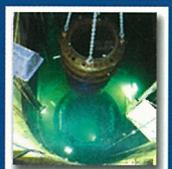
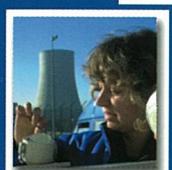


# Kernenergie heute



**Kerntechnische Entwicklung**

# **Kernenergie heute**



KERNENERGIE-AGENTUR  
ORGANISATION FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT UND ENTWICKLUNG

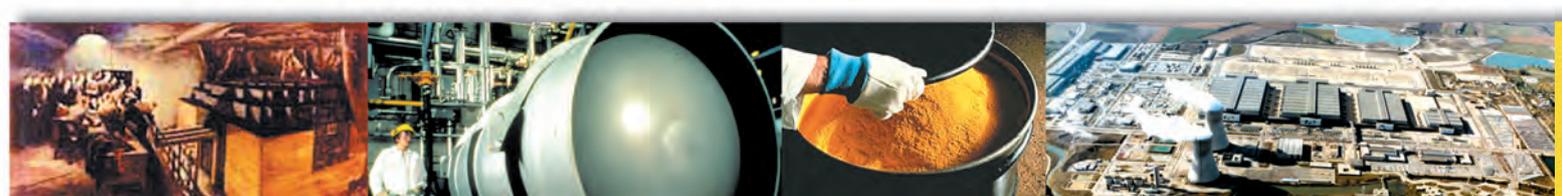


# Vorwort

Alle Prognosen zur Weltenergienachfrage in den nächsten 50 Jahren deuten auf einen erheblichen Anstieg des Energieverbrauchs hin. Ein Großteil der neuen Nachfrage wird von Regionen ausgehen, in denen der Energieverbrauch im Vergleich zu den OECD-Ländern derzeit noch recht niedrig ist, die aber zunehmend in die Weltwirtschaft eingebunden werden. Mit der wachsenden Nachfrage müssen sich alle Länder weltweit der besonderen Herausforderung stellen, die für Wirtschaftswachstum und gesellschaftliche Entwicklung notwendige Energieversorgung bei gleichzeitiger Verbesserung des Umweltschutzes zu gewährleisten.

Den politischen Entscheidungsträgern kommt die Aufgabe zu, eine Energiepolitik zu etablieren, die diesen Herausforderungen gerecht wird und zugleich hinreichend tragfähig ist, um den mit der Globalisierung der Weltwirtschaft verbundenen Risiken zu begegnen. Diversifizierung, Versorgungssicherheit, Umweltschutz und technologische Entwicklung sind entscheidende Bestandteile einer jeden Energiepolitik, die darauf abzielt, die Märkte ausreichend, nachhaltig und zu vernünftigen Preisen mit Energie zu versorgen.

Aus politischer Sicht erscheint keine der verschiedenen Energiequellen, die heute einen wesentlichen Beitrag zur weltweiten Energieversorgung leisten, so komplex wie die Kernenergie. Die wirtschaftlichen, technologischen und sozialen Auswirkungen der Kernkraft



geben allen Entscheidungen in diesem Bereich eine gesellschaftliche Dimension, die weit über die energiewirtschaftlichen Aspekte dieser Technologie hinausreicht. Dazu gehören Fragen zur Sicherheit der kerntechnischen Anlagen, zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle, zum Potenzial der Kernenergie hinsichtlich der Verringerung von Treibhausgasemissionen, zur Wirtschaftlichkeit des gesamten Brennstoffkreislaufs insbesondere auf liberalisierten Strommärkten bis hin zur Frage der Nichtverbreitung von Kernwaffen.

Die OECD Kernenergie-Agentur (Nuclear Energy Agency – NEA) ist seit über vierzig Jahren in vielen dieser Bereiche tätig. Die NEA bringt die weltweit führenden Experten zusammen, um gemeinsam objektive Analysen für die Regierungen der Mitgliedsländer zu erstellen.

Die Arbeit der NEA stützt sich auf wissenschaftliche und technische Analysen der verschiedenen Komponenten des gesamten nuklearen Brennstoffkreislaufs. Diese Analysen sind eine wissenschaftliche und technische Basis, auf der die Mitgliedsländer nach Einbeziehung von gesellschaftlichen Faktoren ihre Nuklear- und Energiepolitik aufbauen können.

In einer kurzen Publikation wie der vorliegenden lassen sich nur sehr schwer alle Aspekte beschreiben, die für eine tragfähige Kernenergiepolitik berücksichtigt werden müssen. Dennoch glaube ich, dass dieser NEA-Bericht die politischen Entscheidungsträger bei der Erfüllung ihrer Aufgaben unterstützen und der breiten Öffentlichkeit die Fakten näher bringen kann, die sich hinter einer der beeindruckendsten Technologien der vergangenen sechzig Jahre verbergen – einer Technologie, die auf den unsichtbaren inneren Kräften beruht, die den Grundbaustein der Materie, das Atom, zusammenhalten.

In dem Maße, wie die Kernenergie beherrscht wird ohne inakzeptable Risiken einzugehen, kann sie einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung unserer Gesellschaft leisten.



Luis E. Echávarri  
Generaldirektor, NEA





# Einführung

Die vorliegende Veröffentlichung ist die deutsche Übersetzung der englischen Publikation "Nuclear Energy Today", die 2003 von der Kernenergie-Agentur veröffentlicht wurde. Sie wurde in einigen grundlegenden Daten (Kapitel 1 und 8) gegenüber dem englischen Original aktualisiert.

"Kernenergie heute" befasst sich mit den wichtigsten gegenwärtigen Fragen zur Kernenergie, und gibt einen zuverlässigen, auf Fakten gestützten Überblick über die Thematik. Die Broschüre wendet sich in erster Linie an politische Entscheidungsträger, dürfte aber auch für interessierte Leser allgemein, für führende Vertreter von Wirtschaft und Politik sowie für Journalisten von Nutzen sein.

Kapitel 1 gibt zunächst einen kurzen Gesamtüberblick. In den weiteren Kapiteln werden dann die grundlegenden Fragen angesprochen, die für die Kernenergie-debatte heute von Bedeutung sind. Kapitel 2 und 3 sollen den Leser mit den wissenschaftlichen und technologischen Grundlagen vertraut machen. In den Kapiteln 4 bis 8 werden Fakten und offene Fragen im Zusammenhang mit der Behandlung radioaktiver Abfälle, der kerntechnischen Sicherheit, dem Strahlenschutz, der Wirtschaftlichkeit sowie dem internationalen Atomrecht und der Nichtverbreitung von Kernwaffen behandelt. Im 9. Kapitel wird die Kernenergie im Kontext der nachhaltigen Entwicklung betrachtet. Das 10. und letzte Kapitel richtet den Blick auf die Zukunft und befasst sich mit dem Potenzial neuer Kernenergie-Technologien.

Alle Informationen in dieser Veröffentlichung sind zwangsläufig kurz gefasst; zu jedem Kapitel gibt es jedoch Hinweise auf weitere Literaturangaben am Ende der Veröffentlichung, die eine eingehendere Auseinandersetzung mit der jeweiligen Thematik erlauben. Wichtige Prinzipien und Begriffe werden im Allgemeinen im Haupttext kurz erläutert; ausführlichere Definitionen sind dem Glossar zu entnehmen. Die im Glossar enthaltenen Begriffe sind im Text jeweils grün gedruckt. Erscheint ein solcher Begriff in einem Kapitel mehrmals, wird er gewöhnlich nur bei der ersten Erwähnung hervorgehoben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>2</b>
<b>Einführung</b>	<b>5</b>
<b>1. Überblick über die Kernenergie heute</b>	<b>9</b>
<b>2. Grundlagen der Kernenergie</b>	<b>13</b>
Kernspaltung	13
Hauptkomponenten von Kernreaktoren	16
Reaktortechnologien	17
Kernfusion	20
<b>3. Nuklearer Brennstoffkreislauf</b>	<b>23</b>
Versorgung	24
Entsorgung	27
Stilllegung	28
<b>4. Entsorgung radioaktiver Abfälle</b>	<b>31</b>
Die verschiedenen Arten radioaktiver Abfälle	31
Grundlagen der Entsorgung	33
Praxis der Entsorgung	34
Geologische Endlagerung langlebiger Abfälle	35
Transport	38
Gesellschaftliche und politische Aspekte	40
<b>5. Reaktorsicherheit</b>	<b>43</b>
Grundlagen der Reaktorsicherheit	43
Betriebserfahrungen	49
Konsequenzen der Markt deregulierung für die Sicherheit	50
Sicherheitsaspekte künftiger Reaktoren	51



<b>6. Strahlenschutz</b>	<b>53</b>
Wissenschaftlicher und medizinischer Hintergrund	53
Das System des Strahlenschutzes und seine rechtlichen Grundlagen	59
Notfallschutzmaßnahmen	61
Beseitigung von Unfallfolgen	62
<b>7. Ökonomische Aspekte der Kernenergie</b>	<b>65</b>
Kosten, Risiken und Haftung	65
Wettbewerbsaspekte	67
<b>8. Internationales Atomrecht und Nichtverbreitung von Kernwaffen</b>	<b>71</b>
Internationales Atomrecht	71
Nichtverbreitung	77
<b>9. Kernenergie und nachhaltige Entwicklung</b>	<b>81</b>
Energiebedarf	81
Kernenergie und nachhaltige Entwicklung	82
<b>10. Zukunft der Kernenergie</b>	<b>89</b>
Möglichkeiten für eine alternative Nutzung der Kernenergie	90
Forschung und Entwicklung	93
<b>Zusammenfassung</b>	<b>99</b>
<b>Glossar</b>	<b>101</b>
<b>Weiterführende Informationen</b>	<b>115</b>
<b>Abbildungen, Tabellen und Bildnachweis</b>	<b>121</b>



# Überblick über die Kernenergie heute

Die Kernenergie hat seit ihren Anfängen kontinuierlich an Bedeutung gewonnen und dabei ihre wachsende Leistungsfähigkeit und Effizienz gezeigt. Sie ist heute eine wichtige Energiequelle, die rd. 16% des weltweiten Strombedarfs liefert.

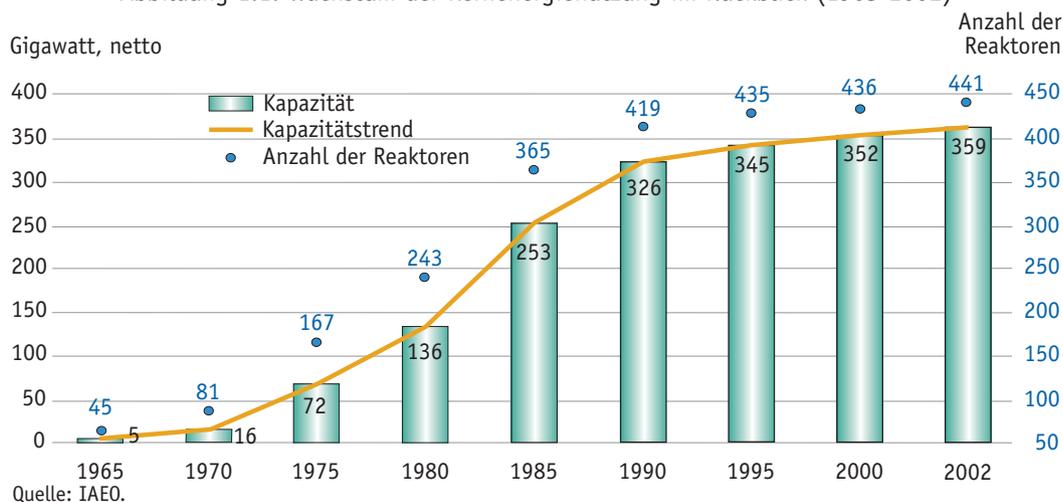


Ausgehend von der Entdeckung des Neutrons durch Sir James Chadwick im Jahr 1932 hat sich die Kernwissenschaft unter dem Druck der Ereignisse des Zweiten Weltkrieges sprunghaft weiterentwickelt. Kurz nach der Entdeckung der Kernspaltung wurde klar, dass bei der Spaltung von Atomkernen Energie freigesetzt wird. Den grundlegenden wissenschaftlichen Erkenntnissen folgten die erste kontrollierte Kettenreaktion (1942), die Entwicklung der ersten Atomwaffe (1945) und die erstmalige Stromerzeugung mit Hilfe von Kernenergie (1951). So entwickelte sich die Kerntechnik innerhalb einer Zeitspanne von nur zwanzig Jahren von den ersten theoretischen Grundlagen bis hin zur technischen Nutzung.

Nach der ersten Anwendung der Kernenergie zur Stromerzeugung in den Vereinigten Staaten begannen auch Grossbritannien (1953), Russland (1954), Frankreich (1956) und Deutschland (1961) mit der friedlichen Nutzung der Kernkraft – also fünf Länder innerhalb des ersten Jahrzehnts. In den

sechziger Jahren begannen zehn weitere Länder die Erzeugung von Strom durch Kernenergie, denen in den siebziger Jahren wiederum zehn weitere Länder folgten. Die Ölkrise Mitte der siebziger Jahre ließ die Zahl der Bauaufträge für Kernkraftwerke und der Neubauten sprunghaft ansteigen. Im weiteren Verlauf der siebziger Jahre dämpfte dann die weltweite Konjunkturlaute zusammen mit dem Preisrückgang für fossile Brennstoffe das Wachstum der Kernenergie. Gleichzeitig stellten zwei Unfälle, der eine in Three Mile Island in den Vereinigten Staaten (1979), der andere in Tschernobyl in der ehemaligen Sowjetunion (1986), in der Öffentlichkeit die Sicherheit der Kernenergie insgesamt in Frage. In der Folge kam es daraufhin in den neunziger Jahren zu einem deutlich langsameren Wachstum der Kernenergie. Einige Länder haben den Reaktorbau dennoch weiter stark vorangetrieben und damit zu einem kleinen weiteren Anstieg der weltweiten Kernenergienutzung beigetragen (vgl. Abb. 1.1).

Abbildung 1.1: Wachstum der Kernenergienutzung im Rückblick (1965-2002)



1932 entdeckt  
Sir James Chadwick  
das Neutron.



Insgesamt haben bisher 32 Länder Strom mit **Kernreaktoren** erzeugt. Das entspricht über 10 000 Reaktor-Betriebsjahren an Erfahrung und einer Nettostromerzeugung am Ende des ersten „nuklearen Jahrhunderts“ von über 40 000 Terawattstunden (TWh). Anfang 2006 existierten weltweit 443 kommerziell betriebene Kernreaktoren (vgl. Tabelle 1.1) mit einer installierten Nettostromerzeugungskapazität von insgesamt rd. 369 Gigawatt (GWe), auf die rd. 7% des gesamten Energie- und rd. 16% des weltweiten Elektrizitätsaufkommens entfielen (vgl. Abb. 1.2 und 1.3). 352 dieser Kernreaktoren mit einer installierten

Tabelle 1.1  
Betriebsbereite Reaktoren je Land  
(Stand 1. Januar 2006)

Land	Anzahl der Reaktoren
Vereinigte Staaten	104
Frankreich	59
Japan	56
Vereinigtes Königreich	23
Russische Föderation	31
Deutschland	17
Korea	20
Kanada	18
Indien	15
Ukraine	15
Übrige Welt	85
Insgesamt	443

Quelle: IAEA.

Abbildung 1.2: Anteile der einzelnen Energieträger an der weltweiten Primärenergieversorgung, Stand 2003 (in Prozent)

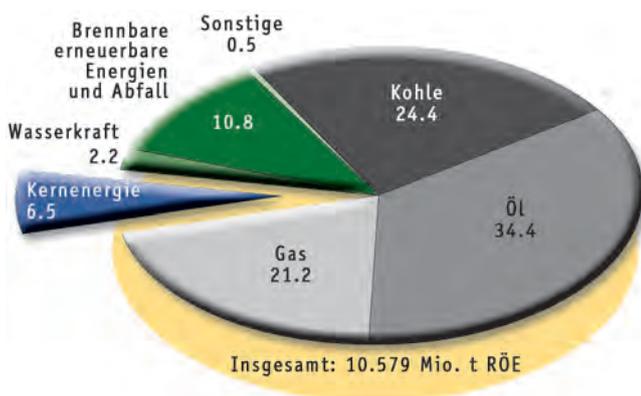
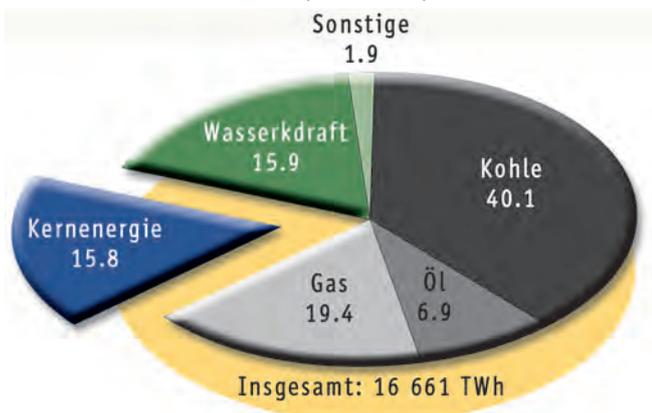


Abbildung 1.3: Weltstromerzeugung, aufgeschlüsselt nach Energieträgern, Stand 2003 (in Prozent)



Quelle: Internationale Energie-Agentur.

Nettleistung von etwa 304 GWe befanden sich im OECD-Raum (in insgesamt 17 Ländern) und lieferten rd. 11% des gesamten Energieaufkommens bzw. rd. 24% des Stromverbrauches dieser Region. Weitere 24 Reaktoren mit einer geplanten zusätzlichen Nettleistung von 19 GWe befanden sich weltweit im Bau.

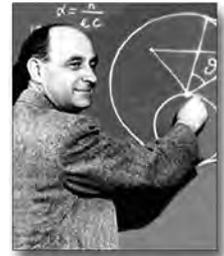
Die Abbildungen 1.2 und 1.3 zeigen die starke Abhängigkeit von fossilen Energieträgern bei der weltweiten Primärenergieversorgung und der Stromerzeugung. Die damit einhergehende Produktion von Treibhausgasen ist einer der Hauptgründe dafür, dass in allen Volkswirtschaften immer mehr Gewicht auf die CO<sub>2</sub>-Minderung gelegt wird. Angesichts einer Konzentration der Öl- und Erdgasquellen auf eine relativ geringe Zahl von Förderländern sind Befürchtungen über die Sicherheit der Energieversorgung derzeit ein weiterer wichtiger Faktor bei nationalen energiepolitischen Überlegungen. Die Tatsachen, dass die Atomenergie keine Treibhausgasemissionen verursacht und dass die Kernbrennstoffressourcen weltweit relativ gleichmäßig verteilt sind, richten die Aufmerksamkeit zunehmend auf die Frage des Potenzials der Kernenergie, den energiepolitischen Zielen einer nachhaltigen Energieversorgung gerecht zu werden.

In den vergangenen zehn Jahren ist die **Verfügbarkeit** der Kernkraftwerke für die Energieproduktion tendenziell gestiegen. Das hat in den

letzten Jahren dazu geführt, dass in vielen Ländern die durch Kernenergie produzierte Strommenge neue Höchststände erreichte (vgl. Abb. 1.4). Zu den Ländern, die 2001 einen neuen Rekord für ihre nukleare Stromerzeugung verzeichneten, zählen Argentinien, Brasilien, Bulgarien, Deutschland, Finnland, Frankreich, Indien, die Republik Korea, Russland, Schweiz, Spanien und die Vereinigten Staaten.

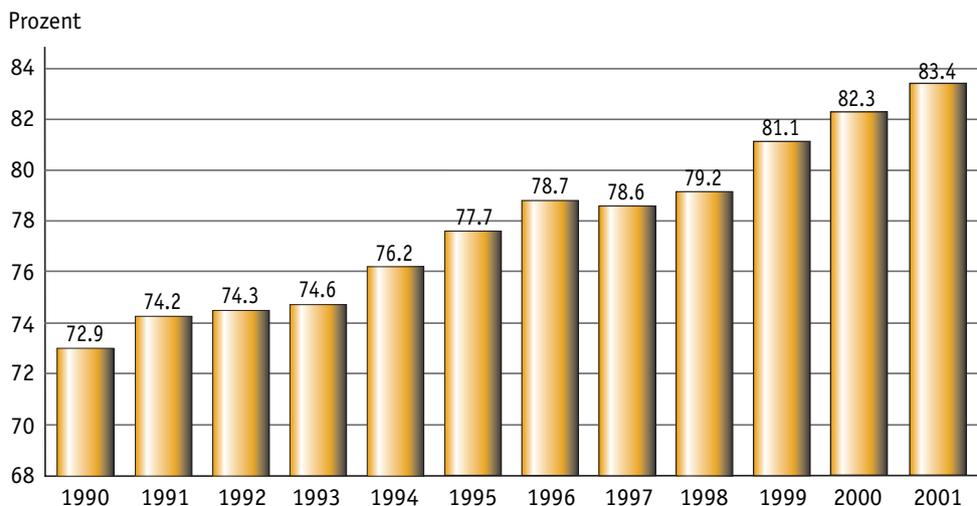
Trotz ihrer technischen Reife, ihrer breiten Nutzung und der stetigen technischen Fortschritte nimmt die Kernenergie im Vergleich zu den anderen Energiequellen eine Sonderstellung ein, sowohl hinsichtlich des Grades der staatlichen Einfluß-

nahme wie auch der in der Öffentlichkeit geäußerten Befürchtungen. Viele Faktoren tragen hierzu bei, so vor allem der militärische Ursprung der Kernenergienutzung und ihre mögliche Verwendung für Waffenzwecke, die technische Komplexität, die langfristigen Auswirkungen der nuklearen Abfälle, die komplizierten Sicherheits-, Rechts- und Versicherungsauflagen, die Konsequenzen potenzieller Unfälle, die gesundheitsschädlichen Effekte ionisierender Strahlen und die hohen Investitionen für den Bau von Kernkraftwerken. Das Verständnis dieser Fragestellung ist wichtig, wenn man sich ein Bild davon machen will, worum es bei der Kernenergie heute geht.



Am 2. Dezember 1942 findet unter Leitung von **Enrico Fermi** in Chicago, USA, die erste erfolgreiche atomare Kettenreaktion statt.

Abbildung 1.4: Verfügbarkeit der Kernenergieanlagen weltweit (1990-2001)



Quelle: IAEA, Power Reactor Information System.

Die **Verfügbarkeit** ist das in Prozent ausgedrückte Verhältnis der realen Stromproduktion zur maximalen Stromproduktion, die ein Kernkraftwerk dem Stromnetz zuführen kann, und dient als Messgröße der Betriebszuverlässigkeit.

### Weiterführende Informationen

Zu folgenden Themen werden im Kapitel „Weiterführende Informationen“ Literaturhinweise gegeben:

- **Anzahl und Typ der Reaktoren weltweit** sowie zugehörige jährliche Leistungsdaten, vgl. 1.1 und 1.2.
- **Schätzungen von Energieangebot und -nachfrage** nach Region und Energieträger, vgl. 1.3, einschließlich kurzfristiger Projektionen, vgl. 1.5.
- **Allgemeine Ausführungen über die Rolle der Kernenergie** im OECD-Raum und damit zusammenhängende Fragen, vgl. 1.5.



# Grundlagen der Kernenergie

*Die Kernspaltung ist eine Kernreaktion, bei der schwere Atomkerne nach der Kollision mit einem Neutron gespalten werden. Bei der Spaltung des Atomkerns wird Energie freigesetzt und größtenteils in Wärme umgewandelt. Eine weitere Wärme produzierende Kernreaktion ist die Fusion, die allerdings bisher noch nicht für die Stromerzeugung eingesetzt wird.*

*Kernreaktoren sind Anlagen, in denen durch kontrollierte Kernspaltung Wärme und Strom erzeugt werden. Es sind viele verschiedene Typen von Reaktoren im kommerziellen Einsatz, die alle mehrere Komponenten gemeinsam haben – Kernbrennstoff, Moderator, Kühlmittel und Steuerstäbe.*

*Derzeit wird in nahezu 80% der Kernreaktoren natürliches Wasser gleichzeitig als Kühlmittel und als Moderator verwendet. Als Haupttypen sind der Druckwasserreaktor (DWR) und der Siedewasserreaktor (SWR) zu nennen. Als Kernbrennstoff dient in erster Linie Uran.*



Ein **Kernreaktor** ist im Wesentlichen eine Anlage zur Erzeugung von Wärme für das Erhitzen von Wasser, wobei der erzeugte Dampf zum Antrieb der Turbinengeneratoren für die Stromproduktion dient. In diesem Kapitel werden die verschiedenen Prozesse erklärt und die zur Energiegewinnung angewandten Techniken erläutert.

Eine Kernreaktion findet statt, wenn der Kern eines Atoms infolge einer Kollision mit anderen physikalischen Teilchen, seien es **Alphateilchen**, **Neutronen**, **Protonen**, andere Atome oder auch **Gammastrahlen**, verändert wird. Von den vielen möglichen Kernreaktionen sind zwei – die **Kernspaltung** und die **Kernfusion** – von besonderem Interesse, da sie eine große Menge Energie produzieren können. Von diesen beiden Reaktionen ist bisher nur die Kernspaltung für die Stromerzeugung eingesetzt worden.

## Kernspaltung

Bestimmte in der Natur vorkommende oder künstlich erzeugte schwere Elemente, wie beispielsweise Uran und Plutonium, sind relativ instabil. Wenn der Kern eines derartigen Elements von

einem Neutron getroffen wird, das er absorbiert, kann er gespalten werden bzw. in zwei Bruchstücke zerfallen, wobei gleichzeitig zwei oder drei Neutronen und Energie freigesetzt werden (Abb. 2.1).

Die Fragmente, die in vielen verschiedenen Kombinationen entstehen können, werden als **Spaltprodukte** bezeichnet. Die Gesamtmasse der Reaktionsprodukte (Spaltprodukte und sekundäre Neutronen) ist etwas geringer als die ursprüngliche Masse des Atomkerns und des auftreffenden Neutrons, wobei der Masseverlust gemäß der berühmten Formel von Einstein  $E = mc^2$  in Energie umgewandelt worden ist.

Abbildung 2.2 gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der **Isotope** einer bestimmten Masse bei einer Kernspaltung gebildet werden, in diesem Fall bei der Spaltung von Uran-235 ( $^{235}\text{U}$ ). Hinsichtlich der Häufigkeit ihres Vorkommen und ihrer **Radioaktivität** sind die wichtigsten Spaltprodukte des Uran-Isotops  $^{235}\text{U}$  radioaktive Formen von Brom (Br), Cäsium (Cs), Iod (I), Krypton (Kr), Strontium (Sr) sowie Xenon (Xe). Wie alle radioaktiven Isotope, so



Lise Meitner (1878-1968) spielte bei der Entdeckung der Kernspaltung eine zentrale Rolle. Die gebürtige Österreicherin führte ihre Forschungsarbeiten über Transurane bei Otto Hahn in Deutschland durch. Als Jüdin zur Flucht vor den Nazis gezwungen, emigrierte Lise Meitner 1938 nach Schweden. Während eines Besuchs bei ihrem Neffen Otto Frisch in Dänemark gelangen ihr und Frisch die Erklärung der Spaltung des Uranatoms. 1939 beschrieben sie ihre Entdeckung in einer bahnbrechenden Veröffentlichung mit dem Titel *Disintegration of Uranium by Neutrons: A New Type of Nuclear Reaction* (Spaltung von Uran durch Neutronen: Eine neue Form der Kernreaktion) und prägten in dieser Veröffentlichung auch den Begriff der Kernspaltung.

zerfallen auch diese in Tochterkerne, jedes in einem unterschiedlichen Zeitraum, der **Halbwertszeit** genannt wird. Die Halbwertszeit ist die Zeit, in der die Hälfte der Kerne eines Radionuklids zerfällt. Diese Spaltprodukte und ihre Zerfallsprodukte stellen einen beachtlichen Anteil der gesamten nuklearen Abfälle (vgl. Kapitel 4).

Die **Spaltprodukte**, die im Spaltprozess freigesetzt werden, kollidieren mit anderen Atomen und verlieren innerhalb eines Millimeters den Großteil ihrer Bewegungsenergie, die in Wärmeenergie umgewandelt wird. Diese Wärme wird dann für die Stromerzeugung verwendet.

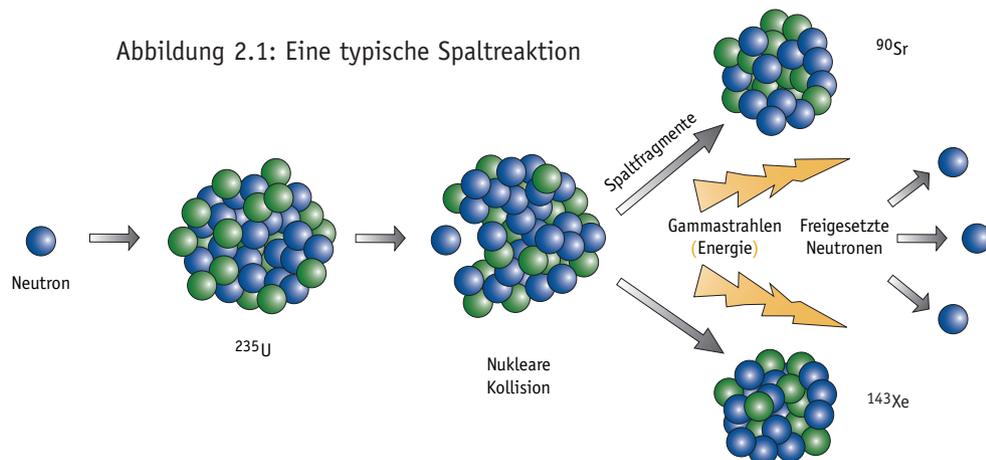
Wenn die **Neutronen**, die ebenfalls während des Spaltprozesses freigesetzt werden, von anderen nahe gelegenen spaltbaren Atomen absorbiert werden, können auch diese Atome gespalten werden und für die Freisetzung von weiteren Neutronen sorgen, so dass es zu einer so genannten Kettenreaktion kommt. Alternativ hierzu können sie von einem Kern abprallen (Streuung), ohne Wechselwirkung nach außen verloren gehen (Verlust) oder einfach von (anderen) Kernen eingefangen werden (Einfang-Reaktion).

Wenn genügend freie Neutronen zur Verfügung stehen, um die Anzahl der durch Verlust und Einfangen verlorenen Neutronen auszugleichen, setzt sich der Spaltprozess von selbst fort und das

System hat die so genannte **Kritikalität** erreicht. Die **kritische Masse** ist die unter bestimmten Bedingungen erforderliche Mindestmenge an spaltbarem Material zur Initiierung einer selbsterhaltenden Kettenreaktion.

Neutronen mit einer relativ geringen kinetischen Energie (weniger als 0,1 **Elektronenvolt** – [eV]) werden als **thermische Neutronen** bezeichnet; für die Spaltung von Uran- oder Plutoniumkernen sind sie am effizientesten. Neutronen mit einer höheren kinetischen Energie, generell bis zu 10 Millionen Elektronenvolt (MeV), werden als **schnelle Neutronen** bezeichnet. Alle bei einer Spaltreaktion erzeugten Neutronen sind schnelle Neutronen. Obwohl schnelle Neutronen bei der Spaltung von Uran weniger effektiv sind, können sie mit einem breiteren Spektrum von Kernen reagieren. Ein **Moderator** dient der Abbremsung der während des Spaltprozesses freigesetzten Neutronen auf effizientere thermische Energien, wie sie in kommerziellen Kernkraftwerken benötigt werden.

Wenn der Kern eines Atoms ein Neutron einfängt und sich nicht spaltet, kann er sich in ein anderes Element umwandeln. In einem **Kernreaktor** führt dies zur Entstehung einer großen Zahl langlebiger radioaktiver Elemente, die in der Natur entweder nicht vorkommen oder sehr selten sind (vgl. Tabelle 2.1).



Alle in Tabelle 2.1 aufgelisteten Elemente sind radioaktiv und einige – insbesondere Plutonium – können selbst als **Kernbrennstoff** verwendet werden. Auf Grund ihrer langen Halbwertszeiten und hohen radiologischen und biologischen Toxizität sind sie eine weitere wichtige Komponente von Nuklearabfällen und der Grund dafür, warum ein Teil dieser Abfälle über sehr lange Zeiträume isoliert werden muss (vgl. Kapitel 4).

Die **Kernspaltung** ist eine Energiequelle mit einer sehr hohen Energiedichte, d.h. Energie bezogen auf die Brennstoffmasse. Im Vergleich zu chemischen Reaktionen, wie beispielsweise der Verbrennung fossiler Brennstoffe, bedürfen Spaltreaktionen für die Erzeugung äquivalenter Energiemengen einer geringeren Menge an Ausgangsstoff. Die bei der Spaltung von einem Kilogramm Uran in einem

Standardreaktor freigesetzte Energie entspricht der Energiemenge, die bei der Verbrennung von rd. 45 000 kg Holz, 22 000 kg Kohle, 15 000 kg Öl oder 14 000 kg flüssigem Erdgas erzeugt wird (vgl. Tabelle 2.2).

Wegen ihrer hohen Energiedichte setzt die Kernenergie im Vergleich zu verbrennungslosen Energiequellen wie Sonne und Wind auch eine sehr viel kleinere Wirtschaftsfläche voraus, um eine äquivalente Strommenge zu erzeugen. Nach dem aktuellen Stand der einschlägigen Technologien und unter Berücksichtigung von Effizienz- und Verfügbarkeitskriterien erzeugt ein Kernkraftwerk mit einer Leistung von 900 **Megawatt** elektrisch (MWe) in einem Jahr genauso viel Strom wie 70 Quadratkilometer Sonnenkollektoren oder einige tausend Windkraftanlagen.

**Spaltstoffe sind Stoffe**, die sich unter dem Einfluss eines thermischen Neutrons spalten. Die in der Praxis wichtigsten Spaltstoffe sind  $^{235}\text{U}$  und  $^{239}\text{Pu}$ .

**Spaltbares Material** ist Material, das gespalten werden kann; es unterscheidet sich generell insofern von Spaltstoffen, als es sich nur unter Beschuss mit einem schnellen Neutron spalten lässt. Ein Beispiel für ein spaltbares Material ist  $^{238}\text{U}$ .

Ein **Brutstoff** ist ein Stoff, der durch den Einfang eines oder mehrerer Neutronen spaltbar wird, möglicherweise gefolgt von einem radioaktiven Zerfall. Wichtige Beispiele sind  $^{238}\text{U}$ , das spaltbar ist, aber auch durch den Einfang von Neutronen in den Spaltstoff  $^{239}\text{Pu}$  umgewandelt werden kann, und  $^{232}\text{Th}$ , das wiederum in den Spaltstoff  $^{233}\text{U}$  umgewandelt werden kann.

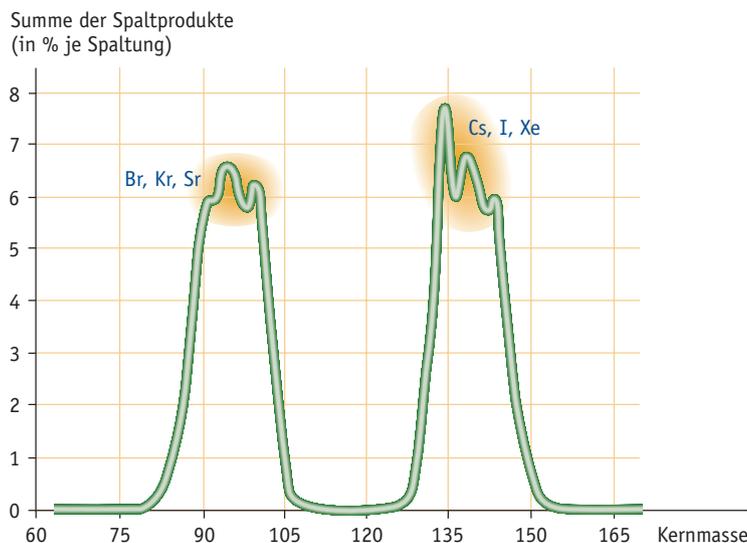
Tabelle 2.1: Wichtige Isotope, die durch Neutroneneinfang in einem Kernreaktor gebildet werden

Element	Ungefähre Halbwertszeit
Neptunium ( $^{237}\text{Np}$ )	2 140 000 Jahre
Plutonium ( $^{239}\text{Pu}$ )	24 000 Jahre
Americium ( $^{243}\text{Am}$ )	7 400 Jahre

Tabelle 2.2  
Energiegehalt verschiedener Brennstoffe

Brennmaterial	Ungefährer Energiegehalt je Tonne (GJ)
Holz	14
Kohle	29
Öl	42
Erdgas (flüssig)	46
Uran (LWR, offener Brennstoffkreislauf)	630 000

Abbildung 2.2: Ausbeute an Spaltprodukten bei der thermischen Spaltung von  $^{235}\text{U}$



## Hauptkomponenten von Kernreaktoren

Die grundlegende Technologie, die zur wirksamen Nutzung der durch **Kernspaltung** erzeugten Energie eingesetzt wird, ist der **Kernreaktor**. Obgleich es viele Typen von Kernreaktoren gibt, haben sie alle die folgenden Komponenten gemeinsam: **Kernbrennstoff**, **Moderator**, **Kühlmittel** sowie **Steuerstäbe** (vgl. Abb. 2.3).

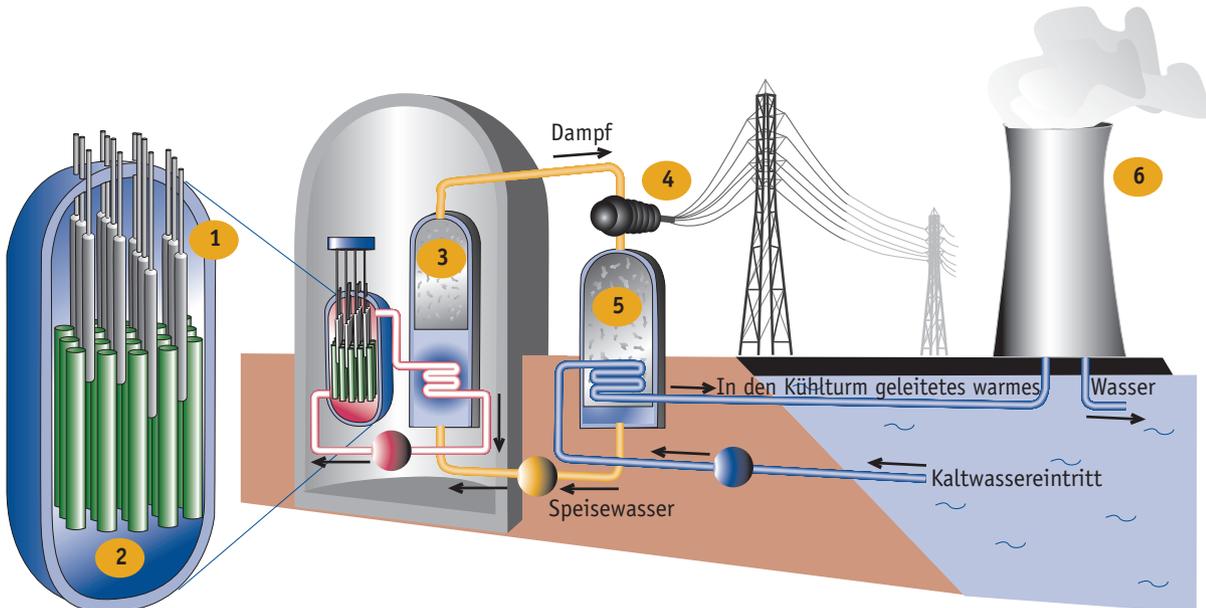
### Kernbrennstoffe

$^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  sind die wichtigsten Uranisotope.  $^{235}\text{U}$  ist das einzige **spaltbare Element**, das in der Natur vorkommt, es lässt sich unter Beschuss mit **thermischen** oder **schnellen Neutronen** leicht spalten. So wird in fast allen Reaktoren Uran als Kernbrennstoff verwendet. Die meisten Kernbrennstoffe für kommerzielle Reaktoren werden so bearbeitet, dass sie eine höhere Konzentration an  $^{235}\text{U}$  enthalten, als in der Natur vorkommt; diese liegt generell

bei 0,711% im Vergleich zu den 2-5%, die für Kerntechniken benötigt werden. Ein derartiger Brennstoff wird als **angereichertes Uran** bezeichnet.

Der übrige Teil des Brennstoffs, generell  $^{238}\text{U}$ , lässt sich nur unter Beschuss von schnellen **Neutronen** mit einer bestimmten Energie spalten; jedoch kann beim Einfang eines Neutrons aus  $^{238}\text{U}$  dann Plutonium-239 ( $^{239}\text{Pu}$ ) entstehen. Dieses Plutoniumisotop (eines von vielen) lässt sich unter der Einwirkung von thermischen oder schnellen Neutronen ebenfalls spalten. In einem **Leichtwasserreaktor** nimmt sein Beitrag zur Stromproduktion allmählich zu, bis er annähernd 30% des erzeugten Stroms erreicht. Einige Reaktoren verwenden einen Brennstoff, der von vornherein Plutonium enthält und **Mischoxid-Brennelement (MOX)** genannt wird. Das ist eine Möglichkeit, Bestände an Plutonium abzubauen, das bei der Wiederaufarbeitung aus abgebrannten Brennelementen gewonnen wurde und ansonsten als Abfall zu behandeln wäre.

Abbildung 2.3: Basiskomponenten eines Kernkraftwerks mit Druckwasserreaktor



Quelle: New Scientist.

- 1 – Reaktor: Der Kernbrennstoff (grün) heizt das Wasser im Druckbehälter auf. Die Steuerstäbe (grau) absorbieren Neutronen zur Steuerung bzw. Beendigung des Spaltprozesses.
- 2 – Kühlmittel und Moderator: Brenn- und Steuerstäbe sind von Wasser umgeben, das als Kühlmittel und Moderator fungiert.
- 3 – Dampferzeuger: Heißes Wasser aus dem Reaktor wird durch einen Dampferzeuger gepumpt, damit Hochdruckdampf entsteht.
- 4 – Turbinengenerator: Der Dampf treibt die Turbine zur Stromerzeugung an.
- 5 – Kondensator: entnimmt Wärme, um Dampf wieder in Wasser umzuwandeln.
- 6 – Kühlturm: führt Wärme ab, damit das Kühlwasser wieder nahezu die Temperatur der Umgebungsluft erhält.

## Moderator

Ein Moderator ist notwendig, um die bei der Spaltung freigesetzten schnellen Neutronen durch Abbremsung in **thermische Neutronen** umzuwandeln, damit sich ihre Spaltungseffizienz erhöht. Der Moderator muss aus einem leichten Stoff bestehen, der eine Abbremsung der Neutronen ohne Einfangen ermöglicht. Gewöhnlich wird natürliches Wasser verwendet; Alternativen sind Graphit – eine Form von Kohle – sowie **schweres Wasser**, das aus dem schwereren **Deuteriumisotop** des Wasserstoffs besteht.

## Kühlmittel

Ein **Kühlmittel** ist zur Abfuhr der bei der Kernspaltung freigesetzten Wärme erforderlich und hält die Brennstofftemperatur innerhalb akzeptabler Grenzen. Das Kühlmittel kann dann die Wärme transportieren, um Turbinen für die Stromerzeugung anzutreiben. Wird Wasser als Kühlmittel verwendet, kann der erzeugte Dampf direkt an die Turbinen geleitet werden. Alternativ hierzu kann das Wasser durch einen Wärmeaustauscher fließen, wo die Wärmeenergie abgegeben und Wasserdampf erzeugt wird. Andere mögliche Kühlmittel sind schweres Wasser, Gase wie Kohlendioxid oder Helium, oder flüssige Metalle wie Natrium, Blei oder Wismut. Ein Kühlmittel kann gleichzeitig auch Moderator sein; in den meisten modernen Reaktoren wird natürliches Wasser für diesen doppelten Zweck verwendet.

## Steuerstäbe

Steuerstäbe bestehen aus Materialien, die Neutronen absorbieren, wie z.B. Bor, Silber, Indium, Cadmium und Hafnium. Sie werden in den Reaktor eingefahren, um die Zahl der Neutronen zu reduzieren und so den Spaltvorgang, wenn erforderlich, zum Stillstand zu bringen bzw. bei Reaktorbetrieb die Energieerzeugung hinsichtlich Höhe und räumlicher Verteilung im Reaktor zu regulieren.

## Sonstige Komponenten

Der Kernbrennstoff bildet zusammen mit seiner mechanischen Struktur, die ihn fest einschließt, den Reaktorkern. In der Regel ist der Reaktorkern von einem Neutronenreflektor umgeben, der dazu dient, eine Höchstmenge an aus dem Reaktor austretenden Neutronen in das Uran zurück zu reflektieren und mithin ihre Nutzung zu optimieren. Der

Reaktorkern und der Reflektor befinden sich oft in einem dicken Stahlgefäß, das als Reaktordruckbehälter bezeichnet wird. Eine Strahlungsabschirmung dient zur Reduzierung der bei der Kernspaltung erzeugten starken **Strahlung** (vgl. Kapitel 6). Zahlreiche Instrumente innerhalb des Reaktorkerns und im Sicherheitsbehälter erlauben die Beobachtung und Kontrolle der Funktionsweise des Reaktors, z.B. anhand von Temperatur, Druck, Strahlung und Energieniveau.

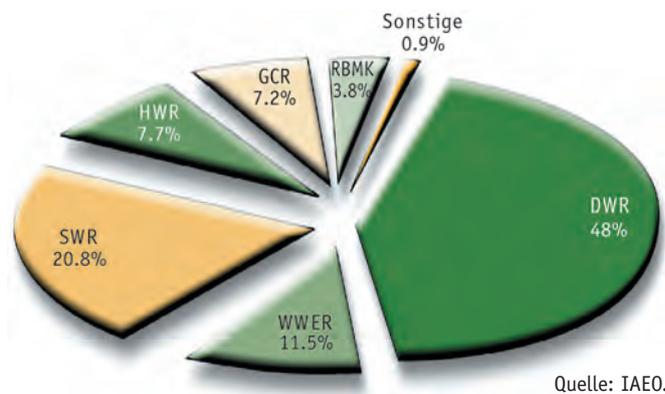
## Reaktortechnologien

Eine geläufige und sinnvolle Methode der Reaktorklassifizierung beruht auf dem verwendeten Kühlmittel. Rund 80% der Anfang 2003 in Betrieb befindlichen Reaktoren werden mit natürlichem Wasser gekühlt und moderiert, und diese Reaktoren sind unter der Bezeichnung **Leichtwasserreaktoren (LWR)** bekannt. Von diesen Leichtwasserreaktoren existieren zwei Haupttypen – **Druckwasserreaktoren (DWR)**, von denen es auch eine russische Variante gibt (WWER), und **Siedewasserreaktoren (SWR)**. In der Mehrzahl der übrigen 20% der Reaktoren erfolgt die Kühlung durch schweres Wasser oder Gas. Abbildung 2.4 zeigt die Verbreitung der wichtigsten Typen kommerzieller Reaktoren weltweit.

Die einzelnen Grundtypen kommerzieller Reaktoren werden weiter unten kurz beschrieben, wobei die Angaben zur Reaktorzahl dem Stand vom 1. Januar 2003 entsprechen.

Innerhalb jedes Grundtyps gibt es wegen der unterschiedlichen nationalen Hersteller- und Kundenanforderungen verschiedene Modelle.

Abbildung 2.4: Reaktortypen im Einsatz weltweit (Stand 1. Januar 2003)



Quelle: IAEA.

## Druckwasserreaktoren (DWR; bzw. WWER (russische Bauart))

Anfang 2003 gab es weltweit 212 **Druckwasserreaktoren**, davon 150 in Frankreich, Japan und den Vereinigten Staaten.

In Druckwasserreaktoren wird natürliches Wasser gleichzeitig als **Kühlmittel** und als **Moderator** verwendet. Das Kühlmittel wird unter hohem Betriebsdruck gehalten (rd. 15,5 MPa bzw. 150 bar), damit es während des Betriebs nicht verdampft. Es ist im Druckkreislauf untergebracht, der hauptsächlich aus dem Reaktordruckgefäß und dem Rohrsystem des Primärwasserkreislaufs besteht. Das Kühlmittel wird mit leistungsstarken Pumpen zirkuliert und gibt seine Wärme in einem Dampferzeuger an den getrennten Sekundärwasser-

kreislauf ab. Der so erzeugte Dampf treibt den Strom produzierenden Turbinengenerator an (vgl. Abb. 2.5).

Bei den WWER-Reaktoren (Abkürzung für Wasser-Wasser Energiereaktor) handelt es sich um in Russland entwickelte Druckwasserreaktoren. Anfang des Jahres 2003 waren insgesamt 51 WWER-Reaktoren in Betrieb, davon 26 in der Russischen Föderation und der Ukraine. Sie werden auch in Armenien, Bulgarien, Finnland, der Slowakischen Republik, der Tschechischen Republik und in Ungarn betrieben. Die Bezeichnung WWER entspricht einer russischen Abkürzung für einen Reaktor, der Wasser als Kühlmittel und Moderator verwendet.

WWER-Reaktoren der ersten Generation (Typ 440/230) bedürfen kostspieliger Nachrüstungen, da ihre ursprüngliche Konstruktion nicht dem heutigen Stand der Reaktorsicherheit entspricht. Infolgedessen wurde beschlossen, einige dieser Reaktoren abzuschalten, so z.B. in Bulgarien und in der Slowakischen Republik.

Abbildung 2.5: Schema eines Druckwasserreaktors (DWR)

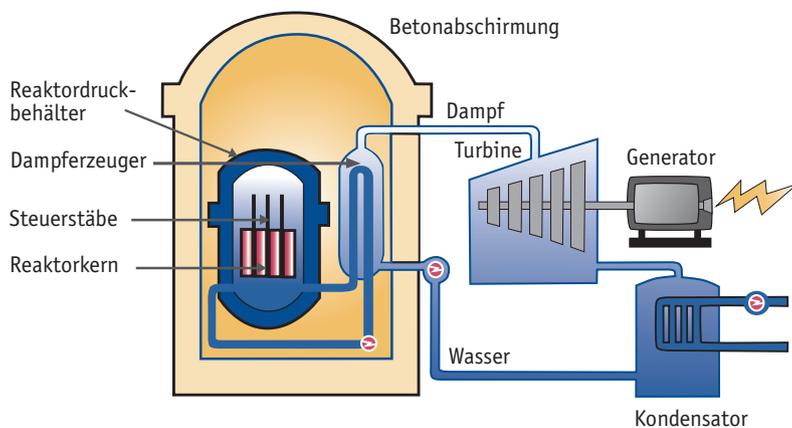
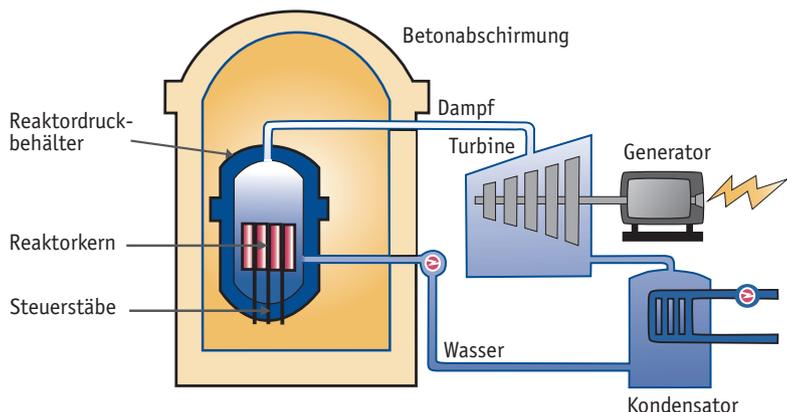


Abbildung 2.6: Schema eines Siedewasserreaktors (SWR)



Quelle: Website des Nuclear Energy Institute.

## Siedewasserreaktoren (SWR)

Insgesamt waren in neun Ländern 92 SWR in Betrieb, davon allein 64 in Japan und den Vereinigten Staaten. In einem SWR wird natürliches Wasser sowohl als Kühlmittel als auch als Moderator verwendet. Das Kühlmittel wird unter niedrigerem Druck gehalten als im Druckwasserreaktor (bei rd. 7 MPa oder 70 bar), weshalb das Kühlmittel in der heißesten Zone des Reaktors (in der Spaltzone) siedet. Der resultierende Dampf wird direkt an die angeschlossene Turbine geleitet, die mit einem Stromgenerator gekoppelt ist (vgl. Abb. 2.6). Die Konzeption ohne Dampferzeuger vereinfacht die Konstruktion gegenüber der eines DWR; jedoch wird die den Generator antreibende Turbine radioaktiv kontaminiert.

## Schwerwasserreaktoren (HWR)

Vierunddreißig HWR waren weltweit in sechs Ländern in Betrieb, davon 14 in ihrem Ursprungsland Kanada und die übrigen in Argentinien, Indien, Korea, Pakistan und Rumänien. Bekannt unter der Bezeichnung **CANDU-Reaktoren** (Abkürzung für Canadian Deuterium Uranium) werden sie mit **schwerem Wasser** ( $D_2O$ ; Wasser, das das schwerere Deuteriumisotop enthält) betrieben, das gleichzeitig **Kühlmittel** und **Moderator** ist.

**Schweres Wasser** ermöglicht den Einsatz von **Natururan** als Brennstoff, ohne Notwendigkeit der Urananreicherung und der damit verbundenen Kosten. Jedoch setzt die Produktion von schwerem Wasser eine spezifische Anlage voraus, in der  $D_2O$  von natürlichem Wasser getrennt wird. Die  $D_2O$ -Konzentration wird in diesen Anlagen von ihrem natürlichen Wert von weniger als 0,1% auf die im CANDU-Reaktor verwendete Konzentration von 99% erhöht. Wie beim Druckwasserreaktor wird das Kühlmittel durch einen Dampferzeuger geleitet, um in einem getrennten Kreislauf natürliches Wasser zum Sieden zu bringen. Ein Vorteil des CANDU-Konzepts besteht darin, dass der Brennelementwechsel während des Betriebs stattfinden kann, während die DWR- und SWR-Reaktoren bei einem Brennelementwechsel abgeschaltet werden müssen. Diese Eigenschaften ermöglichen eine hohe Verfügbarkeit, erhöhen gleichzeitig aber auch die Komplexität des Betriebs.

### Gasgekühlte Reaktoren

Nur im Vereinigten Königreich werden (33) gasgekühlte Reaktoren kommerziell betrieben. Es gibt zwei Typen, den Magnox (bezeichnet nach der Magnesiumlegierung, die als Brennelementhülle verwendet wird) und den fortgeschrittenen gasgekühlten Reaktor (AGR). Beide verwenden Kohlendioxid als Kühlmittel und Graphit als Moderator. Im Magnox-Reaktor wird Natururan und im AGR **angereichertes Uran** als **Kernbrennstoff** eingesetzt. Wie bei CANDU-Reaktoren kann der Brennelementwechsel bei diesen Reaktoren während des Betriebs stattfinden.

### RBMK (Siedewasser-Druckröhrenreaktor)

Siebzehn RBMK sind heute noch in Betrieb, davon 15 in der Russischen Föderation und zwei in Litauen. Die Bezeichnung ist eine russische Abkürzung für einen **Siedewasserreaktor** großer Leistung.

Natürliches Wasser wird als Kühlmittel und Graphit als Moderator verwendet. Wie beim Siedewasserreaktor beginnt das Kühlmittel zu sieden, wenn es den Reaktorkern passiert, und der entstehende Dampf wird direkt in die Turbinengeneratoren geleitet.

RBMK-Reaktoren, eine sehr frühe Konstruktion, wurden häufig gebaut. Einige RBMK-Reaktoren werden derzeit auch ohne die andernorts vorge-

schriebenen Sicherheitseinrichtungen und -merkmale betrieben. Der Unfall von Tschernobyl (Ukraine) im Jahr 1986 ereignete sich in einem Reaktor dieses Typs.

Für Reaktoren dieses Typs gibt es spezifische Sicherheitsbedenken, da sie aus Kostengründen nicht an die heutigen Sicherheitsanforderungen angepasst werden können.

### Schnelle Brutreaktoren

Bei den oben beschriebenen Reaktortypen handelt es sich um thermische Reaktoren, da die **Kernspaltung** größtenteils durch **thermische Neutronen** ausgelöst wird. Schnelle Reaktoren sind so konzipiert, dass sie schnellere Neutronen mit sehr viel höherer kinetischer Energie nutzen. Im Wesentlichen erzeugen schnelle Reaktoren mehr Neutronen je Spaltung als thermische Reaktoren. Diese Überschussneutronen können für die Umwandlung von **Brutstoffen**, wie beispielsweise  $^{238}U$  und  $^{232}Th$ , in **spaltbares Material** durch Neutroneneinfang eingesetzt werden. Dieser neu geschaffene Spaltstoff kann wiederum den Reaktor mit Brennstoff versorgen. Es ist möglich, **Brutreaktoren** zu konzipieren, die mehr Kernbrennstoff produzieren als sie verbrauchen. Brutreaktoren sind generell schnelle Reaktoren, obgleich es auch Modelle gibt, die thermische Neutronen verwenden könnten. Reaktoren des Typs „Schneller Brüter“ wandeln nicht spaltbare **Isotope** in Brennstoff um, so dass die Effizienz der Brennstoffnutzung durch Wiederaufarbeitung erhöht werden kann. Sie können potenziell die nuklearen Brennstoffressourcen weltweit bis um das fünfzigfache erhöhen und sind daher ein Schlüsselfaktor für die Nachhaltigkeit der Kernenergie auf sehr lange Sicht. Brutreaktoren sind in einer Reihe von Ländern gebaut und in Betrieb genommen worden; sie waren 2002 aber nur in Frankreich, Indien, Japan und der Russischen Föderation in Betrieb.

### Lebensdauer der Reaktoren

Einige Reaktoren der ersten Generation, wie beispielsweise die Magnox-Reaktoren im Vereinigten Königreich, sind noch immer in Betrieb, obwohl sie sich nach 35 oder mehr Jahren des Einsatzes dem Ende ihrer Laufzeit nähern. Viele der heute betriebenen Reaktoren wurden in den siebziger und achtziger Jahren gebaut und werden ab 2015 eine Laufzeit von 40 Jahren erreichen. In Studien,

Ein **Brutreaktor** ist ein Reaktor, der genauso viel oder mehr Kernbrennstoff erzeugt, als er verbraucht.

Die **Nennleistung eines Reaktors** kann entweder in thermischer oder elektrischer Leistung angegeben werden. Die thermische Leistung eines Reaktors entspricht der Menge an Wärme, die je Zeiteinheit erzeugt wird; sie wird generell in Megawatt thermisch oder  $MW_{th}$  angegeben. Die elektrische Leistung eines Reaktors wird in den meisten Fällen in Megawatt elektrisch ( $MW_e$ ) angegeben. Da die Effizienz der Umwandlung von Wärmeenergie in Strom in Leichtwasserreaktoren bei rd. 33% liegt, hätte ein Kernkraftwerk mit einer thermischen Leistungsfähigkeit von  $3\,300\,MW_{th}$  eine elektrische Leistung von  $1\,000\,MW_e$ . Eine dritte Möglichkeit, die Leistung eines Reaktors auszudrücken, ist die Leistung in Megawatt<sub>netto</sub>, d.h. ohne die Strommenge, die am Standort verbraucht und nicht am offenen Markt verkauft wurde. Letztere entspricht generell einem kleinen Prozentsatz der gesamten Stromproduktion. Beispielsweise weist der jüngste französische Leichtwasserreaktor in Civaux eine elektrische Leistung von  $1\,516\,MW_e$  und eine Nettoleistung von  $1\,450\,MW_{netto}$  auf.

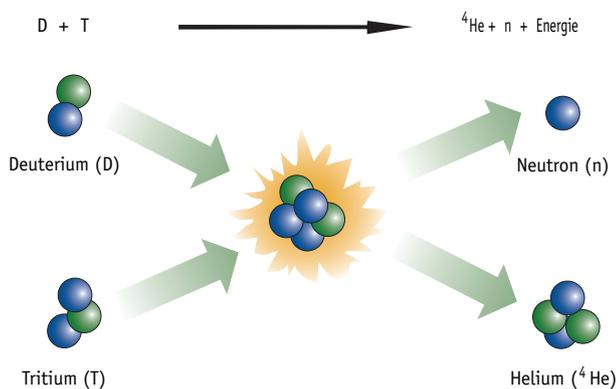
die die Betriebserfahrungen und die Erfahrungen mit dem verwendeten Material analysierten, wurden jedoch keine größeren technologischen Probleme festgestellt, die einer längeren Betriebsdauer für viele Reaktoren, insbesondere für **Druckwasser-** und **Siedewasserreaktoren**, entgegenstehen könnten. Eine sorgfältige Kontrolle der Reaktorleistung, Analysen der während des Betriebs gesammelten Erfahrungen, Modernisierungsprogramme und Nachrüstungen bieten günstige Aussichten für eine Laufzeitverlängerung vieler Kernkraftwerke. Im Januar 2003 beispielsweise hat die nationale Atomsicherheitsbehörde der Vereinigten Staaten für zehn Atomkraftwerke eine Verlängerung der Betriebsdauer auf 60 Jahre genehmigt, d.h. 20 Jahre über die in der Betriebslizenz ursprünglich vorgesehene Dauer hinaus. Andere Länder, wie die Russische Föderation, planen derzeit ebenfalls, die Laufzeit existierender Reaktoren zu verlängern. In vielen Ländern werden Entscheidungen über die Betriebsdauer von Kernkraftwerken im Rahmen der regelmäßigen Erneuerung der Betriebsgenehmigungen getroffen, die gemäß dem neuesten Stand der Technik Informations- und Sicherheitsauflagen sowie umfassende Sicherheitsanalysen vorsehen.

## Kernfusion

Während die **Kernspaltung** aus der Spaltung eines schweren Atomkerns und einer sich anschließenden Freisetzung von Energie besteht, handelt es sich bei der **Kernfusion** um einen Prozess, in dem leichte Atomkerne unter Freisetzung von Energie zu einem schwereren Atomkern verschmelzen. Dieser Prozess findet im Universum kontinuierlich statt. Im Inneren der Sonne wird Wasserstoff bei Temperaturen von 10-15 Mio. °C in Helium umgewandelt und jene Energie erzeugt, die das Leben auf der Erde ermöglicht.

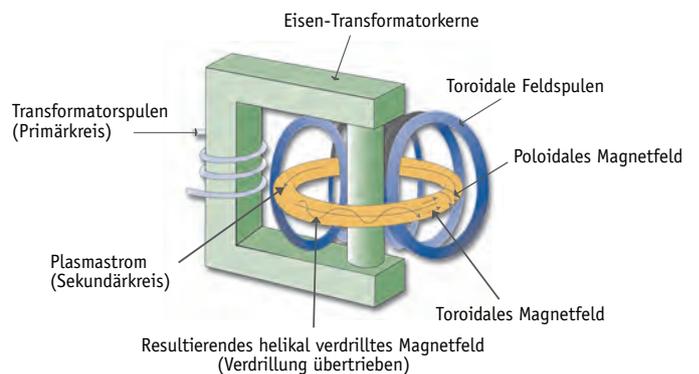
Möglichkeiten zur kommerziellen Energiegewinnung durch Fusion werden seit Jahrzehnten erforscht. Eine der untersuchten möglichen Fusionsreaktionen (die D-T-[**Deuterium-Tritium**]-Fusionsreaktion) wird in Abbildung 2.7 veranschaulicht. Die Kerne von zwei Wasserstoffisotopen, d.h. einem **Deuteriumisotop**, das ein **Neutron** und ein **Proton** enthält, sowie einem **Tritiumisotop**, das zwei Neutronen und ein Proton besitzt, verschmelzen und bilden Helium und ein Neutron, wobei im Fusionsprozess Energie freigesetzt wird.

Abbildung 2.7:  
Typische Fusionsreaktion



Quelle: Europäische Fusionsanlage (JET).

Abbildung 2.8:  
Vereinfachtes Diagramm eines Tokamak-Fusionsreaktors



Quelle: Europäische Fusionsanlage (JET).

Bei den extrem hohen Temperaturen, die für Fusionsreaktionen notwendig sind, geht der **Kernbrennstoff** vom gasförmigen Zustand in ein **Plasma** über, ein Zustand, in dem alle Elektronen von den Atomen losgelöst sind und nur die Kerne übrig bleiben. Erforschung und Beherrschung des Plasmas sind eine große Herausforderung für die Entwicklung der Fusionsenergie.

Der Aufbau eines Kernfusionsreaktors wäre sehr verschieden von dem eines Kernspaltungsreaktors. Das Hauptproblem ist der Einschluss des Plasma-brennstoffs, der auf sehr hohem Temperaturniveau gehalten werden muss, um den Fusionsprozess auszulösen und aufrechtzuerhalten. Die Forschung hat sich bisher auf zwei verschiedene Einschluss-techniken konzentriert – den Magnet- und den Trägheitseinschluss. Im ersten Fall wird das Plasma durch Magnetfelder in einen „Schlauch“ oder einem **Torus** eingeschlossen. Im zweiten Fall verhindert, bei höchster Kompression, die Trägheit des Brennstoffs selbst das Entweichen des Plasmas.

In beiden Fällen darf das Plasma nicht mit der Oberfläche des umschließenden Materials in Berührung kommen, um eine Abkühlung des Plasmas und eine Kontaminierung durch Verunreinigungen auf der Oberfläche zu vermeiden. Eine der vielversprechendsten Methoden zur Erreichung dieses Ziels ist ein toroidaler (ringförmiger) magnetischer Einschluss des Plasmas, unter denen die Tokamak-Konfiguration heute bevorzugt wird (vgl. Abb. 2.8).

Wenn sie einmal anwendungsreif werden, könnten Fusionsreaktoren einige vorteilhafte Merkmale aufweisen. Sie würden z.B.

- auf eine mehr oder minder unbegrenzte Versorgung mit Brennstoff zurückgreifen können (Wasserstoff, verfügbar aus Wasser, und Tritium, das aus dem reichlich vorhandenen Lithium erzeugt wird);
- grundsätzlich sehr sicher sein (da eine Freisetzung des Plasmas den Fusionsprozess sofort stoppen würde);
- nur geringe Mengen an langlebigem hochaktivem Abfall erzeugen (obwohl andere Formen radioaktiven Abfalls produziert würden, wobei Tritium das größte Problem darstellt);
- nicht dazu verwendet werden können, **spaltbares Material** zu produzieren, das zur Herstellung von Kernwaffen geeignet wäre.

Weltweit werden Experimente zur Fusion durchgeführt und es existieren entsprechende Versuchseinrichtungen. Obwohl erhebliche Fortschritte erzielt worden sind, bedarf es wohl noch vieler weiterer Jahre der Forschung, bevor ein einsatzfähiger Reaktor gebaut werden kann. Zu den bereits existierenden Großanlagen der Fusionsforschung zählt die Europäische Fusionsanlage JET (Joint European Torus) der Europäischen Union in Großbritannien, das Princeton Plasma Physics Laboratory (Vereinigte Staaten) sowie der JT-60U Tokamak im Japanischen Forschungsinstitut für Kernenergie. China, die Europäische Union, Japan, Kanada, Russland und die Vereinigten Staaten arbeiten gemeinsam am Aufbau eines Experimentalreaktors der nächsten Generation, dem Internationalen Thermonuklearen Versuchsreaktor (ITER).

**Zehn Gramm Deuterium, die sich aus 500 Liter natürlichem Wasser extrahieren lassen, und 15 Gramm Tritium, das wiederum aus nur 30 Gramm Lithium – ein in der Natur in großen Mengen vorkommendes Element – produziert wird, würden hinreichend Energie erzeugen, um den lebenslangen Strombedarf einer Durchschnittsperson in einem Industrieland zu decken.**

### Weiterführende Informationen

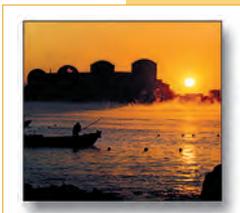
Vergleiche die Literaturhinweise im Kapitel „Weiterführende Informationen“ wegen eingehenderer Informationen über:

- **Graphische Darstellung und Aufbereitung grundlegender Daten zur Kernenergie**, darunter Daten für Spaltreaktionen, zu Halbwertszeiten von Radionukliden und zur Ausbeute an Spaltprodukten, vgl. 2.1;
- Daten zu **Anzahl und Typ der weltweit existierenden Reaktoren** zusammen mit diesbezüglichen jährlich aktualisierten Informationen, vgl. 1.1, 1.2 und 1.3;
- **Grundlagen der Kernspaltung und die verschiedenen Arten von Kernreaktoren**, vgl. 2.2 bis 2.4;
- **Kernfusion und ITER**, vgl. 2.5.



# Nuklearer Brennstoffkreislauf

Als Kernbrennstoffkreislauf werden die Arbeitsschritte und Prozesse bezeichnet, die der Fertigung von Kernbrennstoffen und deren Entsorgung nach ihrer Verwendung im Reaktor dienen. Der Kernbrennstoffkreislauf beginnt mit dem Abbau von Uran. Ein offener Brennstoffkreislauf ist die Regel; in mehreren Ländern werden abgebrannte Brennelemente aber auch wieder aufgearbeitet, vor allem um den Kernbrennstoff besser auszunutzen und die langfristige Radiotoxizität des Abfalls zu reduzieren.



Als Kernbrennstoffkreislauf werden die Arbeitsschritte und Prozesse bezeichnet, die der Fertigung des Kernbrennstoffs und seiner Behandlung, bzw. Entsorgung nach dem Einsatz im Reaktor, dienen. Dementsprechend gibt es eine Versorgungs- und eine Entsorgungsseite des Brennstoffkreislaufs. Die Energieerzeugung im Reaktor selbst wird hier nicht als Teil des Zyklus betrachtet.

Es gibt zwei Grundtypen des Brennstoffkreislaufs – den offenen und den geschlossenen –,

wobei der Unterschied in der Behandlung der abgebrannten Brennelemente besteht. Die wichtigsten Prozesse im Zyklus sind in Abbildung 3.1 zusammengefasst. Im offenen Kernbrennstoffkreislauf wird der dem Reaktor entnommene Kernbrennstoff nach seiner Zwischenlagerung endgelagert. Im geschlossenen Kernbrennstoffkreislauf, der auch als „Brennstoffkreislauf mit Wiederaufarbeitung“ bezeichnet wird, kann das nicht verwertete spaltbare Material zurückgewonnen und zur Herstellung von neuem Brennstoff verwendet werden.

Abbildung 3.1: Der nukleare Brennstoffkreislauf





Uran wird größtenteils unter Einsatz konventioneller Bergbautechniken gewonnen.

## Versorgung

### Uranabbau und -gewinnung

Der Abbau von Uranerzen ähnelt der Förderung anderer Mineralien, wie z.B. Kupfer. Über 70% der **Urangewinnung** erfolgt durch bergmännische Erzförderung im Tage- oder Untertagebau. Der übrige Teil wird hauptsächlich durch in situ-Laugung (ISL – in situ Leaching) gewonnen, eine Verfahrenstechnik, bei der über einen Injektionsbrunnen unterirdisch ein Lösungsmittel in die Uranlagerstätte eingegeben wird; das Uran löst sich in diesem Mittel und wird sodann aus Förderbrunnen gepumpt.

Im weiteren Verlauf der Urangewinnung wird das geförderte Uranerz durch physikalische Verfahren zerkleinert und chemisch behandelt, um das Uran herauszulösen und zu reinigen. In diesem Prozess wird auch das Volumen des Materials für den Transport zur nächsten Etappe des Brennstoffzyklus reduziert. Wegen seiner Farbe und Konsistenz wird das feste Produkt der Urangewinnung ( $U_3O_8$ ) „Yellowcake“ genannt.



„Yellowcake“-Uran.

Anfang 2001 wurde in insgesamt 21 Ländern Uran gefördert, von denen 10 (Australien, Kanada, Kasachstan, Namibia, Niger, die Russische Föderation, Südafrika, die Ukraine, Usbekistan und die Vereinigten Staaten) 90% der weltweiten Produktion lieferten. Marktbeherrschende Erzeuger sind Australien und Kanada, die im Jahr 2000 zusammen über 50% der weltweiten Fördermenge auf sich vereinten.

Bei der Förderung und Gewinnung von Uranerz fallen Abfälle unterschiedlicher Art an, die in geeigneter Weise entsorgt werden müssen. Bei der Uranerzförderung im Tage- oder Untertagebau sind dies im Wesentlichen Gesteinsstaub und/oder Abfallgestein (**Abraum**); es kann sich aber auch um Uranerze handeln, deren Urangehalt unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht ausreicht oder die übermäßig verunreinigt sind. Bei der Gewinnung fällt das größte Abfallvolumen in Form von „**tailings**“ an, der sich als eine Mischung aus fein gemahlenem Gestein und Prozessflüssigkeit darstellt. Die Abfälle bereiten auf Grund ihrer großen Menge sowie ihrer radiologischen und teilweise ihrer chemischen Eigenschaften besondere Probleme. Beim ISL-Verfahren werden weder Abfallgestein noch Abraum produziert, doch bietet sich dieses Verfahren nur unter spezifischen geologischen Bedingungen an, und bei der Anwendung muss zudem gewährleistet werden, dass das Grundwasser vor Kontamination geschützt bleibt.



Ein  $UF_6$ -Zylinder.

Tabelle 3.1  
Wichtige Uran-Konversionsanlagen weltweit

Land	Standort(e)
Kanada	Blind River und Port Hope, Ontario
Frankreich	Malvési; Pierrelatte
Russische Föderation	Angarsk; Jekaterinburg
Vereinigtes Königreich	Springfields, Lancashire
Vereinigte Staaten	Metropolis, Illinois

Die zur Herstellung einer Tonne Produktmaterials, sei es Kupfer oder Uran, notwendige Menge an Erz bei Gewinnung im Tage- oder Untertagebau hängt vor allem vom durchschnittlichen Erzgehalt ab und kann von 10 bis zu 1 000 Tonnen reichen (bei einem durchschnittlichen Erzgehalt von 0,1-10%). Bei der Erzgewinnung entsteht also ein großes Abfallvolumen. So produzierte beispielsweise das Uranbergwerk Shirley Basin in den Vereinigten Staaten während seiner gesamten Betriebszeit 9 460 Tonnen Uranerz mit einem durchschnittlichen Urangehalt von 0,145%. Das ergab 7,1 Millionen Tonnen von Abraum auf einer Fläche von 106 ha.

Uranförderung und -gewinnung sind ausgereifte Industriezweige, die im internationalen Wettbewerb stehen.

### Konversion

Die **Konversion** ist der chemische Prozess, mit dem der „Yellowcake“ in Uranhexafluorid ( $UF_6$ ) umgewandelt wird. Er wird weltweit nur an einigen wenigen Standorten durchgeführt, die größtenteils in den OECD-Ländern liegen (vgl. Tabelle 3.1). Uranhexafluorid ist bei Zimmertemperatur fest, geht aber bereits bei Temperaturen unter  $100^\circ C$  in den gasförmigen Zustand über und ist in dieser Form auch sehr gut für den **Anreicherungsprozess** geeignet. Es wird standardmäßig in großen zylindrischen Stahlbehältern mit einem Durchmesser von 122 cm und einer Speicherkapazität von rd. 12 000 kg gelagert und transportiert. In diesem Stadium besitzt das Uran noch immer die gleiche Isotopen-Zusammensetzung wie das **Natururan**.

### Anreicherung

Bei der Urananreicherung wird das Uran in seine beiden Hauptisotope  $^{235}U$  und  $^{238}U$  zerlegt, wobei zwei Materialströme entstehen, ein **angereicherter** Strom mit einem höheren  $^{235}U$ -Gehalt als im Natururan (0,711%) und ein zweiter Strom mit entsprechend **abgereicherter** Uran. In den meisten kommerziellen Reaktoren wird Uran mit einem  $^{235}U$ -Gehalt von weniger als 5% benötigt. In einigen Forschungsreaktoren wird **hoch angereichertes Uran** verwendet, d.h. mit einem  $^{235}U$ -Gehalt von über 20%; jedoch werden die meisten dieser Forschungsreaktoren auf den Einsatz von **niedrig angereichertem Uran** umgestellt.

Zwei Anreicherungsverfahren sind im kommerziellen Einsatz: Das Gasdiffusionsverfahren und das Zentrifugen-Trennverfahren, die beide  $UF_6$  verarbeiten. In den frühen Anlagen wurde trotz des hohen



Urananreicherungsanlage in Tricastin, Frankreich. Diese Anreicherungsanlage allein ist groß genug, um mehr als den Bedarf aller Kernkraftwerke in Frankreich zu decken.



Zentrifugenkaskaden in Rokkasho-mura, Japan.

Tabelle 3.2: Wichtige Urananreicherungsanlagen weltweit

Land	Standort(e)	Technologie
China	Lanzhou	Zentrifuge <sup>1</sup>
	Shaanxi	Zentrifuge
Frankreich	Tricastin	Gasdiffusion
Deutschland	Gronau	Zentrifuge
Japan	Rokkasho-mura	Zentrifuge
Niederlande	Almelo	Zentrifuge
Russland	Angarsk	Zentrifuge
	Jekaterinburg	Zentrifuge
	Krasnojarsk	Zentrifuge
	Seversk	Zentrifuge
Vereinigtes Königreich	Capenhurst	Zentrifuge
Vereinigte Staaten	Paducah	Gasdiffusion

1. Im Bau.



Typische Brennstoff-Tablette.



Typisches SWR-Brennelement: Etwa 4 m lang und auf jeder Seite rd. 15 cm breit; es wiegt ungefähr 300 kg.

Stromverbrauchs und der sehr großen Anlagen dimension die Gasdiffusionstechnologie verwendet. Beide Faktoren sind für die nur geringe Anzahl dieser Anlagen weltweit verantwortlich (vgl. Tab. 3.2). Beispielsweise wird die Gasdiffusionsanlage in Tricastin, Frankreich, von vier Kernkraftwerken versorgt. In jüngerer Zeit sind in den Bereichen Werkstofftechnologie und Fabrikationsmethoden Fortschritte erzielt worden, die zu einem verstärkten Einsatz des Zentrifugen-Trennverfahrens geführt haben, das vor allem wegen des geringeren Stromverbrauchs die Anreicherungskosten um einen Faktor 50 reduziert.

Im Anreicherungsprozess wird auch **abgereichertes Uran** produziert, von dem Ende 1999 Schätzungen zufolge ein Bestand von über 1,2 Millionen Tonnen existierte, die hauptsächlich aus dem Gasdiffusionsprozess stammen. Das abgereicherte Uran aus dem Gasdiffusionsverfahren enthält oft wiedergewinnungsfähiges  $^{235}\text{U}$ , gewöhnlich mit einem  $^{235}\text{U}$ -Gehalt von 0,3% (gegenüber den ursprünglichen 0,711% im Natururan).

Die einzelnen Länder haben unterschiedliche Strategien für den Umgang mit diesen Stoffen. In der Regel wird das abgereicherte Uran als  $\text{UF}_6$  in großen Stahlbehältern gelagert, so in den Vereinigten Staaten und in Russland. In dieser Form kann es eine potenzielle chemische Gefahr darstellen, wenn die Stahlbehälter undicht werden. Andere Länder, wie beispielsweise Frankreich, wandeln ihre

Typisches Lagerbecken für abgebrannte Brennelemente.



$\text{UF}_6$ -Bestände in ein stabiles Oxid für die Langzeitlagerung und die mögliche Wiederverwertung als **Kernbrennstoff** in Schnellen **Brutreaktoren** um. Je nach wirtschaftlicher Lage und verfügbarer Anreicherungskapazität im Zentrifugen-Trennverfahren reichern einige Länder, darunter Russland, den Brennstoff erneut an, um das weiter verwertbare  $^{235}\text{U}$  zurückzugewinnen.

Die **Anreicherung** ist heute eine ausgereifte Dienstleistungsindustrie, die in internationalen wettbewerblichen Märkten agiert.

### Brennelementherstellung

In den meisten Reaktoren kommt das Uran in der Form von Urandioxid als Brennstoff zum Einsatz. Bei der Herstellung der Brennelemente wird  $\text{UF}_6$  zu Urandioxid-Pulver ( $\text{UO}_2$ ) umgewandelt, das dann bei hohen Temperaturen (von bis zu  $1\,400^\circ\text{C}$ ) zu würfelförmigen  $\text{UO}_2$ -Tabletten (pellets) gesintert wird. Diese werden in Metallrohre gefüllt (Brennstäbe), die dann zu einem Bündel zusammengefasst ein Brennelement bilden. Das verwendete Metall ist hoch korrosionsresistent; es handelt sich generell um Edelstahl oder eine Zirkoniumlegierung. Ein typischer SWR-Reaktor enthält über 730 Brennelemente mit rd. 46 000 Brennstäben.

Weniger als 10% der weltweit in Betrieb befindlichen Reaktoren verfügen über eine Genehmigung zum Einsatz von **Mischoxid-Brennstoff (MOX)** – einer Mischung aus Urandioxid und Plutoniumdioxid. Das Plutoniumdioxid stammt

Trockenlagerung von abgebrannten Brennelementen.



größtenteils aus der kommerziellen **Wiederaufarbeitung** von abgebrannten Brennelementen, obwohl Russland und die Vereinigten Staaten derzeit planen, auch Plutonium aus abgerüsteten nuklearen Gefechtsköpfen zu verwenden. Der MOX-Herstellungsprozess ähnelt dem bereits für die Herstellung von Uranoxid-Brennstoff beschriebenen Verfahren; allerdings sind hier besondere Maßnahmen zum Schutz der Arbeitskräfte vor der höheren **Radioaktivität** dieses bestrahlten Materials und vor der Inhalation von Plutonium notwendig.

Obwohl es weltweit eine Vielzahl von Brennstoffherstellern gibt, hat sich kein echter kommerzieller Wettbewerb unter ihnen entwickelt, was weitgehend durch die sehr spezifischen Auflagen, die unterschiedlichen nationalen Genehmigungsverfahren und -erfordernisse und die Vielzahl der Reaktortypen bedingt ist. Außerdem verändern sich die in den einzelnen Ländern verfolgten Strategien zum Brennstoffmanagement je nach Marktbedingungen und Kernenergiepolitik.

## Entsorgung

Die Entsorgungsphase im **Brennstoffkreislauf** beginnt, wenn die bestrahlten oder „abgebrannten“ Brennelemente dem Reaktor entnommen und für einen Anfangszeitraum von gewöhnlich fünf bis zehn Jahren im Kraftwerk oder auf dem Kraftwerksgelände gelagert werden. Bei dieser Zwischenlagerung werden die abgebrannten Brennelemente in wassergefüllte so genannte „Abklingbecken“ untergebracht. Das Wasser dient sowohl der Strahlungsabschirmung als auch der Kühlung der Brennelemente. Nach dieser ersten Abkühlungsphase, in der die Brennelemente einen großen Teil ihrer Wärme abgeben, ist die Temperatur des Kernbrennstoffs sehr viel niedriger, so dass dieser dann für die langfristige Lagerung oder – sofern eine entsprechende Strategie verfolgt wird – für die Wiederaufarbeitung geeignet ist.

Die langfristige Lagerung von abgebrannten Brennelementen kann unter nassen oder trockenen Bedingungen erfolgen. Bei einer Nasslagerung werden die abgebrannten Brennelemente in ein anderes Wasserbecken überführt, das in seiner Beschaffenheit dem ersten zur Kühlung verwendeten Becken gleicht. Als Alternative, die heutzutage zunehmend eingesetzt wird, können die Brennelemente auch trocken in große, abschirmende Behälter verbracht werden, bei denen der Kernbrennstoff durch natür-

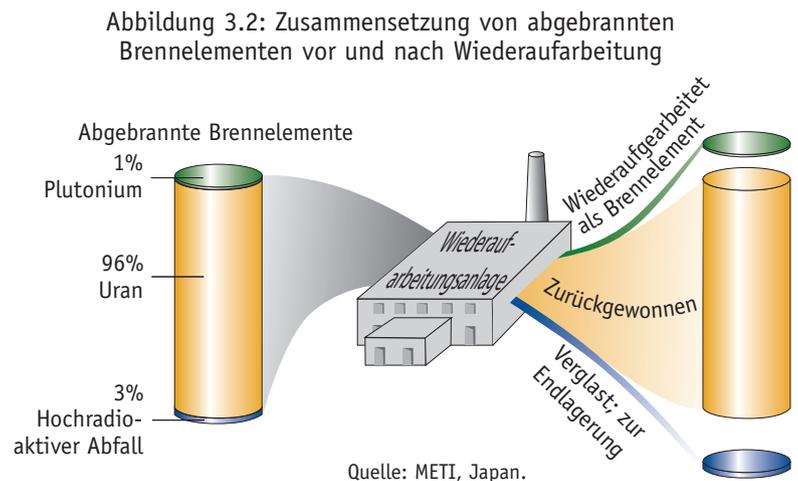
liche Luftzirkulation gekühlt wird (**Trockenlagerung**). Diese Behälter können gegebenenfalls auf der Straße oder Schiene zu anderen Standorten transportiert werden. Abgebrannte Brennelemente können unter nassen oder trockenen Bedingungen mehr als 30 bis 50 Jahre gelagert werden, bevor entweder ein Verpacken oder Umpacken notwendig werden oder das Material in einem Endlager entsorgt wird.

## Wiederaufarbeitung

Die Wiederaufarbeitung ist ein Verfahren, bei dem das in abgebrannten Brennelementen noch weiterhin vorhandene spaltbare Material zum Zweck eines erneuten Einsatzes als Kernbrennstoff oder zur Konditionierung für die Endlagerung zurückgewonnen wird (vgl. Abb. 3.2). Außerdem werden Volumen und langfristige Radiotoxizität des für die Endlagerung bestimmten Abfalls reduziert. Diese Form der Entsorgung von abgebrannten Brennelementen wird oder wurde von einigen europäischen Ländern (Belgien, Deutschland, Frankreich und Schweiz) sowie China, Indien, Japan und Russland verfolgt; die Mehrzahl der Länder, in denen **Kernreaktoren** betrieben werden, nutzen die Wiederaufarbeitung jedoch nicht.

Die Wiederaufarbeitung kann den Bedarf an Natururan um etwa 10-15% reduzieren, indem sie Plutonium, das während des Spaltungsprozesses erzeugt wurde, aus den abgebrannten Brennelementen herausgelöst, in Form von MOX-Brennmaterial wiederverarbeitet und in Kernkraftwerken erneut zum Einsatz bringt. Die Trennung des Urans und des Plutoniums von anderen

Für die Herstellung einer Tonne angereicherter Uran zur Verwendung in einem Leichtwasserreaktor werden 7-10 t Natururan benötigt.



Isotopen wird kommerziell in einem chemischen Verfahren, dem so genannten PUREX-Verfahren (Plutonium-Uran-Extraktionsverfahren), durchgeführt. Die verbleibenden Spaltprodukte und Aktiniden sind hochradioaktive Abfälle (vgl. Kapitel 4). Ein weiteres Abfallprodukt sind die nicht löslichen metallischen Strukturteile der Brennelemente (Hüllrohre und Endkappen). Die derzeit betriebenen Wiederaufarbeitungsanlagen sind große, komplexe und kostspielige Einrichtungen, die aus diesem Grund auch nur in wenigen Ländern gebaut wurden (vgl. Tabelle 3.3).

Die Zahl der mit den derzeitigen Wiederaufarbeitungs- und Reaktortechnologien möglichen Rezyklierungszyklen wird einerseits durch die Zunahme an solchen Plutoniumisotopen begrenzt, die sich nicht durch thermische Neutronen in Leichtwasserreaktoren spalten lassen, und andererseits durch die Entstehung unerwünschter Elemente wie vor allem Curium. Nach zwei bis drei Zyklen müsste der rezyklierte Kernbrennstoff genauso entsorgt werden wie im offenen Brennstoffzyklus. Diese Einschränkung in Bezug auf die Anzahl der Recyclingzyklen gilt allerdings nicht, wenn das wiederaufgearbeitete Material in Brutreaktoren eingesetzt wird.

Das während der Wiederaufarbeitung zurückgewonnene Uran ist in der Vergangenheit wieder zu Kernbrennstoff verarbeitet worden, während es heute für eine künftige Wiederverwendung gelagert wird. Das erklärt sich aus der Tatsache, dass das zurückgewonnene Uran (weil es im Reaktor Neutronen ausgesetzt war) stärker radioaktiv ist als das natürliche Uran und seine Wiederaufarbeitung

die Anreicherungsanlagen und Brennelementefabriken kontaminieren und mithin deren Betrieb erschweren würde. Der Einsatz von zurückgewonnenem Uran erfordert speziell dafür vorgesehene Einrichtungen, die derzeit nicht wirtschaftlich sind.

## Stilllegung

Bei der endgültigen Schließung einer kerntechnischen Einrichtung, sei es ein Reaktor, ein Uranbergwerk oder eine andere Anlage des Brennstoffkreislaufes, muss diese in einen Zustand versetzt werden, in dem für die Bevölkerung, für die in der Anlage Beschäftigten, und für die Umwelt kein Schaden entstehen kann. Bis Januar 2003 sind über 120 kommerzielle Reaktoren stillgelegt worden und befinden sich in verschiedenen Phasen des Rückbaus.

Dieser Prozess, der unter der Bezeichnung Stilllegung bekannt ist, umfasst generell mehrere Etappen.

## Sicherer Einschluss

Die abgebrannten Brennelemente werden dem Reaktor entnommen und auf die herkömmliche Weise gelagert, das Flüssigkeitssystem geleert, das Betriebssystem abgeschaltet und die Öffnungen der Anlage nach außen blockiert oder versiegelt. Die Atmosphäre in der Betonhülle wird kontrolliert, der Zugang zu diesem Gebäude begrenzt, und es werden Überwachungssysteme installiert. Generell werden die Maßnahmen zum sicheren Einschluss kurzfristig nach der endgültigen Abschaltung der Anlage begonnen.

Tabelle 3.3: Kommerzielle Anlagen für die Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente weltweit

Land	Anlage/Standort	Jahr der Inbetriebnahme	Brennstoffart
China	Diwopu (Ganzu)	2002	LWR
Frankreich	La Hague	1976	LWR
Indien	Kalpakkam	1998	HWR
	Tarapur	1974	HWR
Japan	Rokkasho-mura	2006 (geplant)	LWR
	Tokai-mura	1977	LWR, ATR
Russische Föderation	Tcheljabinsk-65 Majak	1984	WWER
Vereinigtes Königreich	B205/Sellafield	1964	Magnox GCR
	Thorp/Sellafield	1994	LWR, AGR

Oberer biologischer Schild, der unter Einsatz einer thermischen Lanze im Rahmen des Abrissprojekts des gasgekühlten Reaktors in Windscale abgebaut wird.



## Dekontamination und Rückbau

Alle Oberflächen werden mit Wasser oder mit mechanischen, chemischen oder elektrochemischen Mitteln behandelt, um die anhaftende Radioaktivität zu beseitigen (Dekontamination). Alle in diesen Prozess einbezogenen Arbeitsinstrumente und -gebäude werden dann entfernt, auf etwaige verbleibende Radioaktivität überprüft und entweder wiederaufgearbeitet oder in Zwischenlagern untergebracht, so dass nur die Grundelemente des Kernreaktors übrig bleiben, d.h. der Reaktorbehälter und dessen Schutzmauern. Die nicht kontaminierten Teile der Einrichtung – Büroräume, Turbinen, Behälter usw. – werden verschrottet oder für andere Zwecke verwendet. Für die verbleibenden Teile der Anlage und für die Umgebung wird ein angemessenes Maß an Überwachung aufrechterhalten. Dieser Zustand des sicheren Einschluss kann 10, 20 oder mehr Jahre dauern.

## Rückbau und Standortfreigabe

Sofern Teile der verbleibenden Anlagen nicht für andere Zwecke verwendet werden sollen, werden schließlich die Gesamtanlage und alle Materialien entfernt, dem Standort wird die Betriebslizenz ent-

zogen, und er steht dann für neue Zwecke zur Verfügung. Der Zeitpunkt dieser letzten Phase wird in jedem Land nach wirtschaftlichen, technischen und aufsichtsrechtlichen Faktoren bestimmt; in einigen Fällen kann diese Phase erst nach einer sehr langen Zeit, manchmal erst 100 Jahre nach der Schließung, stattfinden. Mit der Einführung von Roboter- und Telemanipulationstechniken beginnt diese Phase des Stilllegungsprozesses derzeit aber häufig früher.

Die relativ langen Wartezeiten zwischen dem Abschluss der drei Phasen sollen ein Abklingen der Radioaktivität ermöglichen, dienen zum Schutz der am Stilllegungsprozess beteiligten Arbeitskräfte und erleichtern die Lagerung sowie die Endlagerung radioaktiver Stoffe.

Rückbautechniken von Kernkraftwerken sind in den Vereinigten Staaten und mehreren europäischen Ländern mittlerweile recht weit fortgeschritten (vgl. Tabelle 3.4). Die Rückbautechniken werden immer ausgereifter, und der Erfahrungsaustausch hat nunmehr ein Stadium erreicht, in dem diese Prozesse als detailliert planbare Phasen des Betriebszyklus eines Reaktors angesehen werden können.

Tabelle 3.4: Ausgewählte Reaktoren, die derzeit stillgelegt werden oder bereits stillgelegt wurden

Reaktor	Leistung (MWe)	Land	Kommentar
Niederaichbach	100	Deutschland	Gasgekühlter Reaktor, der 1974 stillgelegt wurde. Die Anlage wurde außer Betrieb genommen und abgerissen, und der Standort wurde 1995 für die uneingeschränkte landwirtschaftliche Nutzung freigegeben.
Shippingport	60	USA	Leichtwasserbrutreaktor, der 1982 stillgelegt wurde. 1989 wurde der Standort zur uneingeschränkten Nutzung freigegeben.
Trojan	1 180	USA	DWR, der 1993 stillgelegt wurde. Die Dampferzeuger wurden 1995 entfernt und entsorgt; der Reaktorbehälter wurde 1999 entfernt und entsorgt. Die Gebäude werden derzeit dekontaminiert, der Abriss ist aber nicht vor 2018 geplant.
Rancho Seco	913	USA	DWR, der 1989 stillgelegt wurde. Die Anlage wurde in einen sicheren Lagerungszustand gebracht und wird lt. Plan bis 2008 in diesem Zustand bleiben, wenn Mittel zum Rückbau verfügbar sein werden.
Chinon	70 210 480	Frankreich	Drei gasgekühlte Anlagen, von denen die letzte 1990 stillgelegt wurde. Sie wurden bereits z.T. zurückgebaut, der endgültige Rückbau ist aber um 50 Jahre verschoben worden.
Berkeley	2 x 138	UK	Gasgekühlter Reaktor, der 1989 stillgelegt wurde. Die Entnahme des Brennstoffmaterials wurde 1992 abgeschlossen. Die Anlage wird derzeit auf eine längere Phase der Wartung und Nachsorge vorbereitet.

Quelle: World Nuclear Association.

## Abfälle aus Stilllegungen

Bei der **Stilllegung** eines Kernkraftwerks oder einer anderen kerntechnischen Einrichtung fallen erhebliche Mengen an radioaktivem Abfall an, größtenteils in Form von **schwachaktiven Abfällen** (vgl. Kapitel 4). Schätzungen der Europäischen Kommission zufolge werden bei der Stilllegung eines „durchschnittlichen“ Kernkraftwerks bis zu 10 000 m<sup>3</sup> an radioaktivem Abfall erzeugt. Der volumenmäßig größte Teil des radioaktiven Abfalls besteht aus Beton oder sonstigem Baumaterial mit einem nur sehr geringen Gehalt an **Radioaktivität**.

Die abgebrannten Brennelemente im Reaktor sind die größte Quelle von Radioaktivität, und mit ihrer Beseitigung wird die Gesamtradioaktivität der Anlage um rd. 99% reduziert. Große Komponenten wie der Reaktordruckbehälter und die Dampferzeuger werden ebenfalls wie radioaktiver Abfall behandelt, obwohl ihre Größe ganz spezifische Probleme aufwirft. Diese Komponenten können durch Zersägen zu einer leichter handhabaren

Entfernung des belgischen BR3-Reaktordruckbehälters für die weitere Zerlegung.



Größe reduziert oder, wie dies gewöhnlich der Fall ist, intakt demontiert und in Lagerstätten für **schwachaktive Abfälle** transportiert werden.

Ein derzeit erörtertes Stilllegungsproblem betrifft die Einführung einer international gültigen Freigrenze, unterhalb derer geringfügig kontaminierte Stoffe von der Kontrolle durch die für den Strahlenschutz zuständigen Stellen ausgenommen werden können. Auf der einen Seite würden die Freigabe und die Wiederverwertung großer Mengen an leicht kontaminiertem Beton und leicht kontaminierten Metallen die Entsorgungskosten für diese Stoffe bei der Stilllegung erheblich reduzieren, bei vernachlässigbarem radiologischen Risiko. Auf der anderen Seite hat die öffentliche Wahrnehmung dessen, was genau ein vertretbares und akzeptables Risiko darstellt, in den meisten Fällen dazu geführt, dass sich die Regierungen gegen die Freigabe von derart kontaminiertem Abfall entschieden haben, so dass dieser meist in Lagerstätten für schwachaktive Abfälle entsorgt wird.

## Weiterführende Informationen

Vergleiche die Literaturhinweise im Kapitel „Weiterführende Informationen“ wegen eingehenderer Informationen über:

- den typischen **Uran-Brennstoffzyklus**, vgl. 3.1.
- die Technologien und Verfahren, die bei existierenden und **potenziell fortgeschrittenen Brennstoffzyklen zum Einsatz kommen**, vgl. 3.2 und 3.3.
- das **abgereicherte Uran** als Nebenprodukt des Anreicherungsverfahrens, vgl. 3.4;
- **Stilllegung**, vgl. 3.5 und 3.6.
- **Umweltsanierung** von Uranproduktionsstätten, vgl. 3.7.

# Entsorgung radioaktiver Abfälle

*Radioaktive Abfälle entstehen bei zahlreichen industriellen und medizinischen Anwendungen, von denen die Kernenergieerzeugung wegen der Menge und Langlebigkeit der dabei anfallenden Abfälle am stärksten ins Gewicht fällt.*

*Radioaktive Abfälle werden in der Regel in drei Kategorien eingeteilt: schwachaktive Abfälle, mittelaktive Abfälle und hochaktive Abfälle, je nach der Konzentration der Radioaktivität und der Zeitspanne, während der von den Abfällen eine Gefährdung ausgeht.*

*Zur Entsorgung der schwachaktiven und der meisten mittelaktiven Abfälle existieren ausgereifte Verfahren. Die Entsorgung hochaktiver Abfälle, ohne Austritt schädlicher Emissionen aus der Endlagerstätte, gilt unter Wissenschaftlern und Technikern als sicher machbar, doch scheiterte bislang die praktische Umsetzung an dem mangelnden gesellschaftlichen Konsens.*



Radioaktive Abfälle entstehen bei jeder Aktivität, bei der nukleares Material verwendet wird, sei es in **Kernreaktoren** oder in medizinischen und industriellen Anwendungen. Unabhängig von ihrem jeweiligen Ursprung müssen diese Abfälle sicher und wirtschaftlich sowie auf ökologisch und gesellschaftlich akzeptable Weise entsorgt werden.

## Die verschiedenen Arten radioaktiver Abfälle

Radioaktive Abfälle werden gewöhnlich in wenige Kategorien unterteilt, je nach der Höhe ihrer Radioaktivität und nach dem Zeitraum, innerhalb dessen die Abfälle radioaktiv bleiben. Dies erleichtert die Handhabung, Lagerung und Entsorgung der Abfälle sowie die staatliche Aufsicht. Die Kategorien werden von Land zu Land unterschiedlich definiert; im Allgemeinen wird jedoch unterschieden nach schwach-, mittel- und hochaktiven Abfällen.

**Schwachaktive Abfälle** sind in der Regel Produkte, die dem Kontakt mit geringen Mengen kurzlebig radioaktiver Stoffe ausgesetzt waren, so z.B.

Overalls, Behälter, Spritzen usw. Die Handhabung von schwachaktiven Abfällen ist generell mit Gummihandschuhen möglich. Ein Großteil der bei der **Stilllegung** eines Kernkraftwerks entstehenden Abfälle sind schwachaktive Abfälle und werden entsprechend behandelt.

**Mittelaktive Abfälle** fallen vorwiegend in der Industrie an; dabei handelt es sich z.B. um Ausrüstungsgegenstände, die in Verbindung mit nuklearem Material verwendet wurden, oder verbrauchte Ionenaustauschharze, die bei der Reinigung radioaktiver Flüssigkeiten zur Anwendung kamen. Dabei ist die Wärmeentwicklung gewöhnlich vernachlässigbar, doch wird **Strahlung** freigesetzt, die kurz- oder langlebig sein kann und in der Regel eine Abschirmung erfordert. Bei der **Wiederaufarbeitung** wird mittelaktiver Abfall erzeugt, der aus den nicht aufgelösten metallischen Strukturteilen der Brennelemente (Hülsen- und Endstücken) besteht.

**Hochaktive Abfälle** sind vorwiegend hoch radioaktive und langlebige Restprodukte der

Abbildung 4.1: Zerfall eines radioaktiven Elements mit einer Halbwertszeit von fünf Tagen

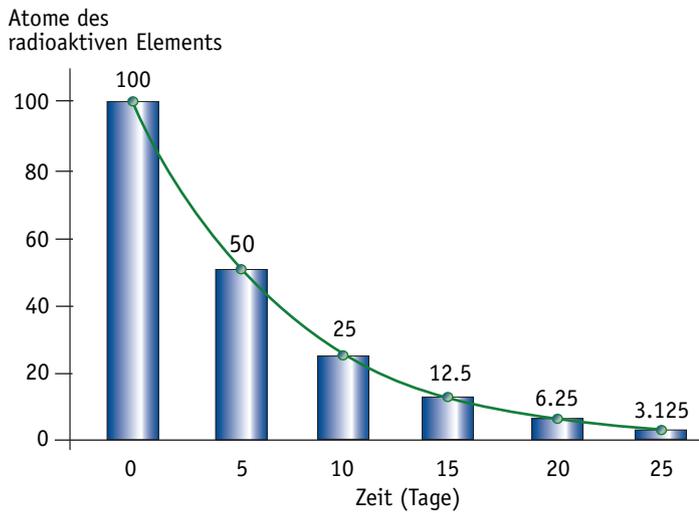


Tabelle 4.1  
Ausgewählte Isotope  
in hochaktiven Abfällen

Isotop	Ungefähre Halbwertszeit
Strontium-90	29 Jahre
Cäsium-137	30 Jahre
Americium-241	430 Jahre
Americium-243	7 400 Jahre
Plutonium-239	24 000 Jahre
Technetium-99	213 000 Jahre

Tabelle 4.2  
Ungefähre Mengen der in einem LWR von 1 000 MWe  
erzeugten radioaktiven Abfälle (m<sup>3</sup> pro Jahr)

Abfallart	Offener Brennstoffzyklus	Brennstoffzyklus mit Wiederaufarbeitung
Schwach-/mittelaktiv	50-100	70-190
Hochaktiv	0	15-35
Abgebrannte Brennelemente	45-55	0

Quelle: Europäische Kommission, *Die Entsorgung von radioaktiven Abfällen in der Europäischen Union* (Brüssel, 1998).

**Kernspaltung.** Sie müssen stark abgeschirmt werden und bedürfen generell der Kühlung. Innerhalb der Kategorie der hochaktiven Abfälle wird unterschieden zwischen **abgebrannten Brennelementen**, die nicht wiederaufgearbeitet werden, und den Abfallprodukten der **Wiederaufarbeitung**. Wengleich die beiden Unterkategorien in vielerlei Hinsicht ähnlich behandelt werden, sind sie doch von Form und Gehalt her unterschiedlich, was nicht zuletzt daran liegt, dass die Abfallprodukte der Wiederaufarbeitung in den meisten Fällen zunächst in flüssiger Form anfallen.

Der wichtigste Faktor für die Handhabung bzw. den Transport der Abfälle ist deren **Radioaktivität**. Bei der Entsorgung kommt jedoch ein weiterer wichtiger Faktor ins Spiel, nämlich die Zeitspanne, während der die Abfälle eingeschlossen bleiben müssen und die sich nach der **Halbwertszeit** der darin enthaltenen radioaktiven **Isotope** bemisst. Einige langlebige Isotope, wie sie z.B. in hochaktiven Abfällen und abgebrannten Brennelementen vorkommen, erfordern einen sicheren Einschluss über Tausende von Jahren hinweg.

Die Halbwertszeit eines radioaktiven Isotops ist die Zeitspanne, in der die Hälfte einer gegebenen Menge von Atomkernen des radioaktiven Isotops zerfällt. Sie kann je nach Isotop von weniger als einer Sekunde bis zu unendlich (im letzteren Fall ist das Isotop stabil) reichen. Aus Abbildung 4.1 wird ersichtlich, dass nach fünf Halbwertszeiten die verbleibende Konzentration eines radioaktiven Isotops rd. 3% der ursprünglichen Konzentration beträgt; nach zehn Halbwertszeiten bleibt weniger als 0,1% übrig. Tabelle 4.1 zeigt einige der Isotope, die für die Bewertung der Entsorgungsbedingungen hochaktiver Abfälle und abgebrannter Brennelemente besonders wichtig sind. Cäsium, Strontium und Technetium sind **Spaltprodukte**; die anderen Isotope entstehen durch Neutroneneinfang.

### Radioaktive Abfallmengen aus der Kernenergieerzeugung

Auf Grund ihrer hohen Energiedichte erzeugt die Kernenergie eine relativ geringe Abfallmenge je produzierter Energieeinheit. Unterschiedliche Reaktoren und **Brennstoffkreisläufe** erzeugen auch unterschiedliche Mengen und Arten von Abfall. In Tabelle 4.2 wird gleichwohl versucht, eine Übersicht über die Abfallmengen zu vermitteln, die bei der Produktion von Kernenergie entstehen.

Abbildung 4.2: Vergleich der Aufkommen von Industrieabfall und radioaktivem Abfall – jährliches Aufkommen in der Europäischen Union



Quelle: *Nuclear and Renewable Energies* (Rom: Accademia Nazionale dei Lincei, 2000), aktualisiert mit Daten der Europäischen Kommission, *Radioactive Waste Management in the European Union [Die Entsorgung von radioaktiven Abfällen in der Europäischen Union]* (Brüssel, 1998).

Auf Grund verbesserter Verfahren und Technologien, die teilweise auch zur Verringerung der Betriebs- und Wartungskosten beitragen, ist generell ein Trend zur Reduzierung der je Stromeinheit erzeugten Abfallmengen festzustellen.

Um diese Abfallmengen in die richtige Perspektive zu rücken, sollte nicht vergessen werden, dass auch Fabriken, Krankenhäuser und Krebsbehandlungszentren in großem Umfang radioaktive Abfälle erzeugen und dass derartige Abfälle insgesamt lediglich einen Bruchteil des Jahr für Jahr in der Industrie anfallenden toxischen Mülls und einen noch weit geringeren Anteil an der gesamten Abfallmenge unserer Gesellschaft darstellen (vgl. Abb. 4.2).

## Grundlagen der Entsorgung

Die Entsorgung und Endlagerung radioaktiver Abfälle wird überall als nationale Aufgabe betrachtet. Wenngleich die Länder beim Abfallmanagement unterschiedlich vorgehen, sind in internationaler Zusammenarbeit eine Reihe grundlegender Prinzipien und Verpflichtungen formuliert worden, über die ein breiter Konsens besteht; ein Beispiel

dafür sind die *Principles of Radioactive Waste Management* der IAEA.

Dieses Dokument besagt in seinen wesentlichen Punkten, dass radioaktive Abfälle so entsorgt werden sollen, dass sichergestellt ist, dass

- hinreichender Schutz für die Gesundheit des Menschen und die Umwelt besteht, auch über nationale Grenzen hinweg;
- die Auswirkungen auf *künftige Generationen* nicht größer sind als für die heutige Generation akzeptiert und dass unverhältnismäßige Belastungen für künftige Generationen vermieden werden;
- ein geeigneter *nationaler Rechtsrahmen* besteht mit klarer Aufteilung der Zuständigkeiten sowie einer *unabhängigen Genehmigungsinstitution*;
- die *Abfallerzeugung* auf ein *praktikables Minimum* reduziert ist, unter Berücksichtigung der Abhängigkeit zwischen den verschiedenen Verfahrensschritten;
- die *Sicherheit der Einrichtungen* zur Abfallentsorgung in angemessener Weise gewährleistet ist.

Die schwachaktiven Abfälle machen etwa 90% des Gesamtvolumens aller weltweit jährlich erzeugten radioaktiven Abfälle aus; sie enthalten jedoch nur rd. 1% der Gesamtradioaktivität. Etwa 99% der aus der Kernspaltung resultierenden Radioaktivität sind in den hochaktiven Abfällen konzentriert.

Die Menge hochaktiven Abfalls, die entstehen würde, wenn der Strombedarf einer Person während deren gesamter Lebenszeit durch Kernenergie gedeckt würde, dürfte in die Hand eines Menschen passen. Die starke Wärmeentwicklung und Radioaktivität von hochaktiven Abfällen erfordern jedoch deren massive Abschirmung.

## Praxis der Entsorgung

Die notwendigen Schritte für eine sachgerechte Entsorgung radioaktiver Abfälle können in folgende Kategorien eingeteilt werden:

- Minimierung der erzeugten Mengen;
- Konditionierung und Verpackung, um eine sichere Handhabung und den notwendigen Schutz während des Transports zu gewährleisten;
- Zwischenlagerung;
- Endlagerung.

### Minimierung

Durch Ausnutzung optimierter Verfahren und fortgeschrittener Technik können schon mit den vorhandenen Einrichtungen zur Abfallentsorgung die erzeugten Abfallmengen weitgehend reduziert werden. Neuere Technologien und fortgeschrittene Kraftwerkskonzepte zielen darüber hinaus auf eine Verringerung der Abfallmengen schon bei ihrer Entstehung, z.B. durch verbesserte Wartungsanforderungen.

### Konditionierung und Verpackung

Feste schwach- und mittelaktive Abfälle können hoch verdichtet und so ihr Volumen erheblich verkleinert werden. Da die Entsorgung flüssiger Abfälle sicherheitstechnisch problematisch ist, müssen diese zunächst in feste Abfälle umgewandelt werden. Die radioaktiven Elemente können durch Filtration oder Ionenaustausch aus den Flüssigkeiten abge-

schieden und danach getrocknet, in ein Fixiermedium absorbiert oder in Beton verfestigt werden. Nach entsprechender Behandlung werden schwach- oder mittelaktive Abfälle zu Zwecken der Zwischen- oder Endlagerung in Stahlfässern oder Stahlkästen verpackt. So werden z.B. die metallischen Überreste bei der Wiederaufarbeitung von Brennelementen typischerweise kompaktiert und dann in Stahlfässern zur Endlagerung einzementiert.

Hochaktive Abfälle, die als Nebenprodukt der Wiederaufarbeitung anfallen, sind flüssig und müssen in einen festen Stoff umgewandelt werden. Dies geschieht normalerweise durch ein Verglasungsverfahren, wobei ein spezieller Glastyp entsteht (vgl. nachstehendes Foto). Darüber hinaus wurden auch andere Verfestigungsverfahren unter Verwendung von Keramik erprobt. Diesen Abfallformen ist gemeinsam, dass sie extrem haltbar und geeignet sind, den Abfall über lange Zeiträume sicher einzuschließen. Nicht wiederaufgearbeitete abgebrannte Brennelemente erfordern keine speziellen Konditionierungsverfahren außer einer Verpackung in Spezialbehältern zur Zwischen- und/oder Endlagerung.

### Zwischenlagerung

Die Zwischenlagerung unterscheidet sich insofern von der Endlagerung, als hierbei die Absicht besteht, die Abfälle irgendwann wieder aus der Lagerstätte zu entnehmen. Daher bedarf es aus Schutz- und Sicherheitsgründen einer aktiven Überwachung und Wartung sowie institutioneller Kontrollen.

Ist eine Endlagerstätte verfügbar, können schwach- und mittelaktive Abfälle direkt dorthin verbracht werden. Ist dies nicht der Fall, so sind oberirdische Zwischenlager erforderlich. Für hochaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente ist man sich seit jeher der Notwendigkeit von Zwischenlagern bewusst, um die Strahlung und die Zerfallswärme abklingen zu lassen. Zwischenlager für nukleare Abfälle können sicher gebaut und, wenn erforderlich, über viele Jahrzehnte auch sicher betrieben werden.

### Endlagerung

Die Endlagerung ist der letzte Schritt der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Gewöhnlich wird darunter verstanden, dass die Abfälle ohne jede Absicht einer späteren Wiederentnahme deponiert



Lagerung konditionierter radioaktiver Abfälle in Stahlfässern.



Durch Verglasung erzeugtes Testmaterial.

werden und dass keine langfristigen Überwachungs- und Kontrollmaßnahmen erforderlich sind, um die Abfälle sicher von Öffentlichkeit und Umwelt isoliert zu halten. Radioaktive Abfälle werden in eigens für diesen Zweck bestimmte Einrichtungen endgelagert und nicht mit anderen, nicht-radioaktiven Abfällen vermischt.

### Kurzlebige Abfälle

Kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle werden an zahlreichen Standorten in vielen Ländern routinemäßig endgelagert (vgl. Tabelle 4.3); einige Endlager wurden bereits vollständig gefüllt und versiegelt. Die meisten dieser Einrichtungen sind oberflächennah und haben gewöhnlich einfache technische Barrieren zur Verbesserung des Einschlusses – im Normalfall eine Auskleidung der Einlagerungsgräben mit einer Schicht aus Beton oder einem anderen Material. Der Raum zwischen den Abfallgebinden wird häufig mit Erde, Lehm oder Beton ausgefüllt. Die Gräben werden mit Materialien von geringer Durchlässigkeit abgedeckt, um den Wassereintritt zu minimieren, wobei Drainagesysteme dennoch eingetretenes Wasser aus den Einlagerungsgräben ableiten.

Diese Vorkehrungen verlängern die Lebensdauer der Abfallverpackungen und sollen einen möglichen Austritt von Radioaktivität aus dem Endlager verhindern. Gleichwohl wird davon ausgegangen, dass über einen Zeitraum von rd. 100 bis 300 Jahren nach Versiegelung einer Lagerstätte für schwach- und mittelaktive Abfälle aktive oder passive Kontrollmaßnahmen durchgeführt werden, z.B. Grundwasserüberwachung, Zugangsbeschränkungen, bestimmte Wartungsarbeiten sowie Beschränkungen bezüglich der weiteren Landnutzung. Nach diesem Zeitraum sind die radioaktiven Isotope auf ein vernachlässigbares Maß zerfallen.

### Langlebige Abfälle

Als schwieriger hat es sich hingegen erwiesen, Lösungen für langlebige Abfälle, d.h. entweder hochaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente oder langlebige mittelaktive Abfälle, zu finden. Bisher wurde weltweit noch kein Endlager für abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle in Betrieb genommen, wenngleich in den Vereinigten Staaten langlebige radioaktive Abfälle aus dem Verteidigungsbereich endgelagert werden.

Viele Länder (darunter Belgien, China, Deutschland, Finnland, Frankreich, Japan, Kanada, Russland, die Schweiz, Spanien, das Vereinigte Königreich und die Vereinigten Staaten) betreiben Forschung zur Entwicklung von Endlagern für langlebiger Abfälle.

## Geologische Endlagerung langlebiger Abfälle

Das wichtigste Endlagerungskonzept für langlebige Abfälle, das derzeit in Erwägung gezogen wird, ist die Verbringung in tief unter der Erde gelegenen Stätten, d.h. die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen, um so Sicherheit und Einschluss über lange Zeiträume zu gewährleisten (vgl. Abb. 4.3). Das gewünschte Ziel ist ein langfristiges, passiv sicheres System, das künftigen Generationen keinerlei Unterhaltungsaufwand auferlegt und sicherstellt, dass keine signifikanten Mengen radioaktiver Stoffe in die Biosphäre dringen. Das Hauptproblem bei diesem Ansatz besteht in dem mangelnden Vertrauen der Öffentlichkeit im Hinblick darauf, ob die Kenntnis der geologischen Prozesse und der Materialeigenschaften ausreichend ist, um einen sicheren Einschluss der Abfälle über die fraglichen langen Zeiträume hinweg zu garantieren.



Quelle: Posiva Oy, Finnland.

Abbildung 4.3: Endlagerkonzept für Eurajoki, Finnland

Tabelle 4.3: Endlagerstandorte für schwach- und mittelaktive Abfälle in OECD-Mitgliedsländern

Land	Endlagerstandort(e)
Australien	Mt. Walton East
Deutschland	Morsleben
Finnland	Loviisa Olkiluoto
Frankreich	Centre de l'Aube
Japan	Rokkasho
Mexiko	Maquixco
Norwegen	Himdalen
Schweden	SFR Oskarshamn NPP Studsvik Forsmark Ringhals
Spanien	El Cabril
Tschechische Republik	Richard II Bratrstvi Dukovany
Ungarn	RHFT Puspokszilagy
Vereinigtes Königreich	Dounreay; Drigg
Vereinigte Staaten	Barnwell, South Carolina Richland, Washington Envirocare, Utah

**Die Naturreaktoren von Oklo in Gabun.**

1972 entdeckte der französische Physiker Francis Perrin, dass in der Uranmine von Oklo in Gabun vor rd. zwei Milliarden Jahren auf natürliche Weise nukleare Kettenreaktionen stattgefunden haben. Die von diesen Naturreaktoren erzeugten Abfälle sind denen moderner Kernkraftwerke ähnlich. Die Uranmine von Oklo stellt damit die weltweit bekannteste natürliche Analogie für eine Endlagerung dar. Die Naturreaktoren von Oklo sind für die Experten für geologische Endlagerung von besonderem Interesse, da sie mit ihrer Hilfe das Verhalten langlebiger Abfälle über Millionen von Jahren beobachten und deren zeitliche Entwicklung in einer geologischen Lagerstätte besser analysieren können. Geochemische Beobachtungen in Oklo deuten darauf hin, dass nach dem Abbrennen des Spaltstoffs in den Naturreaktoren die erzeugten hochradioaktiven Abfälle durch den sie umgebenden Granit, Sandstein bzw. Ton ortsfest eingeschlossen wurden.

**Die geologische Barriere**

Die potenziellen geologischen Wirtformationen werden nach ihrer langfristigen Stabilität sowie ihrer Eigenschaft ausgesucht, jede mögliche Freisetzung von **Radioaktivität** zu verhindern bzw. erheblich zu verzögern. Außerdem müssen sie genügend ausgedehnt sein, um die notwendigen Endlagerstrukturen aufzunehmen. Ein entscheidendes Merkmal ist ein geringer Grundwasserfluss, da dieser potenziell den wahrscheinlichsten Übertragungsweg in die Biosphäre darstellt. Die bisher untersuchten Hauptformationstypen sind Salzgestein, sedimentäre Wirtsgesteine wie Ton und Schiefer, kristalline Formationen wie Granit sowie vulkanische Formationen wie Basalt und Tuffstein.

**Technische Barrieren**

Technische Barrieren sollen als Ergänzung natürlicher Barrieren einen physikalischen und chemischen Einschluss des Abfalls gewährleisten (vgl. Abb. 4.4). Die technischen Barrieren sind in der Regel folgender Art:

- **hochaktive Abfälle:** Einschluss in Glas;
- **abgebrannte Brennelemente:** Brennstofftabletten und Ummantelungsmaterial;
- **sonstige Abfälle:** Zement oder andere Einschlussmaterialien.

Diese technischen Barrieren werden durch Stahl- oder Betonverpackungen und das um die Behälter im Endlager eingebrachte Füllmaterial ergänzt.

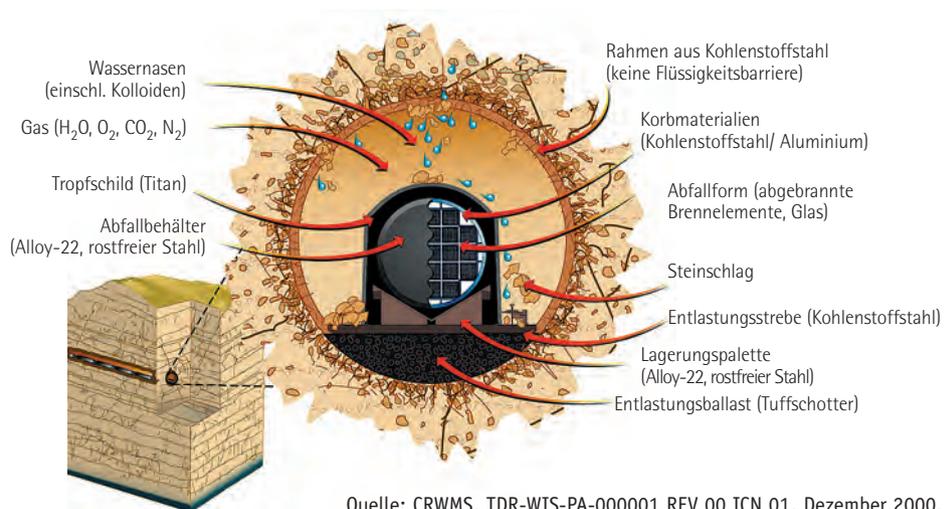
Für die Behälter wurde eine Reihe von Konstruktionen und Materialien vorgeschlagen, die sich nach dem geologischen Umfeld und der ihnen zugewiesenen spezifischen Sicherheitsfunktion richten. Durch die technischen Barrieren soll das Eindringen von Grundwasser verhindert werden. Sie können ferner chemische Bedingungen schaffen, die im unwahrscheinlichen Fall des Austritts von radioaktivem Material aus der Verpackung dafür sorgen, dass dieses nicht gelöst, bzw. dass etwaige dennoch gelöste Stoffe immobilisiert werden.

**Sicherheitsnachweis**

Da die bei der geologischen Endlagerung anvisierten Zeiträume weit über die bisher dokumentierte Erfahrungen des Menschen hinausgehen und die chemischen und physikalischen Wechselwirkungen sehr komplex sind, ist es schwierig, den Nachweis zu erbringen, dass die Sicherheit einer geologischen Endlagerstätte über ihre gesamte Existenz hinweg gewährleistet ist. Die Definition geeigneter Modelle und die Gewinnung der für eine Sicherheitsbeurteilung notwendigen Daten stellen bedeutende Herausforderungen dar.

Der Zeitraum, über den ein Nachweis für die Sicherheit einer Endlagerstätte verlangt wird, ist je

Abbildung 4.4: Auslegungsmerkmale der technischen Barrieren für die geplante Endlagerstätte von Yucca Mountain in den Vereinigten Staaten



Quelle: CRWMS, TDR-WIS-PA-000001 REV 00 ICN 01, Dezember 2000.

nach Land unterschiedlich – manche Länder haben 10 000 Jahre spezifiziert, einige gehen von längeren Zeiträumen aus, und andere haben überhaupt kein Zeitlimit festgelegt. Alle Vorhersagen, die extrem weit in die Zukunft hinein projiziert werden, sind zwangsläufig mit Unsicherheiten behaftet und daher eher als qualitative Anhaltspunkte für die Sicherheit einer Anlage zu sehen denn als eine präzise Vorhersage des zeitlichen Verhaltens der Endlagerstätte. Gleichwohl haben Berechnungen und experimentelle Untersuchungen ergeben, dass die eventuell freigesetzten Mengen eindeutig innerhalb akzeptabler Grenzen liegen, selbst wenn man Unsicherheitsfaktoren von mehreren Größenordnungen zulässt.

Das technische Vertrauen in die Praxistauglichkeit der geologischen Endlagerung resultiert aus grundlegenden wissenschaftlichen Erkenntnissen in Geologie, Hydrologie, Materialwissenschaften und Geochemie, die durch Forschungsaktivitäten unter Tage erhärtet werden. In Untertage-Labors, die größtenteils in nicht mehr genutzten Bergwerken eingerichtet wurden, können Informationen über standortspezifische Charakteristiken gewonnen und die Modelle auf die geforderten Eigenschaften hin getestet werden (vgl. Tabelle 4.4). Zur experimentellen Absicherung tragen ferner auch Studien über das sehr langfristige Verhalten von Uran und verwandten Radionukliden in natürlichen Lagerstätten bei, also der Vergleich dieser natürlichen Analoga mit Endlagerstätten. Diese Studien bestätigen, dass es möglich ist, geologische Endlager so zu konzipieren, dass schädliche Emissionen verhindert werden. Eine potenziell signifikante Freisetzung von Radionukli-

den ist nur unter der Annahme sehr unwahrscheinlicher Szenarien denkbar.

### Derzeitige Aktivitäten zur geologischen Endlagerung

1999 begannen die Vereinigten Staaten mit der Endlagerung von langlebigen, keine Wärme erzeugenden hoch radioaktiven Abfällen aus dem Verteidigungssektor, und zwar in der *Waste Isolation Pilot Plant* (WIPP) in New Mexiko in Hohlräumen in einem Salzstock 650 Meter tief unter der Erde. Als nationale Endlagerstätte für hochaktive, wärmeerzeugende Abfälle und abgebrannte Brennelemente wurde in den Vereinigten Staaten im Jahre 2002 nach umfassenden Untersuchungen offiziell der Standort Yucca Mountain in Nevada vorgeschlagen. Eine endgültige Entscheidung über die Nutzung des Standorts hängt aber noch von der sicherheitstechnischen Überprüfung der unabhängigen Aufsichtsbehörde für Nuklearsicherheit ab; bis dahin werden noch mehrere Jahre vergehen. Das finnische Parlament traf im Jahr 2001 eine Grundsatzentscheidung für die Einrichtung einer geologischen Endlagerstätte für abgebrannte Brennelemente in der Gemeinde Eurajoki. Der Gemeinderat hatte vorher seine Zustimmung zur Errichtung eines nationalen Endlagers erteilt. Inzwischen haben die Bauarbeiten für das Endlager begonnen.

In Deutschland wird ein Salzstock bei Gorleben auf seine Eignung für ein Endlager untersucht. Die Arbeiten wurden jedoch im Jahre 2003 unterbrochen, um vorher grundsätzliche Fragen der Standortwahl zu klären.

**Fortschritte in Finnland**  
Am 18. Mai 2001 erklärte das finnische Parlament, dass die Einrichtung einer tiefen geologischen Lagerstätte für in finnischen Kernkraftwerken benutzte abgebrannte Brennelemente im Gesamtinteresse der Gesellschaft liege. Dieser Grundsatzbeschluss sicherte dem Projekt politische Unterstützung auf nationaler Ebene zu und die Einrichtung eines Untertage-Labors zur detaillierten Analyse des Standorts Olkiluoto nahe der Stadt Eurajoki wurden begonnen. Bau- und Betriebsgenehmigungen für das Endlager müssen allerdings erst noch erteilt werden. Die Arbeiten an der eigentlichen Endlagerstätte würden nach 2010 beginnen, und die Inbetriebnahme dürfte nicht vor 2020 möglich sein.

Tabelle 4.4: Beispiele für Untertagelabors

Land	Standort(e)
Belgien	Mol/Dessel: spezifische Forschungsarbeiten vor Ort seit 1984
Finnland	Olkiluoto: spezifische Forschungsarbeiten vor Ort seit 1992
Frankreich	Bure: Bau eines Labors seit 2000
Deutschland	Asse: spezifische Forschungsarbeiten vor Ort seit 1965 Gorleben: spezifische Forschungsarbeiten vor Ort seit 1985
Japan	Mizunami: spezifische Forschungsarbeiten vor Ort seit 2002 Horonobe: spezifische Forschungsarbeiten vor Ort seit 2001
Schweiz	Grimsel: spezifische Forschungsarbeiten vor Ort seit 1984 Mont Terri: spezifische Forschungsarbeiten vor Ort seit 1995
Vereinigte Staaten	Yucca Mountain, Nevada: spezifische Forschungsarbeiten vor Ort seit 1993

## Transport

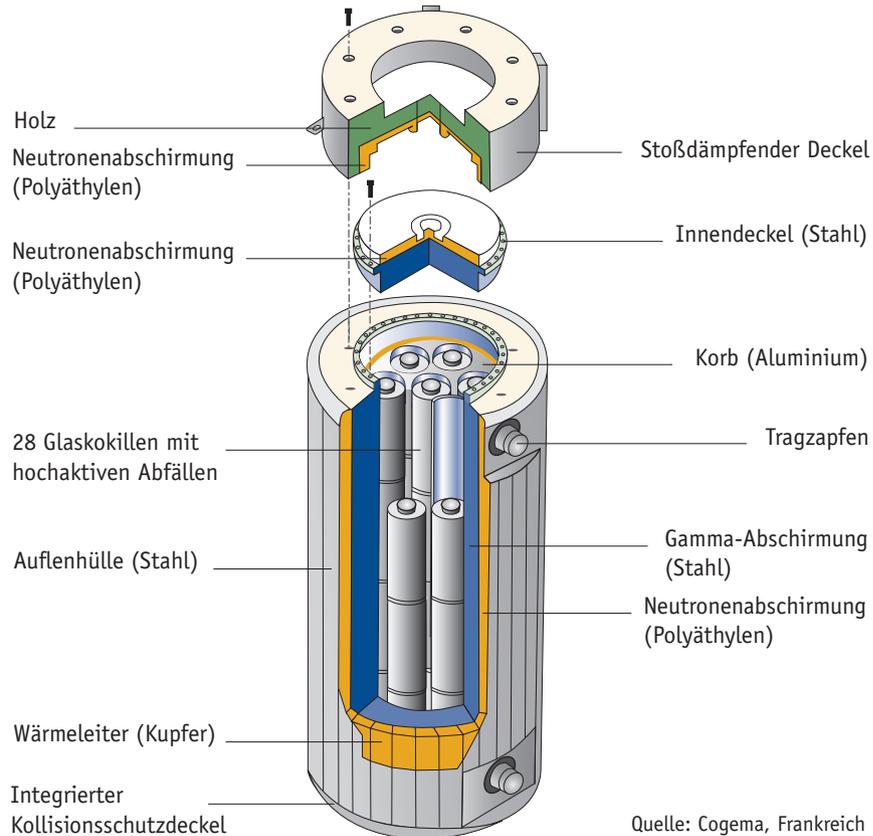
Wegen der vergleichsweise geringen Mengen radioaktiver Abfälle sowie der Notwendigkeit ihres langfristigen Einschusses sind meist zentrale Deponien für die Zwischen- und Endlagerung von radioaktiven Abfällen vorgesehen. Dies wiederum erfordert den Transport des radioaktiven Materials von den Entstehungsorten zu den jeweiligen Lagerstandorten. Auch das für industrielle und medizinische Anwendungen benutzte radioaktive Material muss vom Lieferanten zum Verbraucher transportiert werden.

Für die Sicherheit des Transports radioaktiven Materials sind primär die einzelnen Länder verantwortlich. Gleichwohl wenden nahezu 60 Länder die IAEA *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material* an, mit denen die Beförderungspraktiken harmonisiert und standardisiert wurden.

Darüber hinaus haben sich die Internationale Zivilluftfahrtorganisation (188 Vertragsparteien) und die Internationale Seeschiffahrtsorganisation (162 Mitgliedstaaten) diese IAEA-Grundsätze zu Eigen gemacht und schreiben deren Befolgung beim Luft- und Seetransport verbindlich vor. Diese Bestimmungen gehen von dem Grundprinzip aus, dass die Sicherheit von der Verpackung des radioaktiven Materials abhängt, unabhängig von der Art und Weise, wie es transportiert wird. Da Verkehrsunfälle nicht ausgeschlossen werden können, sollen mit diesem Prinzip Strahlungsfolgen auch dann verhindert werden, wenn die Verpackung einem schweren Unfall ausgesetzt ist.

Die Anforderungen und Kontrollen sind dem jeweiligen Gefährdungspotenzial des radioaktiven Materials angepasst. So können beispielsweise für manche Lieferungen medizinischer **Isotope** einfache Kartonverpackungen verwendet werden, auch

Abbildung 4.5: Ein typischer Transportbehälter für hochradioaktive Abfälle



wenn die radioaktiven Inhaltsmengen strengen Begrenzungen unterliegen. Es bedarf einer klaren Etikettierung, die Pakete müssen für den Transport zertifiziert sein und die Transporteure müssen über eine entsprechende Dokumentation verfügen.

**Abgebrannte Brennelemente** oder **hochaktive Abfälle** müssen in hochstabilen Behältern transportiert werden, die so ausgelegt sind, dass die **Radioaktivität** abgeschirmt wird und auch unter extremen Unfallbedingungen ein sicherer Einschluss gewährleistet ist (vgl. Abb. 4.5).

In den siebziger und achtziger Jahren haben die Vereinigten Staaten Tests durchgeführt, um das Verhalten von Transportbehältern für abgebrannte Brennelemente (Castor und ähnliche Behälter) unter realen Unfallbedingungen zu erproben. Es handelte sich dabei u.a. um folgende Tests:

- Aufprall eines mit einem Transportbehälter beladenen Lkws mit einer Geschwindigkeit von rd. 130 km/h frontal gegen eine Mauer aus verstärktem Beton (vgl. nachstehende Fotos);
- Seitenaufprall einer Lokomotive auf einen Behälter, der sich auf einem Lkw-Anhänger befand, bei rd. 130 km/h;
- Abwurf eines Behälters aus einer Höhe von 600 m auf festen Erdboden, wobei der Behälter beim Aufprall eine Geschwindigkeit von rd. 380 km/h hatte.

Bei all diesen Tests wie auch bei ähnlichen Tests, die im Vereinigten Königreich im Jahr 1984 durchgeführt wurden, blieben die Behälter intakt, und in nachfolgenden Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass keine Radioaktivität freigesetzt worden wäre.

### Sicherheitsbilanz

Jahr für Jahr finden weltweit zahlreiche Transporte radioaktiven Materials und Abfalls in allen Formen statt und Zwischenfälle sind in der Praxis äußerst selten. So werden beispielsweise in Frankreich jährlich rd. 300 000 derartige Transporte verzeichnet, von denen 15 000 mit dem nuklearen Brennstoffkreislauf in Verbindung stehen und 750 den Transport neuer oder abgebrannter Brennelemente oder hochaktiver Abfälle betreffen. Im Zeitraum 1975–1997 kam es im Durchschnitt zu lediglich einem Zwischenfall pro Jahr mit möglichen leichten lokalen Folgen, z.B. einer Kontamination des Transportbehälters. Weltweit haben seit 1971 über 20 000 Transporte von abgebrannten Brennelementen und hochaktiven Abfällen mit Zügen, Lkw und Schiffen stattgefunden; die Gesamtmenge des transportierten Materials erreichte über 50 000 Tonnen und der Gesamttransportweg über 30 Millionen Kilometer. Bei keinem dieser Transporte kam es zu einem Unfall, bei dem ein Behälter undicht oder Radioaktivität freigesetzt wurde.

Erprobung eines Brennelemente-Transportbehälters.



## Gesellschaftliche und politische Aspekte

Wegen des gegenwärtigen Fehlens von Endlagern wird die Entsorgung radioaktiver Abfälle bisweilen als die „Achillesferse“ der Kernenergie bezeichnet. Die Bildung gesellschaftlichem und politischem Vertrauen in die Sicherheitsstrategien zum Schutz derzeitiger und künftiger Generationen vor etwaigen Risiken erweist sich als überaus schwierig.

Technische Experten sind zuversichtlich, dass der sichere Einschluss hochaktiver Abfälle durch Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ethisch und ökologisch vertretbar und die entsprechende Technologie sowohl hoch entwickelt als auch zuverlässig ist.

Viele Menschen teilen diese Auffassung jedoch nicht. Die Kommunikation mit der Öffentlichkeit stellt nach wie vor ein großes Problem und eine Herausforderung für die Kernenergie dar. So gering die Risiken der Endlagerung langlebiger Radionuklide für die Bevölkerung auch sein mögen, ist ein Teil der öffentlichen Meinung doch überzeugt, dass diese Risiken aus ethischen Gründen künftigen Generationen nicht zumutbar sind. Andere wiederum tendieren dazu, Risiken dieser geringen Größenordnung, die zudem Generationen betreffen, deren physische Umwelt und technischen Kapazitäten sich unserem Vorstellungsvermögen

entziehen, auf der Skala der auf diesen künftigen Generationen lastenden Risiken als vernachlässigbar zu betrachten. Jedenfalls steht dieser weltanschauliche Konflikt der konkreten Akzeptanz von Endlagerungslösungen entgegen. Indessen bleibt die Tatsache bestehen, dass nukleare Abfälle vorhanden sind und dass über deren Entsorgung irgendwann entschieden werden muss.

Zu den anderen derzeit erörterten Aspekten der Abfallentsorgung gehört die langfristige Zwischenlagerung während der Zeit bis zur Endlagerung, die Möglichkeit der Rückholbarkeit von endgelagerten Abfällen und die Frage, inwieweit von mehreren Ländern gemeinsam genutzte Endlagerstätten wünschenswert sind.

### Langfristige Zwischenlagerung

Eine naheliegende Alternative zur Endlagerung von hochaktiven Abfällen und abgebrannten Brennelementen stellt die Zwischenlagerung über Tage dar. Diese Möglichkeit wird im Allgemeinen als technisch machbar betrachtet und ist derzeit auch gängige Praxis. Gleichwohl gilt die langfristige Zwischenlagerung bisher allgemein als „zweitbeste“ Lösung. Die notwendige Aufrechterhaltung der Sicherheit sowie die Umweltüberwachung an den Lagerstätten erhöhen die Kosten. Die im Laufe der Zeit unvermeidliche Abnutzung der Lagereinrichtungen und der dort gelagerten Abfallverpackungen überlässt den künftigen Generationen

Endlagerstätte für schwach- und mittelaktive Abfälle in Schweden.



die Kosten und Risiken ihrer regelmäßigen Erneuerung, und bei dieser Option bleibt natürlich die Frage der Endlagerung offen, wenn eines Tages die entsprechenden Entscheidungen getroffen werden. Auf mittelfristiger Basis handelt es sich hierbei gleichwohl um eine technisch durchführbare Option.

### *Rückholbarkeit*

Eng verzahnt mit dem Konzept der langfristigen Zwischenlagerung und mit ähnlichen Kosten- und Risikofaktoren behaftet ist die Schaffung von Einrichtungen in einem Endlager, die eine Umkehrbarkeit des Endlagerungsprozesses, d.h. eine Rückholung der zuvor eingeschlossenen Abfälle, ermöglichen sollen. Diese Option scheint technisch machbar, könnte aber mit dem Ziel in Konflikt geraten, einen optimalen Einschluss sicherzustellen. Überdies könnten zusätzliche Finanzmittel für eine zweite Entsorgungsstufe erforderlich sein. Technisch gesehen wäre jedoch ein Ansatz in mehreren Stufen möglich, bei dem man Schritt für Schritt zu einer Endkonfiguration gelangt, bei der alle Abfälle eingelagert sind und das Endlager für

eine maximale passive Sicherheit versiegelt ist, wobei gleichzeitig Maßnahmen, die nur sehr schwer wieder rückgängig zu machen sind, zurückgestellt würden.

### *Internationale Endlager*

Die Menge der Abfälle, die einer geologischen Endlagerung bedürfen, sind klein genug, um das Konzept eines für mehrere Länder gemeinsamen Endlagers grundsätzlich attraktiv machen. Ein solches Konzept wäre ganz besonders attraktiv für kleinere Länder, für die die Festkosten der Erschließung einer Endlagerstätte eine besonders große Belastung bedeuten würden, bzw. für Länder mit schwierigen geologischen Bedingungen. Studien zufolge dürfte es kaum irgendwelche signifikanten technischen oder ökologischen Einwände gegen die Einrichtung einer internationalen Endlagerstätte geben. Die ethischen und politischen Probleme im Zusammenhang mit der Standortwahl sowie gesellschaftliche oder rechtliche Vorbehalte, Abfälle eines anderen Landes aufzunehmen, blockieren jedoch Fortschritte in diese Richtung – zumindest für die nahe Zukunft.

### **Weiterführende Informationen**

Vergleiche die Literaturhinweise im Kapitel „Weiterführende Informationen“ wegen eingehenderer Informationen über:

- [grundlegende Prinzipien und Verpflichtungen im Zusammenhang](#) mit dem Management radioaktiver Abfälle, vgl. 4.1 bis 4.7;
- [zweijährliche Berichte](#) über den Stand der Programme für das Management radioaktiver Abfälle in den NEA-Mitgliedsländern, vgl. 4.8;
- [technische Aspekte](#) der geologischen Endlagerung, vgl. 4.9 bis 4.12;
- [gesellschaftliche Aspekte](#) der Endlagerung, vgl. 4.13 und 4.14;
- Fragen der [Umkehrbarkeit und Rückholbarkeit](#), vgl. 4.15;
- [die Naturreaktoren von Oklo](#) und andere Analogien in der Natur, vgl. 4.16 und 4.17;
- Transport radioaktiver Abfälle, einschließlich Informationen über Tests der Transportbehälter für radioaktives Material unter realen Bedingungen, vgl. 4.18 und 4.19.



# Reaktorsicherheit

*Die Sicherheit einer kerntechnischen Anlage hängt von der technischen Auslegung sowie von der Betriebsorganisation, der Ausbildung, den Betriebsabläufen und der Sorgfalt der Betreiber ab.*

*Der Sicherheit von Kernanlagen liegt als wichtigstes Konstruktionsprinzip das Mehrstufenkonzept (defence in depth) zu Grunde, bei dem das Vorhandensein mehrerer Schutzbarrieren gegen die Freisetzung radioaktiver Stoffe im Vordergrund steht, wobei jede Barriere dann zum Einsatz kommt, wenn die vorangehende Barriere versagt.*

*Die Kernenergie besitzt das Potenzial, durch ein unkontrolliertes Entweichen radioaktiver Stoffe Schaden für Mensch und Umwelt zu verursachen. Für die Nutzung der Kernenergie ist daher ein besonders hoher Stand der Reaktorsicherheit seit jeher eine wesentliche Voraussetzung. Wie bei vielen anderen technischen Entwicklungen bleibt dennoch ein gewisses Restrisiko bestehen, so gering dieses auch sein mag.*



Bei kerntechnischen Einrichtungen – seien es Kernkraftwerke, Wiederaufarbeitungsanlagen, Anlagen für die Abfallkonditionierung oder für die Lagerung abgebrannter Brennelemente – sind gewöhnlich große Mengen radioaktiver Stoffe im Spiel, deren Freisetzung eine Kontamination der Umwelt und Gesundheitsschäden beim Menschen verursachen könnte. Als Hauptzweck aller Schutzmaßnahmen ist daher zu gewährleisten, dass **Radioaktivität** unter allen Umständen eingeschlossen bleibt, bzw. nur kontrolliert und in so geringen Mengen freigesetzt wird, dass Schädigungen ausgeschlossen sind.

Ganz allgemein ist somit unter der Sicherheit einer Kernanlage die Fähigkeit der Anlagensysteme und des Anlagenpersonals zu verstehen, Störfälle zu verhüten bzw. bei Eintreten eines Störfalls dessen Folgen auf ein Minimum zu begrenzen. Letzten Endes muss die durch den Betrieb von Kernanlagen bedingte Strahlenwirkung auf Mensch und Umwelt sowohl im Normalbetrieb als auch bei potenziellen Störfällen so gering wie möglich sein. Um dieses Ziel zu erreichen, bzw. mit anderen Worten, um zu gewährleisten, dass eine Kernanlage als hinreichend sicher gilt, werden in allen Phasen ihres Betriebszyklus technische und organisatorische Maßnahmen

durchgeführt, zunächst bei Standortauswahl und Konstruktion, dann bei Herstellung, Bau und Inbetriebnahme, während des Betriebs und schließlich bei der Stilllegung.

Das Schadenspotenzial eines Unfalls in einem Kernkraftwerk ist größer als das von Unfällen in anderen kerntechnischen Anlagen, da beim **Kernspaltungsprozess** eine besonders hohe Konzentration radioaktiver Stoffe entsteht. Außerdem sind große Energiemengen im Spiel und Prozessflüssigkeiten und -gase können die Radioaktivität über weite Gebiete verbreiten. Die folgenden Überlegungen beziehen sich daher in erster Linie auf Kernkraftwerke, doch gelten dieselben Prinzipien und Verfahrensweisen auch für andere kerntechnische Anlagen.

## Grundlagen der Reaktorsicherheit

Reaktorsicherheit ist das Ergebnis einer Reihe einander sich ergänzender und überschneidender Sicherheitskonzepte (vgl. Abb. 5.1):

- Eine detaillierte Beachtung aller Faktoren, die sich auf die Sicherheit einer geplanten Anlage auswirken, und zwar von Beginn an: d.h.

Standortwahl, bewährte Konstruktion, hohes Qualitätsniveau bei Komponenten und Zusambau sowie umfassende Erprobung vor der Inbetriebnahme;

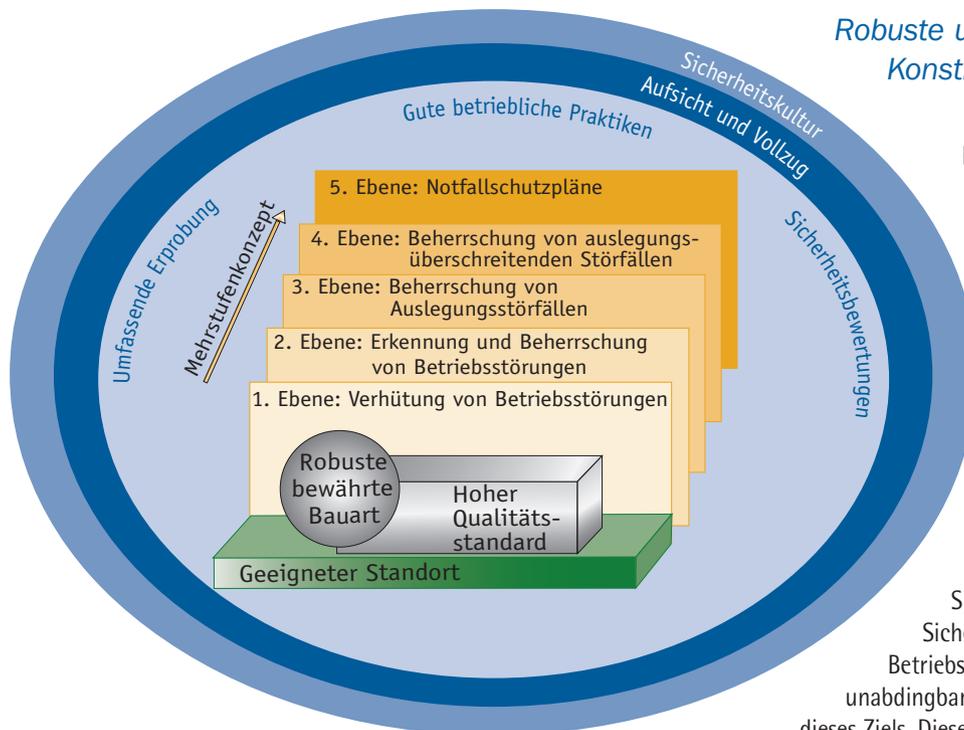
- Geringe Wahrscheinlichkeit von Fehlfunktionen, die ausserdem bei der Anlagenauslegung berücksichtigt sind, und das Vorhandensein mehrstufiger Schutzsysteme, die verhindern, dass es durch einen bestimmten Fehler bzw. den Ausfall eines Anlagenteils zu einem Störfall kommt (**Mehrstuufenkonzept**);
- Besondere Berücksichtigung menschlicher Faktoren durch sorgfältig durchdachte betriebliche Organisationsstrukturen, die regelmäßige Sicherheitsanalysen einschließen und die Sicherheitskultur der Betreiberorganisationen und Aufsichtsbehörden stärken;
- Überwachung und Prüfung durch eine unabhängige Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde, die auch befugt ist, den Betrieb auszusetzen oder, als letztes Mittel, die Betriebsgenehmigung zu entziehen.

Aus diesen Konzepten ergeben sich in der Praxis die nachfolgenden Sicherheitsauslegungen und -massnahmen.

### Standortauswahl

Die Standortwahl für ein Kernkraftwerk (oder für jede andere kerntechnische Anlage) unterliegt den im betreffenden Land geltenden Gesetzen und muss durch die für Sicherheitsfragen zuständige Aufsichtsinstanz genehmigt werden. Als Sicherheitsfaktoren für einen potenziellen Standort sind u.a. dessen hydrologische, geologische, meteorologische, seismologische und demographische Charakteristik zu berücksichtigen. Die Sicherheitsziele bestehen darin, die Exposition von Mensch und Umwelt im Falle der Freisetzung von **Radioaktivität** auf ein Minimum zu begrenzen und zu gewährleisten, dass die sicherheitsrelevanten Strukturen und Systeme dem größten vorhersehbaren durch natürliche (z.B. ein Erdbeben) oder zivilisatorische Einwirkungen verursachten Ereignis standhalten. Aus diesen Gründen befinden sich die Standorte von Kernkraftwerken nach Möglichkeit abseits von Ballungsräumen. Zu einer Neubewertung des Standorts kann es kommen, wenn sich der Kenntnisstand über mögliche natürliche oder anthropogene Risiken oder die Verfahren zur ihrer Untersuchung verbessert haben.

Abbildung 5.1: Elemente der Reaktorsicherheit



### Robuste und bewährte Konstruktion

Das grundlegende Konstruktionsprinzip von Kernanlagen beruht auf dem Mehrstuufenkonzept, d.h. es sind mehrere Sicherheitsebenen zum Schutz vor Freisetzung radioaktiver Stoffe vorgesehen. Die erste Schutzbarriere dient der Vermeidung von Fehlfunktionen. Ziel der Auslegung von Kernanlagen ist es daher, einen zuverlässigen, stabilen und möglichst unkomplizierten Betrieb sicherzustellen. Der Einsatz von Spitzentechnologien mit hohen Sicherheitsreserven im Hinblick auf Betriebssicherheit und Belastbarkeit sind unabdingbare Voraussetzung zur Erreichung dieses Ziels. Diese Faktoren tragen auch dazu bei,

die Betriebssicherheit und Verfügbarkeit der Anlage zu optimieren.

Die zweite Schutzbarriere, die Erkennung und Beherrschung von Fehlfunktionen, soll sicherstellen, dass jede Abweichung vom Normalbetrieb rasch festgestellt und möglichst automatisch durch Regelung der Betriebsparameter und Sicherheitssysteme korrigiert wird, ohne den laufenden Betrieb zu stören. Sollten diese Überwachungssysteme infolge eines anomalen Betriebsereignisses versagen, so sorgen in die Anlage integrierte sicherheitstechnische Systeme (siehe unten) dafür, dass der Reaktor automatisch in einen sicheren Zustand versetzt wird und die radioaktiven Stoffe sicher eingeschlossen werden. Diese Systeme sind so konzipiert, dass sie den so genannten **Auslegungsstörfällen**, d.h. dem Eintreten einer Reihe anomaler Ereignisse und potenzieller bei der Auslegung vorhergesehener und berücksichtigter Störfälle, standhalten. Die Beherrschung dieser Auslegungsstörfälle bildet die dritte Schutzbarriere.

Die oben beschriebenen Konstruktionsmerkmale bilden die erste, zweite und dritte Barriere des Mehrstufenkonzepts gegen einen nuklearen Unfall. Bei der vierten und fünften Barriere handelt es sich zum einen um die Beherrschung schwerer Unfälle mit dem Ziel, deren Folgen zu begrenzen und (erforderlichenfalls auch zu Lasten der weiteren Betriebsfähigkeit der Anlage) das Austreten radioaktiver Stoffe zu verhindern, und zum anderen um die Minderung der radiologischen Folgen durch anlagenexterne Notfallplanung, falls es zu einer massiven Freisetzung radioaktiver Stoffe kommen sollte (wegen zusätzlicher Informationen über Notfallschutzmaßnahmen vgl. Kapitel 6).

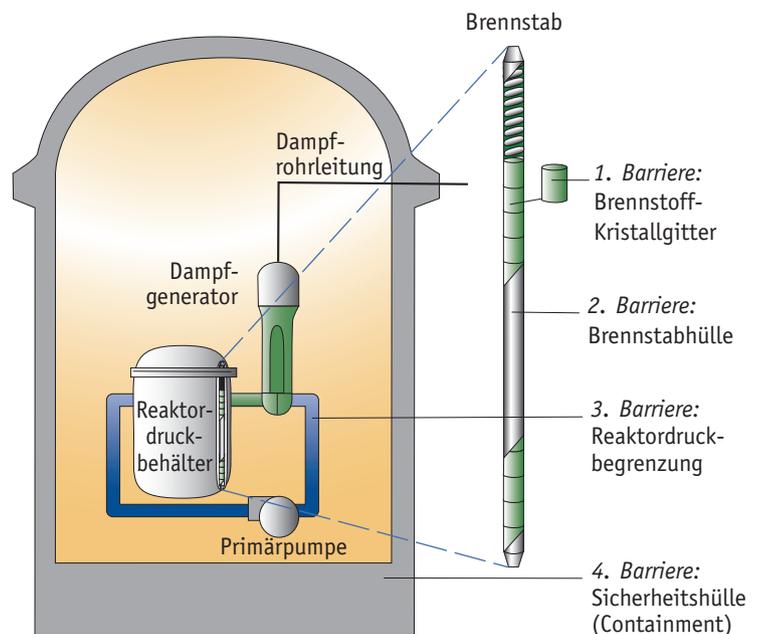
### Sicherheitstechnische Systeme

In einem Kernkraftwerk wird durch entsprechende Systeme sichergestellt, dass 1. radioaktive Stoffe jederzeit eingeschlossen sind, dass 2. der Kernspaltungsprozess jederzeit nahezu verzögerungslos abgebrochen werden kann, falls ein anomaler Zustand eintritt, so dass nur noch Nachwärme und Radioaktivität entstehen, und dass 3. die Nachwärme nach einer Abschaltung abgeführt wird, um eine Beschädigung der vor dem Austreten radioaktiver Stoffe schützenden Barrieren zu verhindern.

Unter Berücksichtigung dieser Punkte sind zur Verhinderung des Austretens von Radioaktivität

mehrfache Sicherheitsbarrieren vorgesehen. Die primären Sicherheitsbarrieren zum Schutz vor austretender Radioaktivität sind das Kristallgefüge des Brennstoffes und dessen hermetischer Behälter - die Brennstabhülle. Die nächste Barriere bildet die robuste Reaktordruckabschirmung, die im Normalbetrieb das **Kühlmittel** umschließt, und vor allem der Druckbehälter, der den Reaktorkern enthält. Die letzte Barriere bildet normalerweise das Reaktorgebäude, d.h. im Allgemeinen eine große Stahlbetonstruktur, die dazu dient, einerseits freigesetzte radioaktive Stoffe zurückzuhalten und andererseits die zur Druckabschirmung dienenden Strukturen vor anlagenexternen Gefahrenquellen wie z.B. Flugkörpern, Bränden oder Explosionen zu schützen (vgl. Abb. 5.2). Bei dem Unfall von Three Mile Island im Jahr 1979, einem von zwei schweren Unfällen, die sich in kommerziellen Kernkraftwerken zugetragen haben, konnten durch den Reaktordruckbehälter und das Reaktorsicherheitsgebäude Personenschäden verhindert werden, obwohl es zu einer schweren Beschädigung des Reaktorkerns und dadurch zur Freisetzung von großen Wärmemengen und Radioaktivität gekommen war.

Abbildung 5.2: Typische Sicherheitsbarrieren zur Abschirmung radioaktiven Materials



Der Kernspaltungsprozess kann mittels **Neutronen** absorbierender **Steuerstäbe** gestoppt werden. Diese Stäbe können eingefahren und so gesteuert werden, dass sie den Reaktor langsam oder aber schnell abschalten, um die Kernspaltungsreaktion mehr oder minder unverzüglich zum Stillstand zu bringen, ein Verfahren, das unter dem Begriff **Schnellabschaltung** oder **Scram** bekannt ist. Zusätzlich kann die Abschaltung stets noch auf eine zweite Art erfolgen, d.h. durch Einspritzen von Flüssigkeiten, die Neutronen absorbieren und so eine langfristige Reaktorabschaltung gewährleisten.

Die Kühlung des Reaktors erfolgt normalerweise allein durch die Wirkung des **Kühlmittels**, d.h. bei einem **Leichtwasserreaktor** entsteht Dampf, der dem Antrieb der Strom erzeugenden Turbinengeneratoren dient. Sollte dies nicht möglich sein, so sorgen separate sicherheitstechnische Systeme für die Abführung der auch noch nach einer Abschaltung im Reaktor entstehenden Nachwärme. Der Strom für diese und andere erforderliche Systeme wird bei Bedarf vor Ort von (meist mit Dieselmotoren betriebenen) Notstromgeneratoren erzeugt.

Die ständige Verfügbarkeit und der zuverlässige Betrieb der sicherheitstechnischen Systeme sind ein wichtiger Teil des Mehrstufenkonzepts, und ihre Funktionsfähigkeit wird regelmäßig überprüft. Diese Systeme müssen so ausgelegt sein, dass das Versagen einer einzigen Sicherheitskomponente keinen Funktionsausfall verursachen kann (Einzelfehlerkriterium).

Die Auslegung der Sicherheitssysteme erfolgt zudem erstens nach dem Prinzip der Redundanz, d.h. Systeme sind mehrfach vorhanden oder wesentlich belastbarer, als auf der Basis ohnehin pessimistischer Annahmen notwendig wäre; zweitens nach dem Prinzip der Diversität, d.h. Funktionsausfälle mit gleicher Ursache werden vermieden, indem Sicherheitseinrichtungen mit unterschiedlicher technischer Funktionsweise eingesetzt werden; und drittens nach dem Prinzip der physischen Trennung der Sicherheitssysteme von den verfahrenstechnischen Systemen der Anlage. Grundlage all dieser Vorkehrungen sind durchweg konservativen Annahmen bezüglich der Risiken von Betriebsstörungen, eine eingehende Analyse der Auslegungssicherheit auf der Basis des Prinzips „Was wäre, wenn?“ und die mit dem Verhalten von Bauteilen und Werkstoffen gesammelten Erfahrungen.

Die gegenwärtige Praxis verlangt heute in den meisten OECD-Ländern eine Grundausbildung und weiterführende Schulungen des Anlagenpersonals in einer Vielzahl unterschiedlicher Betriebs- und Notfallsituationen, unter Nutzung von Simulatoren mit originalgetreu nachgebildeten Schaltwarten.

## *Ein hoher Qualitätsstandard bei Herstellung und Bau*

Qualitativ hochwertige Ausrüstungen sind eine unabdingbare Voraussetzung für einen zuverlässigen Betrieb. Qualitätssicherung ist daher ein wesentlicher Bestandteil der Reaktorsicherheit. Für die in einer Kernanlage eingesetzten Ausrüstungen und Bauteile wurde daher eine Reihe spezieller Vorschriften und Normen entwickelt. Diese verlangen strenge Prüfungen zur Einhaltung von Qualitätsstandards und stellen sicher, dass nur bewährte etablierte Technologien zum Einsatz kommen. Die nationalen Aufsichtsbehörden überwachen die Durchführung dieser Qualitätssicherungsprogramme. Die Kosten der Qualitätssicherungsmaßnahmen machen einen beträchtlichen Teil der hohen Bau- und Instandhaltungsaufwendungen für eine Kernanlage aus.

## *Umfassende Erprobung*

Die Inbetriebnahme ist eine wichtige Etappe bei der Fertigstellung eines Kernkraftwerkes. Die Reaktorleistung wird schrittweise auf ein festgelegtes Niveau erhöht, und dabei werden die Betriebskennwerte der verfahrenstechnischen und Sicherheitssysteme der Anlage, wie sie gebaut wurde, ermittelt, dokumentiert und mit zuvor definierten Prüfkriterien verglichen. Zahlreiche spezifische Prüfungen werden durchgeführt, um die Funktionsweise der Bauteile und Systeme sowie das Gesamtverhalten der Anlage zu überprüfen; Mängel werden behoben, und die einzelnen Tests werden wiederholt, bis das Ergebnis den Anforderungen entspricht.

Umfassende Prüfungen werden auch nach größeren Wartungsarbeiten, dem Austausch oder der qualitativen Verbesserung von Bauteilen durchgeführt.

## *Sicherheitsanalysen*

Die Sicherheit einer Kernanlage muss durch eine systematische Beurteilung verschiedener zuvor definierter Referenz-Störfälle einschliesslich ihrer Wechselwirkungen mit den Sicherheitsbarrieren ermittelt werden. Diese Vorgehensweise wird als **deterministisches Sicherheitskonzept** bezeichnet. Bei diesem Ansatz werden bewusst pessimistische Annahmen zu Grunde gelegt, um zu zeigen, dass die Anlage und ihre Sicherheitssysteme bei einer Reihe von Auslegungstörfällen, z.B. einem

Kühlmittelverlust, die von den Behörden vorgeschriebenen Grenzwerte und Anforderungen erfüllen. Unberücksichtigt bleibt bei diesem Ansatz die Wahrscheinlichkeit, dass derartige Störfälle überhaupt auftreten, und es wird davon ausgegangen, dass alle eingebauten Sicherheitssysteme die ihnen zugedachte Funktion erfüllen.

Diese Untersuchung findet vor Abschluss der Auslegung (Konstruktion) statt, um zu bestätigen, dass angesichts der Eigenschaften des vorgeschlagenen Standorts ein Betrieb der Anlage im Rahmen der behördlich vorgeschriebenen Grenzwerte und Auflagen ohne weiteres möglich ist. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden in Zuverlässigkeitsanalysen oder Sicherheitsberichten dokumentiert. Diese werden vor der Erteilung einer Betriebsgenehmigung von den zuständigen Aufsichtsbehörden einer kritischen Prüfung unterzogen und bilden danach die Richtschnur für den sicheren Betrieb der Anlage.

Innerstaatliche Vorschriften fordern zudem häufig, dass während der gesamten Betriebsdauer von Kernanlagen systematisch Sicherheitsanalysen zusammen mit Eigenkontrollen der Betreiber durchgeführt werden, um eine Fortsetzung des Anlagenbetriebs entsprechend den Sicherheitsberichten und anderen Betriebsanforderungen sicherzustellen.

Seit den achtziger Jahren ist es gängige Praxis, die deterministische Analyse durch eine **probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA)** zu ergänzen. Bei

einer PSA werden alle Arten von Störungen analysiert, die einen Unfall zur Folge haben können, darunter auch der Ausfall von Anlagenteilen und menschliches Versagen. Die Kombinationen aus Ereignissen und Betriebsstörungen, die potenziell zu schweren Unfällen führen können, werden ebenfalls aufgezeigt, und die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens wird geschätzt. Die Ergebnisse dieser Studien werden für eine Vielzahl von Zwecken genutzt, wie z.B. die Prioritätensetzung für Verbesserungen im Bereich der Anlagensicherheit, die Ausbildung des Anlagenpersonals und die Festlegung von Prioritäten für Inspektionen.

### *Sorgfältig konzipierte betriebliche Praktiken*

Die Erfahrung hat gezeigt, dass ein sicherer Betrieb von kerntechnischen Anlagen von der Einhaltung einer Reihe von Grundsätzen abhängt, darunter:

- Klare Regelung der Verantwortung für die Anlagensicherheit, die in erster Linie beim Betreiber liegt, dessen Managementgrundsätze der Sicherheit die erforderliche Priorität geben müssen;
- Gute Betriebsorganisation, die u.a auf einer ausreichenden Zahl von Betriebspersonal mit entsprechender Qualifikation und Erfahrung aufbaut;
- Festsetzung konservativer Grenzwerte und Bedingungen für einen sicheren Betrieb;

Regelmäßig stattfindende Auffrischungsübungen in Simulatoren – eine der guten betrieblichen Praktiken, durch die Reaktorsicherheit gewährleistet wird.



**Sicherheitskultur** bedeutet „eine Gesamtheit von Eigenschaften und Einstellungen in Organisationen und bei Personen, die gewährleistet, dass als oberste Priorität den Fragen der Kernanlagensicherheit die ihrer Bedeutung gebührende Aufmerksamkeit gewidmet wird“. *IAEO-Bericht, Safety Culture, 1991.*

Eine Reihe international anerkannter Sicherheitsgrundsätze wurde in dem bei der IAEO hinterlegten Übereinkommen über die nukleare Sicherheit festgelegt. Dieses Abkommen zur Förderung der Sicherheit trat im Oktober 1996 in Kraft. Im April 2002 waren dem Abkommen 54 Vertragsparteien sowie 65 Signatarstaaten beigetreten, darunter alle Staaten, in denen Kernkraftwerke in Betrieb sind. Gegenstand des Übereinkommens ist die Schaffung eines Rahmens für Gesetzgebung und Vollzug; Standortwahl, Auslegung, Bau und Betrieb von Kernanlagen; Verfügbarkeit angemessener Finanzmittel und Humanressourcen; Bewertung und Überprüfung der Sicherheit; Qualitätssicherung und Notfallvorsorge.

- Geregelte und genehmigte Verfahren für alle Arbeitsabläufe einschliesslich von Prüfungen, Wartung und Operationen außerhalb des Routinebetriebs, wie z.B. freiwillige Prüfungen durch die Kraftwerksbetreiber und unabhängige Verifizierungsverfahren;
- umfangreiche Qualitätssicherungsprogramme für alle Arbeitsabläufe, Inspektionen, Erprobung und Wartung;
- Schulungsprogramme für sämtliche Tätigkeiten, die direkte Auswirkungen auf die Reaktorsicherheit haben;
- Verfügbarkeit der notwendigen ingenieurtechnischen und allgemein technischen Unterstützung während der ganzen Lebensdauer der Anlage;
- Rechtzeitige Meldung von Ereignissen an die zuständige Aufsichtsbehörde;
- Programme zur Sammlung und Analyse von Betriebserfahrungen einschliesslich deren Weitergabe an internationale Gremien, staatliche Stellen und Betreiberorganisationen, sowie für die Einarbeitung dieser Erfahrungen in Schulungsprogramme;
- Ausarbeitung von Notfallschutzmaßnahmen und -plänen vor der Inbetriebnahme, die dann regelmäßig geprobt werden, um die Maßnahmen der bei einem Unfall an der Bekämpfung der Folgen beteiligten Organisationen aufeinander abzustimmen;
- sorgfältige Berücksichtigung ingenieurtechnischer Grundsätze im Hinblick auf menschliche Faktoren bei der Auslegung und Gestaltung der Schaltwarte sowie der Alarm- und Anzeigesysteme.

### Sicherheitskultur

Die Erfahrung hat gezeigt, dass ein Nachlassen der Anlagensicherheit in vielen Fällen vor allem auf eine unzureichende „Sicherheitskultur“ zurückzuführen sind. Trotz aller systembasierten **Kernmaterialüberwachung** sind es stets die dort tätigen Menschen, die letzten Endes die Sicherheit einer Kernanlage garantieren. Das Vorhandensein einer guten Sicherheitskultur, die grossen Einfluss auf Haltung und Einstellung all derjenigen hat, deren Handlungen Auswirkungen auf die Sicherheit haben können, ist ein entscheidendes Prinzip der Reaktorsicherheit. Zu den Elementen

einer guten Sicherheitskultur gehören großes Verantwortungsbewusstsein, Selbstdisziplin und Einhaltung der behördlichen Vorschriften durch jeden Einzelnen, und auch der Managementstil ist eine wichtige Komponente. Die Sicherheitskultur ist nicht naturgegeben, und da sie mit den Gepflogenheiten und der Kultur des jeweiligen Landes in Zusammenhang steht, ist es nicht möglich, sie kurzfristig zu erwerben oder wie eine Art Hardwarekomponente einzufügen. Sie muss kontinuierlich und unmissverständlich von oben vermittelt werden und alle Betreiberorganisationen und staatlichen Aufsichtsbehörden durchdringen.

### Aufsicht und Vollzug

Die Verantwortung für die nukleare Sicherheit liegt in erster Linie auf nationaler Ebene, wobei jedes Land für die Sicherheit der Kernanlagen zuständig ist, deren Bau und Betrieb es innerhalb der Landesgrenzen genehmigt hat. Die Hauptverantwortung für die Sicherheit wird meist den Anlagenbetreibern übertragen, die Genehmigungsinhaber sind. Ein wesentlicher Beitrag zur Entwicklung zweckmäßiger Konzepte und zur Verbreitung empfehlenswerter Verfahrensweisen wird auch in internationaler Zusammenarbeit unter Mitwirkung von Organisationen wie der Kernenergie-Agentur (NEA) der OECD und der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) geleistet (vgl. auch Kapitel 8).

So sind z.B. im Übereinkommen über Nukleare Sicherheit, das alle Kernanlagen betreibende Staaten unterzeichnet haben, eine Reihe international anerkannter Grundsätze und Verpflichtungen im Hinblick auf die grundlegenden Elemente der Sicherheit festgelegt.

Obwohl die Verantwortung für die Reaktorsicherheit dem Betreiber obliegt, kommt der behördlichen Überprüfung und Kontrolle eine wesentliche Bedeutung zu. In allen Ländern mit Kernenergieprogramm gibt es eine staatliche Aufsichtsinstanz, die für die Genehmigung von Kernanlagen und für die Durchsetzung der einschlägigen Vorschriften zuständig ist.

Diese staatlichen Stellen

- entwickeln und erlassen geeignete behördliche Bestimmungen, d.h. Sicherheitsvorschriften oder -regelungen;
- erteilen nach Bewertung der Anlagensicherheit die erforderlichen Genehmigungen;

- untersuchen, überwachen und überprüfen die von den Genehmigungsinhabern vorgenommenen Sicherheitsprüfungen; und
- verifizieren die Einhaltung der behördlichen Auflagen oder Regelungen und verordnen Abhilfemaßnahmen im Falle von Verstößen gegen Sicherheitsvorschriften oder Abweichungen von den festgesetzten Standards.

Ein wichtiger Grundsatz im Übereinkommen über die nukleare Sicherheit ist die wirksame Trennung zwischen der staatlichen Regulierungsinstanz und anderen Stellen oder Organisationen, die mit der Förderung oder Nutzung von Kernenergie befasst sind, so dass die staatliche Aufsichtsinstanz und ihr Entscheidungsprozess vor unzulässiger Einflussmaßnahme von außen geschützt ist.

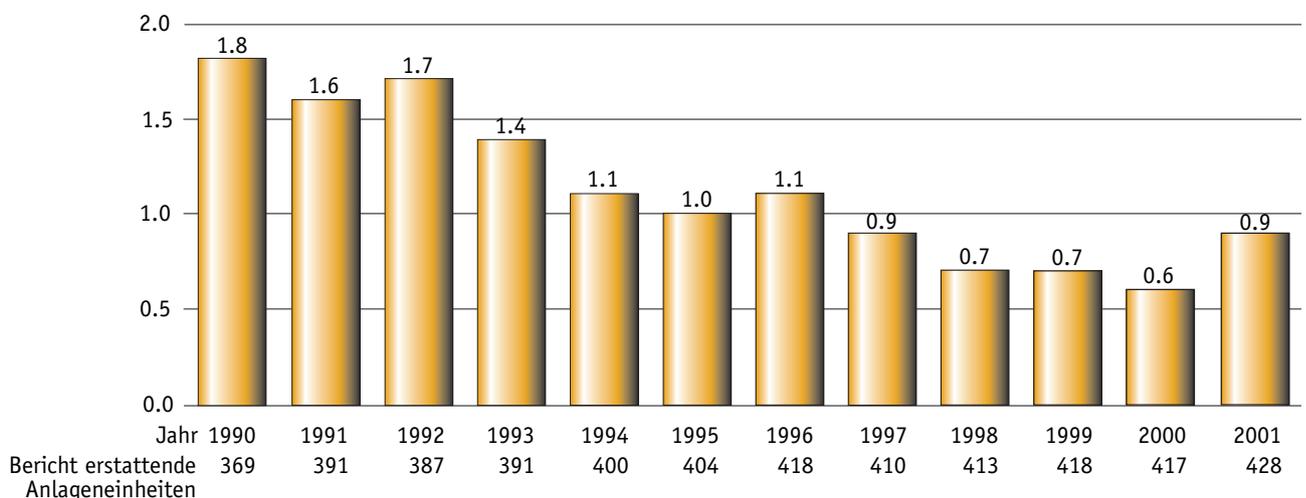
## Betriebserfahrungen

Viele Informationen und Erkenntnisse wurden in weltweit über 10 000 Reaktorjahren an Betriebserfahrung gewonnen. Diese Erfahrungswerte werden routinemäßig mittels Datenbanken und

Berichten von internationalen Organisationen, durch Fachzeitschriften und in Konferenzen weitergegeben. Ein wichtiges Ergebnis ist die ständige Verbesserung der Betriebssicherheit von Kernanlagen, vor allem in den letzten Jahren. So ist beispielsweise die Zahl nicht geplanter automatischer **Schnellabschaltungen (Scrams)** in den letzten zehn Jahren gesunken, ein Zeichen für eine erhebliche Verbesserung des Anlagenbetriebs (vgl. Abb. 5.3).

Die insgesamt positive Sicherheitsbilanz kommerzieller Kernanlagen wird durch zwei schwere Unfälle getrübt: Three Mile Island (TMI) 1979 in den Vereinigten Staaten und Tschernobyl 1986 in der Ukraine (ehemalige Sowjetunion). Der TMI-Unfall führte zu einer schweren Beschädigung des Reaktorkerns, doch sorgten der Reaktordruckbehälter und die Sicherheitshülle dafür, dass nur Spuren radioaktiver Gase entweichen konnten, die ohne Effekt auf die Bevölkerung blieben. Dem Unfall wurde auf der INES-Skala anschließend die Stufe 5 zugeordnet. Der Unfall von Tschernobyl war in jeder Hinsicht eine Katastrophe und das bisher einzige Ereignis, bei dem (mit Stufe 7) die Stufe 5 überschritten wurde. In Tschernobyl kam es zusammen mit dem Schmelzen des **Kernbrennstoffs**

Abbildung 5.3: Weltweite Quote von nicht geplanten automatischen Reaktorabschaltungen (Zahl pro 7 000 Stunden)



Der kritische Indikator der nicht geplanten automatischen Schnellabschaltungen (*Scrams*) verfolgt über eine Betriebsdauer von etwa einem Jahr (7 000 Stunden) die mittlere Quote der automatischen Schnellabschaltungen. Nicht geplante Schnellabschaltungen führen zu vorübergehenden thermischen und hydraulischen Spitzenwerten, die negative Auswirkungen auf die Anlagensysteme haben können.

Quelle: WANO, 2001 Performance Indicators.

Ein Instrument, das es ermöglicht, die Bedeutung eines nuklearen Ereignisses für die Sicherheit schnell und konsistent anzugeben, ist die Internationale Skala zur Bewertung nuklearer Ereignisse (INES – vgl. Abb. 5.4).

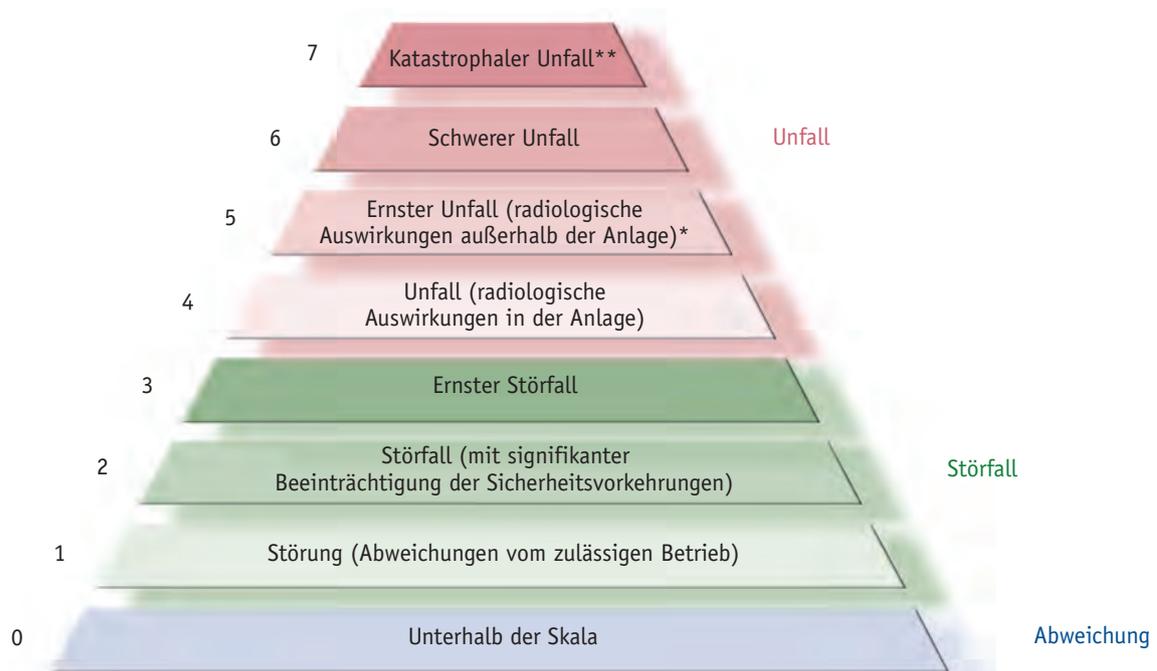
zu einer Dampfexplosion, und das Fehlen eines funktionsfähigen Containment-Gebäudes führte dazu, dass große Mengen festen und gasförmigen radioaktiven Materials weit über Europa verbreitet wurden.

Aus diesen beiden Unfällen konnten wichtige Erfahrungen gewonnen werden. Der TMI-Unfall machte die Notwendigkeit deutlich, menschliches Verhalten stärker zu berücksichtigen und insbesondere die Qualifikation und Ausbildung des Bedienpersonals, die Notfallschutzmassnahmen und die Kommunikation mit der Öffentlichkeit zu verbessern. Infolge des Tschernobyl-Unfalls und der Offenlegung der Schwachpunkte der RBMK-Reaktorbauart (ein Reaktortyp, der in den OECD-Ländern nicht verwendet wird) wurde die Bedeutung der Sicherheitskultur erkannt. Der Unfall zeigte, dass eine unzureichende Sicherheitskultur beim Bedienpersonal – aber auch im Managementbereich – zusammen mit externen Einflüssen zu einem betrieblichen Verhalten führen konnte, bei dem jede einzelne Ebene des Mehrstufenkonzepts durchbrochen wurde.

## Konsequenzen der Markt deregulierung für die Sicherheit

In jüngster Zeit hat sich die Tendenz zur Öffnung der Elektrizitätsmärkte in Hinblick auf eine wettbewerbsgerechte Versorgung und Preisgestaltung verstärkt. Wenn auch kaum Zweifel daran bestehen, dass die Deregulierung der Märkte die Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung verbessern wird, sind ihre Auswirkungen auf die Reaktorsicherheit noch klärungsbedürftig. Erste Erfahrungen zeigen, dass die Einhaltung sicherheitstechnischer Vorschriften nicht im Widerspruch zu einem wirtschaftlich konkurrenzfähigen Betrieb der Anlage steht, wenngleich durch strenge Aufsicht von Seiten einer unabhängigen Instanz sicherzustellen ist, dass dies auch weiterhin der Fall sein wird. Die Aufsichtsbehörden werden den sich ändernden Marktbedingungen wahrscheinlich durch die Weiterentwicklung und Anpassung von Vorschriften und Ausbildung des Personals Rechnung tragen müssen, um sicherzu-

Abbildung 5.4: Die internationale INES-Skala zur Bewertung nuklearer Ereignisse



\* Three Mile Island, USA, 1979

\*\* Tschernobyl, Ukraine, 1986

stellen, dass eine wirksame Aufsicht erhalten bleibt, die aber gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit des Betreibers auf einem offenen Markt nicht beeinträchtigt.

## Sicherheitsaspekte künftiger Reaktoren

In den nächsten Jahrzehnten könnten neue Reaktortypen eingeführt werden, um mit anderen Stromquellen zu konkurrieren. Diese modernen Reaktortypen werden den Anspruch haben, die Stromerzeugungskosten zu senken und gleichzeitig den derzeitigen Stand der Sicherheit zu wahren bzw. zu verbessern. Für die nächste Generation von **Kernreaktoren** wurden verschiedene Konzepte vorgeschlagen, die derzeit noch untersucht werden (vgl. Kapitel 10). Einige sicherheitsbezogene Aspekte lassen sich folgendermaßen beschreiben:

- Ausdrückliche Berücksichtigung schwerer Unfälle bei der Auslegung;
- Wirksame Verhinderung schwerer Unfallabläufe durch Nutzung inhärenter Sicherheitsmerkmale;
- Wesentliche Reduktion oder Verhinderung der Freisetzung großer Mengen radioaktiven Materials selbst bei einem schweren Unfall;
- Verbesserung der Betriebsfähigkeit und Wartungsfreundlichkeit durch weitgehenden Einsatz der Digitaltechnik;
- Verringerung der Systemkomplexität und der Möglichkeiten menschlichen Versagens.

All diese Maßnahmen könnten bei erfolgreicher Umsetzung dazu führen, dass die Schutzmaßnahmen, die innerhalb und außerhalb einer Anlage zu treffen sind (z.B. Pläne für die Evakuierung der Bevölkerung), eingeschränkt werden können und dennoch eine Verbesserung gegenüber dem gegenwärtigen Sicherheitsstand erreicht wird.

### Weiterführende Informationen

Vergleiche die Literaturhinweise im Kapitel „Weiterführende Informationen“ wegen eingehenderer Informationen über:

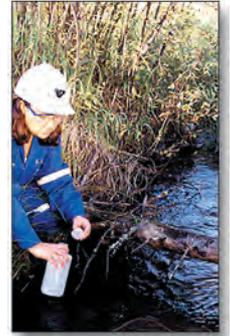
- **Grundsätze nuklearer Sicherheit**, vgl. 5.1 und 5.3.
- **nukleare Sicherheitskultur**, vgl. 5.4 und 5.5.
- **Internationale Skala zur Bewertung nuklearer Ereignisse INES** (*International Nuclear Event Scale*), vgl. 5.6.
- Ursachen des **Tschernobyl-Unfalls** und seine radiologischen und gesundheitlichen Folgen, vgl. 5.7 und 6.1.
- **Betriebserfahrungen** und gewonnene Erkenntnisse, vgl. 5.8.
- **Auswirkungen der Marktregulierung**, vgl. 5.9 und 5.10.
- **die Sicherheitsaspekte künftiger Kernreaktoren**, vgl. 5.11.



# Strahlenschutz

*Strahlung ist überall gegenwärtig. Sie hat sich für medizinische und industrielle Zwecke als wertvoll erwiesen. Gleichzeitig ist Strahlung aber auch eines der am besten untersuchten Gesundheitsrisiken, und der Kenntnisstand zu Strahlenrisiken verbessert sich ständig. Es gibt zahlreiche Arten von Strahlung, von denen einige schädlicher sind als andere; es gibt aber auch viele Wege, Schutz bei der Erzeugung von Strahlung und ihrer Nutzung zu gewährleisten.*

*Der Strahlenschutz von Bevölkerung, Umwelt und Arbeitskräften ist eines der obersten Sicherheitsziele der Kernkraftindustrie. Die Konzepte des Strahlenschutzes basieren auf drei Grundsätzen: Rechtfertigung der Anwendung, Optimierung des Schutzes und Begrenzung der Exposition.*



Im Universum ist radioaktive **Strahlung** allgegenwärtig, auch auf der Erde und bei den auf ihr heimischen Lebewesen. Seit der Entdeckung der radioaktiven Strahlung gegen Ende des neunzehnten Jahrhunderts wurden viele Einsatzbereiche für Strahlen und **Radioaktivität** gefunden und auch genutzt.

Die medizinische Wissenschaft war eines der ersten Gebiete, in denen die den Strahlen eigene Fähigkeit, Materie zu durchdringen, genutzt wurde; der Einsatz von **Röntgenstrahlen** revolutionierte die Erforschung des menschlichen Körpers und medizinische Behandlungsmethoden. Doch schon sehr bald erkannte man, dass mit den Vorteilen auch Risiken verbunden waren und somit die Notwendigkeit bestand, die Menschen vor Strahlung zu schützen. Seither geht es beim Einsatz von Strahlen stets darum, Nutzen und Risiko gegeneinander abzuwägen. Um dieses Abwägen zu erleichtern, wurden die Theorie des Strahlenschutzes, seine Ziele und rechtliche Regelung sowie seine praktische Anwendung weiterentwickelt, jeweils angepasst an den sich wandelnden Wissensstand über Strahlungsquellen, ihre Einsatzmöglichkeiten und -wirkungen.

## Wissenschaftlicher und medizinischer Hintergrund

### Strahlungsarten

Strahlung ist Energie, die in Form subatomarer Teilchen oder elektromagnetischer Wellen Raum bzw. Materie durchdringt. Radioaktivität ist die spontane Veränderung des Kerns eines instabilen Atoms, welche zur Abgabe von radioaktiver Strahlung führt. Diese Veränderung des Kerns wird häufig als „Zerfall“ von Atomen bezeichnet. Radioaktive Atome werden oft auch „Radionuklide“ oder „radioaktive **Isotope**“ eines chemischen Elements genannt.

Ist die Energie der Strahlung – sei es Teilchen- oder elektromagnetische Strahlung – ausreichend hoch, um Elektronen aus der Elektronenhülle von Atomen herauszulösen und diese damit zu ionisieren, d.h. positiv oder negativ zu laden, spricht man von **ionisierender Strahlung**. Die aus dieser Wechselwirkung resultierenden Ionen können chemische Veränderungen auslösen, bei denen die betroffenen Zellen geschädigt werden können.

**Kosmogene Radionuklide** sind radioaktive Isotope, die durch die Wechselwirkung kosmischer Strahlung mit dem Kern eines Atoms erzeugt wurden. Sie können in der Erdatmosphäre oder im Erdboden vorhanden sein, oder sie können in Meteoriten und sonstiger extraterrestrischer Materie entstanden sein, die irgendwann die Erde erreicht hat. Beispiele hierfür sind: Tritium ( $H^3$ , Wasserstoff mit zwei zusätzlichen Neutronen [Halbwertszeit 12,3 Jahre]) und Kohlenstoff-14 (Halbwertszeit 5 730 Jahre), zwei Elemente, die beide in geringen Mengen in jedem Lebewesen vorhanden sind.

**Primordiale Radionuklide** sind Überbleibsel aus der Zeit der Entstehung der Erde und des Universums. Typisch für sie ist ihre Langlebigkeit, so liegt ihre Halbwertszeit zumeist in der Größenordnung von Hunderten von Millionen Jahren. Die wichtigsten Beispiele sind Uran-238 (Halbwertszeit 4 470 Mio. Jahre), Thorium-232 (Halbwertszeit 14 100 Mio. Jahre) und Kalium-40 (Halbwertszeit 1 280 Mio. Jahre).

Beispiele für **ionisierende Strahlung** sind **Alpha-Teilchen**, **Beta-Teilchen** und **Gammastrahlen**. Reicht die Energie der Teilchen- oder elektromagnetischen **Strahlung** nicht zur Ionisierung von Atomen aus, handelt es sich um nicht ionisierende Strahlung. Zu dieser Kategorie gehören beispielsweise Radiowellen, Licht und Mikrowellen.

Ionisierende Strahlung tritt in verschiedenen Formen auf – als Alpha-Teilchen, Beta-Teilchen oder **Neutronen** oder auch in Form elektromagnetischer Strahlen (Gammastrahlen und **Röntgenstrahlen**). Jede der verschiedenen Arten ionisierender Strahlung wirkt auf Materie, einschließlich des menschlichen Körpers, unterschiedlich und jede von ihnen kann durch unterschiedliche Materialien wirksam abgeschirmt werden (vgl. Abb. 6.1).

Alpha-Teilchen werden von einem Atomkern abgegeben und bestehen aus zwei **Protonen** sowie zwei Neutronen. Sie sind mit dem Kern eines Heliumatoms identisch und sind zweifach geladen. Weil sie zudem schwer sind, verlieren sie in Materie besonders schnell Energie. Bereits ein Blatt Papier oder die äußere abgestorbene Hautschicht eines Menschen stoppt diese Teilchen. Alpha-Teilchen gelten nur dann als gesundheitsschädlich, wenn sie von einem Menschen über die Nahrung oder die Atemluft aufgenommen werden und so zu besonders empfindlichen Zellen gelangen.

**Beta-Teilchen** sind vom Kern eines Atoms abgegebene Elektronen. Da sie nur einfach negativ geladen sind, wechselwirken sie weniger als Alpha-Teilchen mit Materie und durchdringen diese daher stärker. Sie werden schon von dünnen Kunststoff- oder Metallschichten abgeschirmt. Auch diese Teilchen sind vor allem dann gefährlich, wenn eine

Betastrahlenquelle mit der Nahrung oder der Atemluft in den Körper aufgenommen wird. Bei genügend hoher Strahlendosis können sie auch Hautschäden verursachen.

Die im Atomkern vorhandenen Neutronen können mittels Stoß oder Spaltung freigesetzt werden. Neutronen sind elektrisch neutrale Teilchen mit ungefähr der gleichen Masse wie ein Proton und wechselwirken, da sie neutral sind, nur schwach mit Materie, durchdringen diese daher sehr leicht und sind nicht leicht abzuschirmen. Den besten Schutz bieten dicke Betonschichten oder Stoffe mit einem hohen Anteil an Wasserstoffatomen, wie z.B. Wasser oder Öl.

Sowohl Gammastrahlen als auch Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen; Gammastrahlen werden vom Atomkern abgegeben, während Röntgenstrahlen durch Abbremsen energiereicher Elektronen entstehen. Bei beiden handelt es sich um Formen energiereicher, mit Materie leicht wechselwirkender elektromagnetischer Strahlung. Sie lassen sich am besten durch dicke Schichten Blei oder andere dichte Materialien abschirmen. Sie sind für Menschen selbst dann gefährlich, wenn sich die Strahlungsquellen außerhalb des menschlichen Körpers befinden.

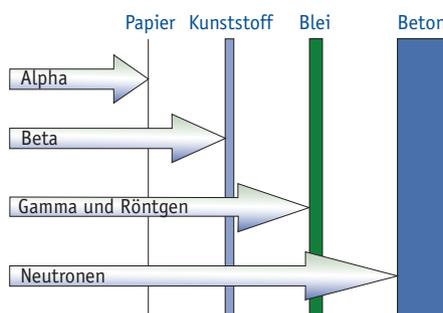
### Strahlungsquellen

Strahlungsquellen lassen sich im Wesentlichen in zwei Kategorien unterteilen: natürliche und zivilisatorische Strahlungsquellen.

### Natürliche Strahlung

Bei der natürlichen Strahlung – sie kann ionisierend oder auch nicht ionisierend sein – lässt sich zwischen „kosmischer“ und „terrestrischer“ Strahlung unterscheiden. **Kosmische Strahlung** kommt aus dem Weltall und entsteht durch verschiedene Prozesse, wie z.B. das Entstehen und Erlöschen von Sternen. Die wichtigste Quelle kosmischer Strahlen ist für die Erdbewohner die Sonne. **Terrestrische Strahlung** kommt von der Erde selbst und entsteht durch den Zerfall der in der Erdkruste (Lithosphäre) enthaltenen primordialen und der aus kosmischer Strahlung entstandenen Radionuklide. Zwei natürliche Elemente, Uran und Thorium, geben während ihres allmählichen Zerfalls, der sich über Millionen von Jahren erstreckt, ionisierende Strahlen ab und werden schließlich zu Blei, das stabil ist und somit keine Strahlung abgibt.

Abbildung 6.1: Durchdringungstiefe verschiedener Strahlungsarten



Quelle: University of Michigan, Vereinigte Staaten.

Eines der Glieder der Uranzerfallsreihe ist Radon, ein Gas, das, sofern es nahe der Erdoberfläche entstanden ist, in die Atmosphäre eintritt. Strahlung geht somit nicht nur unmittelbar von den terrestrischen Quellen aus, sondern ist, je nachdem, welche Mengen und Arten radioaktiver Stoffe in der Region der Erde vorkommen, in der wir uns befinden, in kleineren oder größeren Mengen in der Atemluft enthalten.

Selbst unsere Nahrung ist von Natur aus radioaktiv, denn Pflanzen und Tiere nehmen radioaktive Stoffe aus der Umwelt auf. Infolgedessen enthält der menschliche Körper, und vor allem die Knochen, geringe Mengen radioaktiver Elemente wie Kohlenstoff-14, Kalium-40 und Radium-226. Kalium ist ein Mineral, dem in der Ernährung eine wichtige Rolle zukommt; z.B. enthalten Bananen, die eine reichhaltige Kaliumquelle sind, u.a. das radioaktive Isotop Kalium-40. Tritium, ein in der Natur vorkommendes wie auch künstlich hergestelltes radioaktives Wasserstoff-Isotop ist Bestandteil aller Wasservorkommen der Erde und findet sich ebenfalls in geringen Mengen im menschlichen Körper, meist im Weichteilgewebe und im Blutkreislauf.

### Zivilisatorische Strahlung

Im Zuge der Erschließung der Kernenergie und der Weiterentwicklung der Wissenschaft sind verschiedene neue, durch den Menschen generierte Strahlenquellen entstanden. Durch die anfangs oberirdisch durchgeführten Kernwaffentests wurden große Mengen radioaktiver Stoffe in hohen Schichten der Erdatmosphäre freigesetzt, von wo aus sie sich global verteilt haben. Der überwiegende Teil der Bevölkerung der nördlichen sowie auch ein Teil der Bevölkerung der südlichen Hemisphäre war und ist der von diesen Stoffen ausgehenden Strahlung ausgesetzt.

Die Entwicklung der Kernkraft seit den fünfziger Jahren hat ebenfalls dazu geführt, dass in verschiedenen Phasen des Brennstoffkreislaufs, größtenteils bei der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente, in geringerem Maße aber auch bei Brennstoffherstellung und Stromerzeugung, Radioaktivität an die Atmosphäre abgegeben und ins Wasser eingeleitet wird.

Strahlung wird seit ihrer Entdeckung intensiv für medizinische Zwecke genutzt. Beim Einsatz von Röntgenstrahlen ist der Mensch einer ganz erheblichen Dosis ionisierender Strahlung ausgesetzt.

Eine jüngere Entwicklung ist die Verwendung von Echtzeit-Teleröntgenaufnahmen im Operationssaal, um den operierenden Arzt bei der Positionierung der chirurgischen Instrumente zu unterstützen. Weitere hochspezialisierte medizinische Einsatzbereiche für Gammastrahlen sind die Computertomographie (CT) und die Positronen-Emissionstomographie (PET).

Strahlen werden auch zu therapeutischen Zwecken eingesetzt, gerade weil sie Zellen – z.B. Tumorzellen – abtöten können. Strahlungsquellen können chirurgisch in Tumore implantiert werden, und flüssige Strahlungsquellen lassen sich in die Blutbahn injizieren, damit sie sich in den anvisierten Zellen konzentrieren – ein Verfahren, das zur Heilung von Schilddrüsenkrebs angewandt wird. All diese Verfahren stellen Strahlungsquellen dar, denen sowohl die Patienten als auch das medizinische Personal ausgesetzt sind.

### Höhe der Strahlenexposition

Welchen Strahlungsdosen sind Menschen normalerweise ausgesetzt, und welches sind die wichtigsten Quellen? Der wissenschaftliche Ausschuss der VN zur Untersuchung der Auswirkungen der atomaren Strahlung (UNSCEAR) sammelt seit 1955 Informationen hierüber und erstellt etwa alle vier Jahre einen Bericht, in dem die Durchschnittswerte der aus allen Quellen resultierenden Strahlung zusammengefasst sind. Abbildung 6.2 gibt die Ergebnisse des letzten Berichts, UNSCEAR 2000, wieder.

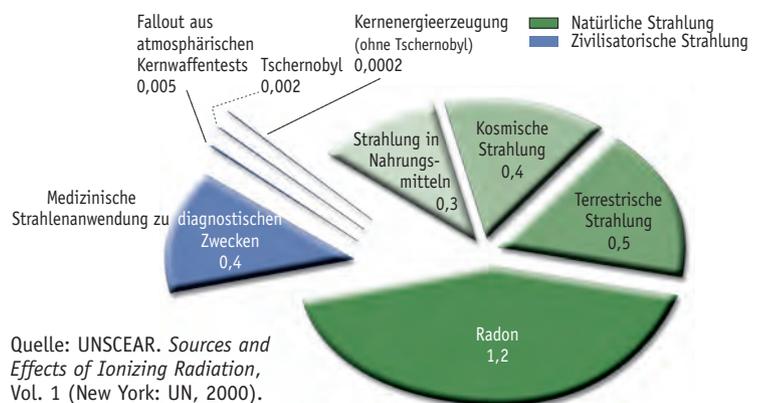
Diesen verschiedenen natürlichen und künstlichen Strahlenquellen kann der Mensch freiwillig oder unfreiwillig ausgesetzt sein.

Ein Joule entspricht der Energie, die erforderlich ist, um die Temperatur eines Gramms Wasser um 0,24°C zu erhöhen.

Die Begriffe Dosis und Exposition sind im Allgemeinen gleichbedeutend und austauschbar; bei beiden handelt es sich um gängige Ausdrücke.

Jeder Mensch kommt im täglichen Leben mit nicht ionisierender elektromagnetischer Strahlung in Berührung. Beispiele für nicht ionisierende Strahlen sind das für den Menschen sichtbare Licht sowie Radio- und Fernsehwellen. Sie gehen aber auch vom Computerbildschirm aus und erwärmen unsere Nahrung im Mikrowellenherd. Diese Strahlen werden auf Grund ihrer geringen Energie als nicht ionisierend bezeichnet.

Abbildung 6.2: Typische Quellen der allgemeinen Strahlenexposition (in mSv pro Jahr)



Im Körper aufgenommene Radionuklide können dort eine Zeitlang verweilen, bis sie durch biologische Funktionen den Körper verlassen haben oder auf Grund ihrer Radioaktivität zerfallen sind. Um der durch diese Radionuklide bedingten Strahlendosis Rechnung zu tragen und sicherzustellen, dass die damit verbundenen Risiken nicht unterschätzt werden, wird zu Genehmigungszwecken angenommen, dass die Strahlenexposition, die in den 50 Jahren nach Aufnahme eines Radionuklids eintreten wird, bereits im Jahr der Inkorporation eintritt. Diese errechnete innere Strahlenexposition wird als Folgedosis bezeichnet.

## Wirkungen der Strahlenexposition

Der wichtigste Effekt von Strahlen, die Materie (wie z.B. menschliches Gewebe) durchdringen, ist die Abgabe von Energie an die jeweilige Materie. Die **Strahlung** verliert durch die Wechselwirkung mit der Materie Energie und die Materie nimmt diese Energie auf. Die zur Messung der Strahlenexposition verwendete Einheit basiert daher auf der absorbierten Energiemenge. Die (auch als „Energiedosis“ bezeichnete) Strahlenexposition wird heute in **Gray (Gy)** gemessen. Ein Gray ist definiert als die Abgabe von einem Joule Energie an ein Kilogramm Materie.

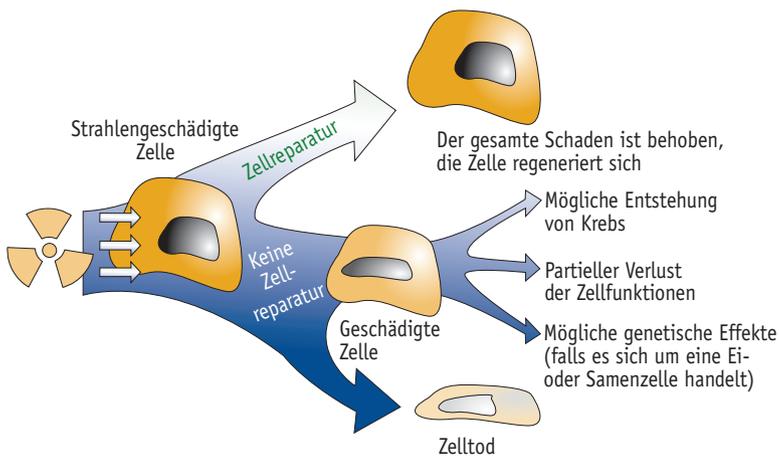
Manche Arten ionisierender Strahlung sind schädlicher als andere. Zum Beispiel geben **Alpha-teilchen** auf Grund ihrer großen Masse und elektrischen Ladung generell über sehr kurze Entfernungen große Energiemengen ab und können daher erheblichen Schaden anrichten, wenn sie empfindliches biologisches Gewebe durchdringen. **Neutronen** wechselwirken dagegen sehr selten mit Atomen; ist dies aber doch der Fall, so kann die Wirkung signifikant sein. Aus diesen physikalischen Gründen wurden den verschiedenen Strahlungsarten unterschiedliche biologische Wichtungsfaktoren zugeordnet, die dazu dienen, eine Beziehung zwischen der physikalischen Energieabgabe und der Schwere des hierdurch verursachten biologischen Schadens herzustellen.

Die Schwere des biologischen Schadens wird in **Sievert (Sv)** gemessen. Diese Einheit ist gleich der übertragenen Energiedosis in Gray, die mit dem

entsprechenden biologischen Wichtungsfaktor multipliziert wird; je höher dieser Faktor ist, desto schwerer ist der zu erwartende Schaden. Für Alpha-teilchen beträgt dieser Faktor 20, für Neutronen liegt er je nach deren Energie im Bereich von 5-20, für Gamma-, Beta- und **Röntgenstrahlen** beträgt der Faktor 1.

Bei der Abschätzung des Schadens ist auch die Frage zu berücksichtigen, ob der ganze Körper der Strahlung ausgesetzt ist oder nur ein Teil davon, und falls ja, welcher Körperteil. Die Strahlenempfindlichkeit ist je nach Gewebeart (z.B. Lunge, Leber, Knochen) unterschiedlich. Beispielsweise gehen von Uran verschiedene Strahlungsarten aus, von denen die Alphateilchen biologisch am wirksamsten sind. Die Alphastrahlung ist nicht in der Lage, die Haut eines Menschen zu durchdringen, so dass Hautkontakte mit Uranstaub im Allgemeinen ungefährlich sind. Wird dieser Staub aber eingeatmet und gelangt in die Nähe des empfindlichen Lungengewebes, so kann es zu schweren Schäden der bestrahlten Zellen kommen. In diesem Fall wird hauptsächlich ein einziges Gewebe bestrahlt, und Energie wird ausschließlich in diesem Gewebe deponiert. Um eine bestimmte Gewebeeexposition mit der Exposition anderer Gewebe vergleichen zu können, haben die Wissenschaftler Gewebewichtungsfaktoren entwickelt. Mit Hilfe dieser Faktoren können die biologischen Folgen einer Ganzkörperexposition durch einen bestimmten Strahlentyp mit denen der Exposition eines einzelnen Organs durch einen anderen Strahlentyp miteinander verglichen und addiert werden. Hierdurch ist es möglich, die biologischen Wirkungen verschiedener Strahlenexpositionsarten auf ein und derselben Skala abzubilden.

Abbildung 6.3: Potenzielle biologische Folgen einer strahlenbedingten Zellschädigung



## Biologische Wirkungen der Strahlenexposition

Von allen gesundheitsgefährdenden Toxinen ist Strahlung eines der am besten untersuchten. Strahlen lassen sich weder ertasten noch schmecken oder riechen, sind aber – anders als z.B. Krebs erregende chemische Stoffe – sehr leicht nachweisbar und quantifizierbar. Auch der physikalische Vorgang, bei dem Strahlung Materie durchdringt, ist bestens bekannt, so dass die Wirkungen, die unterschiedliche Strahlendosen auf den Menschen haben, durchaus wissenschaftlich erforscht werden können.

Der strahlenphysikalische Vorgang ist aber nur der Anfang. Genauer betrachtet, überträgt **ionisierende Strahlung** Energie an die Atome der Substanz, die sie durchdringt. Wasser ist das im menschlichen Körper am häufigsten vorkommende Molekül und wird unter Strahlungseinwirkung häufig ionisiert, d.h. es wird chemisch außergewöhnlich reaktiv. Befindet sich das betreffende Wassermolekül nun zufällig in der Nähe eines Desoxyribonukleinsäure-Moleküls (DNA) einer menschlichen Gewebezelle, so kann dieses geschädigt werden – DNA dient der Zellenreproduktion. Eine von Strahlung geschädigte Körperzelle kann im Wesentlichen auf dreierlei Art und Weise reagieren (vgl. Abb. 6.3):

- sie regeneriert sich selbst erfolgreich;
- es gelingt ihr nicht, sich zu regenerieren, und es kommt zum Zelltod;
- sie kann sich nicht regenerieren, stirbt aber auch nicht ab.

Langfristige Effekte sind potenziell im dritten Fall möglich; der Zellschaden kann dazu führen, dass die Zelle sich zu einer Krebszelle entwickelt. Wenn es sich zudem um eine der Fortpflanzung dienenden Zelle – d.h. eine Ei- oder Samenzelle –

handelt, kann die Beschädigung der DNA potenziell zu einer Erbgutveränderung führen. Diesen beiden potenziellen Effekten gilt das Hauptinteresse der auf dem Gebiet des Strahlenschutzes tätigen Wissenschaftler.

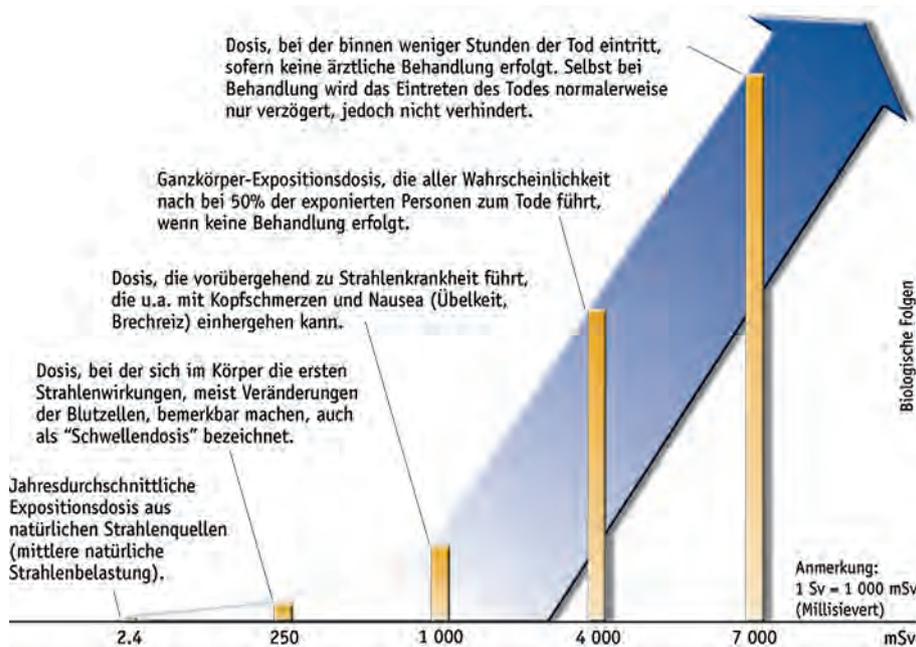
Die möglichen Wirkungen einer Exposition des Menschen durch ionisierende Strahlen lassen sich wie folgt unterteilen:

- Soforteffekte, die gleich nach der Strahlenexposition auftreten – die so genannten **deterministischen Effekte**;
- verzögerte Effekte, die sich zuweilen erst nach vielen Jahren zeigen – die so genannten **stochastischen Effekte**.

Der Schwellenwert der Strahlenexposition, die beim Menschen deterministische Wirkungen hervorruft, liegt bei etwa 0,25 Sievert (250 mSv). Je nachdem, wie weit die effektive Dosis über diesem Schwellenwert liegt, treten unterschiedliche Arten biologischer Reaktionen auf, wobei die Schwere der Wirkungen mit zunehmender Dosis steigt (vgl. Abb. 6.4).

Unfälle, die zu starken Strahlenexpositionen führen, sind zum Glück sehr selten. Auch wurden und werden bei der medizinischen Behandlung von

Abbildung 6.4: Deterministische Strahlenwirkungen bei hoher Dosis



Menschen, die hohen Strahlendosen ausgesetzt waren, weiterhin große Fortschritte erzielt.

Stochastische Wirkungen müssen nicht immer eintreten, doch erhöht sich ihre Wahrscheinlichkeit mit zunehmender Strahlenexposition. Hervorzuhebende stochastische Wirkungen sind Krebserkrankungen, wie z.B. Leukämie. Bei der Exposition von Fortpflanzungszellen kann es theoretisch zu Erbgutveränderungen kommen, was jedoch in keiner der bislang untersuchten Bevölkerungsgruppen, wie z.B. den Überlebenden von Hiroshima, Nagasaki oder den Tschernobyl-„Liquidatoren“, beobachtet wurde.

### Risiken bei hoher Strahlendosis

Die Effekte einer kurzen Exposition mit hoher Strahlendosis sind recht gut erforscht. Die 100 000 strahlenexponierten Überlebenden des Atombombenangriffs auf Japan stehen seit nunmehr über 60 Jahren unter ärztlicher Beobachtung. Etwa 20% der Todesfälle in dieser Bevölkerungsgruppe waren auf verschiedene Arten von Krebserkrankungen zurückzuführen – das entspricht ungefähr dem Anteil krebsbedingter Sterbefälle im Durchschnitt aller ähnlich zusammengesetzten Bevölkerungsgruppen Westeuropas. Ein Vergleich mit ähnlichen Bevölkerungsgruppen Japans, die nicht der damaligen Strahlendosis ausgesetzt waren, führte jedoch zu dem Schluss, dass etwa 400 krebsbedingte Todesfälle in der Gruppe der Überlebenden des Atombombenangriffs tatsächlich der radioaktiven **Strahlung** zuzuschreiben waren.

Mit dem vorhandenen Datenmaterial von Unfällen mit hoher Strahlendosis, oder über die Folgen der Atombomben in Japan, konnte eine Dosis-Wirkungs-Kurve entwickelt werden, die eine Korrelation zwischen den berechneten individuellen Strahlendosen und der zu erwartenden Zahl krebsbedingter Todesfälle herstellt. Die Kurve wird dazu verwendet, das mit einer gegebenen Strahlendosis verbundene zusätzliche Krebsrisiko zu ermitteln. Je **Sievert** Strahlenexposition erhöht sich das „normale“ 20%ige Krebsrisiko um 5%, d.h. das Risiko einer krebsbedingten Verkürzung der statischen Gesamtlebenszeit erhöht sich für 1 000 mSv Strahlenexposition von 20% auf 25%.

### Risiken bei geringer Strahlendosis

Wie bei wissenschaftlichen Studien allgemein sind auch in Bezug auf biologische Strahlenwirkungen einige Aspekte gut bekannt, andere

dagegen weniger. Die bislang zu Grunde gelegten Statistiken basieren auf relativ hohen Dosen, und es ist bekannt, in welchem Maße ein erhöhtes Krebsrisiko auf hohe Strahlendosen zurückzuführen ist. Umstritten ist hingegen, ob auch geringe Strahlendosen, denen wir z.B. durch die natürliche Hintergrundstrahlung oder denen bestimmte Berufsgruppen bei Ausübung ihres Berufs möglicherweise ausgesetzt sind, ähnlich schwere Wirkungen haben können.

Statistische Daten über Personengruppen, die hohen Strahlendosen ausgesetzt sind oder waren, zeigen, dass ab einem Wert von etwa 100 mSv über dem des natürlichen Strahlungshintergrunds eindeutig eine Beziehung zwischen Strahlendosis und erhöhtem Krebsrisiko besteht. Für Strahlenexpositionen unterhalb dieses Wertes haben die Studien bislang keine statistisch signifikanten Belege über schädliche Wirkungen erbracht. In den zahlreichen Studien über Bevölkerungsgruppen, die Strahlendosen unter 100 mSv ausgesetzt waren, wurde keine Erhöhung des Krebsrisikos gegenüber grundsätzlich ähnlichen, jedoch nicht dieser „Extra“-Strahlendosis ausgesetzten Gruppen beobachtet.

Da wir aber wissen, dass Strahlung bei höherer Dosis Krebs verursachen kann und unsere Kenntnisse über die relevanten biologischen Vorgänge noch lückenhaft sind, dürfen wir vernünftigerweise nicht davon ausgehen, dass Krebs *nicht* durch geringe Strahlendosen entstehen kann. Aus Vorsichtsgründen wird deshalb grundsätzlich unterstellt, dass jede empfangene Strahlendosis, so gering sie auch sein mag, ein gewisses Risiko birgt, das proportional zur Höhe der Dosis ist. Mit anderen Worten wird davon ausgegangen, dass kein absoluter Sicherheitsschwellwert existiert, oder anders gesagt, dass es keine noch so geringe Dosis gibt, bei der überhaupt kein Risiko besteht.

Diese beiden Annahmen, d.h. erstens dass jede Strahlendosis mit einem gewissen Risiko verbunden ist und dass zweitens das Risiko proportional zur Höhe der Dosis ist, werden zusammengefasst als „**LNT-Hypothese**“ (Lineares Modell ohne Grenzwert). Diese Hypothese, die dem Vorsichtsprinzip folgt, bildet eine wichtige Grundlage für die Konzeption und Anwendung von Strahlenschutzvorschriften. Da es keine schlüssigen wissenschaftlichen Beweise gibt, die für oder gegen ein Krebsrisiko bei niedrigen Dosen sprechen, wird ein Ansatz zu Grunde gelegt, der auf dem Vorsichtsprinzip und eher pessimistischen Annahmen basiert.

## Das System des Strahlenschutzes und seine rechtlichen Grundlagen

Ziel des Strahlenschutzes ist es, Menschen vor potenziell schädlichen Strahlenwirkungen zu schützen, dabei aber Tätigkeiten zuzulassen, die zwar mit einer Strahlenexposition verbunden sind, aber dem Menschen Nutzen bringen.

Das heute weltweit geltende Strahlenschutzsystem hat sich seit der Gründung der Internationalen Kommission für Strahlenschutz (ICRP) auf dem Internationalen Kongress über Radiologie von 1928 aus der Anwendung der aus zahlreichen Studien gewonnenen Erkenntnisse über strahlenexponierte Bevölkerungsgruppen der oben genannten Art sowie aus Untersuchungen über die Strahlenwirkungen auf Pflanzen, Insekten und Tiere entwickelt. Dieses weltweite System stützt sich auf folgende Grundsätze:

- **Rechtfertigung** einer Strahlenanwendung;
- **Optimierung** des Strahlenschutzes;
- **Begrenzung** der individuellen Strahlenexposition.

Dieses in den Empfehlungen der Internationalen Kommission für Strahlenschutz (ICRP) kodifizierte Konzept wurde praktisch in allen nationalen Gesetzgebungen umgesetzt. Die ICRP tritt einmal jährlich zusammen und veröffentlicht auf Grund neuer Entwicklungen und Erkenntnissen erforderliche Empfehlungen. Das bisherige Strahlenschutzsystem unterliegt derzeit einem Wandel und wird voraussichtlich im Zuge einer neuen Reihe von ICRP-Empfehlungen, deren Veröffentlichung für 2007 geplant ist, grundsätzlich überarbeitet werden. Zu den vorgesehenen Verbesserungen gehört u.a. die ausdrückliche Erweiterung des Strahlenschutzes auch auf andere Lebewesen als den Menschen.

Die ICRP-Empfehlungen haben auch in internationalen Normen, namentlich den Sicherheitsgrundnormen (BSS) der IAEO, sowie in den Richtlinien der Europäischen Union (z.B. 96/29/EURATOM), ihren Niederschlag gefunden.

### Rechtfertigung

Diesem Grundsatz zufolge sind Strahlenanwendungen nur dann zulässig, wenn sie sich rechtfertigen lassen. Für derartige Entscheidungen

dürfen nicht allein wissenschaftliche Kriterien herangezogen werden, sondern sie müssen unbedingt auch gesellschaftliche, wirtschaftliche und ethische Faktoren einbeziehen. Wissenschaftler können die Risiken abschätzen und Informationen liefern; letztlich obliegt es jedoch der gesamten Gesellschaft in demokratischen Prozessen zu entscheiden, ob eine bestimmte mit Risiken verbundene Praxis gerechtfertigt ist. Dies ist im Wesentlichen eine Werte- und Ermessensfrage. Das Prinzip der Rechtfertigung ist auf Einzelfallbasis anzuwenden, wobei der springende Punkt darin besteht, dass diejenigen, die über die Strahlenexposition zu entscheiden haben, bereit sein müssen, ihre Gründe hierfür darzulegen und andererseits zu akzeptieren, dass diese Gründe u.U. bestritten werden.

So gilt z.B. der Einsatz von **Röntgenstrahlen** in der Medizin generell als gerechtfertigt, doch wird vom medizinischen Personal erwartet, dass es vor jeder Strahlenanwendung deren potenzielle Nutzeffekte beurteilt. Dabei ist die sehr leichte Erhöhung des Krebsrisikos gegen den Nutzen abzuwägen, der von einer exakten Diagnose zu erwarten ist. Andererseits wurde in manchen Ländern der Nutzen des Kernenergieeinsatzes zur Stromerzeugung angesichts der damit verbundenen Risiken in Frage gestellt, was sich in entsprechenden staatlichen Politikentscheidungen niederschlug.

### Optimierung

Das Prinzip der Optimierung des Schutzes gilt nur für Tätigkeiten, die grundsätzlich für gerechtfertigt befunden werden. Diesem Prinzip zufolge muss jede aus den betreffenden Tätigkeiten resultierende Strahlenexposition so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar sein (**ALARA-Prinzip**). In der Praxis beinhaltet das ALARA-Prinzip die zwei Fragestellungen: „Wurde genug getan, um die Exposition in diesem spezifischen Fall so weit wie möglich zu reduzieren? Wäre es vielleicht möglich und vernünftig, die Exposition noch weiter zu verringern?“ Zu beachten ist, dass das mit der Optimierung des Schutzes angestrebte Ziel bzw. das ALARA-Prinzip nicht darin besteht, die Exposition auf null zu senken, sondern vielmehr sicherzustellen, dass die Risiken unter den jeweiligen spezifischen Umständen auf ein annehmbares Niveau reduziert werden. Was annehmbar ist, wird nach wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Kriterien beurteilt.

Dies kann mit verschiedenen Mitteln erreicht werden, z.B. durch Minimierung der Größe der Strahlenquelle, durch Begrenzung der Expositionsdauer, Maximierung der Entfernung zwischen exponierter Person und Strahlenquelle, Benutzung von Abschirmungen usw. Auch die Zahl der jeweils exponierten Personen und die geographische Verteilung der Strahlendosen (z.B. Strahlenexposition der Bevölkerung in einem bestimmten geographischen Gebiet) sind wichtige Gesichtspunkte, die bei der **Optimierung** zu berücksichtigen sind.

### **Dosisbegrenzung**

Über den Grundsatz der Optimierung der Strahlendosis anhand der **ALARA**-Kriterien hinaus darf die individuelle künstliche Strahlenexposition nicht die vorgeschriebenen Dosisgrenzwerte überschreiten. Die Dosisgrenzwerte für die Bevölkerung

allgemein wurden national und international auf 1 mSv jährlich festgesetzt. Für beruflich strahlenexponierte Personen gilt international ein Dosisgrenzwert von insgesamt 100 mSv innerhalb eines Zeitraums von fünf Jahren, wobei in keinem dieser fünf Jahre 50 mSv überschritten werden dürfen. In einigen Ländern wurde von der zuständigen Behörde für beruflich exponierte Personen ein strengerer Grenzwert von 20 mSv pro Jahr vorgeschrieben. In der Praxis sorgen jedoch die strikte Anwendung des ALARA-Prinzips und Vorschriften wie die Begrenzung der Einleitung radioaktiver Stoffe in Abluft oder Abwasser dafür, dass die effektive wie auch die durchschnittliche Strahlendosis normalerweise weit unter diesen Grenzwerten liegt.

Wie bei der Geschwindigkeitsbegrenzung auf Autobahnen stellt auch der Grenzwert für die Strahlendosis kein Limit dar, oberhalb dessen verheerende Folgen zu erwarten sind oder unterhalb dessen Folgen dieser Art ausgeschlossen sind. Es handelt sich lediglich um einen Wert, der nach Auffassung der Bevölkerung bzw. der Regierung eines Landes normalerweise besser nicht überschritten werden sollte. Wie viele andere Entscheidungen in Sachen Strahlenschutz, basiert auch die Wahl dieses Grenzwerts auf dem derzeit besten wissenschaftlichen Kenntnisstand über die Risiken, ist aber letztlich gleichwohl eine Ermessensentscheidung.

Zusammenfassend bedeutet dies, dass der Strahlenschutz bei allen gerechtfertigten Strahlenanwendungen so optimiert werden muss, dass die Strahlenexposition einer Person so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar ist und überdies unterhalb der vorgeschriebenen Grenzwerte liegt.

### **Strahlenschutz in kerntechnischen Anlagen**

Da es sich bei Uran und seinen Tochterisotopen um natürliche strahlende Stoffe handelt, und da bei der **Kernspaltung** Radioaktivität entsteht und die bei der Kernspaltung erzeugten Abfälle ebenfalls radioaktiv sind, bildet der Strahlenschutz ein zentrales Sicherheitsanliegen der Kernindustrie. Die Probleme des Strahlenschutzes sind jedoch je nach Anlage des Kernbrennstoffkreislaufs unterschiedlich.

Zum Beispiel sind die Bergleute beim Uranabbau uranhaltigem Staub und Uranfolgeprodukten ausge-

Für alle Kernanlagen sind ständige Umweltkontrollen vorgeschrieben.



setzt. Da Lungenschäden entstehen können, wenn **Alphateilchen** emittierende Radionuklide in die Atemwege gelangen, sind geeignete Grubenlüfteranlagen und Atemschutzgeräte für die Arbeiter erforderlich. Diese Radionuklide sind auch die wichtigste potenzielle Gefahrenquelle während sämtlicher Prozesse zur Erzeugung von **Kernbrennstoff** bzw. Brennelementen.

In Kernkraftwerken wird die Strahlenexposition des Personals im Allgemeinen durch Radionuklide wie Kobalt-60 verursacht, dessen Gammastrahlung die Materie stärker durchdringt. Diese Strahlung bleibt innerhalb der Anlage auf die Rohrleitungen und die direkt der Kühlung des Reaktorkerns dienenden Systeme begrenzt. Für das Personal stellt sie in der Regel nur während der Wartungsarbeiten an diesen Systemen eine Gefahr dar. Während des Normalbetriebs sind diese jedoch abgeschirmt, und das Personal bleibt von den Gefahrenzonen geschützt. Das Wartungspersonal wird während der Arbeiten durch Abschirmungen sowie dadurch geschützt, dass die einzelnen Arbeitsgänge zweckmäßig aufgeteilt und so geplant werden, dass die Zeit, die der Einzelne in der Nähe strahlender Quellen verbringt, auf ein Minimum beschränkt ist.

Expositionsgefahren beim Abfallmanagement, z.B. beim Umgang mit abgebrannten Brennelementen, gehen zumeist von **Gammastrahlen** emittierenden Radionukliden aus. Eine bedeutende Strahlenquelle bei LLW (Low Level Waste), d.h. schwachaktiven Abfällen, und ILW (Intermediate Level Waste), d.h. mittelaktiven Abfällen, ist Kobalt-60. Die Hauptstrahlenquellen bei hochaktiven Abfällen und abgebrannten Brennelementen sind **Spaltprodukte**, wie z.B. Cäsium-137 und Strontium-90. Die durch die Abfallbehandlung bedingte Strahlenexposition wird durch den Einsatz von Spezialeinrichtungen, -ausrüstungen und -verfahren, die die Strahlen gar nicht erst an das Personal herankommen lassen, auf ein Minimum begrenzt.

In den verschiedenen Phasen des Brennstoffkreislaufs werden geringe Mengen **Radioaktivität** an die Umwelt abgegeben. Die Ableitungen in die Umwelt stammen in erster Linie aus der **Wiederaufarbeitung** abgebrannter Brennelemente, aber auch vom normalen Kernkraftwerksbetrieb. Um Mensch und Umwelt zu schützen, müssen diese Emissionen daher auf ein Minimum begrenzt und gemessen werden. Die Filterung und Reinigung der Abluft und Abwässer minimiert die Menge der

abgegebenen Schadstoffe, und durch umfassende Umweltüberwachungssysteme im Umkreis sämtlicher Kernanlagen wird überprüft, ob diese ordnungsgemäß funktionieren.

## Notfallschutzmaßnahmen

Jede menschliche Aktivität ist zumindest mit einem Restrisiko behaftet. Trotz des sehr hohen Sicherheitsniveaus, das für alle radiologischen Aktivitäten gilt, kann es zu Unfällen kommen, die zu einer Strahlenexposition des Personals und der Bevölkerung führen und die (wie im Fall Tschernobyl) internationale Auswirkungen haben können. Die internationale Gemeinschaft hat daher detaillierte Programme und Maßnahmen für Notfallvorsorge und nuklearen Notfallschutz entwickelt.

Hauptzweck dieser Programme und Maßnahmen ist es, die Folgen jedes etwaigen Ereignisses dieser Art so gering wie möglich zu halten. Wirksame Notfallpläne und Maßnahmen, die kurzfristig verwirklicht werden können, sind wichtiger Teil des nuklearen Notfallschutzes. Das setzt zunächst die Konzeption und Untersuchung zahlreicher „Notfallszenarien“ voraus, und unter Konsultation aller zuständigen Instanzen werden dann eine grundlegende Organisationsstruktur und ein Komplex genau geplanter, je nach Umständen modulierbarer Maßnahmen festgelegt. Diese flexiblen Pläne werden regelmäßig getestet, so dass sie im Ernstfall jederzeit einsatzbereit sind.

Die organisatorischen Strukturen des Notfallschutzes umfassen Befehls- und Kommunikationssysteme, genau definierte Verantwortlichkeiten der potenziell zuständigen staatlichen Stellen und Einrichtungen sowie entsprechende Schulungskurse für das Personal. Alle weltweit existierenden Kernanlagen besitzen, in Abstimmung mit den kommunalen und nationalen Behörden, solche Notfallpläne und dazu gehörende Strukturen. Die bei Eintreten eines Störfalls am Entscheidungsprozess beteiligten Personen nehmen regelmäßig an Schulungen mit technischen Experten wie auch mit ihren jeweiligen Partnern teil. In vielen Ländern werden auch für die in der Nähe von Kernanlagen ansässige Bevölkerung Informations- und Schulungsmaßnahmen durchgeführt.

Notfallschutz ist die Anwendung dieser Maßnahmen je nach Typ der betreffenden Kernanlage und je nach Art des Störfalls (z.B. Brand, unvorher-

gesehene **Kritikalität** oder Freisetzung von Radioaktivität). Große Kernanlagen, vor allem Kernkraftwerke, sind mit zahlreichen Sicherheitsbarrieren ausgestattet, die die Entstehung eines möglichen Störfalls begrenzen (vgl. Kapitel 5), so dass bei einem schweren Unfall, zu dem es zwangsläufig erst nach dem Versagen dieser hintereinander geschalteten Barrieren kommen könnte, ein beträchtlicher Zeitraum verstreichen würde, bevor eine unmittelbare Gefahr für die Bevölkerung besteht. Normalerweise würde man über Stunden, ja Tage für die notwendige Einleitung von Schutzmaßnahmen verfügen.

Im Frühstadium eines nuklearen Notfalls können drei Arten von Maßnahmen getroffen werden:

- **Abschirmung** der betroffenen Bevölkerung. Hier können ganz einfache Maßnahmen wirksam sein. So lässt sich die Wirkung einer radioaktiven Wolke oder entweichender **Radioaktivität** sehr leicht wesentlich abschwächen, indem die Menschen aufgefordert werden, sich in das Innere ihrer Häuser zu begeben, alle Fenster zu schließen und die Klimaanlage solange abzuschalten, bis sich die radioaktive Wolke durch Wind- und Wettereinwirkung aufgelöst hat.
- **Evakuierung** der Bevölkerung. Diese Maßnahme wird getroffen, wenn die erwartete Menge freigesetzter radioaktiver Stoffe entsprechend hoch eingeschätzt wird. Am effektivsten ist die Evakuierung natürlich, wenn sie bereits vor der Freisetzung von Radioaktivität sowie in Kenntnis der meteorologischen Bedingungen hinsichtlich Richtung und Geschwindigkeit der Ausbreitung der radioaktiven Wolke erfolgt.
- Verteilung von **Jodtabletten**, die eine stabile, nicht radioaktive Form von Jod enthalten. Durch die Einnahme von Jod kann die Absorption von radioaktivem Jod, das beim Kernspaltungsprozess entsteht und eine wichtige Rolle bei jeglicher Freisetzung radioaktiver Stoffe im Rahmen eines schweren Kernkraftwerksunfalls spielen würde, stark verringert werden. Jod, das der Körper für viele Zwecke nutzt, wird in der Schilddrüse gespeichert. Das bedeutet, dass sich das gesamte in den Körper gelangende radioaktive Jod in der Schilddrüse

konzentriert und dort zu einer hohen Strahlendosis führt, die vor allem bei Kindern Schilddrüsenkrebs verursachen kann. Auch im Boden deponiertes radioaktives Jod kann zu ähnlichen Folgen führen, wenn es in die Milch oder andere Nahrungsmittel gelangt. Die Gegenmaßnahme besteht darin, die Schilddrüse durch die Einnahme von Jodtabletten mit nicht radioaktivem stabilen Jod „aufzufüllen“; die dem Körper dann zugeführten radioaktiven Jodüberschüsse würden vor allem über Schweiß oder Harn rasch ausgeschieden werden.

In den meisten Ländern werden derzeit Schritte eingeleitet, um sicherzustellen, dass Bevölkerungsgruppen, die im Hinblick auf die Freisetzung signifikanter Mengen von Kernspaltungsprodukten gefährdet sind, raschen Zugang zu Jodtabletten haben. Die Jodeinnahme wird jedoch lediglich als eine flankierende Maßnahme zur Abschirmung oder Evakuierung der Bevölkerung betrachtet.

## Beseitigung von Unfallfolgen

Sobald eine Notfallsituation unter Kontrolle gebracht und die Bevölkerung geschützt ist, müssen die längerfristigen Sanierungsarbeiten beginnen. Der erste Schritt dürfte im Allgemeinen darin bestehen, den Grad der Kontamination der Umwelt festzustellen, die individuell absorbierten Strahlendosen zu ermitteln und dann geeignete Sanierungs- und medizinische Folgemaßnahmenprogramme aufzustellen. Die Sanierung kontaminierten Bodens, vor allem landwirtschaftlicher Nutzflächen für die Nahrungsmittelproduktion, wäre ein wichtiger Bestandteil dieser Programme. Die Tatsache, dass sich Radioaktivität leicht nachweisen lässt, erleichtert glücklicherweise die Anwendung der Vielzahl vorhandener Sanierungstechniken erheblich.

In Fällen besonders hoher Kontamination, wie z.B. in der Umgebung des Tschernobyl-Reaktors, dürfte eine Rückkehr zu den Werten und Expositionsdosen der Zeit vor dem Unfall nur durch extreme Maßnahmen wie beispielsweise die völlige Entfernung des Mutterbodens und der Vegetation bzw. Einschränkungen für den Konsum lokaler Erzeugnisse zu erreichen sein.

### Die Gesundheitsfolgen des Tschernobyl-Unfalls nach 20 Jahren

Die Gesundheitsfolgen des Tschernobyl-Unfalls lassen sich in zwei Kategorien unterteilen, nämlich akute Unfallfolgen und Spätfolgen.

Von den **akuten Unfallfolgen** waren das Anlagenpersonal sowie alle Personen betroffen, die während der Notfallphase bei der Brandbekämpfung mitwirkten, medizinische Hilfe leisteten und bei den sofortigen Aufräumarbeiten („Liquidatoren“) tätig waren. Insgesamt 31 Personen starben an den unmittelbaren Folgen des Unfalls und etwa 140 Personen litten unter unterschiedlich starken Formen der Strahlenkrankheit und anderen Gesundheitsschäden, von denen bis heute 19 verstorben sind. In der allgemeinen Bevölkerung wurden keine derartigen Fälle festgestellt.

Was die **Spätfolgen** betrifft, so war unter den in den kontaminierten Gebieten der ehemaligen Sowjetunion lebenden Kindern ein realer, signifikanter Anstieg der Schilddrüsenkarzinome zu verzeichnen, die, solange nicht das Gegenteil erwiesen ist, den Unfallfolgen zuzurechnen sind. Zum Beispiel wurden in den acht Jahren vor dem Unfall nur fünf Fälle von Schilddrüsenkrebs bei Kindern im Alter von 0-14 Jahren im größten Zentrum Weißrusslands für Diagnose und Behandlung von Schilddrüsenkrebs bei Kindern in Minsk beobachtet. Bis Ende 2005 war die Gesamtzahl der Kinder mit Schilddrüsenkrebs in Russland, der Ukraine und in Weißrussland auf 4 000 gestiegen. Neun von diesen Kindern starben, die übrigen konnten erfolgreich behandelt werden. Unter den in diesen Gebieten lebenden Erwachsenen dürfte sich die Zahl der Schilddrüsenkrebs-erkrankungen ebenfalls etwas erhöht haben. Nach dem bisherigen Trend zu urteilen, ist der Höchststand der Schilddrüsenenerkrankungen noch nicht erreicht, das heißt, diese Art von Krebs wird dort wohl noch einige Zeit lang über seiner natürlichen Rate liegen.

Andererseits wurde bisher bei der wissenschaftlichen und medizinischen Beobachtung der Bevölkerung keine über die „natürliche“ Rate hinausgehende Zunahme anderer Krebsarten festgestellt, was auch für Leukämie, erbliche Anomalien, negative Auswirkungen auf den Schwangerschaftsverlauf oder sonstige strahleninduzierte, durch den Unfall bedingte Leiden gilt.

### Weiterführende Informationen

Vergleiche die Literaturhinweise im Kapitel „Weiterführende Informationen“ wegen eingehenderer Informationen über:

- **Strahlenquellen** und Überblick über die durchschnittlichen Expositionswerte, vgl. 6.1;
- **Grundlagen des Strahlenschutzes**, vgl. 6.2 bis 6.5;
- **jüngste Entwicklungen** beim Strahlenschutz, vgl. 6.6 bis 6.8;
- **das System der Notfallschutzvorsorge**, vgl. 6.9.



# Ökonomische Aspekte der Kernenergie

Die Kernenergie zeichnet sich durch niedrige Produktionskosten, hohe Investitionsaufwendungen, Unabhängigkeit gegenüber Schwankungen der Brennstoffpreise, eine lange Betriebsdauer und erhebliche Kosten für Genehmigung und sichertechnische Überwachung aus.

Im Allgemeinen sind die existierenden Kernkraftwerke selbst in deregulierten Märkten wettbewerbsfähig, insbesondere wenn die anfänglichen Investitionskosten einmal amortisiert sind. Vor allem auf Grund der hohen Investitionsaufwendungen dürften Entscheidungen für den Bau neuer Kernkraftwerke in Zukunft erheblich von politischen Faktoren abhängen.

Ein Unterschied zwischen der Kernenergie und anderen Formen der Stromerzeugung besteht darin, dass manche Kosten, die bei anderen Energiequellen vorwiegend externer Natur sind, im Fall der Kernenergie internalisiert und somit bereits einbezogen sind.



## Kosten, Risiken und Haftung

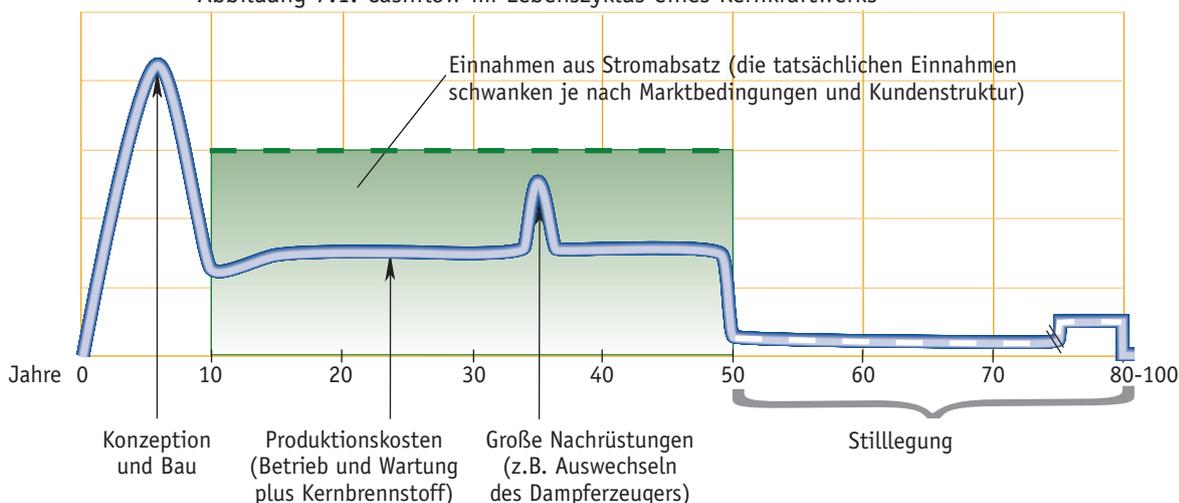
### Faktoren, die die Wirtschaftlichkeit der Kernenergie beeinflussen

Abbildung 7.1 zeigt die Einnahmen und Ausgaben für ein typisches Kernkraftwerk während seines Betriebszyklus. Sie veranschaulicht, welche Faktoren die Wirtschaftlichkeit der Kernenergie

beeinflussen; hierzu zählen u.a.

- hohe Investitionskosten;
- lange Planungszeiten und Betriebsdauer;
- niedrige Brennstoff-, Betriebs- und Wartungskosten;
- erhebliche Kosten nach der Einstellung der Stromerzeugung (vor allem für den Rückbau und die Entsorgung des radioaktiven Abfalls).

Abbildung 7.1: Cashflow im Lebenszyklus eines Kernkraftwerks



Die **Investitionskosten** umfassen die Kosten für den Bau, große Nachrüstungen während der Betriebszeit der Anlage sowie die Stilllegung.

Die **Betriebs- und Wartungskosten** umfassen die Aufwendungen für das Betriebspersonal, Aus- und Weiterbildung, Sicherheit, Gesundheit, Arbeitsschutz sowie die Kosten für die Entsorgung von schwach- und mittelaktiven Betriebsabfällen. Faktisch gehören zu dieser Kategorie all jene Kosten, die nicht als Investitions- oder Brennstoffkosten angesehen werden.

**Brennstoffkosten** sind alle Aufwendungen im Zusammenhang mit dem Brennstoffkreislauf. Dazu zählen die Kosten für das Uran, dessen Konversion und Anreicherung, die Brennstoffherstellung, die Konditionierung und Entsorgung bzw. Wiederaufarbeitung und die Entsorgung der Abfälle aus der Wiederaufarbeitung.

## Kostenfaktoren der nuklearen Stromerzeugung

Die Kosten der Stromerzeugung werden generell in drei große Kategorien unterteilt: die Investitionskosten (Sachkapital), Betrieb und Wartung, sowie Brennstoffkosten.

Die Investitionskosten umfassen die Ausgaben für Planung und Bau, größere Nachrüstungen und **Stilllegung**. Zu den Stilllegungskosten zählen alle Ausgaben von der endgültigen Abschaltung einer Anlage bis zur Freigabe des Geländes für andere Zwecke gemäß den nationalen Politikbestimmungen, und sie enthalten die Aufwendungen für die Entsorgung der radioaktiven und sonstigen Abfälle, die während der Stilllegung anfallen, bis zu ihrer Endlagerung. Zu diesen Kosten kommen die Aufwendungen für die Verfahren zur Erteilung der aufsichtsrechtlichen Genehmigung für den Bau und die Inbetriebnahme der Anlage hinzu.

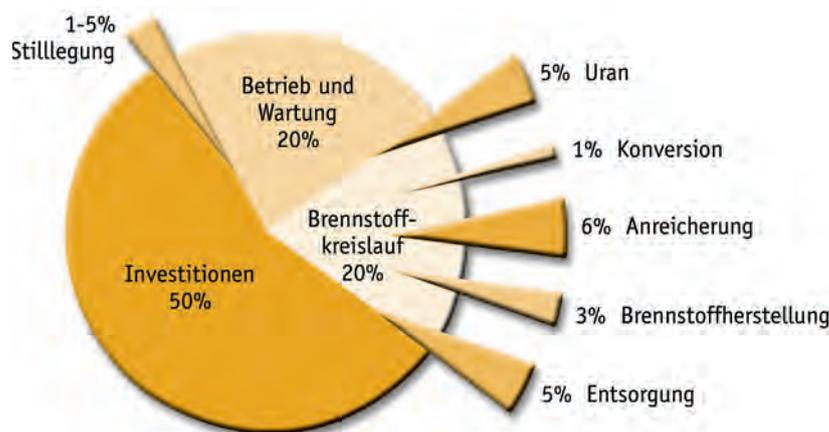
Die Investitionskosten müssen finanziert werden, und der dafür anfallende Zinsaufwand wird in einem vorab festgelegten Zeitraum abgeschrieben, der sich vielleicht über 20-25 Jahre erstreckt. Der Schuldendienst ist ein fester Bestandteil der Stromerzeugungskosten. Ferner müssen von Seiten der Kernkraftwerksbetreiber Rücklagen für die Stilllegung der Anlage und Entsorgung der dabei anfallenden Abfälle gebildet bzw. entsprechend gezahlt werden – Prozesse, die sich über mehrere Jahrzehnte hinziehen können.

Die Betriebs- und Wartungskosten (B&W) umfassen alle Aufwendungen, die nicht als Investitions- oder Brennstoffkosten zu betrachten sind; als größte Posten gelten hier die Ausgaben für das Betriebs- und Infrastrukturpersonal, Aus- und Weiterbildung, Sicherheit der Anlage, Gesundheit und Arbeitsschutz sowie Management und Entsorgung von Betriebsabfällen. Die Kosten für die laufende Wartung und regelmäßige Inspektion (Zeiten, in denen die Anlagen generell vom Netz genommen werden müssen) sind ebenfalls inbegriffen. Da die Investitionskosten nach dem Bau im Wesentlichen festgelegt sind, bieten sich in einem existierenden Kernkraftwerk hauptsächlich die Betriebs- und Wartungskosten für mögliche Kostenreduzierungen an.

Zu den Brennstoffkosten zählen alle im Rahmen des Brennstoffkreislaufs anfallenden Aufwendungen, vor allem die Ausgaben für den Erwerb, die **Konversion** und die **Anreicherung** von Uran, die Brennstoffherstellung, die Lagerung von abgebrannten Brennelementen, die **Wiederaufarbeitung**, die Entsorgung der abgebrannten Brennelemente (oder des hochaktiven Abfalls aus der Wiederaufarbeitung) sowie den Transport. Die Brennstoffkosten machen nur rd. 20% der Gesamtkosten der nuklearen Stromerzeugung aus, so dass diese Energieform im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen von Preisschwankungen relativ wenig betroffen ist.

Obwohl die Stromerzeugungskosten je nach Land variieren, gibt Abbildung 7.2 einen Überblick über die relativen Anteile der einzelnen Beiträge zu den Gesamtkosten der nuklearen Stromerzeugung.

Abbildung 7.2: Aufschlüsselung der typischen Kosten der nuklearen Stromerzeugung



## Langfristige finanzielle Risiken und Verpflichtungen

Die Entscheidung zum Bau oder Betrieb eines Kernkraftwerks stellt aus mehreren Gründen ein größeres kommerzielles Risiko dar als entsprechende Entscheidungen bei anderen Energiequellen:

- Wegen des langen Planungszeitraums und der langen Betriebsdauer ist die Möglichkeit größer, dass langfristige Veränderungen am Markt die Einnahmen (positiv oder auch negativ) beeinflussen.
- Der große Festkostenanteil, der weitgehend auf die beträchtlichen Investitionskosten zurückzuführen ist, erhöht die Anfälligkeit gegenüber kurzfristigen Veränderungen der Geldmarktbedingungen.
- Die hohe sicherheitstechnische Regulierungsdichte verringert die betriebliche Flexibilität und mögliche Veränderungen von Auflagen können sich negativ auf die Kosten auswirken (was in der Vergangenheit bereits der Fall war).
- Die Kosten der Stilllegung und die Kosten der Entsorgung von langlebigen radioaktiven Abfällen sind, ebenso wie die voraussichtlichen Zeiträume, ungewiss.
- Während nicht-nukleare Anlagen unter ungünstigen wirtschaftlichen Bedingungen einen Großteil ihrer Aktiva auf Kostenbasis handeln oder veräußern können (z.B. kann ein gasbefeuertes Kraftwerk das auf Vorrat gespeicherte Gas am offenen Markt verkaufen), ist dies für Kernkraftwerke in der Praxis weitgehend unmöglich.

Obwohl die Stilllegung und die Entsorgung der radioaktiven Abfälle mit hohen Kosten verbunden sind, stellen diese Aufwendungen eine verhältnismäßig kleine Komponente der Gesamtbetriebskosten während des Lebenszyklus dar, nicht zuletzt weil die langen Zeiträume, die hier eine Rolle spielen, erhebliche Abzinsungen mit sich bringen. In Bezug auf die Genauigkeit der Kostenschätzungen für die Zukunft können angesichts der langen Reaktorlaufzeiten und der Möglichkeit, dass Anforderungen der Aufsichtsbehörden geändert, d.h. in der Regel verschärft werden, jedoch auch Unsicherheiten entstehen. Um derartige künftige Risiken bei den Stilllegungskosten decken zu können, werden entsprechende Sonderrückstellungen vorgenommen.

Werden als Basis dieser Rückstellungen die projizierten Einnahmen während der erwarteten Betriebsdauer eines Kernkraftwerks angesetzt, besteht die Gefahr von Fehlbeträgen, falls die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen eine vorzeitige Schließung erfordern oder die Erträge des Kraftwerks hinter dem projizierten Niveau zurückbleiben. In der Praxis wurden Rückstellungen aber unter der Annahme sehr viel kürzerer Betriebszeiten gebildet als tatsächlich erreicht werden. Ferner besteht auch die Möglichkeit, dass einschlägige technische Fortschritte die Kosten unter das veranschlagte Niveau drücken.

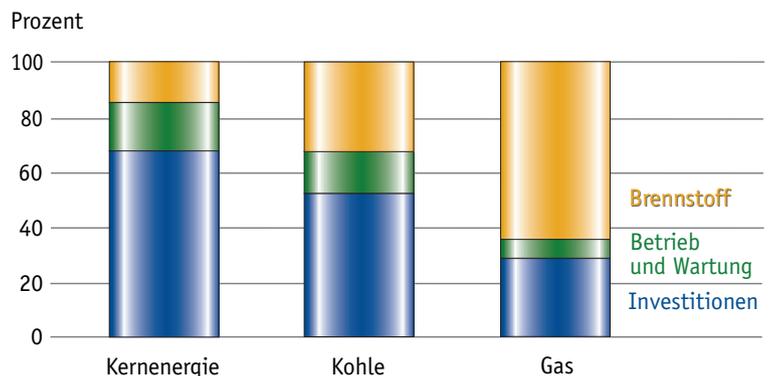
## Wettbewerbsaspekte

### Stromerzeugungskosten im Vergleich

Abbildung 7.3 liefert einen Vergleich der repräsentativen Kosten für die Stromerzeugung aus Kernenergie und einigen fossilen Energiequellen.

Im Vergleich zur Kernenergie zeichnen sich gasbefeuerte Anlagen durch niedrige Investitionskosten und erhebliche Brennstoffkosten aus. Kohlebefeuerte Anlagen weisen mittlere Investitions- und Brennstoffkosten auf. Generell machen die Brennstoffkosten bei fossilen Energieträgern einen verhältnismäßig großen Anteil an den Stromerzeugungskosten aus, die daher sehr stark auf Veränderungen der Brennstoffpreise

Abbildung 7.3: Aufschlüsselung repräsentativer Stromerzeugungskosten (bei einem Diskontsatz von 10%)



Quelle: NEA. *Projected Costs of Generating Electricity* (Paris: OECD, 1998). Durchschnittswerte für Frankreich, Japan, Kanada, Spanien die Vereinigten Staaten.

Die externen Kosten sind Aufwendungen, die zu Lasten der Allgemeinheit und der Umwelt fallen und nicht in den Kosten für Hersteller und Verbraucher berücksichtigt sind. Sie sind daher auch nicht in den Marktpreisen enthalten.

reagieren. Erneuerbare Energiequellen, d.h. Wind- und Wasserenergie, ähneln insofern der Kernenergie, als sie hohe Investitionskosten, aber niedrige Produktionskosten je erzeugter Energieeinheit aufweisen.

### Existierende Anlagen

Angesichts der verhältnismäßig geringen Kosten von Kernbrennstoffen, der jüngsten Fortschritte bei der Erhöhung des Wirkungsgrads und der Tatsache, dass in vielen Fällen die anfänglichen Investitionskosten mittlerweile in erheblichem Maße abgeschrieben sind, haben sich die vorhandenen Kernkraftwerke in der Regel weltweit als wettbewerbsfähig erwiesen.

Daten der Europäischen Kommission zu den Stromerzeugungskosten (Investitionen, Betrieb und Wartung sowie Brennstoffkosten inbegriffen) veranschaulichen, dass die Kernenergie auch unter Berücksichtigung der hohen Investitionskosten wettbewerbsfähig ist (vgl. Tabelle 7.1).

Daten aus den Vereinigten Staaten zu den Betriebskosten von Anlagen zur Energiegewinnung (nur Betriebs- und Wartungskosten, sowie Brennstoffkosten) ergeben ein ähnliches Resultat. 1999 wurden die Betriebsausgaben je erzeugter Energieeinheit in Dollar auf 1,92 Cent/kWh für die Kernenergie, 2,02 Cent/kWh für fossile Brennstoffquellen, 0,68 Cent/kWh für Wasserenergie und 3,87 Cent/kWh für Gasturbinen, Photovoltaik und Windenergie geschätzt.

Die Aussichten für bereits existierende Kernkraftwerke zielen daher aus ökonomischer Sicht auf eine weitere Nutzung dieser Anlagen, zumal die Kosten für eine Verlängerung der Betriebszeiten bzw. Aufstockung der Kapazität generell sehr viel niedriger sind als die Kosten für den Bau neuer Kraftwerke.

### Kernenergie an deregulierten Märkten

Eine im Jahr 2000 veröffentlichte OECD/NEA-Studie über *Nuclear Power in Competitive Electricity Markets* kommt zu dem Ergebnis, dass Kernkraftwerke in Deutschland, Finnland, den Niederlanden, Schweden, Spanien, dem Vereinigten Königreich und den Vereinigten Staaten an den jeweiligen deregulierten Märkten wettbewerbsfähig waren.

Generell war die Folge von Markt deregulierungen eine Verbesserung der Betriebsleistung und -rentabilität. Der Druck, ein Kernkraftwerk unter Erfüllung strenger Auflagen sicher zu betreiben, bietet offenbar eine solide Grundlage für wettbewerbsfähige Ergebnisse.

### Neue Anlagen

Die OECD/NEA-Studie über *Projected Costs of Generating Electricity* von 1998 enthält einen Vergleich der Durchschnittskosten der Stromerzeugung für verschiedene Brennstoffarten. Die Ergebnisse zeigten, dass der Anreiz zum Bau neuer Kraftwerke von länderspezifischen Faktoren und vor allem dem im jeweiligen Land gültigen Diskontsatz abhängt. Laut dieser Studie ist die Kernenergie beispielsweise bei einem jährlichen Diskontsatz von 5% in fünf von zwölf Ländern am preisgünstigsten, während sie bei einem Diskontsatz von 10% in keinem Land am preisgünstigsten ist.

Die verhältnismäßig hohen Investitionen für neue Kernkraftwerke sind ein Hauptkostenfaktor. Um den Bau neuer Kernkraftwerke unter Wettbewerbsbedingungen wirtschaftlich attraktiver zu machen, müssen die Investitionskosten gesenkt werden.

Tabelle 7.1: Stromerzeugungskosten bei einer Auslastung von 7000 Stunden (in Euro-Cent von 1990/kWh)

	Kohle	Heizöl und Braunkohle	Gas	Kernkraft	Biomasse	Photovoltaikzellen	Windturbinen
Mindestens	3.2	4.9	2.6	3.4	3.4	51.2	6.7
Höchstens	5.0	5.2	3.5	5.9	34.5	85.3	7.2

Quelle: Europäische Kommission. *Grünbuch: Hin zu einer europäischen Strategie für Energieversorgungssicherheit* (Brüssel, 2000), Anhang 2, Tabelle 1 ohne Verbrauchssteuern und Subventionen.

Neue kosteneffizientere Konstruktionen, verbesserte Baumethoden, Standardisierungen und Serienfertigung wie auch der Parallelbau mehrerer Einheiten sind alles Maßnahmen, mit denen sich die Investitionskosten von Kernkraftwerken reduzieren lassen. Verbesserungen sind also möglich. In Japan z.B. ermöglichte in den 90er Jahren der Einsatz eines standardisierten fortgeschrittenen Baumusters zusammen mit dem Parallelbau an einem einzigen Standort in den neunziger Jahren die Fertigstellung neuer Kernkraftwerke in einem Zeitraum von weniger als sechs Jahren, während die Bauzeiten früher im Vergleich sieben bis zehn Jahre betragen. So wurde beispielsweise der Bau von zwei fortgeschrittenen **Siedewasserreaktoren** (ASWR) in Kashiwazaki-Kariwa (von Baubeginn bis Inbetriebnahme) in 62 und 65 Monaten vollendet.

Der hohe finanzielle Einsatz und das wirtschaftliche Risiko kann in einem Wettbewerbsmarkt dem privaten Sektor die alleinige Finanzierung neuer Kernkraftwerke erschweren, selbst unter Berücksichtigung von möglichen Zeit- und Kostenersparnissen. In der Vergangenheit wurden die Möglichkeiten der Kernenergie einschließlich der Entwicklung ihrer hochinnovativen Basis in öffentlich-privater Partnerschaft erschlossen. Heute stellt sich die Frage, ob eine solche Zusammenarbeit auch in deregulierten Märkten ihren Platz hat – oder überhaupt haben sollte.

## Externe Kosten

Ein Unterschied zwischen der Kernenergie und anderen Formen der Stromerzeugung besteht darin, dass in der Kernenergie gewisse Kosten internalisiert sind, die in den Kostenrechnungen anderer Energiequellen fehlen (bzw. externalisiert sind). Einige der Kosten, die im Zusammenhang mit der nuklearen Stromproduktion entstehen und die in den Preisen berücksichtigt sind, zu dem der erzeugte Strom am offenen Markt veräußert wird, schließen die Aufwendungen für Management und Entsorgung von radioaktivem Abfall ein. Die aus fossilen Brennstoffen erzeugte Energie enthält – ebenso wie die Kernenergie – auch gewisse Kosten zur Reduzierung der Schadstoffemissionen in Luft und Wasser, jedoch wird ein beachtlicher Teil des Abfalls direkt in die Atmosphäre geleitet, so dass der Allgemeinheit Kosten entstehen, die sich im Strompreis nicht niederschlagen. Tabelle 7.2 stellt die Ergebnisse einer großen Studie der Europäischen Kommission über die **externen Kosten** der Stromerzeugung je Brennstoffquelle dar. In dieser Studie wurden nicht nur die Kosten der Abfalllagerung, sondern auch die Auswirkungen auf die öffentliche Gesundheit sowie einige andere Negativeffekte berücksichtigt, deren Kosten generell eher zu Lasten der Allgemeinheit als des einzelnen Verbrauchers gehen.

Die Einheiten 6 und 7 des Kernkraftwerks in Kashiwazaki-Kariwa, Japan, wurden in weniger als sechs Jahren fertig gestellt.



Tabelle 7.2: Externe Kosten für die Stromerzeugung in der Europäischen Union (Euro-Cent/kWh)

Kohle und Braunkohle	1.8 - 15.0
Heizöl	2.6 - 10.9
Gas	0.5 - 3.5
Wasserenergie	0.04 - 0.7
Photovoltaik	0.1 - 0.3
Biomasse (einschl. Torf)	0.1 - 5.2
Windturbinen	0.05 - 0.25
Kernkraft	0.3 - 0.7

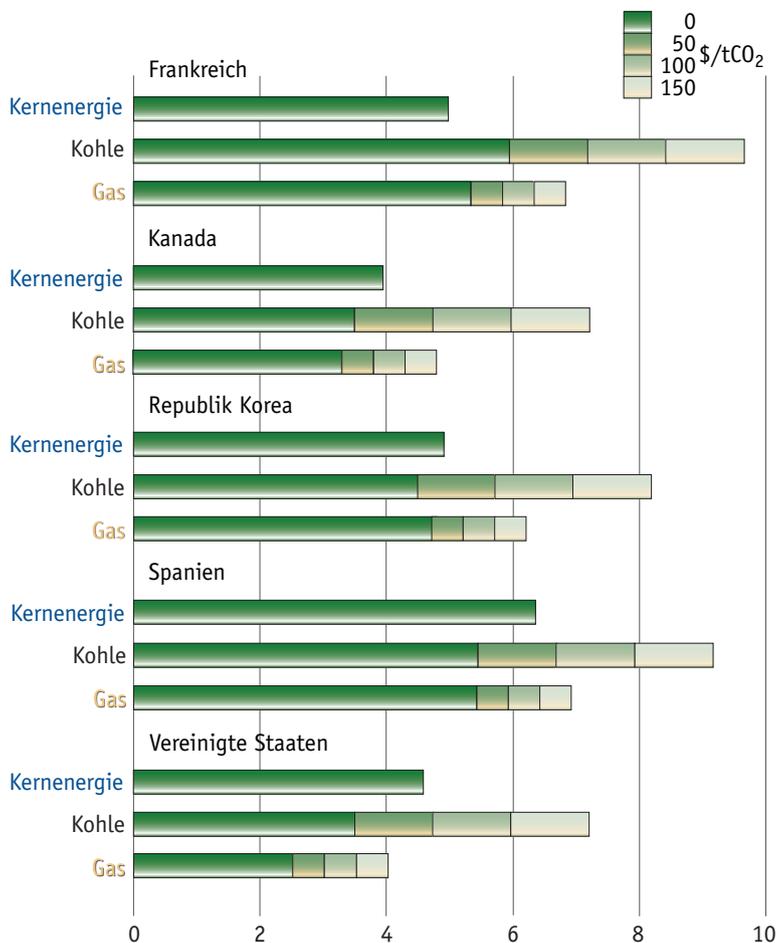
Quelle: Europäische Kommission, *ExternE – Externalities of Energy*, Vol. 10: National Implementation (Luxemburg, 1999), p. 6.

Die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit der Kernenergie könnte sich drastisch verändern, sollten die externen Kosten der fossilen Stromerzeugung internalisiert werden. Beispielsweise wäre der Effekt auf die Durchschnittskosten der Stromerzeugung erheblich, wenn die externen Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Abgabe oder CO<sub>2</sub>-Steuer internalisiert würden (vgl. Abb. 7.4).

Solange es nicht gelingt, die Investitionskosten für Kernenergie drastisch zu reduzieren und solange die Preise für fossile Brennstoffe nicht

erheblich und kontinuierlich steigen bzw. keine politischen Entscheidungen zur Internalisierung einiger der mit fossilen Brennstoffen verbundenen externen Kosten getroffen werden, dürften Investitionen des privaten Sektors in neue Kernkraftwerke auf sich warten lassen. Bis dahin hängen die Entscheidungen zum Bau neuer Kernkraftwerke wahrscheinlich sehr stark von politischen Faktoren ab, wie z.B. von der Versorgungssicherheit. Ob und wie diesen staatlichen Anliegen an Wettbewerbsmärkten Rechnung getragen wird, ist eine offene Frage, die außerhalb des Verantwortungsbereichs des privaten Sektors liegt.

Abbildung 7.4: Auswirkungen der CO<sub>2</sub>-Steuer auf die Durchschnittskosten der Stromerzeugung in verschiedenen Ländern (bei einem Diskontsatz von 10%)



Quelle: NEA. *Nuclear Energy and the Kyoto Protocol* (Paris: OECD, 2002).

### Weiterführende Informationen

Vergleiche die Literaturhinweise im Kapitel „Weiterführende Informationen“ wegen eingehenderer Informationen über:

- die **ökonomischen Aspekte des nuklearen Brennstoffkreislaufs**, vgl. 7.1;
- eine **ausführliche Analyse der Stromerzeugungskosten** verschiedener Technologien, die derzeit im Einsatz sind, einschließlich der Kernenergie, vgl. 7.2;
- zusätzliche Informationen zu den **ökonomischen Aspekten der Kernenergie**, vgl. 7.2, 7.3 und 7.4;
- Kernenergie an **wettbewerblichen Strommärkten**, vgl. 7.3 bis 7.5;
- **externe Kosten** der Stromerzeugung, vgl. 7.6 bis 7.8.

# Internationales Atomrecht und Nichtverbreitung von Kernwaffen

*Praktisch alle Aspekte des Einsatzes von Kernenergie sind in einen Rahmen nationaler Gesetze eingebunden, der sich oft auf Prinzipien stützt, die auf internationaler Ebene vereinbart wurden und häufig in internationalen Übereinkommen oder sonstigen rechtlichen Instrumenten verankert sind.*

*Der Nichtverbreitung dienende Übereinkommen und Instrumente nehmen innerhalb dieser Regelungen insofern eine besonders wichtige Stellung ein, als sie der in der Öffentlichkeit weit verbreiteten Sorge hinsichtlich der Kernwaffenproliferation Rechnung tragen. Der Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen aus dem Jahr 1968 ist die wichtigste Rechtsgrundlage des internationalen nuklearen Nichtverbreitungsregimes.*



Im Nuklearbereich gibt es ein weit gespanntes Netz von Vereinbarungen, Übereinkommen, Gesetzen, Regelungen, Normen und Institutionen, das im Rahmen dieser Veröffentlichung nicht umfassend behandelt werden kann. Deshalb soll in diesem Kapitel das Hauptaugenmerk auf zwei besonders wichtige Aspekte der Kernenergienutzung gerichtet werden, nämlich zum einen auf den Rahmen des internationalen Atomrechts und zum anderen auf die Nichtverbreitung von Kernwaffen.

## Internationales Atomrecht

Verantwortungsbewusste Regelungen im Bereich der Kernenergie spielen seit je her eine bedeutsame Rolle, wenn es um das Vertrauen der Öffentlichkeit in deren Nutzung geht. Um dieses Vertrauen zu festigen, bedarf es eines umfassenden und effizienten Gesetzeswerks, dessen Ziel der Schutz der Gesundheit, die Sicherheit der Öffentlichkeit und die Erhaltung der Umwelt ist.

Darüber hinaus ist Vertrauen in die einschlägigen Institutionen, d.h. sowohl in die Aufsichtsinstanzen als auch in die beaufsichtigten Institutionen, eine Grundvoraussetzung für das Vertrauen der Öffentlichkeit in die Kernenergie. Dazu wiederum sind Transparenz und aktive Kommunikation notwendig.

Ein wirkungsvoller Gesetzesrahmen setzt strenge Auflagen sowie die Möglichkeit von

Durchsetzungsmaßnahmen voraus, die die Einhaltung dieser Auflagen gewährleisten. Zugleich muss das Regelwerk aber auch hinreichend flexibel sein, um mit dem technologischen Fortschritt und den sich wandelnden öffentlichen Anliegen Schritt halten zu können. Da die Konsequenzen der Nutzung von Kernenergie u.U. nicht auf das Inland beschränkt bleiben, muss das Regelwerk darüber hinaus eine im Wesentlichen internationale Dimension aufweisen.

## Nationale Auflagen

Alle Kernenergie nutzenden OECD-Länder haben sowohl allgemeine gesetzliche Auflagen für die Durchführung ziviler Aktivitäten im Nuklearbereich festgelegt als auch öffentliche Institutionen eingerichtet, die beauftragt sind, die Einhaltung dieser Auflagen durchzusetzen.

Die meisten Länder haben zwingend vorgeschriebene Genehmigungsverfahren eingeführt. Dabei handelt es sich um eine Form der Regulierung, bei der die Durchführung bestimmter Aktivitäten dann rechtlich zulässig ist, wenn bestimmte, in der von der zuständigen öffentlichen Institution erteilten Genehmigung spezifizierte Bedingungen eingehalten werden. In der weit überwiegenden Zahl der Fälle wird die Einhaltung dieser Bedingungen durch systematische Inspektionen der Genehmigungsbehörde und durch

Die Kernenergie-Agentur der OECD wurde 1958 ins Leben gerufen und zählte im Januar 2006 28 Mitgliedstaaten. Die Europäische Kommission beteiligt sich an den Arbeiten der Agentur. Die NEA arbeitet ferner eng mit der IAEA sowie anderen im Nuklearbereich tätigen internationalen Organisationen zusammen. Sie befasst sich insbesondere mit Sicherheit und Regulierung von nuklearen Aktivitäten, radioaktiven Abfällen, Strahlenschutz, Kernwissenschaft, wirtschaftlichen und technischen Analysen des nuklearen Brennstoffkreislaufs, Atomrecht und Haftung gegenüber Dritten sowie Fragen der Information der Öffentlichkeit. Die NEA-Datenbank enthält Daten zu nuklearen Fragen sowie Software-dienste für die Teilnehmerstaaten.

Berichtsaufgaben für den Genehmigungsinhaber überprüft. Die Nichteinhaltung der Genehmigungsbedingungen kann je nach Schwere des Verstoßes mit der Suspendierung oder Aberkennung der Genehmigung, der Auferlegung von Geldbußen oder sogar Gefängnisstrafen für den Genehmigungsinhaber bzw. andere verantwortliche Personen geahndet werden.

Angesichts der raschen Entwicklung der Kernphysik und -technik im Verlauf der letzten Jahrzehnte mussten die staatlichen Stellen sicherstellen, dass die gesetzlichen Auflagen mit der Nutzung neuer Technologien, bzw. den neuen Anwendungen bereits existierender Technologien, Schritt hielten. Dabei wurde der Geltungsbereich der nationalen Gesetze kontinuierlich ausgedehnt, um die Öffentlichkeit wie auch die Umwelt vor den mit diesen neuen Entwicklungen verbundenen Gefahren zu schützen. Als Folge davon decken die in der nationalen Gesetzgebung enthaltenen Auflagen heute ein überaus weites Feld von Aktivitäten ab, darunter:

- Uranförderung und -verarbeitung;
- Einsatz **radioaktiver Stoffe** und radioaktiver **Strahlung** in Forschung und Medizin;
- Verpackung und Transport radioaktiver Substanzen einschließlich von **Kernbrennstoffen**;
- nukleare Sicherheit in allen Betriebsstadien kerntechnischer Anlagen, von Kernkraftwerken bis hin zu Strahlentherapiegeräten, und von der Planung bis zur **Stilllegung**;
- Sicherung von Kernmaterial und Kernanlagen;
- internationaler Handel mit Kernmaterial, Kernanlagen und Kerntechnologie;
- Behandlung/Entsorgung von abgebrannten Brennelementen und radioaktiven Abfällen;
- Verpflichtungen in Bezug auf Nichtverbreitung und **Sicherungsmaßnahmen**;
- Notfallschutzvorsorge und Gegenmaßnahmen bei radiologischen Ereignissen;
- Haftung und Schadensersatz für Schäden im Zusammenhang mit nuklearen Ereignissen.

Viele dieser gesetzlichen Auflagen leiten sich aus international anerkannten Prinzipien und Normen ab bzw. stützen sich darauf. Die meisten

Industrieländer halten sich beispielsweise an die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission in Bezug auf die Dosisraten (vgl. Kapitel 6), wobei in einigen Ländern sogar noch strengere Auflagen gelten. Sie beachten ferner die *Internationalen Grundnormen für den Schutz gegen ionisierende Strahlung und für die sichere Handhabung von Strahlenquellen* der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) sowie deren Richtlinien zur Sicherheit von Transporten abgebrannter Brennelemente. Diese internationalen Rechtsinstrumente sind das Resultat von Zusammenarbeit und Konsultationen zwischen Regierungen und Fachleuten verschiedener Länder.

### Internationaler Rechtsrahmen

Im nuklearen Bereich gibt es eine Vielzahl internationaler Übereinkommen, denen die meisten OECD-Länder beigetreten sind und die sich mit Fragen wie der Nichtverbreitung von Kernwaffen, der Sicherung von Kernmaterial, der Zusammenarbeit und gegenseitigen Unterstützung bei nuklearen Unfällen, der Reaktorsicherheit und dem Umgang mit radioaktiven Abfällen befassen. Die wichtigsten von ihnen sind:

- der (seit 1970 geltende) *Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen*, der die Verbreitung von Kernwaffen und Kernwaffentechnologie verhindern und die friedliche Nutzung der Kernenergie fördern soll;
- das (1986 in Kraft getretene) *Übereinkommen über die frühzeitige Benachrichtigung bei nuklearen Unfällen*, mit dem ein System zur Benachrichtigung der IAEA und der Nachbarstaaten im Falle von nuklearen Unfällen mit potenziell grenzüberschreitenden Konsequenzen eingerichtet wurde;
- das (1987 in Kraft getretene) *Übereinkommen über den physischen Schutz von Kernmaterial*, das den Vertragsstaaten Verpflichtungen im Zusammenhang mit dem Schutz von Kernmaterial auf ihrem Hoheitsgebiet oder während des internationalen Transports auferlegt<sup>1</sup>;
- das (1987 in Kraft getretene) *Übereinkommen über Hilfeleistung bei nuklearen Unfällen oder radiologischen Notfällen*, mit dem ein interna-

1. Das Übereinkommen wurde am 8. Juli 2005 novelliert. Sein Geltungsbereich wurde auf den Schutz von Kernmaterial während Einsatz, Lagerung und Transport im Inland sowie auf etwaige Sabotageakte erweitert.

tionaler Rahmen geschaffen wurde, der rasche Hilfeleistung und Unterstützung im Falle nuklearer Ereignisse und radiologischer Notfälle erleichtern soll (wegen weiterer Informationen zum nuklearen Notfallschutz vgl. Kapitel 6);

- das (1996 in Kraft getretene) *Übereinkommen über nukleare Sicherheit*, ein wegberedendes Übereinkommen<sup>2</sup>, das durch die Festlegung internationaler Vergleichsmaßstäbe für Verfahren und Genehmigungen im Bereich der Reaktorsicherheit auf die Wahrung eines hohen Maßes an Sicherheit beim Betrieb von Kernkraftwerken abzielt (wegen weiterer Informationen zur nuklearen Sicherheit vgl. Kapitel 5);
- das (2001 in Kraft getretene) *Gemeinsame Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle*, ein weiteres wegberedendes Übereinkommen, das durch die Verbesserung nationaler Maßnahmen und durch internationale Zusammenarbeit auf die Erreichung und Beibehaltung eines hohen Maßes an Sicherheit abzielt (wegen weiterer Informationen zum Umgang mit radioaktiven Abfällen vgl. Kapitel 3 und 4).

Zusätzlich zu diesen Übereinkommen wurde eine beträchtliche Zahl multilateraler Vereinbarungen – häufig zwischen Nachbarstaaten – geschlossen, so z.B. das Abkommen über die Zusammenarbeit beim Transport von nuklearem Material zwischen der Russischen Föderation, der Slowakischen Republik, der Tschechischen Republik und der Ukraine. Es bestehen auch bilaterale Vereinbarungen über die Zusammenarbeit in Bereichen wie dem Austausch von technischen Informationen und Fachleuten, der Bereitstellung von Versuchsmaterial und -ausrüstungen sowie der Durchführung gemeinsamer Forschungsvorhaben. Ähnliche Vereinbarungen befassen sich mit Fragen der Sicherheit und des Strahlenschutzes.

Hinzu kommt die reguläre Arbeit überstaatlicher Organe wie der Europäischen Union und internationaler Organisationen wie der IAEA und der OECD/NEA zur Festlegung von Richtlinien und

Standards und zur Einrichtung von Foren für internationale Diskussionen und gegenseitige Hilfeleistung. Im Fall der Europäischen Union erstreckt sich dies auf eine Vielzahl von Verordnungen des Rats, Richtlinien und sonstige für die Mitgliedstaaten bindende Instrumente.

### Besondere Regelungen für Haftung und Schadensersatz

Die meisten OECD-Länder haben Sonderbestimmungen zu Haftung und Schadensersatz verabschiedet, um sicherzustellen, dass im Falle von Schäden infolge nuklearer Ereignisse Anspruch auf angemessene Entschädigung besteht. Diese Regelungen nehmen insofern eine Sonderstellung ein, als sie von den Rechtsgrundsätzen abweichen, die normalerweise für die Haftung bei durch gefährliche Aktivitäten verursachten Schäden maßgeblich sind.

Gemäß diesen Sonderregelungen trägt der Betreiber einer Kernanlage<sup>3</sup> die sowohl *verschuldensunabhängige* als auch *ausschließliche* Haftung für nukleare Schäden, die Dritten infolge von nuklearen Ereignissen entstehen, die in seiner Anlage eingetreten sind bzw. die mit aus seiner Anlage stammenden radioaktiven Stoffen in Zusammenhang stehen. Allerdings sind zumeist Haftungshöchstgrenzen sowie feste Fristen für die Einreichung der Schadensersatzklagen vorgesehen. Im OECD-Raum sind die Inhaber von Kernanlagen zur Aufrechterhaltung einer finanziellen Sicherheit in Höhe des Haftungsbetrags verpflichtet, damit gewährleistet ist, dass die zur Schadensersatzzahlung erforderlichen Mittel zur Verfügung stehen (Deckungsvorsorge). Diese finanzielle Sicherheit kann auf vielerlei Wegen erlangt werden, z.B. durch Bankbürgschaften, Verpfändung von Anlagewerten, staatliche Bürgschaften oder eine Art staatlicher Versicherung; in der Praxis ist die am weitesten verbreitete Form der Deckungsvorsorge jedoch der Abschluss einer Privatversicherung.

Angesichts der Größe der Risiken und der Höhe der erforderlichen Deckungsbeträge ist es indivi-

Die auf Grund des Kernreaktorunfalls von Three Mile Island in den Vereinigten Staaten im Jahr 1979 zur Begleichung von Schadensersatzansprüchen gezahlte bzw. noch zu zahlende Versicherungssumme beläuft sich auf 100 Mio. US- $\$$ .

Verschuldensunabhängige Haftung bzw. Gefährdungshaftung bedeutet, dass der Betreiber einer Kernanlage für Verletzungen oder Schäden Dritter infolge eines nuklearen Ereignisses in seiner Anlage haftbar ist, ohne dass ihm ein Fehler oder eine Nachlässigkeit nachgewiesen werden muss.

Ausschließliche Haftung bedeutet, dass nur der Betreiber der Kernanlage, in der es zu dem Ereignis kam, für die von Dritten erlittenen Verletzungen oder Schäden haftbar gemacht werden kann.

Als Dritte gelten in diesem Kontext alle Personen, bei denen es sich weder um den Betreiber der Kernanlage noch um Zulieferer von für den Inhaber bestimmten Gütern, Dienstleistungen oder Technologien handelt.

Zu beachten ist, dass in den meisten OECD-Ländern die erforderliche finanzielle Sicherheit nur zur Entschädigung der Opfer, nicht jedoch zur Deckung von Kosten oder Zinsen eingesetzt werden darf.

2. Ziel eines „wegberedenden“ Übereinkommens ist es, die Einhaltung durch freiwillige Zusammenarbeit anstatt durch Kontrollen und Sanktionen zu erwirken.
3. Die Definition des Begriffs *Kernanlagen* kann von Land zu Land etwas variieren, umfasst jedoch im Allgemeinen Kernreaktoren, Anlagen zur Herstellung und Aufbereitung von Brennelementen, Isotopentrennanlagen, Anlagen zur Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen sowie Anlagen für die Zwischen- oder Endlagerung von abgebrannten Brennelementen, radioaktiven Stoffen oder Abfällen.



Internationale Übereinkommen sind ein bedeutendes Instrument zur weltweiten Koordinierung der Kernenergienutzung.

Gemäß dem Pariser Übereinkommen ist der Betreiber einer Kernanlage nicht von der Haftung für Schäden freigestellt, die durch ein unmittelbar auf terroristische Handlungen zurückgehendes nukleares Ereignis verursacht werden.

duell operierenden Versicherungsunternehmen nicht möglich, diese Risiken alleine zu versichern. Daher wird die Privatversicherung von Kernanlagen in den einzelnen Ländern jeweils von Versicherungsgemeinschaften bzw. „Pools“ übernommen, d.h. Gruppen von Versicherungsunternehmen, die sich zum Zweck der gemeinsamen Risikodeckung zusammengeschlossen haben<sup>4</sup>. Seit ihrer Einrichtung Mitte der fünfziger Jahre hat sich die Kapazität dieser Versicherungsgemeinschaften um ein Vielfaches erhöht, nicht nur weil ihnen mehr Versicherungsunternehmen beigetreten sind, sondern auch weil sie mit wachsender Erfahrung mehr Risiken abzudecken imstande sind. Dennoch bleibt ihre Finanzkapazität insgesamt selbst bei Zusammenlegung der Mittel im Allgemeinen immer noch hinter dem Umfang der finanziellen Sicherheit zurück, die von den Betreibern von Kernanlagen verlangt wird. Daher arbeiten die Versicherungspools der einzelnen Länder zur Deckung des Restbetrags mit den Pools anderer Länder zusammen. Im Allgemeinen verpflichtet sich der federführende Versicherungspool des jeweiligen Landes zur Zahlung des vollen Versicherungsbetrags an den Versicherungsnehmer und schließt dann für den Großteil dieses Betrags eine Rückversicherung<sup>5</sup> mit einem anderen Pool ab.

Man ist sich darüber im Klaren, dass die Höhe des für den Betreiber geltenden Haftpflichtversicherungsschutzes u.U. nicht ausreicht, um die Folgen einer nuklearen Katastrophe abzudecken. Daher wurden in den meisten OECD-Ländern ergänzend zu den geltenden Deckungsvorsorgeverpflichtungen Mechanismen bzw. Maßnahmen eingeführt, dank denen zusätzliche finanzielle Hilfen

oder Schadensersatzleistungen aus öffentlichen Mitteln gezahlt werden können, wenn die finanzielle Sicherheit des Betreibers nicht zur Erfüllung der Schadensersatzverpflichtungen ausreicht. Die jeweiligen Maßnahmen und Deckungssummen sind von Land zu Land verschieden.

Neben der Einrichtung dieser nationalen Entschädigungssysteme sind viele Länder auch Unterzeichnerstaaten bzw. Vertragsparteien des einen oder anderen internationalen Übereinkommens, in dem die Haftpflicht- und Entschädigungsregeln für das komplexe Verfahren der Einklagung von Schadensersatz bei nuklearen Unfällen mit grenzüberschreitenden Folgen festgelegt sind. Bei diesen Übereinkommen handelt es sich um:

- das *Pariser Übereinkommen über die Haftung gegenüber Dritten auf dem Gebiet der Kernenergie* von 1960 (Pariser Übereinkommen);
- das *Brüsseler Zusatzübereinkommen zum Pariser Übereinkommen* (Brüsseler Zusatzübereinkommen, BZÜ, 1963);
- das *Wiener Übereinkommen über die zivilrechtliche Haftung für nukleare Schäden* von 1963 (Wiener Übereinkommen);
- das *Gemeinsame Protokoll über die Anwendung des Wiener Übereinkommens und des Pariser Übereinkommens* (Gemeinsames Protokoll von 1988);
- das *Protokoll zur Änderung des Wiener Übereinkommens über die zivilrechtliche Haftung für nukleare Schäden* von 1997 (Wiener Zusatzprotokoll)<sup>6</sup>;
- das *Übereinkommen zur Bereitstellung zusätzlicher Entschädigungsmittel bei Nuklearschäden* von 1997 (Entschädigungsmittelübereinkommen)<sup>7</sup>.

Dem Pariser Übereinkommen, dem Wiener Übereinkommen und dem Wiener Zusatzprotokoll liegen dieselben Prinzipien zu Grunde:

4. Gemeinsame Risikodeckung heißt, dass eine Gruppe von Versicherungsunternehmen ein bestimmtes Risiko gemeinsam absichert, wobei sich die Summe ihrer jeweiligen Anteile auf 100% beläuft.
5. Rückversicherung bedeutet, dass ein Versicherer oder Mitversicherer einen Teil des von ihm eingegangenen Risikos an einen anderen Versicherer abtritt, an den er eine Prämie zahlt, womit er im Wesentlichen das von ihm selbst versicherte Risiko versichert.
6. Das *Protokoll zur Änderung des Wiener Übereinkommens über die zivilrechtliche Haftung für nukleare Schäden* von 1997 ist am 4. Oktober 2003 in Kraft getreten.
7. Das *Übereinkommen zur Bereitstellung zusätzlicher Entschädigungsmittel bei Nuklearschäden* von 1997 war zum 1. Januar 2006 noch nicht in Kraft getreten.

Tabelle 8.1: Internationale Übereinkommen über Haftung und Schadensersatz sowie deren Geltungsbereich in den OECD-Mitgliedsländern<sup>a</sup>

	Pariser Überein- kommen	BZÜ	Wiener Überein- kommen	Gemein- sames Protokoll	Ungefähre Höhe der für die Betreiber von Kernanlagen nach nationalem Recht geltenden Haftungsbeträge (soweit nicht anders vermerkt, deckt sich die Obergrenze der finanziellen Sicherheit mit dem Haftungsbetrag) <sup>b</sup>
Australien					Keine besonderen gesetzlichen Regelungen.
Belgien	✓	✓			300 Mio. Euro.
Dänemark	✓	✓		✓	60 Mio. SZR (rd. 90 Mio. Euro).
Deutschland	✓	✓		✓	Unbeschränkte Haftung, für die finanzielle Sicherheit gilt jedoch eine Obergrenze in Höhe von rd. 2 500 Mio. Euro.
Finnland	✓	✓		✓	175 Mio. SZR (rd. 260 Mio. Euro).
Frankreich	✓	✓			91,5 Mio. Euro.
Griechenland	✓			✓	Keine besonderen gesetzlichen Regelungen.
Irland					Keine besonderen gesetzlichen Regelungen.
Island					Keine besonderen gesetzlichen Regelungen.
Italien	✓	✓		✓	4 Mio. Euro.
Japan					Unbeschränkte Haftung, für die finanzielle Sicherheit gilt jedoch eine Obergrenze in Höhe von rd. 60 000 Mio. Yen für Reaktoren mit über 10 000 kW. <sup>c</sup>
Kanada					Obergrenze für finanzielle Sicherheit: 75 Mio. kan\$.
Luxemburg					Keine besonderen gesetzlichen Regelungen.
Mexiko			✓		100 Mio. Peso.
Neuseeland					Keine besonderen gesetzlichen Regelungen.
Niederlande	✓	✓		✓	340 Mio. Euro.
Norwegen	✓	✓		✓	60 Mio. SZR (rd. 90 Mio. Euro).
Österreich					Unbeschränkte Haftung, für die finanzielle Sicherheit gilt jedoch eine Obergrenze in Höhe von rd. 400 Mio. Euro.
Polen			✓	✓	150 Mio. SZR (rd. 225 Mio. Euro).
Portugal	✓				Keine besonderen gesetzlichen Regelungen.
Republik Korea					300 Mio. SZR (rd. 450 Mio. Euro).
Schweden	✓	✓		✓	300 Mio. SZR (rd. 450 Mio. Euro).
Schweiz					Unbeschränkte Haftung, für die finanzielle Sicherheit gilt jedoch eine Obergrenze in Höhe von rd. 1 000 Mio. sfr.
Slowakische Rep.			✓	✓	2 000 Mio. SKK.
Spanien	✓	✓			150 Mio. Euro.
Tschechische Rep.			✓	✓	6 000 Mio. CZK.
Türkei	✓				Keine besonderen gesetzlichen Regelungen.
Ungarn			✓	✓	100 Mio. SZR (rd. 150 Mio. Euro).
Vereinigtes Königreich	✓	✓			140 Mio. £.
Vereinigte Staaten					10 400 Mio. US-\$ die Obergrenze für die finanzielle Sicherheit liegt jedoch bei 300 Mio. US-\$.

a. Gestützt auf inoffizielle Schätzungen der Kernenergie-Agentur der OECD, Stand Oktober 2002 (2004 für Vereinigte Staaten).

b. Umrechnungskurs: 1 SZR entspricht 1,48 Euro (Stand 20. Februar 2003, vom IWF ermittelter Wert).

c. Für Reaktoren mit weniger als 10 000 kW liegt die Obergrenze bei 12 000 Mio. Yen und für sonstige Kernanlagen bei 2 000 Mio. Yen.

Die 1957 gegründete Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) ist eine autonome zwischenstaatliche Organisation innerhalb des Verbunds der Vereinten Nationen, die als Forum für wissenschaftliche und technische Zusammenarbeit im Bereich der friedlichen Nutzung der Kernenergie dient. In ihren Aufgabenbereich fällt insbesondere die Ausarbeitung international anerkannter kerntechnischer Sicherheitsstandards sowie die Überprüfung, dass die Staaten Kernbrennstoff und kerntechnische Anlagen ausschließlich für friedliche Zwecke nutzen. Die IAEO zählt gegenwärtig 139 Mitgliedstaaten.

- verschuldensunabhängige und ausschließliche Haftung des Betreibers für nukleare Schäden Dritter;
- Verpflichtung des Betreibers zur Deckungsvorsorge;
- Haftungshöchstgrenzen für den Betreiber und feste Fristen für die Geltendmachung von Schadensersatzansprüchen durch die Opfer;
- Nichtdiskriminierung der Opfer auf Grund von Staatsangehörigkeit, Firmensitz oder Wohnort;
- Einheitlichkeit der Rechtsprechung, d.h. ein einziges Gericht entscheidet über alle im Zusammenhang mit einem bestimmten Ereignis eingereichten Schadensersatzklagen.

Das gemeinsame Protokoll von 1988 fungiert als geographisches Verbindungsglied zwischen dem Pariser und dem Wiener Übereinkommen. Das Brüsseler Zusatzübereinkommen sieht Entschädigungsmittel zusätzlich zu den im Pariser Übereinkommen festgelegten Beträgen vor. Das Entschädigungsmittelübereinkommen zielt auf die Bereitstellung weiterer Entschädigungsmittel zusätzlich zu den Beträgen ab, die im Pariser Übereinkommen, im Wiener Übereinkommen bzw. in der Gesetzgebung eines Anlagenstaats (gemäß Definition des Übereinkommens) vorgesehen sind.

In Bezug auf die in den oben genannten Übereinkommen von den Betreibern von Kernanlagen geforderten Haftungsbeträge gilt Folgendes:

- Das Wiener Übereinkommen schreibt einen Mindesthaftungsbetrag von 5 Mio. US-\$<sup>8</sup> vor.
- Im Pariser Übereinkommen ist ein Haftungshöchstbetrag von 15 Mio. SZR<sup>9</sup> (rd. 22 Mio. Euro) festgelegt, wenngleich die nationale Gesetzgebung der meisten Vertragsparteien höhere Haftungsbeträge für die Betreiber von Kernanlagen vorsieht, die sich üblicherweise in der Größenordnung von 150 Mio. SZR (rd. 220 Mio. Euro) bewegen.
- Das Brüsseler Zusatzübereinkommen sieht einen Höchstbetrag von 300 Mio. SZR (rd. 450 Mio.

Euro) vor, der aus der finanziellen Sicherheit des haftpflichtigen Betreibers und aus öffentlichen Mitteln des Staates, in dem sich die Anlage des haftpflichtigen Betreibers befindet, sowie aus von allen Vertragsparteien gemeinsam zur Verfügung gestellten öffentlichen Mitteln gedeckt werden soll.

- Das Wiener Zusatzprotokoll wird einen Mindesthaftungsbetrag von 300 Mio. SZR (rd. 450 Mio. Euro) vorschreiben (wovon die Hälfte von dem Staat bereitgestellt werden kann, auf dessen Hoheitsgebiet sich die Anlage befindet).
- Das Entschädigungsmittelübereinkommen wird die Bereitstellung von ungefähr 600 Mio. SZR (rd. 900 Mio. Euro) vorsehen, was bedeutet, dass sich die durch dieses Übereinkommen gesicherten „zusätzlichen“ Mittel auf ca. 300 Mio. SZR (rd. 450 Mio. Euro) belaufen.

Sowohl das Pariser Übereinkommen als auch das Brüsseler Zusatzübereinkommen wurden überarbeitet. Nach Inkrafttreten der Zusatzprotokolle im Jahre 2004 müssen die Haftungsgrenzen mindestens 700 Mio. Euro betragen, während sich der Gesamtentschädigungsbetrag, wie er sich aus dem Pariser und dem Brüsseler Übereinkommen gemeinsam ergibt, auf 1,5 Mrd. Euro erhöhen wird.

Einen Überblick über die internationalen Übereinkommen betreffend Haftung und Schadensersatz, denen die OECD-Staaten beigetreten sind, gibt Tabelle 8.1. In der Tabelle sind die Haftungsbeträge angegeben, die für die Betreiber von Kernanlagen gemäß der jeweiligen nationalen Gesetzgebung gelten und die u.U. von den entsprechenden Beträgen in den von dem betreffenden Land unterzeichneten Übereinkommen abweichen können. Im Falle unterschiedlicher Obergrenzen gilt der jeweils höhere Betrag. Die Betreiber von Kernanlagen müssen eine finanzielle Sicherheit in Höhe des Haftungsbetrags aufrechterhalten. In einigen Ländern sind allerdings sehr hohe bzw. nach oben unbegrenzte Haftungssummen vorgesehen. In diesen Fällen wurden allerdings, wie in der Tabelle angegeben,

8. Dieser Betrag wird auf der Basis seines Goldwerts vom 29. April 1963 definiert (35 US-\$ pro Troy-Unze Feingold), wobei heute im Allgemeinen von einem Wert von ungefähr 60 Mio. US-\$ ausgegangen wird.

9. SZR steht für Sonderzeichnungsrecht, eine vom Internationalen Währungsfonds definierte Rechneinheit. Diese wird täglich auf der Grundlage eines Währungskorbs errechnet, der sich zum 1. Januar 2003 aus dem Euro, dem Yen, dem US-Dollar und dem Pfund Sterling zusammensetzte. Zum 20. Februar 2003 entsprach ein SZR 1,48 Euro bzw. 1,37 US-\$.

für die finanzielle Sicherheit niedrigere Obergrenzen festgesetzt, um den Betreibern gleichwohl den Abschluss einer Versicherung zu ermöglichen.

Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, sind viele Länder, die in erheblichem Umfang Kernanlagen betrieben, den genannten Übereinkommen nicht beigetreten, so z.B. China, Japan, Kanada, die Republik Korea, die Schweiz und die Vereinigten Staaten. Die meisten dieser Länder haben jedoch identische Grundsätze in ihren nationalen Gesetzgebungen verankert.

Das Atomrecht wird sich, wie dies auch bisher der Fall war, auf nationaler wie internationaler Ebene weiterentwickeln. Darin schlägt sich die Notwendigkeit nieder, nicht nur den wissenschaftlichen und technologischen Entwicklungen im Nuklearbereich gebührend Rechnung zu tragen, sondern auch sicherzustellen, dass bei gleichzeitigem Schutz der öffentlichen Gesundheit und Sicherheit sowie der Umwelt größtmöglicher Nutzen aus der friedlichen Anwendung der Kernenergie gezogen werden kann.

## Nichtverbreitung

In Anbetracht des unvorstellbaren Zerstörungspotenzials von Kernwaffen hat sich die internationale Staatengemeinschaft entschlossen, deren Weiterverbreitung zu verhindern. Indessen werden durchaus die Vorteile gesehen, die die Nutzung von Kernenergie zu friedlichen Zwecken mit sich bringt. Da jedoch ein Großteil des für den Bau von Kernwaffen erforderlichen Wissens gewissermaßen automatisch beim Einsatz von Kernenergie und/oder Kernforschungsanlagen bzw. bei den entsprechenden Vorbereitungsarbeiten erworben wird, ist es schwierig, die Verbreitung von Kernwaffen zu verhindern, zugleich aber die Entwicklung der friedlichen Nutzung von Kernenergie zu gestatten. Die Gefahr der Verbreitung von Kernwaffen wird folglich so lange ein Problem für die Kernenergienutzung bleiben und in der Öffentlichkeit Anlass zur Sorge geben, wie es nicht gelingt, die Verzahnung von ziviler und militärischer Nutzung von Kernenergie nachhaltig und wirksam zu durchbrechen.

Die Herstellung von Kernwaffen ist ein komplexes Unterfangen, für das nicht nur besondere **Spaltstoffe**, sondern auch die nötigen Kenntnisse und Technologien für Entwicklung, Bau, Handhabung und Einsatz dieser Waffen erforderlichlich

sind. Normalerweise wird es auch als notwendig erachtet, Kernwaffen auf ihre Verlässlichkeit und Wirksamkeit hin zu testen.

1946 begann die internationale Staatengemeinschaft, sich gezielt mit jeder einzelnen dieser „unabdingbaren Voraussetzungen“ zu befassen, um den Zugang zu Materialien und kritischen Technologien zu versperren, Kernwaffentests zu verhindern und den Zugang zu dem für den Bau von Kernwaffen erforderlichen Wissen zu begrenzen (vgl. Abb. 8.1). Diese Anstrengungen gipfelten in einer Reihe internationaler Verträge, namentlich dem *Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen* (Nichtverbreitungsvertrag, NVV, 1970 in Kraft getreten) und dem *Vertrag über das umfassende Verbot von Nuklearversuchen* (UVNV, noch nicht in Kraft), die nach wie vor die Basis aller Bemühungen um Verhinderung der Weiterverbreitung von Kernwaffen bilden.

Der NVV teilt die Welt in zwei Gruppen, auf der einen Seite die Staaten, die zum Zeitpunkt der Einführung des Vertrags über Kernwaffen verfügten, die „Kernwaffenstaaten“, bei denen es sich damals um China, Frankreich, Russland, das Vereinigte Königreich und die Vereinigten Staaten handelte, und auf der anderen Seite die übrigen Vertragsparteien, die so genannten „Nichtkernwaffenstaaten“. Anfang 2003 hatten 188 Staaten den Vertrag unterzeichnet, darunter zuletzt Kuba, das im November 2002 beigetreten war. Alle Kernwaffenstaaten verpflichteten sich, keine Kernwaffen weiterzugeben, Nichtkernwaffen-

„Gelingt es nicht, ein Verbot von Kernwaffenversuchen durchzusetzen, so wäre dies die größte Enttäuschung für jede Regierung, jedes Jahrzehnt, jede Epoche und jede Partei überhaupt.“  
*Dwight D. Eisenhower, 1961.*

Abbildung 8.1: Die einzelnen Elemente des Nichtverbreitungsregimes



Die Nuclear Suppliers Group (NSG) ist ein Verbund nuklearer Lieferländer, deren Zahl sich im Ende 2005 auf 45 belief und die sich zusammengeschlossen haben, um die Verbreitung von Kernwaffen zu verhindern. Die Mitgliedsländer sind bestrebt, die NSG-Ziele durch die Einhaltung einvernehmlich festgelegter Richtlinien für nukleare und damit zusammenhängende Exporte und den Austausch von Informationen zu erreichen.

staaten nicht bei der Entwicklung von Kernwaffen zu unterstützen und auf nukleare Abrüstung hinarbeiten. Indien, Israel und Pakistan lehnten es bisher ab, den NVV zu unterzeichnen.

### Kontrolle von Kernmaterial

Die **Sicherungsmaßnahmen** der IAEO (safeguards) sind das wichtigste Instrument, mit dem aufgedeckt und verhindert werden kann, dass einzelne Staaten Nuklearmaterial zu verbotenen Zwecken abzugeben. Alle Nichtkernwaffenstaaten, die dem NVV beitreten, müssen der Anwendung der IAEO-Sicherungsmaßnahmen auf ihr gesamtes Nuklearmaterial zustimmen. Derartige umfassende Sicherheitsabkommen (*safeguards agreements*) sollen das Vertrauen darin stärken, dass die Nichtkernwaffenstaaten die von ihnen eingegangene Verpflichtung, keine Kernwaffen herzustellen, tatsächlich einhalten. Obwohl sie nicht dazu gezwungen sind, haben auch sämtliche Kernwaffenstaaten Sicherheitsabkommen geschlossen (so genannte *voluntary offers*), die es der IAEO ermöglichen, einen Teil oder die Gesamtheit ihrer zivilen Aktivitäten im Nuklearbereich zu überprüfen. Die IAEO-Sicherungsmaßnahmen erstrecken sich auch auf Nichtunterzeichnerstaaten (Indien, Israel und Pakistan), allerdings nur für ausgewählte Anlagen und nur dann, wenn dies von den Lieferanten der Anlage oder des verwendeten Kernmaterials verlangt wird. 1997 wurde ein Zusatzprotokoll zum Sicherheitsabkommen vereinbart, das Maßnahmen enthält, mit denen die Möglichkeiten zur Aufdeckung etwaiger nicht deklarerter Aktivitäten im Nuklearbereich verbessert werden sollen. Bis Februar 2006 hatten 107 Staaten das Zusatzprotokoll bereits unterzeichnet, und in 75 dieser Länder ist inzwischen auch der Ratifizierungsprozess abgeschlossen.

Den Kern der Sicherheitsmaßnahmen stellt eine Erklärung der jeweiligen Staaten bezüglich ihres Kernmaterials und ihrer Anlagen und Aktivitäten im Nuklearbereich dar, wobei diese Erklärung gekoppelt ist mit der Durchführung von Inspektionen durch die IAEO bzw. dem Zugang der IAEO zu den entsprechenden Anlagen zwecks Überprüfung der gelieferten Informationen. Die Inspektionen der IAEO erfolgen in keinem festgelegten Turnus, werden aber im Voraus angekündigt und finden mindestens einmal jährlich statt. In besonders sensiblen Anlagen können die Inspektionen sogar

kontinuierlich durchgeführt werden. Die IAEO-Inspektionen beinhalten die Überprüfung der Auslegung der Kernanlagen auf Übereinstimmung mit den gelieferten Informationen, die Überprüfung der Betriebsprotokolle, Messungen und Stichprobenentnahmen des Kernmaterials selbst sowie den Einsatz von Überwachungsgeräten und Versiegelungsvorrichtungen zur Sicherung des Kenntnisstands über das jeweilige Material. Gemäß dem Zusatzprotokoll zum Sicherheitsabkommen sind die Staaten verpflichtet, auch darüber hinausgehende Informationen über ihre Aktivitäten im Nuklearbereich zu liefern (d.h. auch über solche Aktivitäten, bei denen nicht zwangsläufig Nuklearmaterial zum Einsatz kommt, sowie über Dual-use-Aktivitäten). Außerdem ist der IAEO der Zugang zu allen in Frage kommenden Standorten im Rahmen von Überraschungsinspektionen gestattet.

Die IAEO-Sicherungsmaßnahmen werden durch weitere regionale Vorkehrungen/Regelungen ergänzt, wie die EURATOM-Sicherungsmaßnahmen und die Brasilianisch-argentinische Agentur für Buchführungs- und Kontrollsysteme für Kernmaterial. Darüber hinaus beugen nationale Sicherheitsmaßnahmen der Entwendung bzw. unerlaubten Abzweigung von Nuklearmaterial oder Kerntechnologien sowie der Sabotage vor. Bei diesen Sicherheitsmaßnahmen handelt es sich mehrheitlich um materielle Sicherheitsvorkehrungen wie Anlagensicherheit, bewaffnetes Wachpersonal, besondere Sicherheitsschlösser, Zugangscodes und Kameraüberwachung; sie umfassen aber auch organisatorische Vorkehrungen, wie z.B. die Einschränkung der Zugangsberechtigung zu sensiblen Informationen und die Überprüfungen des persönlichen Hintergrunds der Beteiligten (so genannte *Security-clearance*-Verfahren).

Die jüngsten Ereignisse haben erneut Sorge über die mögliche Nutzung von radioaktivem oder kernbrennstoffhaltigem Material für terroristische Zwecke aufkommen lassen. Die Möglichkeit, konventionelle Sprengstoffe zur Verteilung radioaktiver Stoffe, so genannte „schmutzige Bomben“ („*dirty bombs*“), einzusetzen, erhöht die Bedeutung nationaler und internationaler Kontrollen radioaktiver Stoffe und Quellen. Die IAEO arbeitet derzeit beispielsweise an einem internationalen Aktionsrahmen zur Verbesserung der Sicherheit von Strahlenquellen.

## Kontrollen kritischer Technologien und Substanzen

Einige kritische Materialien und Technologien (Schlüsseltechnologien) unterliegen sehr strengen internationalen *Ausfuhrkontrollen*, weil es als äußerst wichtig erachtet wird, sicherzustellen, dass sie nicht für militärische Zwecke genutzt werden. Die *Gruppe der Kernmaterial-Lieferländer* (*Nuclear Suppliers Group* – NSG) hat eine Reihe von *Richtlinien für Kernmaterial-Lieferanten* ausgearbeitet, die für die Weitergabe kritischer Materialien und Technologien maßgeblich sind. Die *Guidelines for Nuclear Transfers* beziehen sich auf die Weitergabe von nuklearen Materialien, Ausrüstungen, Technologien, Bauteilen und Anlagen, die in einer Ausfuhrkontrollliste definiert sind. Die NSG-Mitglieder haben vereinbart, keines der auf der Ausfuhrkontrollliste stehenden Güter an solche Nichtkernwaffenstaaten zu liefern, die keine umfassenden Sicherungsabkommen mit der IAEA geschlossen haben. Die NSG hat ferner Richtlinien für den Transfer bestimmter *Dual-use*-Güter bzw. – Technologien festgelegt, die außer in ihren nicht nuklearen Anwendungsbereichen auch im Nuklearsektor eingesetzt werden können, wie z.B. Höchstleistungscomputer.

Desgleichen arbeiten die meisten Vertragsparteien des NWV bereits im Rahmen des *Träger-technologie-Kontrollregimes* (MTCR) zusammen, um den Export von Technologien zum Bau von Trägerraketen zu kontrollieren, die den Einsatz von Kernwaffen ermöglichen würden. Ferner wird gegen den Schmuggel von Kernmaterial vorgegangen, an vorderster Stelle durch das *Illicit Trafficking Programme* der G8-Staaten und die entsprechenden Folgemaßnahmen im Rahmen der IAEA. Auf weniger formeller Ebene tauschen viele Staaten Informationen aus, wenn Verdacht auf illegale Aus- oder Einfuhr von Kerntechnologien oder -materialien besteht, und sie können im Falle vermuteter oder nachweislicher Proliferationsakte Sanktionen verhängen.

## Kontrolle von Kernwaffentests

Die Verhandlungen über ein „umfassendes Verbot von Nuklearversuchen“ (Kernwaffentestverbot) wurden im Januar 1994 eingeleitet, und der entsprechende Vertrag (UVNV) wurde 1996 abgeschlossen; er wird jedoch erst in Kraft treten, wenn er von allen 44 Staaten, die im Besitz von

Kernkraftwerken oder Forschungsreaktoren sind, ratifiziert ist. Der Vertrag verbietet sämtliche nukleare Explosionen für militärische wie auch zivile Zwecke. Die Unterzeichnerstaaten (deren Zahl sich im Dezember 2005 auf 176 belief) kamen überein, nukleare Explosionen an jedem ihrer Hoheitsgewalt oder Kontrolle unterstehenden Ort zu verbieten bzw. zu verhindern und nukleare Explosionen weder zu fördern noch sich in irgendeiner Weise daran zu beteiligen. Mit dem Vertrag wird ein umfassendes Verifikationssystem eingerichtet, das u.a. Inspektionen vor Ort, Bestimmungen in Bezug auf Konsultationen und Klärstellungen sowie gegenseitige vertrauensbildende Maßnahmen vorsieht.

## Eine gemischte Erfolgsbilanz

Durch nationale und internationale Kontrollen von Kernmaterial, Kernwaffenversuchen und Schlüsseltechnologien konnte das Tempo der Weiterverbreitung von Kernwaffen bislang erfolgreich gebremst werden. Die Gefahren, die von Ländern ausgehen, die ihre auf internationaler Ebene eingegangenen Verpflichtungen verletzen oder den Beitritt zum internationalen Nichtverbreitungsregime ablehnen, machen jedoch deutlich, dass kontinuierliche Anstrengungen und Wachsamkeit vonnöten sind, um sicherzustellen, dass Kernenergie ausschließlich zu friedlichen Zwecken genutzt wird.

## Weiterführende Informationen

Vergleiche die Literaturhinweise im Kapitel „Weiterführende Informationen“ wegen eingehenderer Informationen über:

- [Atomrecht](#), vgl. 8.1 bis 8.6;
- [Haftung gegenüber Dritten und Schadensersatz für nukleare Ereignisse](#), vgl. 8.7 bis 8.9;
- [Übereinkommen und Vereinbarungen unter Federführung der IAEA](#), vgl. 8.10;
- [Sicherungsmaßnahmen und Nichtproliferation](#), vgl. 8.11 bis 8.13;
- [besondere internationale Sicherungsverfahren](#), vgl. 8.14 bis 8.16;
- [Nuclear Suppliers Guidelines](#), vgl. 8.17;
- [Vertrag über das umfassende Verbot von Nuklearversuchen](#), vgl. 8.18.



# Kernenergie und nachhaltige Entwicklung

*In den kommenden Jahren wird der globale Energiebedarf wahrscheinlich rasch steigen, bei gleichzeitig wachsenden Befürchtungen der Öffentlichkeit über die Umwelteffekte konkurrierender Energieversorgungssysteme.*

*Vor diesem Hintergrund wird die Frage der Nachhaltigkeit der verschiedenen Energiequellen wahrscheinlich eine immer größere Bedeutung gewinnen, und in diesem Kontext bietet die Kernenergie auf Grund der CO<sub>2</sub>-freien Strom- und Wärmeerzeugung sowie im Hinblick auf die Versorgungssicherheit gewisse Vorteile.*



Das vorliegende Kapitel befasst sich mit der Zukunft der Kernenergie im umfassenderen Kontext von Energieangebot und -nachfrage weltweit.

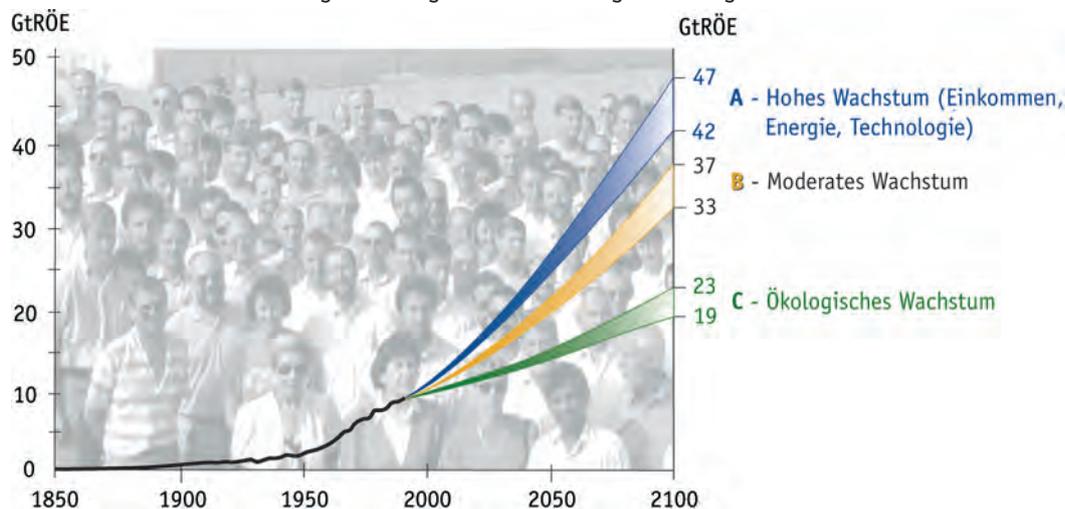
## Energiebedarf

Unter dem Einfluss der wirtschaftlichen Entwicklung und des Bevölkerungswachstums wird der Weltenergiebedarf weiter steigen (vgl. Abb. 9.1). Der Löwenanteil dieses Wachstums dürfte in den Entwicklungsländern stattfinden, die sich stark um eine Anhebung des Lebensstandards ihrer stetig zunehmenden Bevölkerungen bemü-

hen. 1998 kamen das Internationale Institut für Angewandte Systemanalyse (IIASA) und der Weltenergieerät zu der Schlussfolgerung, dass der globale Energiebedarf bis 2050 voraussichtlich um einen Faktor von 1,5 bis 3,0 steigen und sich der Stromverbrauch zumindest verdoppeln wird. Die *British Royal Society* und die *Royal Academy of Engineering* zogen 1999 die Schlussfolgerung, dass sich der Energieverbrauch

*... unter dem Einfluss des Bevölkerungswachstums und der Bemühungen der Menschen um eine Verbesserung ihres Lebensstandards in den kommenden*

Abbildung 9.1: Prognostizierte Energienachfrage bis 2100



Quelle: IIASA. *Global Energy Perspectives* (Cambridge: Cambridge University Press, 1998).

Weltweit haben 2 Milliarden Menschen keinen Zugang zu Strom, und ebenso viele Menschen bedienen sich noch immer traditioneller fester Brennstoffe zum Kochen. *World Energy Assessment, Entwicklungsprogramm der Vereinten Nationen, 2000.*

**Nachhaltige Entwicklung** – eine Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können. *Brundtlandkommission, 1987.*

50 Jahren zumindest verdoppeln und ... in den kommenden 100 Jahren um einen Faktor von bis zu fünf steigen wird.

Die Herausforderung wird darin bestehen, dieser Nachfrage auf eine Art und Weise zu begegnen, die dem wachsenden Wunsch der Gesellschaft gerecht wird, ihre Bedürfnisse von heute zu befriedigen, ohne die künftigen Generationen über Gebühr zu belasten.

## Kernenergie und nachhaltige Entwicklung

Energie ist eine wichtige Komponente jeder Politik für eine nachhaltige Entwicklung, da sie für die menschlichen Aktivitäten und das Wirtschaftswachstum von entscheidender Bedeutung ist. Die Tatsache, dass die derzeitigen Technologien zur Energieversorgung zunehmend als nicht zukunftsfähig angesehen werden, stellt zugleich eine Chance und eine Herausforderung dar. Bis zu welchem Grad die Nachhaltigkeit der Kernenergie nachgewiesen werden kann, wird in erheblichem Maße den Rang bestimmen, den sie im Spektrum der Energieversorgungsquellen einnehmen wird.

Die Nachhaltigkeit jeder Entwicklung wird gewöhnlich unter Berücksichtigung von drei

Dimensionen diskutiert – den *wirtschaftlichen, ökologischen* und *gesellschaftlichen* Aspekten (vgl. Abb. 9.2).

### Wirtschaftliche Aspekte

Die mikroökonomischen Aspekte der Kernenergie wurden in Kapitel 7 erörtert. Die nachstehenden Abschnitte konzentrieren sich auf makroökonomische Elemente.

### Direkte Kosteneinsparungen

Die Fähigkeit, ein verlässliches Stromangebot zu niedrigen Kosten zu gewährleisten, ist ein wichtiger Aspekt der nachhaltigen Entwicklung. Wie in Kapitel 7 gezeigt wurde, kann die Kernenergie auf lange Sicht mit anderen wichtigen Formen der Stromerzeugung kostenmäßig konkurrieren, auch wenn dazu möglicherweise zunächst ergänzende politische Maßnahmen zur Internalisierung der Umweltkosten, Schaffung von Akzeptanz in der Öffentlichkeit und Gewährleistung der Sicherheit der Brennstoffversorgung notwendig sind. Auf kürzere Sicht ist die Wettbewerbsfähigkeit der Kernenergie in den einzelnen Ländern unterschiedlich, hängt aber vor allem von den Preisen für fossile Brennstoffe ab, die in der Regel fluktuieren.

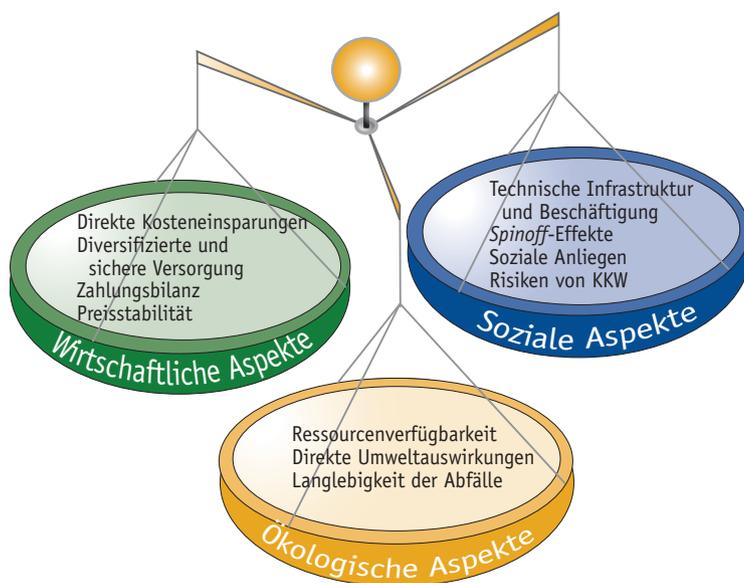
### Vielfalt und Sicherheit der Energieversorgung

Die geographische Verfügbarkeit von Öl und Gas ist recht begrenzt, die Länder des Nahen Ostens und die Russische Föderation kontrollieren über 70% der weltweiten Ölvorkommen und zwei Drittel der Erdgasreserven. Abgesehen von der politischen Instabilität, die z.T. in den Förderregionen herrscht, sind die langen Transportwege zu wichtigen Märkten auch sehr anfällig gegenüber Unterbrechungen der Ölversorgung durch politische Aktionen.

Demgegenüber vereinen die OECD-Länder nahezu 55% der Welt-Uran-Produktion auf sich und verfügen über 40% der nachgewiesenen Uranreserven, verglichen mit rd. 7% der Öl-, 12% der Gas- und 40% der Kohlereserven. Außerdem sind die OECD-Länder autark in Bezug auf die wesentlichen Verfahren, mit denen *Natururan* in nutzbaren *Kernbrennstoff* umgewandelt wird (vgl. Kapitel 3).

Im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen sind Kernbrennstoffe und deren Ausgangsmaterial kompakt und lassen sich einfach lagern, so dass große Bestände zu verhältnismäßig niedrigen Kosten

Abbildung 9.2: Auf die Kernenergie zutreffende Kriterien der nachhaltigen Entwicklung



gehalten werden können. Etwa 25 Tonnen Brennelemente enthalten den Brennstoff, um einen **Druckwasserreaktor** der heutigen Generation mit einer Leistung von 1 GW<sub>e</sub> ein Jahr zu betreiben. Eine kohlebefeuerte Anlage mit vergleichbarer Leistung würde 3 Mio. Tonnen Brennstoff benötigen, d.h. mehr als 100 000-mal soviel.

Nimmt die Abhängigkeit eines Landes von ausländischen Energiequellen zu, steigen auch die Kosten und wirtschaftlichen Konsequenzen von Versorgungsunterbrechungen. Jede Energiequelle, die die Abhängigkeit von externer Brennstoffversorgung reduziert, dürfte die Sicherheit der Energieversorgung und letztlich auch die Sicherheit des betreffenden Landes erhöhen. Versorgungssicherheit war in allen OECD-Ländern schon immer eines der Hauptziele der Energiepolitik.

### Zahlungsbilanz

Die Kernenergie wirkt sich potenziell auf zweierlei Weise positiv auf die Handelsbilanz aus, wenn davon ausgegangen wird, dass ihre Kosten mehr oder minder konkurrenzfähig sind. Erstens ist die Einfuhr verhältnismäßig kleiner Mengen preisgünstigen Urans sehr viel attraktiver als die Einfuhr

relativ großer Mengen teurer Brennstoffe wie Kohle, Öl oder Gas. Zweitens kann die Schaffung oder der Ausbau der spitzentechnologischen Infrastruktur, die zur Unterstützung der Kernenergie notwendig ist, einen Beitrag zur technologischen Leistungsfähigkeit leisten.

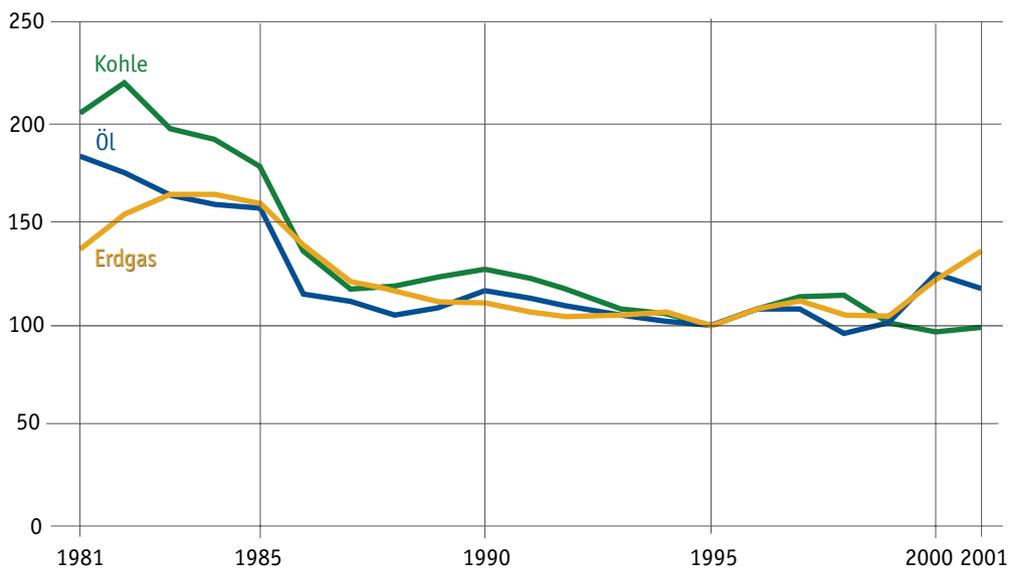
### Preisstabilität

Die Brennstoffkosten sind eine wichtige Komponente des Gesamtpreises der Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen. Der Trend zu Preisfluktuationen bei fossilen Brennstoffen (vgl. Abb. 9.3) schlägt sich daher auch in Schwankungen bei den Strompreisen nieder, vor allem an Wettbewerbsmärkten. Der niedrige Anteil der Brennstoffkosten und der hohe Anteil der Festkosten im Falle der nuklearen Stromerzeugung haben hingegen einen potenziell stabilisierenden Effekt auf die Stromkosten und -preise.

Generell reduzieren Verfügbarkeit und Nutzung eines größtmöglichen Spektrums von Energiequellen den Nachfragedruck auf die einzelnen Energieträger und tragen daher potenziell zu einer allgemeinen makroökonomischen Stabilität bei.

**Uranvorkommen** werden nach ihrer wirtschaftlichen Attraktivität und dem Vertrauen in ihre Existenz klassifiziert. Ressourcen, die nachgewiesen wurden und sich mit konventionellen Techniken kostengünstig abbauen lassen, werden als *Known Conventional Resources* (Nachgewiesene konventionelle Vorkommen) bezeichnet. Diese Ressourcen sind in zwei Untergruppen aufgeteilt: *Reasonably Assured Resources* (RAR – Gesicherte Reserven) und *Estimated Additional Resources – Category I* (EAR-I – Geschätzte zusätzliche Vorkommen – Kategorie I). Ressourcen, deren Existenz und Erschließung mit konventionellen Förderungstechniken angenommen wird, ohne geologisch bestätigt zu sein, zählen zur Gruppe der *Undiscovered Conventional Resources* (Nicht entdeckte konventionelle Vorkommen). Sie umfassen auch die *Estimated Additional Resources – Category II* (EAR-II – Geschätzte zusätzliche Ressourcen – Kategorie II) und *Speculative Resources* (SR – Spekulative Vorkommen).

Abbildung 9.3: Langjährige Preisschwankungen bei fossilen Brennstoffen



Anmerkung: Der "reale" Preisindex wird anhand der Preise in nationaler Währung berechnet und durch die länderspezifischen Verbraucherpreisindizes für den Industriesektor und den Verbraucherpreisindex für den Haushaltssektor dividiert. Das Basisjahr ist hier 1995.

Quelle: IEA. *Energy Prices and Taxes* (Paris: IEA, zweites Quartal 2002).

## Umweltaspekte

Die ökologische Nachhaltigkeit eines bestimmten Rohstoffs wird generell in Bezug auf dessen Verfügbarkeit, d.h. den Umfang der Reserven, und dessen direkte Umweltauswirkungen diskutiert.

## Ressourcenverfügbarkeit

Uran ist in der Erdkruste und den Ozeanen weit verteilt und ist reichlicher vorhanden als Silber. Anfang 2001 wurden die konventionellen (nachgewiesenen und nicht nachgewiesenen) Uranressourcen auf insgesamt über 16 Mio. t geschätzt, was unter Zugrundelegung des derzeitigen Verbrauchs einer Versorgungsreichweite von nahezu 250 Jahren entspricht. Zusätzlich gibt es aber noch unkonventionelle Quellen, in denen Uran mit sehr niedrigem Gehalt vorkommt oder aus denen es als Nebenprodukt gewonnen wird. Diese belaufen sich auf ungefähr weitere 22 Mio. t in Phosphatlagerstätten und bis zu 4 Mrd. t Uran im Meerwasser. Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass es möglich ist, die enormen Ressourcen im Meerwasser zu erschließen, wengleich derzeit nur im Labormaßstab. Außerdem werden die Kosten hierfür als sehr hoch eingeschätzt, auf etwa das 5-10 fache der derzeitigen Kosten für konventionell abgebautes Uran.

Auf lange Sicht hängt die Reichweite der Uranreserven von den eingesetzten Reaktortechnologien und Brennstoffkreislaufstrategien ab. Die **Wiederaufarbeitung** von **abgebrannten Brennelementen** aus derzeit existierenden **Leichtwasserreaktoren** könnte den Uranverbrauch prinzipiell um 10-15% reduzieren. Die Einführung schneller Reaktoren würde den Nutzungsgrad des Brennstoffs zusätzlich erhöhen; ein Austausch aller gegenwärtig laufenden thermischen Reaktoren gegen schnelle Reaktoren und Brennstoffkreisläufe mit Wiederaufarbeitung würde die Uranreserven um einen Faktor von 50 erhöhen (vgl. Tabelle 10.1). Weitere fortgeschrittene Techniken, die derzeit ins Auge gefasst werden, könnten eher Thorium als Ausgangsbrennstoff und nicht mehr Uran nutzen und damit die nuklearen Brennstoffressourcen vergrößern. Insbesondere Indien, das über große Thoriumvorräte verfügt, arbeitet derzeit am Einsatz eines Thorium-Brennstoffkreislaufs. Zusammenfassend muß die Kernenergie als Energieform mit weitreichenden Ressourcen angesehen werden.

## Direkte Umwelteffekte

Die Kernenergie zählt zu den wenigen Energiequellen, die praktisch keine Luftschadstoffe oder Treibhausgase emittieren. Schätzungen zufolge werden im gesamten nuklearen **Brennstoffkreislauf**, einschließlich des Uran-Erzabbaus und der Errichtung von Kernkraftwerken, je kWh erzeugten Stroms 2,5-6 Gramm CO<sub>2</sub> emittiert. Das entspricht in etwa den geschätzten Emissionen beim Einsatz erneuerbarer Energien (Wind, Wasser- und Solarenergie) und ist rd. 20-27-mal geringer als die Emissionen aus gasbefeuerten Kraftwerken, der saubersten aller verfügbaren fossilen Energiequellen (vgl. Abb. 9.4).

Somit ist die Kernenergie eines der besten verfügbaren Technologien, um CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Umwelt zu begrenzen. Allein in den OECD-Ländern wird durch den Einsatz von Kernkraftwerken der Ausstoß von etwa 1 200 Mio. t CO<sub>2</sub> jährlich vermieden. Unter der Annahme, dass alle Kernkraftwerke der Welt durch moderne Kraftwerke mit fossilen Brennstoffen ersetzt würden, nähme die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Energiesektors weltweit um rd. 8% zu.

Bei der Kernenergie werden auch keine lokal wirksamen luftverschmutzenden Gase und Partikel wie Schwefel und Stickoxide emittiert, die mit dem sauren Regen und Atemwegkrankheiten assoziiert werden. Die Menge an festen Abfällen, die je Stromeinheit entsteht, ist bei nuklearen Energiequellen sehr viel geringer als bei jedem anderen fossilen Energieträger. Sie entspricht im Wesentlichen derjenigen Menge, wie sie bei erneuerbaren Energien, etwa der Solarenergie, anfällt (vgl. Abb. 9.5).

Wenn von der Kernenergie ein sehr großer Beitrag zur Verringerung einer übermäßigen Erderwärmung erwartet wird, bedarf es aber einer starken Expansion der Kernenergiekapazität. Derzeit findet die Kernkraft nur in einem Sektor der Energienutzung, der Stromerzeugung, Anwendung. Gegenwärtigen Schätzungen zufolge würde selbst bei einem Ausbau der vorhandenen Kernkraftkapazität um einen Faktor von 10 bis Ende 2100 der Anteil der Kernenergie am gesamten Primärenergieverbrauch von gegenwärtig 7% auf nicht mehr als 25% steigen, und es könnten so etwa 15% der insgesamt erwarteten CO<sub>2</sub>-Emissionen in diesem Zeitraum vermieden werden. Fände eine derartige Expansion der Kernkraft aber mit den vorhandenen Technologien statt, würde

Die Luftverschmutzung verursacht jedes Jahr 2,7-3,0 Millionen vorzeitige Todesfälle bzw. 5-6% der globalen Mortalität. *Weltgesundheitsorganisation, 1997.*

sich auch das akkumulierte Volumen (und auch die Gesamtaktivität) des radioaktiven Abfalls erheblich erhöhen.

Die Kernenergie ist eine Option, die dazu beitragen könnte, den prognostizierten Anstieg des weltweiten Energieverbrauchs zu decken, und dies im Wesentlichen ohne zusätzliche CO<sub>2</sub>-Emissionen. Um auf diesem Niveau aber Effizienz und Akzeptanz sicherzustellen, bedarf es fortgeschrittener Reaktortechnologien und Wiederaufarbeitungsstrategien. Im Wesentlichen müsste im Lauf des Jahrhunderts der derzeitige Bestand an thermischen Leichtwasserreaktoren durch fortgeschrittene Technologien, wie Schnelle Brüter mit Wiederaufarbeitung, ersetzt werden. Derartige Neuerungen würden erhebliche Investitionen erfordern, die aber wohl kaum den Investitionsbedarf für andere Technologien zur Deckung des wachsenden Energieverbrauchs übersteigen, andererseits aber die Erderwärmung begrenzen würden.

### Langlebige Abfälle

**Hochaktive Abfälle** haben zwar nur ein geringes Volumen, sind jedoch für sehr lange Zeiträume radioaktiv. Seit mehreren Jahrzehnten werden tiefe geologische Endlagerstätten untersucht, und nach Meinung der Experten gibt es keine technischen Hindernisse für die Einrichtung von Endlagern mit entsprechend hohem Sicherheitsstandard. Obwohl in Finnland und den Vereinigten Staaten in jüngerer Zeit Fortschritte erzielt wurden, ist bisher noch kein Endlager einsatzbereit. So stellt die Entsorgung von hochaktivem Abfall heute noch immer eine Herausforderung für die nachhaltige Entwicklung der Kernenergie dar.

Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den Bereichen fortgeschrittene Brennstoffzyklen und Abfallbehandlung versprechen eine Reduzierung des Abfalls, für den eine Verpackung erforderlich ist, wie auch des Zeitraums, in dem dieser Abfall isoliert bleiben muss. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden aber erst in einigen Jahrzehnten verfügbar sein.

### Gesellschaftliche Aspekte

#### Technische Infrastruktur und Beschäftigung

Jede Technologie wird von Menschen geschaffen und erhalten. Die Kernenergie weist in dieser Hinsicht spezifische Merkmale auf, da sie im Wesentlichen auf wissenschaftlichen und tech-

nischen Entwicklungen des 20. Jahrhunderts beruht. Ein Großteil der Kosten von kerntechnischen Anlagen ist in den Wissenschafts- und Technologie-Aufwendungen begründet, die für die kontinuierliche Sicherheit der Anlagen und ihre weiterführende Entwicklung unerlässlich sind. Ferner beschäftigt die kerntechnische Industrie im Vergleich zu den meisten anderen Bereichen der Energie- und verarbeitenden Industrie einen hohen

Abbildung 9.4: Treibhausgasemissionen durch die Stromerzeugung aus verschiedenen Quellen

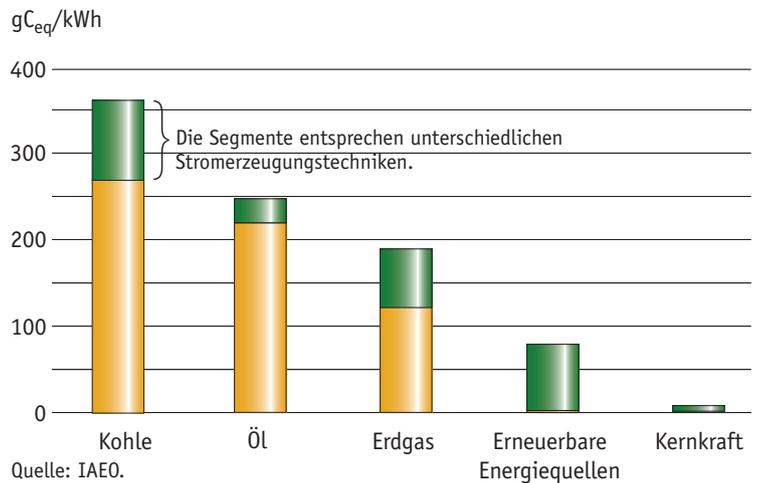
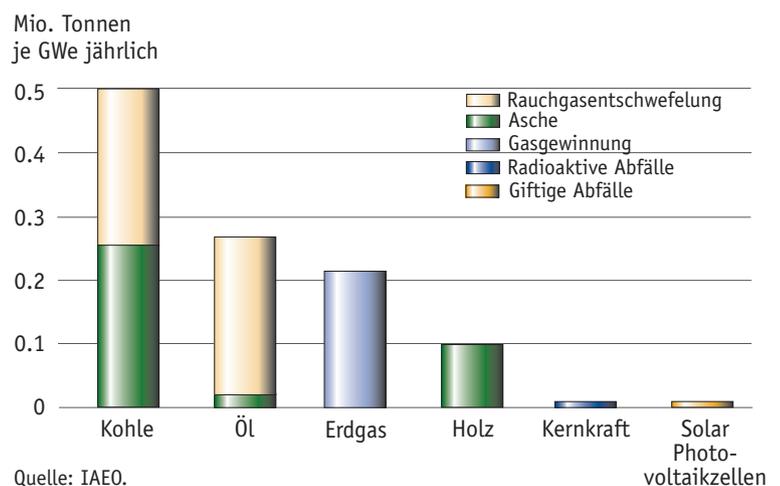


Abbildung 9.5: Gesamte Abfallproduktion je Energieträger



Anteil an qualifizierten Fachkräften mit Hochschulabschluss. Diese stellen ein sehr wichtiges, jedoch auch sensibles Humankapital dar, das auch eine Voraussetzung für eine kontinuierliche Leistungssteigerung dieses Industriezweiges, und in gewisser Hinsicht auch darüber hinaus, ist.

Die Nachhaltigkeit der Kernenergie hängt von der komplexen und kostspieligen Infrastruktur ab, die diesem gesellschaftlichen Kapital zu Grunde liegt. Es ließe sich bei einem Verlust nur schwer und weder preiswert noch schnell ersetzen.

### Spin-off Effekte

Die Erhaltung und Verbesserung der technischen und intellektuellen Infrastruktur zur Unterstützung der Kernenergie bietet einer Gesellschaft zahlreiche gesellschaftlich relevante Spinoff-Vorteile. Wie auch andere fortgeschrittene Technologien hat die Kernenergie historisch eine wichtige Rolle bei der Entwicklung neuer Werkstoffe, Techniken und Fertigkeiten gespielt, die von anderen Bereichen wie Medizin, Verarbeitung, öffentliche Gesundheit und Landwirtschaft mit den entsprechenden wirtschaftlichen Vorteilen aufgegriffen wurden.

### Gesellschaftliche Anliegen

Alle Energietechnologien lösen tendenziell in der Gesellschaft Diskussionen und manchmal auch Konflikte aus. Im Fall der Kernenergie haben sich die Diskussionen auf Fragen der Sicherheit, Weiterverbreitung und Abfallentsorgung konzentriert. Die Kohle hat ihre eigene, lange zurückreichende Geschichte von Konflikten und gesellschaftlichen Spannungen, und das Gleiche gilt auf internationaler Ebene für das Öl. Selbst die Nutzung erneuerbarer Energien gerät seit einiger Zeit zunehmend in die Kritik, die sich an der Verschandelung des Landschaftsbildes und der Inanspruchnahme großer Areale entzündet. Große Wasserkraftprojekte rufen wegen der gesellschaftlichen und ökologischen Auswirkungen der mit ihnen verbundenen massiven Überschwemmungen auf globaler Ebene Widerstand hervor.

### Risiken von Kernkraftwerken

Wie bei jeder anderen großen Industrieanlage und trotz aller getroffenen Vorsichtsmaßnahmen stellen Kernkraftwerke für die Arbeitskräfte, die in ihrer unmittelbaren Nähe lebenden Menschen und, im Falle eines sehr schweren Reaktorunfalls wie

dem von Tschernobyl, auch für weit entfernt lebende Menschen eine potentielle Gefahr dar. Gewöhnlich werden diese Risiken unter dem Aspekt der radiologischen Folgen bei normalem Betrieb und bei Stör- bzw. Unfällen analysiert. Angesichts des hoch qualifizierten Personals, der soliden Betriebspraktiken und strengen aufsichtsrechtlichen Kontrollen ist die Kernenergie vom industrietechnischen Sicherheitsstandpunkt aus betrachtet vergleichsweise sicher. Daten aus den Vereinigten Staaten für das Jahr 2000 ergeben beispielsweise eine Unfallquote in Kernkraftwerken von 0,26 je 200 000 Arbeitsstunden, verglichen mit einem landesweiten Durchschnitt je Arbeitsplatz von 3,0.

### Risiken beim Normalbetrieb

Radiologische Gefährdungen beim Normalbetrieb entstehen durch alltägliche Ableitung von radioaktiven Stoffen in Luft und Wasser. Für diese Ableitungen gelten in allen OECD-Ländern strenge Vorschriften der zuständigen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden. Ferner unterliegen sie internationalen Übereinkommen, wie z. B. dem OSPAR-Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordost-Atlantik, bei deren Sitzung auf Ministerebene 1998 in Sintra, Portugal, eine Einigung erzielt wurde, die eine Reduzierung der zusätzlichen radioaktiven Belastung durch Einleitungen und Emissionen in die Meeresumwelt auf „nahe null“ bis Ende 2020 fordert.

Prinzipiell können Ableitungen dieser Art in die Nahrungsmittelkette (beispielsweise über Schalentiere) gelangen und mithin eine Gefahr für die menschliche Gesundheit darstellen. Es lassen sich Schätzungen der Wahrscheinlichkeit vornehmen, mit der Menschen, die in der Nähe von Kernkraftwerken leben oder Meerestiere in sehr großen Mengen zu sich nehmen, durch schwachaktive Belastungen Gesundheitsschäden erleiden. Nach derartigen Schätzungen, ergeben sich Risiken, die deutlich unter 1 von 1 000 000 der jährlich theoretisch gefährdeten Personen liegt.

### Risiken bei Unfällen

Die Risiken bei Unfällen lassen sich sehr viel schwerer abschätzen, z.T. weil sich kerntechnische Unfälle generell sehr selten ereignen und z.T. weil die Folgen so unterschiedlich ausfallen können.

Es sind Untersuchungen durchgeführt worden, um die Wahrscheinlichkeit abzuschätzen, mit der

Schutzbarrieren in modernen Kernkraftwerken bei einem Unfall funktionsuntüchtig werden und so hypothetisch radioaktive Emissionen unterschiedlichen Ausmaßes verursachen. Die Rechnungen zeigen generell, dass die Wahrscheinlichkeit eines derartigen Unfalls in einem modernen Reaktor, der nach den Erkenntnissen aus den Unfällen von Three Mile Island und Tschernobyl aufgerüstet wurde, bei weniger als 1 zu 100 000 pro Jahr liegt. Bei den Konstruktionen für künftige Reaktoren wurde die Möglichkeit des Ereignisses schwerer Unfälle ausdrücklich berücksichtigt, und die Rechnungen zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit eines schweren Unfalls sogar noch geringer ist, mit einer Größenordnung von 1 zu 1 000 000 pro Jahr. Bei der Beurteilung dieser Angaben muss aber der Tatsache Rechnung getragen werden, dass die Effekte eines großen nuklearen Unfalls erhebliche Folgen haben können, darunter auch den Tod vieler Menschen (der z.T. erst Jahrzehnte nach dem Unfall eintreten kann), den Verlust von Bau- und Agrarland sowie den Verlust großer Mengen an Stromerzeugungskapazität, Effekte, die allesamt schwerwiegende Folgen für die Allgemeinheit hätten.

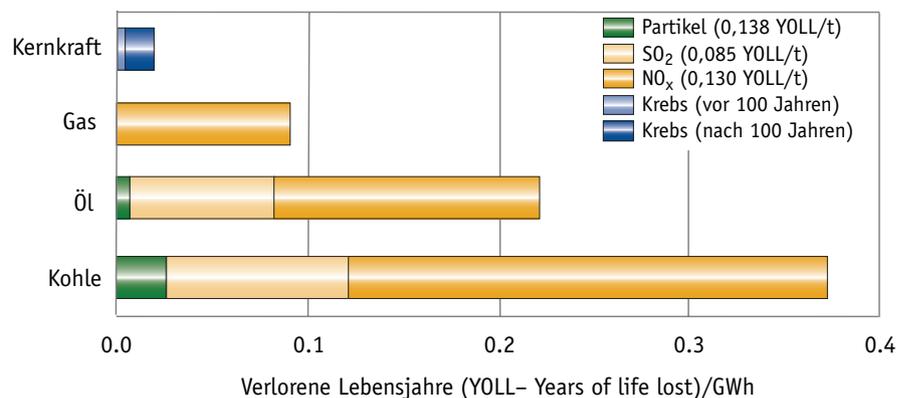
Bei der Betrachtung der potenziellen Gefahren der Kernenergie muss diese Form der Energieerzeugung vor dem Hintergrund der wachsenden Energienachfrage der Gesellschaft gesehen werden. Ein Blick auf die potenziellen Risiken verschiedener Energieträger zeigt, dass die mögliche Belastung

der Umwelt und der öffentlichen Gesundheit durch die Kernenergie geringer ist als beim Einsatz fossiler Brennstoffe (vgl. Abb. 9.6).

Aus einer umfassenderen Sicht müssen auch die weniger quantifizierbaren Risiken berücksichtigt werden, wie beispielsweise eine zu starke Abhängigkeit von Brennstoffimporten aus weit entfernten Ländern, die bei einer Unterbrechung der Versorgungskette erhebliche wirtschaftliche Störungen verursachen könnte. Außerdem könnten fossile Energiequellen, von denen immer stärker angenommen wird, dass sie zur Erderwärmung beitragen, in manchen Ländern zu schwerwiegenden Konsequenzen führen, z.B., dass Teile von Küstenregionen unbewohnbar werden.

Kerntechnische Einrichtungen aller Art zählen zu den potenziellen Anschlagzielen von Terroristen. Im Gegensatz zu vielen anderen industriellen Bereichen werden bei Kernkraftwerken als Reaktion auf diese potenzielle Bedrohung aktive Schutzmaßnahmen ergriffen, wenngleich absolute Sicherheit nie garantiert werden kann. Risiken dieser Art lassen sich sehr schwer quantifizieren oder auch nur beschreiben, doch stellen Kernkraftwerke auf Grund der ihnen eigenen Robustheit, der eingebauten Schutzmaßnahmen, ihrer Sicherheitskräfte und in der Regel abgelegenen Lage vergleichsweise unattraktive und wenig lohnende Ziele für terroristische Anschläge dar.

Abbildung 9.6: Vergleich der Gesundheitsrisiken verschiedener Energiesysteme



Quelle: "Comparative Assessment of Emissions from Energy Systems", IAEA Bulletin, 41/1/1999.

Schließlich kann nur der Einzelne selbst entscheiden, welchen Risiken er sich aussetzen will. Vergleichende Risikobetrachtungen können daher nur eine begrenzte Bedeutung haben, sie sind aber dennoch hilfreich, wenn es darum geht, verschiedene Aspekte in Relation zu setzen und uns daran zu erinnern, dass das Leben auf Erden mit Gefahren verbunden ist und dass alle verfügbaren Techniken der Stromerzeugung Risiken in sich bergen.

Der gesellschaftlichen Komponente der nachhaltigen Entwicklung kann nur Rechnung getragen werden, wenn die in der Öffentlichkeit gehegten Befürchtungen Ernst genommen werden und das Vertrauen der Öffentlichkeit gewonnen wird. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, die Bevölkerung dazu zu befähigen, die durch die Kernenergie aufgeworfenen gesellschaftlichen, ethischen und politischen Fragen in einen Zusammen-

hang mit den anders orientierten, im Grunde aber ähnlichen Fragen einzuordnen, die in Bezug auf die anderen Quellen der Stromproduktion aufgeworfen werden.

Alles in allem kann der Kernenergie vor dem Hintergrund der drei Aspekte der nachhaltigen Entwicklung das Potenzial zugeschrieben werden, einen erheblichen Teil des künftigen Energiebedarfs weltweit zu decken und gleichzeitig viele Ziele der nachhaltigen Entwicklung zu erreichen. Die globalen politischen Trade-offs zwischen den drei Aspekten der Nachhaltigkeit sind von Land zu Land verschieden und werden sowohl die getroffenen Entscheidungen als auch die Mittel beeinflussen, mit denen auf die Befürchtungen der Öffentlichkeit eingegangen und versucht wird, das Vertrauen der Öffentlichkeit zu gewinnen.

## Weiterführende Informationen

Vergleiche die Literaturhinweise im Kapitel „Weiterführende Informationen“ wegen eingehender Informationen über:

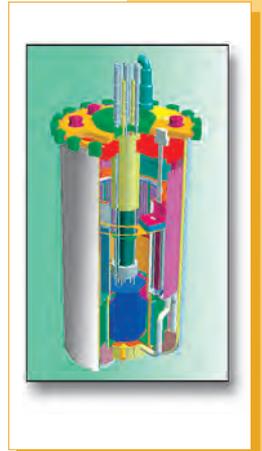
- [Projektionen für die künftige Weltenergienachfrage](#), vgl. 1.4, 9.1 und 9.2;
- [Projektionen für Uranressourcen und -nachfrage](#), vgl. 9.3;
- Kernenergie im Kontext einer [nachhaltigen Entwicklung](#), vgl. 9.4 und 9.5.
- die Rolle der Kernenergie im Hinblick auf die [Klimaänderung](#), vgl. 9.6 und 9.7;
- [die globalen Auswirkungen](#) der Kernenergie, vgl. 9.8;
- [Spinoff-Technologien](#) auf der Basis nuklearer Aktivitäten, vgl. 9.9;
- Aus- und Fortbildung sowie Angebot von [qualifiziertem Personal](#), vgl. 9.10.

# Zukunft der Kernenergie

Die Zukunft der Kernenergie hängt von den Wechselwirkungen zwischen vier Faktoren ab: Dem Wachstum des Energiebedarfs, der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit gegenüber anderen Energieträgern, von Umwelterwägungen sowie von Fragen der Akzeptanz in der Öffentlichkeit.

Wenn in Bezug auf diese vier Punkte zufriedenstellende Lösungen gefunden und entsprechende technische Fortschritte erzielt werden, können neue bzw. erweiterte Anwendungsmöglichkeiten der Kernenergie ins Auge gefasst werden, z.B. im Bereich der Wasserstoffgewinnung, der Meerwasserentsalzung und der vermehrten Isotopenproduktion für medizinische Zwecke.

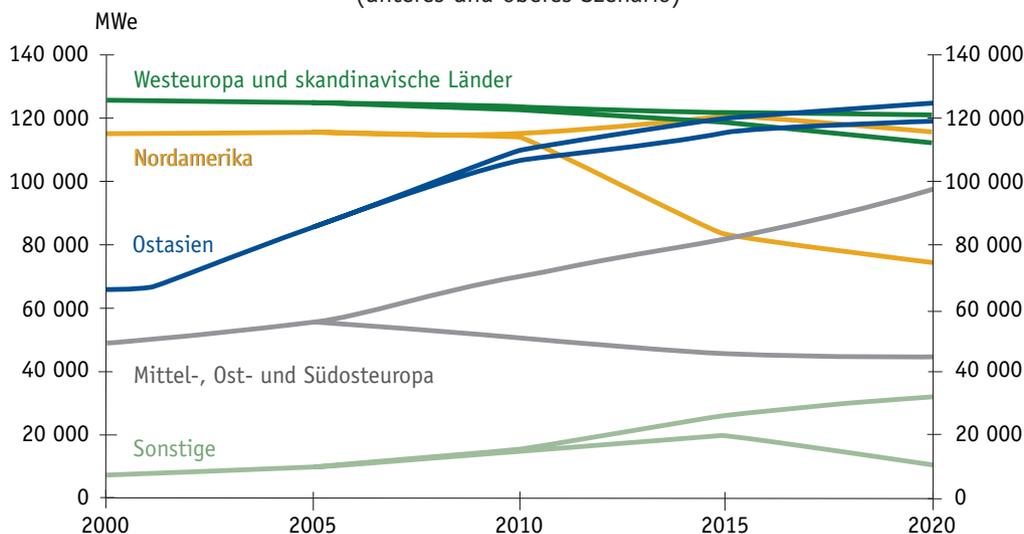
Derzeit laufen zahlreiche Forschungsarbeiten zur Erschließung dieser potenziellen Einsatzmöglichkeiten und zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Kernenergiesystemen.



Ende 2000 machten die weltweiten Kernkraftwerkskapazitäten rd. 17% der Weltstromproduktion aus. Der Großteil dieser Kapazitäten bestand auch bereits zehn Jahre zuvor (vgl. Abb. 1.1). Zwar gehen auch weiterhin neue Anlagen ans Netz, jedoch wurden andere aus

Altersgründen außer Betrieb genommen, so dass netto nur wenig neue Kapazität hinzukam. Die amtlichen Kapazitätsprognosen der einzelnen Länder deuten auf eine weitgehend unveränderte Situation bis 2020 und vielleicht auch darüber hinaus hin, wobei eine installierte Nuklearkapazität

Abbildung 10.1: Erwartung der installierten Kernkraftwerkskapazität bis 2020 (unteres und oberes Szenario)



Quelle: NEA. Uranium 2001: Resources, Production and Demand (Paris: OECD, 2002).

## Neue

### Kernkraftwerke

- Im Januar 2003 waren weltweit 33 Reaktoren in 10 Ländern in Bau: Indien (8), China (6), Republik Korea (4), Ukraine (4), Japan (3), Islamische Republik Iran (2), Russland (2), Slowakische Republik (2), Argentinien (1) und Rumänien (1).
- In OECD-Ländern ist derzeit der Bau 26 neuer Reaktoren fest zugesagt bzw. geplant, 24 davon in Japan und der Republik Korea.
  - Mit dem Parlamentsentscheid vom 24. Mai 2002 wurde Finnland zum ersten westeuropäischen Land, in dem nach einer Pause von über 10 Jahren wieder der Bau eines neuen Kernreaktors genehmigt wurde.
- Die US-Regierung arbeitet gemeinsam mit den Versorgungsunternehmen an Plänen für neue Kernreaktoren, deren Bau zwar noch nicht fest zugesagt ist, jedoch noch vor 2005 in Angriff genommen werden soll.
- In Belgien und Deutschland hingegen wurde beschlossen, in den nächsten Jahren schrittweise aus der Kernenergie auszusteigen.

von 334 bis 466 GW<sub>e</sub> prognostiziert wird, gegenüber derzeit 362 GW<sub>e</sub>. Aus Abbildung 10.1 ist jedoch ersichtlich, dass diese Erwartungen erhebliche regionale Unterschiede enthalten. Zumindest in Westeuropa wird es bei den gegenwärtigen Trends und trotz der zunehmenden Lebensdauer des vorhandenen Anlagenparks nur noch eine Frage der Zeit sein, bis ein allmählicher Rückgang der installierten Kapazität einsetzt. In Fernost wird hingegen ein starkes Wachstum verzeichnet, das sich den Prognosen zufolge fortsetzen wird, da sowohl China, die Republik Korea als auch Japan zahlreiche neue Anlagen bauen. Auch in Osteuropa, insbesondere in Russland und der Ukraine, ist ein starkes Wachstum zu beobachten; diese Zuwächse dürften durch die Abschaltung älterer Anlagen in anderen Ländern allerdings aufgewogen werden. Die Aussichten für Nordamerika sind ungewiss, da die Kernenergie dort einer weitreichenden Neubeurteilung unterzogen wird, deren Ergebnisse noch unklar sind.

Aus bereits anderweitig in dieser Veröffentlichung erörterten Gründen hängt die weitere Entwicklung der Kernenergienutzung von Faktoren ab, die sich nur schwer vorhersagen lassen, wozu nicht zuletzt die öffentliche Meinung gehört.

Würden nur ökonomische Faktoren in die Gleichung einbezogen und würde die derzeitige Einstellung der Öffentlichkeit unverändert bleiben, so wäre in Anbetracht der für die Kernenergie charakteristischen hohen Bau- und geringen Stromerzeugungskosten auf einem deregulierten und wettbewerbsintensiven Markt damit zu rechnen, dass die existierenden **Kernreaktoren** bis zum Ende ihrer Lebensdauer mit Gewinn betrieben, danach aber nicht durch neue Anlagen ersetzt werden. Der zunehmende Weltenergieverbrauch wird jedoch weiterhin Entscheidungen in Bezug auf den Bau neuer Kraftwerke erforderlich machen, und das obige enge Szenario könnte dann unter dem Einfluss anderer Faktoren in positiver oder negativer Richtung verschoben werden. Bei diesen Faktoren handelt es sich z.B. um

- ökologische Erwägungen, für die ausschlaggebend ist, welches Potenzial der Kernenergie im Hinblick auf die Erfüllung der Treibhausgas-minderungsziele zugeschrieben wird;
- Bedenken hinsichtlich der Versorgungssicherheit;
- Besorgnis über die Weiterverbreitung von Kernwaffen;

- kostenmäßige Vorteile der Kernenergie gegenüber anderen Energieträgern, einschließlich „erneuerbarer“ Energien;
- die Einstellung der Öffentlichkeit in Bezug auf die Sicherheit der Kernenergie und die geplante Entsorgungsvorsorge;
- Veränderungen der relativen Wettbewerbsfähigkeit der verschiedenen Energieträger durch moderne Technologien.

## Möglichkeiten für eine alternative Nutzung der Kernenergie

Bislang wurde Kernenergie fast ausschließlich zur Stromerzeugung eingesetzt. Sie bietet aber darüber hinaus noch weitere Nutzungsmöglichkeiten, weshalb die Zukunft der Kernenergie auch davon abhängen wird, welche Bedeutung diese Alternativen erlangen.

### Wasserstoffgewinnung

Mit einem weltweiten Verbrauch von derzeit rd. 45 Millionen Tonnen pro Jahr ist Wasserstoff schon heute ein wichtiger Rohstoff für die Industrie. Eingesetzt wird er vor allem für die Herstellung von Chemikalien und Düngemitteln sowie in der Mineralölverarbeitung, wo mit einem beträchtlichen Anstieg der Wasserstoffnachfrage zu rechnen ist, da die qualitativ hochwertigen Erdölvorkommen geringer werden und nach saubereren Brennstoffen gesucht wird.

Zudem besitzt Wasserstoff an sich ein großes Potenzial als „sauberer“ Brennstoff. Bei vielen Forschungsarbeiten geht es derzeit um die Frage, wie kohlenwasserstoffhaltige Treibstoffe in Kraftfahrzeugen – dem gegenwärtig am schnellsten wachsende Bereich des Weltenergieverbrauchs – durch Wasserstoff ersetzt werden können. Sollte dies gelingen, wäre mit einem enormen Anstieg der Wasserstoffnachfrage zu rechnen. Bislang ist zur Herstellung von Wasserstoff jedoch Erdgas erforderlich, das wiederum selbst Kohlenstoffemissionen verursacht. Bevor Wasserstoff den „Nachhaltigkeitstest“ besteht, müssen trotz seiner unbegrenzten Verfügbarkeit wirtschaftlichere Methoden gefunden werden, um ihn direkt aus Wasser – ohne die Verwendung von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen – gewinnen zu können.

Kernenergie könnte dann zu einer wichtigen „nachhaltigen“ Wasserstoffquelle werden, sei es

durch Erzeugung des zu seiner Gewinnung erforderlichen Hochtemperaturdampfes oder durch Nuklearstrom. In den Schlussfolgerungen des NEA-Berichts *Nuclear Production of Hydrogen* (2001) heißt es:

*Die Wasserstoffherzeugung mittels Kernenergie kann einen großen Beitrag zur weltweiten Energieversorgung im 21. Jahrhundert leisten. Die Wasserstoffgewinnung durch Wasserspaltung und die durch Kernenergie unterstützte Umwandlung fossiler Rohstoffe ist technisch durchführbar und könnte eine Form der Energieerzeugung darstellen, durch die sich die weltweite Treibhausgasemission verringert.*

In verschiedenen Hochtemperaturreaktortypen könnten die Temperaturen von nahezu 1 000°C erreicht werden, die zur direkten Wasserstoffherzeugung erforderlich sind, so z.B. in gasgekühlten oder flüssigmetallgekühlten Hochtemperaturreaktoren. Derzeit werden von mehreren Ländern und internationalen Einrichtungen, die die neuen Einsatzmöglichkeiten der Kernenergie mit ihrer potenziell wichtigen Rolle für die Zukunft verfolgen und fördern, darunter der NEA und der IAEO, Forschungs- und Entwicklungsarbeiten über die Nutzung der Kernenergie zur Wasserstoffgewinnung durchgeführt.

### Meerwasserentsalzung

Süßwasser von guter Qualität ist lebensnotwendig. In vielen Teilen der Welt – insbesondere in Afrika, Asien und im Nahen Osten – wird es immer schwieriger, den in Landwirtschaft und Industrie sowie durch Stadtentwicklung und Bevölkerungswachstum steigenden Bedarf zu decken.

Zur Meerwasseraufbereitung sind sehr hohe Temperaturen erforderlich, weshalb in Japan und den Vereinigten Staaten bereits mit Kernkraft beheizte Entsalzungsanlagen in Betrieb sind. Diese Anlagen sind nicht für den Großverbrauch bestimmt, sondern dienen mehrheitlich der Deckung des Wasserbedarfs vor Ort. Sie haben jedoch erfolgreich unter Beweis gestellt, dass Kernenergie angesichts der wachsenden Nachfrage nach Meerwasserentsalzung eine gangbare Alternative zur Nutzung fossiler Energieträger als Wärmequelle darstellt. Argentinien, China, Indien, Marokko, Pakistan, die Republik Korea und die Russische Föderation haben bereits ihr Interesse an dieser Möglichkeit bekundet.

### Prozess- und Fernwärme

Eine Nutzungsmöglichkeit der Kernenergie, die von Anfang an existiert hat und in Zukunft expandieren dürfte, ist die – in der Regel, aber nicht immer – an die Stromerzeugung gekoppelte Nutzung der Abwärme von **Kernreaktoren** zur Gewinnung von Heißwasser oder Dampf zur Beheizung von Industrieanlagen oder Wohnräumen. Bulgarien, China, Deutschland, Japan, Kanada, Kasachstan, die Russische Föderation, die Schweiz, die Slowakische Republik, die Ukraine, Ungarn und die Vereinigten Staaten haben bereits große Erfahrung mit dieser Form der Kernenergienutzung. Rund 1% der Abwärme von Kernreaktoren wird weltweit auf diese Weise genutzt, und die Entwicklung von eigens für die Wärmeerzeugung konstruierten Reaktoren mit kleiner oder mittlerer Leistung könnte dazu führen, dass dieser Anteil weiter wächst. China und die Russische Föderation arbeiten an dieser Option.

### Isotopenproduktion

Der Einsatz sowohl radioaktiver als auch stabiler **Isotope** ist, insbesondere in Medizin, Industrie, Landwirtschaft, Lebensmittelverarbeitung und Forschung, sehr weit verbreitet. Im Jahr 2000 wurden radioaktive Isotope von über 70 Forschungsreaktoren und Kraftwerken in mehr als 60 Ländern produziert.

In vielen Anwendungsbereichen gibt es für Isotope keinen Ersatz, und in den meisten Fällen sind sie wirksamer und billiger als andere Alternativen. Bislang fielen sie hauptsächlich als Nebenprodukte von Forschungsaktivitäten an, inzwischen befinden sich jedoch bereits mehrere eigens für die Isotopenproduktion entwickelte Reaktoren in Planung bzw. im Bau. Eine kurze Betrachtung ihrer typischen Anwendungsbereiche macht deutlich, welche Bedeutung Isotopen zukommt und welche vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten sie bieten.

### Medizin

Isotope werden seit über dreißig Jahren routinemäßig in der Medizin eingesetzt und werden z.Zt. jährlich weltweit bei über 30 Millionen anspruchsvollen medizinischen Verfahren angewendet. In der diagnostischen Bildgebung mittels Gamma-Kameras werden Isotope häufig zur Detektion von Tumoren sowie einer Vielzahl anderer Krankheiten (z.B. in der Kardiologie) eingesetzt.

*Heute, zu Beginn des 21. Jahrhunderts, haben über 1,2 Milliarden Menschen keinen Zugang zu sicherem Trinkwasser. Erklärung der Minister, Internationale Süßwasserkonferenz, Bonn, Dezember 2001.*



Die PET-Bildgebung (Positronen-Emissionstomographie) spielt in der Medizin eine wichtige Rolle.

Das wichtigste Isotop für diese Zwecke ist das in Reaktoren erzeugte Technetium-99.

In der Therapie werden umschlossene Strahlenquellen zur Behandlung von Gebärmutterhals-, Gebärmutter-, Brust-, Lungen-, Magen-, Prostata- und Speiseröhrenkrebs direkt in den Körper eingeführt (so genannte Brachytherapie). Die für diese Zwecke wichtigen Isotope sind Iod ( $^{125}\text{I}$ ) und Palladium ( $^{103}\text{Pd}$ ), die ebenfalls in Reaktoren hergestellt werden.

### Landwirtschaft und Industrie

Die Industrie macht in großem Umfang Gebrauch von Isotopen, insbesondere im Messgerätebau und in der Verfahrenstechnik. Zu den Anwendungsbereichen gehören Analyse- und Sicherheitsinstrumente, Umweltbelastungsmessungen, physikalische Messungen, Lebensmittelbestrahlung und zerstörungsfreie Werkstofftests. Die Lebensmittelbestrahlung hat sich bei Gewürzen, Obst, Getreide, Fleisch, Fisch und Geflügel als erfolgreich erwiesen und erhielt u.a. die Zustimmung der Weltgesundheitsorganisation, der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen und der US-Bundesbehörde für Nahrungs- und Arzneimittelüberwachung. In immer mehr Ländern wird dieses Verfahren inzwischen als Mittel zur Verbesserung der Lebensmittelsicherheit und zur Erhöhung des Nährwerts zugelassen.

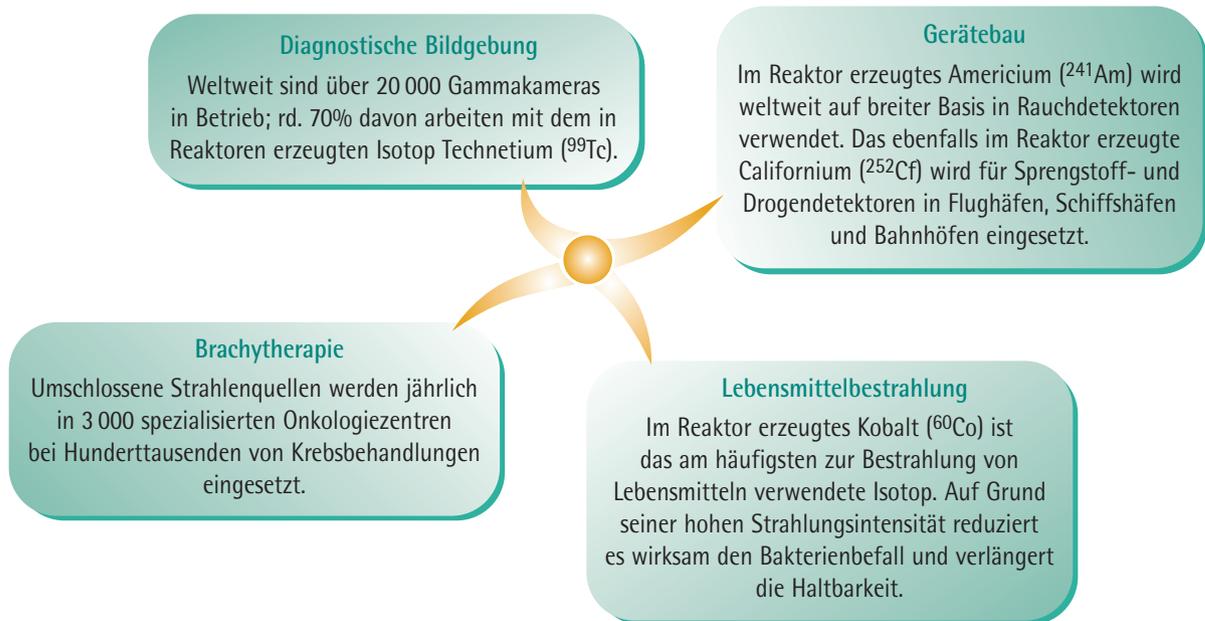
### Trends beim Einsatz von Isotopen

Die Trends beim Isotopeneinsatz lassen sich nicht ohne weiteres definieren, da sie je nach Anwendungsgebiet und Region unterschiedlich sind und die Nutzung einiger Isotope abnimmt, während sich die Bedeutung anderer erhöht. In der Medizin insgesamt werden Isotope in wachsendem Maße für ein ständig größer werdendes Spektrum von Anwendungen eingesetzt. Je nach Anwendungsbereich sind jedoch unterschiedliche Trends zu beobachten. So wird z.B. die Telekobalt-Therapie voraussichtlich nach und nach an Bedeutung verlieren, wohingegen mit einem starken Anstieg des Einsatzes von Isotopen in der Brachytherapie gerechnet wird. Mit der Entwicklung neuer Anwendungsmöglichkeiten, z.B. in der Palliativmedizin, erhöht sich die Nachfrage nach bereits existierenden Isotopen und entsteht zugleich Bedarf an neuen Isotopen.

In der Industrie insgesamt ist die Nachfrage nach Isotopen vergleichsweise stabil. Sollte sich aber die Bestrahlung von Lebensmitteln allgemein durchsetzen, könnte die Nachfrage nach radioaktivem Kobalt erheblich steigen.

Da viele dieser Isotopen in Beschleunigern hergestellt werden können, lässt sich schwer voraussagen, inwieweit sich Veränderungen der Isotopenachfrage in einem erhöhten Bedarf an neuen Reaktor-Produktionskapazitäten niederschlagen werden.

Abbildung 10.2: Verschiedene Einsatzmöglichkeiten für Isotope aus Reaktoren



## Forschung und Entwicklung

Forschung und Entwicklung (FuE) haben stets eine zentrale Rolle in allen Anwendungsbereichen der Kernenergie gespielt und den Wissensstand der Menschheit bereichert. Von den vielen Bereichen, in denen FuE eine wichtige Rolle spielt, sind drei inzwischen in den Vordergrund gerückt: fortgeschrittene Reaktoren und **Brennstoffkreisläufe**, fortgeschrittene Methoden für die Behandlung radioaktiver Abfälle und Verbesserung der Betriebssicherheit. Die Forschungsarbeiten werden von Hochschulen, staatlichen Stellen (u.a. Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden) und Wirtschaft entweder einzeln oder im Rahmen von Gemeinschaftsprojekten durchgeführt, wobei der Stellenwert der internationalen Zusammenarbeit in der kerntechnischen FuE zunimmt.

### Fortgeschrittene Reaktoren und Brennstoffkreislauf

Die Technologie der **Leichtwasserreaktoren** (LWR) ist heute im Großen und Ganzen ausgereift. In näherer Zukunft wird es sich bei den neu entwickelten Reaktortypen daher um Weiterentwick-

lungen bereits existierender Reaktorkonzepte mit dem Ziel handeln, die Sicherheit zu verbessern, den Betrieb wirtschaftlicher zu gestalten und die Flexibilität zu vergrößern. Unter den verbesserten Reaktorkonzepten, die ab 2015 bzw. auch früher zur kommerziellen Nutzung bereitstehen dürften, sind zu nennen:

- neue **Siedewasserreaktoren** (SWR), darunter der fortgeschrittene Siedewasserreaktor ABWR, von dem bereits zwei in Japan gebaut wurden, sowie der SWR 90+ und der Siedewasserreaktor mit sicherheitsvereinfachter Systemtechnologie SWR 1000;
- fortgeschrittene **Druckwasserreaktoren**, wie der von den US-amerikanischen Genehmigungsbehörden bereits zugelassene AP600, dessen größere 1 000 MW<sub>e</sub>-Version, für die das Genehmigungsverfahren in den Vereinigten Staaten derzeit läuft, sowie der Europäische Druckwasserreaktor (*European Pressurised Water Reactor – EPR*) und der „*International Reactor, Innovative and Secure*“ (IRIS);
- gasgekühlte Reaktoren, darunter der modulare „Kugelhaufen-Reaktor“ (*Pebble Bed Modular Reactor – PBMR*) und der GT-MHR (*Gas Turbine Modular Helium Reactor*).

Langfristig liegt das Hauptaugenmerk auf fortschrittlicheren Kernenergietechnologien und Brennstoffzyklen. Zu den gegenwärtig untersuchten Konzepten gehören flüssigmetallgekühlte Reaktoren, Hochtemperaturreaktoren, Thoriumreaktoren und verbesserte Wiederaufarbeitungstechnologien für eine effizientere Ausbeutung der Uran- und Plutoniumressourcen. Von diesen fortschrittenen Technologien verspricht man sich eine wesentlich verbesserte Nachhaltigkeit der Kernenergie. Schnelle Reaktoren z.B. ermöglichen im Prinzip eine annähernd um den Faktor 50 verbesserte energetische Ausbeute des eingesetzten Urans (vgl. Tabelle 10.1).

Nachstehend werden zwei große internationale Projekte beschrieben, mit denen Fortschritte im Bereich der Kernenergiesysteme und Brennstoffzyklen erreicht werden sollen.

### Generation IV International Forum

Das Generation-IV-Programm wurde Ende 2000 als Gemeinschaftsvorhaben interessierter Regierungen, Wirtschafts- und Forschungskreise mit dem Ziel der Entwicklung und Demonstration fortgeschrittener Kernenergiesysteme gestartet, deren kommerzielle Nutzung ab 2030 anvisiert werden könnte (so genannte Kernreaktoren der „vierten Generation“). Damit sollen in Bezug auf Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Verlässlichkeit, Nachhaltigkeit, Verringerung des Proliferationsrisikos und Anlagenschutz Fortschritte gegenüber existierenden Systemen erzielt werden. An dem Programm beteiligt waren Anfang 2003 Argentinien, Brasilien, Frankreich, Japan, Kanada, die Republik Korea, die Schweiz, Südafrika, das Vereinigte Königreich und die Vereinigten Staaten.

Tabelle 10.1:  
Auswirkungen technologischer Neuerungen auf die verfügbaren Ressourcen<sup>1</sup>

Reaktor/Brennstoffkreislauf	Stromerzeugungskapazität in Jahren	
	Nur konventionelle Uran- und Thoriumressourcen	Sämtliche Ressourcen von Uran und Thorium
Derzeitiger Brennstoffkreislauf (LWR, ohne Wiederaufarbeitung)	326	8 350
Brennstoffkreislauf mit Wiederaufarbeitung (nur Plutonium, Einfachzyklisierung)	366	9 410
Leichtwasser- und schnelle Reaktoren in Kombination mit Wiederaufarbeitung	488	12 500
Brennstoffkreislauf ausschließlich mit schnellen Reaktoren in Kombination mit Wiederaufarbeitung	10 000	250 000
Fortgeschrittener Thorium-/Uranbrennstoffkreislauf mit Wiederaufarbeitung	17 000	355 000

1. Ausgehend von der weltweiten Stromerzeugung im Jahr 1999 aus *Key World Energy Statistics* (Paris: IEA, 2001).  
Quelle: "Nuclear Fuel Resources: Enough to Last?", *NEA News*, No. 20.2 (2002).

Im Oktober 2002 wurden sechs Reaktorvarianten ausgewählt, auf die sich die gemeinschaftlichen FuE-Anstrengungen konzentrieren sollen: Ein mit Natrium gekühlter schneller Reaktor (*Sodium-cooled Fast Reactor* – SFR), ein Höchsttemperaturreaktor (*Very High Temperature Reactor* – VHTR), ein mit superkritischem Wasser gekühlter Reaktor (*Supercritical-water-cooled Reactor* – SCWR), ein bleigekühlter schneller Reaktor (*Lead-cooled Fast Reactor* – LFR), ein gasgekühlter schneller Reaktor (*Gas-cooled Fast Reactor* – GFR) und ein Salzschnmelzen-Reaktor (*Molten Salt Reactor* – MSR). Mit einer Ausnahme beinhalten alle diese Konzepte die **Wiederaufarbeitung** abgebrannter Brennelemente.

### *International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO)*

Das von der IAEA initiierte und geförderte internationale Kooperationsprojekt INPRO wurde

im Jahr 2001 mit dem erklärten Ziel der Förderung einer sicheren, nachhaltigen, wirtschaftlichen und proliferations-sicheren Nutzung der Kerntechnologie zur Deckung des weltweiten Energieverbrauchs im 21. Jahrhundert gestartet. Anfang 2002 beteiligten sich an dieser Initiative die Europäische Kommission, Argentinien, China, Deutschland, Indien, Kanada, die Niederlande, die Russische Föderation, die Schweiz, Spanien und die Türkei.

### *Fortgeschrittene Technologien der Abfallbehandlung*

Ein relativ neuer Ansatz, der potenziell imstande ist, die Beschaffenheit der für die Endlagerung in geologischen Formationen bestimmten Abfälle zu verändern, ist das „**Partitioning-and-Transmutation**“-Verfahren (P&T, **Abtrennung und Umwandlung**). Bei diesem Prozess handelt es sich um die Umwandlung langlebiger in kurzlebigerer Radionuklide durch Neutroneneinfang oder **Kernspaltung**, wobei der Teil der hochaktiven

Blick in die RASPLAV-Anlage während der Vorbereitung auf das MASCA-Versuchsprogramm.



### **NEA-Projekte für FuE im Bereich der Reaktorsicherheit (Stand Januar 2003):**

Beim **CABRI-Wasserkreislaufprojekt** wird die Widerstandsfähigkeit von Brennelementen mit erhöhtem Abbrand bei raschen Leistungsanstiegen untersucht.

Im Rahmen des **FIRE-Projekts** sollen neue Erkenntnisse in Zusammenhang mit Bränden in kerntechnischen Anlagen gewonnen werden.

Beim **Halden-Reaktor-Projekt** werden Versuche zur Verbesserung der Brennelemente und Erhöhung der Betriebssicherheit durchgeführt.

Durch den Erfahrungs- und Datenaustausch im Rahmen des **International Common Cause Failure Data Exchange** sollen neue Erkenntnisse über wichtige Sicherheitskomponenten gewonnen werden.

Gegenstand des **MASCA-Projekts** sind phänomenologische Untersuchungen über das Verhalten des Reaktordruckbehälters bei schweren Störfällen.

Beim **Melt Coolability and Concrete Interaction Project (MCCI)**, Schmelze/Beton-Wechselwirkung) werden phänomenologische Untersuchungen über den hypothetischen Fall einer Kernschmelze durchgeführt.

Das **OECD Pipe Failure Data Exchange Project (OPDE)** befasst sich mit den grundlegenden Ursachen von Rohrbrüchen.

Im Rahmen des **SETH-Projekts** werden experimentelle Untersuchungen zur Verhinderung oder Beherrschung nuklearer Unfälle durchgeführt.

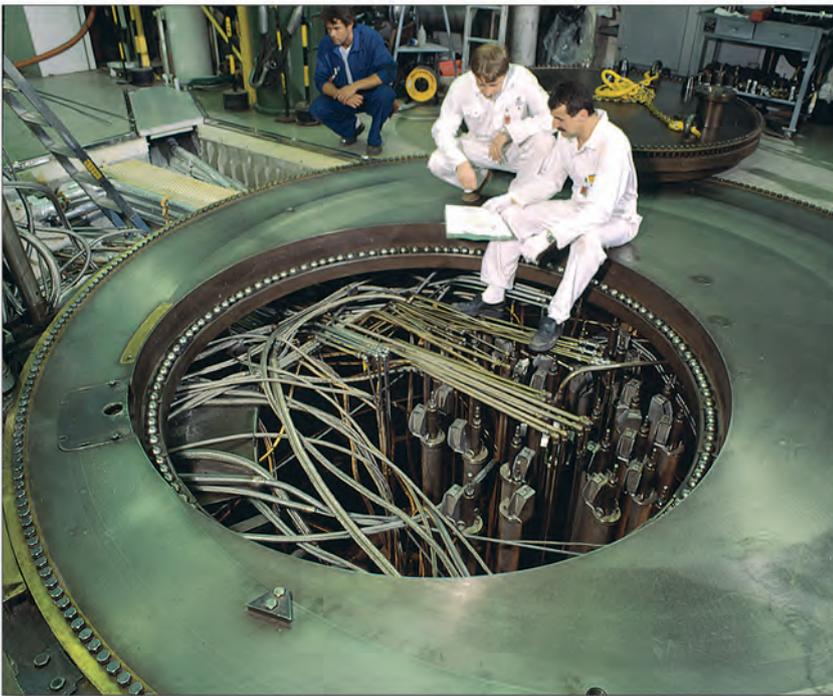
Unter **Partitioning** ist die Abtrennung unerwünschter Elemente - d.h. Aktinide und langlebige Spaltprodukte - aus abgebrannten Brennelementen zu verstehen. **Transmutation** bedeutet Umwandlung eines Elements in ein anderes durch Neutroneneinfang oder Kernspaltung. Dadurch sollen die unerwünschten Elemente in kürzerlebige oder stabile Elemente verwandelt werden.

Abfälle, der am stärksten zur Hitzeentwicklung und **Radioaktivität** der Abfälle beiträgt, beseitigt würde. Damit bestände die Möglichkeit, die erforderliche Einschlusszeit radioaktiver Abfälle von mehreren tausend auf mehrere hundert Jahre zu verringern, d.h. auf einen noch innerhalb des menschlichen Erfahrungshorizonts liegenden Zeitraum, womit sich die Ungewissheit in Bezug auf die Abschätzung der Langzeitsicherheit von Endlagern reduzieren würde. Um eine dazu ausreichende Umwandlung der langlebigen **Isotope** zu erzielen, sind jedoch zahlreiche P&T-Verfahrensschritte und ein geschlossener **Brennstoffkreislauf** mit fortentwickelter **Wiederaufarbeitung** erforderlich. Dahingehende Lösungen dürften somit noch in weiter Ferne liegen.

Die für Partitioning und **Transmutation** untersuchten Methoden unterscheiden sich zwar von

Land zu Land je nach den für den **Brennstoffkreislauf** maßgeblichen Technologien und Strategien, doch sind sie ähnlich genug, um eine Zusammenarbeit wünschenswert erscheinen zu lassen. Die Forschung konzentriert sich hier vor allem auf fortgeschrittene Trennverfahren zur besseren Abtrennung von **Spaltprodukten** und Transuranen aus abgebrannten Brennelementen sowie auf den Einsatz von beschleunigergetriebenen Systemen oder Kernreaktoren für die Transmutation.

Zahlreiche Länder, darunter Belgien, China, Frankreich, Italien, Russland und die Vereinigten Staaten, sind in diesen Forschungsbereichen tätig. An kleineren Kooperationsvorhaben beteiligen sich derzeit Frankreich, Japan, die Republik Korea, die Vereinigten Staaten und die Europäische Kommission.



Das Halden-Reaktor-Projekt in Norwegen.

## FuE im Bereich der Reaktorsicherheit

Zusätzlich zu der auf kerntechnische Fortschritte ausgerichteten FuE gab und gibt es auf nationaler wie internationaler Ebene Programme zur Verbesserung der Betriebssicherheit von Kernkraftwerken. Auf internationaler Ebene organisiert die NEA eine Reihe von Forschungsprojekten, wie z.B. das Halden-Reaktor-Projekt in Norwegen. Dieses Projekt läuft seit über 40 Jahren und wird von rund hundert Organisationen aus zwanzig Ländern getragen. Geforscht wird u.a. in den Bereichen **Kernbrennstoffe** und Werkstoffe, Verbesserung der Anlagenleistung und Betriebssicherheit.

## Sonstige internationale FuE

Die Europäische Union fördert und leitet über die Europäische Kommission und deren Gemeinsame Forschungsstelle GFS zahlreiche Forschungsvorhaben, mit denen sie die Programme ihrer Mitgliedstaaten unterstützt. Vier der sieben GFS-Zentren sind in Bereichen tätig, die mit Kernenergie in Zusammenhang stehen. Das Institut

für Referenzmaterial und Messungen (IRMM) im belgischen Geel misst die Wechselwirkung von **Neutronen** mit verschiedenen Werkstoffen und führt u.a. hochauflösende Wirkungsquerschnittsmessungen durch. Das Institut für Transurane (ITU) in Karlsruhe befasst sich mit Alpha-Radio-Immunotherapie, Grundlagenforschung über Aktinide, der Sicherheit von Kernbrennstoffen, der Charakterisierung von abgebrannten Brennelementen sowie Partitioning und Transmutation. Zu den Tätigkeitsfeldern des Instituts für Energie (IE) in Petten (Niederlande) gehören kerntechnische Sicherheit, Entwicklung neuer Reaktortechnologien und Nuklearmedizin. Das Institut für Schutz und Sicherheit des Bürgers (IPSC) in Ispra (Italien) schließlich führt Forschungsarbeiten im Bereich Nichtproliferation und nukleare **Sicherungsmaßnahmen** durch.

Darüber hinaus fördert die IAEO im Rahmen ihres koordinierten Forschungsprogramms nukleare FuE in den Bereichen Kernenergie, Sicherheit radioaktiver Abfälle, Abfalltechnologie und Sicherungsmaßnahmen.

## Weiterführende Informationen

Vergleiche die Literaturhinweise im Kapitel „Weiterführende Informationen“ wegen eingehenderer Informationen über:

- **Projektionen** zu den künftigen Kernenergiekapazitäten sowie zu Umfang und Verbrauch von Uranressourcen, vgl. 1.1 und 9.3;
- **Wasserstoff** als Energieträger und Kernenergie als Wasserstoffquelle, vgl. 10.1 bis 10.4;
- **alternative Einsatzmöglichkeiten** von Kernenergie, einschließlich Meerwasserentsalzung und Prozesswärme, vgl. 10.4;
- **Produktion und Einsatz von Isotopen**, vgl. 10.5;
- **fortgeschrittene Reaktortypen**, vgl. 10.6 bis 10.8;
- **internationale Forschungsprogramme im Kernenergiebereich**, darunter Generation IV International Forum und INPRO, sowie andere interessante Links, vgl. 10.9 und 10.10;
- **fortgeschrittene Systeme zur Behandlung hochaktiver Abfälle**, vgl. 10.11.



# Zusammenfassung

Kernenergie ist eine in technischer Hinsicht komplexe Energiequelle, die aus mehreren Gründen eine Sonderstellung einnimmt. Zum gegenwärtigen Stand und Wissen wurde in dieser Veröffentlichung gezeigt:

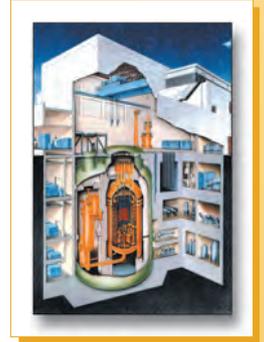
- Kernenergie ist eine weltweit wichtige Energiequelle, auf die 16% der Weltstromerzeugung entfallen.
- Die große Mehrheit der Reaktoren arbeitet mit normalem Wasser als Kühlmittel und Moderator, verwendet Uran als Kernbrennstoff und ist durch einen offenen Brennstoffkreislauf (ohne Wiederaufarbeitung) gekennzeichnet.
- Die Entsorgung von schwach- und mittelaktiven Abfällen hat inzwischen die notwendige technische Reife erlangt, aber die Entsorgung hochaktiver Abfälle ist noch nicht verwirklicht. Hauptgrund hierfür sind Bedenken der Öffentlichkeit; jedoch sind derzeit Fortschritte auf dem Weg zur Umsetzung von Lösungsansätzen zu verzeichnen.
- Ein sehr hohes Sicherheitsniveau ist für die kommerzielle Nutzung der Kernenergie wesentlich, wenn auch ein gewisses Restrisiko nicht ausgeschlossen werden kann.
- Es wurde ein wirkungsvolles Strahlenschutzsystem ausgehend von drei Grundsätzen entwickelt: Rechtfertigung der Anwendung, Optimierung und Dosisbegrenzung.
- Die vorhandenen Kernkraftwerke sind im Allgemeinen auch auf deregulierten Märkten wirtschaftlich wettbewerbsfähig; Entscheidungen über den Bau neuer Reaktoren dürften jedoch von der staatlichen Politik abhängen.
- Fast alle Aspekte der Kernenergienutzung sind Gegenstand nationaler Gesetze und internationaler Übereinkommen, was eine stärkere Mitwirkung des Staates als bei anderen Energieträgern widerspiegelt.
- Kernenergie hat bestimmte Vorteile gegenüber anderen Energiequellen: Stromerzeugung ohne Kohlenstoff- und Luftschadstoffemissionen sowie Versorgungssicherheit.
- In der Forschung werden derzeit weiterentwickelte oder ganz neue Konzepte untersucht, um neue Anwendungen für die Kernenergie zu erschliessen und die Leistungsfähigkeit von Kernenergiesystemen zu erhöhen.

In Anbetracht dieser Merkmale befindet sich die Kernenergie heute, zu Beginn des zweiten nuklearen Jahrhunderts, gewissermaßen an einem Scheideweg; sie wird einer gründlichen Überprüfung und Neubeurteilung durch Regierungen, Öffentlichkeit und Wirtschaft unterzogen. Die politischen Entscheidungsträger sehen sich mit der schwierigen Frage konfrontiert, wie der stetig steigende Weltenergiebedarf gedeckt werden kann und dabei zugleich die Umwelteffekte der Stromerzeugung so gering wie möglich gehalten werden können. Darüber hinaus müssen sie der öffentlichen Meinung Rechnung tragen und Kosten und Wettbewerbsfähigkeit der verschiedenen Energieträger sowie andere Ziele der staatlichen Politik, wie z.B. Versorgungssicherheit und Nichtverbreitung, berücksichtigen. Wie sich die Verantwortlichen im Spannungsfeld dieser sich z.T. widersprechenden Ziele orientieren werden, wird letztlich über den Umfang der weltweiten Kernenergienutzung entscheiden. Eine große Rolle könnte aber auch die Frage spielen, wie rasch sich vielversprechende technische Fortschritte auf die diesbezüglichen Entscheidungen auswirken.

Wenn nicht mit hinreichender Gewissheit nachgewiesen werden kann, dass Kernenergie sicher und wirtschaftlich wettbewerbsfähig ist und dass akzeptable Lösungen für die Entsorgung nuklearer Abfälle existieren, wird die Kernenergie wohl – wenn auch zunächst nur langsam – an Bedeutung verlieren. Können der Öffentlichkeit hingegen überzeugende Beweise dafür geliefert werden, dass die Kernkraft den an sie gestellten Forderungen gerecht wird, ist mit einem kräftigen Wachstum der Kernenergie zu rechnen.



# Glossar



## A

### Abgebrannte Brennelemente

Brennelemente nach ihrem Einsatz in einem Kernreaktor.

### Abgereichertes Uran

Uran mit einer geringeren als der in der Natur vorkommenden Isotopenkonzentration an Uran-235 (rd. 0,711%). Abgereichertes Uran entsteht als Nebenprodukt bei der Anreicherung.

### Abraum

Abraum sind diejenigen Gesteinsmassen die kein Erz enthalten oder nur Erz von zu geringer Konzentration, um wirtschaftlich zu sein. Abraum fällt z.B. beim Auffahren von Schächten und Stollen an und wird auf Halden gelagert. Gelegentlich wird Abraum zum späteren Verfüllen der Gruben oder Tagebaue verwendet.

### Abtrennung und Umwandlung (P&T – *Partitioning and Transmutation*)

Bei *Partitioning* handelt es sich um die Abtrennung unerwünschter langlebiger radioaktiver Elemente wie Aktinide (z.B. Americium-243) und Spaltprodukte von abgebrannten Brennelementen. Die *Transmutation* ist die Umwandlung dieser unerwünschten Elemente mittels Kernreaktionen in kurzlebige oder stabile Elemente. Diese Prozesse (Abtrennung und Umwandlung) könnten zumindest teilweise jenen Anteil der hochaktiven Abfälle eliminieren, der am stärksten zur Wärmeentwicklung und langlebigen Radioaktivität beiträgt. P&T-Maßnahmen verfügen daher über das Potenzial, den Zeitraum, in dem Abfall isoliert gehalten werden muss, erheblich zu reduzieren.

### ALARA

Abkürzung für „*as low as reasonably achievable*“ („so gering wie vernünftigerweise erreichbar“). Dies bedeutet, dass alle zumutbaren Anstrengungen unternommen werden müssen, um die Belastung durch ionisierende Strahlung auch unterhalb der gesetzlich zulässigen Grenzwerte, unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Aspekte, so gering wie möglich zu halten.

### Alphateilchen

Positiv geladenes Teilchen, das vom Atomkern während des radioaktiven Zerfalls ausgestrahlt wird. Alphateilchen bestehen aus zwei Protonen und zwei Neutronen.

### Angereichertes Uran

Uran, dessen Isotopenkonzentration an Uran-235 über das natürliche Niveau von 0,711% hinaus erhöht wurde.

### Anreicherung/Anreicherungsprozess

Physikalisches Verfahren, bei dem die Isotopenkonzentration an Uran-235 im Vergleich zu dem in Natururan enthaltenen Wert erhöht wird. Zwei Verfahren werden hierzu kommerziell genutzt, das Gasdiffusionsverfahren und das Gaszentrifugenverfahren.

### Auslegungsstörfälle

Spektrum der verschiedenen Zustände und Ereignisse (z.B. Leitungsbruch, K hlmittelpumpenversagen), die bereits bei der Auslegung einer Kernanlage ausdrücklich berücksichtigt werden, um zu gewährleisten, dass die Anlage ihnen standhalten kann, ohne dass die zulässigen Sicherheitsgrenzwerte überschritten werden. Voraussetzung für die Beherrschung von Auslegungsstörfällen ist die auslegungsgemä e Funktionsfähigkeit der Sicherheitssysteme.

## B

### Becquerel

SI-Maßeinheit des radioaktiven Zerfalls, die dem Zerfall eines Atomkerns pro Sekunde entspricht. Da es sich um eine sehr kleine Maßeinheit handelt, sind in der Praxis Gigabecquerel ( $10^9$  Bq) und Terabecquerel ( $10^{12}$  Bq) gebräuchlicher.

### Betateilchen

Von einem Atomkern beim radioaktiven Zerfall ausgesandtes Elektron (negative Ladung), oder Positron (positive Ladung).

### Brennstoffkreislauf

Unter Brennstoffkreislauf sind die verschiedenen Verfahrensschritte zu verstehen, die zur Herstellung, Verwendung und Entsorgung von Brennstoff für Kernreaktoren erforderlich sind. Der Brennstoffkreislauf kann sich aus Uranerzförderung und -gewinnung, Konversion, Anreicherung, Brennelementherstellung, Einsatz im Reaktor, Wiederaufarbeitung und Entsorgung zusammensetzen. Aus welchen Verfahrensschritten der Brennstoffkreislauf im Einzelnen aufgebaut ist, hängt von technologischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Faktoren ab. Zu Beginn des nuklearen Zeitalters wurde davon ausgegangen, dass schnelle Brutreaktoren eines Tages das vorherrschende Reaktorkonzept sein würden und dass es auch einen Brennstoffkreislauf auf Plutoniumbasis geben würde. In einem solchen Fall wäre der Prozess der Herstellung und Behandlung von Kernbrennstoff insofern zyklisch, als der Brennstoff fortwährend wiederverwendet würde. Das Zyklus-Prinzip ist in der Bezeichnung der Herstellungs- und Behandlungsverfahren von Kernbrennstoffen erhalten geblieben, obwohl beim „offenen“ Brennstoffkreislauf nicht wiederaufgearbeitet wird und auch beim „geschlossenen“ Brennstoffkreislauf in seiner derzeitigen Form nur eine partielle Wiederaufarbeitung vorgesehen ist.

### Brutmaterial

Bei Brutmaterial handelt es sich um nicht spaltbare Stoffe, die erst nach Umwandlung durch Neutroneneinfang und nachfolgendem radioaktiven Zerfall spaltbar werden. Beispiele für Brutmaterial sind: Uran-238, das in spaltbares Plutonium-239 umgewandelt werden kann, und Thorium-232, das in spaltbares Uran-233 umgewandelt werden kann.

### Brutreaktor

Kernreaktor, der mehr Kernbrennstoff erzeugt als er verbraucht. In Reaktoren diesen Typs wird in der Regel Brutmaterial im und um den Reaktorkern angeordnet, um die während der Kernspaltung erzeugten Neutronen zur Umwandlung des Brutmaterials in spaltbares Material zu verwenden. Um die Spaltzone eines schnellen Reaktors kann beispielsweise Uran-238 angeordnet werden, das dann in Plutonium-239 umgewandelt wird. Dieses kann wiederaufgearbeitet und als Brennstoff im Reaktor wiederverwendet werden.

## C

### CANDU-Reaktor

Abkürzung für *Canadian Deuterium Uranium Reactor*. In diesem Reaktortyp wird „schweres“ Wasser, d.h. Deuteriumoxid, als Kühlmittel und Moderator eingesetzt. Bei Verwendung von schwerem Wasser kann Natururan als Brennstoff benutzt werden, womit die Anreicherung des Urans entfällt.

## D

### Deterministische Effekte

Strahlenwirkungen werden eingeteilt in deterministische Wirkungen, die bei einer Strahlenbelastung oberhalb einer bestimmten Schwellendosis mit Sicherheit eintreten (z.B. messbare Blutbildveränderungen), und stochastische Wirkungen, die nach Ablauf einer längeren Latenzzeit mit einer bestimmten dosisabhängigen Wahrscheinlichkeit eintreten können.

Deterministische Strahlenwirkungen können direkt auf eine bestimmte Strahlenbelastung zurückgeführt werden; je höher die Strahlendosis ist, desto schwerer ist die Erkrankung.

### Deterministisches Sicherheitskonzept

Das deterministische Sicherheitskonzept ist eine Methode zur Beurteilung der Sicherheit von Kernanlagen unter Verwendung eines definierten Katalogs an auslösenden Ereignissen, den so genannten „Auslegungsstörfällen“. Die Auslegungsstörfälle wurden so gewählt, dass sie ein realistisches Spektrum möglicher auslösender Ereignisse widerspiegeln, die die Sicherheit der Anlage gefährden könnten, so z.B. Kühlmittelverluststörfälle, Steuerstabsauswurf (DWR), Herausfallen eines Steuerstabs (LWR) und Dampfleitungsbruch. Die Reaktion der Anlage und ihrer Sicherheitssysteme wird mit Hilfe von Simulationsrechnungen vorausgesagt, wobei überprüft wird, dass die zulässigen Grenzwerte nicht überschritten werden.

### Deuterium

Stabiles Wasserstoffisotop, dessen Kern ein Proton und ein Neutron enthält, gegenüber gewöhnlichem Wasserstoff, der nur ein Proton enthält.

### Diskontsatz

Der Diskontsatz ist ein wichtiges Element von Wirtschaftlichkeitsanalysen, unter dessen Einfluss sich die Zweckmäßigkeit einer wirtschaftlichen Entscheidung verändern kann. Der Diskontsatz ist ein Auf- bzw. Abzinsungsfaktor, mit dem sich der Barwert eines eingesetzten Kapitals zu einem bestimmten Zeitpunkt berechnen lässt.

### Dosisbegrenzung

Im Kontext des Strahlenschutzes handelt es sich bei der Begrenzung der Strahlenexposition (Dosis) um den Prozess, mit dem gewährleistet wird, dass bei geplanten und gerechtfertigten Aktivitäten die amtlich festgelegten Dosisgrenzwerte der Strahlenexposition nicht überschritten werden. Die Festlegung des Dosisgrenzwerts beinhaltet subjektive Kriterien, die wissenschaftliche und gesellschaftliche Aspekte berücksichtigen. Als Dosisgrenzwert wird eine Größe festgelegt, ab der es die Genehmigungsbehörden für notwendig halten, die Strahlenexposition zu reduzieren.

### Druckwasserreaktor (DWR)

Ein Kernreaktor, der unter hohem Druck gehalten wird, um ein Sieden des Kühlwassers bei hoher Betriebstemperatur zu verhindern. Die vom Reaktor erzeugte Wärme wird vom Reaktorkern in einen großen Wärmetauscher (den so genannten Dampferzeuger) geleitet, in dem das Wasser in einem Sekundärkreislauf erwärmt wird, um den für die Stromerzeugung notwendigen Dampf zu erzeugen.

## E

### Elektronenvolt

In der Atom- und Kernphysik gebräuchliche Maßeinheit. Ein Elektronenvolt ist die von einem Elektron gewonnene kinetische Energie beim Durchlaufen einer Spannungsdifferenz von einem Volt. Weil diese Maßeinheit sehr klein ist, wird sie oft in Megaelektronenvolt (MeV) ausgedrückt, d.h. 1 Million ( $1 \times 10^6$ ) Elektronenvolt. Ein Elektronenvolt entspricht  $1,602 \times 10^{-19}$  Joule.

## Externe Kosten

Gesellschaftliche oder ökologische Kosten, die in den Energiepreisen auf der Erzeuger- und der Verbraucherebene nicht berücksichtigt sind und nicht in die Berechnung des Verkaufspreises einbezogen werden. Bei Energieerzeugung handelt es sich hierbei in der Regel um Kosten der Abfallentsorgung, von Umwelteffekten und Auswirkungen auf die Volksgesundheit.

## G

### Gammastrahlen

Hochenergetische elektromagnetische Strahlung, den Röntgenstrahlen ähnlich, die von einem Atomkern ausgestrahlt wird.

### Geschätzte zusätzliche Vorkommen – Kategorie I (*Estimated additional resources – EAR-I*)

Uranvorkommen, die auf der Grundlage direkter geologischer Belege in Nebenadern bereits gut erschlossener Lagerstätten bzw. in Lagerstätten vermutet werden, deren geologische Kontinuität zwar nachgewiesen wurde, bei denen die vorliegenden Einzeldaten, z.B. zu ihren Abmessungen oder ihrer Beschaffenheit, jedoch nicht als ausreichend angesehen werden, um sie als gesicherte Reserven (*Reasonably assured resources – RAR*) einstufen zu können. Die Schätzungen von Menge, Beschaffenheit sowie Erkundungs-, Vermessungs- und Förderkosten gründen sich auf verfügbare Stichproben oder auf Erkenntnisse über die Lagerstättencharakteristiken, die an den bekanntesten Stellen der Lagerstätte bzw. in ähnlichen Lagerstätten gewonnen wurden.

### Geschätzte zusätzliche Vorkommen – Kategorie II (*EAR-II*)

Uranvorkommen, mit denen – hauptsächlich auf der Grundlage indirekter Belege – in Lagerstätten gerechnet wird, die in hinreichend bestimmten geologischen Formationen oder in Mineralisationsgebieten mit bereits bekannten Lagerstätten vermutet werden. Die Schätzungen von Menge und Beschaffenheit des Urans sowie der Erkundungs-, Vermessungs- und Förderkosten stützen sich in erster Linie auf Kenntnisse über die Merkmale von Uranvorkommen in bekannten Lagerstätten der jeweiligen Formationen oder Mineralisationsgebiete sowie auf eventuell vorliegende Stichproben bzw. geologische, geophysikalische oder geochemische Daten. Diese Schätzungen sind weniger verlässlich als bei der Kategorie EAR-I.

### Geschlossener Brennstoffkreislauf

Brennstoffkreislauf, bei dem die abgebrannten Brennelemente zur Rezyklierung des noch unverbrauchten Spaltmaterials wiederaufgearbeitet werden. Nach der Entfernung aus dem Reaktor durchlaufen die abgebrannten Brennelemente chemische Verfahren, bei denen das Uran und Plutonium herausgetrennt werden, die dann zur Herstellung neuer Brennelemente genutzt werden können. Derzeit wird nur das wiedergewonnene Plutonium bei der Herstellung von Mischoxid-Brennelementen (MOX) wiederverwendet. Auf Grund der Anreicherung von Plutoniumisotopen, die im thermischen Neutronenspektrum eines Leichtwasserreaktors nicht gespalten werden können, sowie anderer unerwünschter Isotope, wie insbesondere Curium, kann Plutonium jedoch nur zwei- oder dreimal wiederaufgearbeitet werden und muss dann wie Abfall aus einem offenen Brennstoffkreislauf behandelt werden. Bei der Verwendung von wiederaufgearbeitetem Spaltmaterial in schnellen Reaktoren gilt diese Einschränkung nicht.

### Gesicherte Reserven (*Reasonably assured resources – RAR*)

Uran, das in nachgewiesenen Erzlagerstätten von definierter Größe, Qualität und Konfiguration vorkommt, so dass die Mengen, die sich in den jeweiligen Kostenklassen mit bewährten Abbau- und Verarbeitungstechnologien gewinnen lassen, spezifiziert werden können. Schätzungen der Menge und Qualität basieren auf spezifischen Stichprobendaten und Erkundungen der Vorkommen bzw. auf Kenntnissen über die Merkmale der Lagerstätten.

### Gray

Maßeinheit der Energiedosis; entspricht einem Joule absorbiertes Energie pro Kilogramm Absorptionsmaterial.

## Gruppe der Kernmaterial-Lieferländer

Die Gruppe der Kernmaterial-Lieferländer umfasst Länder (39 im Oktober 2002), die zur Verhinderung der Verbreitung von Kernwaffen zusammenarbeiten. Jedes Mitgliedsland setzt sich für die Ziele der Gruppe ein, indem es sich zur Einhaltung der Konsensleitsätze für den Export von Kern- und verwandtem Material verpflichtet und einschlägige Kenntnisse austauscht.

## H

### Halbwertszeit

Zeit, in der die Hälfte der Atome eines radioaktiven Isotops zerfällt.

### Hochaktive Abfälle (*High-level waste – HLW*)

Radioaktive Abfälle werden normalerweise in einige wenige Kategorien unterteilt, um die für ihre Handhabung, Lagerung und Entsorgung geltenden Regeln leichter bestimmen zu können. Diese Einteilung richtet sich nach der Radioaktivität des Abfalls sowie der Zeitspanne, in der der Abfall radioaktiv bleibt. Die Definition der verschiedenen Kategorien sind von Land zu Land unterschiedlich. Hochaktive Abfälle enthalten im Allgemeinen langlebige hochaktive Radionuklide, von denen auch eine starke Wärmeentwicklung ausgehen kann. Im Rahmen des Wiederaufarbeitungsprozesses werden sie in der Regel konzentriert und durch Verglasung verfestigt, so dass eine glasartige, für die Zwischen- und Endlagerung geeignete Substanz entsteht. Abgebrannte Brennelemente, die nicht wiederaufgearbeitet werden, fallen ebenfalls in diese Kategorie. Für diese Art von Abfällen ist die Endlagerung in geologischen Formationen vorgesehen.

### Hoch angereichertes Uran

Uran, dessen Gehalt an Uran-235 auf mindestens 20% erhöht wurde.

## I

### Ionenaustausch

Ionenaustausch ist ein chemisches Verfahren, das im Bereich der Kernenergie häufig zur Wasserreinigung oder Behandlung radioaktiver Abfälle eingesetzt wird. Eine Lösung, die unerwünschte Ionen enthält (Ionen sind Atome oder Atomgruppen, die nach Aufnahme oder Abgabe eines oder mehrerer Elektronen elektrisch geladen sind), wird über ein Ionenaustauschmedium geleitet, in dem die Ionen mit sauren (H+) oder basischen (OH-) Ionen ausgetauscht werden, so dass die unerwünschten Ionen im Austauschmedium abgeschieden werden. Bei dem Ionenaustauschmedium handelt es sich in der Regel um Harzgranulat. Nach einiger Zeit ist das Harz mit radioaktiven Ionen gesättigt und muss ausgewechselt werden. Im Ionenaustauscherharz konzentrieren sich die radioaktiven Abfallstoffe derart, dass es selbst hochaktiv wird und nur noch ferngesteuert gehandhabt werden kann.

### Ionisierende Strahlung

Ist die Energie der Strahlung – sei es Teilchen- oder elektromagnetische Strahlung – ausreichend hoch, um Elektronen aus der Elektronenhülle von Atomen herauszulösen und diese damit zu ionisieren, d.h. positiv oder negativ zu laden, spricht man von ionisierender Strahlung. Die aus dieser Wechselwirkung resultierenden Ionen können chemische Veränderungen auslösen, bei denen menschliche Zellen geschädigt werden können. Beispiele für ionisierende Strahlung sind Alphateilchen, Betateilchen und Gammastrahlen. Reicht die Energie der Teilchen- oder elektromagnetischen Strahlung nicht zur Ionisierung der Atome aus, handelt es sich um nicht ionisierende Strahlung. Zu dieser Kategorie gehören beispielsweise Radiowellen, Licht und Mikrowellen.

### Isotop

Als Isotope bezeichnet man Atome eines Elements mit der gleichen Protonenzahl (=Kernladung), aber unterschiedlichen Neutronenzahlen. Uran-235 ( $^{235}\text{U}$ ) und Uran-238 ( $^{238}\text{U}$ ) sind beispielsweise beides Isotope des Urans, mit 143 Neutronen in  $^{235}\text{U}$  und 146 Neutronen in  $^{238}\text{U}$ .

## K

### Kernbrennstoff/-kreislauf

In den meisten Reaktoren wird Urandioxid als Brennstoff verwendet. Die Mehrzahl der in gewerblich genutzten Reaktoren eingesetzten Brennstoffe enthält 2-5% Uran-235 ( $^{235}\text{U}$ ) im Vergleich zu den 0,711%, die in Natururan anzutreffen sind; man spricht daher von angereichertem Uran. Der Rest des Brennstoffs, bei dem es sich in der Regel um Uran-238 ( $^{238}\text{U}$ ) handelt, kann nur gespalten werden, wenn er mit schnellen Neutronen zusammenstößt; kommt es zum Neutroneneinfang, zerfällt er allmählich und verwandelt sich dabei in Plutonium-239 ( $^{239}\text{Pu}$ ). Dieses Spaltmaterial kann wiederum durch Kollision mit thermischen oder schnellen Neutronen gespalten werden, so dass sein Beitrag zur Energieleistung des Brennstoffs nach und nach bis auf rd. 30% der Energieerzeugung ansteigt. Das Uranoxidpulver wird normalerweise erhitzt, um daraus Pellets, kleine Presszylinder, herzustellen. Diese Pellets werden in metallene Hüllrohre gefüllt (Brennstäbe), die dann zu Brennelementen gebündelt werden. Ein Siedewasserreaktor wird in der Regel mit 730 Brennelementen aus rd. 46 000 Brennstäben bestückt. Etwa 10% der Reaktoren weltweit haben eine Genehmigung für die Verwendung von Mischoxid-Brennelementen (MOX), die eine Mischung aus Urandioxid und Plutoniumdioxid enthalten. Plutoniumdioxid stammt hauptsächlich aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente; die Russische Föderation und die Vereinigten Staaten planen allerdings, in Zukunft auch Plutonium aus nicht mehr benötigten nuklearen Sprengköpfen zu verwenden. Der Herstellungsprozess von MOX-Brennelementen ähnelt dem von Urandioxid-Brennelementen. Als Brennstoff für Reaktoren eignen sich ferner: Thorium, ein Brutmaterial, aus dem nach Neutroneneinfang und radioaktivem Zerfall spaltbares  $^{233}\text{U}$  wird. Andere Brennstoffformen sind Uransalze, die in flüssigmetallgekühlten Reaktoren eingesetzt werden können, sowie andere Uranformen, wie z.B. Urannitride und Urancarbide.

### Kernfusion

Kernfusion ist eine Kernreaktion, bei der leichte Atomkerne miteinander zu schwereren Atomkernen verschmelzen, wobei Energie freigesetzt wird. Dieser Prozess findet im Universum laufend statt. Im Kern der Sonne verwandelt sich Wasserstoff bei Temperaturen von 10 bis 15 Millionen °C in Helium, wodurch die Energie freigesetzt wird, die das Leben auf der Erde ermöglicht. Es werden zur Zeit erhebliche Forschungsanstrengungen unternommen, um den Prozess der Kernfusion zur Energiegewinnung in Fusionsreaktoren nutzbar zu machen.

### Kernmaterialüberwachung (Safeguards)

Maßnahmen zur Kernmaterialüberwachung. Methoden, mit denen überprüft wird, ob die in Nichtverbreitungsübereinkommen enthaltenen Verpflichtungen zur „friedlichen Nutzung“ eingehalten werden. Die Safeguards setzen voraus, dass ein Land seinen Bestand an waffentauglichem Kernmaterial definiert (bzw. angibt) und darüber informiert, wo sich dieser befindet. Mit den Safeguards soll verifiziert werden, ob die Kontrolle von waffentauglichem Kernmaterial sowie die korrekte Buchführung über die entsprechenden Bestände sowohl in einzelnen kerntechnischen Einrichtungen als auch in der Gesamtheit der Nuklearanlagen, die ein Signatarstaat offiziell als Gegenstand der Safeguards angegeben hat, gewährleistet ist. Die Verifizierung erfolgt mit von der IAEA installierten Überwachungsinstrumenten, von denen einige versiegelt sind, um Manipulationen zu verhindern. Physische Inspektionen nuklearer Einrichtungen nach dem Zufallsprinzip, aber mit Vorankündigung, finden mindestens einmal jährlich statt, um die Angaben des Kernkraftwerkbetreibers zu überprüfen und zu gewährleisten, dass alle installierten Instrumente zufriedenstellend funktionieren und die Sicherheitssiegel nicht manipuliert worden sind. Seit 1997 können IAEA-Inspektionen auch auf Überraschungs- oder Verdachtsbasis erfolgen, sobald ein Staat ein entsprechendes Zusatzprotokoll ratifiziert hat. Durch die Überprüfung der Kernmaterialbestände im Rahmen dieser Inspektionen kann die IAEA bekannt geben, dass das gesamte Kernmaterial für friedliche Zwecke verwendet wird.

### Kernreaktor

Eine Anlage, in der Strom durch Kernspaltung erzeugt wird. Obwohl es viele Reaktortypen gibt, haben diese gewisse Merkmale gemeinsam, insbesondere Brennstoff, Kühlmittel, Moderator (es sei denn,

der Reaktor wird mit schnellen Neutronen betrieben) und Steuerstäbe. Zu den weiteren gemeinsamen Merkmalen zählen ein Reflektor zum Zurückstreuen von austretenden Neutronen, Abschirmungen zum Schutz des Personals vor Strahlenexposition, Instrumente zur Messung und Steuerung des Reaktors sowie Vorkehrungen zum Schutz des Reaktors.

### Kernspaltung

Vorgang, bei dem ein Atomkern in zwei oder mehr Bruchstücke gespalten wird, was mit der Freisetzung von Neutronen und großen Energiemengen verbunden ist. Bei schweren Atomkernen ist eine Spontanspaltung (ohne Anregung von außen) möglich, üblicherweise wird die Spaltung jedoch dadurch ausgelöst, dass der Atomkern ein Neutron absorbiert.

### Konversion

Chemischer Prozess, bei dem das von der Erzverarbeitung gelieferte feste Uranoxid in flüchtiges Uranhexafluorid umgewandelt wird, das unter bestimmten Temperatur- und Druckverhältnissen gasförmig und somit für den Anreicherungsprozess geeignet ist.

### Kosmische Strahlung

Vom Weltraum ausgehende Strahlung, die durch verschiedene Vorgänge erzeugt wird, wie z.B. das Entstehen und Vergehen von Sternen. Wenn die kosmische Strahlung mit einem Atomkern in Wechselwirkung tritt, entstehen Radionuklide kosmischen Ursprungs mit einer Halbwertszeit von Tausenden bis zu Millionen Jahren. Sie können in der Erdatmosphäre sowie auf der festen Erdoberfläche vorkommen und auch in Meteoriten und anderen extraterrestrischen Stoffen entstehen, die später auf die Erde fallen. Als Beispiele wären zu nennen: Tritium ( $H^3$ ), Wasserstoff mit zwei zusätzlichen Neutronen, das Bestandteil allen Wassers auf der Erde ist (Halbwertszeit 12,3 Jahre), und Kohlenstoff-14 (Halbwertszeit 5 730 Jahre), der in aller biologischen Materie enthalten ist.

### Kritikalität

Zustand eines Kernreaktors, in dem eine sich selbst erhaltende Kernreaktion abläuft, d.h. durch die Kernspaltung entstehen ausreichend Neutronen, um einen Ausgleich für die entwichenen oder absorbierten Neutronen zu schaffen, so dass die Zahl der bei der Kernspaltung erzeugten Neutronen gerade konstant bleibt.

### Kritische Masse

Kleinste Masse eines spaltbaren Materials, die unter den jeweils gegebenen Bedingungen – Form des spaltbaren Materials, Menge und Art des Moderators oder des Reflektors – eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion ermöglicht.

### Kühlmittel

Ein Kühlmittel absorbiert und transportiert die bei der Kernspaltung erzeugte Wärme und sorgt dafür, dass die Temperatur der Brennelemente in einem akzeptablen Bereich gehalten wird. Die absorbierte Wärmeenergie kann dann zum Antrieb von Turbinen und Generatoren zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Wenn Wasser als Kühlmittel verwendet wird, kann der bei der Erhitzung entstehende Dampf direkt in diese Turbinen geleitet werden. Alternativ dazu kann das Wasser oder ein anderes Kühlmittel zur Ableitung der Wärme und Dampferzeugung durch einen Wärmetauscher geleitet werden. Ebenfalls als Kühlmittel geeignet sind Gase, wie z.B. Helium, oder Flüssigmetalle, wie Natrium oder Blei und Wismut. Ein Kühlmittel kann zugleich auch als Moderator dienen; in den meisten Reaktoren wird Wasser für beide Zwecke eingesetzt.

## L

### Leichtwasserreaktor

Sammelbezeichnung für alle Kernreaktoren, die mit natürlichem Wasser gekühlt und/oder moderiert werden.

### LNT-Hypothese (Lineares Modell ohne Grenzwert)

Es sind viele wissenschaftliche Untersuchungen über die Strahlenexposition und die damit verbundenen Risiken durchgeführt worden, und die Risiken von höheren Strahlendosen sind sehr genau bekannt. Im Bereich sehr geringer Strahlenexpositionen jedoch sind die Risiken noch nicht vollständig geklärt und müssen noch mit Hilfe von Biologie und Medizin sowie statistischen Untersuchungen von strahlenexponierten Personen nachgewiesen werden. Der Verlauf der Dosis-Risiko-Beziehung, die den Zusammenhang zwischen individueller Strahlendosis und der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten stochastischer Strahlenwirkungen angibt, ist für geringe Strahlendosen nicht exakt bekannt; es wird angenommen, dass ein linearer Verlauf der Dosis-Risiko-Beziehung nicht zu einer Unterschätzung der Risiken führt. Aus diesem Grund wird in der Praxis gewöhnlich davon ausgegangen, dass jede Strahlenexposition, und sei sie auch noch so gering, mit Risiken verbunden ist und dass der Strahlenschutz entsprechend optimiert werden muss.

## M

### Megawatt (MW)

Die Leistungseinheit, die einer Million ( $1 \times 10^6$ ) Watt entspricht. Ein Megawatt elektrisch (MWe) bezeichnet die Stromproduktion eines Generators, ein Megawatt thermisch ( $MW_{th}$ ) die Wärmeproduktion eines Kernreaktors. Das Verhältnis zwischen beiden ergibt eine Messgröße für den Wirkungsgrad des Stromerzeugungsprozesses. In der Regel stehen die thermische Leistung und die elektrische Leistung eines Kernreaktors in einem Verhältnis von 3:1, so dass ein Reaktor mit einer thermischen Leistung von 2 700 MW rd. 900 MW Strom erzeugen kann.

### Mehrstufenkonzept (auch Mehrfachbarrierenprinzip)

Auf mehreren Schutzebenen aufbauendes Auslegungs- und Betriebsprinzip für Kernanlagen zur Verhinderung von Störfällen und Begrenzung ihrer Folgen. Bei den verschiedenen Schutzebenen handelt es sich um: technische und administrative Kontrollen zur Qualitätssicherung, Barriersysteme, mehrfach installierte Sicherheitsvorkehrungen (Redundanzprinzip) und Notfallschutzmaßnahmen.

### Mischoxid-Brennelement (MOX)

MOX ist die Abkürzung für Mischoxid-Brennelement, ein Brennstoff für Kernkraftwerke, der aus einer Mischung von angereichertem Uranoxid und Plutoniumoxid besteht.

### Mittelaktive Abfälle (*Intermediate-level waste* – ILW)

Radioaktive Abfälle werden normalerweise in einige wenige Kategorien unterteilt, um die für ihre Handhabung, Lagerung und Entsorgung geltenden Regeln leichter bestimmen zu können. Diese Einteilung richtet sich nach der Radioaktivität des Abfalls sowie der Zeitspanne, in der der Abfall radioaktiv bleibt. Die Definitionen der verschiedenen Kategorien sind von Land zu Land unterschiedlich. Mittelaktive Abfälle erfordern im Allgemeinen eine besondere Konditionierung. Je nach ihrem Gehalt an langlebigen Radionukliden müssen sie der Endlagerung in geologischen Formationen zugeführt werden, können aber auch oberirdisch oder in geringer Tiefe gelagert werden.

### Moderator

Ein Moderator dient der Abbremsung der Neutronen auf eine niedrigere Energie, um so die Spaltungseffizienz für den Kernbrennstoff zu erhöhen. Der Moderator muss aus einem leichten Stoff bestehen, der eine effiziente Abbremsung der Neutronen bei geringer Einfangwahrscheinlichkeit ermöglicht. Gewöhnlich wird natürliches Wasser verwendet; eine Alternative ist Graphit, eine Form von Kohle.

## N

### Nachgewiesene konventionelle Vorkommen

Die am leichtesten zugänglichen Uranressourcen; Ressourcen, die nachgewiesen wurden und deren Förderung mit konventionellen Techniken nicht kostspielig ist, werden als Known conventional

resources (Nachgewiesene konventionelle Ressourcen) bezeichnet. Diese Ressourcen sind in zwei Untergruppen aufgeteilt: Reasonably assured resources (Gesicherte Reserven) und Estimated additional resources – Category 1 (EAR-1 – Geschätzte zusätzliche Ressourcen – Kategorie I). Gemessen werden die nachgewiesenen konventionellen Ressourcen anhand der um Verluste bei den Abbau- und Gewinnungsprozessen bereinigten Uranmenge. Erfasst werden sie in den Kostenklassen unter 40 US-\$/kg Uran, 40-80 US-\$/kg Uran und 80-130 US-\$/kg Uran.

### Natururan

Uran in der Isotopenzusammensetzung, in der es in der Natur vorkommt, d.h. 99,2745% Uran-238 (oder <sup>238</sup>U), 0,711% Uran-235 (<sup>235</sup>U) und 0,0055% Uran-234 (<sup>234</sup>U).

### Neutron

Ein Elementarteilchen ohne elektrische Ladung und mit einer Masse, die geringfügig größer ist als die Protonenmasse; es ist im Kern aller Atome enthalten, mit Ausnahme des Wasserstoffatoms H-1 (<sup>1</sup>H).

### Nicht entdeckte konventionelle Vorkommen

Uranressourcen, von denen angenommen wird, dass sie existieren und mit konventionellen Bergbautechniken abgebaut werden können, deren Existenz aber derzeit noch nicht physisch nachgewiesen wurde, zählen zur Kategorie der nicht entdeckten konventionellen Ressourcen. Sie umfassen auch die geschätzten zusätzlichen Ressourcen – Kategorie II (EAR-II) und die spekulativen Ressourcen (SR).

### Niedrig angereichertes Uran

Uran, bei dem die Isotopenkonzentration von Uran-235 über das in der Natur vorkommende Niveau hinaus angereichert wurde, aber unter 20% bleibt. In Kernkraftwerken wird generell niedrig angereichertes Uran mit einem Uran-235-Gehalt von 3-5% verwendet.

## O

### Offener Brennstoffkreislauf

Ein Brennstoffkreislauf, in dem abgebrannte Brennelemente nicht wiederaufgearbeitet werden. Die dem Reaktor entnommenen abgebrannten Brennelemente werden konditioniert und bis zur Verfügbarkeit einer Lagerstätte für die Endlagerung zwischengelagert.

### Optimierung

Im Zusammenhang mit dem Strahlenschutz ist die Optimierung der Prozess, mit dem sichergestellt wird, dass die durch eine „gerechtfertigte Anwendung“ bedingte Strahlenexposition von Zivilpersonen und/oder beruflich strahlenexponierten Personen auch unterhalb festgelegter Grenzwerte so gering wie vernünftigerweise machbar gehalten wird, wobei wirtschaftliche und gesellschaftliche Faktoren berücksichtigt werden. Um optimale Lösungen zu finden, werden sowohl ein qualitativer (Konsensdiskussionen zwischen beteiligten Akteuren, gute Arbeitspraktiken im Interesse aller, beste industrielle Verfahrensweisen) als auch ein quantitativer Ansatz verwendet (d.h. differentielle Kosten-Nutzen-Analyse, *Multi-attribute-Analyse*).

## P

### Plasma

Insgesamt elektrisch neutrales Gasgemisch aus Elektronen, Ionen und neutralen Teilchen, die sich unabhängig voneinander bewegen. (Andere Zustände sind fest, flüssig und gasförmig.)

### Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA)

Eine PSA ist eine Form der Sicherheitsanalyse, bei der zur Analyse des globalen Risikos sowohl in der Bauphase als auch beim Betrieb eines Kernkraftwerks probabilistische Risikobeurteilungstechniken

angewendet werden. Bei der Betrachtung eines Gesamtkatalogs potenzieller Ereignisse mit den jeweiligen Wahrscheinlichkeiten und Folgen lässt sich das Gesamtrisiko eines nuklearen Störfalls oder Unfalls evaluieren. Für ein Kernkraftwerk wird dieses Risiko anhand der Häufigkeit von Kernschmelzen bzw. der Häufigkeit großer radioaktiver Emissionen gemessen. Für die existierenden Kernkraftwerke wird für die Wahrscheinlichkeit einer Beschädigung des Reaktorkerns generell ein Wert unter rd.  $1 \times 10^{-4}$  pro Jahr akzeptiert, bei neuen Anlagen sollte der Schwellenwert sogar bei weniger als  $1 \times 10^{-5}$  pro Jahr liegen. In der Praxis ist es heute so, dass die errechneten Ergebnisse nicht mehr als absolute Richtwerte, sondern vielmehr als Zielwerte betrachtet werden, die für eine Genehmigung oder Ablehnung von Seiten der Genehmigungsbehörden ausschlaggebend sind.

### Proton

Ein Elementarteilchen mit einer positiven elektrischen Ladung, das sich im Atomkern befindet.

## R

### Radioaktivität/Radioaktive Stoffe

Eigenschaft bestimmter Stoffe, sich ohne äußere Einwirkung umzuwandeln und dabei eine charakteristische Strahlung auszusenden. Dieser Prozess wird auch als Umwandlung oder Zerfall eines Atoms bezeichnet. Radioaktive Atome werden oft als radioaktive Isotope oder Radionuklide bezeichnet.

### Rechtfertigung

Im Kontext des Strahlenschutzes ist eine Strahlenexposition der Bevölkerung und beruflich exponierten Personen nur gestattet, wenn sie durch eine „gerechtfertigte“ Tätigkeit bedingt ist. Das bedeutet im Wesentlichen, dass die von der Strahlenexposition ausgehenden Risiken von dem mit der betreffenden Aktivität verbundenen gesellschaftlichen Nutzen aufgewogen werden. Die Entscheidung darüber, ob eine bestimmte Aktivität gerechtfertigt ist oder nicht, ist prinzipiell ein subjektives Werturteil, das auf der Basis von wissenschaftlichen Informationen über die absoluten und relativen Größenordnungen der impliziten radiologischen Risiken gefällt wird. Entscheidungen bezüglich der Rechtfertigung einer Aktivität sind meistens fallspezifisch und werden je nach Situation und nationalem Kontext auf verschiedenen staatlichen Entscheidungsebenen bzw. Prozessen der öffentlichen Verwaltung getroffen.

### Richtlinien der Kernmaterial-Lieferländer

Die Richtlinien der Kernmaterial-Lieferländer bestehen aus einem Katalog von Grundsätzen und einer Liste von Materialien, Anlagen und Produkten, die für Entwurf, Bau und Erprobung von Kernwaffen eingesetzt werden könnten, und wurden von der Gruppe der Kernmaterial-Lieferländer konzipiert. Es wurden zwei Kategorien von Richtlinien ausgearbeitet: *Guidelines for the Export of Nuclear Material, Equipment and Technology* (Richtlinien für den Export von Kernmaterial, -anlagen und -technologien) und *Guidelines for Transfers of Nuclear-related Dual-use Equipment, Material and Related Technology* (Richtlinien für Transfers von nuklearen und verwandten Ausrüstungen, Materialien und verbundenen Technologien mit doppeltem Verwendungszweck).

Für die Anwendung der Richtlinien gelten folgende Grundsätze:

- Die Lieferanten sollen die Weitergabe bestimmter Produkte oder Technologien nur bei einer offiziellen Zusicherung seitens der Regierung des Empfängerlandes genehmigen, wenn Verwendungszwecke ausdrücklich ausgeschlossen sind, die zur Herstellung nuklearer Sprengsätze führen können.
- Die Lieferanten sollen die Weitergabe bestimmter Produkte oder Technologien nur dann gestatten, wenn sie sichergestellt sehen, dass derartige Transfers nicht zur Weiterverbreitung von Kernwaffen oder sonstigen nuklearen Sprengkörpern beitragen würden.
- Die Lieferanten sollen sich nicht mit einer Zusicherung von Seiten der Empfänger zufrieden geben, wenn sie über einschlägige Informationen oder Belege verfügen, die zu der Annahme berechtigen, dass ein Transfer die Gefahr der Proliferation von Kernwaffen erhöhen könnte.

## Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen, die bei Veränderungen des Energiezustands der Elektronen in einem Atom ausgesendet werden. Sie sind eine Form hoch energetischer elektromagnetischer Strahlung, die gering mit Materie wechselwirken. Sie werden am besten durch dicke Bleischichten oder andere Materialien hoher Dichte gestoppt.

## S

### Schnellabschaltung (Scram)

Das möglichst schnelle Abschalten eines Kernreaktors, im Allgemeinen durch schnelles Einfahren der Regelstäbe. Ursprünglich handelte es sich um eine Abkürzung für „*Safety control rod axe man*“, die im Zusammenhang mit dem ersten in Betrieb genommenen (Forschungs-) Reaktor in den Vereinigten Staaten (dem „Chicago-Pile“) verwendet wurde.

### Schnelle Neutronen

Schnelle Neutronen sind Neutronen mit einer hohen kinetischen Energie, d.h. mehr als rd. 0,1 eV (in der Regel aber weniger als  $10^6$  eV bzw. 1 MeV). Schnelle Neutronen können in Spaltmaterial eine Kernspaltung auslösen, die Wahrscheinlichkeit ist jedoch geringer als bei thermischen Neutronen. Die Zahl der spaltbaren Isotope steigt allerdings mit zunehmender Energie der Neutronen.

### Schwachaktive Abfälle (*Low-level waste* – LLW)

Radioaktive Abfälle werden normalerweise in einige wenige Kategorien unterteilt, um die für ihre Handhabung, Lagerung und Entsorgung geltenden Regeln leichter bestimmen zu können. Diese Einteilung richtet sich nach der Radioaktivität des Abfalls sowie der Zeitspanne, in der der Abfall radioaktiv bleibt. Die Definitionen der verschiedenen Kategorien sind von Land zu Land unterschiedlich. Generell handelt es sich bei schwachaktiven Abfällen aber um eine Kategorie, deren Handhabung keine spezifische Abschirmung erfordert und die sich, da keine langlebigen Radionuklide vorhanden sind, für die Entsorgung in Oberflächen- oder oberflächennahen Endlagern eignet. Rund 90% des jährlich weltweit produzierten Volumens an radioaktivem Abfall sind schwachaktiv.

### Schweres Wasser

Wasser, das erheblich mehr Deuteriumatome enthält als natürliches Wasser. Deuterium ist ein Wasserstoffisotop, das ein Neutron und ein Proton enthält gegenüber nur einem Proton wie in gewöhnlichem Wasserstoff. Schweres Wasser wird in Schwerwasser-Druckwasserreaktoren (*Pressurised heavy water reactors* – PHWR) als Kühlmittel und Moderator eingesetzt, weil es die Verwendung von Natururan als Brennstoff ermöglicht. Schweres Wasser macht weniger als 1% des in der Natur vorkommenden Wassers aus und muss daher in eigens zu diesem Zweck konstruierten Anlagen getrennt und konzentriert werden, um in Reaktoren eingesetzt werden zu können.

### Siedewasserreaktor (SWR)

Weit verbreiteter, in aller Welt eingesetzter Leichtwasserreaktor, in dem natürliches Wasser sowohl als Kühlmittel als auch als Moderator dient und im Reaktorkern siedet. Der dabei entstehende Dampf wird direkt zur Stromerzeugung verwendet.

### Sievert (Sv)

Die internationale Einheit für die Äquivalentdosis, dem Produkt aus Energiedosis und biologischem Bewertungsfaktor, ein Maß für die durch eine Strahlenexposition verursachte biologische Wirkung. Die biologische Wirkung einer Strahlenexposition ist je nach Art der Strahlung unterschiedlich. Beispielsweise erzeugt eine Energiedosis von 1 Joule Beta- oder Gammastrahlung pro kg Gewebe eine biologische Wirkung mit einer Äquivalentdosis von 1 Sv; 1 Joule/kg Alphastrahlung hat eine Wirkung von 20 Sv und 1 Joule/kg Neutronenstrahlung verursacht eine biologische Wirkung von 10 Sv.

### Spaltbares Material/Element

Bei spaltbarem Material handelt es sich um Elemente/Isotope, die eine Spaltung durchlaufen können, wobei der Unterschied zum **Spaltstoff** normalerweise darin besteht, dass dies beim Einfang eines schnellen Neutrons geschieht. Uran-238 beispielsweise ist spaltbares Material.

### Spaltprodukte

Bei der Spaltung eines Atomkerns entstehen in der Regel zwei Bruchstücke, die als Spaltprodukte bezeichnet werden. Es werden Neutronen sowie große Energiemengen freigesetzt. In Bezug auf ihre relative Häufigkeit und hohe Radioaktivität wichtige Spaltproduktisotope sind Brom, Caesium, Jod, Krypton, Rubidium, Strontium und Xenon. Spaltprodukte und deren Zerfallsprodukte machen einen Großteil des nuklearen Abfalls aus.

### Spaltstoffe

Spaltstoffe sind Stoffe, die sich nach Einfang eines thermischen (langsamen) Neutrons spalten können. Die in der Praxis am häufigsten verwendeten Spaltstoffe sind: Uran-233, Uran-235 und Plutonium-239.

### Spekulative Ressourcen (SR)

Uranressourcen, die im Wesentlichen auf Grund indirekter Informationen und geologischer Extrapolationen in Lagerstätten vermutet werden, wo sie mit existierenden Explorationstechniken erkundet werden können. Als genauer Standort der in diese Kategorie fallenden Vorkommen kann generell nur eine Region oder geologische Formation angegeben werden. Wie aus der Bezeichnung hervorgeht, sind Existenz und Umfang dieser Ressourcen spekulativ.

### Steuerstäbe

Auch: Regelstäbe, Absorberstäbe. Steuerstäbe sind aus neutronenabsorbierenden Materialien, wie z.B. Bor, Silber, Indium, Cadmium und Hafnium. Sie werden in den Reaktor eingefahren, um die Zahl der Neutronen zu verringern und so den Spaltprozess wenn nötig zu unterbrechen oder um die Leistung des Reaktors und die räumliche Energieverteilung während des Betriebs zu regulieren.

### Stilllegung

Administrative und technische Schritte, die zur Aufhebung eines Teils oder der Gesamtheit der für eine kerntechnische Anlage geltenden staatlichen Kontrollen unternommen werden. Die Stilllegung erfolgt in der Regel in mehreren Etappen: Außerbetriebnahme, Dekontamination und Demontage, Abriss und Freigabe des Geländes.

### Stochastische Effekte

Strahlenwirkungen werden eingeteilt in deterministische Wirkungen, die bei einer Strahlenbelastung oberhalb einer bestimmten Schwellendosis mit Sicherheit eintreten (z.B. messbare Blutbildveränderungen), und stochastische Wirkungen (z. B. Krebs oder Leukämie), die nach Ablauf einer längeren Latenzzeit mit einer bestimmten dosisabhängigen Wahrscheinlichkeit eintreten können. Die Wahrscheinlichkeit, dass stochastische Strahlenwirkungen eintreten, ist proportional zur Höhe der Strahlendosis.

### Strahlung

Strahlung ist Energie, die sich als elektromagnetische Welle oder als Fluß hochenergetischer Teilchen ausbreitet. Ist die Energie der Strahlung – Teilchen- oder elektromagnetische Strahlung – ausreichend hoch, um Elektronen aus der Elektronenhülle von Atomen herauszulösen, und diese damit zu ionisieren, d.h. positiv oder negativ zu laden, spricht man von ionisierender Strahlung. Beispiele für ionisierende Strahlung sind Alphateilchen, Betateilchen, Neutronen und Gammastrahlen. Reicht die Energie der Teilchen- oder elektromagnetischen Strahlung nicht zur Ionisierung der Atome aus, handelt es sich um nicht ionisierende Strahlung. Zu dieser Kategorie gehören beispielsweise Radio(Funk-)wellen, Licht, ultraviolette Strahlen (UV) und Mikrowellen.

## T

### Tailings

Mit diesem englischen Begriff werden die Rückstände aus der Uranerzaufbereitung bezeichnet. Durch den Mahlprozess sind sie sandförmig und im allgemeinen dünnflüssig durch die in ihnen enthaltenen Prozessflüssigkeiten. Sie werden in Absetzbecken gelagert und später auch dort verwahrt. Tailings enthalten den grössten Teil der nicht dem Uran zugehörigen Radioaktivität des Erzes.

### Technetium-99

Ein radioaktives Technetiumisotop, dessen als Technetium-99m ( $^{99m}\text{Tc}$ ) bekannte spezifische Form in der Nuklearmedizin zur Krebsdiagnose auf breiter Basis verwendet wird. Technetium-99m entsteht beim radioaktiven Zerfall von Molybdän-99, das wiederum als Spaltprodukt bei der Bestrahlung einer hoch angereicherten Uranfolie in einem Reaktor gebildet wird.

### Terrestrische Strahlung

Strahlung durch die natürlich in der Erdkruste vorkommenden radioaktiven Stoffe. Ein Großteil der terrestrischen Strahlung geht von den beiden Elementen Uran und Thorium sowie deren Zerfallsprodukten aus. Eines der radioaktiven Zerfallsprodukte der natürlichen Zerfallsreihe des Urans ist das radioaktive Edelgas Radon, das in die Atmosphäre gelangt, wenn es an der Erdoberfläche entsteht, und so zur Radioaktivität der Luft, die wir atmen, beiträgt.

### Thermische Neutronen

Thermische Neutronen sind Neutronen mit einer geringen kinetischen Energie von weniger als 0,1 Elektronenvolt (eV). Mit thermischen Neutronen lassen sich Uran-235 und Plutonium-239 am besten spalten.

### Torus

Eine schlauchförmige Geometrie, die durch Rotation eines Kreises um eine Achse entsteht. Für den Fusionsreaktor hat sich die Forschung auf zwei Plasmaeinschlusstechniken konzentriert – den Magnet- und den Trägheitseinschluss. Der Magneteinschluss kann kugel- oder torusförmig sein. Bei einem Torus-Fusionsreaktor werden torusförmige Magnetfelder für den Einschluss des Plasmabrennstoffs verwendet.

### Transmutation

Umwandlung eines Atomkerns nach Neutroneneinfang. Dieser Prozess vollzieht sich in Spaltungsreaktoren und erzeugt einige langlebige Elemente die dann im radioaktiven Abfall enthalten sind. Dieser Prozess wird aber in bestimmten Reaktortypen zur Umwandlung von langlebigen Elementen im hochaktiven Abfall in kurzlebige Elemente verwendet.

### Tritium

Radioaktives Isotop des Wasserstoffs, dessen Kern zwei Neutronen und ein Proton enthält. Die Nutzung von Tritium als Brennstoff in Fusionsreaktoren wird derzeit untersucht. Da Tritium radioaktiv ist und leicht Wasser bilden kann, gelten ganz besondere Strahlenschutzanforderungen.

### Trockenlagerung

Lagerung bestrahlter Brennelemente ohne Verwendung von Wasser als Kühlmittel. Nach der Abkühlung im Wasserbecken können die abgebrannten Brennelemente in große, abgeschirmte Sicherheitsbehälter verbracht werden, wobei die natürliche Luftzirkulation eine zu starke Erwärmung verhindert.

## U

### Urangewinnung

Prozess, in dem natürliches Uranerz chemisch behandelt wird, um das Uran herauszulösen und zu reinigen. In diesem Prozess wird auch das Volumen des Materials für den Transport und die weitere Handhabung in der Brennstofffabrik reduziert. Wegen seiner Farbe und Konsistenz wird das feste Produkt der Urangewinnung ( $\text{U}_3\text{O}_8$ ) *Yellowcake* genannt.

### UTA - Urantrennarbeit (SWU - Separative work unit)

Die Urantrennarbeit ist ein Maß für den zur Erzeugung von angereichertem Uran zu leistenden Aufwand.

Die Urantrennarbeit hängt von der Menge des im Prozess verarbeiteten Urans, dem Grad der Anreicherung und der Menge an Uran-235 im Abfallstrom ab. Generell sind rd. 100 000-120 000 UTA notwendig, um einen Leichtwasserreaktor mit einer Leistung von 1 000 MW<sub>e</sub> ein Jahr mit angereichertem Uran zu versorgen.

### V

#### Verfügbarkeit

Kenngröße für die Nutzung eines Kraftwerks, die der tatsächlich ans Netz abgegebenen Energie im Verhältnis zur potenziellen Höchstliefermenge eines Reaktors entspricht.

#### Verglasung

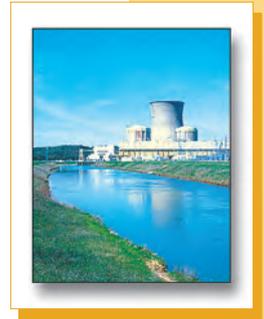
Es handelt sich um eine Technik, die gemeinhin zur Immobilisierung von hochaktivem Abfall verwendet wird, der bei der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen entsteht. Dieses Glas zeichnet sich generell durch eine lange Haltbarkeit und Widerstandsfähigkeit gegen die vom Abfall ausgehende intensive Strahlung und hohen Temperaturen aus und ist stabil, so dass es die radioaktiven Isotope über einen sehr langen Zeitraum einschließen kann.

### W

#### Wiederaufarbeitung

Der Prozess der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen, in dem das Uran und das Plutonium von Spaltprodukten und sonstigen Elementen getrennt und dadurch zurückgewonnen wird. Auf diese Weise können ein höherer Prozentsatz des potenziellen Energiewerts des Urans genutzt und das Abfallvolumen reduziert werden.

# Weiterführende Informationen



## Kapitel 1: Überblick über Kernenergie heute

- 1.1 NEA, *Nuclear Energy Data "Brown Book"*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2002 (jährliche Veröffentlichung).
- 1.2 *Nuclear Power Reactors in the World, Reference Data Series 2*. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA), 2002 (jährliche Veröffentlichung). Siehe auch online Power Reactor Information System (PRIS) unter [www.iaea.org/programmes/a2](http://www.iaea.org/programmes/a2).
- 1.3 International Energy Agency (IEA), *Key World Energy Statistics*. Paris: OECD/IEA, 2002. Jährliche Publikation, mit Details zum Energieangebot und -nachfrage.
- 1.4 IEA, *World Energy Outlook*. Paris: OECD/IEA, 2000.
- 1.5 IEA, *Nuclear Power in the OECD*. Paris: OECD/IEA, 2001.

## Kapitel 2: Grundlagen der Kernenergie

- 2.1 NEA, "JANIS – A New Java-based Nuclear Data Display Program". Paris: OECD/NEA, 2001. Ein Programm zur Darstellung und Handhabung von kernwissenschaftlichen Daten. Siehe online unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 2.2 Rhodes, Richard, *The Making of the Atomic Bomb*. New York: Simon & Schuster, 1995.
- 2.3 Lamarsh, John R. and Baratta, Anthony J., *Introduction to Nuclear Engineering*, 3<sup>rd</sup> Edition. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, Inc., 2001.
- 2.4 Murray, Raymond L., *Nuclear Energy*, 5<sup>th</sup> Edition. Boston: Butterworth-Heinemann, 2001.
- 2.5 Die ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) Webseite [www.iter.eu](http://www.iter.eu) liefert Informationen zu Grundlagen der Fusion und zum ITER.

## Kapitel 3: Nuklearer Brennstoffkreislauf

- 3.1 Das Uranium Information Centre gibt Informationen zu den Grundlagen des Uran- Brennstoffzyklus. Siehe [www.uic.com.au](http://www.uic.com.au).
- 3.2 NEA, *Trends in the Nuclear Fuel Cycle: Economic, Environmental and Social Aspects*. Paris: OECD, 2002.
- 3.3 NEA, *Accelerator-driven Systems and Fast Reactors in Advanced Nuclear Fuel Cycles: A Comparative Study*. Paris: OECD, 2002. NEA Issue Brief online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 3.4 NEA, *Management of Depleted Uranium*. Paris: OECD, 2001.

- 3.5 NEA, *The Decommissioning and Dismantling of Nuclear Facilities: Status, Approaches, Challenges*. Paris: OECD, 2002.  
NEA Issue Brief online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 3.6 NEA, *Decontamination Techniques Used in Decommissioning Activities*. Paris: OECD, 1999. Online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 3.7 NEA, *Environmental Remediation of Uranium Production Facilities*. Paris: OECD, 2002.

## Kapitel 4: Entsorgung radioaktiver Abfälle

- 4.1 NEA, *The Disposal of High-level Radioactive Waste*. Paris: OECD, 1989.  
NEA Issue Brief online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 4.2 NEA, *The Management of Low and Intermediate-level Radioactive Waste*. Paris: OECD, 1989.  
NEA Issue Brief online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 4.3 NEA, *Radioactive Waste Management in Perspective*. Paris: OECD, 1996.
- 4.4 IAEA, *The Principles of Radioactive Waste Management*. Vienna: IAEA, 1995.
- 4.5 "Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management". Verfügbar unter [www.iaea.org/worldatom/Documents/Legal/jointconv.shtml](http://www.iaea.org/worldatom/Documents/Legal/jointconv.shtml).
- 4.6 League of Women Voters, *The Nuclear Waste Primer*. Washington DC: Office of Civilian Radioactive Waste Management Information Center, 1993.
- 4.7 Murray, Raymond L., *Understanding Radioactive Waste*. Columbus, Ohio: Battelle Press, 1994.
- 4.8 NEA, *Nuclear Waste Bulletin: Überarbeitung on Waste Management Policies and Programmes*. Paris: OECD, 2001 (zweijährliche Veröffentlichung). Online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 4.9 NEA, *Progress Towards Geologic Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand?* Paris: OECD, 1999. Online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 4.10 NEA, *The Role of Underground Laboratories in Nuclear Waste Disposal Programmes*. Paris: OECD, 2001.
- 4.11 NEA, *Radionuclide Retention in Geologic Media*, Workshop Proceedings, Oskarshamn, Schweden, 7-9 May 2001. Paris, OECD, 2002.
- 4.12 NEA, *Disposal of Radioactive Waste: Can Long-term Safety be Evaluated? An International Collective Opinion*. Paris, OECD, 1991.  
Online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 4.13 NEA, *Establishing and Communicating Confidence in the Safety of Deep Geologic Disposal*. Paris: OECD, 2002.
- 4.14 NEA, *Stakeholder Confidence and Radioactive Waste Disposal*, Workshop Proceedings, Paris, France, 28-31 August 2000. Paris: OECD, 2001. Online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 4.15 NEA, *Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste*. Paris: OECD, 2001.
- 4.16 Cowan, G.A., "A Natural Fission Reactor". *Scientific American*, 235:36, 1976.
- 4.17 "Special Series on Natural Analogues". *Radwaste Magazine*, March 1995.
- 4.18 IAEA, *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*, ST-1. Vienna: IAEA, 1996.
- 4.19 "Sandia National Laboratory Transportation Program".  
Verfügbar unter [www.sandia.gov/tp/SAFE\\_RAM/SEVERITY.HTM](http://www.sandia.gov/tp/SAFE_RAM/SEVERITY.HTM).

## Kapitel 5: Reaktorsicherheit

- 5.1 NEA, *The Safety of the Nuclear Fuel Cycle*. Paris: OECD, 1993.  
Online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 5.2 IAEA, *Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants (75-INSAG-3 Rev.1), A Report by the International Nuclear Safety Advisory Group (INSAG-12)*. Vienna: IAEA, 1999.
- 5.3 *Nuclear Safety Convention (IAEA INFCIRC/449)*.  
Online verfügbar unter [www.iaea.org/worldatom/documents/legal/nukesafety.shtml](http://www.iaea.org/worldatom/documents/legal/nukesafety.shtml).
- 5.4 IAEA, *Safety Culture (75-INSAG-4), A Report by the International Nuclear Safety Advisory Group*. Vienna: IAEA, 1991.
- 5.5 NEA, *The Role of the Nuclear Regulator in Promoting and Evaluating Safety Culture*. Paris: OECD, 2001.
- 5.6 "International Nuclear Events Scale".  
Online verfügbar unter [www.iaea.or.at/worldatom/inforesource/factsheets/ines.html](http://www.iaea.or.at/worldatom/inforesource/factsheets/ines.html).
- 5.7 NEA, *Chernobyl: Assessment of Radiological and Health Impacts*. Paris: OECD, 2002.  
Online verfügbar unter [www.nea.fr/html/rp/chernobyl/welcome.html](http://www.nea.fr/html/rp/chernobyl/welcome.html).
- 5.8 NEA, *Nuclear Power Plant Operating Experiences from the IAEA/NEA Incident Reporting System (1996-1999)*. Paris: OECD, 2000. Online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 5.9 NEA, *Improving Nuclear Regulatory Effectiveness*. Paris: OECD, 2002.  
Online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 5.10 NEA, *Nuclear Regulatory Challenges Arising from Competition in Electricity Markets*. Paris: OECD, 2002. Online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 5.11 NEA, *Advanced Nuclear Reactor Safety Issues and Research Needs, Workshop Proceedings*, Paris, France, 18-20 February 2002. Paris: OECD, 2002.

## Kapitel 6: Strahlenschutz

- 6.1 UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), "Report on sources of radiation along with average exposures". Hat auch ein spezielles Kapitel zu Tschernobyl. New York: UNSCEAR, 2000 (erscheint ungefähr alle vier Jahre).  
Online verfügbar unter [www.unscear.org](http://www.unscear.org).
- 6.2 ICRP, *International Commission on Radiation Protection, Publication 60*. Stockholm: ICRP, 1991.
- 6.3 NEA, *Radiation Protection Overview: International Aspects and Perspective*. Paris: OECD, 1994.  
NEA Issue Brief online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 6.4 NRPB (National Radiological Protection Board), *Living with Radiation*. Chilton: NRPB, 1998.
- 6.5 AEA, *The Radiochemical Manual*. Harwell: AEA Technology, plc., 1998.
- 6.6 NEA, *A Critical Review of the System of Radiation Protection: First Reflections of the OECD/NEA Committee on Radiation Protection and Public Health (CRPPH)*. Paris: OECD, 2002.  
Online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 6.7 NEA, *Developments in Radiation Health Sciences and Their Impact on Radiation Protection*. Paris: OECD, 2000. Online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 6.8 NEA, *Better Integration of Radiation Protection in Modern Society, Workshop Proceedings*, Villigen, Switzerland, 23-25 January 2001. Paris: OECD, 2002.
- 6.9 NEA, *Experience from the International Nuclear Emergency Exercises: The INEX 2 Series*. Paris: OECD, 2001. Online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).

## Kapitel 7: Ökonomische Aspekte der Kernenergie

- 7.1 NEA, *The Economics of the Nuclear Fuel Cycle*. Paris: OECD, 1994.  
Online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 7.2 NEA, *Projected Costs of Generating Electricity: 1998 Überarbeitung*. Paris: OECD, 1998.
- 7.3 NEA, *Reduction of Capital Costs of Nuclear Power Plants*. Paris: OECD, 2000.
- 7.4 NEA, *Nuclear Power in Competitive Electricity Markets*. Paris: OECD, 2000.  
Online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 7.5 NEA, *Nuclear Power Plant Life Management in a Changing Business World*, Workshop Proceedings, Washington DC, Vereinigte Staaten, 26-27 June 2000. Paris: OECD, 2001.
- 7.6 European Commission, *ExternE Externalities of Energy*. Brussels: European Commission, 1995.
- 7.7 European Commission, *ExternE Externalities of Energy – National Implementation*. Brussels: European Commission, 1998.
- 7.8 NEA, *Externalities and Energy Policy: The Life-cycle Analysis Approach*, Workshop Proceedings, Paris, France, 15-16 November 2001. Paris: OECD, 2002.  
Online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).

## Kapitel 8: Internationales Atomrecht und Nichtverbreitung von Kernwaffen

- 8.1 Tromans, Stephen and Fitzgerald, James, *The Law of Nuclear Installations and Radioactive Substances*. London: Sweet & Maxwell, 1996.
- 8.2 Das OECD/NEA *Nuclear Law Bulletin* erscheint zweimal im Jahr in Englisch und Französisch. Dies ist ein Standardwerk zum Atomrecht und informiert zur Rechtsentwicklung und zu Verwaltungsentscheidungen in fast 60 Ländern, sowie zu bilateralen und internationalen Übereinkommen und Aktivitäten der internationalen Organisationen.
- 8.3 NEA, *Regulatory and Institutional Framework for Nuclear Activities*. Paris: OECD, 2002.  
Eine umfassende Übersicht über Recht und Institutionen zur friedlichen Nutzung der Kernenergie in den OECD Mitgliedsländern. Regelmässige überarbeitete Neuauflagen in Englisch und Französisch.
- 8.4 ElBaradei, Mohamed; Nwogugu, Edwin; and Rames, John, *The International Law of Nuclear Energy – Basic Documents (Parts 1 & 2)*. The Hague: Kluwer Academic Publishers, 1993.  
Ein umfassendes zweibändiges Standardwerk über internationales Recht zur Kernenergie.
- 8.5 NEA, *Nuclear Legislation in Central and Eastern Europe and the NIS: 2000 Overview*. Paris: OECD, 2000 (regelmässig überarbeitet).  
Eine umfassende Übersicht über das Recht im Bereich der friedlichen Nutzung der Kernenergie in mittel- und osteuropäischen Ländern sowie in den Nachfolgestaaten der UdSSR.
- 8.6 NEA, *Nuclear Legislation: Analytical Study – Regulatory and Institutional Framework for Nuclear Activities – 2001 Überarbeitung*. Paris: OECD, 2002.
- 8.7 NEA, *International Third Party Liability*. Paris: OECD, 1993.  
NEA Issue Brief online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 8.8 Zu den Rechtsinstrumenten zur Dritthaftung im Bereich der Kernenergie, siehe [www.nea.fr/html/law/legal-documents.html](http://www.nea.fr/html/law/legal-documents.html).
- 8.9 NEA, *Liability and Compensation for Nuclear Damage: An International Overview*. Paris: OECD, 1994.

- 8.10 "Conventions and Agreements under IAEA Auspices".  
Online verfügbar unter [www.iaea.org/worldatom/Documents/Legal](http://www.iaea.org/worldatom/Documents/Legal).
- 8.11 IAEA, "The International Atomic Energy Agency Safeguards Programme".  
Siehe [www.iaea.org/worldatom/Programmes/Safeguards](http://www.iaea.org/worldatom/Programmes/Safeguards).
- 8.12 Sanders, Ben, "A Short History of Nuclear Non-proliferation", *Nuclear Law Bulletin* No. 62, December 1998. Siehe [www.nea.fr/html/law/nlb/Nlb-62/sandslov.pdf](http://www.nea.fr/html/law/nlb/Nlb-62/sandslov.pdf).
- 8.13 Rockwood, Laura, "The Nuclear Non-proliferation Treaty: A Permanent Commitment to Disarmament and Non-proliferation", *Nuclear Law Bulletin* No. 56, December 1995.  
Siehe [www.nea.fr/html/law/nlb/Nlb-56-en.pdf](http://www.nea.fr/html/law/nlb/Nlb-56-en.pdf).
- 8.14 IAEA, *The Structure and Content of Agreements Between the Agency and States Required in Connection with the Treaty on the Non-proliferation of Nuclear Weapons (IAEA INFCIRC/153)*. Vienna: IAEA, 1972.  
Online verfügbar unter [www.iaea.org/worldatom/Documents/Infircs/Others/inf153.shtml](http://www.iaea.org/worldatom/Documents/Infircs/Others/inf153.shtml).
- 8.15 IAEA, *Model Protocol Additional to the Agreements Between State(s) and the International Atomic Energy Agency for the Application of Safeguards (IAEA INFCIRC/540)*. Vienna: IAEA, 1998.  
Online verfügbar unter [www.iaea.org/worldatom/Documents/Infircs/1998/infirc540corrected.pdf](http://www.iaea.org/worldatom/Documents/Infircs/1998/infirc540corrected.pdf).
- 8.16 IAEA, *The Agency's Safeguards System (IAEA INFCIRC/66/Rev. 2)*. Vienna: IAEA, 1968.  
Online verfügbar unter [www.iaea.org/worldatom/Documents/Infircs/Others/inf66r2.shtml](http://www.iaea.org/worldatom/Documents/Infircs/Others/inf66r2.shtml).
- 8.17 Die Nuclear Suppliers Guidelines sind online erhältlich bei [www.nsg-online.org/guide.htm](http://www.nsg-online.org/guide.htm).
- 8.18 *Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty*. Online verfügbar unter [www.ctbto.org](http://www.ctbto.org).

## Kapitel 9: Kernenergie und nachhaltige Entwicklung

- 9.1 Royal Academy of Engineering, *Nuclear Energy: The Future Climate*. London: The Royal Society, 1999.  
Online verfügbar unter [www.royalsoc.ac.uk/policy/nuclearreport.htm](http://www.royalsoc.ac.uk/policy/nuclearreport.htm).
- 9.2 Nakicenovic, Nebojsa; Grübler, Arnulf; and McDonald, Alan, eds., *Global Energy Perspectives*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- 9.3 NEA, *Uranium 2001: Resources, Production and Demand*. Paris: OECD, 2002.
- 9.4 NEA, *Nuclear Energy in a Sustainable Development Perspective*. Paris: OECD, 2000.  
NEA Issue Brief online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 9.5 IAEA, "Sustainable Energy Development". *IAEA Bulletin* Vol. 42, No. 2, 2000.
- 9.6 NEA, *Nuclear Power and Climate Change*. Paris: OECD, 1998.  
Online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 9.7 NEA, *Nuclear Energy and the Kyoto Protocol*. Paris: OECD, 2002.
- 9.8 NEA, *Broad Impact of Nuclear Power*. Paris: OECD, 1993.  
NEA Issue Brief online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 9.9 NEA, *Spin-off Technologies Developed Through Nuclear Activities*. Paris: OECD, 1993.
- 9.10 NEA, *Nuclear Education and Training: Cause for Concern?* Paris: OECD, 2000.  
NEA Issue Brief online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).

## Kapitel 10: Zukunft der Kernenergie

- 10.1 NEA, *Nuclear Production of Hydrogen*, First Information Exchange Meeting, Paris, France, 2-3 October 2000. Paris: OECD, 2001.
- 10.2 USDOE (U.S. Department of Energy), "Hydrogen Program". Grundlagen und weiterführende Informationen zu allen Aspekten der Produktion, der Speicherung und der Nutzung von Wasserstoff. Online verfügbar unter [www.eren.doe.gov/hydrogen](http://www.eren.doe.gov/hydrogen).
- 10.3 IAEA, *Hydrogen as an Energy Carrier and its Production by Nuclear Power*, IAEA TECDOC-1085. Vienna: IAEA, 1999.
- 10.4 IAEA, *Nuclear Heat Applications: Design Aspects and Operating Experience*, IAEA TECDOC-1056. Vienna: IAEA, 1998.
- 10.5 NEA, *Beneficial Uses and Production of Isotopes: 2000 Überarbeitung*. Paris: OECD, 2001.
- 10.6 NEA, *Small and Medium Reactors*. Paris: OECD, 1990.  
NEA Issue Brief online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 10.7 NEA, *Advanced Water Reactor Technology*. Paris: OECD, 1989.  
NEA Issue Brief online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).
- 10.8 IEA, *Innovative Nuclear Reactor Development: Opportunities for International Co-operation*. Paris: OECD/IEA, 2002.
- 10.9 Für Informationen zu amerikanischen Regierungsinitiativen zur Kernenergie, einschließlich des Programms der "4. Generation", Isotopenanwendungen in der Medizin und wissenschaftlichem Begleitprogrammen, siehe [www.nuclear.gov](http://www.nuclear.gov).
- 10.10 Die IAEA Abteilung für "Nuclear Power Technology Development" gibt Information zur Nutzung von Kernreaktoren einschliesslich Links zum INPRO Programm und zur Entsalzung. Siehe [www.iaea.org/programmes/ne/nenp/nptds/NPTDHome.htm](http://www.iaea.org/programmes/ne/nenp/nptds/NPTDHome.htm).
- 10.11 NEA, *Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation*, Sixth International Information Exchange Meeting, Madrid, Spain, 11-13 December 2000. Paris: OECD, 2001.  
NEA Issue Brief online verfügbar unter [www.nea.fr/html/pub/webpubs](http://www.nea.fr/html/pub/webpubs).

## Internet Quellen

Zusätzlich zu den obigen Informationsquellen sind auf den folgenden Webseiten weitere Informationen zur Kernenergie zu finden:

OECD Nuclear Energy Agency	<a href="http://www.nea.fr">www.nea.fr</a>
International Atomic Energy Agency (IAEA)	<a href="http://www.iaea.org/worldatom">www.iaea.org/worldatom</a>
International Commission on Radiological Protection	<a href="http://www.icrp.org">www.icrp.org</a>
Euratom Supply Agency	<a href="http://europa.eu.int/comm.euratom/index_en.html">http://europa.eu.int/comm.euratom/index_en.html</a>
International Nuclear Law Association	<a href="http://www.aidn-inla.be">www.aidn-inla.be</a>
Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organisation	<a href="http://www.ctbto.org">www.ctbto.org</a>
United Nations First Committee (Disarmament and International Security)	<a href="http://disarmament.un.org">http://disarmament.un.org</a>
United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation	<a href="http://www.unscear.org">www.unscear.org</a>
World Association of Nuclear Operators	<a href="http://www.wano.org.uk">www.wano.org.uk</a>
IAEA Glossary of Nuclear Safety Terms	<a href="http://www.iaea.or.at/ns/CoordiNet/documents/safetyglossary.pdf">www.iaea.or.at/ns/CoordiNet/documents/safetyglossary.pdf</a>

## Verzeichnis der Abbildungen

- |     |  |      |  |
|-----|--|------|--|
| 1.1 | Wachstum der Kernenergienutzung im Rückblick (1965-2002)   | 5.3  | Weltweite Quote von nicht geplanten automatischen Reaktorabschaltungen (Zahl pro 7 000 Stunden)  |
| 1.2 | Anteile der einzelnen Energieträger an der weltweiten Primärenergieversorgung, Stand 2003 (in Prozent)                     | 5.4  | Die internationale INES-Skala zur Bewertung nuklearer Ereignisse   |
| 1.3 | Weltstromerzeugung, aufgeschlüsselt nach Energieträgern, Stand 2003 (in Prozent)   | 6.1  | Durchdringungstiefe verschiedener Strahlungsarten  |
| 1.4 | Verfügbarkeit der Kernenergieanlagen weltweit (1990-2001)  | 6.2  | Typische Quellen der allgemeinen Strahlenexposition (in mSv pro Jahr)  |
| 2.1 | Eine typische Spaltreaktion  | 6.3  | Potenzielle biologische Folgen einer strahlenbedingten Zellschädigung  |
| 2.2 | Ausbeute an Spaltprodukten bei der thermischen Spaltung von $^{235}\text{U}$   | 6.4  | Deterministische Strahlenwirkungen bei hoher Dosis   |
| 2.3 | Basiskomponenten eines Kernkraftwerks mit Druckwasserreaktor   | 7.1  | Cashflow im Lebenszyklus eines Kernkraftwerks  |
| 2.4 | Reaktortypen im Einsatz weltweit (Stand 1. Januar 2003)  | 7.2  | Aufschlüsselung der typischen Kosten der nuklearen Stromerzeugung  |
| 2.5 | Schema eines Druckwasserreaktors (DWR)   | 7.3  | Aufschlüsselung repräsentativer Stromerzeugungskosten (bei einem Diskontsatz von 10%)  |
| 2.6 | Schema eines Siedewasserreaktors (SWR)   | 7.4  | Auswirkungen der $\text{CO}_2$ -Steuer auf die Durchschnittskosten der Stromerzeugung in verschiedenen Ländern (bei einem Diskontsatz von 10%) |
| 2.7 | Typische Fusionsreaktion   | 8.1  | Die einzelnen Elemente des Nichtverbreitungsregimes  |
| 2.8 | Vereinfachtes Diagramm eines Tokamak-Fusionsreaktors   | 9.1  | Prognostizierte Energienachfrage bis 2100  |
| 3.1 | Der nukleare Brennstoffkreislauf   | 9.2  | Auf die Kernenergie zutreffende Kriterien der nachhaltigen Entwicklung   |
| 3.2 | Zusammensetzung von abgebrannten Brennelementen vor und nach Wiederaufarbeitung  | 9.3  | Langjährige Preisschwankungen bei fossilen Brennstoffen  |
| 4.1 | Zerfall eines radioaktiven Elements mit einer Halbwertszeit von fünf Tagen   | 9.4  | Treibhausgasemissionen durch die Stromerzeugung aus verschiedenen Quellen  |
| 4.2 | Vergleich der Aufkommen von Industrieabfall und radioaktivem Abfall – jährliches Aufkommen in der Europäischen Union       | 9.5  | Gesamte Abfallproduktion je Energieträger  |
| 4.3 | Endlagerkonzept für Eurajoki, Finnland   | 9.6  | Vergleich der Gesundheitsrisiken verschiedener Energiesysteme  |
| 4.4 | Auslegungsmerkmale der technischen Barrieren für die geplante Endlagerstätte von Yucca Mountain in den Vereinigten Staaten | 10.1 | Erwartung der installierten Kernkraftwerkskapazität bis 2020 (unteres und oberes Szenario)   |
| 4.5 | Ein typischer Transportbehälter für hochradioaktive Abfälle  | 10.2 | Verschiedene Einsatzmöglichkeiten für Isotope aus Reaktoren  |
| 5.1 | Elemente der Reaktorsicherheit   |      |  |
| 5.2 | Typische Sicherheitsbarrieren zur Abschirmung radioaktiven Materials   |      |  |

## Verzeichnis der Tabellen

- 1.1 Betriebsbereite Reaktoren je Land (Stand 1. Januar 2006)
- 2.1 Wichtige Isotope, die durch Neutroneneinfang in einem Kernreaktor gebildet werden
- 2.2 Energiegehalt verschiedener Brennstoffe
- 3.1 Wichtige Uran-Konversionsanlagen weltweit
- 3.2 Wichtige Urananreicherungsanlagen weltweit
- 3.3 Kommerzielle Anlagen für die Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente weltweit
- 3.4 Ausgewählte Reaktoren, die derzeit stillgelegt werden oder bereits stillgelegt wurden
- 4.1 Ausgewählte Isotope in hochaktiven Abfällen
- 4.2 Ungefähre Mengen der in einem LWR von 1 000 MWe erzeugten radioaktiven Abfälle (m<sup>3</sup> pro Jahr)
- 4.3 Endlagerstandorte für schwach- und mittelaktive Abfälle in OECD-Mitgliedsländern
- 4.4 Beispiele für Untertagelabors
- 7.1 Stromerzeugungskosten bei einer Auslastung von 7 000 Stunden (in Euro-Cent von 1990/kWh)
- 7.2 Externe Kosten für die Stromerzeugung in der Europäischen Union (Euro-Cent/kWh)
- 8.1 Internationale Übereinkommen über Haftung und Schadensersatz sowie deren Geltungsbereich in den OECD-Mitgliedsländern
- 10.1 Auswirkungen technologischer Neuerungen auf die verfügbaren Ressourcen

## Bildnachweis

Umschlagseite, v.o.n.u.: SCK•CEN, Belgien. EDF, Frankreich (2). USDOE, Vereinigte Staaten. Gonin, CEA, Frankreich. Ringhals AB, Schweden. Seite 1, v.l.n.r.: Cameco, Kanada (2). Andra, Frankreich. TU Electric, Vereinigte Staaten. Posiva Oy, Finnland. Duke Power Company, Vereinigte Staaten. Cameco, Kanada. Seite 2, v.l.n.r.: Museum of Chicago, Vereinigte Staaten. Port Hope Facility, Kanada. NEI, Vereinigte Staaten. EDF-Eurodif S.A., Frankreich. Seite 3, v.l.n.r.: NEI, Vereinigte Staaten. JNFL, Japan. AEA Windscale, Vereinigtes Königreich. SKB, Schweden. Seite 4: Cofrentes NPP, Iberdrola S.A., Spanien. Seite 9: K. Niederau, KKB/NOK, Schweiz. Seite 10: The Nobel Foundation website. Seite 11: USDOE website, Vereinigte Staaten. Seite 13: Duke Power Company, Vereinigte Staaten. Seite 14: German Historical Museum website, Deutschland. Seite 23: KAERI, Republik Korea. Energy Resources of Australia Ltd., Australien. NEI, Vereinigte Staaten. Energy Resources of Australia Ltd., Australien. Port Hope Facility, Kanada. JNFL, Japan. EDF-Eurodif S.A., Frankreich. Cogema, Frankreich. GKN, Niederlande. Miklos Beregnyei, PAKS NPP, Ungarn. Chugoku Electric Power Co., Inc., Japan. EDF, Frankreich. Wisconsin Electric Power Company, Vereinigte Staaten. Cogema, Frankreich. Department of the Environment, Vereinigtes Königreich. Blind River Facility, Kanada. AEA Technology, Vereinigtes Königreich. Seite 24, v.o.n.u.: Cameco, Kanada. NEI, Vereinigte Staaten. Port Hope Facility, Kanada. Seite 25, v.o.n.u.: EDF-Eurodif S.A., Frankreich. JNFL, Japan. Seite 26, v.o.n.u.: NEI, Vereinigte Staaten. Posiva Oy, Finnland. TU Electric, Vereinigte Staaten. Wisconsin Electric Power Company, Vereinigte Staaten. Seite 28: AEA Windscale, Vereinigtes Königreich. Seite 30: SCK/CEN, Belgien. Seite 31: Posiva Oy, Finnland. Seite 34: Covra, Niederlande. UKAEA, Vereinigtes Königreich. Seite 39: NEI, Vereinigte Staaten. Seite 40: SKB, Schweden. Seite 43: Beznau NPP, Schweiz. Seite 47: CEA, Frankreich. Seite 53: Cameco, Kanada. Seite 60: EDF, Frankreich. Seite 65: Bohunice NPP, Slowakische Republik. Seite 69: Tokyo Electric Power Co., Japan. Seite 74: The National Assembly, Frankreich. Seite 81: Henri Cazin, EDF, Frankreich. Seite 89: General Electric Company, Vereinigte Staaten. Seite 92: USDOE, Vereinigte Staaten. Seite 95: Kurchatov Institute, Russland. Seite 96: Halden-Reaktor-Projekt, Norwegen. Seite 98: TVO, Finnland. Seite 115: USDOE, Vereinigte Staaten. Seite 121-122: Cofrentes NPP, Iberdrola S.A., Spanien.

# *Danksagung*

Das NEA Sekretariat ist John Remington dankbar für seinen wichtigen Beitrag als beratender Herausgeber dieser Veröffentlichung.

Die NEA Autoren dieser Veröffentlichung sind Claes Nordborg (Kap. 2), Hans Riotte (Kap. 4), Miroslav Hrehor (Kap. 5), Ted Lazo (Kap. 6), Stefan Mundigl (Kap. 6, Notfallschutzmaßnahmen), Peter Wilmer (Kap. 7), Julia Schwartz (Kap. 8, Internationales Atomrecht), Carol Kessler (Kap. 8, Nichtverbreitung), Jacques de la Ferté (Kaps. 4 und 9, Gesellschaftliche Aspekte), Robert Price als Autor (Kaps. 1, 3, 9 und 10) und geschäftsführender Herausgeber und Cynthia Picot als Herausgeberin.

Ein besonderer Dank gilt Annette Meunier für ihren Einsatz beim Entwurf und Layout dieser Veröffentlichung.



**OECD Nuclear Energy Agency**  
Le Seine Saint-Germain – 12, boulevard des Îles  
F-92130 Issy-les-Moulineaux, France  
Tel.: +33 (0)1 45 24 10 15 – Fax: +33 (0)1 45 24 11 10  
E-mail: [nea@nea.fr](mailto:nea@nea.fr) – Internet: [www.nea.fr](http://www.nea.fr)

## DIE ORGANISATION FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT UND ENTWICKLUNG (OECD)

Die OECD ist ein in seiner Art einzigartiges Forum, in dem die Regierungen von 30 demokratischen Staaten gemeinsam daran arbeiten, den globalisierungsbedingten Herausforderungen im Wirtschafts-, Sozial- und Umweltbereich zu begegnen. Die OECD steht auch in vorderster Linie bei den Bemühungen um ein besseres Verständnis der neuen Entwicklungen und der dadurch ausgelösten Befürchtungen. Sie hilft den Regierungen dabei, diesen neuen Gegebenheiten Rechnung zu tragen, indem sie Untersuchungen zu Themen wie Corporate Governance, Informationswirtschaft oder Probleme der Bevölkerungsalterung durchführt. Die Organisation bietet den Regierungen einen Rahmen, der es ihnen ermöglicht, ihre Politikerfahrungen auszutauschen, nach Lösungsansätzen für gemeinsame Probleme zu suchen, empfehlenswerte Praktiken aufzuzeigen und auf eine Koordinierung nationaler und internationaler Politiken hinzuarbeiten.

Die OECD-Mitgliedstaaten sind: Australien, Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Japan, Kanada, Korea, Luxemburg, Mexiko, Neuseeland, die Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, Schweiz, die Slowakische Republik, Spanien, die Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, das Vereinigte Königreich und die Vereinigten Staaten. Die Kommission der Europäischen Gemeinschaften nimmt an den Arbeiten der OECD teil.

Über die OECD-Veröffentlichungen finden die Arbeiten der Organisation weite Verbreitung. Letztere erstrecken sich insbesondere auf Erstellung und Analyse statistischer Daten und Untersuchungen über wirtschaftliche, gesellschaftliche und umweltpolitische Themen sowie die von den Mitgliedstaaten vereinbarten Übereinkommen, Leitlinien und Standards.

\* \* \*

*Das vorliegende Dokument wird unter der Verantwortung des Generalsekretärs der OECD veröffentlicht. Die darin zum Ausdruck gebrachten Meinungen und Argumente spiegeln nicht zwangsläufig die offizielle Einstellung der Organisation oder der Regierungen ihrer Mitgliedstaaten wider.*

### KERNENERGIE-AGENTUR

Die Kernenergie-Agentur (NEA) der OECD wurde am 1. Februar 1958 als Europäische Kernenergie-Agentur der OEEC gegründet und am 20. April 1972, als Japan ihr als erstes nichteuropäisches Vollmitglied beitrug, in ihre jetzige Bezeichnung umbenannt. Zu den NEA-Mitgliedern gehören heute 28 OECD-Mitgliedsländer: Australien, Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Japan, Kanada, Luxemburg, Mexiko, die Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Republik Korea, Schweden, Schweiz, die Slowakische Republik, Spanien, die Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, das Vereinigte Königreich und die Vereinigten Staaten. Die Kommission der Europäischen Gemeinschaften nimmt an den Arbeiten der Agentur teil.

Die Aufgabe der NEA ist es

- ihre Mitgliedsländer im Wege der internationalen Zusammenarbeit bei der Wahrung und Weiterentwicklung der für eine sichere, umweltverträgliche und wirtschaftliche Nutzung der Kernenergie zu friedlichen Zwecken erforderlichen wissenschaftlichen, technologischen und rechtlichen Grundlagen zu unterstützen sowie
- maßgebliche Evaluierungen zu liefern und eine Annäherung der Positionen zu wichtigen Fragen herbeizuführen und so einen Beitrag zu staatlichen Entscheidungen über die Kernenergiepolitik sowie zu weiter gehenden OECD-Analysen in Bereichen wie Energie und nachhaltige Entwicklung zu leisten.

Zu den spezifischen Kompetenzbereichen der NEA gehören die Sicherheit von Kernanlagen und Fragen ihrer Überwachung, die Entsorgung radioaktiver Abfälle, der Strahlenschutz, Kernwissenschaft, wirtschaftliche und technische Analysen des Kernbrennstoffzyklus, Kernenergie recht und Haftung im Kernenergiebereich sowie die Information der Öffentlichkeit. Die Datenbank der NEA bietet den teilnehmenden Ländern Zugang zu Dienstleistungen in Zusammenhang mit Kernenergie Daten und Computerprogrammen.

Bei diesen und hiermit zusammenhängenden Aufgaben arbeitet die NEA eng mit der Internationalen Atomenergie-Organisation in Wien zusammen, mit der sie ein Kooperationsabkommen unterzeichnet hat, sowie mit anderen im Kernenergiebereich tätigen internationalen Organisationen.

Originalfassungen veröffentlicht unter dem Titel:

#### **Nuclear Energy Today – L'énergie nucléaire aujourd'hui**

OECD PUBLICATIONS, 2 rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16

OECD No. 66 2003 11 5 P

ISBN 92-64-02653-3

© OECD 2006

Nachdruck, Kopie, Übertragung oder Übersetzung dieser Veröffentlichung nur mit schriftlicher Genehmigung. Diesbezügliche Anträge sind zu richten an: OECD Publishing: [rights@oecd.org](mailto:rights@oecd.org) oder per Fax (+33-1) 45 24 13 91. Die Genehmigung zur Kopie von Teilen dieses Werks ist einzuholen beim Centre Français d'exploitation du droit de Copie, 20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, Frankreich ([contact@cfcopies.com](mailto:contact@cfcopies.com)).