

D. E. Becker, J. Hutter, H. Klonk, Ch. Krause, F. Philippczyk, M. Reiner

Die Kernenergie in Deutschland

Einführung

Die Geschichte der Stromproduktion durch Kernkraftwerke begann in der Bundesrepublik Deutschland 1961 mit dem Bau des Versuchs-Atomkraftwerks in Kahl (VAK) am Main. Durch die Ölkrise 1972 wurde der Ausbau der Kernenergie auch in Deutschland stark vorangetrieben. Zwischenzeitlich produzierten insgesamt 30 Reaktoren in den alten Ländern und 5 Reaktoren in der ehemaligen DDR elektrische Energie. Das letzte Kernkraftwerk, das in Deutschland gebaut wurde und an das Netz ging, war die Konvoi-Anlage Neckarwestheim 2 (GKN 2) im Jahre 1989. Der Anteil an der Stromproduktion mit derzeit 19 Reaktoren liegt bei etwa 34 %. Aus wirtschaftlichen Gründen wurden mittlerweile schon einige der ersten deutschen Kernkraftwerke abgeschaltet und befinden sich derzeit in der Phase der Stilllegung. Alle Kernkraftwerke auf dem Gebiet der ehemaligen DDR sind aus wirtschaftlichen oder sicherheitstechnischen Gründen abgeschaltet und in der Stilllegung.

Im Rahmen der Energie-Konsens-Gespräche wird in Deutschland darüber beraten, welchen Stellenwert die Stromproduktion durch Kernenergie zukünftig einnehmen bzw. ob der Ausstieg vollzogen werden soll. Bei diesen Diskussionen spielt eine wichtige Rolle die Bewertung des Risikos, sei es durch einen Unfall mit Freisetzung radioaktiver Stoffe von im Betrieb befindlichen Kernkraftwerken oder auch bei der Endlagerung der abgebrannten Kernbrennstoffe.

Spätere Generationen können dann darüber resümieren, welche der heutigen Argumente

- Marktanteile durch preiswerte Energie
- Sicherheitsgewinn durch Abschalten der Kernkraftwerke
- Saubere Umwelt ohne CO₂-Ausstoß
- Restrisiko bei der Endlagerung

zur richtigen Entscheidung in Verbindung mit Kernenergieausstieg oder -ausbau hätten führen müssen.

Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse und Überlegungen der letzten Jahre in den Bereichen Verbesserung der Sicherheit, Strategien bei der Uran-Nutzung, Stilllegungsaspekte und Entsorgungsprobleme behandelt.

Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland

In der Bundesrepublik Deutschland sind gegenwärtig:

- 19 Kernkraftwerksblöcke mit insgesamt 22194 MWe brutto in Betrieb, davon 6 Kernkraftwerksblöcke mit Siedewasserreaktor (SWR) und 13 Kernkraftwerksblöcke mit Druckwasserreaktor (DWR),
- 1 Kernkraftwerksblock (DWR) mit 1302 MWe brutto infolge Gerichtsbeschuß auf unbestimmte Zeit abgeschaltet,
- 15 Kernkraftwerksblöcke mit insgesamt 3900 MWe (brutto) endgültig abgeschaltet, d.h. die Stilllegung ist begonnen, beantragt oder geplant,

Die Standorte der Kernkraftwerke zeigt die Abbildung 1. Die Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke mit Datum der Erstkritikalität sowie Höhe der elektrischen Leistung. 1996 betrug die Elektroenergieerzeugung aus den Kernkraftwerken 161702 GWh (1995: 154144 GWh). Das ist eine Steigerung im Vergleich zu 1995 von ca. 4,9 %. Dies ist im wesentlichen auf die Wiederaufnahme des Leistungsbetriebes der Anlagen Krümmel (KKK) und Brunsbüttel (KKB) sowie der Anlage Biblis A (KWB-A) nach längerem Stillstand zurückzuführen .

Der Anteil der Kernkraftwerke an der Gesamt-Brutto-Stromerzeugung der öffentlichen Elektrizitätsversorgung betrug 1996 ca. 34 %, also vergleichbar zum Wert von 1995.

1996 betrug der Anteil der Kernenergie am Primärenergieverbrauch ca. 12,1 % basierend auf einer ersten Schätzung zum Jahresende 1996. Die 1996 in der Bundesrepublik betriebenen Kernkraftwerksblöcke wiesen wie im Vorjahr eine hohe Verfügbarkeit und Ausnutzung auf:

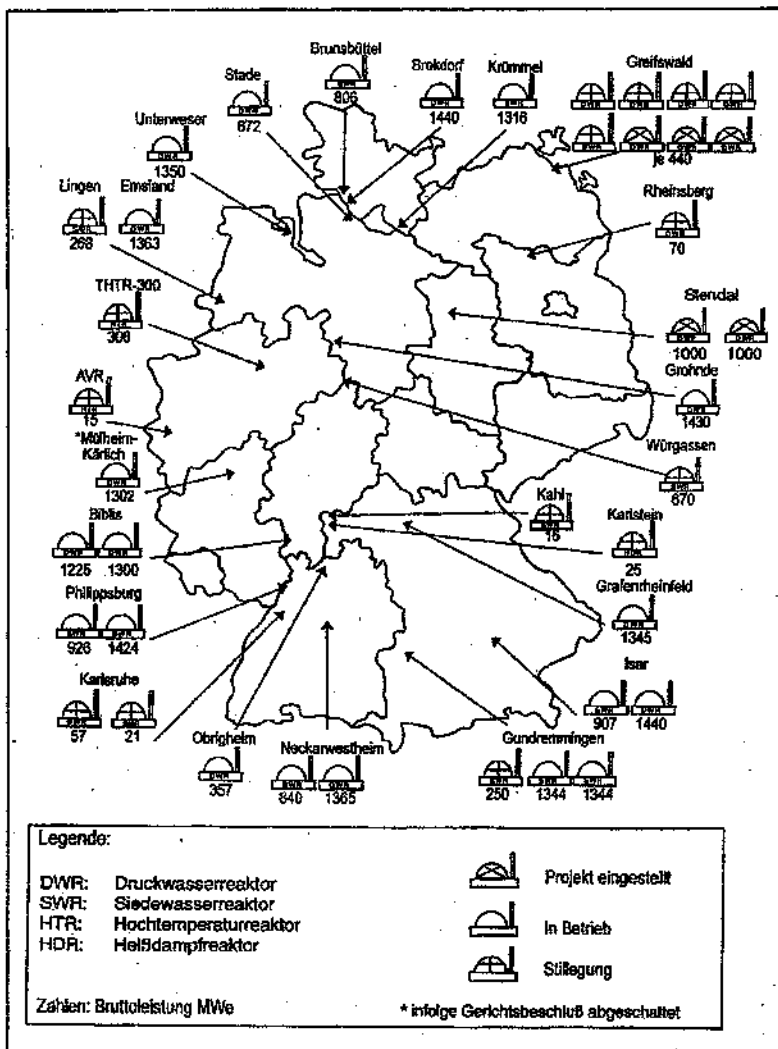


Abb. 1: Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland
Stand 16.05.1997

Tabelle 1: Durchschnittliche Verfügbarkeiten der Kernkraftwerke in 1996, nach Baulinien zusammengefaßt:

Reaktor- Typ	Baulinie	Zeitverfüg- barkeit %	Arbeits- verfügbarkeit %	Arbeits- ausnutzung %
DWR	Konvoi KKI 2, KKE, GKN 2	93,4	93,2	91,6
	Vorkonvoi KWB B, K KU, KKG, KWG, KKP 2, KBR	83,0	83,4	81,1
	ältere Anlagen KWO, KKS, KWB A ¹⁾ , GKN 1	90,0	87,1	82,3
SWR	Baureihe 72 KRB B, KRB C	91,4	90,1	83,6
	Baureihe 69 KKI 1, KKP 1, KKB, KKK	88,5	85,9	79,1

¹⁾ Stillstand der Anlage KWB A vom 21.04.1995 bis 08.08.1996

Quelle: VGB

Bei den Kernkraftwerken Unterweser (KKU), Philippsburg 1 (KKP 1), Philippsburg 2 (KKP 2) und Isar 2 (KKI 2) wurden 1996 Leistungserhöhungen vorgenommen. Für Brokdorf (KBR) ist eine Leistungserhöhung beantragt.

Die Abgaben radioaktiver Stoffe aus den Kernkraftwerken mit Fortluft und Abwasser lagen auch 1996 weit unter den genehmigten Grenzwerten.

Durch den Betrieb der Kernkraftwerke wurde in 1996 die Abgabe von ca. 150 Mill. t Kohlendioxid vermieden. Das entspricht ca. 15 % der Gesamtemissionen der Bundesrepublik Deutschland.

Tabelle 2: Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland in Betrieb

Kernkraftwerk	Standort	Elektrische Bruttoleistung in Mwe	Erst- kritikalität
Kernkraftwerk Isar 1 (KKI 1)	Essenbach bei Landshut, Bayern	907	20.11.1977
Kernkraftwerk Isar 2 (KKI 2)	Essenbach bei Landshut, Bayern	1440	15.01.1988
Kernkraftwerk Unterweser (KKU)	Esenshamm bei Bremerhaven, Niedersachsen	1350	16.09.1978
Kernkraftwerk Philippsburg Block 1 (KKP 1)	Philippsburg bei Speyer, Baden Württemberg	926	09.03.1979
Kernkraftwerk Philippsburg Block 2 (KKP 2)	Philippsburg bei Speyer, Baden Württemberg	1424	13.12.1984
Kernkraftwerk Grafenrheinfeld bei (KKG)	Grafenrheinfeld bei Schweinfurt, Bayern	1345	09.12.1981
Kernkraftwerk Krümmel (KKK)	Krümmel bei Geesthacht, Schleswig-Holstein	1316	14.09.1983
Kernkraftwerk Gundremmingen, Block B (KRB-B)	Gundremmingen bei Günzburg, Bayern	1344	09.03.1984
Kernkraftwerk Gundremmingen, Block C (KRB-C)	Gundremmingen bei Günzburg, Bayern	1344	26.10.1984
Kernkraftwerk Grohnde (KWG)	Grohnde bei Hameln, Niedersachsen	1430	01.09.1984
Kernkraftwerk Brokdorf (KBR)	Brokdorf bei Glückstadt, Schleswig-Holstein	1440	08.10.1986

Fortsetzung von Tabelle 2

Kernkraftwerk Emsland (KKE)	Darne bei Lingen, Niedersachsen	1363	14.04.1988
Kernkraftwerk Obrigheim (KWO)	Obrigheim bei Heilbronn, Baden-Württemberg	357	22.09.1968
Kernkraftwerk Stade (KKS)	Stade, Niedersachsen	672	08.01.1972
Kernkraftwerk Biblis Block A (KWB-A)	Bibilis bei Worms, Hessen	1225	16.07.1974
Kernkraftwerk Biblis Block B (KWB-B)	Bibilis bei Worms, Hessen	1300	25.03.1976
Kernkraftwerk Neckarwestheim Block 1 (GKN 1)	Neckarwestheim bei Lauffen, Neckar, Baden-Württemberg	840	26.05.1976
Kernkraftwerk Neckarwestheim Block 2 (GKN 2)	Neckarwestheim bei Lauffen, Neckar, Baden-Württemberg	1365	29.12.1988
Kernkraftwerk Brunsbüttel (KKB)	Brunsbüttel, Schleswig-Holstein	806	23.06.1976

Anlagen des Brennstoffkreislaufs und der Entsorgung

Eine Übersichtskarte über die Anlagen des Brennstoffkreislaufs einschließlich der Entsorgungsanlagen in der Bundesrepublik Deutschland zeigt die Abbildung 2.

Uranerzbergbau und -aufbereitung

Uranerzbergbau wurde vor allem in den Bundesländern Sachsen und Thüringen in den Gebieten um Aue, Königstein, Ronneburg und Schneeberg

betrieben. Die Erzaufbereitung erfolgte hauptsächlich in Crossen und Seelingstädt. Förderung und Aufbereitung wurden durch die SDAG Wismut betrieben, eine ehemals sowjetisch-deutsche Aktiengesellschaft, die 1991 ihre Tätigkeit einstellte. Zur Zeit werden die ehemals Uran produzierenden Betriebe stillgelegt und verwahrt. Somit wird in Deutschland keine Urangewinnung mehr durchgeführt.

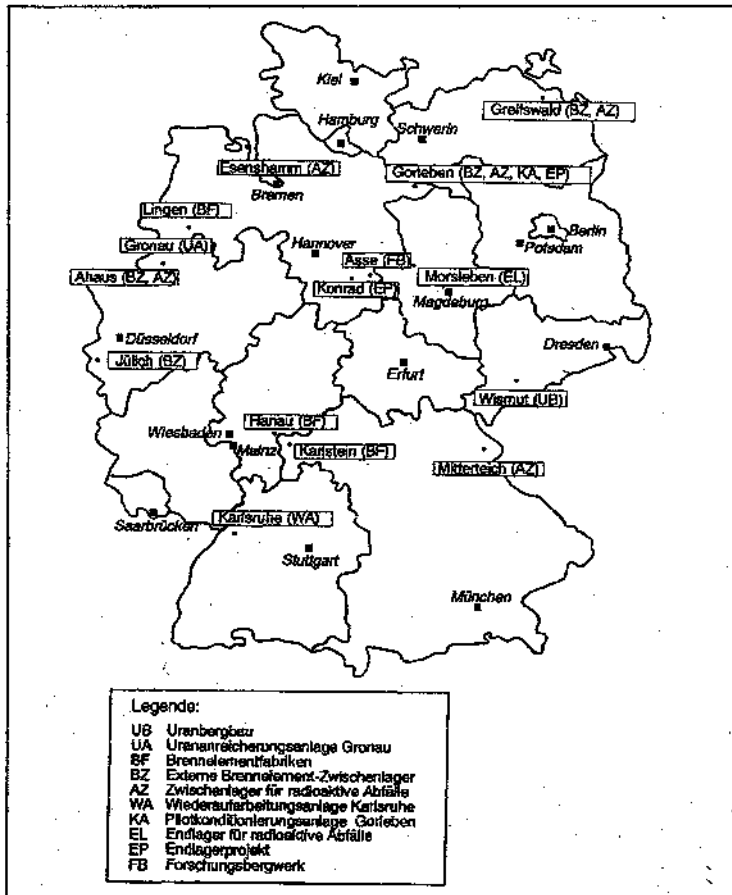


Abb. 2: Anlagen des Brennstoffkreislaufs und der Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland
Stand 16.05.1997

Urananreicherungsanlagen

In der Urananreicherungsanlage Gronau wird natürliches Uran bis zu einer maximalen Konzentration des spaltbaren Isotops U-235 von 5 Gew.-% in Zentrifugenkaskaden angereichert.

Brennelementfabriken

In der Bundesrepublik Deutschland ist eine Brennelementfabrik - Firma ANF in Lingen - in Betrieb. Die Anlage dient der Herstellung von Uran-Brennelementen mit einem maximalen Anteil von 5 Gew.-% U-235 zum überwiegenden Einsatz in Leichtwasserreaktoren.

Mehrere Brennelementfabriken sind zur Zeit außer Betrieb und werden stillgelegt. Seit der Einstellung des Betriebes der Siemens-MOX-Anlage im Jahre 1991 wird in Deutschland kein MOX-Brennstoff^{*} mehr hergestellt. MOX-Brennelemente werden für deutsche Betreiber im Ausland - hauptsächlich in Belgien und Frankreich - gefertigt.

Zwischenlagerung von abgebrannten Brennelementen

Die in den alten Bundesländern der Bundesrepublik Deutschland zur Zeit in Betrieb befindlichen Leichtwasserreaktoren haben eine genehmigte Lagerkapazität in ihren jeweiligen Brennelement-Lagerbecken von insgesamt ca. 6.500 t Schwermetall. Da in den Lagerbecken jeweils die Aufnahmekapazität einer Kern-Ladung freigehalten werden muß, verringert sich die vorgenannte Summe um ca. 2.100 t auf 4.400 t Zwischenlagerkapazität. Zusätzlich ist eine Lagerkapazität von 460 t beantragt. Die mittlere jährliche Entlademenge beträgt ca. 500 t.

Auf dem Betriebsgelände des Kernkraftwerkes Greifswald besteht ein Naßlager für abgebrannten Brennstoff (ZAB) aus den Kernkraftwerken Greifswald und Rheinsberg mit einer genehmigten Lagerkapazität von 4.680 Brennelementen bzw. ca. 560 t Schwermetall. Diese Brennstoffkassetten sollen zukünftig in einem am Standort in Bau befindlichen Zwischenlager trocken in CASTOR-Behältern aufbewahrt werden.

Außerhalb von Kernkraftwerksstandorten werden in der Bundesrepublik Deutschland 3 Trockenlager für abgebrannte Brennelemente aus Kern-

* Mischoxid-Brennstoff, der Plutonium aus der Wiederaufarbeitung enthält

kraftwerken betrieben, an den Standorten Ahaus, Gorleben und Jülich. Die abgebrannten Brennelemente werden in Transport- und Lagerbehältern vom Typ CASTOR aufbewahrt. Es liegen Genehmigungen nach § 6 AtG für eine Kapazität von 1.500 t Schwermetall in Ahaus, 3.800 t Schwermetall in Gorleben und 300.000 AVR-Brennelementen in Jülich vor. Eine Kapazitätserhöhung für Ahaus ist beantragt.

Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen

Die Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung aus dem KKW-Betrieb erfolgt in den alten Bundesländern derzeit auf dem Gelände der Kernkraftwerke, in dem externen Zwischenlager für radioaktive Abfälle in Gorleben (Faßlager), der Sammelstelle der bayerischen EVU Mitterteich und dem Abfallager Esenshamm.

Die Errichtung eines Zwischenlagers Nord (ZLN) auf dem Gelände des KKW Greifswald zur Lagerung von Betriebs- und Stilllegungsabfällen der KKW Greifswald und Rheinsberg mit Zwischenlagerung der abgebauten Großkomponenten und Zerlegung und Konditionierung der Stilllegungsabfälle ist geplant. Die Kapazität soll 200.000 m³ in Form von Gebindevolumina betragen.

Wiederaufarbeitung

Die bestrahlten Brennelemente aus deutschen Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren werden derzeit in der Europäischen Gemeinschaft wiederaufgearbeitet. So bestehen seit den 70er Jahren Wiederaufarbeitungsverträge mit COGEMA (Frankreich) und BNFL (Großbritannien).

Für die abgebrannten Brennelemente aus den Kernkraftwerken der Bundesländer Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern bestanden Rücklieferverpflichtungen zur Wiederaufarbeitung in der UdSSR, die allerdings nach der Auflösung der UdSSR nicht mehr in Anspruch genommen werden konnten.

Pilot-Konditionierungsanlage Gorleben (PKA)

Um die großtechnische Machbarkeit und die atomrechtliche Genehmigungsfähigkeit der gesicherten Endlagerung abgebrannter Brennelemente nachzuweisen, wird am Standort Gorleben (Niedersachsen) eine Pilot-Konditionierungsanlage (PKA) für abgebrannte Brennelemente und radioaktive Abfälle errichtet. Die Anlage soll eine Kapazität von 35 t Schwermetall pro Jahr haben.

Endlager für radioaktive Abfälle / geplante Endlager (Projekte)

Zur Entsorgung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle mit einer überwiegend kurzen Halbwertszeit wurde in der ehemaligen DDR ein Salzbergwerk, die Schachanlage "Bartensleben" am Rande der Gemeinde Morsleben, als zentrales Endlager ausgebaut. Nach einer Versuchsphase (ab 1971) nahm das Endlager 1981 den Betrieb auf und erhielt 1986 eine Dauerbetriebsgenehmigung. Im Rahmen des bisherigen Betriebes sind etwa 14.000 m³ radioaktiver Abfälle und ca. 6.500 Stück Strahlenquellen mit einer Gesamtaktivität von ca. 480 TBq (vornehmlich Beta/Gamma-Strahler) in einer Tiefe von ca. 500 m endgelagert worden. Insgesamt sollen im Betriebszeitraum bis zum 30.06.2000 gemäß Dauerbetriebsgenehmigung ca. 40.000 m³ schwach- und mittelradioaktive Abfälle zur Endlagerung im ERAM angeliefert werden.

Im Salzstock Gorleben ist die Einrichtung eines Endlagers für alle Arten radioaktiver Abfälle (einschließlich hochaktiver Abfälle) geplant. Zur Zeit wird die Eignung des Salzstockes als Endlager durch die Errichtung eines Erkundungsbergwerkes geprüft. Die untertägigen Untersuchungen, mit deren Hilfe ein Bild vom Innenbau des Salzstockes gewonnen werden soll, werden nach derzeitiger Terminplanung nicht vor dem Jahr 2003 beendet sein. Einen positiven Planfeststellungsbeschuß vorausgesetzt, könnte die Inbetriebnahme als Endlager etwa im Jahre 2012 erfolgen.

Die ehemalige Eisenerzgrube Konrad in Salzgitter ist für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, das sind etwa 95 Vol% der insgesamt anfallenden radioaktiven Abfälle, vorgesehen. Von 1977 bis 1982 wurde die grundsätzliche Eignung der Grube in einer eingehenden Untersuchung festgestellt. Der Antrag auf Einleitung eines Planfeststellungsverfahrens nach § 9 AtG bei der Niedersächsischen Landesregierung zur Umrüstung und Nutzung als Endlager wurde 1982

gestellt. Mit einem Planfeststellungsbeschluß wird 1997 gerechnet. Eine Inbetriebnahme des Endlagers wäre dann im Jahr 2001 möglich.

Kernkraftwerke 1996 weltweit

Ende 1996 waren 443 Kernkraftwerksblöcke weltweit in Betrieb. Sie erzeugten ca. 2388 TWh elektrische Leistung. Es dominieren die Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren (Druck- oder Siedewassereaktoren) mit einem Anteil von ca. 80 % (siehe Tabelle 3). Im Vergleich mit der Bundesrepublik Deutschland, in der seit 1989 kein Leistungsreaktor mehr in Betrieb genommen, in Bau oder geplant war, sind derzeit (Stand: 01.02.1997) weltweit 36 Anlagen in Bau oder in Auftrag gegeben, überwiegend in den Ländern China, Frankreich, Indien, Japan, Süd-Korea und Rußland.

Dabei handelt es sich nicht nur um Leichtwasserreaktoren, sondern auch um Reaktoren der Typen CANDU (Druckröhrenreaktor kanadischer Bauart u.a. im Bau oder bestellt in China, Indien, Rumänien, Südkorea) sowie WWER (russischer DWR-Typ u.a. in Bau oder bestellt in Bulgarien, Ukraine). Reaktoren vom Typ Schneller Brüter (3 Anlagen) und weitere Reaktortypen (u.a. RBMK-Reaktoren russischer Bauart oder AGR-Reaktoren) spielen eine kommerziell untergeordnete Rolle.

In 1996 wurden 8 neue Reaktoren in Betrieb oder Probetrieb genommen, davon einer in Frankreich, zwei in Japan, einer in Rumänien, zwei in Süd-Korea, einer in der Ukraine sowie eine Anlage in den Vereinigten Staaten von Amerika. Dabei handelte es sich ausschließlich um DWR-, SWR- oder CANDU-Anlagen.

Zwei Anlagen wurden 1996 außer Betrieb genommen (Connecticut Yankee in den USA und Tschernobyl 1 in der Ukraine).

Die Tabelle 3 zeigt eine Statistik, in der die Kernkraftwerksblöcke nach Reaktortypen aufgeschlüsselt sind; Tabelle 4 zeigt Kernkraftwerksanlagen in den Nachbarländern der Bundesrepublik Deutschland.

Tabelle 3: Kernkraftwerksblöcke in der Welt nach Reaktortypen aufgeschlüsselt, Stand: 01.02.1997.

Reaktortyp ¹⁾	In Betrieb		In Bau		Gesamt	
	Anzahl	MWe	Anzahl	MWe	Anzahl	MWe
DWR (mit WWER)	249	231815	39	37921	288	269736
SWR	95	83271	2	2075	97	85346
CANDU	34	20518	7	3040	41	23558
LWGR (RBMK und GLWR)	18	15048	1	1000	19	16048
SNR	4	2242	3	1880	7	4122
AGR, Sonstige	31 (37)	14518	1	745	32 (38)	15263
Summe	431 (437)	367412	53	46661	484 (490)	414073
LWR (DWR-SWR)	344	315068	41	39996	385	355082

Quelle: atw 03/97

¹⁾ Abkürzungen:

AGR: Fortgeschrittener gasgekühlter Reaktor (Advanced Gas-cooled Reactor)

CANDU: Schwerwasser-(D₂O)-Natururan-Druckröhrenreaktor kanadischer Bauart

DWR: Druckwasserreaktor

GGR: Gas-Graphit-Reaktor

GLWR: Vorläufer des LWGR

LWGR: Mit Graphit moderierter und mit Leichtwasser gekühlter Reaktor (RBMK)

SNR: Schneller Natriumbrüter

SWR: Siedewasserreaktor

WWER: Russischer DWR-Typ

Die Tabelle 4 zeigt den Stand der Kernreaktoren in den an die Bundesrepublik angrenzenden Ländern.

Tabelle 4: Kernkraftwerke 1996 in Betrieb in den Nachbarländern der Bundesrepublik Deutschland.

Land	Anzahl	Typen	Elektrische Leistung brutto in MW _e
Niederlande	1	DWR	480
Belgien	7	nur DWR	5807
Luxemburg	keine	-	-
Frankreich	56	nur DWR	61130
Schweiz	5	DWR, SWR	3229
Österreich	keine	-	-
Tschechische Republik	4	nur DWR	1782
Polen	keine	-	-
Dänemark	keine	-	-
Zum Vergleich USA	108	DWR, SWR	105356
Zum Vergleich Rußland	29	WWER, LWGR, GLWR, SNR	21242

Im Herbst 1996 wurde der Vertrag über die Nukleare Sicherheitskonvention von allen maßgebenden Ländern unterzeichnet. Die Mitgliedsstaaten verpflichten sich damit, im dreijährigen Turnus einen Bericht zum sicherheitsrelevanten Stand ihrer Kernkraftwerke zu erstellen und den Vertragspartnern vorzulegen. Dies ist als ein weltweites Instrumentarium anzusehen, den Sicherheitsstand der Kerntechnik international anzupassen und zu verbessern.

Nachrüstungen im Bereich des anlageninternen Notfallschutzes

Im Atomgesetz ist für die Auslegung der Kernkraftwerke die erforderliche Vorsorge gegen Schäden nach dem Stand von Wissenschaft und Technik gefordert. Dies wird durch die zuständige Genehmigungsbehörde in Zusammenarbeit mit zugezogenen Gutachtern vor Erteilung der Betriebsge-

nehmung sorgfältig geprüft. Die Anforderungen an die Auslegung deutscher Kernkraftwerke wurden mit der Änderung des Atomgesetzes im Jahre 1994 so geändert, daß bei einem Unfall keine gravierenden Auswirkungen auf die unmittelbare Umgebung auftreten dürfen. Dies bedeutet, daß eine Evakuierung der Bevölkerung nicht erforderlich sein darf.

Die Auswertungen von weltweit aufgetretenen Störfällen und Vorkommnissen sowie Betriebserfahrungen führte darüber hinaus zu Empfehlungen von nachträglichen Änderungen zur Erhöhung der Kerntechnischen Sicherheit. Im Spannungsfeld zwischen Bestandsschutz der Genehmigung und dem fortschreitenden Erkenntnisstand von Wissenschaft und Technik ist es Aufgabe der zuständigen Aufsichtsbehörden, auf weitere sicherheitstechnische Verbesserungen in den im Betrieb befindlichen Anlagen hinzuwirken.

Durch den Bundesumweltminister wurden deshalb die nachfolgenden Maßnahmen im Bereich des anlageninternen Notfallschutzes im Jahr 1988 empfohlen und mittlerweile auch weitgehend in den Kernkraftwerken der Bundesrepublik Deutschland umgesetzt:

- Erarbeitung von Notfallhandbüchern für Maßnahmen des kraftwerksinternen Notfallschutzes
- Sicherung der externen Energieversorgung nach Ausfall innerhalb von zwei Stunden
- Sekundär- und primärseitige Druckentlastung der Kühlkreisläufe beim Druckwasserreaktor zur Vermeidung von Kernschäden
- Diversitäre Druckentlastungsmöglichkeiten beim Siedewasserreaktor zur Verhinderung von Schäden am Kern und Reaktordruckbehälter
- Verhinderung von explosiven Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen durch z.B. Inertisierung oder gezielter Verbrennung des bei Kernschädigung auftretenden Wasserstoffes
- Gefilterte Druckentlastungsmöglichkeit des Reaktorsicherheitsbehälters bei einem Störfall mit Druckaufbau
- Ausstattung der Warte und Notwarte für Daueraufenthalt bei einem Unfall innerhalb oder außerhalb der Anlage
- Probenahmesysteme für Wasserstoff und radioaktive Stoffe bei Auslegungsstörfällen und auslegungsüberschreitenden Ereignissen

Die Umsetzung obiger Empfehlungen bedeutet, daß über das bestehende Sicherheitsniveau der Anlagen hinaus im auslegungsüberschreitenden Bereich eventuelle Unfälle noch unwahrscheinlicher werden bzw. eventuelle Auswirkungen auf Mensch und Umwelt noch begrenzter sein werden. Die durchgeführten Nachrüstungen erfolgten auf Eigeninitiative der Betreiber der Kernkraftwerke. Die in diesem Rahmen vorgenommenen Änderungen an sicherheitstechnisch bedeutsamen Anlagenteilen sind aber wegen der Prüfung möglicher eventueller Rückwirkungen auf den genehmigten Betriebszustand genehmigungspflichtig.

Die Auswertung weltweit aufgetretener Ereignisse hat aber auch gezeigt, daß bei vielen Stör- und Unfällen nicht nur technisches Versagen die Ursache war, sondern auch eine menschliche Komponente mit im Spiel war. Deshalb wurden im Bereich der Wechselwirkung Mensch-Maschine erhebliche Verbesserungen vorgenommen. Dies beinhaltet Aspekte wie intensivere Ausbildung, Verbesserung ergonomische Gesichtspunkte, klarere Arbeitsabläufe usw. Diese Aspekte werden unter dem Schlagwort „Human Factor“ in der Literatur behandelt.

Die Störfallmeldestelle des Bundesamtes für Strahlenschutz

Seit dem 1. Januar 1993 werden die in die Zuständigkeit des BfS fallenden Aufgaben im Zusammenhang mit der Erfassung von meldepflichtigen Ereignissen in kerntechnischen Einrichtungen durch die Störfallmeldestelle des Amtes wahrgenommen. Die Störfallmeldestelle hat die Aufgabe, alle Ereignisse, die in kerntechnischen Einrichtungen (insbesondere in Kernkraftwerken) auftreten, zu erfassen, zu dokumentieren und für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit auszuwerten. Die Meldung dieser Ereignisse erfolgt nach den in der Atomrechtlichen Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung festgelegten Kriterien. Das BfS unterstützt damit einerseits das Bundesumweltministerium in dessen Aufgabe, die Öffentlichkeit über solche Ereignisse zu unterrichten und trägt andererseits durch systematische Auswertung und Weiterverbreitung der Erfahrungen aus meldepflichtigen Ereignissen im In- und Ausland dazu bei, daß Störungen im Betriebsablauf in kerntechnischen Einrichtungen bereits im Vorfeld vermieden werden können.

Kernkraftwerke und andere kerntechnische Anlagen sind komplexe, aus vielen Einzelkomponenten zusammengesetzte technische Systeme. Fehlfunktionen oder Versagen einzelner Komponenten sind bei solchen Anla-

gen nicht gänzlich auszuschließen. Die Aufdeckung ihrer Ursachen (die technischer oder menschlicher Natur sein können) und damit auch die Beseitigung bisher nicht entdeckter Schwachstellen ist Aufgabe der systematischen und tiefgehenden Störungsauswertung. Auf diesem Gebiet unterstützen verschiedene Sachverständigengremien und Fachinstitutionen, darunter auch das Bundesamt für Strahlenschutz, das Bundesumweltministerium bei dessen Zweckmäßigkeitssaufsicht über die atomrechtlichen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden. Insbesondere für die Berichterstattung und systematische Auswertung werden die meldepflichtigen Ereignisse in Datenbanken erfaßt, deren Betrieb und Pflege der Störfallmeldestelle des Bundesamtes für Strahlenschutz obliegt.

Weiterhin wird die Überprüfung der Störungen und Störfälle nach den von der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) in Wien herausgegebenen Kriterien für die Einstufung von Ereignissen in Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren durchgeführt, um eine objektive, international vergleichbare und für Zwecke der Öffentlichkeitsarbeit aussagekräftige Information zu gewährleisten. Diese internationale Bewertungsskala (INES) umfaßt sieben Stufen (siehe Abbildung 3). Die Bedeutung der einzelnen Stufen wird jeweils durch eine Zahl und eine Kurzbezeichnung gekennzeichnet. Meldepflichtige Ereignisse ohne sicherheitstechnische Bedeutung im Sinne der internationalen Skala werden als „unterhalb der Skala“ bzw. „Stufe 0“ bezeichnet. Dadurch ergibt sich insgesamt eine achtstufige Skala. Die Bewertungsskala untergliedert sich in zwei größere Bereiche. Die unteren Stufen 0 bis 3 umfassen Störungen und Störfälle, die oberen Stufen 4 bis 7 umfassen Unfälle.

Die Skala dient insbesondere zur Information der Öffentlichkeit und soll dazu beitragen, daß die Auswirkungen von Ereignissen in kerntechnischen Einrichtungen von der Bevölkerung eingeschätzt werden können.

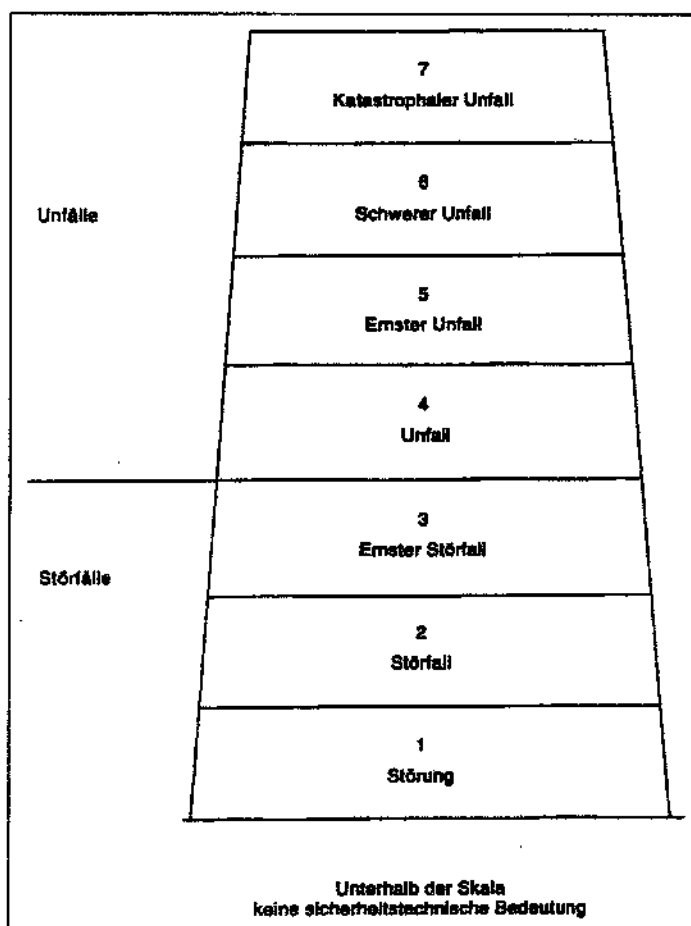


Abb. 3: Internationale Bewertungsskala für bedeutsame Ereignisse in kerntechnischen Einrichtungen

In der Bundesrepublik Deutschland sind im Jahre 1996 137 meldepflichtige Ereignisse aufgetreten, von denen 131 der INES-Stufe 0 (keine sicherheitstechnische Bedeutung) und 6 der INES-Stufe 1 (Störung) zugeordnet wurden. Abgaben radioaktiver Stoffe oberhalb genehmigter Grenzwerte traten 1996 nicht auf. Eine Gefährdung von Personen und der Umgebung war in keinem Fall gegeben.

Bei der Planung und Konstruktion von Anlagen in der Kerntechnik werden detaillierte Überlegungen in die Vermeidung und Bekämpfung von Störungen und Störfällen angestellt und daraus resultierend geeignete Maßnahmen realisiert. Die kerntechnischen Anlagen der Bundesrepublik Deutschland zählen weltweit zu den sichersten Industrieanlagen überhaupt, sowohl für das dort arbeitende Personal als auch für die Menschen in deren Umgebung. Redundanz (Mehrfachauslegung), Diversität, räumliche Trennung der Sicherheitseinrichtungen sowie gestaffelte Sicherheitsbarrieren sind selbstverständliche Prinzipien in der Kerntechnik. Die im nuklearen Bereich eingeführte Sicherheitsphilosophie wurde inzwischen in anderen Industriezweigen, in denen mit Gefahren zu rechnen ist, weitgehend übernommen.

Der Schutz des Menschen und der Biosphäre hat bei der friedlichen Anwendung der Kernenergie Priorität und die Störfallmeldestelle des Bundesamtes für Strahlenschutz trägt mit ihrer Tätigkeit zur Gewährleistung und Weiterentwicklung des hohen Niveaus der kerntechnischen Sicherheit bei.

Unfälle in kerntechnische Anlagen

Von den bisher in kerntechnischen Anlagen aufgetretenen Unfällen - d. h. nach der INES-Skala Stufe 4 und größer - werden nachfolgend drei Unfälle beispielhaft näher beschrieben:

Reaktorunfall in Windscale (Sellafield)

Der Windscale Pile 1 Reaktor in Großbritannien diente der Gewinnung von Plutonium für militärische Zwecke. Der inzwischen stillgelegte, graphitmoderierte Reaktor wurde 1950 fertiggestellt. Am 08.10.1957 geriet ein Teil des Graphits des Reaktorkerns in Brand, wodurch es zu einer erheblichen Freisetzung von Jod in die Umgebung kam. In einem Gebiet von ca. 500 km² mußte die Milch aufgekauft und vernichtet werden; ein Verzehrverbot für Milchprodukte für die Dauer von 60 Tagen wurde ausgesprochen. Bei anderen Nahrungsmitteln gab es keine Überschreitungen von Grenzwerten.

Nach heutigen Maßstäben und bei Anwendung der INES-Skala wäre der Unfall in die Stufe 5 einzuordnen.

Unfall im Kernkraftwerk Three Mile Island (Harrisburg)

Am 28.03.1979 ereignete sich im Block 2 des amerikanischen Kernkraftwerkes Three Mile Island (TMI) ein schwerer Störfall, bei dem es infolge eines offenen Abblaseventils am Druckhalter zu einem Kühlmittelverlust aus dem Reaktorkühlkreislauf und in dessen Folge zur Überhitzung der Brennstäbe und Bildung einer Schmelzzone im Reaktorkern kam. Die Ursache war eine Kombination von Auslegungsmängeln, technischem Versagen und menschlichen Fehlern.

Durch das offene Ventil fiel im Sicherheitsbehältersumpf Kühlmittel an, welches in das Hilfsanlagegebäude gepumpt wurde. Dort kam es dann zur Überspeisung der Behälter mit dem kontaminierten Sumpfwasser und damit zur Aktivitätsfreisetzung (Edelgase) über das Lüftungssystem in die Umgebung.

Die Meßwerte sollen außerhalb des Kraftwerkszaunes max. 20 bis 25 mrem/h (0,2-0,25 mSv/h) erreicht haben, im 16 km entfernten Harrisburg 0,3 mrem/h. Der Anteil von radioaktiven Jod in Milchproben in der Umgebung lag um das 10^3 -fache unter dem Wert, bei dem Maßnahmen hätten ergriffen werden müssen. Die höchste Strahlenbelastung, die eine Person in der Umgebung erlitten haben könnte, wurde auf 50 mrem (0,5 mSv) geschätzt.

Dieses Ereignis würde bei Anwendung der INES-Skala in die Stufe 5 eingeordnet werden.

Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl

Am 26. 04.1986 nachts um 1.24 Uhr kam es im Block 4 des ukrainischen Kernkraftwerkes Tschernobyl zur explosionsartigen Zerstörung des Reaktors. Die Ursachen, eine Kombination aus menschlichem Versagen und einer unzureichenden sicherheitstechnischen Auslegung sind relativ gut bekannt. Dieser in der Geschichte der friedlichen Nutzung der Kernenergie bisher schwerste Reaktorunfall hatte weitreichende Auswirkungen.

Ca. 3,5 bis 4 % des Kernbrennstoffinventars wurden durch den Unfall freigesetzt, wobei ca. 0,4 % direkt auf dem Anlagengelände und ca. 1,5 % in einer 20-km-Zone um das Kernkraftwerk verteilt wurden. Radioaktive Edelgase wurden zu 100 %, Jod zu 80 ... 100 % (davon 80 % gasförmig),

Cäsium bis zu max. 60 % freigesetzt. Etwa 95 % der gesamten Freisetzung erfolgte in den ersten Tagen nach dem Unfalleintritt, der Rest in den darauffolgenden Wochen. Durch Abdeckung des zunächst offenen Reaktors mit 5000 t verschiedener Materialien und durch Abkühlung des in der Reaktorgrube verbliebenen Brennstoffes durch Einblasen von Stickstoff gelang es, die Freisetzung bis zum 06.05.86 auf etwa 10^4 GBq pro Tag und bis Ende Mai 1986 auf ca. 740 GBq pro Tag zu reduzieren.

Von dem Personal, das in den ersten Tagen an den Brandbekämpfungsarbeiten und anderen Arbeiten beteiligt war, mußten etwa 300 Personen mit akuter Strahlenkrankheit - die Strahlenexpositionen dieser Personen lagen zwischen 2 und 16 Sv - und teils schweren Brandverletzungen behandelt werden; 31 davon sind gestorben, 28 davon an akuter Strahlenkrankheit.

Die Bewohner in der näheren Umgebung des Kernkraftwerkes (Kleinstadt Prypyat mit 49000 Einwohnern) wurden am 27.04.86 evakuiert, die übrigen Bewohner der 30-km-Zone um den Reaktor am 04./05.05.86 .

Die radiologische Situation im europäischen Ausland (außer UdSSR) war dadurch gekennzeichnet, daß eine akute Strahlengefährdung der Bevölkerung zu keiner Zeit bestand. Die durchgeführten Dosisabschätzungen ergaben insgesamt eine geringe durch den Reaktorunfall in Tschernobyl bedingte Strahlenexposition. Deshalb waren die Vorsorgemaßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland darauf gerichtet, die Strahlenexposition so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar zu halten (Verbrauchsbeschränkungen für Milch/ Gemüse, Grünfuttermittelverbrauchsbeschränkungen, Importbeschränkungen für Nahrungsmittel aus Osteuropa). 1992 wurde die mittlere durch Tschernobyl verursachte Strahlenexposition der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland fast ausschließlich durch die Bodenstrahlung des deponierten Radiocäsium bestimmt (Halbwertszeit von Cäsium-137: 30 Jahre). Daraus ergibt sich eine mittlere effektive Dosis der Bevölkerung durch Bodenstrahlung von weniger als 0,02 mSv. Diese liegt somit unter 1 % der mittleren natürlichen Strahlenexposition. Aufgrund von örtlich und zeitlich begrenzten Regenfällen während des Durchzugs der radioaktiven Wolke wurden Gebiete südlich der Donau, des Bayerischen Waldes und Ostdeutschlands stärker belastet, hier lag die durch Tschernobyl bedingte Strahlenexposition etwa bei 10 % der natürlichen Strahlenexposition.

Nach der INES-Skala ist der Unfall in Tschernobyl der Stufe 7 zuzuordnen.

Außer der Katastrophe in Tschernobyl hatte nur noch der Unfall in Windscale für die Umgebung größere radiologische Auswirkungen. Bei dem Unfall in Harrisburg wurden die vom zerstörten Kern freigesetzten radioaktiven Stoffe weitestgehend durch die vorhandenen Sicherheitsbarrieren im Reaktorgebäude zurückgehalten. Unter Sicherheitsgesichtspunkten unterscheiden sich die grundlegend anders aufgebauten Reaktortypen in Windscale und Tschernobyl erheblich von deutschen Kernkraftwerken. Den Unfallhergang und die Umweltbelastungen wie in Tschernobyl schließt das Sicherheitskonzept der deutschen Kernkraftwerke aus.

Stilllegung

Neben den aus Sicherheitsgründen stillgelegten Anlagen sowjetischen Typs in den neuen Bundesländern, sind auch Leistungsreaktoren der alten Bundesrepublik Deutschland wie das Versuchsatomkraftwerk Kahl (VAK), das Kernkraftwerk Gundremmingen Block A (KRB-A), das Kernkraftwerk Lingen (KWL), der Hochtemperaturreaktor Hamm-Uentrop (THTR) sowie das Kernkraftwerk Würgassen (KWW) in den Phasen der Stilllegung.

Mit dem vollständigen Abbau des Kernkraftwerkes Niederaichbach (KKN) und der Rekultivierung des Standortgeländes im August 1995 wurde zum ersten Mal in Europa die vollständige Beseitigung eines Kernkraftwerkes erfolgreich demonstriert.

Auch Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufes, wie die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) und die Anlagen zur Uran- und Plutoniumverarbeitung in Hanau sind in der Stilllegung.

Die Stilllegung kerntechnischer Anlagen wird wie deren Betrieb behördlich genehmigt und überwacht. Fragen der Sicherheit spielen auch dabei die herausragende Rolle und betreffen zu allererst den Strahlenschutz des Personals und der Umgebung. Allerdings ist bei den Reaktoren nach dem Entfernen der Brennelemente aus den Anlagen das radioaktive Inventar um mindestens den Faktor 1000 kleiner als im Betrieb. Stör- und Unfälle mit katastrophalen Auswirkungen in der Umgebung sind somit auch wegen des Fehlens erhöhter Drücke und Temperaturen nicht mehr möglich.

Für die stillgelegte Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) besteht die Aufgabe, den angefallenen hochradioaktiven Flüssigabfall zu entsor-

gen. Hierfür ist die Errichtung einer Verglasungsanlage am Standort vorgesehen.

Unter Stilllegung versteht man im technischen Sprachgebrauch alle Maßnahmen nach der endgültigen Einstellung des Betriebes. Dabei kann es sich um den sofortigen und vollständigen Abbau der Anlage, um den Abbau von Teilen oder um den sogenannten Sicheren Einschluß handeln. Beim Sicheren Einschluß wird die Anlage „aufgeräumt“, alle radioaktiven Stoffe werden dauerhaft eingeschlossen und fixiert, und die Gebäude werden gegen den Zutritt Unbefugter gesichert. Der Sichere Einschluß ist für eine längere aber begrenzte Zeit sinnvoll, um die Radioaktivität abklingen zu lassen. In der Regel werden dabei für Kernreaktoren ca. 30 Jahre angesetzt, bevor der Abbau beginnt. In Deutschland befindet sich derzeit das Kernkraftwerk Lingen (KWL) seit 1985 für 25 Jahre im Sicheren Einschluß, im Jahre 2007 muß der Betreiber einen Antrag für die weiteren Stilllegungsschritte stellen.

Für den Abbau der Komponenten, Anlagenteile und der Gebäude gibt es eine ganze Reihe von bewährten Techniken. Einige dieser Zerlegetechniken müssen dabei auch fernbedient mit Greifwerkzeugen und Manipulatoren, zum Teil auch unter Wasser durchgeführt werden, um das Personal sicher vor der Strahlung zu schützen. Diese fernbedienten Techniken wurden beim Abbau des Kernkraftwerkes Niederaichbach (KKN) erfolgreich demonstriert und angewendet.

Weitere Techniken zur Zerlegung von Großkomponenten und zur Dekontamination von Anlagenteilen sind bei Abbau des Kernkraftwerkes Gundremmingen A (KRB-A) erfolgreich entwickelt und mit großer internationaler Beachtung angewendet worden.

Eine wesentliche Frage bei der Stilllegung ist die Behandlung und der Verbleib der Abfälle und Reststoffe. Der Kontrollbereich eines großen Druckwasserreaktors vom Typ Biblis enthält eine Gesamtmasse von 155.000 t. Davon sind allerdings 90 % Beton, der wiederum nur zu einem kleinen Teil radioaktiv ist. Circa 15.000 t Stahl fallen an, davon können 75 % als Schrott in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt werden. Lediglich insgesamt ca. 3200 t radioaktiver Abfall wird in ein Endlager zu verbringen sein.

Die Tatsache, daß die überwiegende Masse des beim Abbau eines Kernkraftwerkes anfallenden Schutts und Schrotts nicht radioaktiv ist, führt zu der Verpflichtung, diese Stoffe schadlos zu verwerten. Vorgeschriebene

Grenzwerte stellen sicher, daß keine unzulässige Strahlenexposition der Bevölkerung aus der Verwertung solcher Materialien resultiert. International und auch in Deutschland hat sich als allgemein anerkanntes Ziel herausgestellt, daß die Dosis, die für die Bevölkerung aus den einzelnen „Verwertungswegen“ resultierten könnte (Schrott, Bauschutt oder Wiederverwertung von Teilen), jeweils auf etwa 10 μSv pro Jahr begrenzt werden sollte. Zum Vergleich beträgt die natürliche Strahlenbelastung in Deutschland im Mittel ca. 2000 μSv pro Jahr.

Brennstoffkreislauf

Die wirtschaftlich zu gewinnenden Uranvorräte betragen weltweit etwa 3 Millionen Tonnen; der weltweite Bedarf zum Betrieb von Kernreaktoren beträgt etwa 60.000 t Uran. Natururan enthält das in Leichtwasserreaktoren spaltbare Uranisotop 235 nur zu etwa 0,7 %, der Rest, also über 99 %, besteht fast ausschließlich aus dem Uranisotop 238. Der im Natururan vorliegende Gehalt an U-235 reicht zur Aufrechterhaltung der Kernspaltung im Reaktor nicht aus; infolgedessen muß das Isotop U-235 auf einen Gehalt von etwa 3 bis 5 % angereichert werden. In Form von Uranhexafluorid kann in Zentrifugen oder Diffusionsanlagen das Uran auf den gewünschten Gehalt an U-235 gebracht werden, das Uran wird „angereichert“. Beim modernen Zentrifugenverfahren wird das Uran durch die auf die verschiedenen Isotopenmassen verschieden wirkenden Fliehkräfte angereichert, während beim energieaufwendigen Diffusionsverfahren die verschiedenen Diffusionsgeschwindigkeiten der verschieden schweren Isotope genutzt werden. Das angereicherte Uranhexafluorid wird wieder in Uranoxid umgewandelt. In einem Sinterungsprozeß werden aus dem Uranoxid zylindrische Brennstoffpellets hergestellt, die eine Länge von etwa 10 mm und einen Durchmesser von etwa 8 mm haben. Diese Brennstoffpellets werden in Hüllrohre von etwa 4 m Länge eingefüllt, die aus Zircaloy bestehen. Zircaloy ist eine Legierung, die hauptsächlich aus Zirkonium besteht. Dieser Werkstoff wird deshalb gewählt, weil Zirkonium eine besonders geringe Neutronenabsorption aufweist. Für Siedewasserreaktoren werden 64-100, für Druckwasserreaktoren 200 - 300 befüllte Hüllrohre zu einem Brennelement assembliert, d.h. in eine Haltekonstruktion montiert und im Leichtwasserreaktor eingesetzt. In einem Siedewasserreaktor sind etwa 800, in Druckwasserreaktoren etwa 200 Brennelemente im Einsatz.

Der Preis von Uran schwankt als Folge von Nachfrage und Angebot; er betrug z. B. im Jahr 1994 20.80 \$ pro kg und im Jahr 1995 30.94 \$/kg Uran. Konversionsleistung und Anreicherungsarbeit werden ebenfalls auf dem Markt gehandelt, im Jahr 1996 kostete die Konversion von 1 kg Uran etwa 5,60 \$, während die für die Anreicherung notwendige Trennarbeit 92 \$ pro kg Trennarbeit kostete. Man kann grob abschätzen, daß für ein kg Uran mit einer Anreicherung von 5 % U-235 Kosten in Höhe von etwa 1200-1400 \$ anfallen. Die dann noch aufzubringenden reinen Herstellungskosten für Brennelemente betragen etwa 630 DM pro kg Brennstoff; Natururanbedarf und Anreicherung machen etwa $\frac{3}{4}$ der Gesamtkosten für ein Brennelement aus.

Der Abbrand ist ein Maß für die während des Einsatzes im Kernreaktor erzeugte thermische Energie, die aus dem Kernbrennstoff durch Kernspaltung gewonnen wird. Erhöhung des Abbrandes, d.h. Verbrennung einer größeren Menge Brennstoff durch Erhöhung der Einsatzzeit eines Brennelementes im Reaktor, führt zu einer besseren Nutzung des eingesetzten Urans und zu einer geringeren anfallenden Menge an abgebranntem Kernbrennstoff. Dadurch werden bezogen auf die durch das Brennelement erzeugte Energie, die Leistungen für Brennelementherstellung, Wiederaufarbeitung und Endlagerung in geringerem Umfang in Anspruch genommen. Dies bewirkt eine Kostenoptimierung bei der Stromerzeugung. Verstärkt wird dieser Trend dadurch, daß der Anteil der Entsorgungskosten, also der Anteil der Kosten für die Wiederaufarbeitung und Abfallagerung an den Gesamtkosten des Brennstoffkreislaufs von der Anreicherung des Urans über die Brennelementfertigung bis zur Wiederaufarbeitung und Endlagerung allein zwischen 1976 und 1986 von 18 % auf 43 % gestiegen ist.

Ihre Grenze findet die in Leichtwasserreaktoren erzielbare Erhöhung des Abbrandes durch die wasserseitige Korrosion der Hüllrohre, durch den Innendruckaufbau infolge der Erzeugung und Freisetzung von Spaltgas und infolge der Dimensionsänderungen von Hüllrohren, Brennstoff und Strukturteilen durch die Bestrahlung. Durch verbessertes Brennelementdesign, zum Beispiel die Erhöhung der Zahl der Brennstäbe pro Brennelement und durch den Einsatz verbesserter Hüllrohre und Brennelementstrukturmaterialien werden derzeit maximale mittlere Druckwasser- und Siedewasserreaktor-Entladeabbrände von 42 000 MWd/tU bzw. 40 000 MWd/tU erreicht, wobei die maximalen Abbrände einzelner Brennelemente bei 54 000 MWd/tU liegen.

Bei den meisten Kernkraftwerken ist schrittweise und im Rahmen der Betriebsgenehmigungen ein weiterer Anstieg der Entladeabbrände geplant.

In Deutschland werden pro Jahr etwa 500 t abgebrannte Brennelemente aus den Reaktoren entladen. Nach der etwa dreijährigen Einsatzzeit im Reaktor sind in dem bestrahlten Brennstoff noch beträchtliche Mengen an zur weiteren Energieerzeugung verwendbarem Spaltstoff vorhanden. Der Anteil an nicht mehr nutzbaren Spaltprodukten - also des eigentlichen Abfalls - beträgt weniger als 4 %. Die Hauptmenge von etwa 96 % weiter nutzbaren Brennstoffs besteht zu 95 % aus Uran und zu 1 % aus Plutonium, das durch Neutroneneinfang aus dem Uran entsteht.

Nach dem Atomgesetz ist der Betreiber von Kernkraftwerken verpflichtet, die beim Betrieb anfallenden bestrahlten Brennelemente schadlos zu verwerten oder als radioaktiven Abfall geordnet zu beseitigen. Schadlose Beseitigung bedeutet Wiederaufarbeitung und erneuten Einsatz der gewonnenen Spaltstoffe in Kernkraftwerken zur Energiegewinnung. Um die Spaltstoffe weiter verwenden zu können, ist es notwendig, Plutonium, Uran und Spaltprodukte voneinander zu trennen. Dies wird bei der Wiederaufarbeitung durchgeführt. Die nicht weiter verwendbaren Spaltprodukte werden in einem Schmelzofen in eine Glasmatrix eingebettet, diese in Edelstahlkokillen abgefüllt und nach einigen Jahrzehnten Zwischenlagerung der Endlagerung zugeführt. Die deutschen Kernkraftwerksbetreiber haben langfristige Verträge mit ausländischen Anbietern von Wiederaufarbeitungsleistungen, also der französischen Cogema und der britischen BNFL abgeschlossen.

Der erneute Einsatz des bei der Wiederaufarbeitung gewonnenen Urans erfolgt derzeit noch nicht in großtechnischem Maßstab, während Plutonium in großem Umfang in Form von sogenannten Mischoxid-Brennelementen in Kernkraftwerken zur Energieerzeugung verwendet wird. Mischoxid Brennelemente sind vom Aufbau her identisch mit Uran-Brennelementen und unterscheiden sich nur in der Art des Brennstoffs: statt angereichertem Uran wird eine Mischung aus Natururan und Plutonium verwendet, wobei durch das Plutonium die Anreicherung des Urans ersetzt wird. Die Rezyklierung des Plutoniums führt bei Leichtwasserreaktoren zu Einsparungen bei Natururan und Trennarbeit und zu einem langsameren Anwachsen der entstehenden Plutoniummengen.

Nach dem Atomgesetz ist auch die sogenannte Direkte Endlagerung der abgebrannten Brennelemente möglich, d. h. die verbrauchten Brennele-

mente werden nach Zerlegen und/oder Zerschneiden ohne weitere Behandlung in speziellen Endlagerbehältern in einem geologischen Endlager endgelagert. Die dazu erforderliche Konditionierungstechnik soll in der im Bau befindlichen Pilotkonditionierungsanlage am Standort Gorleben erprobt werden. Es steht im Ermessen der Kernkraftwerksbetreiber, sich zwischen den Entsorgungswegen Wiederaufarbeitung und direkte Endlagerung zu entscheiden.

Zusammenfassung

In über dreißig Jahren Stromproduktion durch über zwanzig Leistungsreaktoren in Deutschland ist kein Mensch nachweislich durch Strahlung zu Schaden gekommen - weder durch Störfälle noch durch den bestimmungsgemäßen Betrieb. Trotzdem wird darüber nachgedacht, wie die Eintrittswahrscheinlichkeit schwerer Störfälle weiter gesenkt und mögliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt verringert und eingeschränkt werden können. Im Rahmen von Nachrüstungen wurden eine Reihe entsprechender Maßnahmen verwirklicht. Die neue Generation an Kernkraftwerken wird ohne Notfallschutzmaßnahmen in der Umgebung kerntechnischer Anlagen auskommen.

Für die Staaten Südostasiens und der ehemaligen Sowjetunion ist der Ausbau der Kernenergie zur Stromproduktion voll im Gange. Da Uran noch lange als Kernbrennstoff weltweit zur Verfügung stehen wird und Stilllegung von kerntechnischen Anlagen sowie die Endlagerung von radioaktiven Stoffen keine ernsthaften technischen Probleme darstellen, ist es allein eine Entscheidung unserer Politik, ob die Stromproduktion aus Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland im nächsten Jahrhundert ihren Marktanteil auch bei uns behalten wird.