

BERICHTE DER SNG ZUR KERNENERGIE RAPPORTS DE LA SHSN SUR L'ENERGIE NUCLEAIRE

P 30084

4

20/4.82

Beiheft zum Bulletin 1981/1 der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft
und der Schweizerischen Geisteswissenschaftlichen Gesellschaft

Supplément au Bulletin 1981/1 de la Société Helvétique des Sciences Naturelles
et de la Société Suisse des Sciences Humaines

Bereits erschienen:

Strahlengefährdung durch Kernkraftwerke

(Erster Bericht) von Richard Braun, Hedi Fritz-Niggli, Werner Schmid, Pierre A. Tschumi, Gerhard Wagner, Rudolf Weber

Die thermischen Auswirkungen von Kernkraftwerken

(Zweiter Bericht) von Theo Ginsburg, Dieter Imboden, André Junod, Bruno Messerli, Matthias Winiger

Emission radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken im Normalbetrieb

(Dritter Bericht) von Josef Halter, Otto Huber, Heinz Hugo Loosli, Hans Oeschger, Guelfo Poretti, Jean Rossel, Albert Sittkus, Werner Stumm

Die Lagerung radioaktiver Abfälle

(Vierter Bericht) von Lukas Hauber, Rudolf Häusermann, Theodor Hügi, Werner Hunzinger, Heinrich Jäckli, Claude Lunke, Claude Vuilleumier

Physikalische und technische Grundlagen der Kernenergie

(Fünfter Bericht) von Jean Claude Courvoisier, Heini Gränicher, Gérard de Haller, Hans-Rudolf Lutz, Hans Oeschger, Jean Rossel

Die Wahl des Standortes von Kernkraftwerken

(Sechster Bericht) von Franz Allemann, Herbert Lang, Dieter Mayer-Rosa, Erich Nagel, Heinz Wanner

Der Brennstoffkreislauf der Leichtwasserreaktoren

(Siebenter Bericht) von Mario Camani, Alain Colomb, Hans-Rudolf Lutz, Jacques Rognon, Peter Sonderegger, Marc-André Stoll

In Bearbeitung:

Sicherheit der nuklearen Energieerzeugung

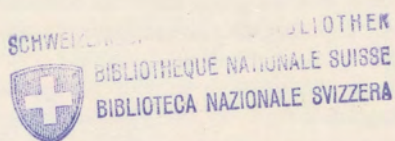
Alternative Energien

Die Berichte erscheinen auf deutsch und französisch

Zu beziehen beim Generalsekretariat der SNG, Hirschengraben 11,
3001 Bern

BERICHTE DER SNG ZUR KERNENERGIE RAPPORTS DE LA SHSN SUR L'ENERGIE NUCLEAIRE

4



SNG
SHSN

Herausgegeben von der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft
(Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften)
Publié par la Société Helvétique des Sciences Naturelles
(Académie Suisse des Sciences)

4
(Erster Bericht) von Richard Braun, Hedi Fritz, Pierre A. Tschumi, Gerhard Wagner, Rudolf Weber

Die thermischen Auswirkungen von Kernkraftwerken

(Zweiter Bericht) von Theo Gindberg, Dieter Imboden, André Junod, Bruno Messerli, Matthias Winger

Entstehung radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken im Normalbetrieb

(Dritter Bericht) von Josef Halter, Otto Huber, Heinz Hugo Lööf, Hans Oeschger, Gualtero Porzili, Jean Rossel, Albert Sinkus, Werner Studer

Die Lagerung radioaktiver Abfälle

(Vierter Bericht) von Lukas Hauber, Rudolf Hausermann, Theodor Hiltner, Werner Hunzinger, Heinrich Jäckli, Claude Lunke, Claude Vuilleumier

Physikalische und technische Grundlagen der Kernenergie

(Fünfter Bericht) von Jean Claude Courvoisier, Heini Gräzicher, Gernold de Haller, Hans-Rudolf Lutz, Hans Oeschger, Jean Rossel

Die Wahl des Standortes von Kernkraftwerken

(Sechster Bericht) von Franz Allemann, Herbert Lang, Dieter Mayer-Schindler, Erich Nagel, Heinz Wanner

Der Brennstoffkreislauf der Leichtwasserreaktoren

(Siebenter Bericht) von Mario Camani, Alain Colomb, Hans-Rudolf Lutz, Jacques Rognon, Peter Sonderegger, Marc-André Stoll

In Bearbeitung:

Sicherheit der nuklearen Energieerzeugung

Alternative Energien

Die Berichte erscheinen auf deutsch und französisch

Copyright © 1981 by Schweizerische Naturforschende Gesellschaft, Bern
Printed in Switzerland

Herausgegeben von der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft
(Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften)
Publié par la Société Helvétique des Sciences Naturelles
(Académie Suisse des Sciences)



Zum Geleit	7
Einführung	7
7. Bericht	
Der Brennstoffkreislauf der Leichtwasserreaktoren	9

Seit die Kontroverse um Nutzen und Schaden von Kernkraftwerken entbrannt ist, geschieht es, dass Wissenschaftler in der Öffentlichkeit widersprüchliche Ansichten vertreten, wobei sie zugleich ihre wissenschaftliche Autorität ins Spiel bringen. Damit wird das Bestreben um Sachlichkeit, das alle Wissenschaft auszeichnen sollte, kompromittiert. Angesichts der grossen Bedeutung, die dem Problemkreis Atomkernenergie — neben anderen grossen Problemen — heute beizumessen ist, nahm der ehemalige Genfer Ausschuss der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft an dieser Lage Anstoss. Er ging von der Überzeugung aus, dass es möglich sei, auf wissenschaftlicher Ebene Gegner und Befürworter von Kernkraftwerken, wie auch Neutrale, in strittigen Punkten zu einem Konsens zusammenzuführen. Im Frühsommer 1975 fasste der Ausschuss daher den Entschluss, Arbeitsgruppen aus Fachleuten verschiedener Einstellung zu bilden mit dem Auftrag, zu bestimmten mit den Kernkraftwerken verbundenen Fragen wissenschaftliche Antworten zu suchen, denen alle Beteiligten zustimmen vermögen. Dass diese Bestrebungen in einzelnen Punkten zu dem Ergebnis führen könnten, es gebe vom rein wissenschaftlichen Gesichtspunkt aus zur Zeit keine gesicherte Antwort, wurde ausdrücklich in Kauf genommen.

Die Arbeiten, die ohne Verzug an die Hand genommen wurden, sind noch nicht abgeschlossen. Indessen liegen seit einiger Zeit Resultate vor, die nicht länger unveröffentlicht bleiben sollen. Der derzeitige Berner Ausschuss der SNG beschloss deshalb, die vorhandenen Berichte in Beiheften zum «Bulletin» der SNG und ihrer Schwesterorganisation, der Schweizerischen Geisteswissenschaftlichen Gesellschaft, laufend zu veröffentlichen. Er dankt der SGG für ihr bereitwilliges Einverständnis.

Die Verantwortung für die einzelnen Berichte tragen ausschliesslich die sie unterzeichnenden Wissenschaftler. Die Berichte gelten nicht als offizielle Stellungnahme der SNG: sie tritt bloss als Herausgeberin auf.

Den Wissenschaftlern, die sich an den verschiedenen Arbeitsgruppen beteiligten und sich weiterhin zur Verfügung stellen, gebührt für ihren Einsatz und ihre Verständigungsbereitschaft aufrichtiger Dank. Die Schweizerische Naturforschende Gesellschaft übergibt ihre Berichte der Öffentlichkeit in der Hoffnung, sie möchten Beachtung finden und zur Versachlichung der Auseinandersetzung um die Kernkraftwerke in unserem Lande beitragen.

Prof. E. Niggli
Zentralpräsident der SNG

Die Berichte erscheinen deutsch und französisch.
 Der vorliegende Bericht wurde aus dem Französischen übersetzt.
 Die Angaben beziehen sich auf den Stand des Wissens vom Frühling 1980.

Die Arbeiten, die ohne Verzug an die Hand genommen wurden, sind noch nicht abgeschlossen. Indessen liegen seit einiger Zeit Resultate vor, die nicht länger unveröffentlicht bleiben sollen. Der derzeitige Berater Ausschuss der SNG beschloss deshalb, die vorhandenen Berichte in Beiträge zum «Bulletin» der SNG und ihrer Schwesterorganisation, der Schweizerischen Genetischen Gesellschaft, laufend zu veröffentlichen. Er dankt der SGC für ihr bereitwilliges Einverständnis.

Die Verantwortung für die einzelnen Berichte tragen ausschließlich die sie untersuchenden Wissenschaftler. Die Berichte gehen nicht als offizielle Stellungnahme der SNG; sie tritt bloss als Herausgeberin auf.

Den Wissenschaftlern, die sich an den verschiedenen Arbeitsgruppen beteiligen und sich weiterhin zur Verfügung stellen, gedankt für ihren Einsatz und ihre Verständigungsbereitschaft aufrichtiger Dank. Die Schweizerische Naturforschende Gesellschaft überträgt ihre Berichte der Öffentlichkeit in der Hoffnung, sie möchten Beachtung finden und zur Vervollständigung der Auswanderung von der Kernkraftwerke in unserem Lande beitragen.

Prof. E. Niggli
 Zentralpräsident der SNG

Einführung

Veranlassung

Angesichts der Kontroversen, welche über die friedliche Nutzung der Kernenergie entbrannt sind, ist die Öffentlichkeit ziemlich verunsichert. Zu den Stellungnahmen aus allen Richtungen gesellen sich die widersprüchlichsten Informationen; sogar die Meinungen der Wissenschaftler scheinen nicht übereinzustimmen.

Nun ist zu bemerken, dass die Uneinigkeit nicht die wissenschaftlichen Tatsachen, sondern deren Anwendung und die daraus geschlossenen Voraussagen betrifft. *Es handelt sich also eher um eine Meinungsdebatte als um eine wissenschaftliche Diskussion.*

Die Schweizerische Naturforschende Gesellschaft SNG ist eine unabhängige Organisation, die für die Schweiz die Stellung einer Naturwissenschaftlichen Akademie einnimmt. *Sie hat sich zum Ziel gesetzt, der nicht spezialisierten Öffentlichkeit eine sichere und objektive Information zu vermitteln*, unabhängig von jedem Interesseneinfluss und ohne jede philosophische, soziale oder politische Tendenz.

Im vorliegenden Dokument nimmt die Gruppe «Kernenergie» der SNG selber nicht Stellung. *Sie stellt nur wissenschaftliche Tatsachen vor.* Selbstverständlich spielen zahlreiche nicht die exakten und Naturwissenschaften betreffende Gesichtspunkte in die Nukleardebatte hinein. *Es ist jedoch nicht Sache der SNG*, die ökonomischen (Energiebedarf, Expansion, Rentabilität usw. betreffende) oder sozialpolitischen Aspekte zu behandeln.

Arbeitsweise und Inhalt

Die Information wurde durch Arbeitsgruppen der SNG zusammengestellt, welche den wissenschaftlichen Wert garantieren. Die Quellen dieser Information sind sowohl in den Texten wie in den Literaturverzeichnissen am Ende jedes Berichtes angeführt.

Diese befassen sich ausschliesslich mit wissenschaftlich festgestellten Tatsachen. Enthalten die konsultierten Unterlagen voneinander abweichende Informationen, so werden die Gründe der Unstimmigkeiten untersucht und nur die wirklich belegten Angaben berücksichtigt. Kann schliesslich ein Problem mit den heute verfügbaren Mitteln nicht gelöst werden, so wird die Information unter Hinweis auf ihre Unsicherheit

oder auf die in ihr enthaltenen Unzulänglichkeiten, und manchmal mit Empfehlungen für die noch notwendigen Forschungen, weitergegeben.

Obwohl die Arbeitsgruppen keine Meinung zu äussern haben, wurden sie so zusammengestellt, dass sowohl erklärte «Gegner» als auch «Befürworter» der Kernkraftwerke in ihnen vertreten sind. Die Resultate werden mit der Zustimmung *aller Mitglieder* der jeweiligen Gruppe, welche vorgängig diesem Verfahren zugestimmt haben, herausgegeben.

Die behandelten Fragen sind, im Rahmen des Möglichen, diejenigen, die sich der «Mann von der Strasse», der die Diskussionen verfolgt, stellt.

Die Arbeitsgruppe «Kernenergie» der SNG hofft, so zur klaren und unparteilichen Information der Öffentlichkeit beizutragen.

Der Koordinator
der Arbeitsgruppe «Kernenergie»
Prof. G. de Haller

Genf, den 20. Februar 1981

Der Brennstoffkreislauf der Leichtwasserreaktoren

1. Gewinnung und Konzentration des Urans	13
1.1 Analyse der Erzkorkommen	17
1.2 Produktion	20
1.3 Lage in der Schweiz	21
2. Konversion	22
3. Anreicherung	24
3.1 Anreicherung durch Diffusion	24
3.2 Anreicherung durch Zentrifugieren	24
3.3 Materialbilanz	24
3.4 Einfluss auf die Umwelt	25
3.5 Arbeitshygiene	25
4. Herstellung der Brennelemente	26
4.1 Beschreibung des Herstellungsverfahrens	26
4.2 Herstellung der Brennelemente mit Plutonium	27
4.3 Einfluss der Herstellungsverfahren auf die Umwelt	27
4.4 Strahlenbelastung des Personals	27
4.5 Einfluss des Plutoniums auf Personal und Umwelt	28
5. Einsatz im Reaktor	29
5.1 Inventar	29
5.2 Handhabung	30
5.3 Betrieb	30
6. Lagerung der abgebrannten Elemente	32
6.1 Inventar	32
6.2 Einwirkungen von aussen	33
6.3 Lagerkapazität	33
7. Transporte	34

Der Bericht wurde erarbeitet und gutgeheissen von

Dr. Mario Camani, Physiker, Sementina

Alain Colomb, Physiker, Perroy

Dr. Hans-Rudolf Lutz, Physiker, Bern

Dr. Jacques Rognon, Physiker, Münchenbuchsee

Peter Sonderegger, Physiker, Genf

Dr. Marc-André Stoll, Chemiker, Birsfelden

Inhalt

Zusammenfassung	13
Einleitung	17
1. Gewinnung und Konzentration des Erzes	
1.1 Analyse der Erzvorkommen	20
1.2 Produktion	21
1.3 Lage in der Schweiz	22
2. Konversion	22
3. Anreicherung	
3.1 Anreicherung durch Diffusion	24
3.2 Anreicherung durch Zentrifugieren	24
3.3 Materialbilanz	24
3.4 Einfluss auf die Umwelt	25
3.5 Arbeitshygiene	25
4. Herstellung der Brennelemente	
4.1 Beschreibung des Herstellungsverfahrens	25
4.2 Herstellung der Brennelemente mit Plutonium	27
4.3 Einfluss der Herstellungswerke auf die Umwelt	27
4.4 Strahlenbelastung des Personals	27
4.5 Einfluss des Plutoniums auf Personal und Umwelt	28
5. Einsatz im Reaktor	
5.1 Inventar	29
5.2 Handhabung	30
5.3 Betrieb	30
6. Lagerung der abgebrannten Elemente	
6.1 Inventar	32
6.2 Einwirkungen von aussen	33
6.3 Lagerkapazität	33
7. Transporte	
7.1 Beschreibung des Vorgangs	34
7.2 Reglementierung	35
7.3 Sicherheit	36
8. Wiederaufbereitung	
8.1 Funktion der Wiederaufbereitung	38
8.2 Beschreibung des Verfahrens	38
8.3 Funktionszwischenfälle	39

8.4	Gegenwärtiger Stand der Wiederaufbereitung	41
8.5	Inventar	42
8.6	Emissionen	42
8.7	Risiken für das Personal	45
9.	Konditionierung der Abfälle	
9.1	Lagerung in flüssiger Form	46
9.2	Verfestigung und Lagerung	46
10.	Rückführung des Plutoniums und des zurückgewonnenen Urans	
10.1	Beschreibung der Arbeitsweise	48
10.2	Ersparnis an natürlichem Uran und an Anreicherungsarbeit	48
11.	Versorgungssicherheit und wirtschaftliche Aspekte	
11.1	Versorgungssicherheit	49
11.2	Brennstoffkosten	50
12.	Proliferation	
12.1	Einführung	52
12.2	Begriffsbestimmungen	53
12.3	Die atomaren Sprengstoffe	54
12.4	Schätzung der Proliferationsrisiken für die verschiedenen Phasen des Brennstoffkreislaufs	55
12.5	Schutzmassnahmen gegen Proliferation	56
	Begriffe	60
	Verzeichnis der Abkürzungen	66
	Literatur	68

Zusammenfassung

Dieser Bericht behandelt die neun Etappen des Brennstoffkreislaufs der Leichtwasserreaktoren und enthält am Schluss einige Überlegungen über die Rückführung des Brennstoffs, die Versorgungssicherheit, die wirtschaftlichen Aspekte und die Frage der Proliferation von Kernwaffen. Die einzelnen Kapitel können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Gewinnung und Konzentration des Erzes

Das Uran findet man in der Erdkruste in sehr verschiedenen Formen und Konzentrationen. Die Konzentration der heute gewonnenen Erze liegt ungefähr bei 1 Promille.

Eine vor kurzem erschienene Studie der OECD zeigt, dass die sicheren Reserven von Uran zu Produktionskosten unter 130 \$ pro kg die gesamten Bedürfnisse der bestehenden und geplanten Kernkraftwerke bis zu den ersten Jahren des nächsten Jahrhunderts decken. Die im Bericht der OECD für das Jahr 2000 angenommene installierte Leistung beträgt 1 000 000 Mwe.

Die Gewinnung des Urans findet meistens im Tagbau oder in Bergwerken statt. Fortschrittlichere Gewinnungstechniken, die es ermöglichen würden, auch weniger reiche Vorkommen auszuwerten, werden intensiv studiert.

Natürliches Uran ist schwach radioaktiv (0,3 Ci pro Tonne Uran). Bei der Gewinnung des Urans wird ein radioaktives Edelgas, das Radon, freigesetzt. Deshalb ist es nötig, in den Bergwerken und in der Nachbarschaft von Abraumhalden die erforderlichen Schutzmassnahmen zu treffen.

In der Schweiz wurde bisher kein wirtschaftlich rentables Uranlager entdeckt.

2. Konversion

Die aus den Minen kommenden Uranoxydkonzentrate werden in Uranhexafluorid umgewandelt, um ihre Anreicherung zu ermöglichen. Diese Prozedur wird in chemischen Konversionswerken vorgenommen, die wegen der Toxizität und der korrosiven Eigenschaften der fluorierten Produkte unter strengen Sicherheitsmassnahmen stehen.

3. Anreicherung

Ein Leichtwasserreaktor kann nicht mit natürlichem Uran arbeiten. Man muss die Konzentration des Urans 235 von 0,7% auf ungefähr 3% erhöhen. Das gebräuchlichste, heute angewandte Verfahren beruht auf dem Prinzip der Gasdiffusion. Die einzigen Lieferanten von Anreicherungsdiensten sind die Vereinigten Staaten, gefolgt von Russland und seit 1979, von Frankreich.

Ein anderes Verfahren, das auf dem Prinzip der Zentrifugierung beruht, gelangt jetzt in sein industrielles Stadium. 1979 haben zwei Anlagen von bescheidenen Ausmassen ihre nominelle Kapazität erreicht; sie befinden sich in Holland und England.

4. Herstellung der Brennelemente

Das angereicherte Uran wird zuerst in Uranoxyd umgewandelt, das zur Herstellung von Tabletten dient. Diese werden in Zirkoniumröhrchen verpackt. Die Röhrchen werden zu sogenannten «Brennelementen» (Brennstäben) zusammengesetzt. Die schwache Radioaktivität gestattet eine Handhabung ohne Schutzvorrichtungen.

Es ist möglich, Uran 235 durch Plutonium zu ersetzen. Die Herstellung solcher Brennelemente erfordert besondere Schutzmassnahmen.

5. Einsatz im Reaktor

In einem Leichtwasserreaktor von 1000 MWe ersetzt man jedes Jahr ungefähr 30 Tonnen Brennstoff.

Im Reaktor wird U-235 gespalten und aus U-238 Plutonium gebildet. Ein Teil des Plutoniums wird seinerseits gespalten. Durch die Spaltungen entstehen hochradioaktive Spaltprodukte; deshalb werden die Brennelemente nach ihrer Verwendung im Reaktor unter Wasser gelagert. Dadurch wird die Strahlung genügend abgeschirmt.

In der Umgebung eines Kernkraftwerkes erzeugt die kontrollierte Emission gasförmiger und flüssiger radioaktiver Produkte eine zusätzliche Strahlungsbelastung, welche einige Prozent der natürlichen Belastung beträgt.

6. Lagerung der abgebrannten Elemente

Die aus dem Reaktor entladene Elemente werden während mindestens einem Jahr in Lagerbecken gelagert. Während dieser Zeit sinkt ihre Radioaktivität auf ca. 1% des Wertes, den sie beim Entladen hatten. Das Wasser des Beckens dient einerseits als Schutz gegen die Strahlungen und erlaubt andererseits den Abtransport der Strahlungswärme. Die Lagerkapazität in den schweizerischen Kernkraftwerken beträgt minimal eine totale Kernladung zuzüglich sechs Jahresladungen.

7. Transporte

Von allen im Brennstoffkreislauf vorgenommenen Transporten sind diejenigen der Überführung der bestrahlten Brennelemente zur Wiederaufbereitungsanlage die heikelsten. Sie müssen in bleigepanzerten Stahlbehältern vorgenommen werden. Das Ein- und Ausladen der Brennelemente geschieht unter Wasser. Der Behälter muss sehr strengen internationalen Sicherheitsvorschriften entsprechen, damit im Falle eines Verkehrsunfalls keine radioaktiven Substanzen austreten können. Diese Transporte unterliegen ebenfalls sehr strengen administrativen Kontrollen.

8. Wiederaufbereitung

In der Wiederaufbereitungsanlage werden die Brennelemente zerkleinert und in Salpetersäure aufgelöst. Die Trennung von Uran, Plutonium, Spaltprodukten und anderen Transuranen wird in flüssiger Phase vorgenommen. Das Uran und das Plutonium können zur Herstellung neuer Brennelemente wiederverwendet werden.

In den heute bestehenden Wiederaufbereitungsanlagen werden die während der Wiederaufbereitung freigesetzten Edelgase (besonders das Kr-85) in die Atmosphäre geleitet, wo sie sich verdünnen. Sollten die Wiederaufbereitungsarbeiten ein grösseres Mass annehmen, müsste man das Zurückhalten dieser Gase in Betracht ziehen. Es ist vorgesehen, sie durch Abkühlen bei niedriger Temperatur zu verflüssigen.

Die Kapazität der Wiederaufbereitungsanlagen für die Leichtwasserbrennelemente wird in den nächsten Jahren ungenügend sein, dies wahrscheinlich bis zur Inbetriebnahme der neuen Einheiten in La Hague und Windscale. Die Erweiterung der bestehenden Lagerbecken und der Bau neuer Becken dürfte diese ungenügende Kapazität ausgleichen.

9. Konditionierung der Abfälle

Die hochradioaktiven Spaltprodukte werden zuerst in flüssiger Form während fünf bis zehn Jahren in doppelwandigen Behältern aus rostfreiem Stahl gelagert. Nachher werden sie verfestigt. In der französischen Anlage La Hague ist vorgesehen, die Verglasungstechnik anzuwenden, deren industrielle Anwendung in Marcoule für Abfälle aus Reaktoren des Typs Gas-Graphit demonstriert worden ist. Vor der endgültigen Lagerung sehen alle Entsorgungskonzepte für solche Abfälle eine Zwischenlagerung von einigen Jahrzehnten in Silos vor.

10. Rückführung des Plutoniums und des zurückgewonnenen Urans

Das bei der Wiederaufarbeitung gewonnene Plutonium kann als Spaltmaterial in Brennelementen für Leichtwasserreaktoren wiederverwendet werden. Die Frage, ob diese Wiederverwendung sich wirtschaftlich rechtfertigen lässt, ist noch nicht endgültig entschieden. Eine vollständige Wiederverwendung des Urans und des Plutoniums ab 1985 würde im Jahr 2000 eine Ersparnis von etwa 25% natürlichem Uran und etwa 20% Anreicherungsdiensten bedeuten.

11. Versorgungssicherheit und wirtschaftliche Aspekte

Die Kernenergie ist eine zusätzliche Energiequelle für die Produktion von Elektrizität. Der wesentliche Unterschied zwischen Kernbrennstoff und fossilem Brennstoff besteht in der Lagerungsmöglichkeit. Ein Kernkraftwerk von 1000 MWe verwendet jährlich nur 30 Tonnen Brennstoff, der leicht und billig gelagert werden kann. Die in der Schweiz arbeitenden Kernkraftwerke besitzen an Ort und Stelle ein solches Lager, welches jeweils eine Betriebsautonomie von etwa zwei Jahren sicherstellt.

Der Anteil des Kernbrennstoffs an den kWh-Kosten ist für Kernkraftwerke gering, derjenige der Kohle oder des Oels für ein thermisches Werk dagegen bedeutend grösser. Das Uran bildet ungefähr 40% der Brennstoffkosten. Eine Verdoppelung des gegenwärtigen Preises des Urans würde eine Kostensteigerung von 0,4 Rp./kWh, also 7% des kWh-Gestehungspreises verursachen.

12. Proliferation

Im atomaren Bereich bezeichnet der Ausdruck «Proliferation» sowohl die Vermehrung der Anzahl atomarer Sprengkörper als auch die Zunahme der über solche verfügbaren Staaten oder Organisationen. Die Verhütung

der Proliferation gründet sich vor allem auf eine äusserst strenge Kontrolle des «empfindlichen» Spaltmaterials, welches für atomare Explosionen verwendbar ist. Die Anti-Proliferationsmassnahmen gelten sowohl für Plutonium sowie für um mehr als 20% angereichertes Uran.

Die verschiedenen Etappen des Brennstoffkreislaufs der Leichtwasserreaktoren bieten mehr oder weniger grosse Proliferationsrisiken. Unter den «empfindlichen»¹ Etappen nennen wir die Anreicherung, die Wiederaufbereitung, die Lagerung und den Transport von abgetrenntem Plutonium. Wir müssen dazu jedoch bemerken, dass die Etappen des Brennstoffkreislaufs von Leichtwasserreaktoren weder die einfachste noch die wirksamste Methode zur Erlangung von Kernwaffenmaterial darstellen.

Es gibt drei Kategorien von Massnahmen zur Verminderung der Proliferationsrisiken: die technischen Massnahmen, das System der Garantien, die institutionellen Verabredungen. Schliesslich werden alle Massnahmen, die internationale Spannungen abbauen, dazu beitragen, das Proliferationsrisiko zu vermindern. Insbesondere sind alle Massnahmen, die zu einer grösseren energetischen Unabhängigkeit führen, Antiproliferationsmittel.

* * *

Einleitung

Die als Brennstoff in Reaktoren verwendbaren Spaltstoffe * sind Uran-235, Uran-233 und Plutonium-239. Während man Uran-235 im natürlichen Uran findet, werden Uran-233 und Plutonium-239 durch Bestrahlung mit Neutronen aus Thorium-232 respektive Uran-238 gebildet. Deshalb werden die beiden letzten Substanzen brütbar * genannt. Wir beschränken uns hier auf den Uran-Zyklus, welcher heute in den meisten industriellen Reaktoren verwendet wird. Das Uran-235, welches mit 0,7% im natürlichen Uran enthalten ist, setzt Energie durch Spaltung * frei, welche ungefähr 7 Millionen elektrischer Kilowattstunden pro kg Uran-235 entspricht.

Die Verwendung des Urans in einem Kernreaktor ist nicht so einfach wie der Name «Brennstoff *» vermuten lassen könnte. Das Uran muss mehrere Etappen durchlaufen, ehe es in Form von Brennelementen in den Reaktor eingesetzt werden kann.

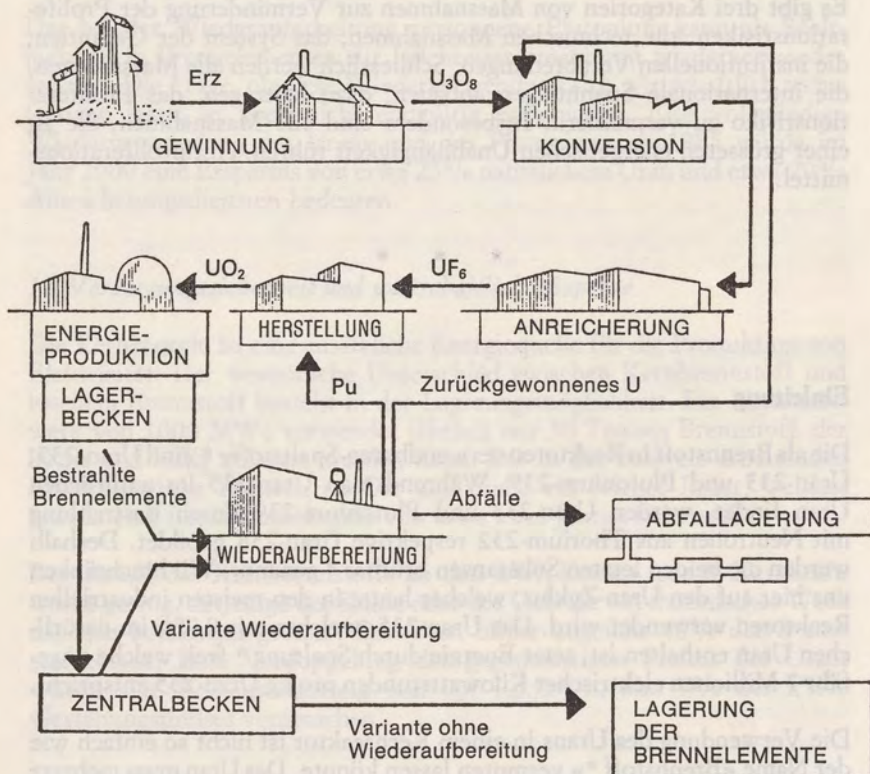
¹⁾ siehe 12.2.

*) Die mit einem Sternchen * bezeichneten Begriffe werden im Anhang Seite 60ff. erklärt.

Der vorliegende Bericht beschränkt sich auf Reaktoren, welche mit leichtem Wasser * betrieben und gekühlt werden. Sie sind heutzutage die am weitaus meist verbreiteten Reaktortypen. Auch die in der Schweiz verwendeten Reaktoren sind Leichtwasserreaktoren. Der Begriff Leichtwasserreaktor schliesst die Druckwasserreaktoren * (PWR) und die Siedewasserreaktoren * (BWR) ein. Da der Brennstoffkreislauf dieser beiden Reaktoren nur leichte Unterschiede aufweist, ist man berechtigt, vom Brennstoffkreislauf der Leichtwasserreaktoren zu sprechen.

Fig. 1 zeigt die verschiedenen Etappen des Brennstoffkreislaufes.

Fig. 1: Der Brennstoffkreislauf



Aus reaktorphysikalischen Gründen muss das zur Herstellung der Brennelemente für diese Reaktoren verwendete Uran in seinem spaltbaren Isotop, dem U-235, leicht angereichert werden. Das leichte Wasser, das

dazu dient, die Neutronen * zu bremsen und den Reaktor zu kühlen, absorbiert zu viele Neutronen, so dass die Verwendung von natürlichem Uran nicht zur Aufrechterhaltung einer Kettenreaktion * genügen würde. Diese künstliche Anreicherung beläuft sich auf ungefähr 3⁰/o.

Dieser Kreislauf beginnt mit der Gewinnung und der Konzentration des natürlichen Urans. Da die Anreicherung des Urans in der Gasphase vorgenommen wird, muss man das Uranoxyd in Uranhexafluorid umwandeln, welches sich als die passendste chemische Verbindung erwiesen hat. Dieses Verfahren nennt man Konversion. Die drei darauffolgenden Etappen sind die Anreicherung des UF₆, die Herstellung der Brennelemente und die Energieproduktion im Reaktor. Nach ihrer Entladung aus dem Reaktor werden die bestrahlten Brennelemente in einem dem Reaktor nahegelegenen Becken unter Wasser während mindestens eines Jahres gelagert. Nachher werden sie in Spezialbehältern zur Wiederaufbereitungsanlage transportiert. Um ein Absinken der Leistung zu verhindern, werden die Brennelemente aus dem Reaktor entladen, bevor das U-235 vollständig aufgebraucht ist. Abgesehen von den Spaltprodukten und den Aktivierungsprodukten, welche die hoch radioaktiven Abfälle darstellen, bleiben noch Uran und Plutonium übrig, die wiedergewonnen und neu in den Kreislauf eingegliedert werden können. Schliesslich müssen die radioaktiven Abfälle für ihre Zwischenlagerung verfestigt werden; zuletzt kommt dann die endgültige Lagerung (Entsorgung).

Um das Risiko der Proliferation von Kernwaffenmaterial zu vermindern, haben mehrere Länder seit 1976 beschlossen, für unbestimmte Zeit auf die Wiederaufbereitung zu verzichten. Dieser Beschluss schliesst den Verzicht auf die Rückgewinnung von sensitivem Material (U, Pu) und auf die Entwicklung einer neuen Methode für die definitive Entsorgung bestrahlter Elemente ein.

1. Gewinnung und Konzentration des Erzes

Das Uran hat einen nicht zu unterschätzenden Anteil an der Zusammensetzung der Erdkruste. Uran findet sich in konzentrierter Form in Adern (Pechblende *) oder in mehr oder weniger zerstreuter Form in Sedimenten, bituminösem Schiefer, Phosphaten und Meerwasser. Man kann es auch als Nebenprodukt aus Gold- oder Kupfererzen gewinnen. Die Konzentrationen sind äusserst verschieden und reichen von 3 mg pro Tonne für Meerwasser bis zu einigen hundert Kilogramm pro Tonne für Pechblende. Das natürliche Uran ist wenig radioaktiv (0,3 Ci pro Tonne); seine chemische Toxizität ist mit derjenigen des Bleis vergleichbar.

1.1 Analyse der Erzvorkommen

Eine Analyse der weltweiten Vorkommen und der Eindeckung der Bedürfnisse auf weite Sicht muss sich auf klar definierten Hypothesen stützen, sowohl was die Art der Vorkommen, als auch die Produktionskosten des Urans, sowie den Baurhythmus und den Typ der Kernkraftwerke betrifft. Die sicheren und zu Produktionskosten unter 130 \$ pro kg abbaubaren Uranvorräte werden von der OECD auf 2,6 Millionen Tonnen geschätzt, dies für den nicht-kommunistischen Teil der Welt (LV 1)¹. Geographisch sind sie folgendermassen verteilt: 27% in den USA, 15% in Südafrika, 11% in Australien, 11% in Schweden, 9% in Kanada, 6% im Niger, 5% in Namibia, 3% in Brasilien, 2% in Frankreich und die verbleibenden 10% in 22 Ländern. Die OECD gibt die geschätzten zusätzlichen Uranreserven, die mit Produktionskosten unter 130 \$ pro kg abgebaut werden können, mit 2,5 Mio Tonnen Uran an. Eine andere Arbeit (LV 2) gibt Auskunft über eine dritte Kategorie von Reserven: die spekulativen Reserven. Diese schwanken zwischen 7 und 15 Mio Tonnen Uran, die durch systematische Bohrungen entdeckt werden können. Diese sind ebenfalls für die nichtkommunistische Welt berechnet.

Zieht man ein Ansteigen der Zahl der Kernkraftanlagen im gegenwärtigen Rhythmus von 11% pro Jahr in Betracht, d. h. eine installierte Leistung von 100 000 MWe im Jahre 1978 auf 1 000 000 MWe²) im Jahre 2000, so kommt die OECD zum Schluss, dass die sicheren Uranvorräte, mit Produktionskosten unter 130 \$ pro kg, in den ersten Jahren des kommenden Jahrhunderts erschöpft sein werden. Diese Voraussage kann um einige Jahre verlängert werden, wenn man mit der Rückführung des wiederaufbereiteten Plutoniums und Urans in die Leichtwasserreaktoren rechnet, und um einige Jahrzehnte, wenn man die geschätzten zusätzlichen Uranreserven * mit Produktionskosten unter 130 \$ pro kg und die spekulativen Reserven * berücksichtigt. Die Dauer der Vorräte hängt aber vor allem von der weltweiten Wachstumsrate der Kernenergieproduktion ab. Diese Betrachtungen zeigen, dass die Beibehaltung einer Wachstumsrate von 11% pro Jahr, die rasche Einführung der schnellen Brüter * notwendig machen müsste. Diese werten das Isotop 238 des Urans auf, indem sie es auf wirkungsvolle Weise in Plutonium umwandeln, welches dann seinerseits als Brennstoff dient. Der Rhythmus der Einführung der schnellen Brüter ist jedoch beschränkt: wenn man nicht über angereichertes Uran verfügt, muss man zuerst eine Anfangsmenge von ungefähr 5 Tonnen Plutonium haben, um einen schnellen Brüter in Betrieb zu setzen. Dies entspricht der jährlichen Produktion von dreissig Leichtwasserreaktoren der Leistungsklasse 1000 MWe. Ausserdem muss man über

¹) (LV) verweist auf die Nummern im Literaturverzeichnis.

²) Mittel zwischen schwacher und starker Zunahme. Heute wird dieser Wert im allgemeinen als zu hoch betrachtet.

leistungsfähigere Wiederaufbereitungsanlagen als die heute gebräuchlichen verfügen, um einen derartigen Brennstoffkreislauf unterhalten zu können.¹⁾

1.2 Produktion

Die Ausbeutung der Uranminen geschieht meistens mit den traditionellen Techniken, im Tagbau oder in Stollen. Da der Gehalt des Erzes schwach ist, muss man es konzentrieren. In den in der Nähe der Minen gelegenen Konzentrationsanlagen werden die Erze zerkleinert und zerquetscht. Das Uran wird auf chemischem Wege extrahiert, filtriert und getrocknet. Auf diese Weise erhält man ein Konzentrat von U_3O_8 , gewöhnlich «yellow cake» genannt, das zur Konversionsfabrik gebracht wird. Die Rückstände oder Abraumhalden, die heute schon sehr umfangreich sind, 200 Mio Tonnen (LV 3), bleiben an Ort und Stelle. Sie geben Radon ab, ein radioaktives Edelgas, das durch den Zerfall des Thoriums-230 freigesetzt wird (Halbwertszeit 80 000 Jahre) und welches die lokale Radioaktivität * permanent erhöhen kann (LV 4). Allerdings ist dieses Risiko seit einigen Jahren erkannt worden und eine Überwachung, resp. Überdeckung dieser Abraumhalden wird heute allgemein gefordert.

Diese Massnahmen sind nötig um z. B. zu vermeiden, dass das auf diesen Halden gelagerte Material als Baumaterial Verwendung finden kann, wie es in der Vergangenheit vereinzelt geschehen ist (LV 5).

Das Einatmen der Zerfallsprodukte des Radons, die ebenfalls radioaktiv sind, kann zur Erhöhung des Lungenkrebsrisikos beitragen, besonders bei Rauchern. Das bedeutet für die Bergarbeiter in den Stollen ein Risiko, das um so grösser war, da es lang unerkannt blieb. Zwei Berichte über ungefähr 5000 tschechische (LV 6) und 3366 amerikanische Kumpel (LV 7) erwähnen noch eine 5- bis 6mal höhere Sterblichkeit als normal an Lungenkrebs (212 resp. 70 festgestellte Todesfälle gegen über 43 und 12 erwarteten). Diese Tatsache wird der Strahlung zugeschrieben, welcher diese Arbeiter im Laufe der fünfziger Jahre ausgesetzt waren. Seither wurde dieses Risiko sehr stark herabgesetzt, besonders durch eine gute Ventilation der Stollen (LV 8).

Eine andere Studie berichtet über 227 000 südafrikanische Bergarbeiter, die eine viel geringere kumulierte Dosis * erhalten hatten als die in den Berichten (LV 6) und (LV 7) angegebene und bei denen sich nichts Abnormes gezeigt hat (LV 9).

¹⁾ Eine von VSE, BBC, Sulzer veröffentlichte Arbeit erklärt, dass der Bau von schnellen Brüttern in der Schweiz nicht vor dem Jahr 2000 in Aussicht genommen wird. «Elektrizität und Wärme: Versorgungskonzept der Schweiz bis zum Jahre 2000.»

Verbesserte Gewinnungstechniken werden geprüft, um Vorkommen, deren Urangehalt weniger reich ist, zu annehmbaren und umweltfreundlicheren Bedingungen abbauen zu können. Diese Techniken streben danach, aus den Vorkommen nur die nützlichen Erze zu holen, unter anderem Uran. In den Vereinigten Staaten hat man in zwei industriellen Anlagen begonnen, das Uran aus der Phosphorsäure zu extrahieren, die zur Düngemittelherstellung verwendet wird. Was die Technik des «In Situ»-Auswaschens betrifft, so hat ihre kommerzielle Anwendung in Texas begonnen, wo sich uranreiche Tonvorkommen zwischen undurchlässigen Schichten befinden: ein Lösungsmittel wird eingespritzt und, wenn es Uran gelöst hat, wieder aufgesogen. Das Uran wird anschließend durch Ionenaustauschprozesse* aus dem Lösungsmittel extrahiert. Die Gewinnung von Uran aus Meerwasser mittels Filtern oder mit Hilfe von urankonzentrierenden Algen befindet sich noch im Laborstadium. Die Produktion von Uran im nicht kommunistischen Weltteil betrug 1978 34 000 Tonnen. Die Aufteilung zwischen den Ländern ist die folgende: 42% in den USA, 20% in Kanada, 12% in Südafrika, 8% in Namibia, 6% im Niger und in Frankreich und die restlichen 6% in 7 Ländern (LV 1).

Der Urangehalt der ausgebeuteten Erzvorkommen schwankt je nach Region zwischen 0,02 bis 3%. Andererseits sinkt er meistens mit der Zeit. Z. B. fiel der mittlere Gehalt des in den USA gewonnenen Urans von 2,1 kg U_3O_8 pro Tonne Erz im Jahre 1966 auf 1,5 im Jahre 1976 (LV 10).

1.3 Lage in der Schweiz

In der Schweiz begann 1956 die Suche nach Uran. Detaillierte radio-metrische und geologische Aufnahmen der wichtige Anomalien aufweisenden Regionen decken eine Fläche von 1000 km². Bis jetzt wurde kein wirtschaftlich rentables Vorkommen entdeckt (LV 11 und 12).

2. Konversion

Um ihre Anreicherung zu ermöglichen, werden die von den Minen kommenden Uranoxidkonzentrate in Uranhexafluorid umgewandelt. Es gibt für diese Konversion mehrere Verfahren. Wir werden uns auf die Beschreibung eines einzigen beschränken (LV 13).

Das Uranoxid (U_3O_8) wird durch Wasserstoff zu Urandioxyd reduziert, das mit Fluorwasserstoffsäure Urantetrafluorid bildet. Der Fluorgehalt dieses Tetrafluorids wird durch Behandlung mit elementarem Fluor* erhöht, was zu Uranhexafluorid führt. Dieses Hexafluorid, welches bei

Raumtemperatur fest ist, wird bei 56° C gasförmig. Es wird durch Destillation gereinigt.¹⁾

Die Konversionswerke müssen, wie alle chemischen Werke, die mit hochtoxischen und hochkorrosiven Produkten, wie Fluorwasserstoffsäure, Fluor und Uranhexafluorid umgehen, entsprechend konzipiert sein.

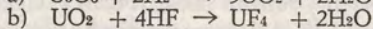
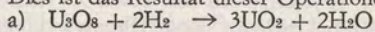
Ein normal grosses Konversionswerk, das etwa fünfzig Kernkraftwerke von je 1000 MWe versorgt, gibt im Jahr ungefähr 5 Tonnen fluorierter Produkte in die Umgebung ab (LV 16). Als Vergleich: Die Aluminiumfabrik Steg VS gibt pro Jahr 12 Tonnen gasförmige Fluoride an die Atmosphäre ab sowie 175 Tonnen staubförmige Fluoride²⁾. Zu den im Laufe des normalen Betriebes abgegebenen Mengen eines Konversionswerkes muss man noch die bei Pannen oder Störfällen möglicherweise entweichenden Produkte hinzurechnen. Im Juli 1977 entwichen z. B. in Pierrelatte wegen einer falschen Handhabung mehrere Tonnen Uranhexafluorid.

Für das Personal stammen die hauptsächlichen Gefahren von der chemischen Toxizität * der Fluorwasserstoffsäure, des Fluors und des Uranhexafluorids. Ferner besteht auch die Gefahr der Exposition durch ionisierende Strahlung *, die besonders den das Uran begleitenden Verunreinigungen zuzuschreiben ist. Im allgemeinen geht man davon aus, dass in dieser Etappe des Kreislaufs die Dosen schwach sind; sie könnten durch Verwendung des Urans aus Wiederaufbereitungsanlagen erhöht werden (siehe Kap. 10, Rückführung), denn in diesem Stadium der Operationen werden Spuren von noch vorhandenen Spaltprodukten * im wiederverwendeten Uran abgeschieden.

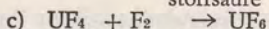
3. Anreicherung

Die Leichtwasserreaktoren können nicht mit natürlichem Uran betrieben werden. Man muss deshalb die Konzentration des Urans 235 von 0,7 auf ungefähr 3% erhöhen. Dieses Verfahren, «Anreicherung» genannt (siehe Fig. 1), ist schwierig auszuführen, denn die Verhaltensunterschiede der beiden Isotope * sind sehr klein: sie besitzen die gleichen chemischen aber ganz leicht voneinander abweichende physikalische Eigenschaften.

¹⁾ Dies ist das Resultat dieser Operationen, in chemischen Formeln ausgedrückt:



Fluorwasser-
stoffsäure



²⁾ Diese Werte wurden uns freundlicherweise durch ALUMINIUM SCHWEIZ AG, Zürich, zur Verfügung gestellt.

3.1 Anreicherung durch Diffusion

Das heute am häufigsten angewendete Verfahren stützt sich auf das Prinzip der Gasdiffusion. Man verdampft das flüchtige * Uranhexafluorid (UF_6). Dieses Gas wird anschliessend in einem mit einer porösen Wand versehenen Raum komprimiert. Das Hexafluorid des U-235 diffundiert leichter durch diese Wand als Hexafluorid des U-238. Nach dem Passieren der Wand ist das Gas sehr leicht angereichert. Die Anreicherung an U-235 ist aber nach einem Schritt noch so gering, dass dieses Verfahren ungefähr 1200mal wiederholt werden muss, um den Gehalt von 3% zu erreichen. Die Anreicherung durch Gasdiffusion ist die Phase des Kreislaufs, die am meisten Energie verbraucht. Dieses Verfahren erfordert ungefähr 2500 kWh pro Trenn-Arbeitseinheit (TAE)¹⁾, was etwas weniger als 4% der anschliessend aus diesem Uran produzierten Energie darstellt. Die USA sind die wichtigsten Lieferanten von Anreicherungsdiensten, gefolgt von Russland und, seit 1979, von Frankreich.

3.2 Anreicherung durch Zentrifugieren

Ein zweites Anreicherungsverfahren erreicht jetzt sein industrielles Stadium: die Zentrifugierung. Das schwerste Isotop * sammelt sich an der Peripherie der Zentrifuge und das leichteste in der Mitte. Der Energieverbrauch ist zehnmal geringer als beim Diffusionsverfahren (LV 4). Eine wirtschaftliche Anlage (ungefähr 2 Mio TAE/Jahr) benötigt ungefähr 150 000 Zentrifugen (LV 15), die mit etwa 80 000 Umdrehungen/Min. betrieben werden. Die Versuchswerke von Almelo in den Niederlanden und von Capenhurst in England, mit einer Gesamtleistung von ungefähr 50 000 TAE, sind seit 1978 in Vollastbetrieb. Zwei Demonstrationswerke mit einer Leistung von je 200 000 TAE, an den gleichen Standorten, haben ihre Nominalproduktion 1979 erreicht.

3.3 Materialbilanz

Um die jährlich in einem 1000-MWe-Reaktor gebrauchte Menge angereicherten Urans zu produzieren, braucht man ungefähr 180 Tonnen Natururan. Beim Verlassen der Anreicherungsanlage erhält man 30 Tonnen angereichertes Uran und 150 Tonnen auf etwa 0,2% abgereichertes Uran in Form von Uranhexafluorid (LV 16). Obwohl seit etwa 30 Jahren in den USA grosse Mengen abgereicherten Urans in dieser Form gelagert sind, wäre es vorzuziehen, das UF_6 in nicht flüchtiges und nicht korrosives

¹⁾ Die Leistung der Anreicherungswerke wird oft in Trenn-Arbeitseinheiten TAE (englisch SWU = separative work unit) angegeben. Eine 1000-MWe-Zentrale benötigt alles in allem ungefähr 100 000 TAE pro Jahr.

Uranoxid umzuwandeln. Abgereichertes Uran wird in speziellen Fällen als Ballast- oder Abschirmmaterial verwendet.

3.4 Einfluss auf die Umwelt

Da die Radioaktivität des Urans schwach ist, stellen sich die Hauptprobleme bei der Anreicherung nicht auf radiologischer, sondern auf chemischer Ebene: Das Anreicherungsverfahren für ein Werk von 1000 MWe stösst jährlich 0,7 Tonnen Fluor aus (LV 16).

Die Anreicherungswerke sind so ausgelegt, dass sie zahlreiche Kernkraftwerke beliefern können. Das Werk Eurodif in Tricastin bei Pierrelatte wird 80 bis 100 Kernkraftwerke beliefern können. Es ist vorgesehen, dass es im Endausbau 10,8 Mio TAE/Jahr liefern wird. Um arbeiten zu können, benötigt das Werk elektrische Energie. Die installierte Leistung beträgt ca. 3000 MWe. Produziert man diese Elektrizität auf thermischem Wege (fossil oder nuklear), bedeutet dies eine Abwärme von 6000 MWt (siehe Bericht SNG «Die thermischen Auswirkungen von Kernkraftwerken»). Am Standort des Eurodifwerkes sind vier Kernkraftwerke (3700 MWe) zu dessen Versorgung mit elektrischem Strom aufgestellt worden.

3.5 Arbeitshygiene

Strenge Vorsichtsmassnahmen müssen getroffen werden, um zu verhindern, dass die Arbeiter akute oder chronische Fluor- und Uranvergiftungen erleiden. In diesem Stadium des Kreislaufs handelt es sich um die chemische Toxizität des Urans; oberhalb einer Anreicherung von 10% überwiegt die Radiotoxizität * (LV 17). Die Atmosphäre des Werkes darf im Mittel nicht mehr als 0,05 mg Uran, 2,7 mg Fluorwasserstoffsäure und 1,6 mg Fluor je Kubikmeter enthalten.¹⁾

4. Herstellung der Brennelemente

4.1 Beschreibung des Herstellungsverfahrens

In die industriellen Reaktoren wird das Uran in Form von Brennelementen (Brennstäben) eingesetzt. Diese können sehr verschiedene Formen

¹⁾ Die tödliche Dosis für Natururan für 50% der beobachteten Tiere (LD₅₀) schwankt zwischen 1,5 und 42 mg/kg Lebendmaterie, je nach der Art der Tiere und der Verabreichungsweise (LV 18).

haben, besitzen aber alle eine gemeinsame Charakteristik: der Brennstoff ist in einer wasserdichten Hülle eingeschlossen, welche die erzeugte Wärme an das Kühlmittel abgibt, aber die radioaktiven Spaltstoffe* zurückbehält.

Etwa zehn Brennelementherstellungsfabriken sind in 7 verschiedenen Ländern in Betrieb, die entweder Reaktoren liefernden Firmen oder am Brennstoffkreislauf interessierten Gesellschaften gehören.

Die Herstellungstechniken sind im allgemeinen recht konventionell, wenn man von den strengen Kontrollen und hohen Qualitätsanforderungen abieht. Zwischen der Ankunft des angereicherten Uranhexafluorids (UF_6) und der Lieferung der fertigen Brennelemente sind zahlreiche Operationen nötig. Diese können in vier Hauptphasen gruppiert werden:

- die Konversion des UF_6 in Uranoxidpulver (UO_2),
- die Herstellung der UO_2 -Tabletten,
- die Herstellung der Brennelementstäbe,
- die endgültige Zusammenstellung der Brennelemente.

Die Stäbe haben einen Durchmesser von ca. 1 cm und eine Länge von ungefähr 4 m. Eine typische Anordnung ist zur Zeit für einen Siedewasserreaktor ein Bündel von 8×8 Stäben mit etwa 15 cm Seitenlänge und für einen Druckwasserreaktor ein Bündel von 17×17 Stäben mit einer Breite von etwa 20 cm. Diese Anordnung nennt man «Brennelemente». Sie wiegen etwa das Doppelte des in ihnen enthaltenen Urans.

In einer Brennelementfabrik sind etwa ein Drittel des Personals mit der Sicherstellung der Qualität beauftragt: diese schliesst die Fabrikations- und Ausführungskontrolle sowie die Registrierung der Elemente ein. Die zur Sicherstellung der Qualität getroffenen Vorsichtsmassnahmen sind sehr weitgehend. Wir wollen zwei Beispiele anführen: die Hüllrohre, deren Dichtigkeit und Dimensionspräzision von allerhöchster Wichtigkeit ist, werden alle sehr genau gemessen und mittels Ultraschall auf ihrer ganzen Länge geprüft. Nach dem Abfüllen werden alle Stäbe kontrolliert, um sicher zu gehen, dass die Brennstofftabletten richtig plaziert sind und die richtige Anreicherung haben.

Bis zu Beginn der 70er Jahre erlitt eine gewisse Anzahl Brennelementstäbe im normalen Betrieb Hüllrohrrisse und Deformaionen. Konzeptionsverbesserungen haben die Quote der Hüllrohrrisse sehr vermindert. So hat man z. B. im Kernkraftwerk Mühleberg seit 1974, bei den neu eingesetzten Brennelementen mit kleinerem Brennelementstabdurchmesser, keine Hüllrohrrisse mehr entdeckt.

4.2 Herstellung der Brennelemente mit Plutonium

Das Plutonium, das sich in den Brennelementen während ihres Einsatzes im Reaktor bildet, ist teilweise spaltbar und trägt ebenfalls zur Energieproduktion bei. Das Plutonium, das nach dem Entladen der Elemente in diesen verbleibt, kann in neuen Elementen wiederverwendet werden, was eine Ersparnis an Uran und Anreicherungsarbeit bedeutet. Solche Elemente sind zur Zeit versuchsweise in einigen Reaktoren im Einsatz. In der Schweiz wurden vier solche Elemente im Sommer 1978 in einem der Beznauereaktoren eingesetzt.

Das Plutonium wird in den Brennelementen in Form von Oxid (PuO_2) eingesetzt, welches dem natürlichen UO_2 vor der Herstellung der Tabletten beigemischt wird. Der Anteil des PuO_2 ist ungefähr 3%. Aus Strahlenschutzgründen* werden alle Manipulationen mit Substanzen, die Plutonium enthalten, in abgeschlossenen Handschuhboxen mit Unterdruck vorgenommen.

4.3 Einfluss der Herstellungswerke auf die Umwelt

Man muss unterscheiden zwischen Werken, in denen Brennelemente nur mit Uran hergestellt werden und jenen, in welchen die Elemente ein Gemisch von Uran und Plutonium enthalten.

Die ersteren, welche 99% der Brennelemente der Welt herstellen, haben keine nennenswerten Einflüsse auf ihre Umgebung. Bei der zweiten Gruppe, von denen es 7 gibt (4 in Europa und 3 in den USA), unterscheidet man zwischen zwei Typen:

- Fabriken zur Herstellung der Brennelemente für die schnellen Brüter* und
- Fabriken zur Herstellung der Brennelemente für Leichtwasserreaktoren.

Diese zweite Gruppe sind Versuchswerke von bescheidenem Ausmass. Bei Normalbetrieb sind ihre Abgaben weit unterhalb der vorgeschriebenen Grenzen.

4.4 Strahlenbelastung des Personals

Die Werke, die Brennelemente aus Uran herstellen, sind derart konzipiert, dass die von den Arbeitern aufgenommenen Dosen* nur einen Bruchteil der zulässigen Dosen darstellen. Dasselbe gilt für die Herstellungswerke, in denen Plutonium gehandhabt wird. In den letzteren wer-

den alle Handhabungen in abgeschlossenen Boxen oder Zellen ausgeführt, und alle dem Personal zugänglichen Zonen sind gemäss den Vorschriften der in Kraft stehenden Reglemente überwacht. Diese Reglemente werden auch bei der Konzeption der künftigen industriellen Einrichtungen gelten.

Da eine Verseuchungseventualität des Personals durch Plutonium nicht vollständig ausgeschlossen werden kann, sind Dekontaminationstechniken entwickelt worden. Speziell erwähnt sei das Lungenauswaschen mit einer physiologischen Lösung, das die Entfernung eines Teils der eingeatmeten Partikel auf mechanischem Wege ermöglicht (LV 19).

4.5 Einfluss des Plutoniums auf Personal und Umwelt

Das Plutonium tritt direkt in mehreren Etappen des Brennstoffkreislaufes auf, d. h. bei der Herstellung, dem Transport und der Wiederaufbereitung. Wir behandeln jedoch in diesem Kapitel die Gesamtheit dieser Probleme, weil sie hier zum ersten Mal auftreten.

In der westlichen Welt handhaben mehr als 40 Werke Plutonium in ansehnlichen Mengen. Bis 1977 betrugen die im militärischen Sektor verarbeiteten Mengen ungefähr 300 Tonnen und diejenigen im zivilen Sektor 50 Tonnen (LV 20). Die unfallbedingten Freisetzungen von Plutonium in die Atmosphäre betrugen für die Gesamtheit dieser Werke, sowohl für die militärischen als auch für die zivilen, einige hundert Gramm (LV 20). Während desselben Zeitraums verpufften bei den Versuchen mit Atombomben ungefähr 5 Tonnen Plutonium in die Atmosphäre (LV 21).

Ein vor kurzem abgefasster Bericht gibt die Kontaminationsstatistiken für das in allen oben erwähnten Werken arbeitende Personal (LV 22). Seit der Entdeckung des Plutoniums im Jahre 1942 schätzt man bis 1974 die Zahl der Amerikaner, die in dieser Industrie gearbeitet haben, auf 17 000. Die Zahl der Unfälle durch Einatmung von Plutonium ist gering. Von 1943 bis 1945 waren am Projekt Manhattan arbeitende Angestellte Plutonium-Aerosolen ausgesetzt. Die dabei aufgenommenen Aktivitätsmengen lagen zwischen 5 und 420 nCi¹⁾. Die einzigen beobachteten Symptome waren diejenigen, die man für irgendeine vergleichbare, nicht bestrahlte Gruppe männlicher, in den USA lebender Personen erwarten konnte. Zu erwähnen ist, dass in den USA die ärztlichen Befunde der in dieser Industrie beschäftigten Arbeiter seit 30 Jahren in ein Spezialregister eingetragen werden (US Transuranium Registry).

In der Wiederaufbereitungsanlage Windscale erhielten 14 Arbeiter höhere Dosen als zulässig. Bis 1978 wurde kein Tumor beobachtet; aber die

¹⁾ Die gegenwärtigen Normen gestatten eine Inkorporation von 40 nCi pro Jahr.

lange Latenzzeit für Knochentumore erfordert eine längere Beobachtungsdauer. Wie für die am Manhattanprojekt beschäftigten Angestellten bietet auch hier die beschränkte Anzahl der beobachteten Fälle keine genügende Statistik, um gültige Schlüsse ziehen zu können. Dennoch hat die British Nuclear Fuel Limited, welche die Wiederaufbereitungsanlage von Windscale betreibt, akzeptiert, den Witwen von zwei Angestellten, die nach Kontakt mit Plutonium an Krebs starben, Entschädigungen auszurichten. In beiden Fällen hatte die Obduktion Spuren von Plutonium nachgewiesen. In La Hague wurde ein Berufskrankheitsfall von der staatlichen Sozialversicherung anerkannt; eine zweite steht noch zur Diskussion. Wir möchten jedoch festhalten, dass diese Entscheide nicht als ein wissenschaftlicher Beweis des Zusammenhangs zwischen der Plutoniumvergiftung und den gefundenen Karzinomen angesehen werden können.

5. Einsatz im Reaktor

Einmal in den Reaktor eingesetzt, produziert der Brennstoff Wärme. Die Brennelemente bleiben während 3 bis 4 Jahren im Reaktor. Bei laufender Anlage findet im Brennstoffbereich die Kettenreaktion * statt (siehe SNG Bericht «Physikalische und technische Grundlagen der Kernenergie»). Dabei wird der Spaltstoff Uran-235 und ein Teil des im Reaktor produzierten Plutoniums durch Neutroneneinfang in leichtere Elemente gespalten, die, wegen ihres Neutronenüberschusses, alle radioaktiv sind. In einer 1000-MWe-Anlage finden pro Sekunde rund 10^{20} , also hundert Trillionen Spaltungen statt. Die im Innern des Brennstoffs durch Bremsung der Spaltprodukte — diese fliegen in der Grössenordnung von Tausendstel von Millimetern weit — entstehende Wärme wird ins umgebende Wasser weitergeleitet, welches als Wärmeträger dient. Im Siedewasserreaktor (BWR) verdampft dieses im Reaktor selber und wird von dort direkt auf die Turbine geleitet. Im Druckwasserreaktor (PWR) findet kein Verdampfen im ersten Kreislauf statt. Dampf wird mit Hilfe von Dampferzeugern im Sekundärkreislauf gebildet.

5.1 Inventar

In einem 1000-MWe-Kernkraftwerk des Typs BWR befinden sich rund 750 Brennelemente und 200 im Kernkraftwerk Typ PWR. Beide Anlagen benötigen pro Jahr etwa 30 Tonnen Urandioxyd mit 2,5% (BWR) und 3,5% (PWR) angereichertem Uran (siehe Kapitel 3). Diese Menge stellt ein Viertel (BWR) bis ein Drittel (PWR) des Gesamtinventars dar. Im Gleichgewichtszustand enthält ein BWR 4, ein PWR 3 Generationen von Brennelementen. Die ältesten werden beim jeweiligen Brenn-

stoffwechsel durch neue Brennelemente ersetzt. Kurz vor dem jährlichen Brennstoffwechsel ist das im Reaktor vorhandene Inventar an Spaltprodukten am grössten und beträgt etwa 17 Mia Curie (LV 21).

Die wesentlichen Daten einiger Spaltprodukte sind im Bericht der SNG «Die Lagerung radioaktiver Abfälle» aufgeführt. Die Aktivitäten dieser verschiedenen radioaktiven Isotope, gekoppelt mit ihrer Radiotoxizität stellen das Gefährdungspotential eines Kernkraftwerkes dar.

5.2 Handhabung

Die Aktivität des leicht angereicherten Urans ist derart gering, dass neuer Brennstoff ohne spezielle Strahlenschutzmassnahmen gehandhabt werden kann. Vorsicht ist einzig wegen des bestehenden Kritikalitätsrisikos * geboten. Dieses kann jedoch durch einfache geometrische Massnahmen (Sicherstellen eines minimalen Abstandes zwischen den Brennelementen) beliebig klein gemacht werden. Mit Reaktorbrennstoff ist bis heute ausserhalb von Reaktoren noch nie ein Kritikalitätsunfall vorgekommen.

Nach dem Einsatz im Reaktor werden die hochaktiven Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren nur unter Wasser bewegt. Zwei bis drei Meter Wasser sind notwendig, um die Strahlung der Brennelemente wirksam abzuschirmen. Einer der wahrscheinlichsten Unfälle ist der sogenannte «Brennelement-Unfall», bei dem ein Brennelement fallengelassen wird, wobei ein Teil der gasförmigen und leicht flüchtigen * Spaltprodukte in das Reaktorgebäude entweicht. In den Vorausberechnungen zur Abschätzung der Konsequenzen nimmt man immer an, dass dieses Element in den Reaktor zurückfällt und dabei eine Reihe weiterer Brennelemente beschädigt. Im ungünstigsten Fall können dabei etwa 20 000 Ci Edelgas- und 5000 Ci Iodaktivität ins Reaktorgebäude freigesetzt werden. Eine für diesen Fall ausgelegte Notabluftanlage sorgt dafür, dass in der Umgebung des Kraftwerkes die Dosisbelastung unterhalb der gesetzlichen Limiten bleibt.¹⁾

5.3 Betrieb

Bei Normalbetrieb geben die Brennelemente keine Radioaktivität an den Primärkreislauf ab. Die Radioaktivität im Primärkreis besteht aus Neutronen-Aktivierungsprodukten der Bestandteile des Wassers und

¹⁾ Ein solcher Vorfall wird gemäss den ASK-Richtlinien für Kernanlagen (R-11) unter Störfall mit kleiner Eintrittswahrscheinlichkeit eingereiht (10^{-2} — 10^{-4} mal pro Reaktorjahr). Dabei darf nach der gesetzlichen Vorschrift für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung pro Ereignis keine höhere Dosis als 100 mrem vorliegen.

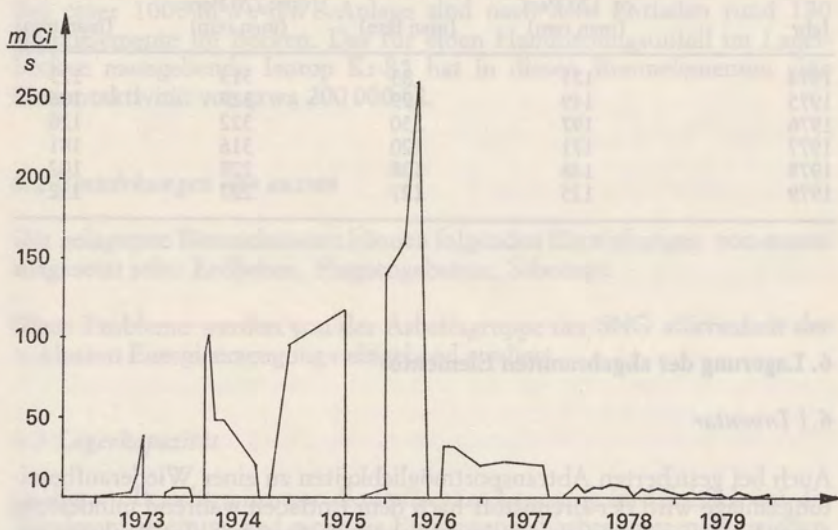
darin enthaltener Verunreinigungen. Diese Aktivität ist schwach und die Mehrzahl der gebildeten Radioelemente haben eine kurze Halbwertszeit.

Der Primärkreislauf wird jedoch von einer grösseren Menge von radioaktiven Produkten kontaminiert, wenn Defekte an den Brennelementhüllrohren auftreten.

In den ersten Jahren war dies recht häufig der Fall. Die Schadenmechanismen (chemische Veränderung des Hüllmaterials durch Wasserstoffanlagerung, mechanische Wechselwirkung der Uranoxidtabletten mit dem Hüllmaterial und kollabierende Hüllrohre) wurden erkannt und konnten durch verbesserte Fabrikationsmethoden, geänderte Brennstoffgeometrie, aber auch durch spezielle Betriebsvorschriften (Brennstoffschonprogramm) weitgehend eliminiert werden.

Figur 2 (LV 24) zeigt den Verlauf der Abgasaktivität, gemessen am Ausgang des Kondensators*, während der ersten sieben Betriebsjahre des Kernkraftwerkes Mühleberg (336 MWe brutto).

Fig. 2: Abgasaktivität gemessen am Ausgang des Kondensators



Die Abgasaktivität ist ein direktes Mass für die Brennelementqualität. Aus der Figur geht deutlich hervor, dass nach dem Entladen der letzten Erstkernelemente im Sommer 1976 ein markanter Rückgang (Faktor 10) festzustellen ist, der auch in den folgenden Jahren anhält.

Das radioaktive Gasgemisch wird anschliessend durch ein langes Rohrleitungssystem (Verzögerungsstrecke) und diverse Aktivkohlefilter gepumpt. Dabei verschwinden die kurzlebigen Aktivitätsanteile, so dass die Abgaberaten am Kamin um einen Faktor 20 bis 500 kleiner sind (LV 25).

Die Umweltbelastung der Schweiz durch Leichtwasserreaktoren wird im Bericht der SNG «Emissionen radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken im Normalbetrieb» behandelt.

Die Jahresbelastung des Personals in den drei Schweizer Kraftwerken ist in der folgenden Tabelle 1 zusammengestellt (gesamte Strahlenbelastung in man-rem¹⁾). Bei der Handhabung der bestrahlten Brennelemente ist das Personal einer gewissen Strahlung ausgesetzt. Die daraus resultierende Dosis beträgt jedoch nur einige Prozent der Jahresbelastung.

Tabelle 1: Totale Jahresbelastung des Personals

Jahr	Mühleberg (300 MWe)		Beznau I und II (700 MWe)	
	eigenes Personal ca. 120 Pers. (man rem)	Fremd- personal (man rem)	eigenes Personal ca. 270 Pers. (man rem)	Fremd- personal (man rem)
1974	121	83	313	123
1975	149	99	329	106
1976	197	130	322	120
1977	171	120	316	181
1978	148	128	228	102
1979	125	127	227	132

6. Lagerung der abgebrannten Elemente

6.1 Inventar

Auch bei gesicherten Abtransportmöglichkeiten zu einer Wiederaufbereitungsanlage wird der Brennstoff nach dem Entladen während mindestens eines Jahres im Brennelementlagerbecken am Standort des Reaktors gelagert. Dabei klingen die kurzlebigen Spaltprodukte* und insbesondere auch das für Reaktorunfallbetrachtungen wesentliche Isotop I-131 vollständig ab. Anschliessend wird eine Abtransportkampagne durchgeführt,

¹⁾ Diese Dosis beinhaltet auch den durch Direktstrahlung des radioaktiven Stickstoffes (N-16) bedingten Anteil.

bei der, für den folgenden Brennelementwechsel, im Lagerbecken wieder Platz frei gemacht wird. Die Lagergestelle für die Brennelemente sind so dimensioniert, dass eine unbeabsichtigte Kettenreaktion * selbst mit frischem Brennstoff nicht möglich ist. Der Abstand der Bündel ist grösser als im Reaktor, und zwischen ihnen befindet sich zusätzliches Neutronenabsorbermaterial.

Die Kühlung des Lagerbeckens ist, wie alle wichtigen Systeme, doppelt vorhanden. Auch bei vollem Becken dürfte jederzeit eine Kühlkette ausfallen; das Reservesystem würde sich sofort einschalten.

Angesichts der beträchtlichen Wassermassen würde ein Ausfall der Kühlung eine Temperaturerhöhung von ungefähr 1°C/Stunde zur Folge haben. Bei einem längeren Andauern des Störfalles würde ein Sieden des Beckenwassers erst nach ca. 3 Tagen auftreten.

In dieser Kühlkette befinden sich auch Harzfilter, die feste und gelöste Spaltprodukte, die durch eventuell defekte Brennelemente ins Beckenwasser geraten sind, zurückhalten. Die Harze dieses Filters gehören zum mittelaktiven Abfall eines Kernkraftwerkes.

Bei einer 1000-MWe-BWR-Anlage sind nach dem Entladen rund 180 Brennelemente im Becken. Das für einen Handhabungsunfall im Lagerbecken massgebende Isotop Kr-85 hat in diesen Brennelementen eine Gesamtaktivität von etwa 200 000 Ci.

6.2 Einwirkungen von aussen

Die gelagerten Brennelemente können folgenden Einwirkungen von aussen ausgesetzt sein: Erdbeben, Flugzeugabsturz, Sabotage.

Diese Probleme werden von der Arbeitsgruppe der SNG «Sicherheit der nuklearen Energieerzeugung» eingehend studiert.

6.3 Lagerkapazität

In diesem Bericht wird nur die temporäre Lagerung im Hinblick auf die Wiederaufbereitung und nicht die Entsorgung abgebrannter, nicht wiederaufbereiteter Brennelemente behandelt.

Wegen der unsicheren weltpolitischen Lage hinsichtlich der Wiederaufbereitungsfrage (siehe Abschnitt 8 und 12) und zur Erhöhung der Betriebsflexibilität wurden bei praktisch allen Leichtwasserreaktoren der Welt sogenannte Kompaktlagergestelle eingebaut. Damit erreichte man

eine Verdoppelung der Lagerkapazität, was im konkreten Falle Mühleberg bedeutete, dass heute im Lagerbecken Platz für einen vollen Kern und Nachladungen für 6 Jahre vorhanden ist. In den neuen Anlagen Gösgen und Leibstadt wurde gleich von Anfang eine wesentlich grössere Lagerkapazität eingeplant.

Wenn die Wiederaufbereitungskapazität für längere Zeit ungenügend bleiben sollte, müsste weiterer Lagerplatz entweder durch Erweiterung der Kapazität im Kernkraftwerk oder bei der Wiederaufbereitungsanlage oder aber durch die Erstellung eines zentralen Zwischenlagers geschaffen werden. Wenn alle Lagermöglichkeiten erschöpft wären, bliebe nur noch das Abstellen der Anlagen übrig. An einer Studie über die zentrale Lagerung abgebrannter Brennelemente wird derzeit gearbeitet. Unter den möglichen Varianten wird auch eine Wiederverwendung der Kaverne Lucens untersucht.

Bei der langfristigen Lagerung der Brennelemente in Wasser stellt sich die Frage nach der Korrosion des Hüllrohrmaterials. Bisherige Erfahrungen zeigen, dass Standzeiten bis über 10 Jahre möglich sind (LV 26). Für wesentlich längere Zeiträume ist noch nicht genügend experimentelle Erfahrung vorhanden.

7. Transporte

7.1 Beschreibung des Vorgangs

Transporte finden grundsätzlich zwischen allen Etappen des Brennstoffkreislaufes statt.

Es handelt sich zuerst um den Transport des Erzes von der Mine zum Konzentrationswerk, der gewöhnlich auf dem Minengelände und mit Baumaschinen erfolgt, während das Uranoxid (U_3O_8), das aus dem Werk kommt, per Bahn oder Strasse in Stahlfässern von je 200 l (LV 27) in die Raffinier- und Konversionsfabrik zur Umwandlung in Uranhexafluorid (UF_6) transportiert wird. Dieses Hexafluorid, in Spezialzylindern von 10—15 Tonnen (LV 27) verpackt, wird dann per Bahn oder Strasse zur Anreicherungsanlage befördert (LV 27). Das angereicherte UF_6 wird seinerseits per Bahn oder Strasse in die Brennelementfabrik gebracht, und zwar ebenfalls in Zylindern, wie die oben beschriebenen, aber, um jedes Kritikalitätsrisiko * zu vermeiden, (man muss für den Transport von angereichertem UF_6 bis auf 2 Tonnen pro Zylinder heruntergehen [LV 27] von kleinerer Kapazität. Wenn die neuen Elemente fertig sind, werden sie in Spezialbehälter verpackt, die die mechanische Integrität der Ele-

mente während des Transports gewährleisten. Der Transport kann per Bahn, Strasse, Schiff oder sogar, je nach Umständen, auf dem Luftwege erfolgen. Nach dem Einsatz im Reaktor und einer Wartezeit von mindestens einem Jahr im Wasserbecken des Werkes (zur Verminderung ihrer Radioaktivität) werden die bestrahlten Brennelemente per Strasse oder Bahn in speziell konzipierten Behältern in die Wiederaufbereitungsanlage gebracht. Das Ein- und Ausladen der Brennelemente geschieht in der Regel unter Wasser. Die oben erwähnten Behälter, deren Leergewichte zwischen 50 und 100 t schwanken (LV 27, 28), sind aus Stahl und Blei. Sie sind dicht und derart dimensioniert, dass sie den entsprechenden vorgeschriebenen Normen gerecht werden: Den Normen über den Schutz gegen Strahlungen, den Normen über die Verminderung des Risikos eventueller Kontamination, den Normen über das Nichtüberschreiten einer vorgeschriebenen Temperatur.

Schliesslich müssen die durch die Wiederaufbereitung abgetrennten Spaltprodukte nach ihrer Verfestigung in die Zwischendeponie und später zur endgültigen Deponie überführt werden. Die Behälter für diese Transportart existieren noch nicht, denn solche Transporte werden nicht vor einigen Jahren nötig sein. Diese Situation ist nicht beunruhigend, denn die verfestigten Spaltprodukte * stellen eine weniger hohe potentielle Gefahr dar als die bestrahlten Brennelemente. Demzufolge werden sehr wahrscheinlich die Schutzmassnahmen, die heute für den Transport bestrahlter Brennelemente gelten, auch für den Transport verfestigter Spaltprodukte Anwendung finden.

Tabelle 2 fasst die Gesamtheit der für die Sicherstellung des Jahresbetriebes eines Kernkraftwerkes von 1000 MWe erforderlichen Transporte zusammen. Die darin angegebenen Werte sind für gegenwärtige Verhältnisse berechnet, wo alle Etappen des Kreislaufs geographisch getrennt sind. Sollten in Zukunft gewisse Zusammenlegungen von Werken, z. B. Fabrikations- und Wiederaufbereitungsanlagen und Abfallagern erfolgen, wäre die Anzahl der Transporte niedriger als die hier dargestellte (LV 27, 28, 29, 30).

7.2 Reglementierung

Die Sicherheitsnormen für die eigentlichen Transporte sind durch nationale Reglemente (LV 31) festgelegt, die in der Schweiz einen Teil der allgemeinen, auf den Transport aller gefährlichen Substanzen bezogenen Vorschriften bilden.

Die nationalen Reglemente stützen sich auf eine internationale Reglementierung (LV 32), welche durch die Int. Atomenergieagentur (IAEA) vorgeschrieben ist. Verglichen mit den anderen Transportkategorien sind die Forderungen der IAEA streng genug, um zusätzliche Sicherheitsmassnahmen nicht als nötig erscheinen zu lassen.

Tabelle 2: Jährliche Transporte zur Belieferung eines Kernkraftwerkes von 1000 MWe *

Art der Materialien	Masse ohne Verpackung (Tonnen)	Approximative Anzahl der:	
		Strassenzüge	Eisenbahnwagen
<i>ausserhalb der Schweiz:</i>			
Erz	ungef. 100 000	Baumaschinen in den Minen	
Konzentrate (U ₃ O ₈)	250	16	7
Uranhexafluorid nat.	310	24	9
Uranhexafluorid anger.	60	4	2
Aktive Abfälle α *	30	1	1
<i>teilweise in der Schweiz:</i>			
Neue Brennelemente	60	10	8
Bestrahlte Brennelemente	60	15	4
Schwach und mittelaktive Abfälle	350	10	5
Verglaste Spaltprodukte	5	wahrscheinlich 3	wahrscheinlich 1
Gesamtzahl der jährl. Transporte		ca. 80	ca. 35

Diese Reglemente bestimmen die Transportmittel, die Verpackungsarten und die zulässigen Dosisleistungen sowie die zur Zulassung der Transporte von radioaktiven Substanzen geforderten verschiedenen administrativen Kontrollen.

In der Schweiz werden die Bewilligungen für den Transport bestrahlter Brennelemente vom Bundesamt für Energiewirtschaft auf Grund der von der Abteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (ASK) ausgestellten Zeugnisse erteilt. Diese präzisieren die Forderungen für die Sicherstellung des Strahlenschutzes. Die kantonalen Polizeiorgane werden von der Eidg. Polizeiabteilung benachrichtigt.

7.3 Sicherheit

Unter den oben beschriebenen Transporten stellen diejenigen von bestrahlten Brennelementen und später von verfestigten Spaltprodukten *, hochradioaktive Abfälle genannt, ein Gefahrenpotential dar, das bei einem Unfall eine Bestrahlung des Betriebspersonals und der Bevölkerung verursachen kann.

Um die Wahrscheinlichkeit, dass ein Unfall während eines Transportes Folgen für Personal und Bevölkerung hat, auf ein Minimum zu reduzieren, bestimmt das Reglement der IAEA die Normen, denen die für den Transport von bestrahlten Brennelementen verwendeten Behälter ent-

sprechen müssen, um keine Radioaktivität freizusetzen. Sie müssen folgenden Anforderungen genügen:

- einem Sturz aus einer Höhe von 9 Metern auf eine undeformierbare Unterlage,
- einem Sturz aus einer Höhe von 1 Meter auf einen Stahlstachel von 15 cm Durchmesser,
- einem Feuer oder einer Temperatur von 800° C während 30 Minuten,
- einem Druck, der einer Wassertiefe von 15 Metern entspricht.

Behälter, die diesen Bedingungen entsprechen, sind in der für ihren Verwendungszweck vorgesehenen Grösse vom Laboratorium Sandia in den USA geprüft worden. U. a. stellte man fest, dass die Schutzvorrichtungen der Behälter intakt blieben, nachdem sie mit einer Geschwindigkeit von 140 km/Std. gegen eine feste Mauer prallten.

Die in Europa verwendeten Behälter werden passiv luftgekühlt; dies geschieht mittels einer grossen Zahl von an ihrer Aussenseite befestigten Rippen. Sie sind so konzipiert, dass die Höchsttemperatur der in ihnen enthaltenen bestrahlten Brennelemente 500° C nicht übersteigt, wenn der Transport sechs Monate nach ihrer Entladung aus dem Reaktor stattfindet. Für solche Brennelemente übersteigt die Dosisleistung an der Oberfläche des Behälters 200 mrem/Std. nicht, während sie in 2 m Entfernung vom Behälter geringer als 10 mrem/Std. ist.

Übrigens zeigen die Sicherheitsanalysen (LV 33, 34), dass das aus diesen Transporten erwachsene Risiko¹⁾ geringer ist als die Risiken anderer industrieller Transporte. Bisher hat noch kein Transport von bestrahlten Brennelementen eine höhere Strahlenbelastung der Bevölkerung verursacht, als es die zugelassenen Bedingungen erlauben. In der Schweiz z. B. haben bis Ende 1979 neunundachtzig derartige Transporte stattgefunden.

Wegen der geringen Strahlung sind die Sicherheitsvorschriften für die übrigen Transporte im Brennstoffkreislauf entsprechend derjenigen anderer vergleichbarer toxischer industrieller Produkte erlassen worden. Die wenigen bisher vorgekommenen Unfälle während dieser Transporte haben keine Folgen in Bezug auf die Strahlenbelastung der Bevölkerung gehabt.

Für die Transporte von konzentrierten spaltbaren Materialien, wie hochangereichertes Uran für die Herstellung von Brennelementen für bestimmte Forschungsreaktoren und das Plutonium für die Verwendung als Spaltstoff gibt es Vorschriften, die dahin zielen, jede Bildung einer kritischen * Masse zu verhindern, um so eine Kettenreaktion mit ungewollter Strahlungs- und Energiefreisetzung zu verunmöglichen. Die Notwendigkeit, regelmässig das in den Bomben verwendete Plutonium zu regenerie-

¹⁾ Risiko = Unfallwahrscheinlichkeit $\times$ Folgen

ren, bedingt Transporte gleicher Art. Die grosse Anzahl solcher Transporte in Militäranlagen der westlichen Staaten, die im Besitz der Atombombe sind, ohne dass je eine Bestrahlung der betreffenden Bevölkerungen verursacht worden wäre, beweist noch einmal, dass diese Transporte auf eine sichere Weise vorgenommen werden können.

8. Wiederaufbereitung

8.1 Funktion der Wiederaufbereitung

Anfänglich wurde die Wiederaufbereitung zur Gewinnung des zur Herstellung der Atombomben nötigen Plutoniums entwickelt. Auf diese Weise wurden einige Tonnen Plutonium abgetrennt. Heute ist der Hauptzweck der Wiederaufbereitung die Trennung des Plutoniums und des Urans von den Spaltprodukten*: das Volumen der hochradioaktiven Abfälle* wird vermindert und damit ihre Lagerung erleichtert. Das Plutonium kann in den Leichtwasserreaktoren* oder den schnellen Brütern* durch Mischung mit Uran im Verhältnis von 3 resp. 20% wiederverwendet werden. Das abgesonderte Uran kann nach der Behandlung in der Anreicherungsanlage wiederverwendet werden. Für die Energieproduktion in Leichtwasserreaktoren ist die Wiederaufbereitung nicht unbedingt notwendig. Hingegen ist sie unentbehrlich, wenn Energie mit Hilfe von schnellen Brütern gewonnen werden soll.

Neben den erwähnten Vorteilen muss man auch die Gefahr der Proliferation atomarer Waffen in Betracht ziehen (siehe Kap. 12). In diesem Zusammenhang hat eine internationale Konferenz alternative Brennstoffkreisläufe geprüft, darunter einige, die auf die Wiederaufbereitung verzichten könnten (International Nuclear Fuel Cycle Evaluation — INFCE¹⁾).

8.2 Beschreibung des Verfahrens

Der gebrauchte Brennstoff setzt sich aus vier Hauptbestandteilen zusammen:

— Uran, im Vergleich zum frischen Brennstoff an Uran-235 angereichert (0,8% U-235),

¹⁾ Die Einsetzung dieser internationalen Konferenz wurde im Oktober 1977 in Washington beschlossen. Sechszehn Länder und fünf internationale Organisationen haben daran teilgenommen, darunter auch die Schweiz. Acht Arbeitsgruppen haben ihre Berichte eingereicht. Diese wurden an der Schlusskonferenz vom 25.—27. Februar 1980 in Wien veröffentlicht.

- Plutonium,
- die Spaltprodukte und die Transurane *,
- die ebenfalls radioaktiven Metalle, welche die Hülle der Brennelemente bilden.

Durch die Wiederaufbereitung werden diese Bestandteile voneinander getrennt. Es wird wie folgt vorgegangen:

Nach einer Zwischenlagerung im Eingangs-Wasserbecken, werden die Elemente zerkleinert und in einem Bad konzentrierter, heisser Salpetersäure aufgelöst. Während dieser Operationen werden das Krypton * und der schwache Jodanteil, der nicht in den Filtern zurückbehalten werden kann, an die Atomsphäre abgegeben. Tritium * kann entweder ins Wasser oder in die Luft abgegeben werden. Man wählt das Vorgehen unter Berücksichtigung der Verdünnungsmöglichkeiten in den beiden Medien.

Uran, Plutonium und Spaltprodukte werden durch eine Reihe von Trennverfahren aus wässriger Lösung, unter Anwendung der Extraktionstechnik mittels Lösungsmittel *, wiedergewonnen. Nach mehreren chemischen Operationen liegt schliesslich das Plutonium in Oxid-Form (PuO_2) vor. Uran wird als Nitrat in die Konversionsanlage gebracht; dort wird es in UF_6 umgewandelt. Die nach der Extraktion von Uran und Plutonium übrigbleibende Lösung enthält die Spaltprodukte * und ungefähr 1% des Plutoniums und andere Transurane *.

Heute wird diese Lösung auf dem Gelände des Werkes in korrosionsfesten Behältern aufbewahrt, ständig gerührt und gekühlt. Eine spätere Verfestigung ist in Aussicht genommen (Kap. 9).

8.3 Funktions-Zwischenfälle

Die Wiederaufbereitung ist die heikelste Phase. Die dabei vorgenommenen Operationen geschehen mit nicht hermetisch verschlossenen radioaktiven Substanzen. Das erfordert eine vollständige Isolierung von der Umwelt, und demzufolge müssen alle Prozesse ferngesteuert werden.

Verschiedene Arten von Störfällen, die in der Vergangenheit schon vorgekommen sind, können mehr oder weniger ernste Leckagen von radioaktiven Produkten im Innern des Werkes oder in die Umgebung hervorrufen: Entzündung der Plutonium enthaltenden Harze, Risse in Brennelementen im Wasserbecken, Leckagen in Lagerbecken für bestrahlte Brennelemente oder in den Behältern mit der Lösung hochradioaktiver Abfälle.

Ein Zwischenfall ereignete sich z. B. im September 1973 in der Wiederaufbereitungsanlage von Windscale (England) und verursachte eine Kon-

tamination des Gebäudes. Eine spontane Entzündung von Überresten von Zirkon verursachte einen Überdruck im Innern einer Zelle. Diese Zelle war nicht vollständig dicht.

Die Dichtung einer Eintrittsstelle war fehlerhaft und der Überdruck in dem die Zelle beherbergenden Gebäude war nicht genügend gross. Daher konnten sich radioaktive Stoffe im Gebäude ausbreiten. Fünfunddreissig Arbeiter erlitten eine Ruthenium-106-Inkorporation * von 0,01 bis 40 μCi . Die integrierte Strahlendosis *, die sich in den kommenden fünfzig Jahren in der Lunge des am schwersten betroffenen Arbeiters ergeben wird, dürfte in der Höhe von 1000 rem sein (Lokaldosis). In diesem Falle würde ein um etwa 1% erhöhtes Lungenkrebsrisiko (LV 35) die Folge sein. Seit diesem Vorfall ist der Eintritt in das den Oxidbrennstoff behandelnde Werk (dieser Brennstoff wird in den Leichtwasserreaktoren * verwendet) untersagt, und die Wiederaufbereitung läuft nur im Magnoxteil * der Anlage (für Gas-Graphit-Reaktoren *).

Seit 1949 werden hochradioaktive Lösungen in der Umgebung des Militärlagerwerkes Hanford (USA) gelagert. Mehr als 1000 m³ sind ins Untergeschoss des Depots eingeflossen. Die Korrosion der Behälter aus Normalstahl hatte durch die alkalischen Lösungen mehrere Leckagen verursacht. Dem wüstenartigen Charakter der Region ist es zu verdanken, dass dieses Ausströmen keine schwerwiegenden Folgen gehabt hat (LV 36). Seit der Einführung doppelwandiger Behälter aus rostfreiem Stahl gab es keine Leckagen mehr. In Europa wurden von Anfang an solche Behälter verwendet und in betonierten Räumen eingeschlossen.

Unter gewissen Bedingungen können explosive chemische Reaktionen zwischen der Salpetersäure oder den Nitraten und dem abgebauten Lösungsmittel (Red Oil) stattfinden. Eine derartige Explosion könnte den die Lösung enthaltenden Behälter zerstören, wäre jedoch wahrscheinlich nicht heftig genug, um eine Abgabe von Radioaktivität * an die Umwelt zu verursachen (LV 3).

Das Vorhandensein von Plutonium stellt Kritikalitätsprobleme *. Da das spaltbare Material in wässriger Lösung vorhanden ist, wirkt das Wasser als Moderator * und begünstigt die Kettenreaktion *. Sollte die kritische Masse erreicht werden, würde sich die nukleare Reaktion beschleunigen und eine plötzliche Energiefreisetzung von etwa 8 kWh auslösen. Die Erfahrung hat gezeigt, dass eine derartige Energiefreisetzung kaum den Bruch des primären Betoncontainments (LV 3) verursachen könnte. Durch die Form und die angepassten Dimensionen der Behälter, in denen die Wiederaufbereitungshandlungen vor sich gehen, sowie durch die Wahl der richtigen Konzentration wird Kritikalität vermieden.

Die Wasserbecken sowie die flüssige, hochradioaktive Abfälle enthaltenden Behälter sind Stellen einer starken Wärmeentwicklung (z. B. 12 000

kW für ein Becken mit 1000 Tonnen bestrahlter Brennelemente, die ihrerseits bereits während eines Jahres abgekühlt worden sind). Die Becken und Behälter müssen demnach fortwährend gekühlt werden.

Das im bestrahlten Brennstoff enthaltene Plutonium setzt sich teilweise in den Röhren und anderen Behältern des Werkes nieder und kann nicht wiedergewonnen werden. Der Aufbau einer Plutoniumschicht kommt nach Erreichen einer gewissen Dicke zum Stillstand. Die Plutoniumablagerung trägt dazu bei, die Genauigkeit der Materialbilanz zu begrenzen. Diese Ablagerungen erfordern sorgfältige Dekontamination im Hinblick auf eine allfällige Demontierung oder den Abbruch des Werkes nach einem Betrieb von etwa 15 bis 20 Jahren. Erste Erfahrungen auf industrieller Ebene hat man in Mol (Belgien) gesammelt. Hier wurde seit 1975 mit der Dekontamination und teilweisen Demontage der Anlage von Eurochemic begonnen. Diese Anlage hatte zuvor acht Jahre lang gearbeitet (LV 37).

8.4 Gegenwärtiger Stand der Wiederaufbereitung

Die diesem Paragraphen zugrunde liegenden Daten sind den Arbeiten (LV 5, 38) und (LV 39) entnommen. Die weltweite Lage auf dem Sektor der Wiederaufbereitungsanlagen zeigt die Schwierigkeiten beim Übergang zur industriellen Anwendung von Wiederaufbereitungsverfahren. Diese Schwierigkeiten sind ausgeprägter für Leichtwasserreaktorbrennelemente als für Gas-Graphit-Reaktorbrennelemente (metallische Form). Der Brennstoff für Leichtwasserreaktoren liefert seiner höheren Anreicherung wegen grössere Energiemengen und ist deshalb radioaktiver*. La Hague in Frankreich ist im Jahr 1980 das einzig laufende Werk von industriellem Ausmass für die Wiederaufbereitung von Uranoxidelementen. Dort hat man erst relativ wenig Erfahrung mit hochbestrahlten, aus Leichtwasserreaktoren kommendem Brennstoff. Von 1976 bis 1979 wurden in La Hague 140 Tonnen hochbestrahlter Brennstoff aus Leichtwasserreaktoren* wiederaufbereitet.

In den USA wurden im Werk von West Valley (N.Y.) zwischen 1966 und 1972 630 Tonnen Brennstoff aufbereitet. Die für 1972 vorgesehenen Änderungen zur Vergrösserung der Leistungsfähigkeit des Werkes von jährlich 300 auf 750 Tonnen Brennstoff wurden nicht ausgeführt. Die zur Verminderung radioaktiver Abgaben auf das erlaubte Maximalniveau und die Sicherheit des Werkes garantierenden Massnahmen waren wirtschaftlich nicht realisierbar. Jetzt ist die Anlage stillgelegt. Auf dem Gelände sind 2200 m³ hochradioaktive Lösungen gelagert.

In Morris (Illinois) musste ein Werk, welches neue Trennverfahren anwendet, aus technischen Gründen als nicht betriebsbereit erklärt werden.

Ein anderes Werk in Barnwell (South Carolina) erhielt keine Betriebsbewilligung hauptsächlich infolge der neuen Politik der Carter-Administration.

Die Anlage von Windscale (England) behandelt den aus Magnox*-Reaktoren stammenden Brennstoff. Derjenige Teil der Anlage, der für die Wiederaufbereitung von Uranoxidelementen bestimmt war, wurde nach dem oben erwähnten Störfall stillgelegt. Von 1964—1977 hatte diese Anlage 100 Tonnen Brennstoff aus Leichtwasserreaktoren* und 18 000 Tonnen Magnox-Brennstoff wiederaufbereitet.

Im Werk der Eurochemic (Mol, Belgien) wurden von 1966—1974 100 Tonnen Leichtwasserreaktor-Brennstoff wiederaufbereitet. Kleine Werke in Karlsruhe, Deutschland (88 Tonnen seit 1971), in Indien und in Japan dienen zur Wiederaufbereitung kleinerer Mengen. In Deutschland, Frankreich und England gibt es Projekte für grosse Wiederaufbereitungsanlagen. In Grossbritannien wurde der Entscheid zum Bau einer Anlage vom Parlament nach einer hundert Tage dauernden Untersuchung getroffen (Windscale Inquiry).

Für den bestrahlten Brennstoff der in Betrieb stehenden Leichtwasserreaktoren muss man während mehrerer Jahre mit einer ungenügenden Wiederaufbereitungskapazität rechnen. Dies hat jedoch keine unmittelbaren Konsequenzen für die Umwelt.

8.5 Inventar

Aus wirtschaftlichen Erwägungen werden die künftigen Wiederaufbereitungsanlagen für 1500 Tonnen bestrahlten Brennstoffs pro Jahr ausgelegt. Dies entspricht ungefähr der Jahresproduktion von 50 Kernkraftwerken der Leistungsklasse 1000 MWe*. Die Produkte und Mengen, die aus der jährlichen Wiederaufbereitung von 1500 Tonnen bestrahlten Brennstoffs resultierten, sind in Tabelle 3 (LV 16) aufgeführt.

Die nominale (theoretische) Kapazität der Wiederaufbereitungsanlage in La Hague beträgt jährlich 200 bis 400 Tonnen bestrahlten Oxidbrennstoffs.

8.6 Emissionen

Im Normalbetrieb ist eine Wiederaufbereitungsanlage eine stärkere Quelle radioaktiver Emissionen als ein 1000 MWe-Reaktor. Die hauptsächlichsten Radionuklide*, die von einer solchen Anlage in die Atmosphäre freigesetzt werden, sind Krypton-85, Tritium, Kohlenstoff-14 und Jod-129.

Tabelle 3: Eigenschaften der jährlich in einer Wiederaufbereitungsanlage behandelten Stoffe und Abfälle (Kapazität 1500 Tonnen; Abkühldauer des Brennstoffs: 1 Jahr).

Stoff	Masse oder Volumen	Radioaktivität (Curies *)
Abgetrenntes Plutonium	15 Tonnen	150 Millionen
Uran (0,8% U-235)	1455 Tonnen	500
Hochradioaktive Lösung (75 kg Pu, 99,9% der Spaltprodukte * und die Transurane * enthaltend)		
In flüssigem Zustand	750 m ³	3,3 Milliarden
In festem Zustand (nach 5 Jahren)	150 m ³	0,9 Milliarden
Hüllen der Brennelemente	100 m ³	15 Millionen
Mittelaktive Lösung	1300 m ³	≥ 5 Ci/m ³
Schwachaktive Lösung	61 000 m ³	max. 5 Ci/m ³

Der jetzigen Abfallbehandlungspraxis entsprechend wird das Krypton-85 mit den gasförmigen Abgasen in die Atmosphäre abgelassen. Diese verteilen sich in der Atmosphäre gleichmässig. Ein Bericht der OECD (LV 40) macht für das Jahr 2000 Voraussagen für das durch die Krypton-85-Abgaben verursachte Bestrahlungsniveau. Dieses Niveau erreicht nur kleine Bruchteile der Variation der natürlichen Strahlung sowie der von der ICRP empfohlenen annehmbaren Grenzwerte. Um aber die Exponierung der in der Nähe von Wiederaufbereitungsanlagen wohnenden Personen zu verringern, ist für das Ende des nächsten Jahrzehnts vorgesehen, in künftigen Anlagen Rückhaltesysteme für Krypton-85 einzubauen. Diese Systeme befinden sich jetzt in verschiedenen Entwicklungsstadien; man hat bereits Krypton-Rückhalte von 98—99% erzielt.

Das in den bestrahlten Elementen verbleibende Tritium wird teilweise in die während der Wiederaufbereitung entstehenden Abfälle eingeschlossen. Sowohl der weltweite wie auch der lokale Einfluss dieser Tritiumabgaben wurde in einer Arbeit von Polvani (LV 40) untersucht. Es werden einerseits Schätzungen für die durch die Akkumulation von Tritium in der Atmosphäre verursachte Strahlenbelastung der Erdbevölkerung bis zum Jahr 2000 angegeben und andererseits Dosen abgeschätzt, die die am meisten exponierten Personen erhalten, welche in der Umgebung von grossen Wiederaufbereitungsanlagen leben. In beiden Fällen ist die Bestrahlung schwach. Dessen ungeachtet sind verschiedene Projekte zur Verminderung der Tritiumabgaben aus Reaktoren und Wiederaufbereitungsanlagen in Arbeit.

Die Schätzung der durch Kohlenstoff-14 und Jod-129 aus Wiederaufbereitungsanlagen entstehenden Bestrahlung ergeben so niedrige Werte, dass

Tabelle 4: Flüssige Abgaben ins Meer

Kritische * Bevölkerung: Küstenfischer; Abkühlung des Brennstoffs: 1 Jahr

Radionuklide *	Jährlich ausgestossene Menge Ci	Kritisches Organ	Norm Bevölkerung mrem/Jahr	Jährliche Dosis * in der meist ausge- setzten Zone	Jährliche Dosis in % der Norm
Strontium 89	50	Magen-Darm- Trakt	1500	0,00045	0,00003
Strontium 90	3 000	Magen-Darm- Trakt	500	0,5	0,1
Zirkonium 95	400	Ganzer Organismus	500	0,03	0,006
Ruthenium 10	35 000	Magen-Darm- Trakt	1500	30	2
Cesium 137	8 000	Ganzer Organismus	500	1	0,2
Cerium 144	600	Magen-Darm- Trakt	1500	0,32	0,021
andere β , γ *	4 000	Magen-Darm- Trakt	1500	0,6	0,04
Plutonium	90	Magen-Darm- Trakt	500	0,003	0,0006
Tritium ¹⁾	1 Million	Ganzer Organismus	500	0,004	0,0008

¹⁾ Der grösste Teil des Tritiums kann entweder in die Luft oder ins Wasser abgegeben werden, wobei die Wahl nach den jeweiligen Verdünnungsmöglichkeiten dieser Medien getroffen wird.

Tabelle 5: Gasförmige Abgaben (Abkühlung des Brennstoffs: 1 Jahr)

Radionuklide	Jährlich ausgestossene Menge Ci	Kritisches Organ	Norm Bevölkerung mrem/Jahr	Jährliche Dosis in der am meisten exponierten Zone mrem/Jahr	Jährliche Dosis in % der Norm
Krypton 85	16 Millionen	Haut	3 000	60	2
Jod 131	} 2,5 ²⁾	Schilddrüse	1 500	150	10
Jod 129					
Tritium ¹⁾	50 000 ²⁾	ganzer Organismus	500	0,4	0,08
Kohlenstoff 14	1 100	Ganzer Organismus	500	0,4	0,08

¹⁾ Der grösste Teil des Tritiums kann entweder in die Luft oder ins Wasser abgegeben werden, wobei die Wahl nach den jeweiligen Verdünnungsmöglichkeiten dieser Medien getroffen wird.

²⁾ Annahme: 50% der im Brennstoff enthaltenen Mengen werden in die Atmosphäre abgegeben.

sich Massnahmen zu ihrer Verminderung vor dem nächsten Jahrhundert nicht aufdrängen.

Die Abgaben einer Wiederaufbereitungsanlage von 1500 Tonnen/Jahr ohne Anlagen für die Rückhaltung von Krypton-85, Kohlenstoff-14 und Tritium sind in Tabelle 4 und 5 dargestellt (LV 41, 42).

8.7 Risiken für das Personal

Neben der Extraktion des Urans ist die Wiederaufbereitung diejenige Phase des Brennstoffkreislaufs, welche das grösste Risiko für das Personal beinhaltet, da die Quantitäten gehandhabter offener radioaktiver Stoffe sehr gross sind.

Tabelle 6 zeigt die vollständigen kollektiven Dosen * für fünf Werke (LV 39).

Tabelle 6: Totale kollektive * Dosis in Mannrem

	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
West Valley	851	¹⁾	1531	2366						
Windscale				3051	3379	3255	3486	4028	4016	¹⁾
La Hague		220	270	330	320	510	540	720	690	673
Eurochemic			340	318	427	372	267	156 ²⁾	146 ²⁾	174 ²⁾
Karlsruhe				100	275	288	208	163	102	140

¹⁾ nicht verfügbar

²⁾ Die Jahre 1975—1977 entsprechen der Reinigungs- und Dekontaminationsperiode * des Werkes (LV 37).

Tabelle 7 zeigt für jedes Werk die Kollektivdosis, die sich auf die Produktion von einem MWe · Jahr * elektrischer Energie bezieht (LV 39).

Tabelle 7: Kollektivdosis in Mannrem bezogen auf die Produktion von einem MWe · Jahr (Mannrem/MWe · Jahr).

	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	Mittelwert
West Valley	2,43	¹⁾	4,05	3,28							3,27
Windscale											1,20
La Hague	1,11	1,56	1,54	1,37	0,70	1,09	0,40	0,57	0,59	0,43	0,70
Eurochemic											0,80
Karlsruhe				2,94	3,98	3,42	1,01	0,66	0,53	1,09	2,27

¹⁾ nicht verfügbar

Die mittleren Jahresdosen* des Personals sind einander ähnlich und schwanken, mit Ausnahme von West Valley, zwischen 0,3 und 1,9 rem für die verschiedenen Werke. Im West Valley wurden von 1968 bis 1971 mittlere Jahresdosen zwischen 2,74 und 7,15 rem registriert. Die höchsten dieser Dosen würden heute nicht mehr zugelassen, da die erlaubte Maximaldosis von 12 rem/Jahr mittlerweile auf 5 rem/Jahr herabgesetzt worden ist.

Direkte Vergleiche zwischen den mittleren Dosen der diversen Werke sind nicht möglich, da die Anzahl der jeweils für die Statistiken untersuchten Personen von Fall zu Fall verschieden ist.

9. Konditionierung der Abfälle

9.1 Lagerung in flüssiger Form

Nach der Wiederaufbereitung des gebrauchten Brennstoffs liegt fast die Gesamtheit der Spaltprodukte* und der Transurane* als konzentrierte hochradioaktive Lösungen vor. Diese Lösungen lagert man in doppelwandigen Behältern aus rostfreiem Stahl, welche in betonierten Räumen eingeschlossen sind. Der Inhalt dieser Behälter muss ständig gekühlt, gerührt und belüftet werden. Auf diese Art wird einerseits die Wärme abgeführt und andererseits die Bildung von Knallgas aus dem durch radiolytische Zersetzung entstehenden Wasserstoffs verhindert. Ausserdem werden so die Bildung von Ablagerungen verhindert, welche die Korrosion des Behältermetalls beschleunigen könnten.

Nach einem Zeitraum von fünf Jahren ist die Radioaktivität* und die damit verbundene Wärmeentwicklung genügend reduziert, so dass zur Verfestigung der Lösungen geschritten werden kann. Diese Verfestigung der Lösungen ist aus drei Hauptgründen notwendig:

- um die der flüssigen Form eigene Gefahr von Leckagen zu vermeiden,
- um das Volumen der Abfälle zu reduzieren,
- um eine Art der Lagerung zu erlauben, die keine Überwachung erfordert.

9.2 Verfestigung und Lagerung

Die fortgeschrittenste Verfestigungsmethode ist die Verglasung. Sie besteht darin, die hochradioaktive Lösung zu verdampfen und die Spaltprodukte* und Transurane* zu kalzinieren. Diese werden anschliessend mit den übrigen Bestandteilen des Glases in einen Ofen gebracht. Tech-

nisch wäre es möglich, die flüssigen Produkte sofort beim Verlassen der Wiederaufbereitungsanlage zu verfestigen. Eine Abkühlung über einige Jahre kann als befriedigender Kompromiss zwischen Wirtschaftlichkeit und Technik betrachtet werden (unterschiedliche Kosten eines Lagers für die verfestigte Form, je nach der Stärke der thermischen Abgaben). Nach dem Schmelzen erhält man ein Glas, in dem die hochradioaktiven Abfälle verteilt sind. Von 1968 bis Ende 1978 wurden 12 Tonnen radioaktive Abfälle enthaltendes Glas im Versuchswerk Marcoule produziert. Diese 12 Tonnen stammen aus 800 Tonnen gebrauchten Brennstoffs vom Typus Gas-Graphit *. Auf demselben Gelände wurde im Juli 1978 eine industrielle Verglasungsanlage mit einer Nennleistung von einem Container pro Tag in Betrieb genommen. Sie produzierte bis November 1979 215 Container, wies also eine Verfügbarkeit von 53% auf (LV 43). Zieht man das Inbetriebnahmesequenz nicht in Betracht, erreichte die Verfügbarkeit der Anlage 66% ihrer nominellen Leistungsfähigkeit. Die Hauptprobleme bei der Verglasung sind jene, die mit der Handhabung sehr stark radioaktiver Produkte verbunden sind.

Im Laufe der Verdampfung, der Kalzinierung * und des Schmelzens werden flüchtige * Produkte und radioaktive Gase freigesetzt. Diese müssen kondensiert und filtriert werden. Das Glas hat den Nachteil, ein sehr schlechter Wärmeleiter zu sein, was zu Beginn der Zwischenlagerung eine forcierte Kühlung erfordert. Es bestehen auch Ungewissheiten in Bezug auf das Verhalten der verglasten Produkte über lange Zeiträume, wenn diese einer intensiven Bestrahlung, einer durch den radioaktiven Zerfall hervorgerufenen Hitze und den wirklichen Bedingungen einer in geologischen Formationen angelegten Deponie (Druck, Wasser usw.) ausgesetzt sind. Viele Untersuchungen zur Abklärung dieser Fragen sind im Gang.

Andere Verfestigungsmethoden werden zurzeit in den USA angewendet. Das Endprodukt ist körnig und wird in Stahlzylindern eingeschlossen.

Da die radioaktive Substanzen enthaltenden Körner im Wasser löslicher sind als Glas, kann diese Form der Konditionierung nicht als definitiv angesehen werden. Dieses Verfahren ist, wenigstens in seiner jetzigen Form, nicht ohne weiteres für Leichtwasserreaktoren Brennstoff anwendbar. Eine Einschliessung in einem metallischen Stoff wird ebenfalls geprüft (besserer Wärmeaustausch).

Grundsätzlich könnte man auch den nicht wiederaufbereiteten Brennstoff auf lange Zeit lagern. Hierfür ist die Forschung weniger weit gediehen.

Vor der Endlagerung werden die verfestigten Abfälle in Silos versorgt. Sie werden zuerst durch forcierte und später durch natürliche Luftzirkulation abgekühlt. Diese Zwischenlagerung erfordert eine Überwachung der Anlagen.

Der Rest der am Ende der Wiederaufbereitungsprozedur übrigbleibenden Abfälle (z. B. Hüllen, radioaktive Flüssigkeiten usw.) wird zur Verminderung eines Volumens noch weiter behandelt (Kompression, Eindampfen, Einäscherung u. a.). Durch diese Behandlung wird natürlich die Radioaktivität nicht zerstört. Die Restbestandteile werden anschliessend in eine feste Form umgewandelt (Mischung mit Zement zur Herstellung von Beton oder mit Bitumen, Einkleiden mit thermohärtbarem Kunststoff, usw.). Sollten in Zukunft Krypton, Tritium und Kohlenstoff-14, die während der Wiederaufbereitung aus dem gebrauchten Brennstoff freigesetzt werden, zurückbehalten werden (siehe Kap. 8), müsste man diese ebenfalls lagern. Eine der in Betracht kommenden Methoden ist die Lagerung unter Druck.

10. Rückführung des Plutoniums und des zurückgewonnenen Urans

10.1 Beschreibung der Arbeitsweise

Das bei der Wiederaufbereitung von den Spaltprodukten und anderen Transuranen abgetrennte Uran und Plutonium können für die Herstellung neuer Brennelemente benutzt werden. Zu diesem Zwecke ist vorgesehen, das zurückgewonnene Uran (Fig. 1) in Form von Hexafluorid beim Eintritt in die Anreicherungsanlage dem Brennstoffkreislauf wieder zuzuführen, während das Plutonium als Oxid beim Eintritt ins Herstellungswerk für Brennelemente hinzugefügt wird. Die Anreicherung des aus dem Wiederaufbereitungsprozess stammenden Urans, dessen Gehalt an U-235 zwischen 0,8 und 1% schwankt, erlaubt nicht nur die Anpassung des Gehalts an die gewünschte Höhe, sondern auch die Entfernung ungefähr der Hälfte des bei der Verwendung des Brennstoffs gebildeten U-236 und auf diese Weise im gleichen Verhältnis die durch dieses Isotop * verursachte parasitäre Absorption von Neutronen * zu vermindern (LV 44).

Das aus der Wiederaufbereitung gewonnene in Oxidform vorliegende Plutonium wird mit Uranoxid vermischt und der Brennelementfabrikation zugeführt. Nach langjährigen Experimenten wird diese Rückführung im Versuchsstadium jetzt in mehreren Ländern praktiziert. Die Wiederverwendung des zurückgewonnenen Urans und Plutoniums führt zu ansehnlichen Einsparungen an natürlichem Uran und an Anreicherungsarbeit.

10.2 Einsparung an natürlichem Uran und an Anreicherungsarbeit

Für einen Gleichgewichts-Brennstoffkreislauf würde allein die Rückführung des zurückgewonnenen Urans den Natururanbedarf auf 80% dessen

reduzieren, das man ohne Wiederaufbereitung brauchen würde. Während die Rückführung von Uran und Plutonium den Verbrauch natürlichen Urans auf etwas weniger als 60% reduzieren würde. Die Rückführung des wiedergewonnenen Urans allein bringt keine nennenswerte Ersparnis an Anreicherungsarbeit, während diejenige des Plutoniums eine Reduktion von etwa 35% bedeuten könnte.

Diese Gleichgewichtswerte können selbstverständlich in der Praxis nicht erreicht werden, denn für die erste Ladung eines Reaktors wird grundsätzlich frisches Uran benutzt.

Daraus folgt, dass die auf die Gesamtheit der Reaktoren in der Welt angewandte Rückführung nicht die hier angegebene Ersparnisquote erreichen würde, solange neue Reaktoren in Betrieb genommen werden. Die neuesten Studien (LV 45) zeigen, dass, wenn die Rückführung des Urans und des Plutoniums von 1985 an systematisch angewendet würde, die daraus entstehenden Ersparnisse an Natururan 1990 18%, 1995 23% und im Jahre 2000 24% betragen könnten, während die entsprechenden Einsparungen für die Anreicherungsarbeit 14%, 18% resp. 21% betragen würden.

Das Plutonium kann ebenfalls als Brennstoff in den schnellen Brütern * verwendet werden. Dieser Reaktortyp produziert aus Uran-238 mehr Plutonium, als er verbraucht.

11. Versorgungssicherheit und wirtschaftliche Aspekte

11.1 Versorgungssicherheit

Es ist klar, dass die Hinwendung zur Kernenergie in keiner Weise unsere Energie-Abhängigkeit vom Ausland verringert. Wegen der zusätzlichen Energiequelle wird aber unsere Versorgungssicherheit verbessert. Nutzbares Uranvorkommen gibt es in zahlreichen Ländern der fünf Kontinente. Geographisch sind sie besser verteilt als die Ölvorkommen. Die Kapazität der Produktion von Urankonzentraten spielt eine wichtige Rolle. Sechs bis acht Jahre sind nötig, um eine Mine in Betrieb zu setzen. Eine Arbeit der OECD (LV 1) gibt Auskunft über die Produktionskapazitäten, die im Zeitraum von 1979 bis 1990 erreicht werden könnten. Die für 1990 vorgesehene Kapazität von 120 000 Tonnen pro Jahr dürfte genügen, um die Bedürfnisse der in dieser Analyse vorgesehenen Kraftwerke zu decken. Als Vergleich betrug die 1978er Produktion 34 000 Tonnen Uran, was jährliche Neuladungen von Kernanlagen mit insgesamt 130 000 MWe und die Erstladung von 35 Anlagen zu je 1000 MWe gestattet.

Was die Anreicherung des Urans betrifft, ist die Situation die folgende: 1978 lieferten nur die USA und Sowjetrußland solche Dienste. Seit 1979 hat sich die Lage durch Inbetriebnahme von drei Werken in Frankreich, Holland und England verbessert. Zu Beginn wird die Kapazität der drei europäischen Werke zusammen nur 15% der Weltproduktion betragen, aber dieser Anteil sollte schon 1981 auf ungefähr 30% anwachsen. Die Brennelemente werden schon in sieben Ländern hergestellt, davon sechs in Europa.

Tabelle 8: Schätzung der Brennstoffkosten (Januar 1980); (Kernkraftwerk 1000 MWe BWR; bezogen auf 1 kg auf 2,8% angereichertes U)

	Einheitspreis	Menge	Preis/kg U Endprodukt sFr.	Rp./kWh	% des Brennstoffpreises
Natürliches UF ₆	112 \$/kg U	5,14 kg U	921	0,42	26
Anreicherung	100 \$/TAE	3,91 TAE	626	0,29	18
Herstellung	215 \$/kg U	1,0 kg U	344	0,16	10
Zinsen des investierten Kapitals			409	0,18	11
Wiederaufbereitung und Abfallverfestigung	3000 FF/kg U	0,96 kg U	1152	0,37	23
Wiedergewonnenes U					
— Aequiv. nat. U	112 \$/kg U	1,20 kg U	— 215		
— Aequiv. TAE	100 \$/TAE	0,16 TAE	— 26		
Wiedergewonnenes Pu	10 \$/g	5,7 g	— 91	0,20	12
Abfallbeseitigung ¹⁾			440		
Total			3560	1,62	100

Jährliche Ausgaben ²⁾ (für ca. 30 t U für 6500 Betriebsstunden pro Jahr bei Vollast): ca. 107 Mio sFr.

Annahmen: 1 \$ = 1,6 sFr.; 1 FF = 0,40 sFr.; Zinsfuß: 5%; Herstellungsverluste: 1%; 1 kg U (2,8% U-235) produziert ca. 220 000 kWh.

¹⁾ Es handelt sich um eine von der NAGRA vorgenommene Schätzung bezüglich der Entsorgung der aus der Wiederaufbereitung anfallenden radioaktiven Abfälle (LV 29).

²⁾ Inklusive Kosten des Reservebrennstoffs für ein Jahr.

Der Bedarf der Schweiz an Natururan von 1980 bis 1990 für den in den Kernkraftwerken Beznau, Mühleberg, Gösgen und Leibstadt gebrauchten angereicherten Brennstoff beläuft sich auf ungefähr 5200 Tonnen. Die vor Ende 1979 abgeschlossenen Verträge decken den Bedarf zu 100% bis 1984 und zu 80% für den Zeitraum von 1985 bis 1990. Der Bedarf an Anreicherungsdiensten ist zu 100% bis 1986 und zu 80% für den Zeitraum von 1987 bis 1990 vertraglich gedeckt.

Ein hauptsächlichlicher Unterschied zwischen dem nuklearen und dem fossilen Brennstoff besteht in ihrer Lagerungsmöglichkeit. Uran ist ein Brennstoff mit ausserordentlich grossem Energieinhalt. Ein Kernkraftwerk von 1000 MWe braucht jährlich nur 30 Tonnen Brennstoff (leicht angereichertes Uran), welches problemlos in einigen Eisenbahnwagen transportiert und in einem kleinen Raum gelagert werden kann. Die Versorgung einer Ölanlage gleicher Leistung erfordert 50 000mal mehr Brennstoff, für dessen Transport 2000 Eisenbahnzüge von je 250 m Länge benötigt werden.

Bei Versorgungsengpässen könnte ein Kernkraftwerk noch während ungefähr zwei Jahren betrieben werden, vorausgesetzt, dass Vorrat für eine Jahresneuladung vorhanden wäre. (Dies ist für die in der Schweiz in Betrieb stehenden Werke der Fall.) Für Öl- oder Kohlewerke wäre die Betriebsautonomie wegen der beschränkten Lagerungsmöglichkeiten des Brennstoffs nur während einiger Monate garantiert. Wir erinnern schliesslich daran, dass die hydraulischen Werke, von meteorologischen Zufällen abgesehen, keine Brennstoffversorgungsprobleme haben.

11.2 Brennstoffkosten

Der Anteil des Brennstoffs an den Kosten der nuklear hergestellten kWh ist nicht unbedeutend (25—30%)¹⁾. Er ist aber niedriger als der Kostenanteil für Kohle oder Öl in einem klassischen thermischen Werk (70 bis 80%). Die detaillierten Kosten des Brennstoffs für eine jährliche Nachladung einer Siedewassieranlage von 1000 MWe sind in Tabelle 9 angegeben. Die Kosten für eine Druckwassieranlage stehen diesen sehr nahe.

Es ist interessant zu vermerken, dass der Preis des Urans auf dem Weltmarkt zwischen 1973 und 1976 von 16 auf 104 \$ je kg gestiegen ist, um sich zu stabilisieren und dann wieder abzusinken. Da der Anteil des Urans am Gestehungspreis der kWh bescheiden ist und der Dollar im Verhältnis zum Schweizerfranken stark abgewertet wurde, hat diese starke Verteuerung in der Schweiz nur eine Erhöhung des Preises der nuklear erzeugten kWh um ungefähr 0,4 Rp. verursacht. Eine Verdoppelung des jetzigen Preises des Natururans würde eine gleiche Preiszunahme bringen, was 7% der Produktionskosten der kWh bedeuten würde.¹⁾

¹⁾ Für die zugrundegelegten Annahmen siehe Tabelle 8.

12. Proliferation

12.1 Einleitung

Die Gefahr, dass die Entwicklung der zu zivilen Zwecken verwendeten Kernenergie direkt oder indirekt zur Erweiterung des Kreises der Länder, die über Atomwaffen verfügen, beitragen könnte, ist seit Beginn des Exportes nuklearer Technologie und Materialien erkannt worden. Als Indien, welches insbesondere die Hilfe der USA und Kanadas genoss, 1974 eine Atombombe in der Wüste von Rajastan zur Explosion brachte, ist dieses Risiko sowohl für gewisse Regierungen wie für die Bevölkerung eine Hauptsorge geworden. Es muss jedoch bemerkt werden, dass Indien die Spaltstoffe aus Anlagen bezog, die keiner Garantiekontrolle unterworfen waren, und dass alle anderen Atomstaaten Atombomben explodieren liesen, ehe sie ein Zivilprogramm für die Energieproduktion hatten.

Die auf weltweiter Ebene unternommenen Bemühungen zur Eindämmung der Proliferation haben zu einigen markanten Etappen geführt:

- Gründung der Internationalen Atomenergieagentur (IAEA) im Jahre 1957 in Wien. Sie zählte 1979 110 Mitgliedstaaten. Eine ihrer Aufgaben ist die Vornahme von Garantiekontrollen, die in den nachstehenden Verträgen, bi- und trilateralen Vereinbarungen über Garantieübertragung vorgesehen sind (Beispiel: IAEA—Deutschland—Brasilien).
- Inkraftsetzung 1967 des Abkommens von Tlatelolco, das vor allem von lateinamerikanischen Staaten unterzeichnet wurde. Die Mitgliedstaaten verpflichten sich, keine Nuklearwaffen zu testen, einzusetzen, herzustellen, aufzunehmen oder zu lagern.
- Der Atomsperrvertrag (Nonproliferation-Treaty NPT), 1970 in Kraft getreten, welchem Ende 1979 108 Staaten beitraten, darunter die Schweiz (LV 46). Doch weder Frankreich, Indien, China, noch etwa zehn weitere Staaten, die auf ihrem Territorium Aktivitäten betreiben, die mit Kernenergie zusammenhängen, sind diesem Abkommen beigetreten. Der NPT zielt dahin, allen unterzeichnenden Ländern den Zugang zu nuklearer Technologie und Spaltstoffen zu sichern. Demgegenüber verpflichten sich diese Länder, auf die Entwicklung von Kernwaffen zu verzichten. Die IAEA ist mit der Durchführung der nötigen Kontrollen betraut.
- Ein 1976 vom Londoner-Club aufgestellter Verhaltenskodex. Dieser Club vereinigt die wichtigsten Uranexporteure von West und Ost (heute 15 an der Zahl, darunter Frankreich und die Schweiz). Dieser Kodex ordnet die Bedingungen, die den nukleare Technologie kaufenden Ländern — Ausrüstung und spaltbares Material — auferlegt werden. Einige dieser Klauseln sind von gewissen Nicht-Nuklearen-Ländern nur widerwillig angenommen worden, da sie darin eine Unvereinbarkeit mit dem NPT sehen.

- Der Widerstand der amerikanischen Regierung gegen die Wiederaufbereitung und die Entwicklung der schnellen Brüter seit 1976, d. h. gegen zwei voneinander abhängige Technologien, welche die Industrialisierung der Verwendung des Plutoniums voraussetzen (LV 48). Dieser Widerstand wurde in den meisten europäischen Ländern ungünstig aufgenommen, da sie ärmer an Uran, aber in der Entwicklung dieser beiden Technologien fortgeschrittener sind als die USA.
- Der Nuclear Non-Proliferation Act, ein wichtiges, vom amerikanischen Kongress am 9. Februar 1978 angenommenes Gesetz (LV 49).

In den letzten Jahren sind mehrere tiefschürfende Analysen erschienen. Wir erwähnen nur die 1978 vom Atlantic Council of the U.S. (LV 49) herausgegebene Analyse sowie diejenige der SIPRI von 1979 (LV 50).

Ferner hat die «International Nuclear Fuel Cycle Evaluation» (INFCE) auf Anregung der amerikanischen Regierung von Ende 1977 bis Februar 1980 die Zusammenhänge studiert, die zwischen der zivilen Anwendung der Kernenergie und der Proliferation der Atomwaffen bestehen könnten (s. Kap. 8). Sie stellte Risiken in allen untersuchten Brennstoffkreisläufen fest, inbegriffen demjenigen der Leichtwasserreaktoren. Die Nichtproliferation rechtfertigt die Zurückstellung oder Aufgabe der Wiederaufbereitung und der Option für schnelle Brüter nicht. Jedoch werden ausge dehntere Kontrollen und die Schaffung von internationalen Zentren für Wiederaufbereitung und Anreicherung empfohlen.

Wir haben hier nicht die Absicht, die politischen Aspekte des atomaren Wettrüstens zu behandeln, dessen Rückwirkungen die Schweiz nicht verschonen¹, sondern vom technisch-wissenschaftlichen Standpunkt aus die Etappen des zivilen Kernbrennstoffkreislaufs zu analysieren, welche zur Abzweigung von Spaltstoffen führen könnten. In der Tat ist deren Besitz ein Schlüsselement für die Konstruktion eines nuklearen Sprengkörpers.

12.2 Begriffsbestimmungen

Im nuklearen Bereich bedeutet «Proliferation» sowohl die zahlenmässige Zunahme der Kernsprengstoffladungen als auch der darüber verfügenden Staaten oder Organisationen. Die atomaren Sprengstoffe können in drei hauptsächliche Richtungen proliferieren:

¹) Seit mehreren Jahren lehnt es Kanada ab, der Schweiz Uran zu liefern. Die USA drohen, die zur Wiederaufbereitung der ausgebauten Brennelemente nötigen Genehmigungen nicht mehr zu erteilen. Gewisse Lieferungen der schweizerischen Industrie an Länder der dritten Welt sind der Grund dafür.

- Die erste, die man «vertikale Proliferation» zu nennen pflegt, besteht aus der Zunahme der Anzahl atomarer Waffen oder Waffentypen in den Zeughäusern der diese Art von Waffen bereits besitzenden Nationen. Die Staaten, die offiziell den Besitz zugeben, sind die USA, die UdSSR, Grossbritannien, Frankreich und China. Indien gibt zu, darüber zu verfügen, erklärt jedoch, keine Waffen zu entwickeln. Die Möglichkeit, diese Proliferation zu beschränken, ist sehr gering.
- Die zweite Richtung, «horizontale Proliferation» genannt, ist diejenige der Zunahme der Anzahl der Nationen, die über Atomwaffen verfügen. Die horizontale Proliferation kann eingestanden oder verheimlicht werden.
- Schliesslich kam man überein, «Diebstahl» oder «Abzweigung» diejenige Proliferation zu nennen, die aus der Aneignung von Spaltstoffen oder Kernwaffen durch nicht staatliche Organisationen entstünde.

Man sagt, dass eine Kernanlage «den Garantien unterstellt» ist, wenn die dort gehandhabten Spaltstoffe von einer anerkannten internationalen Organisation wie z. B. der IAEA kontrolliert werden.

Endlich spricht man von «empfindlichen» Stoffen und von «empfindlichen» Etappen des Brennstoffkreislaufs, wenn ein Proliferationsrisiko damit verbunden ist.

12.3 Die atomaren Sprengstoffe

Die Verhütung der horizontalen Proliferation und «Abzweigung» beruht vor allem auf einer äusserst strengen Kontrolle der für atomare Explosionen verwendbaren Stoffe; die Kontrolle muss den Zugang zu diesen Stoffen beschränken.

Man geht im allgemeinen davon aus, dass Uran, welches mehr als 20% des Isotops * 235 (oder 233) enthält, mit speziellen Vorsichtsmassnahmen zu handhaben ist, während das in den Leichtwasserreaktoren verwendete, zu 3% angereicherte Uran nicht zur Herstellung von Sprengkörpern dienen kann. Die Anti-Proliferationsmassnahmen betreffen ebenfalls das Plutonium, das als «von militärischer Qualität» bezeichnet wird, wenn es 90% oder mehr des Isotops 239 enthält, sowie dasjenige aus den Leichtwasserreaktoren, das sich aus ungefähr 70% Plutonium 239 und 30% der anderen Pu-Isotopen zusammensetzt. Denn das verhältnismässig stark angereicherte Uran und die verschiedenen Isotopmischungen des Plutoniums können in der Tat als Grundmaterial zur Herstellung von Kernwaffen dienen, deren Stärke von der Spaltstoffmenge *, mehr aber noch von ihrer Isotopzusammensetzung und vom Stand des technologischen Wissens des Fabrikanten abhängen wird (LV51—53).

12.4 Schätzung der Proliferationsrisiken für die verschiedenen Phasen des Brennstoffkreislaufs

Ganz allgemein wollen wir vorerst festhalten, dass die horizontale und die vertikale Proliferation, die vor allem vom politischen Willen der Staaten abhängen, bis heute wenig oder gar nicht durch das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein von zivilen Energieproduktionsprogrammen beeinflusst worden sind, sofern diese wirkungsvoll den Garantien unterstellt waren. Dessen ungeachtet nimmt man an, dass das Vorhandensein von ansehnlichen Mengen «empfindlichen» Materials — selbst wenn es den Garantien unterstellt ist — sowie die Verbreitung der wissenschaftlichen und technischen Kenntnisse durch die zivile Anwendung der Kernenergie ein gewisses Proliferationsrisiko darstellt, obwohl dieser Weg sicher nicht der leichteste zur Schaffung einer atomaren Bewaffnung ist.

Die Proliferation durch «Diebstahl» oder «Abzweigung» kann selbstverständlich nur von den militärischen oder zivilen Kernprogrammen aus erfolgen.

Die Analyse der Proliferationsrisiken, die den verschiedenen Phasen eines Brennstoffkreislaufs innewohnen, wird auf Grund einer gewissen Anzahl von Kriterien vorgenommen. Die vier hauptsächlichsten sind: die zur Produktion einer explosiven Ladung benötigte Zeit, das Ausmass der anzuwendenden Mittel, die Wahrscheinlichkeit der Entdeckung der zur Vorbereitung der Ladung nötigen Operationen und die Möglichkeit, die bestehenden Anlagen den Garantien unterzuordnen. Für den Brennstoffkreislauf des Leichtwasserreaktors hebt eine solche Analyse die empfindlichen Aspekte gewisser Phasen hervor:

Die Anreicherung ist nur vom Gesichtspunkt der vertikalen Proliferation her eine empfindliche Phase, da die Umwandlung der gegenwärtig für die Zivilproduktion bestimmten Anlagen mit Gasdiffusion und 30/oiger Anreicherung zu Anlagen für die Produktion von hochangereichertem Uran eine schwierige und komplizierte Sache ist.

Flexiblere Technologien, die zur Zeit das industrielle Stadium erreichen (Zentrifugierung) oder noch im Versuchsstadium stehen (Laser), werden jedoch ein viel grösseres Risiko darstellen (LV 49). Im Gegensatz dazu soll das französische Verfahren chemischer Anreicherung den Vorteil haben, rasch an Wirkung zu verlieren, wenn die Anreicherung hoch wird (LV 54).

Die Wiederaufbereitung ist sowohl für die vertikale wie auch für die horizontale Proliferation eine empfindliche Phase, denn auf diesem Niveau tritt das Plutonium in reiner Form auf. In dieser Phase ist es auch am

schwierigsten, genaue Materialbilanzen aufzustellen, um so Materialüberschüsse oder fehlendes Material aufzuspüren. Diese inhärenten Ungenauigkeiten bezeichnet man mit MUF, nach dem englischen Ausdruck «materials unaccounted for». Die Fehlergrenze ist normalerweise nicht grösser als ein Prozent. Dies genügt aber schon, um Defizite an Plutonium und hoch angereichertem Uran auftreten zu lassen, welche mehrere Male 10 kg betragen können (LV 55). Es wäre nicht richtig, zwischen den von den MUF-Mengen und den zur Herstellung einer explosiven Ladung benötigten Mindestmengen, welche um 10 kg betragen, einen direkten Vergleich anzustellen. In der Tat werden diese Materialdefizite den Ablagerungen in den Rohrleitungen und Analyseungenauigkeiten zugeschrieben; die Möglichkeit einer «Abzweigung» kann jedoch nicht unbedingt ausgeschlossen werden.

Die Lagerung und der Transport des abgetrennten Plutoniums oder der Brennelemente, welche eine Mischung aus Plutonium und Uran enthalten (gemischtes Oxid), stellen ebenfalls ein Proliferationsrisiko dar.

Dagegen betrachtet man die Gewinnung und die Konversion des natürlichen Urans als wenig proliferierend, da dessen Umwandlung in einen Kernsprengkörper lange, komplizierte und leicht erkennbare Operationen verlangt. Ebenfalls als wenig proliferierend gilt die Verwendung der Brennelemente im Reaktor und ihr Transport nach der Bestrahlung, da sie dann durch die starke Strahlung der Spaltprodukte * geschützt sind.

Die Etappen des Brennstoffkreislaufs der Leichtwasserreaktoren * bilden selbstverständlich nicht den einzig möglichen Weg zur Atomwaffe ausserhalb eines militärischen Programms, nicht einmal den zweckmässigsten. Die Schwerwasser- oder Graphitreaktoren z. B. funktionieren mit natürlichem oder sehr schwach angereichertem Uran. Sie produzieren ein Plutonium, dessen Isotopengehalt dem militärischen Plutonium näher steht als dasjenige, das aus den Leichtwasserreaktoren kommt. Wir haben den Kreislauf des Plutoniums der schnellen Brüter, von denen schon mehrere Prototypen arbeiten, bereits erwähnt. Schliesslich besteht ein sicheres Proliferationsrisiko bei den kleinen Versuchsreaktoren, deren Brennstoff häufig hoch angereichertes Uran ist, welches ein strategisches Material darstellt. Von diesen Versuchsreaktoren gibt es mehr als 400 auf der Welt, davon 5 in der Schweiz (LV 49).

12.5 Schutzmassnahmen gegen Proliferation

Die zur Verminderung des Proliferationsrisikos getroffenen Massnahmen gruppieren sich in drei Kategorien: die technischen Massnahmen, das Garantiesystem und die institutionellen Vereinbarungen. Bis jetzt stützten

sich die meisten Schutzmassnahmen gegen die Proliferation auf die technischen Mittel und das Garantiesystem; aber diese sind nicht gänzlich frei von Schwächen und werden nicht für längere Zeit genügen können, da mehr Kernanlagen gebaut werden und die Vorräte an Spaltmaterial rasch ansteigen. Deshalb werden die institutionellen Vereinbarungen eine immer wichtigere und vorherrschende Stellung einnehmen.

Technische Massnahmen

Dreierlei technische Massnahmen sind vorgesehen:

- diejenigen, welche dahin zielen, im Brennstoffkreislauf und unter separater Form das Vorhandensein von Stoffen zu reduzieren, die zur Herstellung von Sprengkörpern dienen;
- diejenigen, welche die Radioaktivität dazu benützen, Spaltstoffe vor einer Abzweigung zu schützen;
- diejenigen, welche die Spaltstoffe mittels physischer Schranken absondern.

Einzig die letzteren sind zur Zeit im Gebrauch. Die Experten der INFCE haben erkannt, dass Massnahmen der zweiten Art auf dem Gebiete der Ökologie, der Radiologie, der Wirtschaft, der Rohstoffnutzung und der Anwendung des Garantiesystems Nachteile haben. Schliesslich müssen die Massnahmen der ersten Art noch richtig ausgearbeitet werden.

Die technischen Massnahmen werden unter der Oberhoheit jedes einzelnen Staates vorgenommen; sie schützen keineswegs gegen die vertikale Proliferation und haben relativ geringe Wirkung gegen die horizontale Proliferation. Ihre Wirksamkeit gegen Diebstahl und Abzweigung hingegen scheint befriedigend.¹⁾

Garantiesystem

Das Garantiesystem besteht darin, dass ein Staat es erlaubt, seine Kernanlagen durch eine anerkannte internationale Organisation, im allgemeinen die IAEA, ganz oder teilweise zu inspizieren, so dass die Verwendung der Spaltstoffe rasch bekannt wird. Zur Zeit beruht das System auf einer Buchhaltung über die Spaltstoffe und auf der Überwachung der ein- und ausgehenden Spaltstoffe in den kontrollierten Anlagen. Die Aus-

1) Die Ladung von 200 Tonnen natürlichen Urans des Frachtschiffes «Scheerberg» wurde 1968 abgezweigt; offiziell weiss man nicht, was damit geschah. Diese Tatsache wurde erst 1977 öffentlich bekanntgegeben. Natürliches Uran wird als wenig proliferierend angesehen. Soweit den Verfassern bekannt ist, hat es keine anderen wichtigen, unbestrittenen und öffentlich zugegebenen Abzweigungen von Spaltmaterial gegeben.

führung dieser Massnahmen wird durch die Inspektoren der IAEA kontrolliert.

Die Verbesserung des Garantiesystems ist in Entwicklung begriffen, um den neuen Anreicherungsverfahren (z. B. Laser), der Wiederaufbereitung in grossem Massstab und der Herstellung von Elementen mit gemischten Oxiden gerecht zu werden.

Mit technischen Massnahmen kombiniert erlaubt das Garantiesystem gegen die horizontale, nicht aber gegen die vertikale Proliferation vorzugehen. Es erfordert den Einsatz zahlreicher internationaler Beamter. Bei der Feststellung von Unregelmässigkeiten ist die IAEA nicht ermächtigt, mit personellen Mitteln einzuschreiten (LV 48). Sie hat aber die Pflicht, sofort den Sicherheitsrat der Vereinten Nationen und die Regierungen der Mitgliedstaaten der IAEA zu benachrichtigen.

Jeder Staat, der den Atomsperrvertrag unterzeichnet hat, hat das Recht, in Ausübung seiner nationalen Souveränität vom Vertrag zurückzutreten, wenn er entscheiden sollte, dass ausserordentliche, mit dem Gegenstand des Vertrages zusammenhängende Ereignisse die höchsten Interessen seines Landes gefährden würde. Er muss seinen Rücktritt drei Monate vorher anzeigen. Die Einfuhr von Rohmaterialien, von Spaltstoffen oder Ausrüstungen würden dann für diesen Staat schwieriger werden, denn die Kontrollbedingungen, denen er unterworfen wäre, würden strenger sein.

Institutionelle Vereinbarungen

Das Konzept der institutionellen Vereinbarungen schliesst die internationalen Verträge und gegenseitigen Absprachen ein, die wir in der Einleitung erwähnten und in allgemeiner Weise alle Handelsverträge und bilateralen oder multilateralen Verträge zwischen Staaten, welche so z. B. die Versorgungssicherheit gewährleisten. Verschiedene Typen von institutionellen Vereinbarungen werden zur Zeit durch internationale, mehrheitlich von der IAEA einberufene, Arbeitsgruppen geprüft, so z. B. die Schaffung internationaler Lager von bestrahlten Brennelementen und von Plutonium. Die Anreicherungsanlage von EURODIF, die einer Gruppe von Energieproduzenten aus fünf Ländern gehört, ist ein konkretes Beispiel dieser Art von Vereinbarungen, welche dank dem multinationalen Charakter ihrer Entscheidungsmechanismen das Proliferationsrisiko vermindern. Vereinbarungen dieser Art sind z. B. von der IAEA für künftige Wiederaufbereitungsanlagen und Brennstoffzentren in Betracht gezogen worden. Sie würden die Wiederaufbereitung, die Herstellung der Brennelemente und die Lagerung der Spaltstoffe am gleichen Ort zusammenlegen (LV 56).

Der Hauptzweck solcher Vereinbarungen ist die Verstärkung der Mechanismen der internationalen Zusammenarbeit in den Bereichen der zivilen Nutzung der Kernenergie und in der Nicht-Proliferation.

Schliesslich werden alle Massnahmen zur Verminderung der internationalen Spannungen zur Herabsetzung des Proliferationsrisikos beisteuern. Insbesondere sind alle Massnahmen, die zu einer grösseren energetischen Unabhängigkeit führen, anti-proliferierend. Fundamental ist die Rolle der sozialpolitischen Faktoren, die über den Rahmen des vorliegenden Berichts hinausgehen, da die Proliferationsrisiken z. T. direkt durch das Vorhandensein von schweren Konflikten, die den Absprachemechanismen entgehen, bedingt sind.

Begriffe

Abbruch: Die Gesamtheit der Dekontaminations-, Demontierungs- und Abfallversorgungsprozeduren bei der Stilllegung einer Kernanlage.

Abfälle, radioaktiv: Man unterscheidet:

- 1) Abfälle mit schwacher und mittlerer β - und γ -Aktivität: Diese in Reaktoren und Wiederaufbereitungsanlagen produzierten Abfälle haben ein unterschiedliches Kontaminationsniveau. Die von den Reaktoren stammenden Abfälle enthalten gewöhnlich keine Aktinide. Die Abfälle aus den Wiederaufbereitungsanlagen können jedoch einen sehr geringen Aktinidgehalt haben.
- 2) Abfälle mit hoher Aktivität: Diese Benennung bezeichnet fast immer die hochradioaktiven Lösungen von Spaltprodukten, die aus den bestrahlten Brennelementen während der chemischen Wiederaufbereitung ausgeschieden wurden. Die hochradioaktiven Abfälle geben bedeutende Mengen von Wärme ab, die der Radioaktivität zuzuschreiben ist, und erfordern Absonderung und Konzentration. Die hochaktiven Abfälle werden zu einem geringen Volumen konzentriert und in gekühlten Behältern gelagert, bis sie verfestigt und in ein für längeres Verweilen bestimmtes Lager transportiert werden.
- 3) α -Abfälle: Diese Art von Abfällen, die verfestigt sind (auch durch Aktinide oder Transurane kontaminierte Abfälle genannt), werden meistens durch die Wiederaufbereitungsanlagen und die Werke, welche Gemischtoxid-Brennelemente (UO_2 PuO_2) herstellen, produziert. Ihre gemeinsamen Charakteristika sind ein Gehalt an Alpha-Strahlen, welche besondere Versorgungsmassnahmen erfordern.

Aktinide: Gruppe von Elementen, die gleiche chemische Eigenschaften haben. Zu diesen gehören unter anderen: Actinium, Thorium, Protactinium, Uran, Neptunium, Plutonium, Americium und Curium.

α -Partikel: Bei Emission einer α -Strahlung verwandelt sich ein radioaktiver Atomkern, indem er einen Heliumkern ausstösst, der zwei positive Ladungen trägt, d. h. eine aus zwei Neutronen und 2 Protonen zusammengesetzte Partikel; es bildet sich somit ein neuer Atomkern, dessen atomare Zahl um 2 Einheiten geringer ist. Der sich bildende Kern muss nicht unbedingt stabil sein; er kann ebenfalls radioaktiv zerfallen.

Aktivierungs-Produkt: Durch eine Bombardierung mit Neutronen oder andern Partikeln radioaktiv gewordene Materie.

Aktivität: Menge eines zerfallenden radioaktiven Stoffes oder Nuklides. Man misst die Aktivität nach der Anzahl der pro Zeiteinheit zerfallenden Atomkerne. Ihre Einheit ist das Curie.

β -Partikel: Man bezeichnet mit β -Strahlung die Emission von Elektronen, die negativ oder positiv geladen sein können. Die letzteren heissen Positronen.

Brennstoff mit gemischten Oxiden: Reaktorbrennstoffe, die mehr als eine Art spaltbare Nuklide enthalten, alle in Form von Oxiden. Dieser Ausdruck bezeichnet gewöhnlich jene Brennstoffe, welche Uranoxid und Plutoniumoxid enthalten.

Brütbar: Dieses Wort bezeichnet die Eigenschaft des Isotops eines Elementes, das nach Einfang eines Neutrons ein spaltbares Isotop erzeugen kann.

Curie, Ci: Aktivitätseinheit. Man hat eine Aktivität von 1 Curie (Ci), wenn $3,7 \cdot 10^{10}$ Atome einer radioaktiven Substanz in einer Sekunde zerfallen; $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$

Dekontamination: Reinigung der Oberflächen von durch radioaktive Partikel kontaminierten Gegenständen mittels chemischer oder physikalischer Mittel.

Dosis: Strahlungsdosis: entspricht der von einer Substanz absorbierten Strahlungsmenge. Die Strahlungstypen sind durch ihre biologische Wirkung voneinander verschieden. Um diesen verschiedenen Wirkungen Rechnung zu tragen, multipliziert man die Dosis D mit dem Qualitätsfaktor und erhält auf diese Weise ein neues Maß der Dosis, die man für Menschen mit «Äquivalentdosis» bezeichnet. Die Einheit ist das rem, «Roentgen Equivalent Man», $1 \text{ rem} = 1000 \text{ mrem}$.

Druckwasser-Reaktor (PWR): Ein Reaktor, dessen Druck des primären Kreislaufs derart gewählt ist, dass das Wasser nicht sieden kann. Der Dampf wird in einem sekundären Kreislauf erzeugt.

Elektrisches Megawatt MWe: Leistungseinheit gleich 1 Million Watt (elektrisch).

Elementarfluor: Fluor, das mit keinem anderen Element vereinigt ist, chemisch sehr aktiv.

Endlagerung: Ort für radioaktive Abfälle, möglichst von der Biosphäre isoliert, so dass nach seiner Versiegelung keinerlei Überwachung mehr nötig ist und sich auch die Frage der späteren Herausnahme der Abfälle nicht mehr stellt.

Flüchtig: Leicht verdampfbar.

γ -Strahlung: Die γ -Strahlung ist eine elektromagnetische wellenförmige Strahlung. Sie begleitet oft die α - und β -Strahlungen, denn nach dem Verlust einer α - oder β -Partikel kann sich der neue Kern in einem Zustand energetischer Anregung befinden. Er kehrt zu seinem Grundzustand zurück, indem er ein genau bestimmtes Quantum von γ -Energie emittiert.

Gas-Graphit: Bezeichnet die Reaktoren, die Graphit als Moderator und Kohlendioxid als Kühlmittel benützen.

Gemischtes Oxid: Siehe Brennstoff mit gemischten Oxiden.

Geschätzte zusätzliche Reserven: Darunter versteht man die Uranmengen, die zu den sicheren Reserven hinzukommen, deren Vorhandensein man, besonders auf direkte geologische Daten gestützt, vermutet und zwar in

- Erweiterung gut erforschter Vorkommen,
- in wenig erforschten Vorkommen,
- in noch nicht entdeckten Vorkommen, deren Vorhandensein man in Formationen mit genau definiertem geologischem Charakter annimmt.

Handschuhboxe: Eine Vorrichtung, welche die Handhabung radioaktiver Stoffe von aussen her im Innern einer abgedichteten Zelle erlaubt. Das radioaktive Material wird mittels Gummihandschuhen gehandhabt.

Heisse Zelle: Geschlossener und gepanzerter Raum, in dessen Innern die radioaktiven Stoffe fernbedient gehandhabt werden.

Höchstzulässige Dosis: Grenzen der Strahlenexposition, die von der Internationalen Kommission für radiologischen Schutz ICRP zur Beschränkung der Exposition menschlicher Wesen an ionisierende Strahlen empfohlen sind.

Ionen-Austauscher: Ein Apparat zur Reinigung von Flüssigkeiten, in welchem die Ionen der zu reinigenden Flüssigkeit auf der Basis ihrer verschiedenen chemischen Eigenschaften gegen andere verträgliche Ionen, die aus der Ionenaustauschermasse stammen, ausgewechselt werden.

Ionisierende Strahlen: Emission von Strahlen, die den ihnen begegnenden Atomen Elektronen entreissen und auf diese Weise Ionenpaare bilden.

Isotop: Eines unter den Nuklide, die dieselbe atomare Ordnungszahl, aber abweichende atomare Massen und demzufolge eine verschiedene Anzahl Neutronen haben. Die Isotope haben gewöhnlich fast identische chemische Eigenschaften.

Kalzinieren: Eine thermische Prozedur, die zur Bildung von Oxiden führt; im gegenwärtigen Fall eine Vorstufe der Verglasung.

Kettenreaktion: Ein Neutron verursacht die Spaltung eines Atoms, was neue Neutronen freisetzt, die ihrerseits neue Spaltungen verursachen und neue Neutronen freisetzen etc.

Kilowatt (kW): Leistungseinheit, welche 1000 Watt entspricht.

Kilowattstunde (kWh): Energiemenge, die 1 kW während einer Stunde produziert.

Knallgas: Ein gasförmiges Gemisch von Wasserstoff und Sauerstoff, das unter gegebenen Bedingungen sehr explosiv sein kann.

Kollektivdosis «Aequivalent der individuellen Dosen»: Summe der einzelnen Aequivalentdosen. Für eine bestimmte Gruppe von Personen kann sie auch als Produkt der Aequivalentdosis der Einzelpersonen multipliziert mit der Anzahl der exponierten Personen berechnet werden. Die Kollektivdosis wird in Mannrem angegeben.

Kondensator: Wärmeaustauscher, der hinter der Turbine liegt und in welchem der Dampf wiederkondensiert wird.

Konditionierung: Sie besteht darin, die radioaktiven Abfälle in eine Form zu bringen, die wirkungsvoll die Ausbreitung ihrer Aktivität verringert und die sich sowohl für den Transport als für die Pufferlagerung und Definitivlagerung eignet.

Kontamination: Verunreinigung durch radioaktive Partikel in Luft, Flüssigkeiten oder an Oberflächen.

Kritikalität: Situation, in welcher die Anordnung und die Menge des Spaltstoffs eine selbsterhaltende Kettenreaktion ermöglicht.

Kritische Bevölkerung: Gruppe von Personen der Bevölkerung, die die höchste Strahlungs-dosis während dem Normalbetrieb oder infolge eines Störfalls erlitten haben.

Kritische Masse: Die zur Produktion einer selbsterhaltenden Kettenreaktion nötige Spaltstoffmenge.

Leichtes Wasser: Gewöhnliches Wasser, im Gegensatz zum schweren Wasser.

Leichtwasser-Reaktor (LWR): Reaktor, der mit gewöhnlichem Wasser gekühlt und moderiert wird.

Lösungsmittel: Eine flüssige Substanz, die andere Substanzen aufzulösen vermag.

Magnox: Magnesiumlegierung, die in gewissen gasgekühlten Reaktoren als Hüllenmaterial für Brennelemente verwendet wird; diese Reaktoren werden «Magnox-Reaktoren» genannt.

Mannrem: Äquivalent-Einheit der Kollektivdosis.

Mikrocurie (μCi): Radioaktivitätseinheit gleich 1 Millionstel Curie.

Millirem: $1/1000$ der Einheit rem.

Moderator: Teil eines Reaktors, dessen Funktion darin besteht, die Neutronen zu verlangsamen, um ihr Spaltvermögen zu erhöhen.

MWe-Jahr: Elektrische Energiemenge, geliefert von einer Quelle mit einer Stärke von 1 MWe während eines Jahres.

Nanocurie ($n\text{Ci}$): Radioaktivitätseinheit gleich 1 Milliardstel Curie.

Neutron: Neutrales elementares Partikel und konstituierender Bestandteil des Atomkerns.

Neutroneneinfang: Der Zielkern absorbiert ein Neutron und gibt augenblicklich den Überschuss an Energie durch Emission eines γ -Einfangsstrahls ab.

Neutronen-Überschuss: Die stabilen Kerne bestehen aus Protonen und Neutronen in einem genau definierten Verhältnis. Hat ein Kern zu viele Neutronen (Spaltprodukt), ist er instabil und nach einer Folge von radioaktiven Zerfällen, bei denen die überschüssigen Neutronen in Protonen verwandelt werden, gelangt er zum stabilen Zustand.

Nuklid: Ein durch seine atomare Ordnungszahl, seine Massenzahl und den energetischen Zustand seines Kerns bestimmtes Atom.

Pechblende: Uranerz mit hohem Urangehalt, das man in Gesteinsadern findet.

Radioaktivität: Die Eigenschaft eines Nuklids, ionisierende Strahlung auszusenden.

Radioaktivität — Halbwertszeit: Zeitspanne, während deren Ablauf die Hälfte der Masse einer radioaktiven Substanz — Radionuklid, radioaktives Isotop — zerfällt. Die radioaktiven Halbwertszeiten können einige Bruchteile einer Sekunde oder mehrere Jahrtausende dauern.

Radiolyse: Radiochemische Zersetzung von Substanzen, besonders des Wassers.

Radiolytische Zersetzung: Zersetzung von Stoffen durch ionisierende Strahlungen.

Radiometrie: Die Gesamtheit der zur Messung der verschiedenen ionisierenden Strahlen angewandten Methoden.

Radionuklid: Radioaktives Nuklid. Es zerfällt mit einer charakteristischen Halbwertszeit. Ungefähr 1500 verschiedene Nuklide sind bekannt, die sich zwischen den 105 Elementen verteilen. Von diesen sind 1200 Radionuklide.

Reduzieren: Chemischer Vorgang, der zu einer Sauerstoffgehaltsabnahme oder einer Wasserstoffgehaltszunahme führt.

Rem: Einheit des Dosis-Aequivalents, das im Gebiet des Strahlenschutzes gebraucht wird. Man erhält Dosen in rem durch Multiplikation von in rads ausgedrückten Dosen mit angemessenen Faktoren, welche die biologischen Wirkungen der verschiedenen Strahlungsarten berücksichtigen.

Schneller Brüter: Ein Reaktor, der mehr spaltbaren Brennstoff herstellt, als er verbraucht. Der neue Spaltstoff wird durch den Einfang von schnellen Neutronen, die aus der Spaltung hervorgehen, in brütbares Material erzeugt.

Schweres Wasser: Wasser, in welchem das normale Isotop des Wasserstoffs, das Protium (H-1), durch Deuterium (H-2) ersetzt ist. Der Deuteriumgehalt des natürlichen Wasserstoffs ist ungefähr 0,015%.

Sichere Reserven: Darunter versteht man das Uran, das sich in bekannten Erzvorkommen befindet, deren Umfang, Gehalt und Gestaltung derart sind, dass man in den gegebenen Grenzen der Produktionskosten dank der heute bewährten Extraktions- und Behandlungstechniken seiner habhaft werden könnte. Die Tonnage- und Gehaltsschätzungen gründen sich auf Wertungen von spezifischen Proben und auf eine genaue Abgrenzung der Dimensionen der Vorkommen, sowie auf die Kenntnis ihrer Charakteristika.

Siedewasser-Reaktor (BWR): Ein Reaktor, dessen Druck des primären Kreislaufs derart gewählt ist, dass das Wasser siedet. Der Dampf strömt direkt zur Turbine.

Spaltprodukte: Chemische Elemente, die sich bei der Spaltung bilden, z. B. bei der Spaltung des Urans unter Einwirkung von Neutronen.

Spaltung: Physikalisches Phänomen, in dessen Verlauf unter Einfluss von Neutronen, Ionen oder einer Strahlung ein Atom einer höheren atomaren Ordnungszahl in mehrere Atome einer niedrigeren Ordnungszahl und in freie elementare Partikel fragmentiert wird.

Spekulative Reserven: Unter spekulativen Reserven versteht man die Uranmengen, die zu den geschätzten zusätzlichen Reserven dazukommen, deren Vorhandensein man hauptsächlich auf Grund von indirekten Angaben und geologischen Extrapolationen in eventuell durch die bestehenden Prospektionstechniken zu entdeckenden Vorkommen vermutet.

Strahlenschutz: Die Gesamtheit der Massnahmen, deren Ziel der Schutz gegen die ionisierenden Strahlen ist.

Thermisches Megawatt MWth: Leistungseinheit gleich 1 Million Watt (thermisch).

Toxizität: Radiotoxizität: Giftigkeit als Folge ionisierender Strahlung, der Halbwertszeit und des metabolischen Verhaltens eines radioaktiven Stoffes.

Transurane: Elemente mit einer atomaren Ordnungszahl über 92. Zu ihnen gehören z. B. Neptunium, Plutonium, Americium, Curium.

Abkürzungen

ASK	Abteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Würenlingen
BBC	Brown Boveri & Cie. AG, Baden
BNFL	British Nuclear Fuel Ltd.; staatliches Dienstleistungsunternehmen für den Kernbrennstoff-Kreislauf in Grossbritannien
BNWL	Battelle, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington
BWR	Siedewasser-Reaktor (Boiling Water Reactor)
CEA	Commissariat à l'énergie atomique; französisches Staatsunternehmen für Nuklearforschung und deren Verwertung auf friedlichem sowie militärischem Gebiet
CFDT	Confédération française démocratique du travail (frz. Gewerkschaft)
CSNI	Komitee für die Sicherheit von Atomanlagen der Kernenergie-Agentur der OECD (Committee on the Safety of Nuclear Installations)
EURATOM	Europäische Vereinigung für Atomenergie, Brüssel
EUROCHEMIC	Europäische Gesellschaft für die chemische Behandlung von bestrahlten Brennelementen
EURODIF	Europäische Aktiengesellschaft für Urananreicherung (durch Gasdiffusion); betreibt die Anlage von Tricastin in Frankreich
GESMO	amerikanische Grundsatzerklärung zur Verwendung von Uran/Plutonium-Mischoxid-Brennstoff (Generic Environmental Statement on use of Mixed Oxide fuels)
IAEA	Internationale Atomenergie-Agentur, Wien
IATA	Internationale Lufttransport-Gesellschaft (International Air Transport Association)
ICRP	Internationale Kommission für Strahlenschutz (International Commission on Radiological Protection)
INFCE	Internationale Studie über den Brennstoff-Kreislauf (International Nuclear Fuel Cycle Evaluation)
KUeR	Eidg. Kommission zur Überwachung der Radioaktivität
MUF	nicht inventarisiertes Material (Material Unaccounted For)
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Baden
NEA	Kernenergieagentur der OECD (Paris) (Nuclear Energy Agency)
NPT	Atomsperrvertrag (Non-Proliferation Treaty)
OECO	Organisation für wirtschaftliche Entwicklung und Zusammenarbeit, Paris (Organization for Economic Co-operation and Development)

PWR	Druckwasser-Reaktor (Pressurized Water Reactor)
SIPRI	Internationales Institut für Friedensforschung, Stockholm (Stockholm International Peace Research Institute)
SVA	Schweizerische Vereinigung für Atomenergie, Bern
TAE	Trennarbeits-Einheit; wird für die Bezeichnung und Berechnung der Arbeit für Urananreicherung verwendet
USAEC	Amerikanische Atomenergie-Behörde, jetzt aufgelöst und ersetzt durch das Energiedepartement (DOE, Dept. of Energy) und die Kommission zur Reglementierung der Nuklearenergie (NRC, Nuclear Regulatory Commission)
VSE	Verband schweizerischer Elektrizitätswerke

Literatur

- (1) «URANIUM — Ressources, production et demande», rapport établi conjointement par l'AEN/OCDE et l'AIEA, Paris, Déc. 1979
- (2) «World Uranium Potential», rapport établi conjointement par l'AEN/OCDE et l'AIEA, Paris, Déc. 1978
- (3) The Safety of the Nuclear Fuel Cycle, OECD-NEA CSNI report no. 25, Paris, Sept. 1978
- (4) Sources and Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR, United Nations, p. 168—170, New York, 1977
- (5) Report to the American Physical Society by the study group on nuclear fuel cycles and waste management, Reviews of Modern Physics, vol. 50, no. 1, Part II, Janvier 1978, p. 78—80; voir aussi M. V. J. Culot, K. J. Schiager et H. G. Olson, «Development of a Radon Barrier»; Health Physics, vol. 35, p. 375, 1978
- (6) J. Sevc, E. Kunz et V. Placek, «Lung Cancer in Uranium Miners and Long-term Exposure to Radon Daughter Products», Health Physics, vol. 30, p. 433 (1976); voir aussi Health Physics, vol. 35, p. 579, 1978
- (7) V. E. Archer et coll.: «Lung cancer among uranium miners in USA», Health Physics, vol. 25, p. 351, Oct. 1973
- (8) N. O'Brien: «Environmental protection in underground mining», International Symposium of the Uranium Institute, Juli 1978
- (9) Goutier R.: «Populations ou individus contaminés par des radiations». Rapport de la Commission d'évaluation belge, Groupe VI «La Santé», p. 193, 1976
- (10) John A. Patterson: «US uranium production outlook», Atomic Industrial Forum, Genève, Sept. 1976
- (11) Communication de M. F. Gilliéron, Office fédéral de la science et de la recherche, Sept. 1978
- (12) Labhart T. P.: «Uranvorkommen im Schweizer Alpenraum», Informations-tagung SVA, Zürich, März 1979
- (13) K. H. Lieser: «Einführung in die Kernchemie», Verlag Chemie GmbH, 1969
- (14) W. C. Patterson: «Nuclear Power», Penguin Books Ltd., p. 94, 1976
- (15) H. Mohrhauer: «Urananreicherungstechnik», Informationstagung SVA, Zürich, März 1979
- (16) T. H. Pigford, Annual Rev. Nucl. Sc. 24 515, 1974
- (17) H. Hodges, J. Stannard, J. Hursh: «Uranium, Plutonium, Transplutonic Elements in Handb. Exp. Pharm. XXXVI», Springer Verlag 1973
- (18) Registry of Toxic Effects of Chemical Substances, US Dep. of Health, Education and Welfare, Cincinnati 1977
- (19) D. Nobile et al.: «Effet thérapeutique du lavage pulmonaire in vivo», 4th International Symposium on Inhaled Particles and Vapors Edinburgh, Sept. 1975
- (20) W. Stoll: «Stand der Technik und die künftige Plutoniumwirtschaft», SVA-Tagung, Juni 1977
- (21) WASH-1250, «The Safety of Nuclear Power Reactors and Related Facilities», July 1973
- (22) Nénot J. C.: «Biological and toxicological aspects related to actinides and their decay products», World Health Organization, Sept. 1979
- (23) Goutier R.: «Contamination par le plutonium», Rapport de la Commission d'évaluation belge, Groupe VI, «La Santé», p. 198, 1976
- (24) Lutz H. R.: «Communication personnelle»
- (25) Berichte der Eidg. Kommission zur Überwachung der Radioaktivität für die Jahre 1973, 1974, 1975, 1976, 1977, 1978 und 1979
- (26) A. B. Johnson: «Behavior of Spent Nuclear Fuel in Water Pool Storage» BNWL-2256, 1977
- (27) WASH 1237, Environmental Survey of the Nuclear Fuel Cycle, USAEC, Washington 1972

- (28) Bulletin de l'AIEA, Déc. 1979, Numéro spécial: Le transport de matières radioactives
- (29) CEDRA, Elimination des déchets radioactifs en Suisse, février 1978
- (30) Y. Sousselier: «Les déchets radioactifs et leur gestion», Revue générale nucléaire, juillet 1978
- (31) Schweizerische Ordnung für die Beförderung gefährlicher Güter mit der Eisenbahn (RSO); Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse (SDR); Restricted articles regulations (IATA)
- (32) AIEA: «Regulation for the Safe Transport of Radioactive Materials», STI/PUB/323, Vienna 1973
- (33) L. B. Shappert et al: «Probability and Consequences of Transportation Accident Involving Radioactive Material Shipments», Nuclear Safety, vol. 14, no. 6, Nov.—Dec. 1973
- (34) W. A. Brobst: «Transportation Accidents: How Probable?»
- (35) Nuclear Installations Inspectorate: «Report by the Chief Inspector of Nuclear Installations on the incident in Building 204 at the Winscale Works of BNFL on Sept. 26, 1973», July 1974
- (36) W. Hunzinger: «Beseitigung radioaktiver Abfälle aus der Kernenergieproduktion». Séance d'information sur les centrales nucléaires. Troisième cycle de la physique, Berne, Nov. 1975
- (37) E. Dettileux: «Mise à l'arrêt des installations d'Eurochemic: programme, évolution et enseignement», Revue générale nucléaire, Juillet 1978
- (38) Koch G.: «Existing and projected reprocessing plant», Atomkernenergie, Band 33, Nr. 4, 1979
- (39) CFDT: «Les recommandations de la CIPR et les travailleurs», Séminaire spécial IAEA-SR-36/22, Vienne, mars 1979
- (40) Polvani-Report: «Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Wastes Arising from Nuclear Power Programmes», NEA/OCDE, Sept. 1977
- (41) EURATOM-C.E.A.: «Etudes relatives aux niveaux de contamination radioactive de la chaîne alimentaire et du milieu ambiant 1961—1974», 1974
- (42) Gugueniat P. et coll.: «Etude de la répartition des radionucléides artificiels dans des sédiments littoraux de la Manche et de la mer du Nord pendant les années 1976—1977» 1979
- (43) Groupe CEA, Inter-info, no 62, Paris, 15 novembre 1979
- (44) GESMO-NUREG-0002, vol. 4, chap. VIII, app. B, NRC Washington Aug. 1976
- (45) OCDE Nuclear Energy Agency, Nuclear Fuel Cycle Requirement and Supply Considerations Through the Long Term, February 1978, OCDE, Paris 1978
- (46) Le «Bulletin de l'AIEA», bimensuel, décembre 1979
- (47) Winkler, Th. Nuclear proliferation and the third world problems and perspectives. Programme for strategie and international security studies, avril 1980
- (48) Nuclear Proliferation Factbook, Congressional Research Service, Sept. 1977, US Print Office no. 052-070-04240-1, Washington, D. C. 20402
- (49) Nuclear Power and Nuclear Weapons Proliferation, vol. II, Atlantic Council's Nuclear Fuels Policy Working Group, 1978, 1616 H. Street, N. W., Washington, D. C. 20006
- (50) Nuclear Energy and Nuclear Weapon Proliferation. Stockholm International Peace Research Institute, Londres 1979
- (51) L. C. Hebel et al, Rev. Modern Phys. 50/1 II p. S 28, 1978
- (52) M. Willrich, T. Taylor, Nuclear Theft: Risks and Safeguards (Ballinger, Cambridge 1974)
- (53) A. B. Lovins, Nature 283 817, 1980
- (54) A. Giraud, contribution à la Conférence Internationale de l'AIEA de Salzburg, 1977
- (55) NUREG-0350 Vol. 1: Report on strategic special nuclear material inventory differences. Août 1977
- (56) AIEA: «Regional nuclear fuel cycle centres», 1977

