

EINSATZ VON PLUTONIUMHALTIGEN MISCHOXID-
BRENNELEMENTEN IN LEICHTWASSERREAKTOREN

Ulrike Fink
Helmut Hirsch
- Gruppe Ökologie Hannover -

im Auftrag von Greenpeace International
November 1991

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorbemerkung	1-2
1. Hintergründe für den Einsatz von MOX-Brennelementen in Leichtwasserreaktoren	1-3
2. Kurzer Überblick: Aktuelle Situation in Atomenergiestaaten mit MOX-Einsatz	2-1
2.1 Bundesrepublik Deutschland	2-2
2.2 Frankreich	2-5
2.3 Belgien	2-5
2.4 Japan	2-6
2.5 Andere Staaten	2-8
3. Zusammenstellung von Basisdaten	3-1
4. Probleme beim Einsatz von MOX	4-1
4.1 Kurzer Überblick über Probleme an einzelnen Stationen der Brennstoffspirale	4-1
4.1.1 Brennelement-Fertigung	4-1
4.1.2 Transporte frischer MOX-Brennelemente	4-2
4.1.3 Einsatz im Reaktor	4-2
4.1.4 Transport und Zwischenlagerung abgebrannter MOX-Brennelemente	4-3
4.1.5 Wiederaufarbeitung von MOX-Brennstoff	4-4
4.1.6 Hochaktive Abfälle	4-4
4.1.7 Endlagerung	4-5
4.2 Vertiefte Behandlung spezieller Probleme	4-6
4.2.1 MOX-Einsatz und Wiederaufarbeitung	4-6
4.2.2 MOX-Brennstoff und Reaktorbetrieb	4-15
4.2.3 Gefahren der Abzweigung von Plutonium	4-20
4.2.4 Strahlenbelastung bei der MOX-BE-Fertigung	4-28
5. Ökonomische Aspekte des MOX-Einsatzes	5-1
5.1 Gesamtbetrachtung	5-1
5.2 Front-end-Kosten	5-1
Literaturverzeichnis	Lit-1

Vorbemerkung

Liebe Leserinnen und Leser,

das vorliegende Arbeitspapier liefert Fakten zur Problematik der Rückführung von Plutonium in Leichtwasserreaktoren (LWR), also zur sogenannten thermischen Rezyklierung von Plutonium. Wir haben die Form eines Readers gewählt, weil so am leichtesten weitere Daten nachgeliefert und eingefügt werden können.

Wichtige Informationen und Einschätzungen sind von GREENPEACE bereits an anderen Stellen veröffentlicht worden, z.B. im RESTRISIKO Nr. 6, "Wackersdorf ist tot - es lebe La Hague?" vom April 1990 sowie in anderen RESTRISIKO-Heften.

Wir bitten Euch um rege Anteilnahme, Kritik und eigene Beiträge zur Erweiterung und fortlaufenden Aktualisierung des vorliegenden Readers!

Ulrike Fink, Helmut Hirsch - Gruppe Ökologie

Hannover, November 1991

1. Hintergründe für den Einsatz von MOX-Brennelementen in Leichtwasserreaktoren oder:
Notlösung MOX

Plutonium entsteht während des Reaktorbetriebes aus gewöhnlichem Uranbrennstoff. Abgebrannte Brennelemente (BE) aus Leichtwasserreaktoren (LWR) enthalten - je nach Abbrand - bis zu 1 % Plutonium (insgesamt), von denen etwa 0,7 % spaltbar sind. Ursprünglich war geplant, dieses Plutonium als Brennstoff für schnelle Brutreaktoren bereitzustellen. Um dies zu ermöglichen, wurde unter großen Schwierigkeiten und enormem Kapitaleinsatz die Technologie der Wiederaufarbeitung für Leichtwasserreaktor-Brennstoffe entwickelt, mit der Plutonium aus den abgebrannten Brennelementen abgetrennt werden kann.

So wurden insbesondere in der großen kommerziellen Wiederaufarbeitungsanlage La Hague (Frankreich) viele Tonnen Plutonium produziert, während gleichzeitig die Zukunft der Brüter-Technologie immer ungewisser wurde und heute ein Einstieg in die Brüter-Wirtschaft in größerem Maßstab überhaupt nicht mehr absehbar ist. Die politische Festlegung, der Wiederaufarbeitung die absolute Priorität bei der "Entsorgung" ausgedienter Brennelemente einzuräumen, führte dann dazu, daß die Plutonium-Halden immer mehr anwuchsen.

Um die Absurdität dieser Entwicklung zu verschleiern, beschloß die Atomindustrie in Frankreich, Deutschland und einigen anderen Staaten, das abgetrennte Plutonium in Leichtwasserreaktoren (Druck- und Siedewasserreaktoren) einzusetzen ("rückzuführen") - eine unsinnige und gefährliche Notlösung.

Die Situation wird sich in den folgenden Jahren erheblich zuspitzen, falls die Wiederaufarbeitung tatsächlich wie geplant funktionieren sollte. Dies kann am Beispiel der bundesdeutschen Atomindustrie illustriert werden.

Abb. 1-1 zeigt die jährlichen und kumulierten Mengen an spaltbarem Plutonium (P_{fiss}), die aufgrund der bestehenden Wiederaufarbeitungsverträge bis zum Ende dieses Jahrhunderts in die Bundesrepublik zurückkommen: In 10 Jahren sind das etwa 25 t. Zusammen mit dem derzeitigen Bestand, über den die EVUs verfügen, macht das eine Masse von 27 - 28 t! ¹⁾

1) So ganz genau weiß die Atomwirtschaft nicht, wieviel spaltbares Plutonium bereits vorliegt. So gab es laut [Schmiedel 1991, S.153] Ende 1989 einen Bestand von 3 t ("*already separated but not yet processed into fuel assemblies*"). Das Strategiepapier der deutschen EVUs nennt einen Bestand von 3,5 t per 31.12.1988 [VDEW 1989].

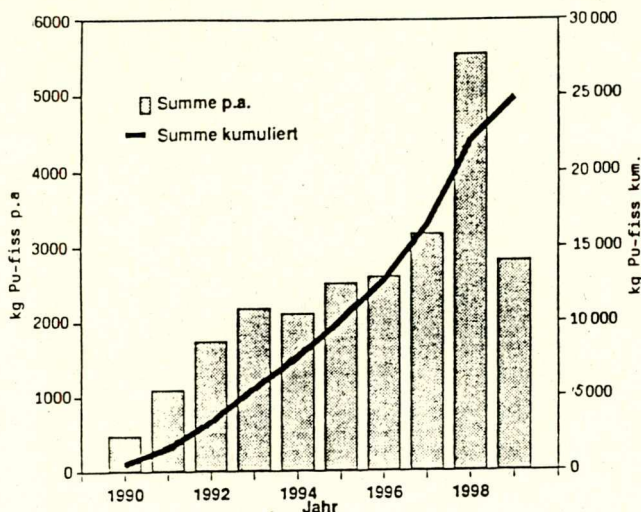


Abb. 1-1: In die Bundesrepublik zurückzunehmende Plutoniummengen (jährlich und kumuliert); aus Dibbert 1991

Warum MOX-Einsatz?

Der Einsatz von MOX-BE in LWR hat im wesentlichen folgende Gründe (s. auch RESTRISIKO Nr. 6 1990):

- **Rechtfertigung der Wiederaufarbeitung.**
Angesichts der völlig ungewissen Brüterzukunft verliert die Wiederaufarbeitung ohne MOX-Einsatz in LWR ihre Berechtigung. Dies ist nicht zuletzt ein Argument mit erheblichem ökonomischem Hintergrund: *"However, closing the fuel cycle is not an easy task; ... In France we have spent more than 25 years and 50 billion French francs to definitely master all the back end operations on the industrial scale ..."* [Guais 1988, S.574]. Vermutlich ist die Zahl, die der Vertreter der französischen Atomindustrie nennt, noch zu tief gegriffen: nach [RESTRISIKO Nr. 6 1990, S.32] hat der staatliche französische Konzern CEA bereits bereits die Unsumme von (geschätzten) rund 150 Milliarden Francs investiert.
- Auch der Atomindustrie muß daran gelegen sein, daß die Gefahr der Weiterverbreitung von Atomwaffen nicht zunimmt - zumindest müssen ihre Vertreter der Kritik vorbeugen, daß gigantische Mengen von Bombenmaterial angehäuft werden.
- Es ist äußerst unsinnig, das Plutonium bis zu einer irgendwann in ferner Zukunft liegenden kommerziellen Einsatzreife von Schnellen Brütern zu lagern:
* Die Lagerung ist sehr teuer (zu den Kosten siehe Kapitel 5);

* während der Lagerung verringert sich der Gehalt an spaltbarem Pu durch den Zerfall von Pu-241. Damit verliert das Plutonium an Wert (siehe Kapitel 3);

* während der Lagerung verschlechtert sich die Qualität des Plutoniums - es wird zunehmend radioaktiver, insbesondere durch den Aufbau des harten Gamma-Strahlers Americium-241 (und - weniger - durch die Töchter von Pu-236). Dies erschwert und verteuert die weitere Handhabung; schließlich muß das abgetrennte Plutonium gereinigt werden (siehe Kapitel 3; zu den Kosten der Reinigung siehe Kapitel 5).

Daraus ergibt sich ein "Sachzwang" zur raschen Weiterverwertung.

- Die Atomindustrie verstellt sich dennoch nicht die Option auf den Schnellen Brüter:
 - * Plutonium aus der Wiederaufarbeitung von MOX ist nach Aussagen der Firma COMMOX "nearly as adequate" wie "virgin" Plutonium aus der Wiederaufarbeitung von Uran-Brennstoff, um damit Schnelle Brüter zu beschicken;
 - * außerdem ermöglicht der MOX-Einsatz in LWR das Sammeln von Erfahrungen im Umgang mit Plutonium und *"prepares in a timely manner for the 21th century when pu will be one of the major energy sources"*. [Bairiot & Le Bastard 1988, S.464]
- MOX - ein neuer Markt.
Während die Pu-Lagerung höchst unwirtschaftlich ist, bietet der MOX-Einsatz gute Aussichten auf die Ausweitung des bestehenden Marktes. So reichen z.B. die bestehenden Fertigungskapazitäten für MOX-BE nicht aus, um den prognostizierten Bedarf für die Zukunft zu decken. Die Energiewirtschaft träumt von einem gigantischen Ausbau (siehe Kapitel 2).

Solange die politischen Randbedingungen gesichert sind (z.B. gesetzliche Regelungen, Erteilung von Genehmigungen), spielt es auch keine Rolle, daß der MOX-Einsatz teurer ist. Die hohen staatlichen Subventionen und die Tatsache, daß letztlich die Verbraucher bezahlen, sorgen schon dafür, daß die Gewinne der Energiekonzerne nicht geschmälert werden.

Die von der Energiewirtschaft ansonsten vorgebrachten Schein-Argumente wie "Ressourcenschonung" oder "Rezykling" sind es kaum wert, daß auf sie eingegangen wird (vergl. Kapitel 4 und 5).

2. Kurzer Überblick: Aktuelle Situation in Staaten mit MOX-Einsatz

MOX-Einsatz ist gekoppelt an die Entscheidung zur Wiederaufarbeitung. Folgende Staaten setzen - in unterschiedlichem Ausmaß - bereits MOX-BE ein: Frankreich, Belgien, Deutschland, Schweiz, Japan. Großbritannien hat Pläne.

Der folgende länderspezifische Kurz-Überblick läßt nicht ohne weiteres erkennen, daß die bestehenden MOX-BE-Fertigungskapazitäten in Belgien, Deutschland und Frankreich nicht ausreichen, um den von der Atomwirtschaft erhofften Plutonium-Anfall in den nächsten Jahren und Jahrzehnten zu verarbeiten. Abbildung 2-1 zeigt am Beispiel BNFL, wie sich die Atomwirtschaft die zukünftige Entwicklung vorstellt. Um dieser "Herausforderung" begegnen zu können, sind neue Fabriken im Bau (MELOX in Marcoule) oder bereits fast fertiggestellt wie die neue Siemens-Anlage in Hanau. Weitere Anlagen sind in Planung (Belgien, Großbritannien, Japan) - falls es der Markt erfordert.

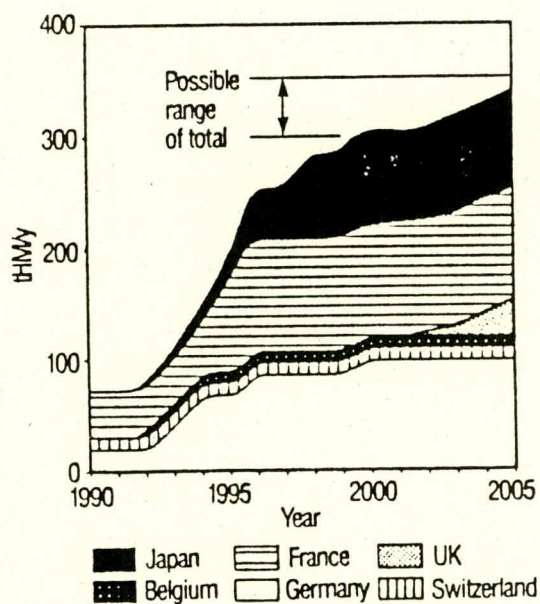


Abb. 2-1: Prognose des MOX-Bedarfs für LWR (Quelle: BNFL); aus Barker 1990

2.1 Bundesrepublik Deutschland

Wiederaufarbeitung:

Verträge mit La Hague und Sellafield (THORP); zu Terminen und kontrahierten Mengen s. [RESTRISIKO Nr. 6, 1990, S.34]. Die kleine nationale WAA in Karlsruhe (WAK) wird stillgelegt; der Wiederaufarbeitungsbetrieb ist bereits eingestellt.

Pu-Lagerung:

in der Siemens-Anlage in Hanau; s. auch [RESTRISIKO Nr.2, 1988]

BE-Fertigung:

bislang und in Zukunft bei der Siemens-BE-Fabrik in Hanau (früher ALKEM).

* Derzeitige Kapazität: ca. 25-35 t SM/a (Genehmigung zum Umgang von 559 kg Pu; jährlich kann ca. 1,6 t Pu zu MOX-BE verarbeitet werden).

* Geplante Kapazität: ca. 120 t SM/a. Die 6. und abschließende Teilgenehmigung für Errichtung und Betrieb vom 11.03.91 erlaubt den Umgang mit 2,5 t Pu. Die Anlage soll ab 1992 in Betrieb gehen und etwa Mitte der 90er Jahre die geplante Kapazität erreichen (können).

Derzeitiger Status: Nach mehreren Zwischenfällen/Unfällen (z.B. Kontaminationen im Spaltstofflager wegen defekter Kunststoffumhüllungen von Spaltstoffgebänden) wurde die Anlage im Juni 1991 teilweise stillgelegt. Seitdem heftige Kontroversen zwischen der Genehmigungsbehörde (Hessisches Umweltministerium) und der Betreiberfirma Siemens. Zukünftige Entwicklung ungewiß.

(s. z.B.: Nuclear Fuel Vol 16 No 16, Aug 5, 1991)

Einsatz in LWR:

Erste Versuchseinsätze ab 1968 (Obrigheim; Versuchs-Atomkraftwerk Kahl), danach folgte ein umfangreicheres Programm. Seit Mitte der 70er Jahre finanzielle Förderung durch das BMFT.

Derzeit (1991) sind 20 AKW-Blöcke mit einer Leistung von insgesamt ca. 22,3 GWe in Betrieb. Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht über den bisherigen Einsatz von MOX-BE und deren "Verbleib". (Ein detaillierter Überblick über die Genehmigungssituation und die geplanten Beladungsstrategien der Energiewirtschaft, Stand September 1989 findet sich in [VEDW 1989]). Es ergibt sich folgendes Bild:

■ 10 AKW-Blöcke - sämtlich Druckwassereaktoren - haben bereits die Genehmigung zum Einsatz von MOX. Der maximale Anteil von MOX-BE im Reaktorkern liegt dabei (bzw. soll liegen) zwischen 9 % und 50 % (!) mit einem Schwergewicht zwischen 33-37 %. Nicht alle Genehmigungen wurden bislang tatsächlich ausgenutzt.

■ Für 5 AKW wurde die Genehmigung beantragt:

* KKB Brunsbüttel: Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung; 1990 Auslegung des Sicherheitsberichtes; der für November 1991 angesetzte Erörterungstermin wurde von der Genehmigungsbehörde verschoben, weil im Sicherheitsbericht ein möglicher Störfall - Leckagen an einer Nachkühlleitung - nicht berücksichtigt wurde.

* KRB Gundremmingen: ebenfalls Verfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung. Auslegung des Sicherheitsberichts bis April 1991; der für Juni 1991 angesetzte Erörterungstermin wurde verschoben wegen der großen Zahl der Einwendungen. Das Genehmigungsverfahren wird derzeit wegen "administrativer Probleme" bei der Fertigstellung der Siemens-BE-Fabrik in Hanau (s.o.) ausgesetzt.

*KKK Krümmel: Auslegung der Antragsunterlagen wird bald erwartet .

*KKI-1 Isar: der derzeitige Stand ist uns nicht bekannt.

■ Für 2 AKW - Biblis A und B - ist die Antragstellung in Vorbereitung

■ In 3 Anlagen - Stade, Würgassen und Philippsburg I - soll kein MOX-Brennstoff eingesetzt werden. Die Energiewirtschaft nennt als - wenig überzeugende - Gründe dafür die eingeschränkte BE-Lagerkapazität oder die "EVU-spezifische Optimierung der Pu-Verwertung" [VDEW 1989, S.14]. Die tatsächlichen Gründe sind uns nicht bekannt.

Die Energiewirtschaft übt unmißverständlichen Druck auf die Behörden aus, die noch ausstehenden Genehmigungen für den MOX-Einsatz in AKW rechtzeitig zu erteilen - siehe Abb. 2-2: *"Die Abbildung macht deutlich, daß eine wesentliche Voraussetzung für die termingerechte Verwertung des Pu der rechtzeitige Erhalt der noch ausstehenden Genehmigungen für den Einsatz von MOX-Brennelementen in Kernkraftwerken ist."*

[Dibbert 1991]

Kernkraftwerk mit Leichtwasserreaktoren	Maximaler MOX-Anteil im Core %	Bisheriger MOX- Anfall (tSM)	Verbleib				MOX-BE im Einsatz (tSM)
			internes Lager (tSM)	COGEMA (tSM)	WAK (tSM)	SKB (tSM)	
Genehmigung erteilt:							
Brokdorf	33	—	—	—	—	—	10,7
Unterweser	25	10,7	8,6	2,1	—	—	12,9
Grohnde	33	—	—	—	—	—	10,7
Emsland	25	—	—	—	—	—	—
Obrigheim	26	17,6 ¹⁾	6,8 ¹⁾	1,1	0,3	9,4	—
Philippsburg 2	37	—	—	—	—	—	6,3
Neckarwestheim 1	9	5,6	1,4	1,4	2,8	—	5,7
Neckarwestheim 2	37	—	—	—	—	—	—
Isar 2	50	—	—	—	—	—	—
Grafenrheinfeld	33	15,0	6,4	8,6	—	—	2,1
Gundremmingen A (stillgelegt)		7,5	—	—	—	7,5	—
Genehmigung beantragt:							
Brunsbüttel	25						
Krömmel	25						
Gundremmingen B	38						
Gundremmingen C	38						
Isar 1	54						

Tab. 2-1: MOX-Einsatz in bundesdeutschen AKW, Stand: 31.12.90; aus [Deutscher Bundestag 1991]

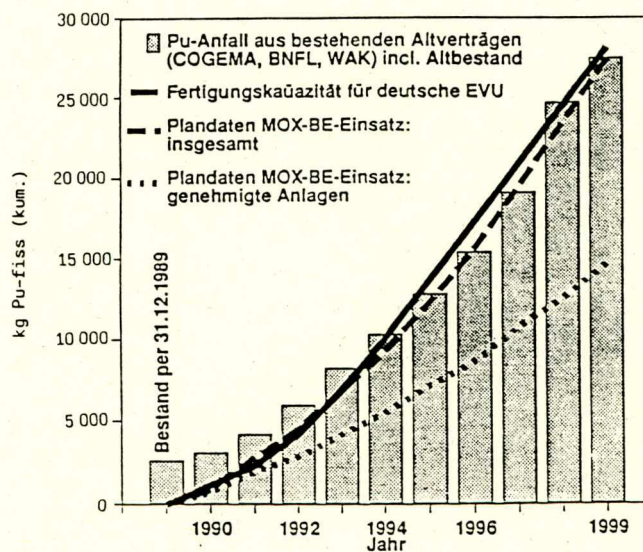


Abb. 2-2: Plandaten der E-Wirtschaft: Pu-Anfall versus MOX-Einsatzplanung; aus Dibbert 1991

Literatur: [Schmiedel 1989, Schmiedel 1991, Krebs 1989, Jend 1990, RESTRISIKO Nr. 6 1990, Seifert 1991]

2.2 Frankreich

Reaktoreinsatz:

Einsatz in einem kommerziellen LRW (St Laurent B1) erst seit 1987. Ende 1990 MOX-Einsatz in 5 DWR (St Laurent B1+2, Gravelines 3+4, Dampierre 1). Ab 1992 sollen insgesamt 16 Reaktoren mit 900 MWe-Leistung mit MOX beladen werden.

BE-Fabrikation:

* Complexe de Fabrication de Cadarache (CFCa), Betreiber: CEA. Fabrikation für Brüter-BE; ab 1990 Einrichtung einer speziellen Produktionslinie für LWR-MOX-BE, Kapazität 15 t SM/a.

* MELOX, Marcoule, joint venture von Framatome und Cogema. Derzeit in Bau, 1992 erste Tests, zweite Hälfte 1993 erster Pu-Einsatz; 1997 soll die geplante Kapazität - ca. 120 t SM/a - erreicht werden. Es sollen BE für EDF sowie 2 deutsche AKW gefertigt werden.

* Die MOX-BE für den derzeitigen Einsatz in französischen Reaktoren wurden wesentlich in Dessel (Belgien, s.u.) gefertigt. Es besteht ein joint venture - COMMOX - zwischen Cogema (60 %) und Belgonucleaire (40 %).

Literatur: [Le Bastard 1990, Le Bastard 1991, Vincent 1990, Simon 1991, Bairiot & Le Bastard 1988, RESTRISIKO Nr. 6 1990]

2.3 Belgien

Reaktoreinsatz: über derzeitigen Stand und zukünftige Pläne ist uns nichts bekannt.

BE-Fabrikation:

* Dessel, Betreiber Belgonucleaire. Seit 1973 in Betrieb, für Brüter-BE eingerichtet. Anfang der 80er Jahre für Produktion von 35 t MOX/a ausgebaut; die volle Kapazität steht derzeit zur Verfügung.

* DEMOX. Falls es der Markt erfordert, soll die BE-Fabrik in Dessel auf doppelte Kapazität ausgelegt werden; Baubeginn vermutlich Mitte der 90er Jahre.

Literatur: s. Frankreich

2.4 Japan

Japan plant einen gigantischen Ausbau seiner Nuklearkapazität: von 29.280 MW (März 1990) auf 72.500 im Jahr 2010. Das würde den Neubau von 40 Reaktoren in den nächsten 20 Jahren bedeuten.

Wiederaufarbeitung:

Es scheint, als solle der gesamte abgebrannte Kernbrennstoff wiederaufgearbeitet werden - langfristig in nationaler Regie (800 t/a WAA in Rokkasho-mura, geplante Inbetriebnahme 1997; derzeit in Tokai-mura). Für dieses Jahrzehnt bestehen WA-Verträge mit Cogema und BNFL: 5.600 t Uran (bis 2002).

Die folgende Aufstellung (aus [Samejima 1991]) zeigt die japanischen Schätzungen zum anfallenden Pu_{ris} bis zum Jahr 2010:

WAA	Kapazität t U/a	rückgewon- nenes Pu	≈ 2000 (in t, kumulativ)	≈ 2010 kumulativ)
Tokai-mura	90	0,45 t/a	6,6	-
Cogema + BNFL	5600 (bis 2002)	32 t	28,9	32,3
Rokkasho-mura	800	4,4 t/a	6,2	49,5
	SUMME:		41,7	81,8

Reaktoreinsatz:

Die japanische Atomwirtschaft setzt grundsätzlich auf kommerzielle Brüter-Technologie. Bis es soweit ist, soll das Pu zunächst teilweise für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (Brüter und ATR-Reaktoren) eingesetzt werden. Für den überwiegenden Teil ist Rückführung in kommerzielle LWR geplant. Bislang läuft ein kleines Demonstrationsprogramm (2 BE im SWR Tsuruga 1, 4 BE im DWR Mihama 1); Mitte der 90er Jahre soll der Einsatz ausgedehnt und am Ende dieses Jahrhunderts sollen in 12 Reaktoren MOX-BE eingesetzt werden (ca. 1/3 des Reaktorkerns).

BE-Fertigung:

Zur Erfüllung der Pläne benötigt Japan spätestens Ende 1992 Plutonium aus Europa, und zwar entweder in reiner Form oder - mangels derzeit ausreichender eigener Kapazitäten - in Form von MOX (Pulver oder BE?). Langfristig wird aber auf natio-

nale Versorgung gesetzt: ab Ende der 90er Jahre sollen in Tokai-mura 15 t MOX/a hergestellt werden (bislang soll das dort zurückgewonnene Pu in 1. Linie zur Herstellung von ATR-BE dienen), und ab 2000 soll das Pu aus der geplanten WAA Rokkasho-mura in einer japanischen MOX-BE-Fabrik (Durchsatz ca. 100 t MOX/a) verarbeitet werden.

Tabelle 2-2 zeigt die japanischen MOX-Träume: bis 2001 werden danach insgesamt 462 t MOX-Brennstoff benötigt, und zwar überwiegend aus Europa (durchschnittlich 33 t MOX pro Jahr). Das entspricht 18,5 t Pu (15,8 t aus Europa). Dies kann einen starken Druck zum Ausbau der europäischen MOX-BE-Fabrikation bedeuten.

Pu-Transporte:

Derzeit ist geplant, Mitte 1992 erstmals 1,3 t (!) reines Pu aus La Hague per Schiff nach Japan zu transportieren, und zwar über den Panama-Kanal. Dieser Transport über weite Entfernungen ist problematisch; es ist vor allem zu befürchten, daß der Bombenrohstoff ein verlockendes Ziel für Terroristen darstellt. (Für MOX gilt das gleiche, s. Kapitel 4.1.2)

Literatur: [Samejima 1991, Stirling 1988, Takagi & Nishio o.J.]

Year	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	Total
Total requirements (kg Pu)	140	360	750	730	1 320	1 320	2 640	3 300	3 960	3 960	18 480
From non-Japanese reprocessors	140	360	750	730	1 320	1 320	2 640	3 300	3 300	1 980	15 840
From JNFS reprocessing plant	-	-	-	-	-	-	-	-	660	1 980	2 640
Total requirements (tMOX)	4	9	19	18	33	33	66	83	99	99	462
From non-Japanese reprocessors	4	9	19	18	33	33	66	83	83	50	396
From JNFS reprocessing plant	-	-	-	-	-	-	-	-	17	50	66

Tab. 2-1: Japanische MOX-Brennstoff-Bedürfnisse; aus Samejima, 1991

2.5 Andere Staaten

Schweiz:

Wiederaufarbeitung: Verträge mit Frankreich

Reaktoreinsatz: DRW Beznau

Großbritannien:

Reaktoreinsatz: In den Gas-Graphit-Reaktoren kein MOX-Einsatz; der einzige Reaktor, in den theoretisch MOX geladen werden könnte, ist Sizewell B.

BE-Fabrikation: Nur für die ausländischen Kunden interessant. Derzeit wird eine 8 jato-Demonstrationsanlage in Sellafield gebaut, um die "short binderless route" für MOX-Brennstoff zu demonstrieren. Als Folgeanlage wird für die späten 90er Jahre eine kommerzielle 50 jato-Anlage ins Auge gefaßt.

Literatur: [Williams 1991]

3. Basisdaten Plutonium und MOX-BE

In diesem Teil sind Basisinformationen zu Plutonium und MOX-Brennstoff zusammengestellt. Die Tabellen und Abbildungen sind direkt, ohne Bearbeitung aus Veröffentlichungen entnommen und enthalten demzufolge teilweise auch Informationen zu anderen Reaktortypen als Leichtwasserreaktoren.

Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

- Tab. 3-1: Abhängigkeit der Plutonium-Zusammensetzung vom Abbrand; Angaben in % der gesamten Pu-Menge incl. Am-241
(aus OECD 1989)
- Tab. 3-2: Eigenschaften von Plutoniumisotopen
(aus OECD 1989)
- Tab. 3-3: Dosisrate an der Oberfläche von 1 kg-Kugeln reiner Plutoniumisotope, in mSv/h
(aus OECD 1989)
- Tab. 3-4: Durchschnittliche Isotopenzusammensetzung von Reaktorplutonium
(aus OECD 1989)
- Tab. 3-5: Veränderung der Isotopenzusammensetzung von Plutonium nach der Entladung aus einem LWR
(aus OECD 1989)
- Tab. 3-6: Verlust an spaltbarem Plutonium während der Lagerung (ausgedrückt in Pu-239-Äquivalenten)
(aus Bairiot & Le Bastard 1988)
- Tab. 3-7: Konzentrationen von Am-241 in LWR-Brennstoff vor und nach der Wiederaufarbeitung
(aus OECD 1989)
- Tab. 3-8: Anhaltswerte für die maximale Dauer der Lagerung von Plutonium
(aus OECD 1989)
- Tab. 3-9: Inventare relevanter Aktiniden in abgebrannten Uran- und MOX-Brennelementen (DWR; Abbrand 50 GWd/t SM, Kühlzeit 3 Jahre)
(aus DWK 1987)

- Tab. 3-10: Inventare relevanter Spaltprodukte in abgebrannten Uran- und MOX-Brennelementen (DWR; Abbrand 50 Gwd/t SM, Kühlzeit 3 Jahre)
(aus DWK 1987)
- Tab. 3-11: Gehalt an Spaltprodukten und Aktiniden in abgebrannten Uran- und MOX-Brennelementen, in Ci/t (DWR; Abbrand 33 Gwd/t SM, Kühlzeit 3 Jahre)
(aus EdF 1990, Annexe 3)
- Abb. 3-1: Uran und Transurane: Bildungs- und Zerfallswege
(aus Stoll 1981)
- Abb. 3-2: Aufbau von Americium-241 in Reaktorplutonium
(aus OECD 1989)
- Abb. 3-3: Aktivität von Uran- und MOX-Brennelementen in Abhängigkeit vom Abbrand
(aus DGB 1986)
- Abb. 3-4: Aktivität von Uran- und MOX-Brennelementen in Abhängigkeit von der Kühlzeit
(aus DGB 1986)

Wieviel Plutonium braucht man für MOX-BE?

Es kann folgende allgemeine Faustregel gelten:

Aus 100 t abgebranntem Uranbrennstoff entsteht bei der Wiederaufarbeitung 1 t Plutonium (insgesamt); davon entfallen 0,7 t auf spaltbares Plutonium (Isotope Pu-239 und Pu-241). Daraus können 18 t frischer MOX-Brennstoff hergestellt werden.

Die Werte sind abhängig vom Anreicherungsgrad des Urans, dem Abbrand und dem Plutoniumanteil im MOX.

(übernommen aus RESTRISIKO Nr.6 1990, S.32)

Beispiel: Unter der Annahme, daß die französische UP-3 ihre Jahreskapazität von 800 t SM erreicht, werden dort pro Jahr etwa 8 t Plutonium abgetrennt. Damit lassen sich knapp 150 t frische MOX-Brennelemente pro Jahr herstellen.

Es sei daran erinnert, daß man für eine Atombombe etwa 5 bis 10 kg Reaktor-Plutonium benötigt.

Toxizität von Plutonium

s. auch [Restrisiko Nr. 5 1989]

Plutonium - stellvertretend versinnbildlicht durch das Isotop 239 - ist ein hochgefährliches Gift: Es hat eine sehr lange physikalische Halbwertszeit, seine Alphastrahlung ist von großer biologischer Schädlichkeit und es verbleibt - nach Aufnahme in den menschlichen Körper - lange Jahre in strahlenempfindlichen Organen. Alphastrahlendes Plutonium kann Knochenkrebs, Leukämie, Lungenkrebs und andere Tumorarten auslösen. Es wird auch vermutet, daß es das körpereigene Immunsystem schwächt - mit allen Folgen einer erhöhten Anfälligkeit für Krankheiten [ICRP 1986].

Die Inhalation von Plutonium ist einer der Hauptaufnahmewege in den menschlichen Körper, vor allem bei routinemäßiger oder unfallbedingter Freisetzung aus Atomanlagen und bei Transportunfällen. Aber auch die Aufnahme mit der Nahrung - von größter Bedeutung hinsichtlich der Freisetzung aus einem Endlager - ist ein wichtiger Aufnahmeweg. Die Annahme, Plutonium würde nur in sehr vernachlässigbarem Ausmaß im Verdauungstrakt resorbiert, mußte in den letzten Jahren revidiert werden: Die von der Internationalen Strahlenschutzkommission empfohlenen Resorptionsraten liegen im Jahr 1986 um das 30- bis 1000fache höher als die im Jahre 1972 empfohlenen [ICRP 1972, ICRP 1986].

Besonders gefährdet durch Plutoniumaufnahme mit der Nahrung sind Neugeborene, weil sie das Gift um Größenordnungen besser resorbieren als Erwachsene [Sullivan & Gorham 1988]. Sie, die zugleich zu den strahlenempfindlichsten Gruppen gehören, bedürfen eines besonderen Schutzes. Gegen Plutonium ist jedoch ein solcher Schutz unmöglich.

Die gleichen Aussagen gelten auch für die anderen Transurane wie Neptunium, Americium und Curium.

Plutonium-Isotope in Reaktorplutonium

(Tab. 3-1 und 3-4, Abb. 3-1)

Reaktorplutonium ist eine Mischung aus verschiedenen Pu-Isotopen in Abhängigkeit von Abbrand, Anfangsanreicherung, Kühlzeit und anderen Faktoren. Das Hauptisotop Pu-239 wird durch Neutronen-Einfang aus Uran-238 gebildet. Mit zunehmender Standzeit bilden sich, ebenfalls durch n-Einfang, höhere Pu-Isotope wie Pu-240, -241 und -242. Zusätzlich entstehen (in geringerem Ausmaß) Pu-236 und Pu-238, die von Bedeutung sind wegen ihrer Alpha-, Neutronen- und Gamma-Aktivität (bzw. der ihrer Töchter). Der Anteil von Pu-239 nimmt ab mit zunehmender Standzeit (zunehmendem Abbrand) im Reaktor, weil es gespalten wird. Plutonium aus hochabgebranntem Brennstoff ist für einen MOX-Einsatz entsprechend weniger gut geeignet.

Eigenschaften von Pu-Isotopen

Tab. 3-2 enthält Angaben zu Halbwertszeit, Zerfallsmodus, spezifischer Aktivität, Anzahl der spontanen Spaltneutronen, Wärmerezeugung und Umwandlungsprodukten wichtiger Pu-Isotope.

Die radioaktive Umwandlung der Pu-Isotope ist begleitet von der Freisetzung von Gamma- und/oder Röntgenstrahlung; die meisten Pu-Isotope unterliegen auch einer Spontanspaltung, bei der Neutronen freigesetzt werden. Tab. 3-3 stellt die Oberflächendosisleistung durch diese Strahlenarten für reine Pu-Nuklide zusammen.

Aktiniden im abgebrannten LWR-Brennstoff

Abb. 3-1, Tab. 3-9, Tab. 3-11
s. unter: Brennelementdaten

Veränderung der Pu-Zusammensetzung nach der Entladung

(Tab. 3-5 und 3-6, Abb. 3-2)

Aufgrund des Zerfalls von Pu-241 verringert sich nach der Entladung aus dem Reaktor zunehmend der Gehalt an spaltbaren Pu-Isotopen. Damit steigt der Anteil von Am-241. Dieser radioaktive Zerfall hat zwei unerwünschte Folgen:

* Verringerung des Energiewertes

Zum einen nimmt der Energiewert des Plutoniums ständig ab, und zwar erheblich: nach 10 Jahren Lagerzeit sind noch etwa 90 % des ursprünglichen Spaltmaterials vorhanden, nach 30 Jahren nur noch etwa 80 % (Tab. 3-6). Grundsätzlich hängt das Ausmaß der Spaltstoffverringerung ab von der Isotopenzusammensetzung nach der Entladung aus dem Reaktor. Pu mit einem ursprünglich höheren Gehalt an Pu-241, wie z.B. aus hochabgebranntem LWR-Brennstoff, verliert sehr viel rascher an Wert als beispielsweise niedrig abgebrannter Magnox-Brennstoff.

* Verschlechterung der Qualität

Zum anderen emittiert das gebildete Am-241 hochenergetische, d.h. durchdringende Gammastrahlung.

Auch die Tochterprodukte von Pu-236, z.B. Wismut-212 (Bi-212) und Thorium-208 (Th-208), sind harte Gammastrahler.

Durch Wiederaufarbeitung abgetrenntes Plutonium wird also zunehmend schwieriger - und damit kostenintensiver - handhabbar, weil Automatisierung und vermehrte Abschirmung erforderlich sind, z.B. bei der MOX-BE-Herstellung und bei Handhabung oder Transport der frischen MOX-BE.

Ein kurzer Zeitraum zwischen Wiederaufarbeitung und BE-Fertigung ist von daher erwünscht.

Gehalt an Americium-241

(Abb. 3-2, Tab. 3-7)

Während der Wiederaufarbeitung wird Americium von Plutonium abgetrennt. Insofern läßt sich der Gehalt an Am-241 dadurch beeinflussen, daß man den Brennstoff erst nach längerer Lagerzeit wiederaufarbeitet.

Zwar läßt sich Am-241 aus Plutonium abtrennen, aber dies verursacht erhebliche Kosten (siehe dazu Kap. 5).

Lagerung von Pu-haltigem Material

Tab. 3-8 präsentiert Anhaltswerte hinsichtlich der Zeit, die Pu-haltiges Material vor der Weiterverwendung gelagert werden kann, ohne daß laut [OECD 1989, S. 39] "ernsthafte Schwierigkeiten entstehen" ("without running into significant difficulties"). Es soll sich dabei um grobe Erfahrungswerte handeln, die den gegenwärtigen Technikstand widerspiegeln:

Americium-Gehalte von etwa 1 % können von der Atomindustrie hingenommen werden, ohne daß zusätzliche Kosten entstehen.

Brennelementdaten für Uran- und MOX-BE

Bereits frischer MOX-Brennstoff hat aufgrund des Plutoniumgehaltes eine höhere Aktivität (und Radiotoxizität) als frischer Uran-Brennstoff. Dies gilt erst recht nach dem Einsatz im Reaktor durch den Aufbau der Aktiniden. Das Ausmaß der Erhöhung hängt ab von Abbrand, Anfangsanreicherung und Kühlzeit. Genaue Kenntnisse der Zusammensetzung sind notwendig vor allem für die Abschätzung der Strahlenbelastung der Beschäftigten, der Beurteilung von Langzeit-Toxizität und Langzeit-Wärmeproduktion der Abfälle sowie der Identifikation von Problemen und Besonderheiten bei Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung.

Abb. 3-3 und 3-4 zeigen für abgebrannte MOX- und Uran-BE die Aktivitäten in Abhängigkeit von Abbrand bzw. Kühlzeit. Die Daten sind ORIGEN-Abbrandrechnungen entnommen ¹⁾. In Tab. 3-9 und 3-10 sind die Inventare relevanter Aktiniden bzw. Spaltprodukte für einen Abbrand von 50 GWd/t Schwermetall und einer Kühlzeit von 3 Jahren gegenübergestellt; in Tab. 3-11 für einen Abbrand von 33 GWd/t Schwermetall.

Gesamtaktivität: bei MOX höher

Aktivität der Aktiniden: bei MOX 4-5fach höher als bei Uran-Brennstoff.

Zwischen 20 und 60 GWd/t SM ist die Aktinidenaktivität bei MOX-Brennstoff nahezu unabhängig vom Abbrand. Dies liegt daran, daß sich die drei maßgeblich zur Aktivität beitragenden Nuklide Cm-244, Pu-238 und Pu-241 im Uran-Brennelement mit steigendem Abbrand aufbauen. Im MOX-BE hingegen bleibt Pu-238 mit steigendem Abbrand in etwa konstant, Pu-241 nimmt

1) "Ergebnisse aktualisierter ORIGEN-Rechnungen zur Auslegung von Wiederaufarbeitungsanlagen". DWK Arbeitsbericht AO/2H/1390/GM/001/00 vom 30.06.1982

ab (wird als Brennstoff gespalten), und nur Cm-244 baut sich auf.

Tab. 3-11: MOX-Brennstoff mit einem Abbrand von 33 GWd/t SM und einer Kühlzeit von 3 Jahren enthält gegenüber abgebranntem Uran-Brennstoff

ca. 7 mal mehr Am-241

ca. 25 mal mehr Cm-244

ca. 6 mal mehr Alpha-Plutonium

ca. 4 mal mehr Gesamt-Plutonium.

Die Aktivität von Np-237 ist dagegen in MOX um den Faktor 3 niedriger.

[EdF 1990]

Aktivität der Spaltprodukte:

Abgebrannter MOX-Brennstoff weist bei Entladung bei gleichem Abbrand eine geringfügig höhere Gesamtaktivität der Spaltprodukte auf, mit z.T. erheblichen Abweichungen bei einzelnen Radionukliden (z.B. erheblich weniger Sr-90, erheblich mehr Ru-106). Nach einigen Jahren Kühlzeit liegt U-Brennstoff höher.

Aktivität des Strukturmaterials: bei MOX-BE etwas niedriger als bei Uran-BE.

CYCLE		Pu-236	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242	Am-241/Pu + Am-241
Enrichment U ₂₃₅ /U	Burn-up Gwd/t	ppm	%	%	%	%	%	ppm
3.25 %	33	12	1.26	56.62	23.18	13.86	4.73	3 500
3.70 %	43	15	1.97	52.55	24.09	14.73	6.22	4 400
4.40 %	53	20	2.74	50.37	24.15	15.16	7.06	5 100

immediatly after unloading

Tab. 3-1: Abhängigkeit der Plutonium-Zusammensetzung vom Abbrand; Angaben in % der gesamten Pu-Menge incl. Am-241
(The Plutonium composition dependence on the initial cycle as percentage of total Pu + Am-241)
(aus OECD 1989)

Isotopic Mass	Half Life	Decay Mode (a)(b)	Specific Activity 10^3 Bq/g	Spontaneous fission neutrons n/g.s.	Heat Generation mW/g	Product
236	2.8 y	α	1.9×10^4	37×10^3	-	U-232
237	45.3 d	β^+	-	-	-	Np-237
238	87.7 y	α	6×10^2	2.6×10^3	560	U-234
239	2.4×10^4 y	α	2	0.03	1.9	U-235
240	6.5×10^3 y	α	8	1.0×10^3	6.8	U-236
241	14.4 y	β	3.7×10^3	-	4.2	Am-241
242	3.8×10^5 y	α	0.1	1.7×10^3	0.1	U-238
Am-241	4.3×10^2 y	α, γ	1.2×10^2	1.1	114	

- a. 0.002 per cent of Pu-241 decays produce alpha-particles.
- b. All the decay processes are accompanied by the emission of some X-rays or gamma-rays.

Tab. 3-2: Eigenschaften von Plutoniumisotopen
(aus OECD 1989)

Isotope	X-Rays	γ -Rays	Spontaneous fission neutrons*	% of isotope in 33 000 MWd/t PWR fuel
Pu-238	5.7×10^3	2.4×10^2	640	1.4
Pu-239	8.9	3.2	< 0.01	57.1
Pu-240	72	0.8	300	22.0
Pu-241	-	120	-	13.7
Pu-242	1.3	-	310	5.5
Am-241	4×10^3	2.7×10^4	0.15	-

* Excludes alpha-neutron reactions which would add to doses from oxide fuels.

Tab. 3-3: Dosisrate an der Oberfläche von 1 kg-Kugeln reiner Plutoniumisotope, in mSv/h
(Surface dose rates for 1 kg spheres of pure nuclides)
(aus OECD 1989)

Reactor Type	Meanfuel burn-up (MWd/t)	Percentage of Pu isotopes at Discharge				
		Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242
Magnox	3 000	0.1	80.0	16.9	2.7	0.3
	5 000	*	68.5	25.0	5.3	1.2
CANDU	7 500	*	66.6	26.6	5.3	1.5
AGR	18 000	0.6	53.7	30.8	9.9	5.0
BWR	27 500	2.6	59.8	23.7	10.6	3.3
	30 400	*	56.8	23.8	14.3	5.1
PWR	33 000	1.3	56.6	23.2	13.9	4.7
	43 000	2.0	52.5	24.1	14.7	6.2
	53 000	2.7	50.4	24.1	15.2	7.1

* Information not available.

Tab. 3-4: Durchschnittliche Isotopenzusammensetzung von Reaktorplutonium
(Average isotopic composition of Plutonium produced in Uranium-fuelled thermal reactors)
(aus OECD 1989)

Years after unloading	Pu composition (per cent)						
	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242	Pu-tot	Am-241
0	1.26	56.62	23.18	13.86	4.73	99.65	0.35
2	1.26	56.62	23.18	12.44	4.73	98.23	1.77
5	1.26	56.62	23.18	10.52	4.73	96.31	3.69
10	1.26	56.62	23.18	8.28	4.73	94.07	5.93
15	1.26	56.62	23.18	5.69	4.73	91.48	8.52

Tab. 3-5: Veränderung der Isotopenzusammensetzung von Plutonium nach der Entladung aus einem LWR
(Change with time of isotopic concentration of Plutonium from Light Water Fuel Reactor)
(aus OECD 1989)

Anmerkung: Die Angaben sind nicht ganz korrekt: von Pu-238 sind nach 15 Jahren bereits rund 11 % zerfallen.

Storage period (a)	LWR (%)	FBR (%)
0	0	0
10	9	9
20	14	14
30	19	17

* If purification is required, 1-2% should be added to these figures.

Tab. 3-6: Verlust an spaltbarem Plutonium während der Lagerung
(ausgedrückt in Pu-239-Äquivalenten)
(Loss of fissile Plutonium during storage expressed
in equivalent Pu-239)
(aus Bairiot & Le Bastard 1988)

Am-241 content in ppm/Total Pu		Initial Enrichment U-235/U		
		3.25 %	3.70 %	4.40 %
Unloading		3 500	4 400	5 100
Reprocessing after 3 years	Before reprocessing	24 600	26 800	28 000
	2 years after reprocessing	10 800	11 200	11 600
Reprocessing after 5 years	Before reprocessing	36 900	39 900	41 600
	2 years after reprocessing	9 980	10 300	10 670
Reprocessing after 10 years	Before reprocessing	59 300	63 700	66 610
	2 years after reprocessing	8 100	8 400	8 700

Tab. 3-7: Konzentrationen von Am-241 in LWR-Brennstoff vor und
nach der Wiederaufarbeitung
(Americium-241 content in the fuel at different stages
after unloading)
(aus OECD 1989)

Plutonium-Bearing Material	Maximum Storage Period
PuO ₂ powders	2 years
MOX fuel rods	10 to 13 years
Fresh MOX fuel assembly	13 to 20 years
Spent MOX fuel assembly	unlimited

* PWR plutonium.

Tab. 3-8: Anhaltswerte für die maximale Dauer der Lagerung von Plutonium
(Indicative limits for Plutonium storage since Plutonium purification)
(aus OECD 1989)

Nuklid	Uran-BE	MOX-BE
	Bq/tSM	Bq/tSM
	AA: 4.0 % U-235	AA: 3.4 % Pu _{fiss}
	AB: 50 Gwd/tSM	AB: 50 Gwd/tSM
	AZ: 3 a	AZ: 3 a
Pu-238	2,59 E14	7,22 E14
Pu-239	1,23 E13	2,45 E13
Pu-240	2,02 E13	6,59 E13
Pu-241	4,48 E15	1,82 E16
Am-241	2,69 E13	1,21 E14
Cm-244	3,60 E14	3,38 E15

AA: Anfangsanreicherung

AB: Abbrand

AZ: Abklingzeit

Tab. 3-9: Inventare relevanter Aktiniden in abgebrannten Uran- und MOX-Brennelementen (DWR; Abbrand 50 Gwd/t SM, Kühlzeit 3 Jahre)
(aus DWK 1987)

Uran-BE
 AA: 4.0 % U-235
 AB: 50 Gwd/tSM
 AZ: 3 a

MOX-BE
 AA: 3.4 % PU_{fiss}
 AB: 50 Gwd/tSM
 AZ: 3 a

Nuklid	Bq/tSM	Bq/tSM
H-3	3,39 E13	4,37 E13
Kr-85	4,92 E14	3,11 E14
Sr-90	3,85 E15	2,31 E15
Ru-106	3,77 E15	5,62 E15
J-129	2,09 E09	2,65 E09
Cs-134	6,51 E15	6,73 E15
Cs-137	5,62 E15	5,77 E15

AA: Anfangsanreicherung
 AB: Abbrand
 AZ: Abklingzeit

Tab. 3-10: Inventare relevanter Spaltprodukte in abgebrannten Uran- und MOX-Brennelementen (DWR; Abbrand 50 Gwd/t SM, Kühlzeit 3 Jahre)
 (aus DWK 1987)

	Combustible UO2	Combustible MOX
90 Sr	68 160	32 757
90 Y	68 160	32 757
106 Ru	64 030	141 676
106 Rh	64 030	141 676
125 Sb	3 478	5 941
134 Cs	50 050	67 541
137 Cs	97 810	98 189
137 mBa	92 630	92 973
144 Ce	74 860	72 811
144 Pr	74 860	72 811
147 Pm	79 620	69 595
154 Eu	5 169	10 497
155 Eu	5 855	10 127
99 Tc	15	13
135 Cs	1	1
PF TOTAUX	761 500	860 000
237 Np	0,3	0,09
241 Am	762,5	5 174
244 Cm	1 944	48 202
Pu g/t	9 470	39 300
Pu Ci/t (alpha)	3 868	23 842

Tab. 3-11: Gehalt an Spaltprodukten und Aktiniden in abgebrannten Uran- und MOX-Brennelementen, in Ci/t (DWR; Abbrand 33 Gwd/t SM, Kühlzeit 3 Jahre)
 (aus EdF 1990, Annexe 3)
 * 1 Ci = 3,7 E10 Bq

URAN UND TRANSURANE

$\frac{\text{LWR}}{\text{MOXFBR}}$ - Brennstoff nach 34.000 MWd_{th}/to Abbrand

Konzentrationen
Bildungs- und Zerfallswege
[Fläche Δ Konzentration]

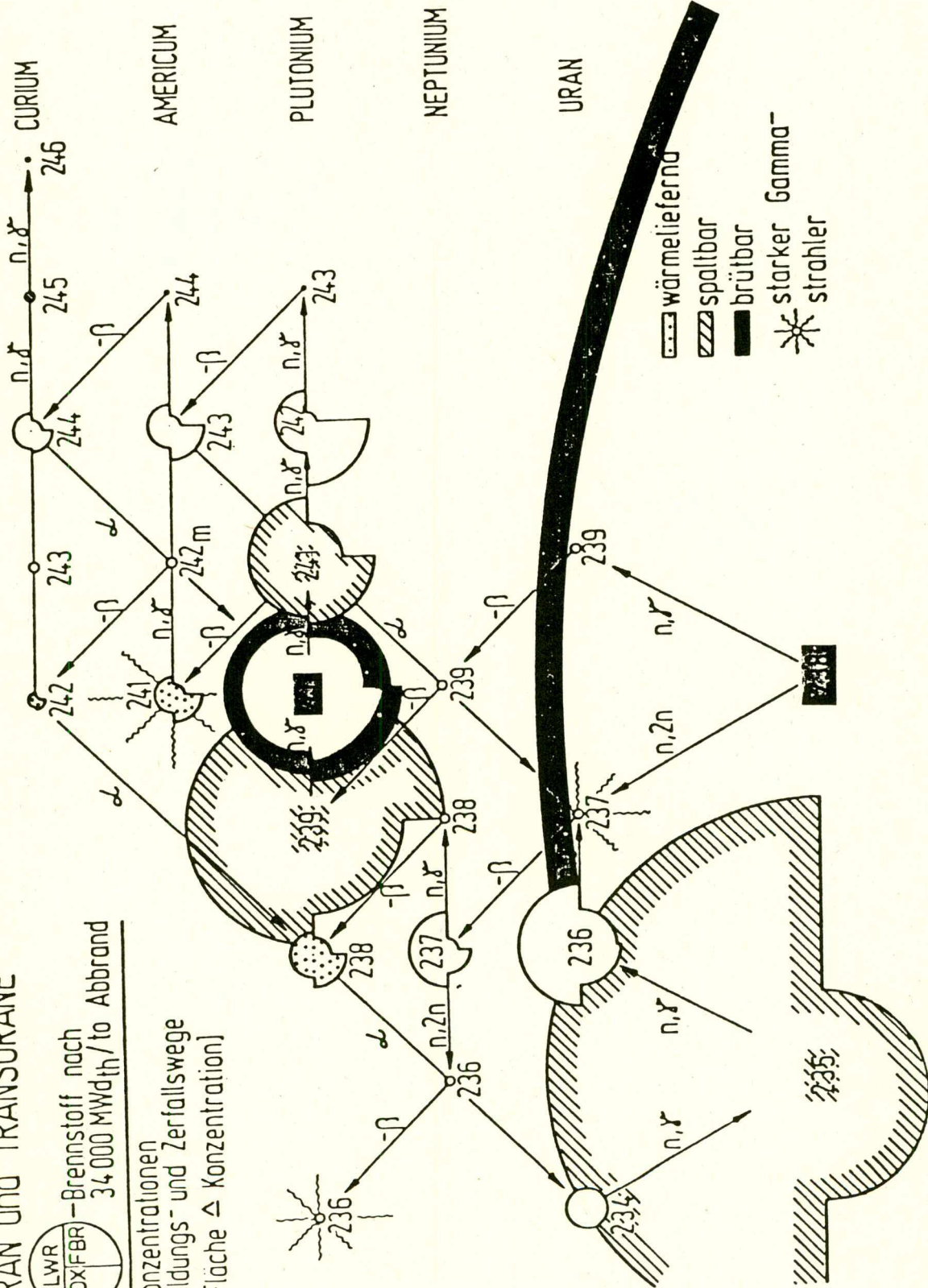


Abb. 3-1: Uran und Transurane: Bildungs- und Zerfallswege (aus Stoll 1981)

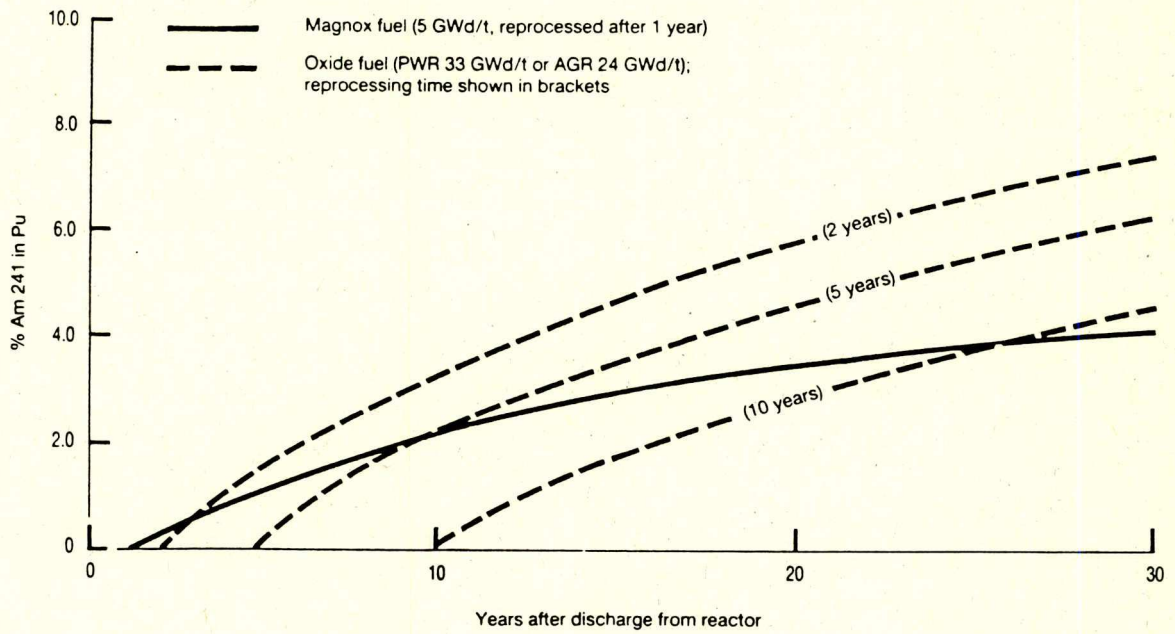


Abb. 3-2: Aufbau von Americium-241 in Reaktorplutonium
 (Build up of Americium in Plutonium with
 time)
 (aus OECD 1989)

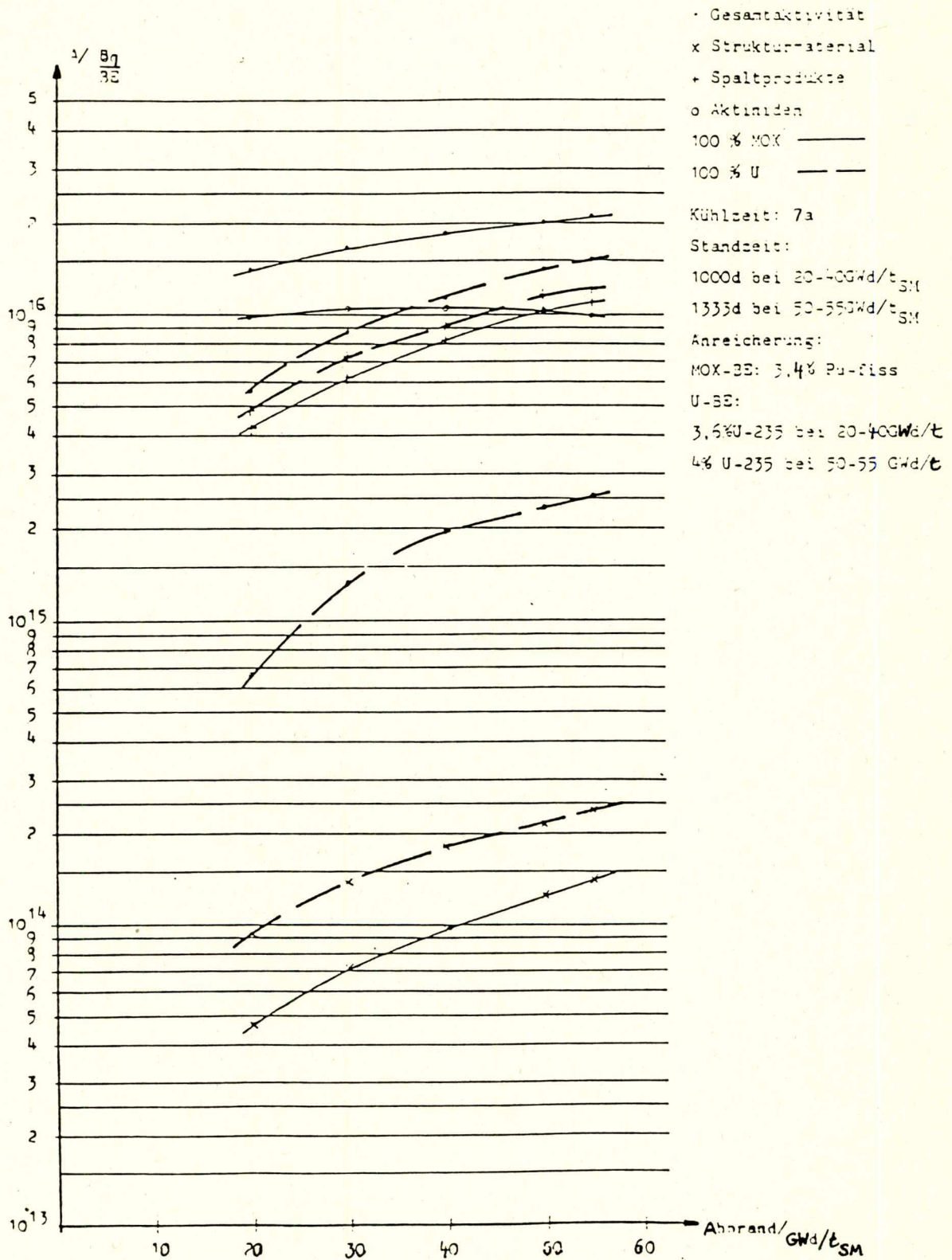


Abb. 3-3: Aktivität von Uran- und MOX-Brennelementen in Abhängigkeit vom Abbrand (aus DGB 1986)

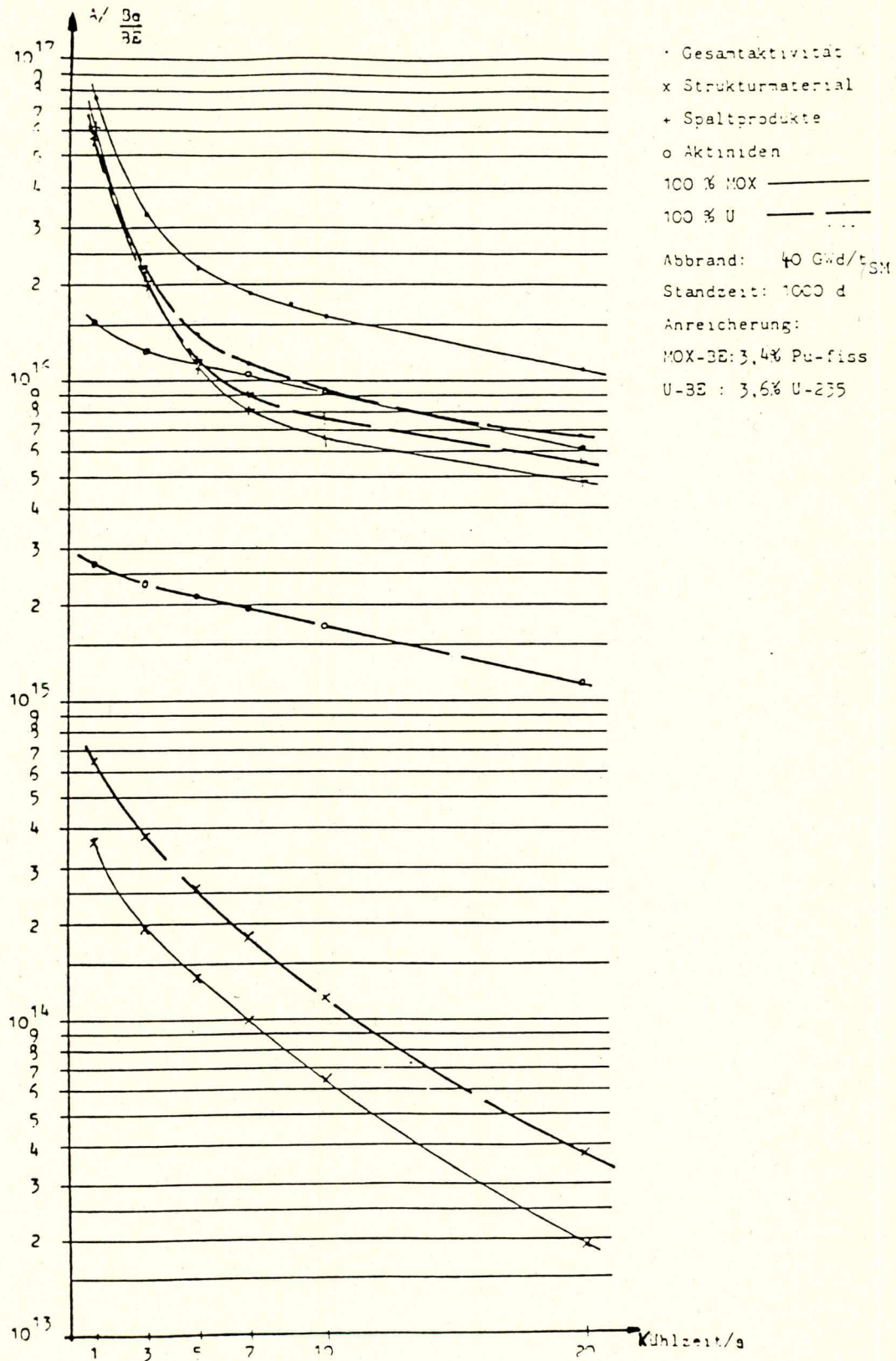


Abb. 3-4: Aktivität von Uran- und MOX-Brennelementen in Abhängigkeit von der Kühlzeit (aus DGB 1986)

4. Probleme beim Einsatz von MOX

Der höhere Gehalt an Aktiniden (der noch zunimmt mit weiteren Rezyklierungen) verursacht die höhere radiologische Giftigkeit von MOX-Brennstoff, die sich an allen Stationen der Verarbeitung, des Transportes, des Einsatzes und der Lagerung zeigt. Eine umfassende Betrachtung der radiologischen Auswirkungen der MOX-Brennstoff-Spirale ist bisher noch nicht erfolgt.

In diesem Kapitel werden zunächst die Probleme an jeder einzelnen Station der Brennstoffspirale kurz vorgestellt. Daran anschließend erfolgt die vertiefte Behandlung einiger spezieller Probleme (Wiederaufarbeitung, Reaktoreinsatz, Proliferation und Strahlenbelastung bei der MOX-BE-Herstellung). Wiederholungen sind von daher teilweise nicht vermeidbar.

4.1 Kurze Darstellung der Probleme an den einzelnen Stationen der Brennelementspirale

4.1.1 Brennelement-Fertigung

Die Herstellung von plutoniumhaltigen MOX-BE führt zu einer höheren Strahlenbelastung der Beschäftigten als die Fabrikation von Uran-BE. Dies liegt - hinsichtlich der äußeren Strahlenbelastung - im wesentlichen an der Neutronenstrahlung von Pu-Isotopen und der durchdringenden Gammastrahlung von Americium-241 - dem Umwandlungsprodukt von Pu-241. Grundsätzlich besteht die Gefahr von Inkorporationen.

Je mehr Americium-241 sich im abgetrennten Plutonium aufgebaut hat - d.h. je länger das Plutonium gelagert wird - desto schwieriger und gefährlicher wird die Verarbeitung. Deshalb ist in den bisherigen MOX-BE-Fabriken (Dessel, Belgien; Cadarache, Frankreich; Hanau, BRD) der Am-241-Gehalt begrenzt auf 10.000 bis 15.000 ppm. Dieser Konzentration entspricht ein Plutonium"alter" von 2 bis 3 Jahren. MOX-BE-Fabriken der Zukunft (wie MELOX in Frankreich) sollen durch verstärkte Abschirmung und Automatisierung die Verarbeitung von Am-241-Gehalten von 30.000 ppm ermöglichen [EdF 1990, Annexe 1].

Betriebserfahrungen liegen uns - mit Ausnahme der Siemens-Anlage in Hanau - nicht vor. Diese hat sich jedoch in Vergangenheit und Gegenwart durch eine Reihe von Pannen und Unfällen ausgezeichnet [Seifert 1991].

Schwere Unfälle in einer MOX-BE-Fabrik (z.B. durch Erdbeben oder Flugzeugabsturz) können verheerende Folgen haben. Die

derzeit in Betrieb befindlichen Anlagen sind unseres Wissens dagegen nicht ausgelegt - im Gegensatz zu neuen Anlagen wie z.B. der 120 jato-Anlage von Siemens/Hanau.

4.1.2 Transporte frischer MOX-Brennelemente

Frischer MOX-Brennstoff weist eine etwas höhere Radioaktivität, Wärmestrahlung und radiologische Giftigkeit auf als frische Uran-Brennelemente. Von größerer Bedeutung ist jedoch, daß Plutonium aus frischen MOX-Brennelementen durch - etwa im Vergleich zur Wiederaufarbeitung von abgebranntem Kernbrennstoff - relativ einfache Verfahren abgetrennt werden kann. Theoretisch reichen bereits zwei Siedewasser-Mischoxid-Brennelemente von jeweils 170 kg und einer Anfangsanreicherung von ca. 3 % spaltbarem Plutonium, um mehr als die für den Bau von einer Atombombe benötigte Menge Plutonium zu gewinnen!

Dies macht solche Brennstoffe für kriminelle oder terroristische Gruppen oder auch Agenten fremder Staaten, die sich in den Besitz von Plutonium zur Herstellung eines Atomsprengkörpers setzen wollen, interessant. Es kann nicht davon ausgegangen werden, daß in diesem Fall die Gefährlichkeit von Plutonium eine ausreichend abschreckende Wirkung hat.

Diese Überlegungen gelten auch für Transporte von Plutoniumdioxid, das nach der Abtrennung von der WAA zu den BE -Fertigungsfabriken transportiert werden muß.

3.1.3 Einsatz im Reaktor

In einem Atomreaktor ist die Steuerung und Moderation des Neutronenflusses von größter Bedeutung. Flußdichte und Energiespektrum der Neutronen müssen genau reguliert werden, damit es weder zu einer unkontrollierten Kettenreaktion noch zu einer unbeabsichtigten Beendigung der Kernspaltung kommt. Durch den Einsatz von MOX-Brennstoff wird die Regelung des Neutronenflusses im Reaktorkern komplizierter (infolge der neutronenabsorbierenden Wirkung von Pu-238, Pu-240, Pu-242 und des sich aufbauenden Am-241).

Die Effektivität der Neutronenabsorberstäbe wird durch den Einsatz von MOX-Brennstoff herabgesetzt. Zur Ausgleichung dieses Effekts erhöht man in französischen Druckwasserreaktoren die Anzahl der Kontrollstäbe. Dies hat jedoch insofern seine Grenzen, als in den zur Zeit in Betrieb befindlichen Reaktoren die Anzahl der Stellen für zusätzliche Kontrollstäbe begrenzt ist [EdF 1990, Annexe 1]. Ebenso wird bei Ein-

satz von MOX-Brennstoff die Wirksamkeit von Borsäure, die im Kühlmittel gelöst ist, verringert.

Die Wärmeleitfähigkeit von MOX-Brennstoff ist schlechter als die von Uran-Brennstoff, was besondere Maßnahmen zur Vermeidung zu großer lokaler Temperaturerhöhungen im Reaktorkern erforderlich macht.

Auch bei der Lagerung von abgebrannten MOX-Brennelementen im Kühlbecken des Reaktors ist der Einsatz stärkerer Neutronenabsorber erforderlich.

Das Inventar des Reaktors an langlebigen Alphastrahlern wird durch den Einsatz von MOX-Brennstoff erhöht. Ein abgebranntes MOX-Brennelement enthält, wie bereits erwähnt, ein Vielfaches an Plutonium und Americium, verglichen mit einem abgebrannten Uran-Brennelement, so daß die Auswirkungen von katastrophalen Unfällen - sei es im Reaktor, sei es beim Abtransport - noch vergrößert werden.

4.1.4 Transport und Zwischenlagerung abgebrannter MOX-Brennelemente

Der Abtransport bestrahlter MOX-Brennelemente nach den Jahren des Einsatzes im Reaktor ist gefährlicher als der Antransport. Aufgrund des höheren Gehaltes an Aktiniden ist die von abgebranntem MOX-Brennstoff ausgesandte Neutronenstrahlung erheblich intensiver als die von Uran-Brennstoff. Dies wird durch die Abschirmwirkung der Transportbehälter nicht ausgeglichen:

Die Ortsdosisleistung an der Oberfläche von Behältern und in 1 m Abstand sind bei abgebrannten MOX-Brennelementen etwa doppelt so hoch wie bei abgebrannten Uran-Brennelementen. Messungen an Behältern mit abgebrannten MOX-Brennelementen aus dem AKW Philippsburg zeigen darüberhinaus, daß die nach den nationalen und internationalen Transportvorschriften zulässigen Höchstwerte von 2 mSv/h (an der Oberfläche) bzw. 0,1 mSv/a (in 1 m Abstand) teilweise fast erreicht wurden [MU 1990].

Dies führt zu einer - verglichen mit abgebranntem Uranbrennstoff - höheren Strahlenbelastung nicht nur für das Transportpersonal und für den Begleitschutz, sondern auch für die Anwohner von Transportstrecken.

Auch bei der Zwischenlagerung und - falls die Brennelemente nicht wiederaufgearbeitet werden - der Vorbereitung zur Direkten Endlagerung in einer Konditionierungsanlage führen

MOX-Brennelemente zu einer stärkeren Strahlenbelastung des Personals.

4.1.5 Wiederaufarbeitung von MOX-Brennstoff

Aufgrund der intensiven Neutronenstrahlung ist die Wiederaufarbeitung von abgebrannten MOX-Brennelementen besonders schwierig. Es werden erhöhte Anforderungen an die Abschirmung in der Anlage, sowie an die Maßnahmen zur Verhinderung von Kritikalität (unkontrollierte Kettenreaktion) gestellt. In großen kommerziellen Wiederaufarbeitungsanlagen wird deshalb MOX-Brennstoff nicht in reiner Form verarbeitet, sondern nur "verdünnt", d.h. gemischt mit Uran-Brennstoff.

Die radioaktiven Emissionen an langlebigen Alpha-Strahlern aus der Wiederaufarbeitungsanlage nehmen zu. Auch die Abgaben von radioaktiven Jod-Isotopen werden erhöht: So entstehen kurzlebige Jod-Isotope wie Jod-133 aus der Spontanspaltung von Curium-244, von dem abgebrannter MOX-Brennstoff ein Vielfaches enthält, verglichen mit abgebranntem Uran-Brennstoff.

Wird das Plutonium mehrmals "rezykliert" - das heißt aus abgebranntem MOX-Brennstoff gewonnen, erneut als Brennstoff eingesetzt, durch Wiederaufarbeitung nochmal abgetrennt usw. - so nimmt die Giftigkeit sowohl der abgebrannten Brennelemente als auch der WAA-Abfälle mit jedem Zyklus weiter zu.

Die Häufigkeit der Rezyklierungen ist deshalb auch begrenzt. Wurde früher der Öffentlichkeit noch vorgegaukelt, mit Plutonium stünde ein unbegrenzter, auf unabsehbare Zeit einsetzbarer Energieträger zur Verfügung, so ist heute klar, daß die Zahl der Rezyklierungen von wiederaufgearbeitetem Plutonium in LWR begrenzt ist. Die französische Energiewirtschaft geht in ihren Zukunftsszenarien sogar noch einen Schritt weiter: Danach werden bestrahlte MOX-Brennelemente nicht wiederaufgearbeitet, sondern direkt in ein (nicht vorhandenes) Endlager gebracht [EdF 1990, Annexe 3].

4.1.6 Hochaktive Abfälle

Auch bei der Verglasung der hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung verursacht MOX-Brennstoff neue Probleme, wie aus französischen Untersuchungen bekannt wurde. Der höhere Gehalt an Aktiniden, insbesondere Curium-244, aber auch Plutonium, führt dazu, daß die Spezifikationen für die Abfälle nicht eingehalten werden können. Die von der französischen Sicherheitsbehörde (SCSIN) genehmigten Spezifikationen betragen weniger als 110 g Plutonium und weniger als 90 g

Cm-244 pro Behälter [Cogema 1986]. Eine Mischung von MOX- und Uranbrennstoff im Verhältnis 1:10 unterschreitet mit 95 g/Container knapp die Spezifikation für Plutonium; mit 105 g Cm-244 pro Behälter wird jedoch die Spezifikation für dieses Nuklid bereits bei so geringem MOX-Anteil überschritten (bei relativ niedrigem Abbrand - 33 GWd/t Schwermetall).

Wenn sich der MOX-Anteil vergrößert - z.B. bis auf ein Viertel - dann können nicht nur die Spezifikationen für Curium-244 nicht mehr eingehalten werden, sondern auch die Spezifikationen für Plutonium werden überschritten.

4.1.7 Endlagerung

Der Einsatz von MOX-Brennstoff schafft zusätzliche Probleme bei der Endlagerung. Werden MOX-Brennelemente wieder aufgearbeitet, so weist der dabei entstehende radioaktive Abfall eine erheblich höhere Langzeit-Giftigkeit auf als Abfall aus der Wiederaufarbeitung von Uran-Brennstoff. Analog ist bei einer Direkten Endlagerung (ohne Wiederaufarbeitung) die Langzeit-Toxizität der MOX-Brennstoffe höher als der Uran-Brennstoffe.

4.2 Vertiefte Behandlung spezieller Probleme

4.2.1 MOX-Einsatz und Wiederaufarbeitung

Kein MOX ohne Wiederaufarbeitung!

Am Beginn der MOX-Nutzung steht die Wiederaufarbeitung des abgebrannten Kernbrennstoffes. Die Abtrennung des Plutonium ist die Voraussetzung für seine weitere Verarbeitung und Nutzung; die Wiederaufarbeitung ihrerseits hätte - rein vom Standpunkt ihrer Befürworter aus betrachtet - keinerlei Sinn, wenn das dabei produzierte Plutonium nicht als Kernbrennstoff genutzt würde.

Nach dem derzeitigen Stand der Planung soll auch am Ende des MOX-Einsatzes die Wiederaufarbeitung stehen; die abgebrannten MOX-BE sollen erneut aufgearbeitet werden, um das in ihnen enthaltenen Plutonium im Rahmen einer zweiten Rezyklierung nochmals als Kernbrennstoff zu nutzen. Sogar an mehrere Zyklen der Rückführung wird gedacht ("Mehrfachrezyklierung"). Allerdings ist es fraglich, inwieweit solche Pläne angesichts der damit verbundenen - und von Zyklus zu Zyklus zunehmenden - Probleme und Schwierigkeiten tatsächlich verwirklicht werden.

4.2.1.1 Probleme und Risiken der Wiederaufarbeitung

Schon der erste Schritt der MOX-Brennstoffspirale - die Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente, die aus angereichertem Natururan hergestellt wurden - ist mit einer Vielzahl von Problemen verbunden, die wir hier kurz zusammenfassend darstellen.

Die Wiederaufarbeitung ist ein komplexer chemischer Prozeß, bei dem der abgebrannte Kernbrennstoff zerkleinert und in Salpetersäure gelöst wird. Diese Brennstofflösung wird in einem mehrstufigen Extraktionsverfahren in drei Hauptströme aufgespalten: Plutonium, Uran und hochaktive Abfalllösung. Uran- und Plutoniumstrom müssen sodann noch mehrere Reinigungsschritte durchlaufen.

Neben den hochaktiven Abfällen entstehen dabei noch weitere Abfallkategorien: Die Hüllen und Strukturteile der Brennelemente, verbrauchte Lösungsmittel, Schlämme aus der Reinigung radioaktiver Abwässer, Abluftfilter sowie ausgediente Geräte, Werkzeuge, Reinigungsmittel u.ä. Alle diese Abfallsorten sind mehr oder weniger radioaktiv und müssen in z.T. sehr aufwendigen Verfahren behandelt werden.

Weitere radioaktive Stoffströme, die die Anlagen verlassen, sind die radioaktiv kontaminierten Abgase und Abwässer, die über verschiedene Kamine bzw. Abwasserleitungen an die Umwelt abgegeben werden [RESTRISIKO Nr. 3/4 1988].

Radioaktive Belastung der Umwelt [OHSI 1990, RESTRISIKO 6 1990]

Diese radioaktiven Abgaben sind schon im Routine-Betrieb erheblich. Dafür liefern die beiden in Europa in Betrieb befindlichen großen WAA in La Hague und Sellafield leider nur zu deutliche Belege: Die Irische See, in die die Abwässer aus Sellafield gepumpt werden, ist heute das am stärksten radioaktiv belastete Meer der Erde. In La Hague sind die Abgaben mit dem Abwasser etwas geringer, vor allem aber ist die Verdünnung durch Meeresströmungen dort größer: Im Rahmen einer "Politik der langen Abwasserleitung" kommt es zu einer weiträumigen Verteilung der radioaktiven Stoffe, die noch in der Nordsee nachweisbar sind. Die Emissionen in die Atmosphäre führen vor allem in den Regionen um die Anlagen zu erhöhter Strahlenbelastung.

Interessant ist ein Vergleich der Strahlenbelastung für die Bevölkerung durch La Hague und Sellafield mit den in Deutschland geltenden Grenzwerten ¹⁾: Schon in der Vergangenheit kam es zu z.T. erheblichen Überschreitungen dieser Grenzwerte. In Zukunft werden sie aller Voraussicht nach durch den Betrieb der Anlage THORP in Sellafield sowohl für Belastung über Abwasser als auch über Abluft, und durch die Anlagen in La Hague zumindest für Belastung über Abluft überschritten werden. Diese Anlagen wären in Deutschland also überhaupt nicht genehmigungsfähig!

Die Erfahrungen mit dem Betrieb in La Hague und Sellafield zeigen überdies, daß Wiederaufarbeitung sehr störanfällig ist: Pannen und technische Probleme treten sehr häufig auf, der Störfall ist schon beinahe der Normalfall. Leckagen, Überlaufen von Behältern, Brände, Störungen in Abluftsystemen, irrtümliche radioaktive Ableitungen an die Umgebung - das sind lediglich einige Beispiele für die in den letzten Jahren verzeichneten Ereignisse. Häufig kam es dabei zu zusätzlichen Strahlenexpositionen der Beschäftigten, teilweise weit über die gesetzlichen Grenzwerte hinaus. Einige der bisher eingetretenen Störfälle führten auch zu erheblichen Strahlenbelastungen in der Umgebung der Anlagen.

1) Die in der Bundesrepublik geltenden Grenzwerte für die Bevölkerung in der Umgebung von Atomanlagen sind niedriger als in Frankreich oder Großbritannien.

So führte z.B. ein Schwelbrand in einem Lagersilo für feste radioaktive Abfälle in La Hague am 06. Januar 1981 zur Freisetzung radioaktiver Cäsiumisotope an die Atmosphäre. Der Brand konnte erst nach 48 Stunden durch Fluten des Silos mit Flüssigstickstoff gelöscht werden. Es dauerte 16 Monate, bis die französischen Behörden eine endgültige Angabe zur Höhe der Freisetzung machten: 0,7 bis 2 TBq Cs-137 und Cs-134 (0,7 bis 2 E12 Bq). Eine Folgenberechnung zeigt, daß in der Umgebung der Anlage (außerhalb des Anlagenzauns) Strahlenbelastungen von bis zu 221 mSv effektive Dosis aufgetreten sein können (zum Vergleich: Der in Deutschland gültige Planungsrichtwert für Störfälle liegt bei 50 mSv).

Zwischen dem 11. und 16. November 1983 wurden in Sellafield aufgrund eines Mißverständnisses bei Wartungsarbeiten etwa 60 TBq Beta/Gamma-Strahler in Form eines radioaktiven Schlammes irrtümlich in die Irische See abgeleitet. Das Vorkommnis wurde erst am 20. November der Aufsichtsbehörden gemeldet; am gleichen Tag erreichte der radioaktive Schlamm die Küste, und etwa 20 km Strand wurden kontaminiert. Nach Angaben des Department of Energy war die Verstrahlung an manchen Stellen so stark, daß bei direktem Kontakt der in Großbritannien gültige Jahresgrenzwert für die Hautdosis (50 mSv) innerhalb einer Stunde überschritten worden wäre. Der betroffene Strand war etwa 10 Tage lang der Öffentlichkeit frei zugänglich.

Weiterhin besteht bei einer WAA das Potential für katastrophale Unfälle mit Freisetzungen, die zu schweren weiträumigen Kontaminationen führen. Die sensitivsten Anlagenbereiche sind dabei das Lagerbecken für abgebrannte Brennelemente sowie die Tanks zur Lagerung flüssiger hochaktiver Abfälle. Beide sind sowohl in Sellafield als auch in La Hague für aktive Kühlung ausgelegt; d.h. das Einhalten eines sicheren Zustandes ist vom Funktionieren eines Kühlsystems mit Pumpen usw. abhängig. Bei den hochaktiven Abfalllösungen sind weiterhin auch aktive Belüftung und Rühren erforderlich. Längerer Ausfall dieser Systeme kann zu Katastrophe führen. (In Deutschland wurde nach dem Gorleben-Hearing 1979 gefordert, diese Anlagenteile für passive Kühlung auszulegen - also mit einer Kühlung zu versehen, die nicht vom Funktionieren technischer Geräte abhängig ist. Flüssige hochaktive Abfälle sollten überhaupt nur in relativ geringen Mengen gelagert werden.)

Diese Gefahr ist keineswegs rein theoretischer Natur: "Vorläufer-Ereignisse" (d.h. Ereignisse, die das Potential hatten, zu solchen Katastrophen zu führen) sind bereits eingetreten. Z.B. führte am 15. April 1980 ein Brand in einem Transformator in La Hague zum kompletten Ausfall der Stromversorgung, einschließlich der Notstromeinrichtungen. Das Tanklager für hochaktive Lösungen war 50 Minuten ohne Strom.

Nach diesem Vorfall wurde die Stromversorgung verbessert. Dennoch kam es am 14. März 1989 erneut zu einem Stromausfall in der gesamten Anlage, für die Dauer von etwa einer Stunde. Am 08. August 1989 fiel der Strom in der Lagereinheit SPF-2 für hochaktive Abfalllösungen für 1 1/2 Stunden aus. Bei Abfällen mit kurzer Kühlzeit wird etwa 2 1/2 Stunden nach Ausfall von Kühlung, Belüftung und Rühren ein kritischer Zustand erreicht (Gefahr einer Wasserstoffexplosion).

Sicherung von Plutonium, Sicherheitskontrollen

Dieser Problemerkis wird in Kap. 4.2.3 allgemein abgehandelt. Ergänzend ist zu bemerken, daß die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO), die für die internationalen Sicherheitskontrollen zuständig ist, bisher mit großen WAA keine Erfahrungen hat. In La Hague und Sellafield unterliegen lediglich die Eingangslager den IAEO-Kontrollen. Die IAEO verfügt bisher auch noch gar nicht über entwickelte Konzepte zu Anwendung von Safeguards in großen WAA; sie ist zur Zeit dabei, solche zu entwickeln (LASCAR-Arbeitsgruppen).

Beide Wiederaufarbeitungsanlagen in der EG unterliegen den Sicherheitskontrollen von EURATOM. Bei der derzeit in Betrieb befindlichen Sellafield-Anlage sind die Kontrollen allerdings sehr erschwert, da sie sowohl zivil als auch militärisch genutzt wird, so daß die EURATOM-Inspektoren keinen vollständigen Zugang haben (EURATOM kontrolliert nur zivile Anlagen; es handelt sich dabei sozusagen um die Selbstkontrolle der EG-Staaten).

Radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung

Eines der größten Probleme der Wiederaufarbeitung sind die großen Volumina radioaktiver Abfälle, die dabei entstehen. 1 t Brennstoff hat ein Nettovolumen von 0,5 m³; das Bruttovolumen nach Verpacken zur direkten Endlagerung beträgt etwa 2,3 m³. Aus 1 t Brennstoff entstehen in La Hague aber 15 m³ radioaktive Abfälle! Außerdem verteilen sich diese Volumina auf die verschiedensten Abfallkategorien, die im Hinblick auf Abschirmung, Handhabung, Transport und Lagerung verschiedene Ansprüche stellen. Die aus La Hague nach Deutschland zurückzunehmenden Abfälle umfassen nach offiziellen Angaben 5 Kategorien; weitere können evtl. noch hinzukommen.

Bei der Konditionierung der Abfälle der meisten Kategorien bestehen noch erhebliche ungelöste Probleme; es ist bisher auch keineswegs garantiert, daß sie für die Endlagerung geeignet sind.

Zu Details siehe [RESTRISIKO Nr. 7 1990].

4.2.1.2 Die Wiederaufarbeitung von MOX-Brennstoff

Abgebrannter MOX-Brennstoff hat eine deutlich andere Zusammensetzung als abgebrannter Uran-Brennstoff. Gewisse Unterschiede bestehen schon bei den Spaltprodukten; die Aktinidenaktivität ist deutlich höher (siehe Kap. 3, Brennelementdaten für Uran- und MOX-BE).

Sicherheitstechnische Probleme der MOX-Aufarbeitung

Aus dem unterschiedlichen Inventar ergeben sich folgende Konsequenzen [EdF 1990, Annexe 1; SN 1990]:

- MOX-Brennstoff sendet sehr viel stärkere Neutronenstrahlung aus (hauptsächlich aus der Spontanspaltung von Cm-244) ==> erhöhte Anforderungen an die Abschirmung, störender Einfluß dieser "Hintergrundstrahlung" bei Messungen der Pu-Konzentration.
- In der Auflöser- und der hochaktiven Abfalllösung entstehen aus der Spontanspaltung von Cm-244 größere Mengen radioaktiver Jodisotope ==> erhöhte Emissionen mit der Abluft.
- Aufgrund des höheren Gehaltes an spaltbarem Plutonium besteht in Lösungen erhöhte Kritikalitätsgefahr ==> zusätzliche Maßnahmen zur Kritikalitätskontrolle.
- Die Langzeit-Toxizität des abgebrannten MOX-Brennstoffes ist größer.

Ein weiterer Unterschied liegt in der schlechteren Löslichkeit von abgebranntem MOX-Brennstoff, weil das Plutonium nicht so homogen im Uran verteilt ist wie in abgebranntem Uranbrennstoff. Das kann zum Ausfallen unlöslicher, plutoniumhaltiger Partikel in der Brennstofflösung führen, wodurch die Plutoniumverluste in den Abfall erhöht werden.

Um die Probleme der erhöhten Neutronenstrahlung und Kritikalitätsgefahr abzumildern, und um zu verhindern, daß die unterschiedliche Zusammensetzung des MOX-Brennstoffes den Ablauf der chemischen Trenn- und Reinigungsvorgänge durcheinanderbringt, soll nach dem Auflösevorgang die MOX-Brennstofflösung mit Uran-Brennstofflösung gemischt werden.

In La Hague z.B. soll MOX in UP2-800 aufgearbeitet werden (UP3 ist dafür nicht vorgesehen); das Mischungsverhältnis zwischen MOX- und Uranbrennstoff soll bei 1 : 9 liegen, jedoch bis auf 1 : 4 erhöht werden können.

Das Mischen löst jedoch noch nicht alle Probleme:

- Zusätzliche Maßnahmen zur Kritikalitätskontrolle sind erforderlich: Entweder stärkere Verdünnung der Brennstofflösung, oder Beigabe löslicher Neutronenabsorber (sogen. "homogene Vergiftung"). Eine zu starke Verdünnung kann aber unverträglich mit dem chemischen Fließschema des Wiederaufarbeitungsprozesses sein; und homogene Vergiftung stellt erhöhte Anforderungen an die Prozeßkontrolle - es muß jederzeit sichergestellt sein, daß das Neutronengift in der erforderlichen Konzentration gleichmäßig verteilt ist.
- Die erhöhte Neutronenstrahlung macht an verschiedenen Stellen zusätzliche Abschirmungen erforderlich.
- Die meßtechnische Erfassung von Plutonium in den Abfallströmen wird sehr erschwert, da die von Cm-244 ausgehende Neutronenstrahlung das Plutonium "maskiert". Neue, komplizierte Meßmethoden müssen angewandt werden.
- Es wird versucht, durch besonders genaue Kontrolle bei der MOX-Herstellung eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Pu zu gewährleisten, damit sich keine unlöslichen Teilchen bilden können. Dennoch wird in UP2-800 zusätzliche apparative Ausrüstung dafür bereitgestellt, solche Teilchen einem zweiten Auflösevorgang zu unterziehen - eine Komplizierung des ganzen Verfahrens.

Erfahrungen mit der Aufarbeitung von MOX, Zukunftspläne

Die bisherigen Erfahrungen mit der Wiederaufarbeitung von MOX-Brennstoff sind sehr begrenzt. 23,6 t deutsche MOX-Brennstoffe der ersten Generation erwiesen sich überhaupt als nicht ausreichend löslich, und sollen daher in Schweden endgelagert werden. Spätere MOX-Brennstoffe wurden mit anderen Verfahren hergestellt, die bessere Löslichkeit gewährleisten. In Karlsruhe und La Hague wurden bis 1991 erst wenige Tonnen MOX-Brennstoff aufgearbeitet. In Frankreich sind für die kommenden Jahre weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie versuchsweise Aufarbeitung kleinerer Chargen von MOX-Brennstoff geplant (in La Hague, Marcoule, und im Forschungszentrum Fontenay-aux-Roses) [EdF 1990, Annexe 4].

Entsprechend den Planungen der offiziellen französischen Stellen soll eine MOX-Wiederaufarbeitung in großem Maßstab in UP2-800 erst nach dem Jahr 2000 beginnen (knapp 3000 t bis zum Jahr 2020, nach der "projection normative" von EdF/COGEMA/CEA [EdF 1990, Annexe 2]). Im Jahre 2000 ist die Inbetriebnahme einer neuen Pu-Reinigungs- und -weiterverarbeitungsanlage (R4) geplant, die jährlich bis zu 25 t Pu durchsetzen kann (gegenüber rd. 8 t in der alten Anlage MaPu). Die verlängerten Zwischenlagerzeiten, die sich aus diesem Aufschub ergeben, werden gerne in Kauf genommen, da durch das damit verbundene Abklingen der Radioaktivität die Wiederaufarbeitung etwas erleichtert wird.

Auswirkungen auf die Wiederaufarbeitungs-Verträge

Das erforderliche Mischen von MOX-Brennstofflösung mit Uran-Brennstofflösung vor den Trenn- und Reinigungsschritten der Wiederaufarbeitung führt zu Komplikationen bei der Aufarbeitung von Brennstoff von ausländischen Kunden. COGEMA nimmt MOX-Brennstoffe aus Deutschland lt. Muster-Wiederaufarbeitungsvertrag nur dann an, wenn entweder gleichzeitig mindestens dreimal so viel abgebrannter Uranbrennstoff geliefert wird, oder eine entsprechende Menge Uranbrennstoff bei anderen Kunden aufgetrieben werden kann. (Nur am Rande sei angemerkt, daß dieses Verhältnis - 1 : 3 - nicht konsistent mit dem sonst von COGEMA zum Mischungsverhältnis gemachten Angaben - 1 : 4 bis 1 : 9 - ist.)

Obwohl weiterhin UP3 für ausländische Kunden bestimmt ist, während UP2-800 den inländischen Bedarf decken soll, muß ausländischer MOX-Brennstoff in UP2-800 aufgearbeitet werden, da UP3 hierfür nicht ausgerüstet ist. Die Muster-Wiederaufarbeitungsverträge enthalten auch einen Hinweis auf diesen Punkt. Weiterhin halten die Verträge fest, daß dadurch "swaps" (Vertauschungen) des Brennstoffs zwischen verschiedenen Kunden erforderlich werden: "*(Dies) erfordert swaps von Brennelementen zwischen Kunden von UP2 und UP3 ... und die Vertragsparteien stimmen darin überein, daß solche swaps vom Wiederaufarbeiter koordiniert werden, und daß (der Kunde) keine Einsprüche gegen solche swaps erheben wird ...*" [COGEMA 1990, Abschnitt 5.6.2]. Im Klartext: Brennstofflösung aus deutschen MOX-Elementen wird mit solcher aus französischem Uran-Brennstoff vermischt, und die klare und eindeutige Zuordnung von spaltbaren Stoffen und radioaktiven Abfällen zu den einzelnen Kunden - schon unter günstigsten Umständen eine nur ungenau lösbare Aufgabe - wird dadurch weiter erschwert.

Im entsprechenden Abschnitt des Mustervertrages mit British Nuclear Fuels wird MOX nicht ausdrücklich angesprochen. Es

findet sich eine pauschale Regelung: "... der Brennstoff kann nach Gutdünken des Wiederaufarbeiters während der Wiederaufarbeitung physikalisch und chemisch mit anderem Brennstoff gemischt werden, in Übereinstimmung mit den betrieblichen Anforderungen des Wiederaufarbeiters" [BNF 1990, Abschnitt 5.4].

Radioaktive Abfälle aus der MOX-Aufarbeitung

Die Abfälle aus der MOX-Wiederaufarbeitung sind erheblich toxischer als jene aus der Wiederaufarbeitung von Uran-Brennelementen; entsprechend dem Ausgangspunkt, daß abgebrannter MOX-Brennstoff toxischer als Uranbrennstoff ist. Wie bereits ausgeführt, enthält er mit Ausnahme von Np-237 deutlich größere Mengen von allen wichtigen α -Strahlern. Langfristig gesehen ist auch der Np-237-Gehalt höher; durch den Zerfall des Mutternuklids Am-241 (Halbwertszeit rd. 450 Jahre) in die Tochter Np-237 "überholt" MOX-Brennstoff in dieser Hinsicht den Uranbrennstoff einige 100 Jahre nach der Entladung aus dem Reaktor.

Der höhere Gehalt an α -Strahlern führt schon bei der Abfallkonditionierung zu Problemen: Die zulässigen Abfall-Spezifikationen können bei verglasten hochaktiven Abfällen sowie bei zementierten Hüllen und Strukturteilen bei unveränderter Prozeßführung nicht eingehalten werden.

Bei den verglasten Abfällen liegt bei einem Mischungsverhältnis von 1 : 9 (MOX:UO₂) selbst bei dem relativ niedrigen Abbrand von 33 GWd/t der Gehalt der Glasblöcke an Cm-244 schon um rd. 17 % über der Spezifikation. Bei einem Verhältnis von 1 : 4 wird bei Plutonium die Spezifikation gerade erreicht; der Gehalt an Cm-244 liegt beim Doppelten des Spezifikationswertes [EdF 1990, Annexe 3]. Möglicherweise kann hier nur durch stärkere Verdünnung der radioaktiven Stoffe im Glas Abhilfe geschaffen werden [SN 1990], wodurch sich die Glasvolumina pro Tonne Brennstoff drastisch erhöhen würden.

Bei Brennelementhüllen und -strukturteilen ist ein Vermischen nicht geplant und wäre auch kaum machbar. Diese Abfälle fallen im Auflöser an, bevor MOX- und Uranbrennstoffstrom zusammengeführt werden. Hier werden die Spezifikationen für den Gehalt an Plutonium überschritten, bei höheren Abbränden möglicherweise auch an Cm-244. COGEMA plant, ein verbessertes Spülverfahren zur wirksameren Dekontamination dieser Abfälle zu entwickeln [EdF 1990, Annexe 3]. Die radioaktiven Stoffe landen dann allerdings z.T. in flüssigen Abfällen, die ihrerseits wieder konditioniert werden müssen.

Die genannten Probleme werden auch von offizieller Seite eingestanden. Bei anderen Abfallkategorien sehen EdF, COGEMA und CEA dagegen keine Schwierigkeiten. Es ist anzumerken, daß bei Schwierigkeiten im Wiederaufarbeitungsprozeß, die z.B. zu unvorhergesehen hohen Verlusten von Plutonium in die Abfallströme führen, bei allen Abfallkategorien zusätzliche Probleme auftreten können.

4.2.1.3 Mehrfachrezyklierung von Plutonium

Die Wiederaufarbeitung von MOX-Brennstoff ist der erste Schritt zu einer zweiten Rezyklierung des Plutonium. Obwohl die MOX-Wiederaufarbeitung, wie dargelegt, sich noch in der Entwicklungs- und Erprobungsphase befindet, werden bereits seit geraumer Zeit Überlegungen über die Möglichkeit einer mehrfachen Rezyklierung von Plutonium angestellt. Das Problem dabei ist, daß mit jeder Rezyklierung der Anteil des spaltbarem Plutonium (Pu_{fiss} , die Isotope Pu-239 und Pu-241) an der Gesamt-Plutoniummenge (Pu_{ges}) abnimmt, wie in der folgenden Übersicht zusammengestellt [EdF 1990, Annexe 1; Aycoberry 1989]:

Anteil von Pu_{fiss} am Pu_{ges}	33 Gwd/t	45 Gwd/t
Abgebrannter UO_2 -Brennstoff	70 %	65 %
Abgebr. MOX-Brennstoff (d.h. nach der ersten Rezyklierung)	63 %	59 %
Nach der zweiten Rezyklierung	53 %	50 %

Außerdem nimmt der Anteil von Pu-238 zu, was zu erhöhter Neutronenstrahlung durch (α, n)-Kernreaktionen und damit zu erhöhten Anforderungen an die Abschirmung führt.

Anfang der 80er Jahre herrschte auf diesem Gebiet noch Optimismus vor: Es wurde davon ausgegangen, daß Mehrfachrezyklierung von Pu ad infinitum durchgeführt werden könne. Die ungünstige Isotopen-Zusammensetzung von Pu hoher Rezyklierungsstufe, so wurde angenommen, könne durch das Mischen mit Pu der niedrigsten Stufe bei der gemeinsamen Wiederaufarbeitung weitgehend ausgeglichen werden [BMFT 1981].

Mittlerweile wird in Frankreich davon ausgegangen, daß Plutonium mit einem Pu_{fiss} -Anteil von unter etwa 60 % im Reaktor nicht mehr eingesetzt werden kann, weil der Gesamt-Plutonium-

gehalt der Brennelemente dann unzulässige Werte erreichen würde. Ohne Vermischung von Plutonium verschiedener Rezyklierungsstufen wäre damit nur eine einzige Rezyklierung möglich. Bei einer Mischung mit abgebranntem Uranbrennstoff im Verhältnis 1 : 4 sollen etwa 3 Rezyklierungen möglich sein, allerdings bei relativ niedrigem Abbrand (33 GWd/t) [Aycoberry 1989]. Bei höheren Abbränden ist die Situation jedenfalls noch ungünstiger. Von einer beliebigen Zahl möglicher Rezyklierungen wird heute nicht mehr gesprochen.

Alle diese Überlegungen beziehen sich lediglich auf die Qualität des Plutonium und setzen voraus, daß die Wiederaufarbeitung von abgebranntem MOX-Brennstoff plangemäß durchgeführt werden kann. Falls dabei aber auch in Zukunft noch technische Schwierigkeiten auftreten, die zu Verzögerungen führen, könnte schon die Wiederaufarbeitung zum limitierenden Faktor bei der Mehrfachrezyklierung werden. Schon allein wenn der erforderliche Verdünnungsgrad erhöht werden müßte, könnte nicht der gesamte MOX-Brennstoff aufgearbeitet werden, weil nicht genug abgebrannter Uran-Brennstoff zum Verdünnen zur Verfügung steht.

Die zur Zeit geforderte Verdünnung zwischen 1 : 4 und 1 : 9 ist auf Dauer auch nur dann machbar, wenn sich die in Betrieb befindliche Kernkraftwerkskapazität laufend erhöht (weil neue Anlagen zunächst einmal mit Uranbrennstoff beladen werden, und dadurch der Anteil dieses Brennstoffs insgesamt erhöht wird. Dies wirkt sich besonders stark aus, weil abgebrannter MOX-Brennstoff vor der Wiederaufarbeitung länger zwischengelagert wird als Uranbrennstoff). Bei gleichbleibender Kernenergiekapazität würde, sobald sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat, der abgebrannte Uranbrennstoff gerade für eine Verdünnung von etwa 1 : 4 bis 1 : 3 reichen, wenn der gesamte MOX-Brennstoff wiederaufgearbeitet werden soll.

Es ist also damit zu rechnen, daß auch bei Weiterführung der großtechnischen Wiederaufarbeitung ein nennenswerter Anteil von abgebrannten MOX-Elementen direkt endgelagert werden muß.

4.2.2 MOX-Brennstoff und Reaktorbetrieb

4.2.2.1 Probleme beim MOX-Einsatz im Reaktor

In einem Reaktor ist die Steuerung und Moderation des Neutronenflusses, der die Kettenreaktion in Gang hält, von größter Bedeutung. Flußdichte und Energiespektrum der Neutronen müssen genau reguliert werden, damit es weder zu einer unkon-

trollierten Kettenreaktion noch zu einer unbeabsichtigten Beendigung der Kernspaltung kommt.

Plutonium unterscheidet sich in seinen Eigenschaften teilweise wesentlich von Uran-235; daher beeinflusst seine Anwesenheit den Reaktorbetrieb. In einem Reaktor, der lediglich mit Uran-Brennstoff beladen wird, erreicht der Plutonium-Anteil in einem Brennelement allerhöchstens etwa ein Prozent (unmittelbar vor der Entladung, bei höheren Abbränden). Bei Mischoxid-Brennelementen werden dagegen im frischen Brennstoff Plutonium-Anteile von bis zu sechs Prozent erreicht, in einzelnen Brennstäben auch darüber.

Der Einsatz von Mischoxid-Brennstoff im Reaktor schafft damit eine spezielle Situation, und der Einfluß des Plutonium im Brennstoff geht weit über jenes Ausmaß hinaus, das durch die Entstehung von Plutonium in gewöhnlichen Uran-Brennelementen während des Betriebes erreicht wird.

Uran-235 weist die höchsten Wirkungsquerschnitte für Spaltung durch Neutronen im thermischen Bereich (Neutronenenergie unter 0,4 eV) auf. Mit steigender Neutronenenergie nimmt der Spaltquerschnitt praktisch kontinuierlich ab. Die spaltbaren Plutonium-Isotope Pu-239 und Pu-241 dagegen erreichen ihren maximalen Spaltquerschnitt bei höheren Energien (über 0,1 eV); in diesem Bereich liegen auch die höchsten Absorptionsquerschnitte der geradzahligen Plutoniumisotope, insb. von Pu-240.

Im Schnitt ist die Absorption von Neutronen in MOX-Brennstoff etwa zweimal stärker als in Uran-Brennstoff. Durch diese Absorption und auch die Spaltung bei höheren Neutronenenergien stellt sich in einem Reaktorkern mit MOX-Brennstoff ein "härteres" Neutronenspektrum ein, d.h. der Anteil thermischer Neutronen wird deutlich reduziert [EdF 1990, Annexe 1].

Aufgrund des höheren Spaltquerschnittes von Plutonium bei dem im Kern vorherrschenden Neutronenspektrum stellen sich besonders in den Randbereichen der MOX-Brennelemente Leistungsspitzen ein. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, daß die mittlere Neutronenausbeute pro Spaltung für Plutonium höher liegt als für Uran-235 (rd. 3 Neutronen gegenüber rd. 2,5 Neutronen).

Das härtere Neutronenspektrum führt zu einem verstärkten Einfang von Neutronen durch Uran-238 und damit zur vermehrten Bildung von neuem Pu-239. Daher haben MOX-Brennelemente mit dem gleichen Abbrandpotential wie Uran-Brennelemente eine geringere Anfangsreaktivität. Insgesamt erniedrigen damit MOX-Brennelemente in ihrer ersten Standzeit die Reaktivität

eines Kerns, während sie diese in späteren Einsatzperioden erhöhen [Böhm 1983]

Durch die Verringerung des thermischen Neutronenflusses und die verstärkte "konkurrierende" Absorption durch geradzahlige Pu-Isotope wird die Wirksamkeit der für Regelung und Abschaltung erforderlichen Neutronenabsorberstäbe im Reaktor herabgesetzt, so daß bei MOX-Einsatz in französischen Druckwasserreaktoren die Zahl dieser Stäbe erhöht werden muß. Ebenso wird bei MOX-Einsatz die Wirksamkeit von Borsäure, die als Neutronenabsorber im Kühlwasser gelöst ist (bei Siedewasserreaktoren während der Stillstandszeiten, bei Druckwasserreaktoren auch im Betrieb) verringert, was u.U. weitere technische Modifikationen erforderlich macht [EdF 1990, Annexe 1].

Ein weiteres Problem von MOX-Brennstoff ist die schlechtere Wärmeleitfähigkeit. Aus diesem Grunde sowie auch (nach längerem Einsatz im Reaktor) durch die höhere Leistung stellt sich in MOX-Brennstoff eine höhere Temperatur ein als in U-Brennstoff.

Der Schmelzpunkt des Brennstoffs liegt für MOX niedriger (um 5°C pro 1 % Pu); die Freisetzung von Spaltgasen ist größer, was bei hohen Abbränden zu Problemen führen kann.

Besonderere Aufmerksamkeit bedarf bei der Einsatzplanung von Plutonium als Brennstoff die Tatsache, daß das spaltbare Isotop Pu-241 mit einer Halbwertszeit von nur 14,4 Jahren zerfällt. Es entsteht als Tochterprodukt Americium-241, das als Neutronenabsorber wirkt, sowie auch durchdringende Gamma-Strahlung aussendet.

Die Zeit zwischen der Pu-Abtrennung bei der Wiederaufarbeitung und dem Neueinsatz der MOX-Brennelemente muß daher begrenzt werden; dies auch aus wirtschaftlichen Gründen, da der Wert des Plutonium durch den Zerfall spaltbarer Kerne abnimmt. Die damit verbundene Reaktivitätsabnahme kann auch im Reaktorbetrieb zu Problemen führen: Nach längeren, z.B. reparaturbedingten Stillstandszeiten wird u.U. das Wiederaufahren erschwert oder unmöglich gemacht [KTG-SFEN 1989; Aussagen in der Diskussion].

Durch den Einsatz von Plutonium verändern sich auch die Temperaturkoeffizienten der Reaktivität (insbesondere wird der Moderator-Temperaturkoeffizient stärker negativ), was bei Störfällen mit raschen Temperaturschwankungen zu gewissen Veränderungen im Verhalten des Kernes führen kann.

4.2.2.2 Auslegung von MOX-Brennelementen

Die Auslegung von MOX-Brennelementen wird in der Praxis durch einen Zielkonflikt bestimmt [Brandstetter 1984]:

- Einerseits soll - um die zusätzliche Strahlenbelastung und die Mehrkosten bei der BE-Fertigung möglichst gering zu halten - das Plutonium auf möglichst wenige Brennelemente konzentriert werden.
- Andererseits müssen die MOX-Brennelemente mit den Uran-Brennelementen "verträglich" sein - das heißt, die abweichenden Eigenschaften wie höhere Spaltquerschnitte, stärkere Absorption usw. sollen in möglichst geringem Maße zu Welligkeit in der Neutronenfluß-, Leistungs- und Temperaturverteilung im Kern führen. In dieser Hinsicht wäre es am günstigsten, das Plutonium gleichmäßig über sämtliche Brennelemente im Kern zu verteilen.

Der Kompromiß zwischen diesen beiden Anforderungen führt dazu, daß Brennelemente mit sehr kompliziertem Aufbau entwickelt werden mußten, um das Plutonium einigermaßen konzentrieren zu können, und gleichzeitig die Sprünge im Neutronenfluß im Grenzbereich zu den Uran-Brennelementen zu reduzieren.

Uran-Brennelemente für Druckwasserreaktoren bestehen aus Brennstäben mit einheitlicher Anreicherung (typischerweise um 3 - 4 % Uran-235); MOX-Elemente dagegen sind aus Brennstäben mit verschiedenem Plutoniumgehalt zusammengesetzt (zwei bis drei verschiedene Zonen, mit Anteilen von etwa 2 - 4 % Pu_{fiss}), wobei zur Glättung des Neutronenflusses die Stäbe mit geringerem Plutoniumgehalt außen liegen.

Bei Siedewasserreaktoren sind aufgrund des komplizierteren Kernaufbaues auch in Uran-Brennelementen Brennstäbe mit mehreren Anreicherungsstufen vorhanden (drei bis vier Zonen, mit typischen Anreicherungen von 2 - 3 % U-235), sowie Brennstäbe, die mit dem Neutronenabsorber Gadolinium versetzt sind.

Typischer MOX-Siedewasserreaktorbrennstoff enthält Brennstäbe mit stark wechselndem Plutoniumgehalt (etwa 1,5 - 6 % Pu_{fiss}) sowie Uran-Gadolinium-Stäbe (Mischoxid-Gadolinium-Brennstoff wurde bisher nicht entwickelt); außerdem zur Verbesserung der Moderation und Glättung des Neutronenflusses auch im Brennelement-Inneren einen wassergefüllten Kanal in der Mitte. Auch hier sind die Brennstäbe mit dem geringsten Pu-Gehalt außen angeordnet, die Uran-Gadolinium-Stäbe rund um den Wasser-Kanal [Böhm 1983, Krebs 1989].

Bei der Fertigung dieser Brennelemente müssen sehr hohe Anforderungen an die Homogenität der Isotopenzusammensetzung des Plutonium und der Mischung Uran/Plutonium gestellt werden, um lokale Leistungsspitzen und Überhitzungen von Brennstäben zu vermeiden [EdF 1990, Annexe 4]

Bei einer Konzentration des MOX-Einsatzes auf bestimmte Reaktoren, die mit 100 % MOX-Beladung betrieben würden, wäre der komplizierte Brennelementaufbau mit mehreren Zonen (der erheblichen zusätzlichen Aufwand bei der Fertigung verursacht) jedenfalls bei Druckwasserreaktoren nicht erforderlich. Diese Möglichkeit wurde in Frankreich untersucht, mit dem Ergebnis, daß sie in den heutigen Reaktortypen nicht praktiziert werden kann. Es ergeben sich Probleme bei der Kontrolle der Reaktivität, die nicht mehr durch das Einfügen zusätzlicher Kontrollstäbe gelöst werden können, da die Zahl der dafür verfügbaren Positionen begrenzt ist. Zur Zeit wird davon ausgegangen, daß bei Druckwasserreaktoren der 900 MWe-Leistungsklasse ein MOX-Anteil von 30 % beherrschbar ist. Anteile bis 50 % werden angestrebt, wobei aber noch Studien zum Verhalten solcher Kerne bei Störfällen für erforderlich gehalten werden. In einer neuentwickelten Reaktorlinie, dem "REP 2000" mit 1450 MW elektrischer Leistung, soll langfristig auch 100 % MOX-Einsatz möglich sein [EdF 1990, Annexe 1].

Komplikationen schafft der Einsatz von MOX-BE auch insofern, als bei diesen bisher keine so hohen Abbrände erzielt werden können als mit modernen Uran-Brennelementen, und auch in Zukunft mit einem "Nachhinken" des MOX-Brennstoffes beim Erreichen hoher Abbrände zu rechnen ist. Dies wird in Zukunft in Frankreich unterschiedliche Brennstoffwechselstrategien erforderlich machen. Bei den Druckwasserreaktoren der 900 MWe-Klasse wird zur Zeit pro Jahr ein Drittel des Kernes ausgetauscht, einheitlich für Uran- und MOX-Brennelemente. Ab 1992 wird bei den Uran-Brennelementen zu einem vierjährigen Zyklus übergegangen, entsprechend einem Austausch von 1/4 pro Jahr, während MOX weiterhin im dreijährigen Zyklus gefahren wird. Ab dem Jahr 2000 ist für Uran-Brennelemente schließlich ein fünfjähriger, für MOX ein vierjähriger Zyklus vorgesehen [EdF 1990, Annexe 2].

4.2.3 Gefahren der Abzweigung von Plutonium

Plutonium ist nicht nur wegen einer sehr hohen Radiotoxizität gefährlich. Etwa sechs Kilogramm dieses Stoffes - eventuell auch weniger - reichen zum Bau eines nuklearen Sprengkörpers, einer Atombombe.

Soweit bekannt, bestehen die heute weltweit vorhandenen Kernwaffen zum größten Teil aus Plutonium, lediglich ein geringer Anteil enthält hochangereichertes Uran. Zum Bombenbau verwenden die Atomwaffenstaaten spezielle Plutoniumgemische. Plutonium besteht aus verschiedenen Isotopen; für den Bau von Waffen wird eine Mischung verwendet, die mindestens 93 Prozent Plutonium-239 enthält ("waffenfähiges" Plutonium). Plutonium dieser Art wird in den Atomwaffenstaaten gezielt für militärische Zwecke hergestellt.

"Reaktorfähiges" Plutonium oder Reaktor-Plutonium dagegen stammt aus dem abgebrannten Kernbrennstoff von Leichtwasserreaktoren, der nach drei oder vier Jahren Standzeit dem zivilen Reaktor entnommen wird. Es enthält lediglich zu rund 60 Prozent (oder weniger) das Isotop Pu-239, und besteht darüber hinaus aus über 20 Prozent Pu-240, über 10 Prozent Pu-241, sowie einigen Prozent Pu-238 und Pu-242 (vergl. Tab. 3-1).

Der höhere Anteil an geradzahligen Pu-Isotopen im Reaktorplutonium erschwert die Kernwaffenproduktion aus diesem "zivilen" Gemisch. Dennoch: Auch aus Reaktor-Plutonium lassen sich Kernwaffen herstellen. Diese Tatsache wurde früher häufig in Abrede gestellt, um die Probleme des Umganges mit Plutonium zu verharmlosen. Sie wird aber heute von keinem ernst zu nehmenden Experten bestritten.

Der Untersuchungsausschuß des Deutschen Bundestages, der nach der TRANSNUKLEAR-Affäre eingesetzt wurde, ist auch der Frage der Waffentauglichkeit von Reaktor-Plutonium nachgegangen. Sämtliche Fachleute - aus Behörden, Forschungsstellen oder anderen Institutionen - waren sich darin einig, daß sie gegeben ist, wenn auch die Sprengwirkung einer Kernwaffe aus Reaktor-Plutonium schlechter voraussagen sei als die einer Waffe aus waffenfähigem Plutonium, und eine Reihe technischer Probleme die Herstellung erschwerten. Es ist sogar möglich, einen Atomsprengkörper aus Plutoniumoxidpulver herzustellen. In dieser chemischen Form liegt das Plutonium nach der Wiederaufarbeitung vor; in dieser Form wird es auch zur Fertigung der Mischoxid-Brennelemente transportiert. Einfacher wäre der Bombenbau mit Plutoniummetall, weil die Handhabung dann leichter ist und sehr viel weniger Material für eine Waffe erforderlich ist. Bei der Umwandlung von Pluto-

niumoxid in Metall handelt es sich um einen relativ gefährlichen chemischen Prozeß, der aber auch von einem technischen Team ohne bisherige Erfahrungen mit Atomwaffen bewältigt werden könnte [Deutscher Bundestag 1990].

Mischoxid-Brennstoff selbst besteht, wie schon der Name sagt, nicht aus reinem Plutoniumoxid; die Abtrennung des Plutonium aus frischem (unbestrahltem) MOX ist jedoch relativ einfach, und jedenfalls sehr viel leichter machbar als die Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente.

Im Rahmen einer "Plutoniumwirtschaft" mit Wiederaufarbeitung und Herstellung von Mischoxid-Brennelementen wird also ein Stoff, von dem einige Kilogramm die Sprengkraft von einigen 100 bis vielen 1000 Tonnen TNT (je nach dem Geschick der Bombenkonstrukteure) entwickeln können, in Mengen von mehreren Tonnen jährlich abgetrennt, gelagert, verarbeitet und in verschiedenen Formen transportiert ¹⁾.

Die Möglichkeit des Plutonium-Mißbrauches stellt sich auf zwei Ebenen. Zum Einen können Staaten unter dem Deckmantel eines zivilen Atomprogrammes durch den Erwerb von Anlagen, know-how, Nuklearmaterial u.ä. das Ziel ansteuern, Atomwaffen herzustellen. Zum Anderen können kriminelle und terroristische Gruppen versuchen, atomwaffenfähiges Material in zivilen Anlagen abzuzweigen, um es dann für Terroraktionen oder nukleare Erpressung zu verwenden. (Die beiden Ebenen sind natürlich nicht völlig eindeutig zu trennen, da auch eine Zusammenarbeit von Terroristen oder anderen Plutoniumdieben mit Regierungen bestimmter Staaten denkbar ist.)

Die erste der genannten Ebenen wird hier nicht weiter behandelt. Das Thema ist hochwichtig; es würde aber den Rahmen des vorliegenden Berichtes sprengen, im Einzelnen auf die damit zusammenhängenden, vor allem politischen Fragen einzugehen. Hier soll die Problematik der Abzweigung von Plutonium durch sogen. "subnationale Gruppen" oder auch Agenten fremder Staaten weiter diskutiert werden.

Maßnahmen gegen die Abzweigung von Plutonium

Die Notwendigkeit, sich gegen Abzweigungen von Plutonium zu schützen, ist allgemein anerkannt. Es bestehen hier zwei ein-

¹⁾ Unabhängig davon ist allerdings die Entstehung des Plutoniums. Solange Leichtwasserreaktoren betrieben werden, wird auch Plutonium produziert, das bei Verzicht auf Wiederaufarbeitung in den abgebrannten Brennelementen verbleibt.

ander ergänzende Systeme, die sich im Laufe der Jahre entwickelt haben:

Sicherheitskontrollen sollen gewährleisten, daß die Abzweigung einer signifikanten Menge Plutonium rechtzeitig erkannt wird. Diese Kontrollen werden im Bereich der Europäischen Gemeinschaft durch EURATOM durchgeführt, unter Beteiligung der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO).

Als "signifikante Mengen" gelten dabei 8 Kilogramm. "Rechtzeitig" bedeutet, daß das Verschwinden der spaltbaren Stoffe innerhalb jener Zeitspanne entdeckt wird, die für die Herstellung der metallischen Komponente einer Atomwaffe erforderlich ist - für Plutoniumdioxid oder Plutoniumnitratlösung sind das etwa eine bis drei Wochen. Dies sind allerdings die nur im Idealfall geltenden "Entdeckungsziele". In der Praxis werden anlagenspezifische "Inspektionsziele" festgelegt, wobei die konkreten Gegebenheiten einer Anlage sowie die Leistungsfähigkeit der Kontrollmaßnahmen berücksichtigt werden. Bei Wiederaufarbeitungsanlagen und Brennelementefabriken kann das Mengenziel ein Mehrfaches der genannten signifikanten Menge betragen; die angestrebte Entdeckungszeit liegt in der Regel bei einem Monat.

Der offizielle Hauptzweck dieser Kontrollen ist es, zu verhindern, daß Staaten aus zivilen Anlagen in ihrem Hoheitsgebiet spaltbare Stoffe für militärische Zwecke abzweigen. Natürlich müssen aber auch Abzweigungen durch andere Tätergruppen durch diese Maßnahmen erfaßt werden.

Sicherheitskontrollen zielen also primär auf die nachträgliche Entdeckung einer Abzweigung, und nicht auf ihre Verhinderung. Allerdings wird davon ausgegangen, daß die Gefahr der Entdeckung auf mögliche Täter abschreckend wirkt, und damit Abzweigungen u.U. auch verhindert werden können.

Physische Schutzmaßnahmen dagegen haben von vornherein das erklärte Ziel, Abzweigungen gar nicht zuzulassen. Die Verantwortung für diesen Bereich liegt beim jeweiligen Staat.

Dieses Schutzsystem umfaßt zum einen präventive Sicherungsmaßnahmen der Betreiber kerntechnischer Anlagen und der Beförderer radioaktiver Stoffe, sowie zum anderen Schutzmaßnahmen der Polizei, insbesondere im Falle rechtswidriger Angriffe. Die Maßnahmen zielen insgesamt nicht nur auf die Vereitelung gewaltsamer Angriffe, sondern auch auf die Verhinderung von Diebstahl durch Personenkontrolle und Überwachung von Material, das kontrollierte Bereiche verläßt. Die Details unterliegen der Geheimhaltung.

Welche Bereiche sind besonders gefährdet?

Bei der Diskussion der Frage, wo besondere Abzweigungsgefahr besteht, stützen wir uns ausschließlich auf allgemein bekannte Tatsachen und veröffentlichte Literatur. Die Darstellung muß daher auf einer relativ allgemeinen Ebene bleiben; auf diese Weise wird vermieden, daß indirekt und ungewollt etwa Anleitungen für mögliche "Interessenten" geliefert werden.

- Besonders gefährdet sind offensichtlich die Transporte spaltbarer Stoffe, bei denen die Möglichkeit eines gewaltsamen Zugriffes auf relativ große Mengen auf einen Schlag gegeben ist.
- Weiterhin als besonders kritisch einzuschätzen sind Wiederaufarbeitungsanlagen und Mischoxid-Brennelementefabriken. In diesen Anlagen liegt Plutonium als Rohmaterial sozusagen in offenem Zustand (als Pulver oder Lösung) vor, so daß versucht werden kann, über längere Zeiträume kleine Mengen unbemerkt abzuzweigen.

Transporte von Plutonium

Schon die Empfehlungen der IAEO zum physischen Schutz von Kernmaterial aus dem Jahre 1977 bezeichnen den Transport von Kernmaterial als *"wahrscheinlich diejenige Operation, bei der die Gefahr einer versuchten unbefugten Entwendung von Kernmaterial bzw. die Gefahr der Sabotage am größten ist"* (zitiert nach [Deutscher Bundestag 1990]). Diese Einschätzung hat nach wie vor Gültigkeit. Eine "Abzweigung" durch einen bewaffneten Raubüberfall kann natürlich nicht unbemerkt und heimlich vonstatten gehen; dafür können dabei u.U. auf einen Schlag Plutoniummengen erbeutet werden, die zur Herstellung eines Atomsprengekörpers (oder auch mehrerer) ausreichend sind. Ein typischer Transportbehälter für Plutoniumdioxid faßt z.B. etwa 6 kg Plutonium; 24 solcher Behälter können auf einem LKW transportiert werden. Ein einziges Mischoxid-Brennelement für Druckwasserreaktoren kann bis zu 30 kg Plutonium enthalten.

Die Möglichkeiten des Schutzes (durch Sicherheitsfahrzeuge, bewaffnete Begleitung u.ä.) sind begrenzt; es liegt auf der Hand, daß gutinformierte Täter, die über entsprechende Mittel verfügen, sich durchaus Erfolgchancen ausrechnen können.

Wiederaufarbeitungsanlagen und Brennelementefabriken

Bei der regelmäßigen Abzweigung kleinerer Mengen von Plutonium müssen sowohl die Sicherheitskontrollen als auch die physischen Schutzmaßnahmen "überlistet" werden.

Die Hauptstütze der Sicherheitskontrollmaßnahmen ist die Materialbilanzierung. Dabei wird die Anlage in Zonen aufgeteilt, und die Materialflüsse zwischen den Zonen sowie zwischen der Anlage und der Außenwelt werden buchhalterisch erfaßt. Regelmäßige (meist jährliche) Inventuren dienen der Verifizierung. Die Verfahren, die dem heutigen Stand der Technik entsprechen, sind allerdings ziemlich ungenau und können in großen Anlagen die unbemerkte Abzweigung beachtlicher Mengen nicht mit Sicherheit verhindern: Bei einer Anlage von der Größe des seinerzeit geplanten Wackersdorf-Komplexes könnten im Bereich der Wiederaufarbeitung (Extraktion und Reinigung) jährlich rd. 105 kg Plutonium "verschwinden", im Bereich der Mischoxid-Pulverherstellung 25 kg, und im Bereich der MOX-Brennelemente-Herstellung 35 kg - bei einer Entdeckungswahrscheinlichkeit von nur 50 %.

Verbesserte Verfahren, die auf Inventuren in kurzen Abständen (z.B. alle zwei Wochen) beruhen, sollen hier Abhilfe schaffen. Die Genauigkeit der Überwachung soll dadurch um einen Faktor 10 gesteigert werden.

In der Praxis dürfte sich diese Verbesserung aber kaum realisieren lassen (einmal davon abgesehen, daß ein Zehntel der oben genannten Mengen immer noch sehr viel ist!): Die Verfahren erreichen ihre volle Leistungsfähigkeit nur, wenn die Abzweigungsstrategie der Täter bekannt ist. Es ist aber kaum anzunehmen, daß eine kriminelle Gruppe ihre Vorgehensweise der Betriebsleitung rechtzeitig ankündigt wird! Außerdem müßten die Inventuren mit einer Genauigkeit durchgeführt werden, die aus heutiger Sicht unrealistisch erscheint.

Die Verteidiger des Sicherheitskontrollsystems argumentieren damit, daß die Materialbilanzierung ja auch noch durch andere Maßnahmen unterstützt würde; vor allem durch Maßnahmen des Einschlusses (wie z.B. Siegel an Türen im sensitiven Bereich) und der Überwachung (z.B. Fernsehkameras). Es ist aber unumstritten, daß lediglich bei der Bilanzierung eine zahlenmäßig Erfassung der Wirksamkeit möglich ist. Die anderen Maßnahmen stellen allenfalls schmückendes Beiwerk dar und können bei entsprechender Kenntnis der Anlage unbemerkt umgangen werden.

Die Probleme der Sicherheitskontrollen in einer großen Wiederaufarbeitungsanlage mit MOX-Brennelementefabrik wurden bereits in [RESTRISIKO Nr. 2 1988] ausführlich dargestellt.

Als letzte Barriere bleiben damit die physischen Schutzmaßnahmen. Nach der erfolgreichen Abzweigung und dem Beiseiteschaffen von Spaltstoff innerhalb der Anlage stehen die Täter noch vor dem Problem, das Material aus der Anlage zu bringen. Dafür stehen grundsätzlich zwei Wege offen: Zum Einen können Personen versuchen, kleine Mengen aus der Anlage zu schmuggeln. Dagegen werden genaue körperliche Kontrollen gesetzt. Es ist fraglich, ob bei derartigen Kontrollen - denen regelmäßig eine relativ große Zahl von Personen unterzogen werden muß - z.B. Material, das in Kapseln inkorporiert wurde, mit Sicherheit gefunden werden kann.

Vielleicht noch wichtiger ist zum Anderen aber der Weg der Tarnung in anderen Materialströmen. So könnte etwa Plutonium mittels Innenbehälter in einen Container mit radioaktiven Abfällen eingebracht werden. Auch diese Abfallcontainer unterliegen freilich vor dem Abtransport bestimmten Kontrollen. Die Frage, ob diese Kontrollen ausreichen, wurde u.a. in dem schon genannten Untersuchungsausschuß des Deutschen Bundestages diskutiert. Die Meinungen der Experten gingen dabei auseinander. Unwidersprochen blieb aber die Aussage des Sachverständigen Dr. Büker (Kernforschungsanlage Jülich), der erklärte, es sei möglich, zerstörungsfreie Messungen (an Abfallgebinden) relativ schnell zu verfälschen. Z.B. könne man durch Abschirmung einiges tun, um Strahlung von Kernmaterial zu verdecken. Um diese Möglichkeit abzudecken, brauche man eine relativ komplexe und komplizierte Meßtechnik. Nur wenn man ein solches Verfahren habe, könne man den Abfallpfad abdecken. Ein solches Verfahren, stellte Herr Dr. Büker abschließend fest, "*haben wir in dieser Form noch nicht*".

Sind die Stoffe aber einmal aus der Anlage gebracht, ist die Entdeckungsgefahr gering: Auf die Frage, ob ein Transport schon einmal effektiv verifiziert worden sei, um festzustellen, ob die Realität mit dem übereinstimme, was in den Papieren stehe, erklärte Dr. Collin (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) vor dem Untersuchungsausschuß, ein solcher Fall sei ihm nicht bekannt [Deutscher Bundestag 1990].

Wer kann eine Abzweigung erfolgreich durchführen?

Aus dem bisher gesagten wird deutlich, daß Abzweigungen von Plutonium in Wiederaufarbeitungsanlagen und MOX-Brennelementefabriken möglich sind. Allerdings wird auch deutlich, daß dazu Sachverstand und eine profunde Kenntnis der Anlage erforderlich ist, und zwar bei allen Teilschritten:

- um eine Abzweigungsstrategie zu entwickeln, die die Materialbilanzierung überlistet;
- um die Maßnahmen von Einschluß und Überwachung zu umgehen;
- und um das Kernmaterial aus der Anlage herauszuschuggeln.

Für Außenstehende dürfte dies eine unlösbare Aufgabe darstellen. Auch für eine einzelne, in der Anlage beschäftigte Person ("Innentäter") erscheint es als überaus schwierig, die erforderlichen Manipulationen in verschiedensten Anlagenbereichen durchzuziehen.

Damit liegt die Hauptgefahr darin, daß eine Gruppe von gut informierten Innentätern in Absprache und Zusammenspiel Abzweigungen vornimmt. In **diesem** Falle wären die Erfolgchancen zweifellos hoch. Ist es aber realistisch, die Existenz solcher Gruppen anzunehmen?

Die Frage ist leichter zu beantworten, wenn sie in etwas anderer Form gestellt wird: Auch wenn wir davon ausgehen, daß die weitaus überwiegende Mehrzahl der in der Atomindustrie Tätigen integer und sich ihrer Verantwortung bewußt ist - wer könnte die Hand dafür ins Feuer legen, daß in der Atomindustrie stets nur völlig korrekte, unbestechliche, nicht erpreßbare oder verführbare Manager und Techniker arbeiten? Wer würde dies insbesondere nach dem TRANSNUKLEAR-Skandal noch tun wollen? Schon eine kleine Gruppe von Personen in Schlüsselpositionen würde ausreichen.

Ausblick

Die Gefahr der Abzweigung von Plutonium, und die Probleme des Schutzes dagegen werden durch Plutonium-Abtrennung und -Rezyklierung sehr verschärft. Die Gefährdung durch Terrorismus bekommt neue Dimensionen, wenn Kernmaterial im Spiel ist - insbesondere, wenn es sich um Material handelt, das u.U. schon mit relativ geringem technischem Aufwand für Atomsprengekörper verwendet werden kann.

Dementsprechend müssen auch die Schutz- und Kontrollmaßnahmen sehr streng und weitgehend sein; dies wirkt sich zunächst vor allem auf die in den Anlagen Beschäftigten aus, aber tendenziell - im Laufe einer allmählichen, schleichenden Entwicklung - auch auf die Menschen in der Umgebung solcher Anlagen, sowie die Anwohner von Transportstrecken; also früher oder später auf einen großen Teil der Bevölkerung insgesamt.

Die Problematik des Nuklearterrorismus und der Einschränkung von bürgerlichen Freiheiten durch Gegenmaßnahmen wurde bereits von zahlreichen Autoren diskutiert. Wir verweisen besonders auf die Ausführungen von P. Sieghart [1979] im Rahmen der Auseinandersetzungen um das Entsorgungszentrum Gorleben, die heute noch ihre Gültigkeit haben.

4.2.4 Strahlenbelastung bei der MOX-BE-Fertigung

Die Herstellung von MOX-BE erfordert aufgrund der Radiotoxizität des Plutonium einen hohen Aufwand an Schutz- und Überwachungsmaßnahmen. Grundsätzlich werden die Beschäftigten einer höheren Strahlenbelastung ausgesetzt als bei der Fabrikation von Uran-BE. Bestimmt wird die Strahlenbelastung durch Gamma- und Neutronenbestrahlung des ganzen Körpers sowie durch die Gefahr einer Inkorporation von Plutonium. Darüberhinaus kommt es an bestimmten Arbeitsplätzen - wie z.B. an Handschuhboxen - zu einer Teilkörperbelastung von Händen und Unterarmen durch niederenergetische Gammastrahlung und Betastrahlung.

Im Rahmen des DGB-Projektes "Arbeitsbedingungen in nuklearen Wiederaufarbeitungsanlagen" [DGB 1986] wurde die Siemens-Anlage in Hanau genau unter die Lupe genommen (Gehalt an Pu_{fiss} im Brennstoff 2-4 %). Die Untersucher fassen zusammen:

"Detaillierte Angaben zur γ -Exposition der Beschäftigten sind uns nicht zugänglich gemacht worden. Als Mittelwert für die Individualdosis werden 5 mSv/a genannt (...). Eine Verringerung der mittleren Individualdosen durch konstruktive Maßnahmen ist in den letzten Jahren allerdings nicht möglich gewesen (3).

Die n-Dosisleistung wird überwiegend durch (α , n)-Reaktionen infolge des Pu 238-Zerfalls und durch Spontanspaltungen der Isotope Pu 240 und Pu 242 bestimmt (...).

Auch das Anwachsen der Konzentrationen der betr. Isotope im Pu-Gemisch nach mehrmaliger Rezyklierung ist nicht zu übersehen. Die n-Dosisleistung wird also bei der weiteren Verfolgung dieses Pfads weiter anwachsen. Ebenso wird die Realisierung der FDWR-Linie ¹⁾ (7- 8 % Pu_{fiss} im MOX-Brennstoff) zu höheren n-Dosisleistungen führen (4, 5).

Vom Betreiber der MOX-Fertigungsanlage wird ein mittlerer n-Anteil an der Gesamtexposition der Beschäftigten (Direktstrahlung) von rund 10 % angegeben. Die im Projektteil I.4.5 durchgeführten Messungen lassen dagegen n-Beiträge bis ca. 100 % vermuten (7).

Pu-Kontaminationen stellen bei der Verarbeitung von MOX-Brennstoffen ein erhebliches Risikopotential für Inkorporationen dar. Die Ursache für Kontaminationen sind in ca. 70 % der Fälle defekte Handschuhe an Boxen (6). Nur selten führen diese Undichtigkeiten jedoch zu meßbaren Luftaktivitäten. Die meisten Kontaminationen (40 - 45 %) treten im "Pulverbereich" beim Mischen und Pressen des Brennstoffs auf. (...)

1) Fortgeschrittener Druckwasserreaktor

Neuere Untersuchungen in der MOX-Brennelementfertigung (7) zeigen, daß der n-Beitrag zur Ganzkörperdosis an einer Reihe von Arbeitsplätzen in der Vergangenheit offensichtlich unterschätzt wurde und n/γ-Verhältnisse > 1 offensichtlich keine Seltenheit sind (.....)

Über Teilkörperdosen, herrührend von β-Strahlung und sehr niederenergetischer γ-Strahlung, liegen uns keine konkreten Daten vor. Aufgrund des Nuklidinventars sind solche jedoch zu vermuten. Detaillierte Untersuchungen (.....) erscheinen angebracht.

Raumluftaktivitäten treten erfahrungsgemäß (7) einige Male im Monat im Bereich undichter Handschuhboxen auf. Konkrete Angaben über die tatsächlich auftretenden Inkorporationen liegen uns nicht vor. Es ist jedoch zu berücksichtigen, daß bei niedrigen Luftkontaminationen im Bereich der JAZ-Vorschaltgrenzwerte (5 % JAZ) ¹⁾ das Nachweisvermögen der α-Aerosolmonitore beschränkt ist, zumindest ist mit erheblichen Verzögerungen der Kontaminationsalarme zu rechnen. Bei höheren Raumluftaktivitäten dagegen, etwa im JAZ-Bereich, sollte ein schnelles Erkennen und Alarmieren möglich sein, vorausgesetzt die Probenahme ist jeweils repräsentativ für die Atemluft der Beschäftigten. (.....)"

(Anmerkung: die Ziffern in Klammern beziehen sich auf folgende Literaturquellen:

- 3) H. Krämer: Tagungsbericht zur DATF-Tagung "Arbeitswelt Kerntechnik", Atomwirtschaft, Heft 2, 101 (1985)
- 4) W. Zeggel, W. Oldekop, H.-D. Berger, S. Schuhmann, U. Wolff, K.J. Siegel: Randbedingungen eines DWR-Systems mit optimaler Plutoniumnutzung. Tagungsbericht zur Jahrestagung Kerntechnik 1985, S. 43
- 5) B. Kuczera, C.A. Goetzmann, R. Brogli: Der Fortgeschrittene Druckwasserreaktor /FDWR). Atomwirtschaft, Heft 6, 290 (1986)
- 6) W. Hagenberg, W. Wagner: Entstehung, Verhinderung, Nachweis und Beseitigung von Kontaminationen in einer Fertigungsanlage für Pu/U-Mischoxid-Brennelemente. Fachverband für Strahlenschutz, FS-83-30 T (1983) S. 281
- 7) H.W. Gabriel, ARGE-TA, Meßprogramm Hanau, 1986

1) JAZ = Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr

5. Ökonomische Aspekte des MOX-Einsatzes

5.1 Gesamtbetrachtung

MOX-Einsatz ist ökonomisch unsinnig. Zwar argumentieren die Befürworter gern mit den Kosten, die sich durch die Einsparung von Uran (und damit Wegfall von Abbau, Anreicherung usw.) einsparen lassen. So kommt z.B. eine Expertengruppe der NEA zu dem Ergebnis:

"It is concluded that the use of plutonium derived from past, present or contracted reprocessing, the costs of which have been paid or committed, in LWR MOX fuel offers utilities an economic saving of some 30 per cent compared with equivalent enriched uranium fuel in existing LWR reloads. ... This is because effectively free plutonium replaces both fresh uranium and separative work costs and this more than offsets the higher cost of MOX fabrication." [OECD 1989, S.12]

Der grundlegende Pferdefuß dieser Argumentation liegt darin, daß in der Rechnung von "freiem Plutonium" ausgegangen wird, d.h. Plutonium, das bereits aus abgebrannten Brennelementen abgetrennt wurde oder für das die Wiederaufarbeitungskosten bereits bezahlt worden sind. Die hohen Kosten der Wiederaufarbeitung müssen aber eingerechnet werden - und dann wird MOX-Einsatz rein ökonomisch gesehen sinnlos.

Eine entsprechende Gesamtbetrachtung ist von der Atomindustrie unseres Wissens bisher noch nicht vorgelegt worden.

5.2 Front-end-Kosten

Die Herstellung von MOX-Brennelementen ist erheblich teurer als die von Uran-Brennstoff, wie bereits allgemein bekannt:

- nach Angaben des staatlichen französischen Elektrizitätskonzerns EDF 3,5 bis 5fach teurer [RESTRISIKO Nr. 6 1990, S.31];
- nach Auswertung von Angaben der belgischen Atomindustrie etwa 4-6 mal teurer (s.u.);
- nach OECD-Angaben liegen die Fabrikationskosten für U-BE derzeit zwischen \$200 und \$300 pro kg. Die Kosten für MOX-BE betragen dagegen \$700 bis \$1300 pro kg [OECD 1989, S.59/60] - liegen also rund \$500 bis \$1000/kg höher als die Fabrikationskosten für Uran-Brennelemente. Für die Zukunft erwartet die OECD Uran-BE-Fertigungs-

kosten zwischen \$175 und \$250; die Kosten für MOX-BE sollen am Ende dieses Jahrhunderts \$750-880 pro kg Brennstoff betragen. Die Mehrkosten pro kg MOX-Brennstoff lägen dann bei etwa \$500.

- Die deutsche Energiewirtschaft rechnet optimistisch ebenfalls mit den vergleichsweise niedrigen Differenzkosten: die MOX-Fertigungskosten in der neuen Siemens-Anlage/Hanau sollen gemittelt bis 1998 ca. DM 1000 pro kg (heutiger Preisstand) über den Kosten eines energieäquivalenten Uran-BE liegen [VDEW 1989].

Vertreter der belgischen Atomindustrie zeigen eindrucksvoll (wenn auch nicht immer nachvollziehbar), in welchen engen Grenzen sich die MOX-Herstellung bewegen muß, um wirtschaftlich nicht völlig unattraktiv zu sein (Vielvoye & Bairiot 1991; der Artikel befindet sich am Ende dieses Kapitels - die Lektüre wird empfohlen).

Wenn man davon ausgeht, daß Reaktoreinsatz und Wiederaufarbeitung von MOX-BE sich nicht von U-BE unterscheiden, müssen nur die sog. "front-end"-Kosten berücksichtigt werden. Hier bestehen allerdings erhebliche Unterschiede zwischen beiden Brennstoffarten:

- * Beim Uran-BE teilen sich die Kosten in etwa wie folgt auf:
 - 35 % für Uran
 - 40 % für Anreicherung
 - 25 % für Brennelementfertigung.

* Beim MOX-BE sieht es anders aus: die front-end Kosten sind etwa identisch mit denen der BE-Herstellung. Daneben muß der Wert des Pu berücksichtigt werden. Je nach Randbedingungen sind Variationen über einen weiten Bereich möglich.

Brennelement-Herstellungskosten

[Vielvoye & Bairiot 1991] unterteilen die Kosten der BE-Herstellung in 5 Gruppen, denen folgende Anteile an den Gesamtkosten zugeordnet werden:

	Uran-BE	MOX-BE
1. Hardware (fuel rod & assembly)	40 %	"roughly identical"
2. Conversion & fuel assembly manufacture	15 %	"slightly higher"
3. Fuel engineering	20 %	ca. 2 mal höher
4. Transport	sehr wenig	mind. 1 Größenordnung höher
5. Fuel rod manufacture	20 %	15-25 mal höher

Setzt man die genannten Angaben in (relative) Zahleneinheiten um, so ergibt sich folgendes Bild:

	Uran-BE	MOX-BE
1. Hardware	40	40
2. Conversion etc.	15	15
3. Fuel engineering	20	40
4. Transport	5	50
5. Fuel rod manufacture	20	300-500
	100	445-645

Das heißt, die Fertigung von MOX-BE ist etwa 4 bis 6 mal teurer als die von Uran-Brennelementen.

Die Hoffnung der Atomindustrie auf bessere Wirtschaftlichkeit gründet sich darauf, daß die Herstellungskosten für MOX-BE in Zukunft erheblich sinken werden (s. auch die obigen Angaben der OECD): Mit einer Fertigungskapazität von 120 t SM/a soll die MOX-BE-Herstellung etwa die Hälfte billiger sein als in einer Fabrik, die für 40 t/a ausgelegt ist, jedoch im Durchschnitt nur 20 t/a verarbeitet hat.

Wie Abb. 5-1 jedoch zeigt, sind die relativen Herstellungskosten erheblich von der MOX-BE-Produktion abhängig - es lohnt sich überhaupt nur, wenn die Fabriken mit (oder an der Grenze) nominaler Kapazität arbeiten, also der Kapazität, für die sie ausgelegt sind: *"taking 100 % as a reference manufacturing cost for a small plant working at full capacity on relatively large fabrication campaigns, the cost might drop to 70 % in large plants working at full capacity on very large fabrication campaigns, but might also rise to 300 % in*

plants operating at reduced capacity on small fabrication campaigns."

Die Vertreter der belgischen Atomindustrie ziehen dann auch die für sie richtigen Schlüsse:

"Therefore, it is important that the regulatory background, the equipment reliability, the experience of personell and the market demand enable a MOX manufacturing plant to run at full capacity."

[Vielvoye & Bairiot 1991]

Kosten für Plutonium

Rasche Rückführung von Plutonium ist aus ökonomischen Gründen notwendig, denn

1. entstehen hohe Lagerkosten (\$1000 bis \$2000 pro kg Pu¹);
2. baut sich gamma-strahlendes Am-241 auf, so daß nach kurzer Lagerzeit eine Reinigung erforderlich ist¹);
3. verliert das Pu während der Lagerung an Wert durch den Verlust an spaltbarem Pu-241 (s. Kapitel 3).

Die logische Folgerung ist dann auch:

"Pu - if not used now - looks much like a money sink."

[Vielvoye & Bairiot 1991]

Abb. 5-2 zeigt den Wert von wiederaufgearbeitetem Plutonium hinsichtlich der Rückführung in LWR - in Abhängigkeit vom Abbrand, der Zeitverzögerung zwischen Wiederaufarbeitung und Reaktoreinsatz sowie den Differenzkosten bei der BE-Fabrikation. Man sieht, daß das Plutonium nur dann nichts kostet, wenn die Rückführung 1 Jahr nach der Wiederaufarbeitung geschieht.

1) Laut [OECD 1989, S.64] ist mit folgenden Kosten für die Pu-Lagerung und Abtrennung von Am zu rechnen:

Published costs of plutonium storage vary widely owing to differences in the size of stores and the other factors mentioned in Section 2.5.4.7. They are usually taken to be in the region of \$1 to \$2 per g of total plutonium per year. Both the UK and France include the cost of short term storage as a minor component of the overall reprocessing charge but some countries requiring longer term storage are incurring costs of this order.

The only published costs for americium removal from plutonium vary from \$9 to \$18 per g Pu_t, in January 1987 US \$ (24, 43). The expert group considers the cost may vary between \$10 and \$28 per g Pu_t and believes a price of \$18 per g Pu_t would be appropriate for plants treating about 2 tonnes Pu_t per annum. This figure corresponds to removal from plutonium oxide and would be less if the plutonium could be stored as nitrate.

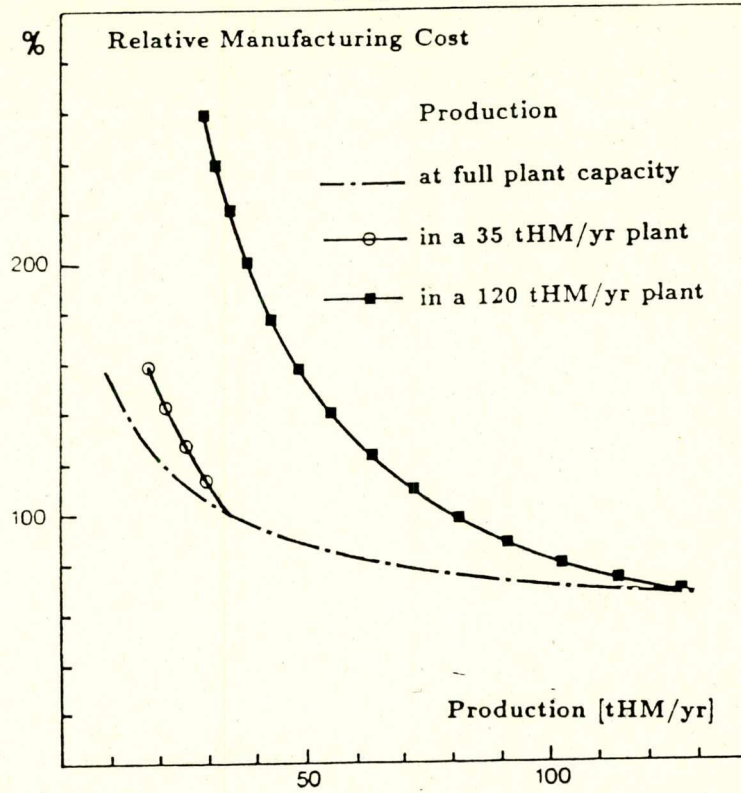


Abb. 5-1: Abhängigkeit der BE-Herstellungskosten von der jährlichen Produktion; aus Vielvoye & Bairiot 1991

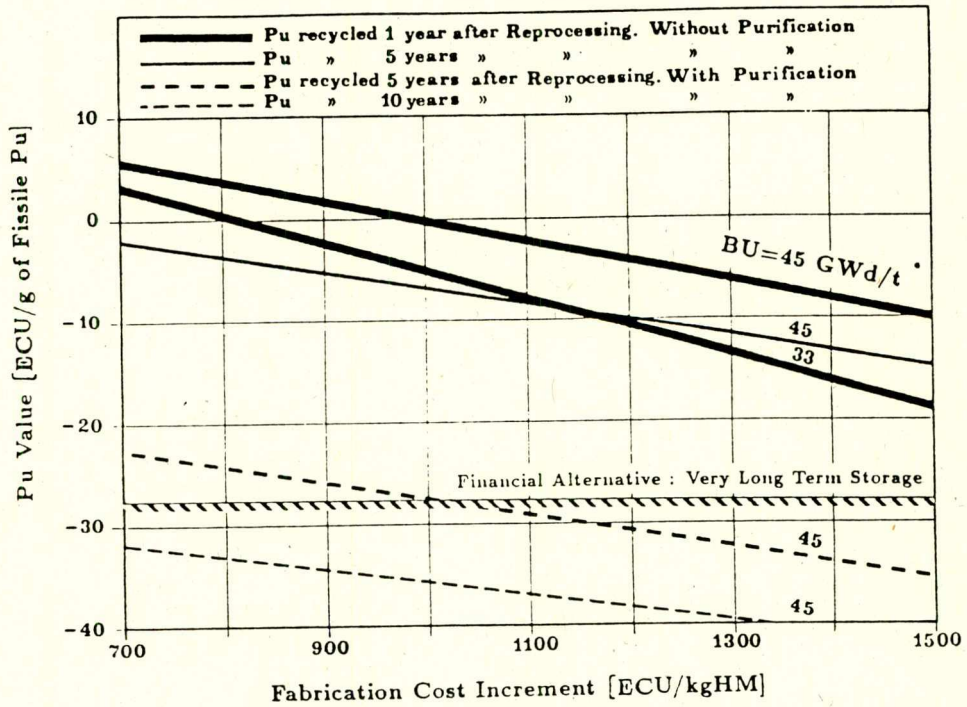


Abb. 5-2: Plutonium-Wert bei der Rückführung in Leichtwasserreaktoren; aus Vielvoye & Bairiot 1991
 1 ECU \approx 2 DM \approx 1,25 US\$

Economic Optimization of MOX Fuel

By A. Vielvoye and H. Bairiot*

MOX fuel is used in LWRs in several countries to cope with the Pu arising from the reprocessing plants. The reasons and the economic incentives to utilize this Pu without delay have been outlined in several publications. This article focusses more particularly on some features of MOX fuel which have an impact on cost optimization.

Fuel Cycle Cost

Although licensing delays may temporarily force utilities to downgrade MOX fuel utilization conditions relative to U fuel, it is recognized that the already available data base justifies the claim that MOX fuel can operate at the same average power density and to the same discharge burn-up as U fuel in PWRs and BWRs.^{2,3,4} The fuel cycle cost constituents can thus be written off on the same energy produced by 1 kgHM and the two types of fuel can be compared on the basis of the cost constituents. Furthermore, reprocessors have steadily declared over the past three years that the cost of reprocessing MOX fuel will not differ from the cost for U fuel, provided that the MOX fuel has appropriate solubility characteristics (the industrial manufacturers have now achieved this) and that MOX fuel can be reprocessed in dilution with U fuel (it is the only industrial reprocessing scheme envisaged nowadays). Under those conditions, only the front-end costs must be taken into consideration.

The front-end cost structure is very different for U and MOX fuel.

The cost of a U fuel assembly consists typically, e.g., of: natural uranium 35%; enrichment services 40%; fuel fabrication 25%.

The cost of a MOX fuel assembly is practically equal to the fuel fabrication cost. The U feed material is either free-issue (if depleted U, i.e. enrichment tails, is being utilized) or represents a small cost component, e.g. 3.5% of the fuel assembly cost (if natural U has to be used). The price to be assigned to Pu is debatable: if not recycled in due time into MOX fuel, Pu rapidly reaches a negative value due to the cost of storage and purification (separation of Am and high-energy gamma-emitting daughter products; plus waste disposal thereof). If used timely, Pu has a fuel value (Equiva-

lence Value) obtained by equating the cost of a fresh MOX fuel assembly and of a fresh U fuel assembly as in Fig. 1. This equivalence value varies largely with economic conditions (predominantly the prices of natural U and enrichment services and the exchange rate of the US\$, as illustrated in Table 1) and technical parameters (e.g. discharge burn-up, size of the MOX fabrication campaign, MOX fuel design); some illustrations are provided here. Since the value of Pu is shaped by its potential utilization rather than by a market price, the book-keeping values adopted by the utilities, owners of the Pu, vary presently from a prudent nil to quite high figures.

Fabrication Cost

Fuel cycle "fabrication cost" comprises all the services and supplies required to deliver fuel assemblies at the power plant, starting from enriched UF₆ or, for MOX fuel, from U feed (UF₆ or U₃O₈) and PuO₂. For comparing U fuel and MOX fuel fabrication costs, these services and supplies can be clustered in five groups. Solely to illustrate the presentation, rounded cost values are notionally assigned to each group; these values should not be considered as a particular evaluation of the authors for any specific case.

Group 1 - fuel rod hardware (cladding tubes . . .) and fuel assembly hardware (spacer grids, end pieces . . .) represents notionally 40% of the fabrication cost of a U fuel assembly. The cost of this group is roughly identical for MOX fuel assemblies, since for reloading any given reactor both types of fuel assembly utilize the same hardware.

Group 2 - UF₆ conversion into UO₂ and fuel assembly manufacture represents notionally 15% of the fabrication cost of a U fuel assembly. The unit cost of this group is slightly higher for MOX fuel due to the smaller quantities to be processed per fabrication campaign and, for fuel assemblies manufacture, due to specific radiation protection precautions.

Group 3 - fuel engineering (design, licensing, project administration and QA) and

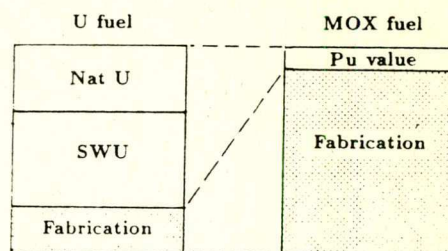


Figure 1: Cost of Fresh Fuel Assemblies

economic provisions (fuel performance warranties, fissile materials stock . . .) represents notionally 20% of the cost of a U fuel assembly. The engineering costs are affected by the smaller size of the MOX fuel fabrication campaigns, leading to higher unit costs. In addition, some utilities insist on a warranty coverage proportional to the fabrication cost, penalizing the MOX fuel and further increasing its cost. Altogether, the cost of this group of services is roughly twice as much for MOX fuel as for U fuel.

Group 4 - transports of fissile materials to the manufacturing plant and of the fuel assemblies to the NPP notionally represents, for U fuel, a very few percent of the fabrication cost. It is at least an order of magnitude higher for MOX fuel and varies quite a lot from one case to another (distances, regulatory constraints . . .).

Group 5 - manufacture of the fuel rods is notionally 20% of the fabrication cost of a U fuel assembly. For MOX fuel, the cost of this group of activities is typically 15 to 25 times higher, for three reasons:

- a MOX fabrication plant incorporates not only fuel rod manufacturing but also a fuel enrichment function (the blending of UO₂ and PuO₂ to the required Pu assay), performed in the enrichment plants for U fuel;
- Pu handling constraints impose larger investments and increased maintenance and surveillance;
- the production scale is small compared to U fuels. It is further very sensitive to MOX fuel specifications and to size of the fabrication campaigns, as outlined hereafter. For these reasons, this cost varies widely.

As a conclusion, if 100 is the fabrication cost of a U fuel assembly, 100 is also

Table 1: Economic Conditions Influencing the Comparison between U and MOX Fuels

Parameter	Price Fluctuations over the Past 10 Yrs	Value Used for the Quick Chart (Fig. 3)
Natural U	US\$/lb U ₃ O ₈	25
Enrichment	US\$/SWU	110
Exchange rates:		
Belgian Francs	BEF/US\$	35
	BEF/ECU*	43
(*ECU = European Currency Unit)		i.e. 0.8 ECU/US\$

* A. Vielvoye, Tractebel, Avenue Ariane 7, B-1200 Brussels. H. Bairiot, Belgonucleaire, Rue du Champ de Mars, 25, B-1050 Brussels.

typically the cost of Groups 1 to 3 services and supplies for MOX fuel. Group 4 and Group 5 come in addition and each varies over very large ranges.

MOX Manufacturing Cost

The contemplated manufacturing costs in large plants will be significantly reduced compared to the present cost.⁶ However, the manufacturing cost is even more sensitive (Fig. 2) to the actual production of each plant. Therefore, it is important that the regulatory background, the equipment reliability, the experience of the personnel and the market demand enable a MOX manufacturing plant to run at full capacity. These evaluations are confirmed by an assessment from an independent source⁷: an increase of production to 120 tHM/yr will about halve the present manufacturing cost for MOX fuel assemblies in a 40 tHM/yr plant, which for historical reasons has produced on the average some 20 tHM/yr in the recent past.⁸

The sensitivity of the manufacturing cost to the production rate has the additional consequence that the cost of an individual fabrication campaign depends to a large extent on the specifications of the fuel and on the characteristics of the fabrication campaign. As an example, under the assumption that both fabrication campaigns are routine manufacturing, necessitating no developments or qualifications, the loss of capacity in switching from one campaign to the next is statistically one week. Experience has also confirmed that the

Table 2:

Relative Manufacturing Cost of MOX Fuel Campaigns Incorporating Three Pu Assays

Size of Fabrication Campaign (tHM)	5	9	22	35	120
Small fabrication plant (35 tHM/yr) Capacity utilization (steady-state production weeks)	8	13	28	41	not applicable
Manufacturing cost multiplication factor	1.3	1.2	1.1	1.0	
Large fabrication plant (120 tHM/yr) Capacity utilization (steady-state production weeks)	3.5	5	10	14	41
Manufacturing cost multiplication factor	2.2	1.6	1.3	1.2	1.0

transition from the fabrication of one Pu assay within a campaign to another Pu assay is equivalent to a loss of half-a-week capacity. For a typical PWR fabrication campaign, with three Pu assays, a total of two weeks capacity loss must therefore be added to the steady-state manufacturing time to obtain the total capacity utilization, and the manufacturing cost is directly proportional to it. Table 2 illustrates the effect of the relative sizes of the fabrication campaign and of the plant capacity. The figures are derived from the arbitrary hypothesis that both plants can operate at steady-state production rate during an equivalent of 41 full weeks per year, the balance of 11 weeks equivalent being capacity losses unrelated to the product characteristics: amongst others, equip-

ment maintenance and repair, regulatory and safeguard interventions.

The features illustrated are not the only ones, nor sometimes even the major ones, but are sufficient to indicate the outstanding volatility of the MOX manufacturing cost: combining Fig. 2 and Table 1, and taking 100% as a reference manufacturing cost for a small plant working at full capacity on relatively large fabrication campaigns, the cost might drop to 70% in large plants working at full capacity on very large fabrication campaigns, but might also rise to 300% in plants operating at reduced capacity on small fabrication campaigns. This manufacturing cost volatility is, of course, unrelated to the fabrication cost of the U fuel loaded in the same reactor. It is a further demonstration that MOX fuel fabrication costs cannot be quoted as a multiplication factor of the corresponding U fabrication cost but should be assessed as incremental part to it. Hence the best formulation is: MOX fabrication cost = U fabrication cost + an increment and this increment is roughly equal to the transport costs (of PuO₂ and MOX fuel assemblies) plus the MOX fuel rod manufacturing costs (i.e. from PuO₂, converted UO₂ and fuel rod structural constituents to fuel rods ready to be assembled).

Savings by Immediately Recycling Pu

Pu should be recycled in MOX fuel as soon as possible. Storage costs of even only 1 ECU/yr/g-Pu-tot hardly justify waiting long in the hope of savings resulting from changing conditions: decrease of MOX fabrication cost, increase of enriched U price, burn-up extension and – in the long term – strong demand to deploy FBRs. The owner of Pu has only two alternatives to a timely MOX implementation policy: *Alternative 1 – Wait and see*. The pitfall is that storing Pu longer than a few (two to four) years after reprocessing is penalized

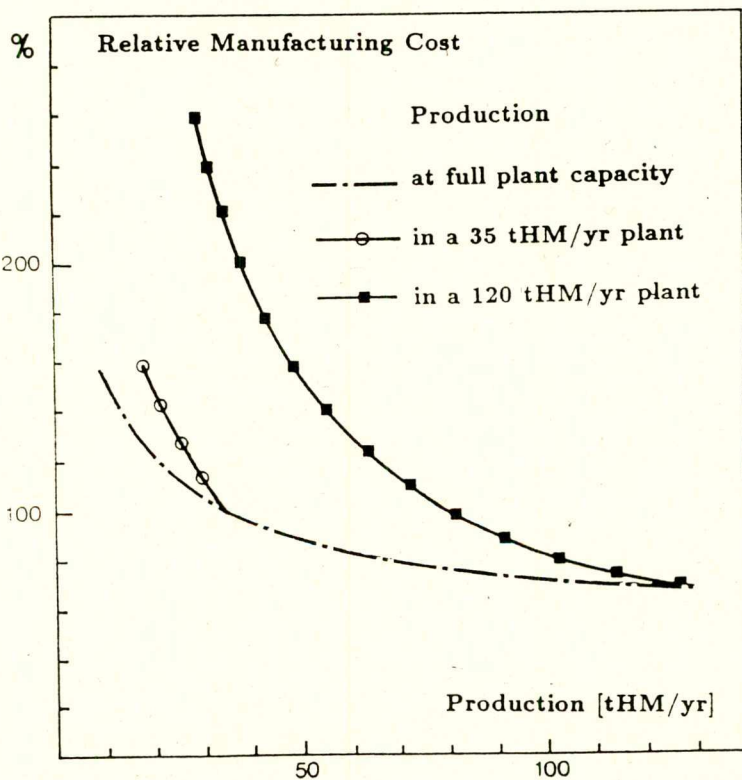


Figure 2: Sensitivity of Manufacturing Costs to Annual Production

by the need for its purification prior to manufacturing and, to a smaller extent, by the storage expenses and by the decay of Pu-241 (the most valuable fissile isotope). Typically, a delay of five years might increase the cost of Pu by more than 20 ECU/g-Pu-tot: such a high cost merely kills the idea of storing Pu in view of economic profit as, in the foreseeable future, no commercial application can afford Pu at such a price.

Alternative 2 - Send Pu to the waste stream might look like the next best option since Pu - if not used now - looks much like a money sink. At present, no large-scale Pu disposal facilities are in operation. By analogy with disposal of spent fuel and of high-active waste, typical costs might be as high as 55 to 100 ECU/g-Pu-tot. The financial limit to the total of storage and disposal costs is the very long-term storage option, prior to final disposal. Indeed, if disposal cost is uncertain, the financial analysts might prefer to invest in risk-free bonds, as long as the yield is high enough to cover the storage expenses. On this basis, with typically a storage cost of 1 ECU/yr/g-Pu-tot and a risk-free rate of 5%, the maximum NPV (Net Present Value) of the storage plus disposal costs would be 20 ECU/g-Pu-tot (or 28 ECU/g-Pu-fiss).

Sensitivity of the Savings by Recycling Pu in LWRs

Pu's Equivalence Value varies with fabrication cost and with delay in Pu utilization. Fig. 3 is elaborated with the economic data summarized in Table 1. It appears that timely recycling of the available Pu is the most economic option in all reasonable instances.

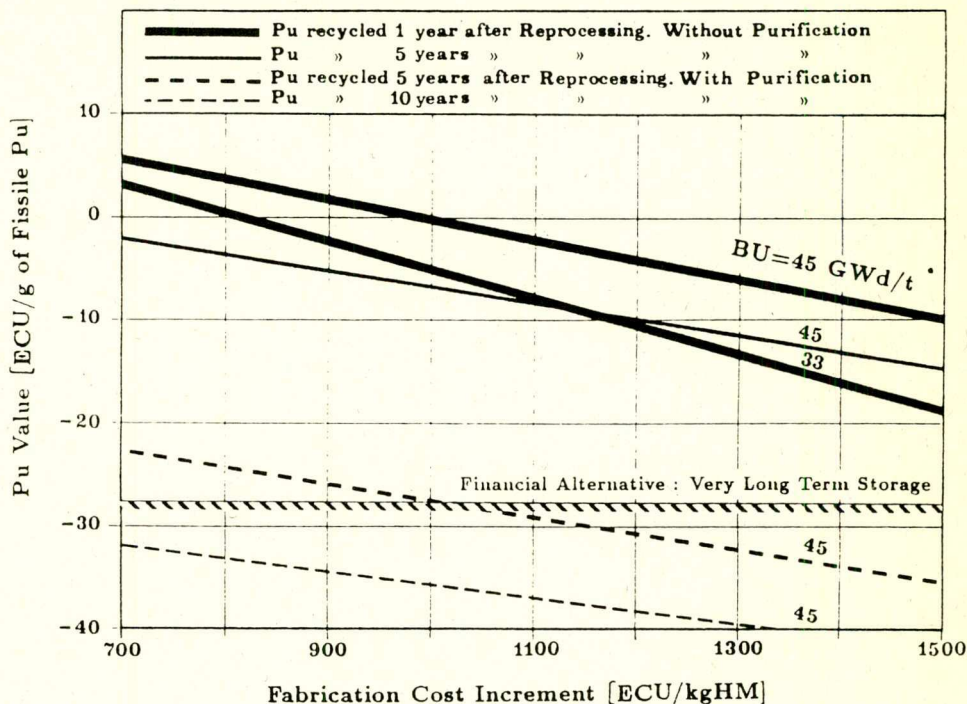
Its saving over alternatives, when expressed in ECU/g-Pu-fiss, is a two-digit figure irrespective of whether the alternative is delayed Pu recycling or very long-term storage.

Conclusions

This article is far from exhaustive, but has highlighted:

- The incentive for immediate Pu recycling must be evaluated taking into account the only possible alternative, namely to store Pu temporarily for later use or final disposal. Storing it for a few years in the expectation that price conditions might change is not economically attractive; storing it for ever is even worse.
- High discharge burn-ups improve significantly the MOX fuel economics relative to U fuel at the same discharge burn-up.
- The predominant (if not total) cost of a fresh MOX fuel assembly is the fabrica-

Figure 3. Equivalence Value of Plutonium When Recycled in LWRs



tion cost, unlike U fuel for which fabrication cost is only a minor constituent. The variability of the fabrication cost is much more pronounced for MOX than for U fuel and depends mainly on transport and fuel rod manufacturing costs.

- MOX fuel economics are significantly improved by grouping the MOX requirements into fabrication campaigns as large as possible and as commensurate as possible with the fabrication plant nominal capacity.
- MOX fuel fabrication plants must operate at or near nominal capacity to maintain reasonable manufacturing costs. It implies a close connection and long-term commitments between the interested parties to fit capacities and demands over the timespans required to amortize the investments. ■

References

1. *Plutonium Fuel, an Assessment*, OECD, Paris 1989, (66 89 07 1), ISBN 92-64-13265-1.
2. H. Bairiot et al., "Foundations for the definition of MOX fuel quality requirements", 4th Intern. Conf. on Characterization and QC of Nuclear Fuels, Karlsruhe (Germany), June 19/21, 1990.
3. P. Schmiedel et al., "Pu recycle in the FRG", *Modern Power Systems*, September 1989.
4. J. van Dievoet et al., "MOX fuel and its fabrication in Europe", 7th Pacific Basin Nuclear Conference, San Diego (USA), March 4/8, 1990.
5. P. Schmiedel et al., "Technical and economic aspects of the recycling of Pu and U in Germany", 17th Annual Meeting of the WNF, Toulouse (France), October 14/16, 1990.
6. G. Lebastard, H. Bairiot, "MOX fuel fabrication: technical and industrial developments", 17th Annual Meeting of the WNF.
7. G. Lebastard, "Conséquences industrielles des nouvelles orientations sur le recyclage du Pu", SFEN, Paris, June 8, 1989.

International Meeting on LWR Fuel Performance

The Sixth International Topical Meeting on LWR Fuel Performance is being held in Avignon, France, April 21-24, 1991 - organized by the French section of the American Nuclear Society, the Belgian Nuclear Society and the Materials Science and Technology Division of ANS, with ENS co-sponsorship. The topics are: fuel performance in commercial reactors, including advanced designs and materials; fuel reliability including fuel failure incidence and re-

freshment of fuel assemblies; thermal and physico-chemical phenomena in fuel rods; cladding-coolant interaction; overall behavior of fuel rods (PCI). On April 25 there will be technical tours of Tricastin, Marcoule and Cadarache nuclear centers. Contact: Jean-Paul Quinaux, Fragema, B.P. 3021, F-69398 Lyon Cedex 03; tel. ++33 74 72 81 59, fax ++33 74 72 87 60. See also pages 22-23.

Literaturverzeichnis

- Aycoberry, C. (1989): La situation du retraitement des combustibles irradiés en France. - Vortrag bei der KTG/SFEN-Tagung "Entwicklungen im nuklearen Brennstoffkreislauf in Frankreich und der Bundesrepublik Deutschland", Kernforschungszentrum Karlsruhe, 20./21.11.1989
- Bairiot, H. & Le Bastard, G. (1988): Recent Progress of MOX Fuels in France and Belgium. - Nuclear Power Performance and Safety, Vienna 28 Sept. - 02 Oct 1987; IAEA, Vienna; IAEA-CN-48/101
- Barker, K. (1990): Investing in MOX for the Future. - Nucl. Engin. Intern. Vol. 35, No. 437, December 1990, S.30-31
- BMFT (1981): Mehrfachzyklisierung von Plutonium und Uran in thermischen Reaktoren. - Ergebnisse eines Statusseminars im Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bonn, 14.10.1981
- BNF (1990): Service Agreement for the Reprocessing of Irradiated Fuel and Related Services, vorliegend in 2 Varianten: "Fixed Quantities" und "Requirements Version", beide v. 18.01.1990
- Böhm, W. (1983): Stand und Entwicklungstendenzen der BE-Einsatzplanung in Leichtwasserreaktoren. atomwirtschaft, XXVIII, März, S. 130-136
- Brandstetter, A., u.a. (1984): Einsatz von Pu in LWR und SNR. - Vortrag auf der Jahrestagung Kerntechnik 1984 in Frankfurt/a.M.
- COGEMA (1986): Specifications of vitrified residues produced from reprocessing at UP 2 or UP 3-A La Hague Plants; Second Series, July 1986
- COGEMA (1990): Contract for the Reprocessing of Irradiated Oxide Fuel, vorliegend in 2 Varianten: "Fixed Quantities" (09.01.1990) und "Requirement" (11.01.1990)
- Deutscher Bundestag (1990): Bericht des 2. Untersuchungsausschusses. - 11. Wahlperiode, Drucksache 11/7800, Bonn, 15.10.1990
- Deutscher Bundestag (1991): Antwort der Bundesregierung auf eine Kleine Anfrage : Entsorgungssituation abgebrannter Brennelemente aus deutschen Atomkraftwerken und Einsatz von MOX(Mischoxid)-Brennelementen in deutschen Atomkraftwerken. - Drucksache 12/719 vom 11.06.1991
- Dibbert, H-J. (1991): Strategien des Brennstoffkreislaufs. - atw 2/1991, S.83-88
- DGB (1986): Arbeitsbedingungen in (nuklearen) Wiederaufarbeitungsanlagen. Abschlußbericht, Kurzfassung von Kapitel I; Düsseldorf

Lit-2

DWK (1987): Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen mbH; Pilot-Konditionierungsanlage Gorleben, Sicherheitsbericht. - Hannover, Dezember

EdF (1990): Le Recyclage du Plutonium dans les REP. - Exposé von EdF, COGEMA und CEA, Mai 1990

Guais, J.C. (1988): Closing the Fuel Cycle: An Industrial Demonstration.- Nuclear Power Performance and Safety, Vienna 28 Sept. - 02 Oct 1987; IAEA, Vienna ; IAEA-CN-48/96

ICRP (1972): International Commission of Radiological Protection; The Metabolism of Compounds of Plutonium and other Actinides. - ICRP Publication Nr. 19, Oxford

ICRP (1986): International Commission of Radiological Protection; The Metabolism of Plutonium and Related Elements. - ICRP Publication Nr. 48, Oxford

Jend, R. (1990): Safety first at Siemens' new Hanau MOX fuel plant. - Nucl. Engin. Intern. Vol. 35, No. 437, December 1990, S.33-35

Krebs, W.D. u.a. (1989): Brennelement-Auslegung und Einsatzplanung für die Spaltstoffrückführung in Leichtwasserreaktoren. - Vortrag auf der KTG/SFEN-Tagung "Entwicklungen im nuklearen Brennstoffkreislauf in Frankreich und der Bundesrepublik Deutschland", Kernforschungszentrum Karlsruhe, 20./21.11.1989

KTG/SFEN, 1989: Tagung "Entwicklungen im nuklearen Brennstoffkreislauf in Frankreich und der Bundesrepublik Deutschland", Kernforschungszentrum Karlsruhe, 20./21.11.1989

Le Bastard, G. (1990): MOX Fuel Fabrication: Present and Future. - In: Uranium and Nuclear Energy 1989, Proceedings of the 14th Symposium held by the Uranium Institute. Uranium Institute, London, S.220-226

Le Bastard, G. (1990): Building MELOX to meet future demand. - Nucl. Engin. Intern. Vol. 35, No. 437, December 1990, S.32-33

MU (1990): Ministerium für Umwelt, Baden-Württemberg; Antwort auf eine Kleine Anfrage Transporte abgebrannter Brennelemente aus den Atomkraftwerken Obrigheim, Philippsburg I und II. - Landtagsdrucksache 10/3432 vom 01.06.90

OECD (1989): OECD Nuclear Energy Agency; Plutonium Fuel - An Assessment. - OECD, Paris

OHSI (1990): Otto Hug Strahleninstitut; Strahlenexposition und -risiko sowie Sicherheit bei der sog. 'schadlosen Verwertung' von bestrahlten

Brennelementen im Ausland. - Gutachten erstellt im Auftrag der Freien und Hansestadt Hamburg, Bonn

RESTRISIKO Nr. 2 (1988): Sicherheitskontrollen in der Wiederaufarbeitungsanlage Wackersdorf - Plutonium-Pfade und Bombenbau. Greenpeace, Hamburg

RESTRISIKO Nr. 3/4 (1988): Schwere Unfälle in der Wiederaufarbeitungsanlage Wackersdorf - Ablauf und Folgen, Greenpeace, Hamburg

RESTRISIKO Nr. 6 (1990): Wiederaufarbeitung in Europa. Wackersdorf ist tot - es lebe La Hague? Greenpeace, Hamburg

RESTRISIKO Nr. 7 (1991): Radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in La Hague und Sellafield - die ungeordnete Beseitigung des Atommülls, Greenpeace, Hamburg

Samejima, K. (1991): The Use of Plutonium in Japan. - In: Uranium and Nuclear Energy 1990, Proceedings of the 15th Symposium held by the Uranium Institute, London September 1990. Uranium Institute, London, S.130-135

(Kurzfassung: The Use of Plutonium in Japan; in Atom Vol.410, Febr. 1991)

Schmiedel, P. (1991): Recycling and its Implication for Uranium Demand: the German Perspektive. - In: Uranium and Nuclear Energy 1990, Proceedings of the 15th Symposium held by the Uranium Institute. Uranium Institute, London, S.152-166

(Kurzfassung in Atom, Vol. 410, Feb. 1991)

Schmiedel, P. (1989): Experience with Plutonium Recycling in the Federal Republic of Germany. - In: Uranium and Nuclear Energy 1988, Proceedings of the 13th Symposium held by the Uranium Institute. Uranium Institute, London, S.171-180

Seifert, D. (1991): Verdammt in alle Ewigkeit - Plutonium in Atomreaktoren. - (Hrsg.) DIE GRÜNEN/GAL Hamburg, Bürgerschaftsfraktion

Sieghart, P. (1979): Die rechtliche, politische und gesellschaftliche Durchführbarkeit der notwendigen Mindestsicherheitsmaßnahmen, die erforderlich sind, um die Bevölkerung vor den Folgen von unerlaubter Entwendung spaltbaren Materials zu schützen. - Bericht der "Gorleben International Review", Hannover 1979, Teil 4.4.

SN (1990): Le recyclage du plutonium dans les réacteurs à eau sous pression. - Bulletin sur la Sécurité des Installations Nucléaires No. 75, August 1990, S. 15-19

Simon, M.A. (1991): Recycling Developments in France. - In: Uranium and Nuclear Energy 1990, Proceedings of the 15th Symposium held by the

Uranium Institute, London September 1990. Uranium Institute, London, S.136-166

(Kurzfassung in Atom, Vol. 410, Feb. 1991)

Stirling, A. (1988): Briefing Paper on the Current Europe-Japan Plutonium Transport Issue.

Stoll (1981): Bericht über Arbeiten zur thermischen Rückführung von Plutonium in Leichtwasserreaktoren. - In: Mehrfachzyklisierung von Plutonium und Uran in thermischen Reaktoren, Ergebnisse eines Statusseminars im Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bonn, 14.10.1981

Sullivan, M.F. & L.S. Gorham (1988): Can Information on the Gastrointestinal Absorption of Actinide Elements by Neonatal Rats, Guinea Pigs, Dogs and Swine be extrapolated to Man? - Health Physics 54 S. 181

Takagi, J. & B. Nishio (o.J.*): The Plutonium Shipment Issue and Plutonium Recycling in Japan - A View from a Japanese Citizens' Group. - Tokio (*vermutlich 1990)

Vincent, F. (1990): Gaining good experience with MOX at French PWRs. - Nucl. Engin. Intern. Vol. 35, No. 437, December 1990, S.35-36

VDEW (1989): Vereinigung deutscher Elektrizitätswerke; Strategieüberlegungen zur Brennelementeentsorgung und Verwertung von Plutonium und wiederaufgearbeitetem Uran

Vielvoye, A. & H. Bairiot (1991): Economic Optimization of MOX Fuel. - Nucl. Europe Wordscan 1-2/1991, S.13-15

Williams, T. (1991): A UK Perspective on Recycling. - In: Uranium and Nuclear Energy 1990, Proceedings of the 15th Symposium held by the Uranium Institute, London September 1990. Uranium Institute, London, S.144-151

(Kurzfassung in Atom, Vol. 410, Feb. 1991)