

Umgang mit deutschem Reaktorplutonium im europäischen Kontext

Wolfgang Liebert, Christoph Pistner, Alexander Glaser

Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Naturwissenschaft, Technik und Sicherheit (IANUS) der
Technischen Universität Darmstadt¹

Nicht nur speziell für den militärischen Bereich produziert es sog. Waffenplutonium (WPu) stellt aus Sicht der Nichtweiterverbreitung von Massenvernichtungswaffen (Non-Proliferation) ein Problem dar. Auch die im zivilen Bereich angefallenen Überschüßmengen an Plutonium, die auf absehbare Zeit nicht als Mischoxid-Brennstoff (MOX) Verwendung finden, müssen in Überlegungen zur Entsorgung einbezogen werden.

Zunächst wird ein quantitativer Überblick der Plutoniumbestände im deutschen Zuständigkeitsbereich gegeben. Wenn ein baldiger Abbau dieser Bestände angestrebt wird, müssen Alternativen zur MOX-Strategie entwickelt werden, wobei europäische Besonderheiten auch im Unterschied zur WPu-Problematik zu berücksichtigen sind. Verschiedene Optionen werden vorgestellt: Immobilisierungsstrategien durch Verglasung (mit und ohne vorhergehender Keramisierung) oder durch Produktion spezieller Lagerstäbe; Eliminierungsstrategien in speziellen Reaktoren (Transmutation, z. T. unter Nutzung inerter Brennstoffe). Auf Bewertungsmaßstäbe für Optionen zur Beseitigung von Reaktorplutonium wird knapp eingegangen.

1 Waffentauglichkeit von Plutonium

„Reaktorplutonium“ und „Waffenplutonium“ sind keine sauber getrennten Begriffe. Jegliches Plutonium stammt aus Reaktoren (nur der Brennstoffabbrand unterscheidet sich) und kann weitgehend unabhängig vom Isotopenvektor in Kernwaffen Verwendung finden. In Tabelle 1 sind zwei typische Isotopenvektoren angegeben, für „Reaktorplutonium“ aus Leistungsreaktoren und für „Waffenplutonium“, das speziell für Waffenzwecke produziert wurde. Nur die ungeradzahigen Isotope sind thermisch spaltbar in entsprechenden Reaktoren. Sie sind ebenso spaltbar in Waffenanwendungen, aber auch die geradzahigen

¹ IANUS, TU Darmstadt, Hochschulstr. 10, 64289 Darmstadt

Isotope haben genügend hohe schnelle Spaltquerschnitte, um für Waffenanwendungen brauchbar zu sein.

wt%	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu	²⁴¹ Am
RPu	1,80	59,00	23,00	12,20	4,00	
WPu	0,01	93,82	5,80	0,13	0,02	0,22

Tabelle 1: Isotopenzusammensetzung von Plutonium aus kommerziellem Leichtwasserreaktor-Brennstoff nach [NEA 1995] (Reaktorplutonium, RPu) und Waffenplutonium (WPu) nach [NAS 1995].²

Aber man muß noch etwas genauer hinschauen: dynamische Effekte bei der Kernwaffenexplosion spielen eine wichtige Rolle, ebenso die Frage der Handhabbarkeit des spaltbaren Materials.

Die Handhabbarkeit für Waffenanwendungen hängt im Falle des Plutoniums im Wesentlichen mit der Zerfallswärme einiger Isotope zusammen (vergl. Tabelle 2).³ ²³⁸Pu liefert mehrere hundert Watt pro Kilogramm. ²⁴¹Am (das auch in anfänglich „reinem“ Plutonium aus dem Zerfall des ²⁴¹Pu entsteht, siehe Fußnote 2) kann ebenfalls einen merklichen Beitrag zur Wärmeleistung des spaltbaren Materials liefern. Vorrichtungen zur Ableitung der Wärme müßten gegebenenfalls bei der Waffenkonstruktion berücksichtigt werden.

Die Dynamik der Waffe kann durch den Neutronenhintergrund aufgrund von Spontanspaltung im spaltbaren Material beeinflusst werden (Frühzündungsproblem). Geradzahige Pu-Isotope liefern den größten Beitrag, entsprechend des Anteils am Isotopenvektor und den zugehörigen Zerfallszeiten allen voran ²⁴⁰Pu gefolgt von ²⁴²Pu und ²³⁸Pu (vergl. Tabelle 2).

Ein Neutron aus Spontanspaltung kann zur Frühzündung der Waffe führen indem die Kettenreaktion gestartet wird bevor eine optimale Kompression des spaltbaren Materials durch den konventionellen Sprengstoff erfolgt ist. Die Wahrscheinlichkeit dafür steigt, je höher der Neutronenhintergrund ist. Die Folge kann eine Reduktion der Energieausbeute sein.

Diese Probleme treten bei Uran als Spaltstoff nicht auf (vergl. Tabelle 3), jedoch muß dann ²³⁵Uran genügend hoch angereichert sein, damit eine praktikable Waffe konstruiert

² Auch nach der Abtrennung von Plutonium aus dem abgebrannten Brennstoff entsteht ²⁴¹Am durch den β^- -Zerfall des ²⁴¹Pu mit einer Halbwertszeit von 14 Jahren. Dies bedeutet, daß 4.7% des ²⁴¹Pu pro Jahr zu ²⁴¹Am zerfallen. Die angegebene Konzentration von ²⁴¹Am bei Waffenplutonium basiert auf einem mittleren Alter (nach Abtrennung) von 20 Jahren, die Zusammensetzung des Reaktorplutoniums entspricht etwa einer Mittelung über die Zusammensetzung der zur Zeit gelagerten Plutoniumbestände.

³ Weitere Probleme beim Umgang mit Plutonium (Hantierung) können durch die auftretende radioaktive Strahlung entstehen. Die wichtigste Quelle für niederenergetische γ -Strahlung ist das ²⁴¹Am. Wir sehen darin aber kein prinzipielles Hindernis für die Verwendbarkeit in Waffen.

	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu	^{241}Am	
Wärmerate	560	1.9	6.8	4.2	0.1	114	W/kg
Neutronenrate	2600	0.022	910	0.049	1700	1.2	n/(ms·kg)

Tabelle 2: Wärme- und Neutronenemissionsrate für verschiedene Isotope (Daten nach [Mark 1993]).

Material	Unreflektierte Kugel	Reflektierte Kugel		Neutronen Emis. Rate [n/(ms·kg)]	Wärmerate [W/kg]
	Kritische Masse	Kritische Masse	Masse inkl. Reflektor		
U-233: 100 %	16.13 kg	6.13 kg	231.6 kg	—	—
U-235: 95 % U-238: 5 %	52.22 kg	19.23 kg	341.3 kg	< 0.002	—
U-235: 20 % U-238: 80 %	770.45 kg	358.88 kg	1487.6 kg	< 0.02	—
WPu	10.51 kg	4.64 kg	210.8 kg	53	2.5
Pu-238: 2 % Pu-239: 59 % Pu-240: 23 % Pu-241: 12 % Pu-242: 4 %	13.23 kg	5.81 kg	224.9 kg	329	14.4
Pu-238: 7.7 % Pu-239: 8.5 % Pu-240: 33.4 % Pu-241: 18.9 % Pu-242: 31.5 %	23.89 kg	11.22 kg	276.8 kg	1040	46.4

Tabelle 3: Kritische Massen für Uran- und Plutoniumkugeln verschiedener Isotopenzusammensetzungen. Monte Carlo Simulationen bei 300K mit ENDF/B-V Querschnittsbibliotheken. Reflektor: Sphärische Schale aus natürlichem Uran; Stärke: 10 cm; Dichte: 19.05 g/cc. Dichte des Pu: 19.84 g/cc. Angaben in Prozent sind Atomprozent.

werden kann. Für typisches Waffenplutonium liegt die Wärmerate bei etwa 10W/4kg und es existiert ein Neutronenhintergrund, der durchaus relevant sein kann. Für typisches Reaktorplutonium ist der Neutronenhintergrund im Vergleich mit Waffenplutonium 7-fach erhöht und die Wärmerate liegt bei 60-80 W pro potentiellm Sprengkopf (vergl. Tabel-

le 3). Die kritischen Massen liegen für Waffenplutonium und typisches Reaktorplutonium nur unwesentlich auseinander (vergl. Tabellen 1 und 3).

Simulationsrechnungen von Nicht-Waffenphysikern, deren Ergebnis in Abbildung 1 zusammengefaßt sind, zeigen [Kankeleit et al. 1989]:

- Auch bei Verwendung von Waffenplutonium besteht eine gewisse Frühzündungswahrscheinlichkeit (im Prozentbereich), aber es gibt eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit für eine maximale Energieausbeute (entsprechend 20 kt TNT bei 6 kg Pu).
- Für typisches Reaktorplutonium besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit für Frühzündung, die zu einer Reduktion der Energieausbeute führt. Jedoch wird bei 6 kg Pu ein Minimal-Yield entsprechend 1 kt TNT nicht unterschritten.

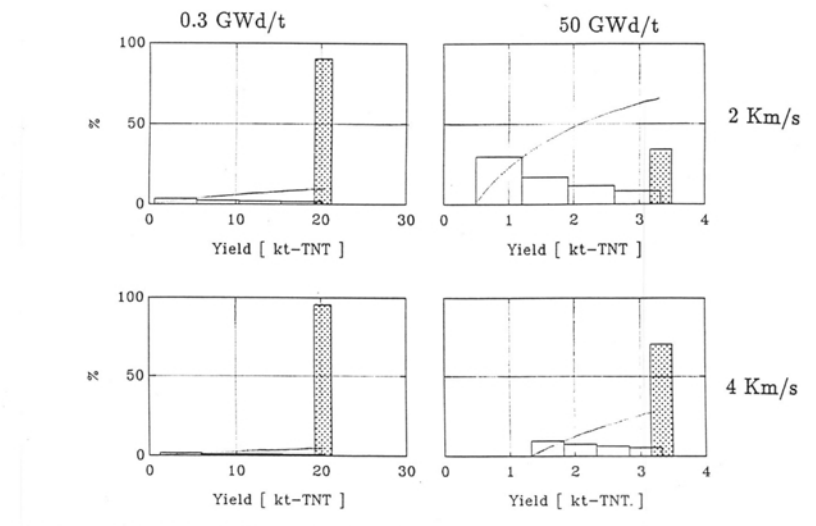


Abbildung 1: Frühzündungswahrscheinlichkeit einer Implosionsbombe mit 6 kg Pu für Waffenplutonium (Abbrand im Reaktor 0,3 GWd/t) und Reaktorplutonium (Abbrand im Reaktor 50 GWd/t) bei niedriger bzw. hoher Kompaktierungsgeschwindigkeit von 2 bzw. 4 km/s. Angabe der Energieausbeute/Yield in kt TNT [Kankeleit et al. 1989].

Wird die Waffentechnik verbessert (Erhöhung der Implosionsgeschwindigkeit durch den konventionellen Sprengstoff von 2 km/s auf 4 km/s) besteht eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit für eine mittlere Energieausbeute entsprechend 3-4 kt TNT; sie ist gegenüber dem theoretischen Maximum von 20 kt zwar reduziert aber doch bereits recht hoch. Eine weitere Steigerung der Sprengkraft könnte durch das sogenannte Tritium-Boosting erreicht werden. Indem 1-2 g Tritium in die Spaltstoff-Hohlkugel inkorporiert wird, kann durch die entstehenden Fusionsneutronen die Spaltausbeute durchaus um einen Faktor 5-10 gesteigert werden. So wäre die Vergleichssprengkraft einer Waffenplutonium-Bombe von 20 kt TNT erreichbar oder gar überschreitbar. Hierdurch würde das Problem der Frühzündung unbedeutend.

Aus der so dokumentierten Waffenverwendbarkeit von Reaktorplutonium folgt: Bemühungen um die Nichtverbreitung von Kernwaffen müssen sich dringend dem Problem vorhandener Mengen abgetrennten Reaktorplutoniums zuwenden. Die Beseitigung von gelagertem Plutonium, egal ob es sich um Waffen- oder Reaktorplutonium handelt, steht an.

Weltweit liegen etwa 250 t Waffenplutonium vor. Etwa 180–190 t Reaktorplutonium werden in abgetrennter Form gelagert, die Tendenz ist steigend. Mehr als 800 t Plutonium befinden sich noch in abgebrannten Brennelementen.

2 Plutonium in deutscher Verantwortung

Über die deutsche Situation liegen viel zu wenig Daten vor, die die Öffentlichkeit informieren. Eine politisch verordnete Geheimhaltungspolitik hat über Jahrzehnte den Umgang mit Plutonium in Deutschland begleitet. Wir stellen hier einige Ergebnisse aus einem Versuch der Bilanzierung durch IANUS vor [Kalinowski et al. 2000].

Abgetrennt gelagerte Plutoniumbestände entstehen aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente aus Reaktoren deutscher Energieversorgungsunternehmen (EVU). Die Wiederaufarbeitung findet inzwischen gewissermaßen im europäischen Verbund statt. Über 8000 t SM (Schwermetall) an Brennstoff deutscher EVU sind prinzipiell für die Wiederaufarbeitung kontrahiert aufgeteilt in Altverträge und Neuverträge, die nach der Aufgabe von Wackersdorf eingegangen wurden (vergl. Abbildung 2). Knapp die Hälfte davon ist bislang tatsächlich wiederaufgearbeitet worden, überwiegend in Frankreich. Von den Altverträgen, die 5641 t SM umfassen, waren bis Anfang 1999 3667 t SM abgearbeitet.

Die Summe bisher abgetrennten Plutoniums beträgt 32-38 t. Die erhebliche Schwankungsbreite entsteht dadurch, daß weder die Reaktorabbrände noch die Wiederaufarbeitungskampagnen öffentlich detailliert bekannt wären. Wenn alle Verträge abgearbeitet würden, kämen nochmals etwa 34-42 t hinzu.

Kann diese zusätzlich anfallende Menge begrenzt werden? Die Neu-Verträge sind zum Teil sog. Bedarfsmengenverträge, die ohne Pönalen gekündigt werden könnten. Genauer es ist

Mengen an Brennelementen [t SM], für die Wiederaufarbeitungsverträge deutscher EVUs noch bestehen oder abgearbeitet sind (Stand: Mitte 1999)
Gesamtmenge: 8200 t SM

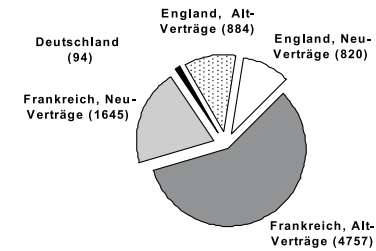


Abbildung 2: Mengen an abgebranntem Brennstoff [t SM], für die Wiederaufarbeitungsverträge deutscher EVU noch bestehen oder bereits abgearbeitet sind (Stand Mitte 1999). Gesamtmenge: 8200 t SM [Kalinowski et al. 2000].

leider öffentlich nicht bekannt. Mehr wäre sicherlich kündbar. Kürzlich hat ein Vertreter der Preussen-Elektra Zahlen dazu genannt, aus denen ableitbar ist, daß der zukünftige zusätzlich Anfall abgetrennten Plutoniums problemlos auf 23 t begrenzt werden könnte.

Seit 1965 wird in Deutschland Uran-Plutonium-Mischoxid-Brennstoff (MOX) hergestellt. Etwa ein Viertel des angefallenen abgetrennten Plutoniums, nämlich 8,5 t, wurden in den Jahren 1972 bis 1992 in Deutschland zu MOX verarbeitet, der größte Teil zu LWR-Brennstoff (Gehalt 5,7 t Pu). Danach hat es keine MOX-Produktion in Deutschland mehr gegeben.

In Deutschland haben 12 Reaktoren eine Lizenz für MOX, drei haben bislang keinen Gebrauch davon gemacht. Der Pu-Gehalt im Brennstoff ist begrenzt (etwa 3,5 % thermisch spaltbares Pu). In der Regel darf – aus Gründen der Reaktorsicherheit – nur ein Viertel bis ein Drittel des Kerns mit MOX-Brennelementen belegt werden (nur ein Reaktor hat eine Lizenz für 50% MOX). Bis Ende 1997 wurden 283,3 t SM MOX, entsprechend maximal etwa 8,3 t Pu, eingesetzt. Im Jahr 1997 wurden 1,3 t Pu in Form von MOX in deutschen Reaktoren eingesetzt. 1999 wurden MOX-Brennelemente mit einem Gehalt von 3 t Pu an EVU ausgeliefert. Demgegenüber fallen etwa 3,5 t abgetrennten Plutoniums pro Jahr aus Brennelementen deutscher EVU in der französischen Wiederaufarbeitung an.

Anfang 1999 lagen 64-80 t Pu in deutscher Verantwortung vor, etwa 40-49 t davon noch eingebettet in abgebrannten Brennstoff. Daraus ergibt sich, daß Anfang 1999 etwa 24-31

t Pu separiert gelagert wurden, der größte Teil davon in Frankreich.⁴

Eine Anmerkung zu den auf Basis unserer unvollständigen Datenkenntnis noch unvermeidbaren Schwankungsbreiten: 1995 veröffentlichte das US-Energieministerium erstmalig eine Plutonium-Bilanz [DoE 1996]. Danach erhielten die USA in den Jahren 1944-1994 Zugriff auf etwas mehr als 111 t Pu. Das Energieministerium mußte einräumen, daß die Inventardifferenzen 2,8 t umfassen, also knapp 3% des Gesamtinventars. Keiner weiß, ob sich in dieser Zahl auch verloren gegangenes oder abgezweigtes Plutonium verbergen. Angesichts der Brisanz des Materials können solche Inventardifferenzen oder Schwankungsbreiten nicht dauerhaft geduldet werden. Es wird nochmals deutlich, wie dringlich es ist, jegliche Plutoniummengen nachhaltig dem Zugriff zu entziehen.

3 Umgang mit Plutonium aus deutscher Verantwortung

Zum 1.1.1999 wären unter Berücksichtigung des zukünftigen weiteren Anfalls 58-72 t Pu zu verarbeiten. Dies ist eventuell auf 47 t reduzierbar, wenn Teile der Wiederaufarbeitungsverträge gekündigt werden. Weitere Reduktionen (etwa auf wenig mehr als 30 t) wären theoretisch denkbar, sind aber von den EVU bislang nicht gewollt. Mindestens 45 t Pu (eventuell 60 t oder mehr) wären demnach ab Frühjahr 2000 (bei begrenzter Fortsetzung der Wiederaufarbeitung) noch als MOX in Deutschland zu fahren.

Theoretisch könnte gemäß der existierenden MOX-Lizenzen etwa 100 t SM entsprechend knapp 5 t Pu pro Jahr in LWR absorbiert werden. Die MOX-Vertragsmengen sind an solche großen Mengen aber nicht angepaßt (zur Zeit: 260 t SM in Frankreich; 40 t SM in UK; 150 t SM in Belgien)⁵. Der tatsächliche MOX-Einsatz in Deutschland bleibt überdies weit hinter den theoretischen Möglichkeiten zurück.

Falls 2 t Pu pro Jahr als MOX in Reaktoren absorbiert werden könnten, würde der Umsatz des abgetrennten Plutoniums etwa 22 (bzw. 30 Jahre oder mehr) benötigen. Falls der Einsatz auf 3 t Pu pro Jahr gesteigert werden könnte, würde der Umsatz 15 Jahre (bzw. 20 Jahre oder mehr) benötigen. Dies paßt nicht mit den Restlaufzeiten für Reaktoren innerhalb eines Ausstiegsszenarios überein. Nur die weitere Reduktion anfallender Plutoniummengen durch frühzeitige Beendigung der Wiederaufarbeitung und/oder die Entwicklung von Alternativen zur MOX-Strategie bieten Auswege aus dem Engpaß.

Darüber hinaus weist der Einsatz von MOX-Brennstoff weitere Nachteile im Vergleich zu gewöhnlichem Uranbrennstoff auf. So führt der erhöhte Gehalt von Plutonium im Reaktorkern zu für den Reaktorbetrieb ungünstigeren Betriebseigenschaften. Der geringere Anteil an verzögerten Neutronen bei der Spaltung von Plutonium erschwert die Steuerung

⁴ Detailliertere Angaben dazu finden sich in [Kalinowski et al. 2000].

⁵ Auch die Produktionskapazitäten der europäischen MOX-Fabrikationsstätten können gegenwärtig nicht problemlos prognostiziert werden.

der Reaktorleistung. Der im Vergleich zu Uran andere Verlauf der Wirkungsquerschnitte von Plutonium (mit ausgeprägten Resonanzen im Bereich von langsamen Neutronen) führt darüber hinaus zu ungünstigeren Temperaturkoeffizienten. Weiterhin wird aufgrund des höheren anfänglichen Gehalts an Plutonium eine größere Menge an höheren Aktiniden (Americium, Curium) produziert. Diese stellen aufgrund ihrer starken Wärmeentwicklung, aber auch wegen einer höheren Neutronenstrahlung ein Problem bei Transport, Verarbeitung und Endlagerung der abgebrannten Brennelemente dar.

Die Nutzung von Plutonium zur Energieerzeugung kann aus heutiger Sicht auch nicht mit der Notwendigkeit der Rohstoffnutzung begründet werden. Wegen der heute zur Verfügung stehenden großen Mengen an günstigem Natururan und der beschränkten Restlaufzeiten deutscher Reaktoren ist die Versorgung mit Brennstoff sicher gewährleistet. Darüber hinaus ist die Nutzung von Plutonium im Vergleich zu Uranbrennstoffen auch nicht wirtschaftlich [Hensing 1995]. Dies ist sowohl auf die relativ niedrigen Preise für Uran, als auch auf die vergleichsweise hohen Anforderungen bei der Produktion von MOX-Brennstoff zurückzuführen.

Die MOX-Referenzlösung für den Umgang mit Plutonium in deutscher Verantwortung hat also Nachteile, ist nicht durch andere Gründe als denjenigen eines Abbaus von Plutoniumbeständen zu rechtfertigen und führt aller Voraussicht nach zu Engpässen. Welche Alternativen zu MOX stehen zur Verfügung oder können verfügbar gemacht werden?

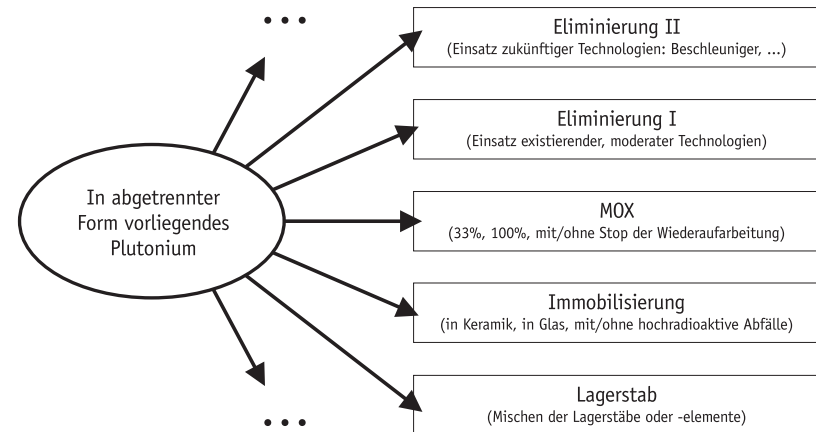


Abbildung 3: Wesentliche Umgangsmöglichkeiten mit abgetrenntem Plutonium

In Abbildung 3 werden wesentliche Umgangsweisen mit bereits in abgetrennter Form vorliegendem Plutonium dargestellt. Eine naheliegende Alternative zur MOX-Option ist es, das Plutonium in einer Lagerform, die letztlich endlagerfähig ist, unzugänglich zu

machen. Diese Immobilisierung des Plutoniums kann zusammen mit existierenden hochradioaktiven Abfällen erfolgen, die gemeinsam verglast werden. Dabei kann zunächst auch eine Einbringung des Plutonium in eine langzeitstabile Keramik vorgenommen werden. Eine Variante ist die Keramisierung des Plutonium analog zur MOX-Produktion bei anschließender Fertigung von Lagerstäben, die gemeinsam mit radioaktiven abgebrannten Brennelementen gelagert werden.

Der Vorteil dieser möglichen Umgehensweisen besteht in dem Aufbau eines intrinsischen Schutzes gegen den direkten Zugriff durch die erzeugte Strahlungsbarriere. Ähnlich wie bei der MOX-Option zerfällt die Strahlungsbarriere allerdings im Verlauf einiger Jahrhunderte und es besteht eine prinzipielle Rückholbarkeit des Plutonium. Die technologischen Herausforderungen für den sofortigen Wiederzugriff auf Plutonium über Wiederaufarbeitung sind teilweise schwieriger teilweise als vergleichbar mit der MOX-Option einzuschätzen.

Eine weitere Gruppe von Alternativen zur MOX-Option sind Möglichkeiten zur weitgehenden Beseitigung der Plutoniummengen. Hierzu müssen bekannte oder neuartige Reaktorsysteme eingesetzt werden. Bei diesen Eliminierungsoptionen geht es um eine möglichst weitgehende quantitative Reduktion der Plutoniumbestände. Eine intrinsische Strahlungsbarriere gegen den Zugriff auf verbleibende Restmengen wird ebenfalls aufgebaut.

In den beiden nächsten Abschnitten werden die Optionen zur Immobilisierung und zur Eliminierung von Plutonium etwas eingehender besprochen.

4 Immobilisierungs-Optionen für Plutonium

4.1 Direktverglasung

Eine Verglasung von radioaktiven Abfällen auf der Basis von Borsilikaten findet bereits statt für Abfälle aus der Wiederaufarbeitung. Erfahrungen liegen in der Nuklearindustrie also vor. Im Forschungszentrum Karlsruhe befindet sich eine kleinere Verglasungsanlage (Verglasungseinrichtung Karlsruhe, VEK) im Aufbau, die 70 Kubikmeter flüssiger Abfälle aus dem Betrieb der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe verglasen soll.

Neu wäre die Beimischung größerer Mengen an Spaltstoffen. Dazu müßten über in der Silikatmatrix befindliches Bor hinaus ggf. weitere Neutronenabsorber hinzugefügt werden, um Kritikalität auf längeren Zeitskalen auszuschließen. Nur bei einem sehr geringen Plutoniumgehalt von etwa 0,5 % könnte bereits durch die im Borsilikatglas enthaltenen Absorber eine Kritikalität auch auf sehr langen Zeitskalen sicher ausgeschlossen werden [Sylvester 1997]. Schließlich werden Spaltstoffe nur bis zu maximal wenige Prozent beimischbar sein.

Bei der Mischung von Borsilikat-Glasfritte, hochradioaktiver Spaltproduktlösung, Absorber und Plutonium-Oxid im Schmelzofen muß auf eine kritikalitätssichere Zufuhr des

Plutonium geachtet werden. Der Umbau bzw. möglicherweise auch der Neubau einer Verglasungsanlage wäre zu diesem Zweck nötig.

Der Prozeß der Direktverglasung ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt. Das Endprodukt des Prozesses wäre eine lagerfähige Glaskokille, die Plutonium und Spaltprodukte enthält. Eine Begrenzung der Gesamtmenge verglasbaren Plutoniums ergibt sich aus der maximal noch zur Verfügung stehenden Menge an noch zu fertigenden Glaskokillen mit hochradioaktivem Abfall aus der Wiederaufarbeitung.⁶

4.2 Plutoniumverglasung mit vorhergehender Keramisierung

Hierbei handelt es sich um eine Variante des Can-in-canister-Verfahrens⁷, das die europäischen Gegebenheiten berücksichtigt. Wenig Erfahrungen mit der Keramisierung nuklearer Abfälle im Vergleich mit einer entsprechenden Verglasung liegen in Europa vor, aber es bestehen Vorteile gegenüber einer Einbringung von Plutonium (gemeinsam mit hochradioaktiven Abfällen) in Glas allein.

Eine vorhergehende Keramisierung des Plutoniums ist vorteilhaft, da bei einer Einbettung des Plutoniums in eine keramische Matrix eine wesentlich höhere Beständigkeit des Lagerprodukts zu erwarten ist. Zusätzlich lassen sich größere Konzentration von Aktiniden in eine keramische Matrix einbinden, als dies bei Glas als Matrix möglich ist (20 % Aktiniden und mehr sind denkbar). Hierdurch könnte es auch möglich werden, ²³⁸Uran gemeinsam mit Plutonium in die keramische Matrix einzubetten. Dieses würde als zusätzlicher Neutronenabsorber fungieren und auch auf sehr langen Zeitskalen (nach dem Zerfall des Hauptisotops ²³⁹Plutonium zu ²³⁵Uran) eine mögliche Kritikalität ausschließen können. Wegen der generell höheren Aufnahmefähigkeit der keramischen Matrix für fremde Nuklide ist auch die Zugabe weiterer Neutronenabsorber möglich.

Erfahrungen mit der Keramisierung von Plutonium liegen in Europa in Form der MOX-Fertigung vor. Im Falle einer Keramisierung mit dem Ziel einer direkten Endlagerung sind keine hohen Qualitätsstandards für die Fertigung erforderlich, so wie sie bei einer Fertigung von Brennstoffen für den Reaktoreinsatz zu fordern sind.⁸ Ein Plutoniumgehalt in MOX von 6,7 % bzw. 14 % (entsprechend 5 bzw. 10 % Spaltstoffanteil) wäre realisierbar [Küppers et al. 1999].

Der Prozeß der Verglasung mit vorhergehender Keramisierung nach dem Can-in-canister-Verfahren ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt. Das Endprodukt des Prozesses wäre ebenfalls eine lagerfähige Glaskokille, die Plutonium und Spaltproduktlösung enthält. Eine

⁶ Weitere Informationen zur Direktverglasung finden sich beispielsweise in [Küppers et al. 1999].

⁷ Vergleiche die Ausführungen im Beitrag von Allison MacFarlane in diesem Band.

⁸ Durch den kürzlich bekannt gewordenen Fälschungsskandal beim britischen Brennstoffherstellers BNFL ist auch belegt, daß es bedeutende Schwierigkeiten bei der Einhaltung der notwendigen Qualitätsstandards in der MOX-Produktion gibt. Dieser Fall wird voraussichtlich zur Rücknahme bereits nach Japan gelieferter Brennstoffe durch BNFL führen.

Begrenzung der Gesamtmenge verglasbaren Plutoniums ergibt sich auch hier aus der maximal noch zur Verfügung stehenden Menge an noch zu fertigenden Glaskokillen mit hochradioaktivem Abfall aus der Wiederaufarbeitung.⁹

4.3 Lagerstabverfahren mit Fertigung von Lagerelementen

Wenn man berücksichtigt, daß die Strahlungsbarriere sowohl bei den bisher beschriebenen Immobilisierungsoptionen als auch der MOX-Option nicht unbegrenzt wirksam ist (die dafür wirksamsten Spaltprodukte haben eine Halbwertszeit von nur bis zu 30 Jahren), kann auch über Vereinfachungen gegenüber der Verglasungsoption mit vorausgehender Keramisierung des Plutoniums nachgedacht werden. Daher hat das Öko-Institut vorgeschlagen, das Plutonium zunächst zu MOX zu verarbeiten, um es dann in Brennstäbe zu verbringen, die als Lagerstäbe geeignet sind.

Der Plutoniumgehalt des MOX, der nicht den üblichen Brennstoffspezifikationen entsprechen muß, kann 6,7 % oder auch 13,9 % sein (entsprechend 5 bzw. 10 % Spaltstoffanteil). Aus den Lagerstäben sollen DWR-Lagerelemente assembliert werden, die 38 bzw. 80 kg Plutonium enthalten könnten. Ein Lagerelement könnte gemeinsam mit 18 abgebrannten Brennelementen, die eine Strahlungsbarriere garantieren, in einen geeigneten Lagerbehälter verpackt werden.

Der Prozeß des Lagerstabverfahrens ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt. Weitere Details finden sich in [Küppers et al. 1999]. Erfahrungen mit der Produktion von Lagerstäben und -elementen wurden bereits im Leerfahrprogramm für den Hanauer Plutoniumbunker gesammelt. Eine Beschränkung des Plutoniumumsatzes ist nur durch die Nutzungsmöglichkeit von MOX-Fertigungskapazitäten gegeben.

4.4 Lagerstabverfahren mit Stabaustausch

Der eben beschriebene Prozeß kann auch etwas komplizierter gestaltet werden. Die Assemblierung der Lagerelemente kann auch so erfolgen, daß produzierte Lagerstäbe mit Stäben aus abgebrannten Brennelementen gemischt werden. Auf diese Weise wären die Lagerelemente selbst mit einer Strahlungsbarriere gegen direkten Zugriff geschützt. Der Prozeß des Lagerstabverfahrens mit Stabaustausch ist in Abbildung 4 skizziert.

4.5 Vergleich der Immobilisierungsoptionen

In [Küppers et al. 1999] wurde eine (erste) Einschätzung der Machbarkeit sowie der Vor- und Nachteile der Immobilisierungsoptionen vorgenommen. Dies ist in Tabelle 4 zusammengefaßt.

⁹ Weitere Informationen finden sich in [Küppers et al. 1999].

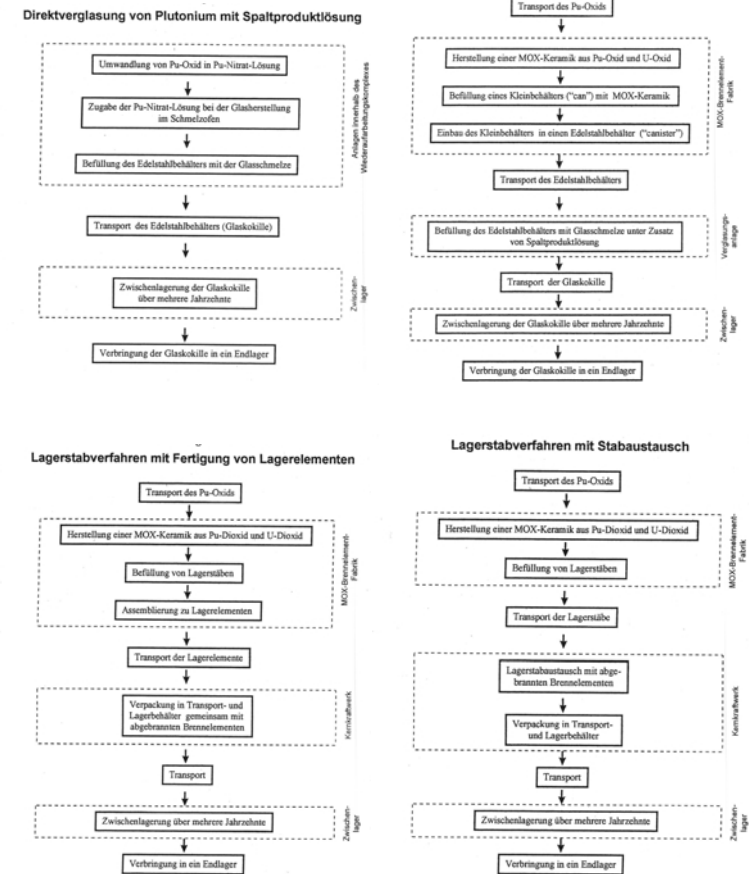


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Verglasung von Plutonium mit hochradioaktiver Spaltproduktlösung direkt bzw. nach vorheriger Keramisierung (Can-in-canister) und der Lagerstabverfahren mit Fertigung von Lagerelementen bzw. mit Stabaustausch. [Küppers et al. 1999]

Für alle Verfahren bis auf die Direktverglasung liegen ausreichende Erfahrungen vor, Anlagen zur Durchführung sind in europäischen Ländern vorhanden, der Bedarf für zusätzli-

che Genehmigungen ist gering. Die verarbeitbare Jahresmenge beträgt jeweils mindestens mehrere Tonnen Plutonium. Beim Can-in-canister-Verfahren könnte die Jahresmenge allerdings kleiner ausfallen. Bei den Verglasungsverfahren ist die Gesamtmenge begrenzt durch den gewählten Plutoniumanteil im Lagergebäude und der insgesamt für dieses Verfahren zur Verfügung stehende Menge an hochradioaktivem Abfall aus der bereits durchgeführten Wiederaufarbeitung. Bei allen Verfahren entsteht ein (end)lagerungsfähiges Produkt.

Was die Kosten anbetrifft, so werden recht große Bandbreiten angegeben, da die Investitions- und Betriebskosten von einer Reihe von Faktoren abhängen, die noch genauer eingegrenzt werden müßten. (Um 10 Tonnen Plutonium auf eine dieser Weisen umzusetzen, muß mit Kosten von ca. 360 Mio. bis 1,4 Mrd. DM gerechnet werden.) Um die betriebswirtschaftliche Attraktivität für die EVU einschätzen zu können, ist der Vergleich mit den Mehrkosten des MOX-Brennstoffeinsatzes gegenüber Uraneinsatz in Reaktoren interessant. Diese Kosten liegen bei 67.000-87.000 DM pro kg Plutonium. Es handelt sich also um dieselbe Größenordnung, was die Kosten angeht. Die Immobilisierungsverfahren erscheinen also zunächst auch unter dem Kostengesichtspunkt als attraktiv. Genauere Berechnungen müßten allerdings noch vorgenommen werden.

	Can-in-canister-Verfahren	Direktverglasung mit Spaltprodukten	Lagerstabverfahren mit Lagerelementfertigung	Lagerstabverfahren mit Stabaustausch
größttechnische Erfahrung für Schritte vor Endlagerung	liegt vor	liegt größtenteils vor	liegt vor	liegt vor
Neue Anlagen erforderlich	nein	neue Verglasungsanlage erforderlich	nein	nein
Bedarf für Genehmigungen	gering	groß	gering	gering
verarbeitbare Jahresmenge Pu-tot in kg	ca. 900 - 1800	ca. 4000	ca. 3300 - 7000	ca. 3300 - 7000
behandelbare Gesamtmenge Pu-tot in kg	ca. 4000 - 16000	ca. 3000 - 9000	keine Obergrenze (Kostenbasis hier 1000 - 25.000 kg)	keine Obergrenze (Kostenbasis hier 1000 - 25.000 kg)
Kosten in DM/kg Pu-tot	ca. 36.000 - 115.000	ca. 23.000 - 25.000	ca. 42.000 - 139.000	ca. 43.000 - 142.000
endlagerfähiges Produkt	ja	ja	ja	ja

Tabelle 4: Vergleich wichtiger Faktoren für die Machbarkeit von Immobilisierungsverfahren (nach [Küppers et al. 1999]).

5 Eliminierungsoptionen für Plutonium

Eine quantitative Beseitigung von Plutonium kann nur durch Spaltung in Reaktoren erfolgen. Den Reaktoreinsatz halten wir nur dann für sinnvoll, wenn

1. die Plutonium-Beseitigung mit sehr hoher Effizienz geschieht,
2. die verwendeten Verfahren eine hohe Proliferationsresistenz aufweisen und
3. hohe Sicherheits- und Umweltstandards eingehalten werden.

In allen diesen Aspekten sollten Eliminierungsverfahren besser bewertet werden können als der heute übliche Reaktoreinsatz. Insbesondere sollte daher der Einsatz von Brutstoffen, in denen Plutonium im Reaktor nachproduziert würde, vermieden werden und es sollte keine (erneute) Wiederaufarbeitung des verwendeten Brennstoffs erfolgen. Unkonventionelle Betriebsstrategien für verwendete Reaktoren sollten nicht ausgeschlossen werden, wie beispielsweise der Verzicht auf Stromproduktion als Preis für eine hohe Effizienz der Plutoniumvernichtung.

Die Effizienz eines Reaktorsystems zur Eliminierung von Plutonium läßt sich durch die Menge des gespaltenen Plutoniums beurteilen. Eine Anlage mit einer thermischen Leistung von 1 GW thermisch spaltet pro Jahr rund 370 kg Plutonium. Je dichter die tatsächlich vernichtete Plutoniummenge an diese physikalisch gegebene Obergrenze heranreicht, desto effizienter arbeitet das betrachtete System.

Wir haben bei IANUS eine Potentialabschätzung auf der Basis existierender Leichtwasserreakorteknologie vorgenommen.¹⁰ Simulationsrechnungen wurden für verschiedene Brennstoffzusammensetzungen durchgeführt. Wie beziehen uns hier exemplarisch auf einen plutoniumhaltigen Brennstoff mit einer Anfangskonzentration 0,36 g/cm³ (dies entspricht in etwa einem MOX-Brennstoff mit einem Spaltstoffgehalt von 4%). Als inerte Brennstoffmatrix dient in diesem Beispiel Magnesiumoxid (3,5 g/cm³) und als brennbares Neutronengift, um die erhöhte Anfangsreaktivität des Brennstoffs abzufangen, sowie als Resonanzabsorber Europiumoxid (0,006 g/cm³). Das Brennstabkonzept entspricht demjenigen eines typischen Druckwasserreaktors. Die übliche Leistungsdichte im Brennstoff ist gegenüber einem üblichen Druckwasserreaktor um den Faktor 10 bzw. 4 reduziert. Die Leistungsdichte von nur 30 bzw. 75 Watt/cm³ führt zu deutlich niedrigeren Brennstoff- und Kühlmitteltemperaturen sowie einem niedrigeren Druck. Daraus ergeben sich Vorteile für die Betriebssicherheit des Reaktors. Dies ist insbesondere wegen des hohen Plutoniumgehalts im Reaktor ein wichtiges Kriterium. Auf die Stromproduktion müßte allerdings aufgrund der zu niedrigen Kühlmitteltemperatur verzichtet werden. Dieser Verzicht

¹⁰ Vergleichbare Ideen wurden erstmals vom Idaho National Engineering Laboratory (INEL; heute: INEEL) im Auftrag der National Academy of Sciences diskutiert [Ryskamp et al. 1993]. Ergebnisse für die Beseitigung von Waffenplutonium wurden von uns bereits bei der DPG vorgestellt [Liebert et al. 1998].

wirkt sich jedoch auch positiv auf den erreichbaren Plutoniumumsatz aus, da bereits stark abgebrannte Brennelemente an entsprechend ausgewählten Reaktorpositionen noch länger bestrahlt werden können, um so einen möglichst hohen Plutoniumabbbrand zu erreichen, selbst wenn dabei nur noch wenig Energie freigesetzt wird, was aus ökonomischer Sicht unattraktiv wäre. Eine Wiederaufarbeitung des Brennstoffs ist nicht vorgesehen, da diese einen erneuten, direkten Zugriff auf Plutonium ermöglichen würde, was aus Non-Proliferationsgründen vermieden werden soll.

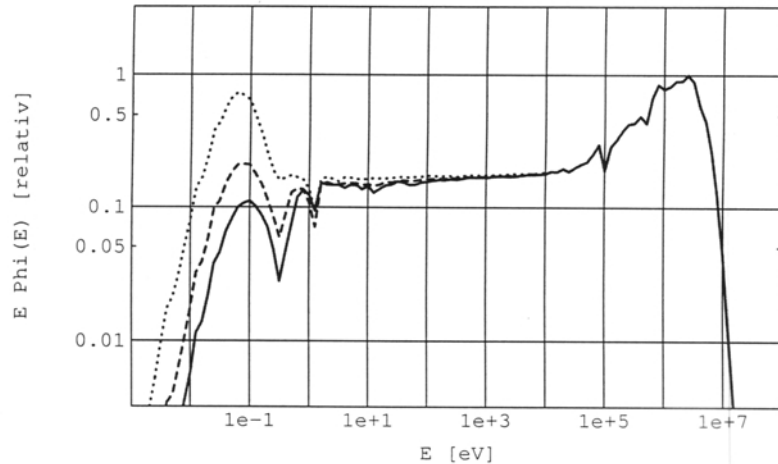


Abbildung 5: Abbrandabhängige Entwicklung des Neutronenspektrums in logarithmischer Darstellung $E \cdot \Phi(E)$ des im Text beschriebenen Brennstoffs, frisch (—), nach 4500 Tagen (- - -), nach 9000 Tagen (.....).

Für eine Potentialabschätzung eines solchen Systems kann nicht auf bekannte Reaktorspektren zurückgegriffen werden, da das Neutronenspektrum deutlich abbrandabhängig ist (vergl. Abbildung 5). Es müssen spezielle MCNP-Simulationsrechnungen durchgeführt werden. Die vorgestellten Resultate basieren schließlich auf Zellabbrandrechnungen.¹¹

In Abbildung 6 sind Ergebnisse der Rechnungen für eine Leistungsdichte von 75 Watt/cm³ dargestellt. Der Umsatz des Schwermetalls ist darin durch eine Gerade gegeben, deren Steigung dem pro Zeiteinheit gespaltenen Brennstoff entspricht. Die anfängliche Steigung der Kurve für ²³⁹Pu nimmt im Laufe des Abbrandes ab, da neben ²³⁹Pu zunehmend auch andere Plutoniumisotope sowie weitere Aktiniden zur Energiefreisetzung durch Spaltung beitragen.

¹¹ Zu Details der Berechnungsverfahren vergl. [Glaser 1998] und [Pistner 1998].

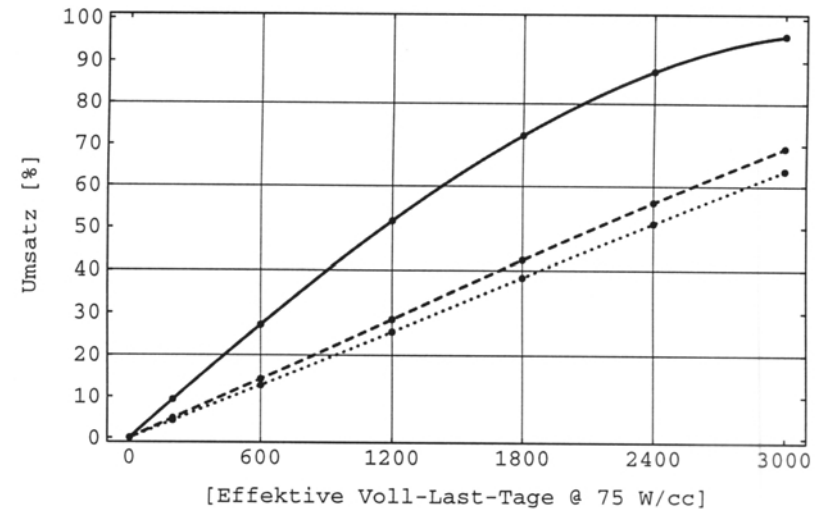


Abbildung 6: Prozentualer Umsatz für ²³⁹Pu (—), Gesamt-Plutonium-Inventar (- - -) und Schwermetall-Inventar (.....).

Nach 8 Jahren Reaktoreinsatz würde ²³⁹Pu zu 96 % umgesetzt. Von eingesetzten 100 kg Reaktorplutonium befänden sich nach 8 Jahren noch 31,8 kg im abgebrannten Brennstoff, darunter nur noch etwa 3 kg ²³⁹Pu. Etwa 5,5 kg weitere Aktiniden wären durch den Reaktoreinsatz entstanden.

Der Isotopenvektor würde durch diesen Reaktoreinsatz deutlich verändert, wie Tabelle 5 im Vergleich mit Tabelle 1 zeigt. Im unteren Teil von Tabelle 3 sind Angaben für kritische Masse, Neutronenhintergrund und Wärmeraten für diesen Isotopenvektor angegeben. Es zeigt sich, daß die erforderliche kritische Masse für die in Abschnitt 1 angegebenen Bedingungen gegenüber typischem Reaktorplutonium um den Faktor 1,9 bzw. gegenüber Waffenplutonium um den Faktor 2,4 erhöht ist. Der Neutronenhintergrund steigt bei der angegebenen kritische Masse um einen Faktor 6,1 bzw. 47,4, die Wärmeleistung hat sich mit etwa 520 Watt so weit erhöht (um den Faktor 6,2 bzw. 44,9), daß eine Waffenanwendung bereits in Frage stehen könnte (alle Angaben beziehen sich hier auf die kritischen Massen mit Reflektor).

Es sind auch weitere Simulationsrechnungen zu anderen Brennstofftypen mit dem Ziel der Reduktion von Plutoniumbeständen durchgeführt worden (für einen Überblick siehe bspw. [JNM 1999]. An der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (ETHL) wurde im

Isotopenvektor:	Pu-238	7.7 %
	Pu-239	8.5 %
	Pu-240	33.4 %
	Pu-241	18.9 %
	Pu-242	31.5 %
Schwermetall-Umsatz:		63.67 %
Totaler Plutonium-Umsatz:		68.22 %
Pu-239-Umsatz:		95.67 %

Tabelle 5: Isotopenvektor und Plutoniumbilanz beim Ziel-Abbrand.

Rahmen einer Dissertation eine Untersuchung zu uranfreien Leichtwasserreaktorkernen sowohl für den Umsatz von Waffen- als auch von Reaktorplutonium durchgeführt [Kasemeyer 1998]. Hierfür wurden Reaktorkerne für den Einsatz zur Stromproduktion konzipiert, die auf einer inerten Zirconium-Matrix beruhen. Als besonders geeignetes brennbares Neutronengift wurde hier Erbium identifiziert. Die Arbeit kommt zu dem Schluß, daß für den Fall von Waffenplutonium in inerten Brennstoffen 72,2%, für den Fall von Reaktorplutonium 57,1%, des anfänglichen Plutoniums in entsprechend konzipierten Leistungsreaktoren umgesetzt werden könnte.

In Tabelle 6 wird ein Vergleich verschiedener Reaktorszenarien in Hinblick auf die Plutoniumeliminierung vorgenommen. Die darin angegebene Effizienz des Plutoniumumsatzes bezieht den jeweils erreichten absoluten Umsatz auf den oben genannten Wert von 370 kg pro GW thermisch. Ein Wert der Effizienz größer 1 kann auftreten, da es neben der Umsetzung von Plutonium durch Spaltung auch zu einer Umwandlung in andere Aktiniden (Americium, Curium) kommt.

	$\Delta M(\text{Pu})$ pro Jahr	Effizienz	Plutonium- Reduktion	Pu-239- Reduktion
Uran (LEU)	+94 kg	-0.25	Produktion!	Produktion!
33% MOX	+18 kg	-0.05	Produktion!	15 %
100% MOX	-136 kg	0.37	30 %	55 %
100% Inert	-412 kg	1.11	57 %	95 %
Pu-Burner	-382 kg	1.03	68 %	96 %

Tabelle 6: Plutonium-Umsatz und Effizienz verschiedener Reaktor-Optionen bei 1 GW(th). Die „Pu-Umsatz-Effizienz“ bezieht den Plutonium-Umsatz (durch Spaltung und Transmutation) auf die gesplante Masse von 370 kg pro GW thermischer Leistung.

Der üblicherweise eingesetzte Uranbrennstoff schneidet naturgemäß am schlechtesten ab: Es findet eine Produktion von Plutonium statt. Auch typische MOX-Varianten mit 33%

MOX-Brennstoff im Reaktor-Core führen zur Plutonium-Produktion mit einer entsprechend negativen Effizienz. Nur das Isotop ^{239}Pu wird um 15% reduziert. Eine fiktive MOX-Strategie mit 100% MOX-Brennstoff im Reaktor-Core, die bislang nirgends realisiert wurde, könnte das eingesetzte Plutonium um 30% reduzieren. Das beste Ergebnis erzielt der eben vorgestellte Pu-Burner mit seiner Reduktionsrate von 68% und einer Reduktion von ^{239}Pu um 96%. Nur der Brennstoff mit inerten Matrix kommt mit einer ^{239}Pu -Reduktion von 95% dicht an dieses Ergebnis heran. Die Reduktion des Gesamtplutoniums um 57% fällt demgegenüber allerdings deutlich zurück.

Die genannten Zahlen können nun zur Darstellung einer „Beseitigungskampagne“ genutzt werden. In Tabelle 7 sind Werte für eine hypothetische Beseitigung von 45 Tonnen Reaktorplutonium zusammengestellt. Wir wählen 45 Tonnen, weil es sich dabei um eine Menge handelt, die wahrscheinlich derjenigen entspricht, die in deutscher Verantwortung anfallen könnte.

	33% MOX	100% MOX	100% Inert	Pu-Burner
Ausgangslage	45 t RPu (26.6 t ^{239}Pu) in 800 t MOX und 1600 t LEU	45 t RPu (26.6 t ^{239}Pu) in 800 t MOX	45 t RPu (26.6 t ^{239}Pu)	45 t RPu (26.6 t ^{239}Pu)
ΔPu	-13.4 t + 18.6 t = +5.2 t	-13.4 t	-25.7 t	-30.6 t
Pu-Inventar bei Ende der Kampagne	50.2 t (22.6 t ^{239}Pu)	31.6 t (12.0 t ^{239}Pu)	19.3 t (1.3 t ^{239}Pu)	14.4 t (1.1 t ^{239}Pu)
Reaktorjahre _{1 GW_{th}}	296	99	62	77

Tabelle 7: Absolutzahlen für verschiedene Reaktor-Strategien zum Umgang mit Plutonium.

Das verbleibende Plutonium wäre jeweils in abgebrannte Brennelemente eingebettet. Die Gesamtmenge des endzulagernden Plutoniums nimmt bei der üblichen 33% MOX-Option um etwas mehr als 5 t zu. Der Pu-Burner schneidet am besten von allen Optionen ab: Eine Reduktion des Plutoniuminventars um etwa 31 t könnte erwartet werden.

Bei 33% MOX sind schließlich 50,2 t Plutonium (davon 22,6 t ^{239}Pu) zu lagern. Bei der hypothetischen 100% MOX-Option wären es noch 31,6 t (davon 12,0 t ^{239}Pu), bei der inert-Option wären es noch 19,3 t (davon 1,3 t ^{239}Pu). Nach Einsatz des Pu-Burners verblieben 14,4 t Plutonium (davon 1,1 t ^{239}Pu).

Auch der Zeitrahmen für die verschiedenen Optionen unterscheidet sich deutlich. Für den Umsatz der angenommen 45 t Reaktorplutonium benötigt die übliche 33% MOX-Option 296 Reaktorjahre (auf 1 GW_{th} bezogen), die Pu-Burner-Option benötigt 77 Reaktorjahre und die Option auf Basis einer inerten Matrix 62 Reaktorjahre.

Bei den hier vorgestellten Optionen handelt es sich um relativ realistische technische Möglichkeiten. Sicherlich wären noch einige genehmigungsrechtliche Fragen und mögliche Probleme der Brennstoffherstellung und der Reaktorsicherheit zu klären. Daneben werden fernliegende Eliminierungsstrategien diskutiert, in denen beschleunigergetriebene Reaktoren genutzt werden könnten. Bei einmaligem Durchlauf durch solche Systeme könnte die eingesetzte Gesamtplutoniummenge möglicherweise um bis zu 80% reduziert werden und die ^{239}Pu -Menge um 98%. Die Entwicklung solcher Systeme würde allerdings noch Jahrzehnte in Anspruch nehmen und das Gelingen kann nicht als gesichert gelten. Auf die Rubbia-Idee eines Energy Amplifiers, der auch zur Plutoniumbeseitigung geeignet sein könnte, gehen wir hier nicht weiter ein, da die Ko-Produktion von $^{233}\text{Uran}$, ebenfalls ein nutzbarer Spaltstoff für Waffenanwendungen, dann genauer diskutiert werden müßte.¹²

6 Schlußbemerkung

Auf der Basis des hier Vorgestellten kann man zu folgender Einschätzung kommen: Aus der Sicht einer dringend geratenen Reduzierung von abgetrennt vorliegenden Plutoniumbeständen erscheint es zunehmend unvernünftig, (ausschließlich) auf die MOX-Option zu setzen. Eine Reihe von wesentlichen Nachteilen sind deutlich geworden. Insbesondere der Vergleich mit anderen Reaktoroptionen zeigt wie schlecht die Strategie der MOX-Nutzung für eine Reduktion von Plutonium abschneidet. Demgegenüber können Immobilisierungsoptionen einsatzfähig gemacht werden. Die besten Aussichten auf eine kurzfristig machbare Realisierung haben die Lagerstabenverfahren und die Can-in-canister Immobilisierung. Diese Optionen sollten alternativ zu MOX dringend weiterentwickelt werden.

Bei der Entwicklung von und einer Entscheidung über technische Möglichkeiten müssen allerdings eine ganze Reihe von Aspekten eine Rolle spielen, die hier nicht ausführlicher dargestellt werden konnten. Wesentliche Kriterien sollen zumindest knapp angedeutet werden¹³:

- zeitlicher Aspekt (technische Realisierbarkeit; Start der Verfahren; Durchsatz/Jahr; Zeitbedarf insgesamt)
- Proliferationsresistenz (Endprodukt in Hinblick auf Menge, Zugänglichkeit, Brauchbarkeit; verwendete Anlagentechnik; Safeguardsaspekte; Auswirkungen auf zivile Technologienutzung)
- ökologische Aspekte (Anlagensicherheit; Radiotoxizitätsbilanz; Normalbetriebsemissionen)

¹² Vergl. zu beschleunigergetriebenen Systemen ausführlicher [Liebert et al. 1999].

¹³ Entwicklungs- und Entscheidungskriterien werden zur Zeit ausführlicher in einem vom BMBF geförderten Projekt von IANUS behandelt (Projektverbund Präventive Rüstungskontrolle — Fallbeispiel: Technische Optionen zur Beseitigung von zivilen Plutoniumbeständen zur Minimierung des Proliferationsrisikos).

- Endlagerfähigkeit¹⁴ (Spaltstoffkonzentration; Ausschluß einer Kritikalität; Beständigkeit der Matrix)
- technischer Entwicklungsbedarf (Vorhandensein technischer Erfahrungen in der EU; Notwendigkeit von Neuentwicklungen; Aussichten der Realisierbarkeit)
- Kosten (Investitionsbedarf; Betriebskosten; Vergleichskosten; Endlagerkosten; spezifische Kosten in Hinblick auf die Gesamtmenge)

Literatur:

[DoE 1996] U. S. Department of Energy: *Plutonium: The First 50 Years — United States Plutonium Production, Acquisition, and Utilization from 1944 to 1994*. Washington D. C., Februar 1996.

[Glaser 1998] A. Glaser: *Abbrandrechnungen für ein System zur Eliminierung von Waffenplutonium*, Diplomarbeit, Institut für Kernphysik/IANUS, TU Darmstadt, Feb. 1998.

[Hensing 1995] I. Hensing; W. Schulz: *Wirtschaftlichkeitsvergleich verschiedener Entsorgungspfade von Kernkraftwerken — Eine Kostensimulation alternativer Strategien aus deutscher Sicht*. Schriften des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität Köln, Band 45. München, 1995.

[JNM 1999] Journal of Nuclear Materials, Volume 274(1-2), 1999.

[Kalinowski et al. 2000] M. Kalinowski, W. Liebert, S. Aumann: *Deutsche Plutoniumbilanz für die vergangenen 30 Jahre*, erscheint in Atomwirtschaft (atw), Herbst 2000.

[Kankeleit et al. 1989] E. Kankeleit, C. Küppers, U. Imkeller: *Bericht zur Waffentauglichkeit von Reaktorplutonium*. IANUS-Arbeitsbericht 1/1989. Übersetzung des deutschen Originals von 1989 durch den Berkeley Scientific Translation Service: *Report on the Usability of Reactor-Plutonium in Weapons*. UCRL-TT-112792, Livermore, Januar 1993.

[Kasemeyer 1998] U. Kasemeyer: *Konzeption eines uranfreien LWR-Kerns zur Plutoniumverbrennung*. Dissertation, No. 1757 (1998), Département de Physique, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1998.

[Küppers et al. 1999] C. Küppers, W. Liebert, M. Sailer: *Realisierbarkeit der Verglasung von Plutonium zusammen mit hochradioaktiven Abfällen sowie der Fertigung von MOX-Lagerstäben zur direkten Endlagerung als Alternative zum Einsatz von MOX-Brennelementen*, Studie im Auftrag der Freien und Hansestadt Hamburg, Öko-Institut, Darmstadt, April 1999.

[Liebert et al. 1998] W. Liebert, A. Glaser, C. Pistner: *Elimination versus Disposal Options for Plutonium*. In: G. Neuneck, J. Altmann, J. Scheffran (Hrsg.): *Nuklearwaffen — Neue*

¹⁴ Dabei ist anzumerken, daß diese Frage von besonderer Bedeutung ist, wenn das potentielle Endlagermedium (Salz, Hartgestein etc.) noch nicht feststeht, wenn es also in Deutschland zu einer Neuaufnahme der Standortsuche für ein potentielles Endlager kommt, wie dies im Rahmen des Gorleben-Moratoriums absehbar ist.

Rüstungstechnologien — Verifikation von Abrüstung. Naturwissenschaftliche Beiträge zu Abrüstung und Verifikation. Tagungsbeiträge der DPG-Frühjahrstagungen in München und Regensburg. DPG/FONAS, Bad Honnef/Hamburg, 1998, S. 111–120.

[Liebert et al. 1999] W. Liebert, R. Bähr, A. Glaser, L. Hahn, C. Pistner: *Fortgeschrittene Nuklearsysteme – Review Study*, Schweizerischer Wissenschaftsrat, TA 34/1999, Bern, April 1999.

[Mark 1993] J. C. Mark: *Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium*. Science and Global Security 4, S. 111-128, 1993.

[NAS 1995] U. S. National Academy of Sciences: *Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium. Reactor-Related Options*. Committee on International Security and Arms Control. National Academy Press, Washington D. C., 1995.

[NEA 1995] Nuclear Energy Agency: *Physics of Plutonium Recycling. Volume II, Plutonium Recycling in Pressurized-water Reactors*. Nuclear Energy Agency, Working Party on the Physics of Plutonium Recycling. OECD Documents, 1995.

[Pistner 1998] C. Pistner: *Entwicklung und Validierung eines Programmsystems für Zellabbrandrechnungen plutoniumhaltiger Brennstoffe*, Diplomarbeit, Institut für Kernphysik/IANUS, TU Darmstadt, Mai 1998.

[Ryskamp et al. 1993] J. Ryskamp et al.: *A new reactor concept without uranium or thorium for burning weapons-grade plutonium*, in: Weapons-Grade Plutonium Disposition, Vol. 3, Idaho National Engineering Laboratory, Juni 1993.

[Sylvester 1997] K. W. B. Sylvester: *Weapons-Grade Plutonium Disposition: An Alternative Immobilization Strategy*. Ph. D. Thesis. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, Juni 1997.