

Plutoniumisotope (Pu-239 und höhere Isotope) entstehen in den heute überwiegend betriebenen Leichtwasserreaktoren aus dem natürlichen Uranisotop 238 durch Einfang von Neutronen und weiteren Kernprozessen. Aufgrund der Halbwertzeit von 24.110 Jahren des erzeugten Isotops Pu-239, seiner Radiotoxizität als Alphastrahler und der Kernwaffenfähigkeit, steht Plutonium seit jeher in der öffentlichen Diskussion.

In den Kernkraftwerken sind weltweit bis heute rund 222.000 t abgebrannter Kernbrennstoff angefallen, pro Jahr kommen rund 9.500 t hinzu. Die dabei kumuliert entstandene Menge an Plutonium beträgt rund 1.400 t und wird jährlich um ca. 70 t durch den laufenden Anlagenbetrieb erhöht. Zudem befinden sich noch größere Mengen an Plutonium in den Kernwaffenarsenalen der Kernwaffenstaaten, wobei die USA und Russland im Rahmen von Abrüstungsinitiativen in den 90er Jahren vereinbart haben, jeweils 50 t Pu in die zivile Nutzung zu überführen.

Für das Plutonium-Management ergeben sich grundsätzlich zwei Optionen: die permanente Endlagerung der abgebrannten Brennelemente – als Direkte Endlagerung – oder die Nutzung für eine weitere Energiegewinnung über Wiederaufarbeitung und Mischoxid-Brennlementherstellung (MOX). Eine Reihe von Ländern haben sich vorläufig für die Direkte Endlagerung entschieden, andere für die weitere Plutoniumnutzung in einem Brennstoffkreislauf. Aufgrund des Spaltstoffanteils im abgebrannten Kernbrennstoff, müssen bei der Direkten Endlagerung die Lagereinrichtungen langfristig überwacht werden. Daraus werden Szenarien entwickelt, die über die Rückführung des Plutoniums in den Energiegewinnungsprozess in besonderen Reaktoren (z.B. dem CAPRA-Reaktor oder ADS-Systemen) im Verbund mit Leistungsreaktoren langfristig eine Minimierung der kumulierten Plutoniumpmenge bei fortlaufender Nutzung der Kernenergie gewährleisten.

Voraussetzung für die Etablierung eines solchen Systems von Leichtwasserkernreaktoren und Plutonium-Burnern sind ein geschlossener Brennstoffkreislauf und fortschrittliche Reaktorsysteme als Pu-Burner.

Anschriften der Verfasser:

Prof. Dr. G. Keßler*, früher: Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Dr.-Ing. K. Gompper, Institut für Nukleare Entsorgung

Dr. C. Broeders und Dr.-Ing. E. Kiefler, Institut für Kern- und Energietechnik
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH – Technik und Umwelt, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Moderne Strategien zur Beseitigung von Plutonium

G. Keßler, K. Gompper, C. Broeders und E. Kiefler,
Karlsruhe

1 Einleitung

Plutonium (Pu) entsteht in den heute überwiegend betriebenen Leichtwasserreaktoren (LWR) aus dem natürlichen Uranisotop 238 durch Einfang von Neutronen. Das dabei zunächst gebildete kurzlebige U-239 (U, Uran) zerfällt über das ebenfalls kurzlebige Np-239 (Np, Neptunium) zum langlebigen Pu-239. Ein Teil davon wird während des Reaktorbetriebs durch Neutronen gespalten während aus einem anderen Teil des Pu-239 und durch weiteren Neutroneneinfang die höheren Plutoniumisotope Pu-240, Pu-241, Pu-242 sowie in geringerer Konzentration Isotope mit höherer Kernladungszahl, z.B. Americium und Curium, gebildet werden.

Aus zwei Gründen ist Plutonium wohl dasjenige radioaktive Element, das am nachhaltigsten in der öffentlichen Diskussion steht. Der eine Grund ist seine Radiotoxizität als Alphastrahler, verbunden mit seiner

Langlebigkeit (Halbwertszeit Pu-239 = 24.110 Jahre). Der andere Grund ist, dass Plutonium wegen seines hohen Energieinhaltes sowohl zur Energiegewinnung in Kernkraftwerken als auch – genauso wie U-233 und höchstangereichertes U-235 – zur Herstellung von Kernwaffen geeignet ist.

2 Plutoniumbestand

2.1 Plutonium aus Kernkraftwerken

Zurzeit produzieren weltweit 436 Kernkraftwerke rund 16% des elektrischen Stromes. 36 Kernkraftwerke sind im Bau, davon 34 in Osteuropa und Asien [1]. Bis heute sind in den Kernkraftwerken der Welt rund 222 000 t abgebrannter Kernbrennstoff angefallen. Pro Jahr kommen zur Zeit knapp 9.500 t dazu [2]. Abb. 1 zeigt die zeitliche Entwicklung, wobei für die Zu-

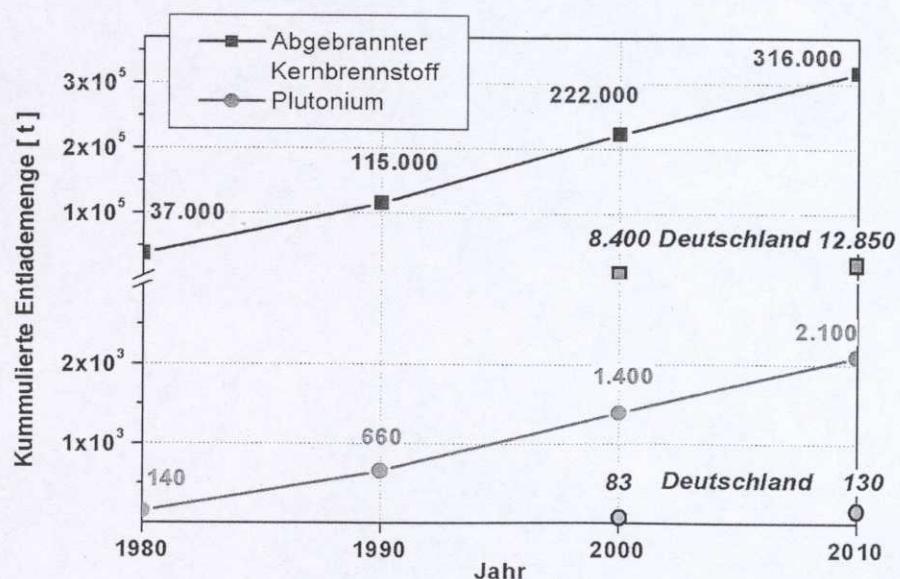


Abb. 1: Kumulierte Entlademengen an abgebranntem Kernbrennstoff und Plutonium weltweit und in Deutschland.

kunft angenommen wurde, dass alle laufenden Reaktoren entsprechend ihrer vorgesehenen Lebensdauer betrieben werden. Wie Abb. 1 ebenfalls zeigt, sind mittlerweile durch die Kernenergienutzung aus den verschiedenen Reaktortypen weltweit rund 1.400 Tonnen Plutonium entstanden, z.Zt. kommen pro Jahr rund 70 t dazu. Ein Teil dieses Plutoniums wurde durch Wiederaufarbeitung zurückgewonnen, der größte Teil befindet sich noch in den abgebrannten Brennelementen.

In Deutschland sind zur Zeit 19 Reaktoren am Netz, die mit einer installierten Leistung von 22 GWe rund ein Drittel zur deutschen Stromversorgung beitragen. Bis heute sind rund 8.400 t abgebrannter Kernbrennstoff mit etwa 83 t Plutonium angefallen. Pro Jahr kommen knapp 450 t mit etwa 4,7 t Plutonium dazu [3].

2.2 Plutonium aus Kernwaffen

Der Bestand an militärischem Plutonium (weltweit) wurde für 1990 auf knapp 260 t geschätzt [4]. Im Rahmen des 1993 geschlossenen START-II Abkommens sollen die strategischen und taktischen Kernwaffen bis zum Jahr 2003 beträchtlich reduziert werden. Im Jahr 1998 haben die USA und Russland verhandelt, dass beide je 50 t Waffenplutonium aus ihrem militärischen Lagervorrat herausnehmen und so behandeln, dass dieses Plutonium nicht mehr zur Kernwaffenherstellung verwendet werden kann [9,10]. In einem endgültigen Vertrag, der im Juni 2000 zwischen den USA und Russland abgeschlossen wurde, beschlossen beide Atommächte, nur je 34 t Plutonium aus ihren Atomwaffenarsenalen herauszunehmen. Die USA werden davon rund 25,6 t Plutonium zu (U, Pu)-Mischoxidbrennelementen (MOX-BE) verarbeiten und in LWRs einsetzen. Russland hat vor, die gesamten 34 t Waffenplutonium als MOX-BE einzusetzen [5].

3 Plutonium-Management

Zur Zeit werden international bei der zivilen Nutzung der Kernenergie zwei Entsorgungswege beschritten, einerseits die permanente Endlagerung der abgebrannten Brennelemente, man spricht hier von der Direkten Endlagerung, und andererseits ihre Wiederaufarbeitung mit dem Ziel, Uran und Plutonium für die weitere Energiegewinnung in Kernkraftwerken zu rezyklieren und weitestgehend aus dem Endlager fernzuhalten.

3.1 Direkte Endlagerung

Für die Direkte Endlagerung („once-Through“) haben sich eine Reihe von Län-

dern entschieden. Allen voran die USA, in denen auch die Möglichkeit der Rückholung eingelagerter abgebrannter Brennelemente vorgesehen wird, aber auch beispielsweise Kanada oder Schweden. Bei der Direkten Endlagerung werden die abgebrannten Kernbrennstoffe nach ihrer Entladung aus dem Reaktor zunächst in den sog. Abklingbecken direkt am Reaktorstandort zwischengelagert. Nach dem Abklingen der kurzlebigen stark wärmeerzeugenden Radionuklide werden die Brennelemente in dickwandige Behälter verpackt und nach einer hinreichend langen Zwischenlagerzeit für die Endlagerung konditioniert.

In Deutschland, wo seit der Änderung des Atomgesetzes 1994 (Artikelgesetz) die Direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente ebenso als Entsorgungsnachweis gilt wie die Wiederaufarbeitung, stehen für die Zwischenlagerung die Einrichtungen in Ahaus und Gorleben zur Verfügung.

3.2 Plutoniumrezyklierung

Nur ein Teil der Kernenergie nutzenden Länder, wie z.B. Belgien, England, Frankreich, Schweiz, Japan und Russland, aber auch Deutschland, sahen in Plutonium eine nutzbare Energiequelle und verfolgten mit der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente das Ziel, es wieder zur Energiegewinnung einzusetzen. In einigen Ländern, wie der Schweiz, aber auch Deutschland, wird gegenwärtig über ein Verbot der Wiederaufarbeitung nachgedacht.

Bei der Wiederaufarbeitung wird allgemein der PUREX-Prozess (PUREX: Plutonium and Uranium Recovery by Extraction) angewandt, der in den 40er Jahren ent-

wickelt und in den letzten Jahrzehnten immer weiter optimiert wurde. Der abgebrannte Kernbrennstoff wird in Salpetersäure aufgelöst. Uran und Plutonium werden extrahiert und die Spaltprodukte, aber auch die sogenannten Minoren Actiniden (Np, Am, Cm, die einen wesentlichen Beitrag zur Langzeit-Radioaktivität bilden), sowie unvermeidliche geringe Abtrennverluste von etwa 0,1% an U und Pu gelangen in den hochradioaktiven Abfall (s. Abb. 2), der nach gegenwärtig angewandter Technik durch Verglasung in ein endlagerfähiges Produkt überführt wird. Zur Zeit gibt es weltweit eine Wiederaufarbeitungskapazität für Uranoxid-Brennstoff von rund 3.300 tSM (tSM = Tonne Schwermetall Uran bzw. Plutonium) pro Jahr [6,7] Vergleicht man diese Zahl mit der jährlich auf der Welt anfallenden Menge an abgebranntem Brennstoff von rund 9.500 t (s. Abb. 1), so zeigt sich, dass mit der derzeit vorhandenen Wiederaufarbeitungskapazität etwa ein Drittel der jährlich anfallenden abgebrannten Brennelemente aufgearbeitet werden könnte.

Die größten Anlagen stehen in Frankreich und Großbritannien mit insgesamt rund 2.800 tSM/a. In diesen Anlagen werden auch Brennelemente aus anderen Ländern, u.a. aus Deutschland, aufgearbeitet. Weltweit wurden in den letzten 40 Jahren etwa 77.000 t abgebrannter Brennstoff wiederaufgearbeitet.

Zurzeit wird die Strategie der Einmalrezyklierung von Plutonium verfolgt, d.h. das bei der Wiederaufarbeitung zurückgewonnene Plutonium wird zu MOX-BE verarbeitet und wieder zur Energieerzeugung in die Reaktoren zurückgeführt. Danach sollen die abgebrannten MOX-BE der Direkten Endlagerung zugeführt werden.

Endlager

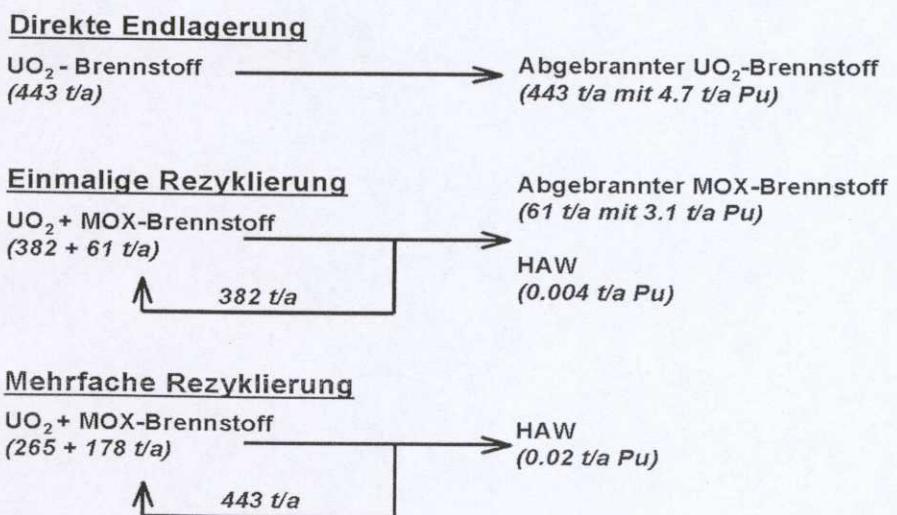


Abb. 2: Plutoniumbilanz in Tonnen pro Jahr für die Direkte Endlagerung, die einmalige Rezyklierung und die mehrfache Rezyklierung des abgebrannten Kernbrennstoffs für das deutsche 22 GWe-Szenario.
Annahme: 40 GWd/t Abbrand, 0,1% Pu-Verlust

Ende 1998 betrug die Fertigungskapazität für MOX-Brennelemente weltweit rund 220 t SM pro Jahr. Für 2010 wird eine Kapazität von knapp 600 t SM pro Jahr weltweit angestrebt [6]. In Belgien, Deutschland, Frankreich, Japan und der Schweiz hatten 1998 40 Kernkraftwerke (Druckwasserreaktoren und Siedewasserreaktoren) die Genehmigung, MOX-BE einzusetzen, 13 weitere haben die Genehmigung beantragt. In 33 Reaktoren werden MOX-BE bereits eingesetzt [7].

In Deutschland stellt sich die Plutoniumsituuation folgendermaßen dar: geht man bis 2010 von knapp 13.000 Tonnen abgebrannter Brennelemente in Deutschland aus (Annahme: Die deutschen Kernkraftwerke werden weiterbetrieben wie bisher. Die kumulierte Menge abgebrannter Kernbrennstoffe auf der Basis der Restlaufzeiten (Konsensgespräche) beläuft sich auf ca. 12.880 t im Jahr 2010.) (s. Abb. 1) und nimmt weiter an, dass die jetzigen Wiederaufarbeitungsverträge mit Frankreich und England von insgesamt rund 7.000 t (Altverträge: 5.540 t; Neuverträge: 1.430 t) abgearbeitet werden, dann stehen im Jahr 2010 zusätzlich noch etwa 6.000 t abgebrannte Brennelemente mit ca. 60 t Plutonium zur Direkten Endlagerung an. Dazu kommt noch das rezyklierte Plutonium aus der bisher geplanten Einmalrezyklierung, dessen Menge sich durch den Einsatz in MOX-BE um etwa ein Drittel verringert haben wird (s. Abb. 2) [8]. Dies sind nochmals rund 45 Tonnen. d.h., aus der deutschen Kernenergienutzung bis 2010 fallen rund 100 t Plutonium in abgebrannten BE (UOX und MOX) zur Endlagerung an.

3.3 Plutoniumentsorgung

Plutonium aus Leistungsreaktoren hat eine andere Isotopenzusammensetzung als für Waffenzwecke hergestelltes Plutonium. Waffenplutonium enthält zu etwa 95% die spaltbaren Isotope Pu-239 (ca. 94%) und Pu-241 (ca. 1,3%). Bei Plutonium aus modernen Leichtwasserreaktoren sind es nur rund 67% Pu-239 und Pu-241. Trotzdem ist Reaktorplutonium, wenn auch nur eingeschränkt, prinzipiell waffenfähig und muss hinsichtlich Sicherheits- und „Non-Proliferations“-Fragen langfristig überwacht werden [8,9,10]. Dies gilt insbesondere, wenn das Plutonium in abgetrennter, reiner Form vorliegt. Überlegungen zur Entsorgung von Waffenplutonium können deshalb grundsätzlich auch auf Reaktorplutonium übertragen werden [8,9,10].

Die Abrüstung atomarer Waffen und die Entscheidung Russlands und der USA, je 34 t Waffenplutonium aus ihrem militärischen Vorrat herauszunehmen, führte zu Überlegungen, wie dieses Plutonium dauerhaft vor einer missbräuchlichen Nutzung

geschützt werden kann („Non-Proliferation“). Auf diese Überlegungen soll an dieser Stelle nicht detailliert eingegangen werden, vielmehr wird auf die Literatur verwiesen [8,9,10,11,12,13,14,15,16].

Russland sieht in Waffenplutonium einen Energieträger, der durch Einsatz als MOX-Brennstoff in Kernkraftwerken genutzt werden soll. In den USA steht vor allem die Verhinderung der missbräuchlichen Nutzung des Plutoniums im Vordergrund. Endlagerfähige Plutonium-Verwahrformen, wie z.B. Glas oder keramische Materialien sollen selbstschützend sein, wie es abgebrannte Brennelemente auf Grund ihrer hohen Dosisleistung sind (Spent-Fuel bzw. Self-Protection Standard). Auf die Problematik der Self-Protection wird in Abschnitt 3.3.1 noch eingegangen. Nach neuesten Plänen sollen in den USA, wo die zivile Wiederaufarbeitung seit 1980 verboten ist, etwa 3/4 der 34 t Waffenplutonium ebenfalls als MOX-Brennstoff in LWRs eingesetzt werden. Dadurch soll neben dem Ziel der teilweisen Vernichtung des Plutoniums, auch der sog. Self-Protection Standard (radiologischer Selbstschutz) des Waffenplutoniums erreicht werden. Außerdem werden u.a. Keramiken zur Immobilisierung von chemisch verunreinigtem Plutonium aus der Waffenproduktion untersucht [17]. Diese Keramiken sollen nach dem sog. Can-in-Can Konzept in große Kokillen eingebracht werden und zur „Self-Protection“ mit hochradioaktivem Glasprodukt aus der Verglasung von hochradioaktiven Abfällen (HAW: high active waste) aus der militärischen Wiederaufarbeitung übergossen werden.

In Deutschland ist vorgesehen, das bei der Wiederaufarbeitung zurückgewonnene Plutonium zu MOX-Brennelementen zu verarbeiten (im Ausland) und wieder in Kernreaktoren zur Energiegewinnung einzusetzen. Für den MOX-Einsatz in Leichtwasserreaktoren besteht in Deutschland langjährige Betriebserfahrung. Zwölf der deutschen Kernkraftwerke haben die Genehmigung zum Einsatz von MOX-Brennstoff, zehn setzen MOX-Brennstoff ein und vier haben die Genehmigung für den Einsatz von MOX-Brennstoff beantragt [7].

Vor dem Hintergrund der Ausstiegsdebatte in Deutschland wurden ebenfalls Überlegungen angestellt, wie das Plutonium aus deutschen Kernkraftwerken, das bisher bei der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen in LaHague und Sellafield angefallen ist, als Alternative zum Einsatz in MOX-Brennelementen in eine endlagerfähige Form gebracht werden kann. Die Verglasung von Plutonium, so konnte in [8] gezeigt werden, ist wirtschaftlich und technisch unrealistisch (Geht man von den etwa 22 t deutschen Plutoniums aus, die Ende 1998 in abgetrennter Form

vorlagen, so würden bei einer Plutonium-Beladung des Glases von 1% und bei Verwendung der europäischen Kokillen, die rund 400 kg Glasprodukt enthalten, 6.000 Kokillen anfallen. Die als Folge der bestehenden Wiederaufarbeitungsverträge (Altverträge) aus La Hague und Sellafield zurückzunehmenden HAW-Kokillen belaufen sich auf insgesamt rund 3.500 Stück. Nicht zu unterschätzen ist auch der Bedarf an hochradioaktivem Abfall (HAWC) zur radioaktiven „Vergiftung“ des Plutoniums (Self-Protection). Bei einer Glasbeladung von 16 Gew. % HAWC (in Oxidform), wie es beispielsweise bei der Verglasung des HAWC aus der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) vorgesehen ist, würden für die 6.000 Kokillen knapp 3.200 m³ HAWC mit einem Aktivitätsinventar von rund $3,7 \times 10^{19}$ Bq benötigt werden. Um diesen HAWC zu erhalten, müssten rund 9.500 t abgebrannte BE aufgearbeitet werden, wobei ca. 95 t Pu zurückgewonnen würden. Wohin mit diesem Plutonium?!?) Eine Studie des Öko-Instituts Darmstadt [18] favorisiert sog. MOX-Lagerstäbe, die zusammen mit abgebrannten Brennelementen endgelagert werden sollen.

3.3.1 Plutoniumproblematik bei der Endlagerung

Bei der Direkten Endlagerung (Once-Through) gelangen mit jeder Tonne abgebranntem LWR-Kernbrennstoffs etwa 10 kg Plutonium ins Endlager. Durch Einmalrezyklierung des Plutoniums wird die Plutoniummenge um ein Drittel verringert (s.o.).

Endlager mit abgebrannten Kernbrennstoffen müssen wegen des hohen Spaltstoffanteils auch in der Nachbetriebsphase praktisch unbegrenzt überwacht werden [19,20]. Es muss sichergestellt sein, dass jede Tätigkeit, z.B. das Umladen, die untägliche Wiederaufarbeitung oder die Rückholung von spaltbarem Material, rechtzeitig entdeckt wird. Am Anfang halten die eingelagerten abgebrannten Brennelemente wegen ihrer Dosisleistung zwar den sogenannten „self protection standard“ ein, aber bedingt durch den Zerfall der Spaltprodukte ist dieser nach einigen hundert Jahren nicht mehr gegeben. Auch über sehr lange Zeiträume ergibt sich keine Änderung der Spaltmaterial-Problematik, da das häufigste spaltbare Plutonium-Isotop 239 zu ebenfalls spaltbarem U-235 ($t_{1/2} = 7 \times 10^8$ Jahre) zerfällt (s. Abb. 3). Eine Akkumulation des spaltbaren Materials zu kritischen Massen durch langfristige geologische Vorgänge in einem Endlager, so dass sich selbst erhaltende Kettenreaktionen ausbilden können, ist zwar sehr unwahrscheinlich, aber dennoch nicht völlig auszuschließen [21,22]. Dadurch könnten Änderungen im Nahbereich, z.B.

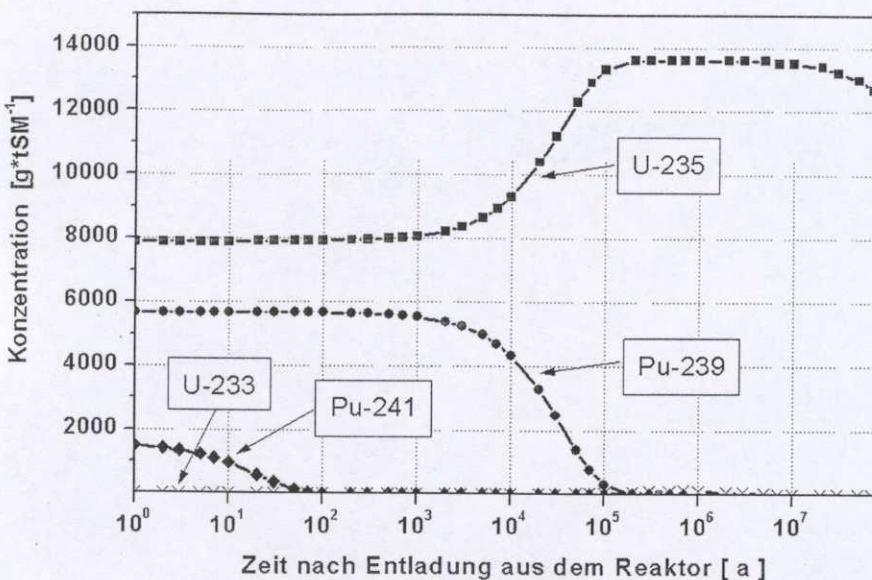


Abb. 3: Änderung der Konzentration der spaltbaren Isotope von U und Pu in einem abgebrannten BE mit der Zeit
(Reaktor: Biblis-Typ; Anfangsanreicherung: 4% U-235; Abbrand 45 GWd/t)

die Bildung neuer Wegsamkeiten (Klüfte) für den Radionuklidtransport durch Wasserzutritt etc., eintreten.

4 Plutoniumvernichtung

Die oben beschriebenen Methoden zur Plutoniumentsorgung, einschließlich der Einmalrezyklierung führen nicht zu einer nachhaltigen Entsorgung im Sinne einer Vernichtung des Plutoniums, da bei allen Varianten große Mengen Plutonium ins Endlager gelangen.

Will man als Hauptziel die Plutoniumvernichtung verfolgen, so muss man die Strategie ändern und von der Einmalrezyklierung zur Mehrfachrezyklierung des Plutoniums übergehen. Bei der Mehrfachrezyklierung muss darauf geachtet werden, dass die Plutonium-Isotopen-Zusammensetzung nicht zu schnell an Pu-239 und Pu-241 verarmt (wichtig für zweite und dritte Mehrfachrezyklierung). Zusätzlich muss man bei Leichtwasserreaktoren den MOX-Brennstoff durch U-235 etwas anreichern, um den für Kritikalitätsänderungen wichtigen Kühlmitteldichtheitkoeffizienten genügend negativ zu halten (etwa ab der dritten Mehrfachrezyklierung) [23].

Im Folgenden werden verschiedene Szenarien vorgestellt, in denen LWRs, die mit Uranoxid-Brennstoff betrieben werden, mit anderen Reaktoren, wie z.B. MOX-Burner, CAPRA-Reaktoren (Consommation Accrue de Plutonium dans les RApides) oder Beschleuniger-getriebenen unerkritischen Einrichtungen (ADS- Accelerator Driven Systems) in einem Pool von Reaktoren kombiniert werden. Dabei wird gezeigt, dass es möglich ist, entstandenes Plutonium in Burnern (Pu-Verbrennern) zu

vernichten. Bei der Betrachtung der Plutoniumvorräts wurde die Dauer des Brennstoffzyklus (10 bzw. 12 Jahre), also die notwendige Zeit vom Entladen des abgebrannten Brennstoffs über die Wiederaufarbeitung bis zur MOX-Brennelementfertigung berücksichtigt.

4.1 Szenario 1: Leichtwasser-Reaktoren als MOX-Burner

Das Forschungszentrum Karlsruhe [23,24], die Electricité de France und das Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) [25,26] haben solche Untersuchungen durchgeführt. Man geht dabei u.a. von voll mit MOX-Brennstoff gefüllten LWRs – sogenannten LWR-Pu-Burnern – aus. Deutsche LWRs haben heute bereits erteilte Genehmigungen bis 50% MOX-Befüllung des Reaktorkerns. Voll (100%) mit MOX-Brennstoff gefüllte LWR-Pu-Burner haben etwa die gleichen Reaktivitätskoeffizienten wie mit UOX befüllte LWRs. Ihr Kühlmitteldichtheitkoeffizient ist sogar stärker negativ. Es sind nur geringe Änderungen im Abschalt- und Regelsystem eines voll mit MOX gefüllten Burners im Vergleich zu einem UOX-LWR erforderlich [3,23,27].

Man startet bei einem heute üblichen Brennstoffabbrand von 50 GWd/tSM mit einer passend gewählten Untermenge von 8 LWRs mit

UOX-Brennstoff. Es kann aber auch mit einem ganzzahligen Vielfachen oder mit einem Teil dieser Untermenge von 8 Reaktoren gerechnet werden. Im letzteren Fall ergeben sich jedoch nur teilweise gefüllte LWR-Pu-Burner und das Szenario wird unübersichtlicher (die hier gewählte Untermenge soll in nachvollziehbarer Form das grundsätzliche Vorgehen demonstrieren). Der Pool von 8 LWRs ergibt sich aus der Tatsache, dass die UOX-LWRs zunächst das Plutonium für das Anfangsinventar des ersten LWR-Pu-Burners erzeugen und auch das Plutonium für den Aufbau des zugehörigen Brennstoffkreislaufs bereitstellen müssen. Die gleiche Forderung ergibt sich bei einem späteren Zubau von weiteren LWR-Pu-Burnern. Für den Fall, dass bereits relativ viel Plutonium aus dem Betrieb und aus Wiederaufarbeitungskampagnen zur Verfügung steht, verkürzt sich die anfängliche Plutoniumproduktionsphase für das Anfangsinventar des ersten LWR-Pu-Burners. Die Zeitachse verschiebt sich in Abb. 4 nach links (Der erste Knickpunkt des unteren Linienzuges der Abb. 4 würde mit 5 t Pu/GWe bei der passend gewählten Untermenge von 8 GWe LWRs 40 t wiederaufgearbeitetem Plutonium entsprechen (bei 20 GWe sind dies 100 t wiederaufgearbeitetes Plutonium)).

Bei dem angenommenen Szenario wird der Brennstoff der UOX-LWRs im Gleichgewichtszyklus alle etwa 1 bis 1,2

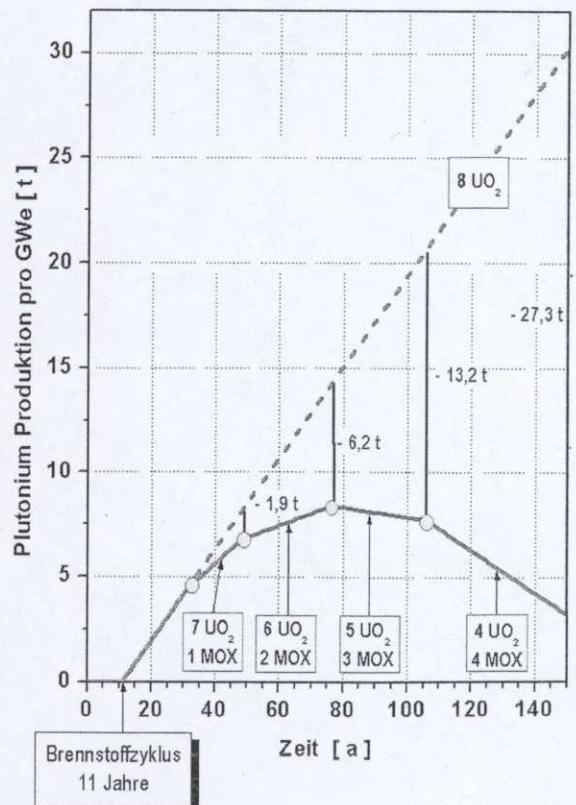


Abb. 4: Anfallende Plutoniummengen pro GWe und Jahr in einem Pool aus LWR-UOX und LWR-MOX Reaktoren (100% MOX-Core)

| Mischung | Anteil in Gew.% | | | | | |
|----------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Pu-238 | Pu-239 | Pu-240 | Pu-241 | Pu-242 | Pufiss |
| M1 | 2,8 | 55,1 | 23,3 | 9,7 | 7,6 | 64,8 |
| M2 | 3,5 | 49,4 | 26,2 | 10,0 | 9,4 | 59,4 |
| M3 | 3,9 | 46,8 | 27,9 | 9,2 | 10,8 | 56,0 |
| M4 | 4,3 | 43,1 | 28,9 | 9,9 | 12,3 | 53,0 |
| M5 | 4,6 | 41,5 | 29,3 | 9,5 | 13,6 | 51,0 |
| M6 | 4,8 | 40,4 | 29,6 | 9,1 | 14,7 | 49,5 |
| M7 | 4,9 | 39,5 | 29,8 | 8,8 | 15,6 | 48,3 |
| M8 | 5,1 | 37,5 | 29,8 | 9,3 | 16,9 | 46,8 |

Tab. 1: Plutonium-Isotopenzusammensetzung in den MOX-Brennstoffen zur Beladung der LWR-Pu-Burner

M1: Pu aus UOX-Brennstoff; M2 -M8: Mischung von Pu aus UOX- und MOX-Brennstoff

Jahre zu einem Fünftel entladen. Nach einer genügenden Abkühlzeit wird er z.B. nach LaHague oder Sellafield transportiert und dort chemisch aufgearbeitet. Anschließend wird in Marcoule oder Sellafield MOX-Brennstoff mit der Pu-Isotopenmischung M1 (Tab.1) gefertigt. Dies erfordert eine Zykluszeit von etwa 11 Jahren.

Die ersten MOX-Brennelemente mit der Pu-Isotopenmischung M1 werden gesammelt bis eine ausreichende Anzahl zum Füllen eines ersten LWR-Pu-Burners MOX1 mit einem Inventar von 7.200 kg Pu_{tot} vorhanden ist. Der Pool besteht nun aus 7 UOX-LWR und einem LWR-Pu-Burner (Tab. 2). Dieser LWR-Pu-Burner

durchgeführt [23], wobei auch die örtliche Leistungsverteilung optimiert wurde und die Reaktivitätskoeffizienten (Dopplerkoeffizient, Kühlmitteldichtekoeffizient) in Abhängigkeit des Abbrandes bestimmt wurden.

Nach einem weiteren Zeitintervall haben die 7 UOX-LWR auch genügend Plutonium für einen 2. LWR-Pu-Burner MOX-2 erzeugt (Tab. 2), der dann gestartet werden kann und dessen Brennstoff im obigen Sinne mit dem abgebrannten UOX-Brennstoff der verbliebenen 6 UOX-LWR und dem abgebrannten Brennstoff des ersten LWR-Pu-Burners (MOX-1) verschnitten wird.

Die Rechnungen zeigen, dass nach dem 2. Rezyklierschritt (bei einem Abbrand von 50 GWd/tSM) wegen der sich verschlechternden Pu-Zusammensetzung (Tab. 1) der Kühlmitteldichte-Koeffizient nicht mehr ausreichend negativ ist. Man kann dies jedoch ausgleichen, indem man zunächst 2% U-235 dem MOX-Brennstoff zumischt. In späteren Zyklen muss man diese U-235-Anreicherung bis auf 3,8% erhöhen [23].

Abb. 4 zeigt als Ergebnis dieser Rechnungen die zeitintegrierten Pu_{tot}-Mengen – allerdings auf 1 GWe bezogen (Für das Szenario mit einer Untermenge von 8 LWRs ergibt sich die angesammelte Pu_{tot}-Menge durch Multiplikation mit 8) – für die 2 verschiedenen Brennstoffzyklus-Szenarien:

- den Once-Through-Zyklus (OT-Zyklus) mit UOX-Reaktoren und Direkter Endlagerung oder temporärer Zwischenlagerung der abgebrannten Brennelemente

- das oben beschriebene Szenario mit UOX-LWRs und LWR-Pu-Burnern und Mehrfachrezyklierung. Nur die Pu-Verluste von etwa 0,1% gehen noch mit dem hochaktiven Abfall (HAW-Glas) ins Endlager.

Für den Once-Through Zyklus ergibt sich eine gerade ansteigende Linie, die sich aus 218 kg/GWe·a Pu-Produktion im UOX-LWR ergibt. Die gerade ansteigende Linie beschreibt die zeitintegrierte Pu_{tot}-Ansammlung.

Für das Szenario der Mehrfachrezyklierung und LWR-Pu-Burner ergibt sich ab dem Einsatz des ersten LWR-Pu-Burners ein

abknickender Linienzug, der nach dem Einsatz des zweiten LWR-Pu-Burners ein Maximum von etwa 8 t Pu/GWe erreicht (Abb. 4) und nach Einsatz des dritten und vierten LWR-Pu-Burners immer mehr abfällt.

Die Differenz zwischen beiden Linienzügen (Once-Through mit Direkter Endlagerung und der Mehrfachrezyklierung mit LWR-Pu-Burnern und Endlagerung des HAW-Glases aus der Wiederaufarbeitung) stellt die Menge des vernichteten bzw. erst gar nicht entstandenen Plutoniums dar. Plutonium entsteht deswegen nicht, weil bei konstanter Energieproduktion von 8 GWe durch LWRs im betrachteten Szenario nach und nach UOX-LWRs durch LWR-Pu-Burner ersetzt werden. Letztere erzeugen zwar genauso viel Energie wie UOX-Reaktoren, sie erzeugen jedoch nicht Plutonium sondern vernichten Plutonium. Insgesamt werden über 100 Jahre (zwischen dem 23. bis zum 123. Jahr in Abb. 4 den LWR-Burnern MOX-1 bis MOX-4 knapp 20 t Plutonium pro GWe vernichtet bzw. entstehen erst gar nicht).

Es gibt mehrere Gründe weswegen das Szenario der Mehrfachrezyklierung in Abb. 4 nicht weiter verfolgt wurde:

- die U-235-Anreicherung überschreitet bei MOX-4 die 4,4% Grenze und liegt damit im Bereich bzw. über derjenigen für UOX-Reaktoren [23].

- die LWR-Pu-Burner (MOX1 bis MOX4) würden immer mehr stark radiotoxisches Americium (Am) und Curium (Cm) produzieren [23] was nicht erwünscht ist.

- es gibt andere Reaktortypen (s. Kap. 4.2 und 4.3), die noch höhere Pu-Vernichtungsraten pro GWe·a haben z.B. flüssigmetallgekühlte Reaktoren mit schnellen Neutronen (CAPRA) oder Beschleuniger-getriebene unterkritische Anlagen (ADS). Dadurch kann die Erzeugung von Am und Cm verringert oder ganz vermieden werden.

4.2 Szenario 2: Flüssigmetallgekühlte Burner-Reaktoren mit schnellem Neutronenspektrum

Diese Reaktoren wurden aus der Brütttechnologie heraus entwickelt und haben eine Brennstoffanreicherung von etwa 40% Plutonium. Brutreaktoren mit schnellem Neutronenspektrum und einer Brennstoffanreicherung von 14 bis 18% spaltbarem Plutonium wie z.B. Superphenix erzeugen bei einem Abbrand der Brennelemente von etwa 120 GWe/tSM im Gegensatz zu den heutigen Leichtwasserreaktoren nur etwa 70 kg Pu pro GWe·a (LWR: 214 kg pro GWe·a). Der Grund liegt darin, dass Plutonium im Kern von Schnellen Brutreaktoren ähnlich wie ein Katalysator wirkt. In schnellen Brutreaktoren wird im Wesentlichen U-238 in Plutonium umgewandelt

| Jahre | Reaktortypen |
|-------|---------------|
| 1-22 | 8 UOX |
| 23-38 | 7 UOX - 1 MOX |
| 39-65 | 6 UOX - 2 MOX |
| 66-95 | 5 UOX - 3 MOX |
| 95- | 4 UOX - 4 MOX |

Tab. 2: Szenario für den Einsatz von LWR mit 100% MOX-Core in einem Pool von ursprünglich 8 LWR-UOX-Reaktoren

MOX1 vernichtet pro GWe·a etwa 420 kg Plutonium [23]. Nach Erreichen des Zielabbrandes von 50 GWd/tSM werden auch die MOX-Brennelemente aus dem Reaktorkern des MOX1 ausgeladen und nach genügend langer Abkühlzeit nach LaHague transportiert. Dort werden diese MOX-Brennelemente mit den dort ebenfalls vorhandenen abgebrannten UOX-Brennelementen aus den restlichen 7 UOX-LWRs verschnitten (gemischt), um den niedrigen Gehalt an Pu-239 und Pu-241 der abgebrannten MOX-Brennelemente durch den höheren Pu-239- und Pu-241-Gehalt der UOX-Brennelemente aufzubessern. Dies ergibt eine neue Pu-Isotopenmischung M2 für den LWR-Pu-Burner (Tab. 1). Nach diesem Prinzip wurden LWR-Pu-Burner Ganz-Kern-Abbrand- und Auslegungsrechnungen

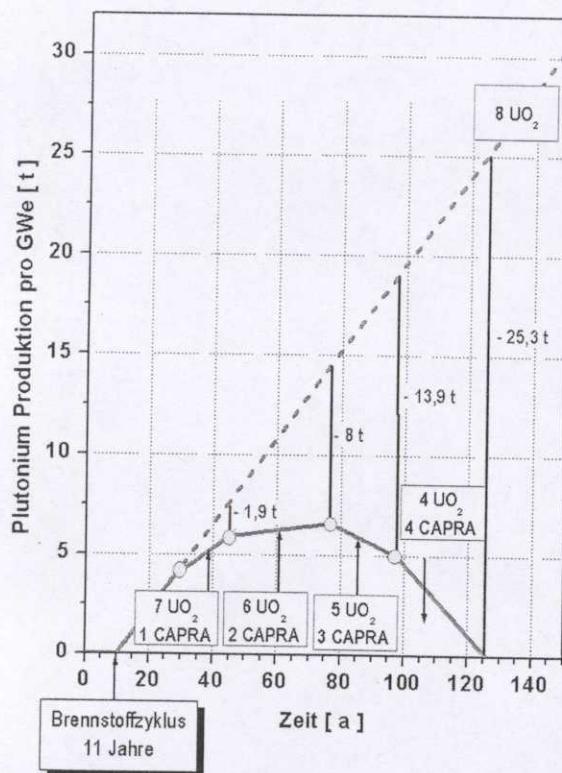


Abb. 5: Anfallende Plutoniummenge pro GWe in einem Pool aus LWR-UOX und CAPRA-Reaktoren

und gespalten [28]. Lässt man bei den Bruttorektoren die äußeren Brutmantel weg und verändert den Reaktorkern u.a. durch Erhöhung der Brennstoffanreicherung so, dass die sogenannte innere Konversionsrate drastisch absinkt, so kann man Pu-Vernichtungsraten bis 570 kg Pu pro GWe·a erreichen [29]. Außerdem produzieren diese sogenannten CAPRA-Burner Reaktoren mit schnellen Neutronen gegenüber LWR-Pu-Burnern mit thermischen Neutronen um etwa den Faktor 4 weniger Americium [25]. Diese Reaktoren wurden vom CEA und dem Forschungszentrum Karlsruhe sehr detailliert untersucht [29]. Wir nehmen hier einen CAPRA-Burner Reaktor an, der pro GWe Leistung, ein Pu-Inventar von 6.300 kg Pu_{tot} hat mit einem 3er Beladezyklus mit Be- und Entladung nach je etwa 1 Jahr.

Wir gehen wie in dem vorigen Schema (s. Kap. 4.1) wieder von einer Untermenge von 8 LWRs aus, wobei je nach Plutonium-Verfügbarkeit UOX-LWRs nach und

| Jahre | Reaktortypen |
|-------|-----------------|
| 1-19 | 8 UOX |
| 20-35 | 7 UOX - 1 CAPRA |
| 36-66 | 6 UOX - 2 CAPRA |
| 67-86 | 5 UOX - 3 CAPRA |
| 86- | 4 UOX - 4 CAPRA |

Tab. 3: Szenario für den Einsatz von CAPRA-Burnern in einem Pool von ursprünglich 8 LWR-UOX-Reaktoren

nach durch CAPRA-Burner ersetzt werden. Wir nehmen weiterhin an, dass die CAPRA-Burner ihre Pu-Isotopenzusammensetzung beim Mischen mit Plutonium aus UOX-LWRs nicht wesentlich ändern.

Analog nach der oben beschriebenen Prozedur für das aus LWR-UOX und LWR-MOX bestehende Szenario werden nun für das Szenario aus UOX-LWR und CAPRA-Reaktoren die Plutoniummengen im Brennstoffzyklus und die jeweils pro Jahr vernichteten Pu_{tot}-Mengen bestimmt. Daraus ergeben sich Abb. 5 bzw. Tab. 3. Ähnlich wie in Abb. 4 die gestrichelte Linie die zeitintegrierte und auf 1 GWe bezogene Pu_{tot}-Menge im Once-Through-Zyklus mit Zwischenlagerung bzw. Direkter Endlagerung dar. Der abknickende Linienzug beschreibt die zeitintegrierte und auf 1 GWe bezogene Pu_{tot}-Menge beim Szenario Mehrfachrezyklierung des Plutoniums mit Zubau von CAPRA-Burnern.

Die Differenz zwischen beiden Linienzügen gibt die Plutonium-Mengen an, die im Szenario Mehrfachrezyklierung mit Zubau von CAPRA-Burnern entweder vernichtet oder gar nicht erzeugt werden. Plutonium wird nicht erzeugt wenn CAPRA-Burner anstelle von UOX-LWRs Leistung erzeugen. Insgesamt würden im CAPRA-Burner-Szenario zwischen dem 20. und 125. Jahr etwa 25 t Pu pro GWe (bei 8 GWe: 200 t) durch die CAPRA-Burner weniger produziert als beim Once-Through-Zyklus. Im Vergleich zum LWR-Pu-Burner ist sowohl das Maximum des abknickenden Linienzuges, als auch der Zeitraum bis zum Erreichen der Nulllinie geringer. Ein Vergleich mit einem fiktiv gewählten CAPRA-Burner, der ein um das 1,5-fache größeres Kerninventar aber die gleiche Pu-Vernichtungsrate hatte, zeigt, dass das Kerninventar einen wesentlichen Einfluss hat. CAPRA-Burner mit geringem Pu-Kern-Inventar und hohen Pu-Vernichtungsraten sind die erwartungsgemäß besseren Pu-Vernichtungsreaktoren.

4.3 Szenario 3: ADS (Beschleunigergetriebene Systeme)

Auch Beschleunigergetriebene unterkritische Systeme, sogenannte ADS-Burner [30,31,32], benötigen die Mehrfachrezyklierung mit Wiederaufarbeitung. Wir wählen ein im Forschungszentrum Karlsruhe [33,34] entwickeltes und durchgerechnetes Beschleunigergetriebenes ADS-Burner-System mit 1 GWe Leistung und Pu/Th Brennstoff. Der Brennstoff kommt nach 12 Jahren wieder aus dem Brennstoffzyklus zurück. Dieser Pu/Th ADS-Burner startet mit 4.040 kg Pu und 19 t Thorium im unterkritischen Kern. Er vernichtet in 3 Jahren 1940 kg Pu und baut allerdings gleichzeitig 2800 kg U-233 auf. Davon verbleiben 1.500 kg im abgebrannten Brennstoff. Dadurch bleibt das k_{eff} der unterkritischen Anordnung über 3 Jahre in etwa konstant. Dies ist notwendig, da das k_{eff} einerseits die Neutronen-Multiplikation bestimmt und andererseits ein über die Betriebszeit konstanter k_{eff} auch einen konstanten Protonenstrom des Beschleunigers erlaubt.

Wir wählen nun wieder ein Szenario mit anfangs 8 UOX-LWRs. Nach 20 Jahren wird der erste ADS zugebaut (Tab. 4) usw. wie oben bereits für die Szenarien mit LWR-Pu-Burnern und CAPRA-Burnern beschrieben. Das Ergebnis ist in Abb. 6 gezeigt. Das sehr viel geringere Pu-Kerninventar des ADS und die etwas höhere Pu-Vernichtungsrate von etwa 650 kg Pu pro GWe·a ergibt das beste Ergebnis. Zwi-

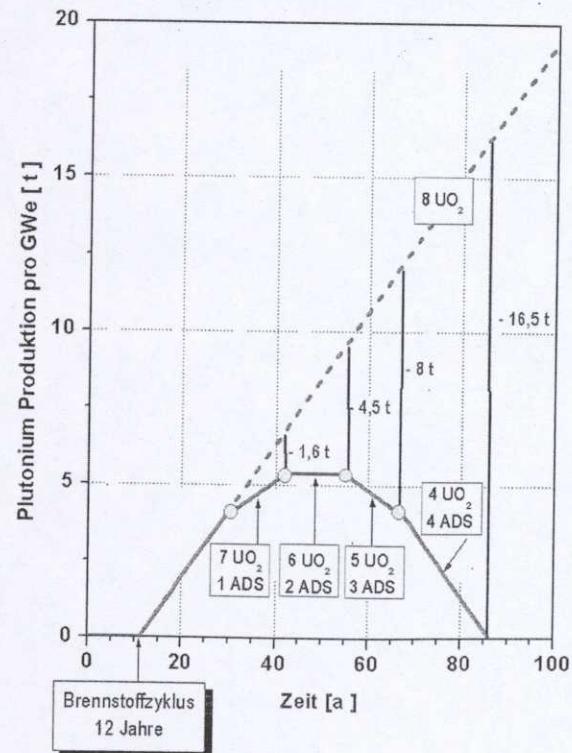


Abb. 6: Anfallende Plutoniummenge pro GWe in einem Pool aus LWR-UOX und ADS

| Jahre | Reaktortypen |
|-------|---------------|
| 1-19 | 8 UOX |
| 20-31 | 7 UOX - 1 ADS |
| 32-43 | 6 UOX - 2 ADS |
| 44-55 | 5 UOX - 3 ADS |
| 55- | 4 UOX - 4 ADS |

Tab. 4: Szenario für den Einsatz von ADS-Burnern in einem Pool von ursprünglich 8 LWR-UOX-Reaktoren

schen dem 20. und bereits dem 86. Jahr sind – auf 1 GWe bezogen – 16 t Plutonium vernichtet worden bzw. sind nicht entstanden.

Spätere Analysen des Forschungszentrums Karlsruhe [35] haben gezeigt, dass bessere neutronenphysikalische Rechenverfahren nicht eine Pu-Vernichtungsrate von 650 kg Pu pro GWe·a, sondern nur 580 kg Pu pro GWe·a ergeben. Diese Ergebnisse würden die in Abb. 6 gezeigte Zeit für die Plutonium-Vernichtung zeitlich etwas verlängern.

Die durch das erzeugte U-233 entstehende Proliferationsgefahr ist ähnlich wie für Pu-239. Allerdings kann man durch Zuschaltung geringer Mengen von U-238 bzw. abgereichertem Uran zum ursprünglichen Th-Pu-Brennstoff direkt ein U-233/U-238 Gemisch erzeugen, das nach chemischer Trennung von Thorium (Thorex-Prozess) als Brennstoff in Reaktoren eingesetzt werden kann, jedoch als waffensfähiges Material untauglich ist.

Folgerung:

Mit den obigen Szenarien, deren Ergebnisse in Abb. 4 bis Abb. 6 dargestellt sind, wurde gezeigt, dass für ein Szenario zeitlich konstanter Kernenergieerzeugung durch Einsatz der Wiederaufarbeitung und der Mehrfachzyklierung durch Zubau von LWR-Pu-Burnern bzw. CAPRA-Burnern oder ADS-Reaktoren mit schnellem Neutronenspektrum die im Reaktorsystem zeitlich sich ansammelnde Plutoniummenge minimiert werden kann. Dies gilt auch unter Berücksichtigung, dass ein Teil des entstandenen Plutoniums im Inventar der LWR-Pu-Burner oder CAPRA-Reaktoren oder ADS-Reaktoren und in deren Brennstoff-Kreislauf gespeichert ist. Bei weiterem Zubau von CAPRA-Reaktoren oder ADS-Reaktoren würde noch mehr Plutonium vernichtet. Die Pu-Vernichtung gelingt umso besser, je geringer das Pu-Kerninventar der Pu-Vernichtungsreaktoren haben und je größer deren Pu-Vernichtungsrate pro GWe·a ist.

4.4 Vernichtung von vorhandenem gespeichertem Plutonium

Wir wollen nun die Problemstellung ändern und statt von einem Szenario mit

konstanter Leistung – erzeugt durch LWRs und Zubau von Plutonium-Vernichtungsreaktoren – uns die Frage stellen: In welcher Zeit kann man eine bestimmte vorhandene Pu-Menge vernichten? Dies wäre z.B. der Fall für die je 34 t Waffenplutonium, die von den USA und Russland aus dem militärischen Programm herausgenommen werden sollen oder wenn man die Kernenergienutzung ab einem bestimmten Zeitpunkt beenden möchte.

Wir betrachten ein passendes System mit 3 CAPRA-Burnern mit je 1 GWe Leistung, mit den zuvor beschriebenen Eigenschaften und ein anfängliches gespeicherte Plutoniumstartinventar von 150 t. Die 3 CAPRA-Burner speichern zunächst als Kern-Inventar und in ihrem Brennstoffkreislauf etwa 120 t Pu. Wir legen in einen Plutoniumspeicher die verbleibenden 30 t Plutonium an und halten sie für Nachladungen im Brennstoffkreislauf bereit. Aus Abb. 7 ergibt sich, dass während der ersten 40 Jahre 60 t Plutonium vernichtet werden, dass aber der Plutoniumspeicher nach 20 Jahren aufgebraucht ist und für Nachladungen in der MOX-Brennelementfertigung in den nächsten 20 Jahren weitere 30 t U-235 zugeladen werden müssen (Der Brennstoff würde dann etwa zur Hälfte mit U-235 und zur Hälfte mit Plutonium angereichert). Danach muss ein CAPRA-Reaktor und sein Brennstoffkreislauf stillgelegt werden, um das Plutonium aus seinem Kreislauf für die Nachladungen der verbliebenen zwei CAPRA-Reaktoren verfügbaren zu machen.

Nach 120 Jahren haben die 3 CAPRA-Burner die letztlich auf 1 CAPRA-Burner reduziert wurden, über 140 t Plutonium vernichtet. Will man – ohne Zu-kauf und späteren Verkauf von Plutonium – die Vernichtungskampagne weiterführen, so muss man letztlich zu immer kleineren (weniger Kerninventar) CAPRA-Burnern übergehen oder ADS-Burner einsetzen.

Damit wurde gezeigt, dass Plutonium einer bestimmten Menge, im vorliegenden Beispiel 150 t, im Prinzip über einen Zeitraum von mehr als 100 Jahren durch CAPRA-Burner vernichtet werden kann.

Dies lässt sich mit ADS-Burnern leichter erreichen, da bei ihnen die Kritikalitätsbedingung entfällt. Mit 2 solchen 1 GWe unterkritischen ADS-Burnern können innerhalb von 96 Jahren von 141 t Plutonium etwa 121 t vernichtet werden. Für den verbleibenden Rest des Plutoniums kann zunächst ein ADS-Burner-System abgeschaltet und dessen Inventar und Inhalt seines Brennstoffkreislaufs für die weitere Vernichtung im verbleibenden ADS-Burner-System verfügbar gemacht werden. Für die weitere Minimierung müsste man eine ähnliche Prozedur wie oben für die CAPRA-Burner, d.h. Verkleinern des Pu-Inventars, mit ADS-Burnern verfolgen.

5 Bemerkungen zu den Szenarien

Die oben beschriebenen Szenarien zur Vernichtung von Plutonium setzen einen geschlossenen Brennstoffkreislauf, d.h. Mehrfachzyklierung des Plutoniums, voraus. Die

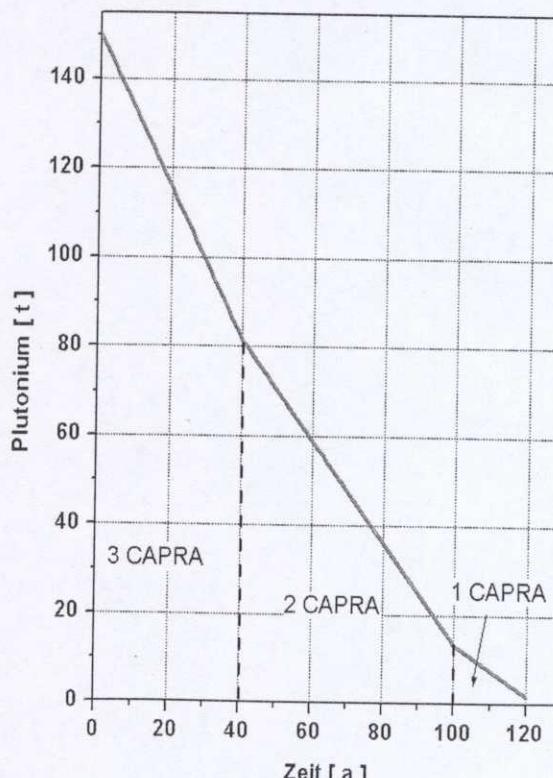


Abb. 7: Vernichtung von 150 t Plutonium durch CAPRA-Reaktoren

Verlustrate von Plutonium während der Wiederaufarbeitung muss gegenüber heute noch weiter gesenkt werden, um möglichst wenig in den Abfällen endzulagern (Abb. 2, Kap.3.2). Ansätze dazu sind vorhanden (elektrochemische und pyrometallurgische Wiederaufarbeitungsverfahren). Bei der MOX-Brennelementfertigung müssen wegen der sich ändernden Isotopenzusammensetzung bei mehrfach rezykliertem Plutonium technisch anspruchsvollere Verfahren (stärkere Abschirmung, Fernbedienungstechnik) eingesetzt werden. Dies ist technisch machbar. Neue Reaktorsysteme, wie z.B. CAPRA-Burner müssen erprobt werden. Beschleuniger-getriebene untkritische Einrichtungen sind zurzeit noch nicht vorhanden. Die Arbeiten hierzu laufen international mit großer Anstrengung.

Die obigen Szenarien beschreiben eine praktisch vollständige Vernichtung des Plutoniums. Verbleibende Restmengen können zusammengefasst und in kleineren CAPRA- oder ADS-Systemen vernichtet werden.

6 Zusammenfassung

Heute werden weltweit zwei Entsorgungswege für abgebrannte Brennelemente aus Kernkraftwerken beschritten. Zum einen die Einmalrezyklierung, d.h. die Wiederaufarbeitung und der Wiedereinsatz des dabei abgetrennten Plutoniums in Form von Mischoxid-Brennelementen. Zum andern die Direkte Endlagerung der abgebrannten Brennelemente. Beide Entsorgungswege führen nicht zu einer Vernichtung des Plutoniums, sondern zu großen Plutoniummengen im Endlager. Die Vernichtung des Plutoniums aber auch von anderen langlebigen Radionukliden ist nur durch die Mehrfachrezyklierung und durch den Einsatz von speziellen, Plutonium verbrauchenden Reaktoren, wie Leichtwasserreaktoren mit vollständiger MOX-Beladung, CAPRA-Reaktoren oder Beschleuniger getriebenen Einrichtungen (ADS) möglich.

Durch Kombination von Leichtwasserreaktoren mit Uranoxid-Brennstoff mit Plutonium-Burnern lässt sich bei gleichbleibender Energieerzeugung zunächst ein Gleichgewicht zwischen Plutoniumproduktion und -verbrauch einstellen. Erhöht man den Anteil an Plutonium-Burnern, so wird mehr Plutonium verbraucht als entsteht. Ebenso lassen sich Plutonium-Burner zu Vernichtung von vorhandenen Plutonium-Beständen einsetzen. Voraussetzung für die Realisierung dieser Szenarien ist die Etablierung fortgeschrittener Wiederaufarbeitungs-, Brennelementfertigungs- und Reaktortechnologien. Aus heutiger technischer Sicht erscheint dies realisierbar.

7 Literatur

- [1] IAEA-Worldatom – Nuclear Power Plant Information (2000)
- [2] D. Albright, F. Berkhout, W. Walker: „World Inventory of Plutonium and Highly Enriched Uranium“. Stockholm International Peace Research Institute, Oxford University Press, Oxford (1993)
- [3] J. I. Kim, K. Gompper, K.D. Closs, G. Kessler, D. Faude: German Approaches to Closing the Nuclear Fuel Cycle and Final Disposal of HLW Journal of Nuclear Materials 238 (1996) 1-10
- [4] W. Walker: „World Inventories of Plutonium“ in Managing the Plutonium Surplus: Applications and Technical Options, edited by R.L.Garwin et al., Nato ASI Series, Kluwer Academic Publishers, London (1994)
- [5] US and Russia agree to plutonium disposal, Nuclear News, p. 100, August 2000
- [6] Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategies: Adjusting to New Realities, IAEA-Proceeding Series, International Atomic Energy Agency, Wien (1997)
- [7] Status and trends in spent fuel reprocessing; Proceedings of an Advisory Group meeting held in Vienna, 7-10 September 1998, IAEA, Wien (1999)
- [8] G. Kessler, J. I. Kim, K. Gompper: „Wohin mit dem deutschen Plutonium“ atw – Internationale Zeitschrift für Kernenergie, 44 (1999) S. 156 - 164
- [9] National Academy of Sciences: Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium, Committee on International Society and Arms Control
National Academy Press, Washington DC, USA, 1994.
- [10] National Academy of Sciences: Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium: Reactor Related Options, Committee on International Society and Arms Control
National Academy Press, Washington DC, USA, 1995.
- [11] R. L. Garwin, M. Grubb, E. Matanle (eds.): Managing the Plutonium Surplus: Applications and technical Options, NATO ASI Series, Kluwer Academic Publishers (1994)
- [12] E. T. Merz, C. E. Walter (Eds.): Disposal of Weapons Plutonium, Approaches and Prospects, NATO ASI Series, Kluwer Academic Publishers (1996)
- [13] E. R. Merz, C. E. Walter (Eds.): Advanced Nuclear Systems Consuming Excess Plutonium, NATO ASI Series, Kluwer Academic Publishers (1997)
- [14] Management of Separated Plutonium - The Technical Options;
Nuclear Energy Agency, OECD (1997)
- [15] Safe Handling and Storage of Plutonium, Safety reports Series No. 9, International Atomic Energy Agency, Wien (1998)
- [16] W. Stoll: What are the Options for Disposition of Excess Weapons Plutonium?, Mat. Res. Soc. Bull. 23 (1998)
- [17] W. L. Gong, W. Lutze, R.C. Ewing: Zirconia Ceramics for Excess Weapons Plutonium Waste, J. Nucl. Mat. 277 (2000)
- [18] 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 des Öko-Instituts e.V., Darmstadt, im Auftrag der Freien und Hansestadt Hamburg (1999)
- [19] IAEA-Report of the Advisory Group Meeting on Safeguards for Final Disposal of Spent Fuel in Geological Repositories, AGM 995, Wien, Dez. 1997
- [20] H. Kranz, H.H. Remagen, K. Rudolf: The German Approach on Safeguards for the Final Disposal of Spent Nuclear Fuel in a Salt Dome; Proceedings DISTEC '98, Hamburg (1998)
- [21] W. E. Kastenberg et al.: Considerations of Autocatalytic Criticality of Fissile Materials in Geologic Repositories, Nuclear Technology, 115, 1996
- [22] R. Papp: GEISHA – Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein, Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-PTE Nr. 3, 1997
- [23] C.H.M. Broeders: Investigations related to the Build-up of Transurania in Pressurized Water Reactors, FZKA 5784 (1996)
- [24] C. H. M. Broeders et al.: Advanced nuclear systems consuming excess plutonium, Kluwer Acad. Publ. 1997
- [25] M. Salvatores et al.: Nuclear waste transmutation, International Reactor Physics Conference, Tel Aviv, June 1994
- [26] J. L. Guillet, J.P. Grouiller: Studies of Nuclear materials recycling in Conventional and Advanced reactors, atomwirtschaft-atomtechnik, 44 (1999) 472
- [27] G. Kessler: Quadrilaterale Meeting der Reaktorsicherheitskommissionen USA, Deutschland, Frankreich, Japan, Tokyo, Okt. 1998
- [28] W. Häfele: Umgang mit Plutonium, Die internationale Gemeinschaft vor schwierigen Entscheidungen, Zeitschrift für internationale Politik, Bonn, Okt. 1999
- [29] RT/SIS/CAPRA 94-001, interner Bericht CEA-DRN-DER, 1994
- [30] C. D. Bowman et al.: Nuclear Energy Generation and Waste Transmutation using an Accelerator-Driven-Intense Thermal Neutron Source, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1320 (1992)
- [31] C. Rubbia et al.: Fast Neutron Incineration in the Energy Amplifier as Alternative for Geologic Storage, CERN/LHC/97-01
- [32] M. Salvatores: Accelerator Driven Systems (ADS), physics principles and specificities, Journal de Physique IV (Proceedings) Vol. 9, Pr 7, July 1999
- [33] I. Broeders, C.H.M. Broeders: Implementation, Development, Validation and First Applications of Different Code Claims for the Investigation of Accelerator-Driven Transmutation
ICENES '96, Obninsk, Russia (1996)
- [34] C.H.M. Broeders, I. Broeders: Neutronenphysikalische Analysen von beschleuniger-getriebenen untkritischen Anordnungen, Nachrichten-Forschungszentrum Karlsruhe, 29 (1997) 277
- [35] C. Broeders, I. Broeders: Transmutation mit Leichtwasserreaktoren und Beschleunigern, PSF-Jahresbericht 1995, Forschungszentrum Karlsruhe, 1996