

August 2002
(Rev. Nov. 2002)

**Hintergrundinformation zu einem
aktuellen Thema**

Plutonium - wohin damit?

1. Einleitung
2. Einige Begriffe
3. Plutoniummengen
4. Was soll mit Plutonium geschehen?
5. Wirtschaftliche Aspekte
6. Wie gehen verschiedene Länder mit diesem Problem um?
7. Schlussfolgerung

1. Einleitung

Anlass für die Hintergrundinformation "Plutonium" vom November 1994 waren Schmuggelaktivitäten mit radioaktiven Materialien, darunter auch Plutonium. Die Autoren Dr. M. Keller und B. Anet behandelten Fragen bezüglich Herkunft, Gefährdung der Gesundheit und der Verwendung von Plutonium zum Bau einer Atombombe. Die Aspekte anderer Verwendungsmöglichkeiten beziehungsweise der Entsorgung wurden nicht behandelt. Gerade die Entsorgung verursacht heute Kopfzerbrechen.

Die Plutoniummengen aus der zivilen Nuklearindustrie oder aus den militärischen Kernwaffenkomplexen der Nuklearwaffenstaaten, nicht zuletzt als Folge der an sich erfreulichen nuklearen Abrüstung, sind riesig angewachsen und stellen aus der Sicht vieler Experten eine grosse Proliferationsgefahr (Proliferation = Weiterverbreitung) dar. Andererseits ist Plutonium ein Rohstoff für die Kernenergieproduktion. Es stellen sich die Fragen: Wie konnte es überhaupt zu solchen Plutoniummengen kommen? Ist dies nun vor allem Abfall, der proliferationsicher entsorgt werden muss oder kann Plutonium als wertvoller Rohstoff weiter verwendet werden? Ist eine Weiterverwendung überhaupt wirtschaftlich? Welche Möglichkeiten gibt es zur Entsorgung? Die vorliegende Hintergrundinformation versucht Antworten auf diese aktuellen und weltweit diskutierten Fragen zu geben.

Zum besseren Verständnis sei dem Leser empfohlen, auch die Hintergrundinformation "Plutonium" vom November 1994 zu konsultieren.

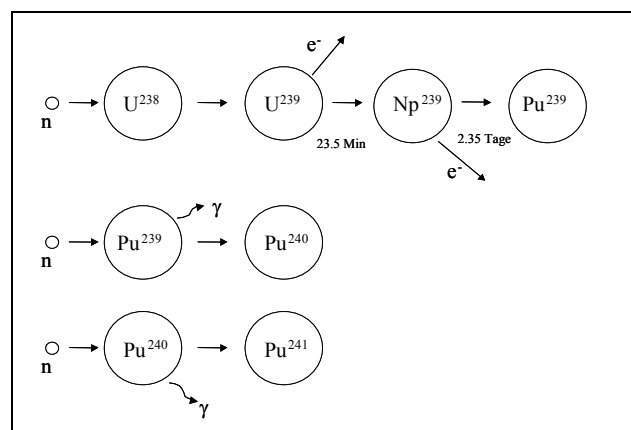
(http://www.vbs.admin.ch/ls/d/h_info/plutonium/index.htm).

2. Einige Begriffe

Was ist Plutonium?

Plutonium ist das chemische Element mit der Ordnungszahl 94. Jeder Plutoniumkern enthält 94 Protonen (positiv geladene Teilchen). Die Kerne eines Elementes können unterschiedlich viele Neutronen (ungeladene Teilchen) enthalten, man spricht dann von verschiedenen **Isotopen**. Der Kern des Plutoniumisotops Pu^{239} beispielsweise enthält 145 Neutronen und 94 Protonen.

Wie entsteht Plutonium?



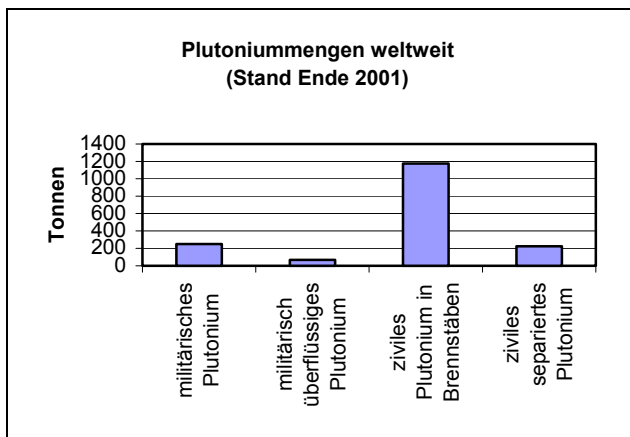
Figur 1: Die Einfangreaktion eines Neutrons im häufigsten Uranisotop U^{238} führt zu U^{239} , das sich innert Tagen mit der Zwischenstufe Np^{239} (Neptunium) in Pu^{239} umwandelt. Weitere Einfangreaktionen führen zu den Plutoniumisotopen Pu^{240} , Pu^{241} und Pu^{242} . Auch das Isotop Pu^{238} entsteht aus einer Kette von Neutronenabsorptionen und radioaktiven Zerfällen, allerdings steht hier das Uranisotop U^{235} am Anfang.

Die in einem Kernreaktor reichlich vorhandenen Neutronen können von Urankernen eingefangen werden. Der Urankern zerfällt dann über einen Zwischenschritt zu einem Plutoniumkern. Die Figur 1 skizziert den Entstehungsmechanismus einiger Plutoniumisotope. Je nach Art des Reaktors und nach der Aufenthaltszeit der Brennstäbe im Reaktor sieht die prozentuale Zusammensetzung der Plutoniumisotopenmischung anders aus.

3. Plutoniummengen

Wie viel gibt es?

Für den Bau von **Kernwaffen** wurden weltweit zirka 250 Tonnen Plutonium produziert. Am 1. September 2000 haben die USA und Russland ein Abkommen unterzeichnet, wonach beide Seiten je 34 Tonnen Plutonium aus ihren Kernwaffen entsorgen werden. Das ist mehr als 10'000 mal soviel Plutonium, wie in der am Ende des zweiten Weltkriegs über Nagasaki abgeworfenen Bombe vorhanden war. Sollten die beiden Staaten tatsächlich bis auf je einige tausend Nuklearsprengköpfe abrüsten, so würden zusätzlich etwa 100 Tonnen Plutonium entsorgt werden müssen. Zu diesen riesigen Mengen an "militärischem" Plutonium kommen noch grössere Mengen an "**zivilem**" Plutonium. In zivilen Reaktoren wurden bisher weltweit etwa 1'400 Tonnen Plutonium erzeugt. Die zivile Plutoniummenge nimmt jedes Jahr um ca. 70 Tonnen zu. Der grösste Teil dieses Plutoniums, ca. 1'200 Tonnen, befindet sich noch im hochradioaktiven, abgebrannten Kernbrennstoff. Etwa 225 Tonnen liegen in separierter Form vor. Sie wurden in einem komplizierten chemischen Prozess, in sogenannten Wiederaufbereitungsanlagen, von allen anderen Materialien im Brennstab getrennt.



Figur 2: Plutoniummengen, Stand Ende 2001.

Die gesamte Menge an zivilem Plutonium (1'400 Tonnen) entspricht etwa einem Würfel von 4.1m Kantenlänge, die separierte Menge Plutonium aus zivilen Reaktoren entspricht der Menge, die in einem Würfel von 2.2m Kantenlänge Platz hätte.

Warum gibt es so viel ziviles, separiertes Plutonium?

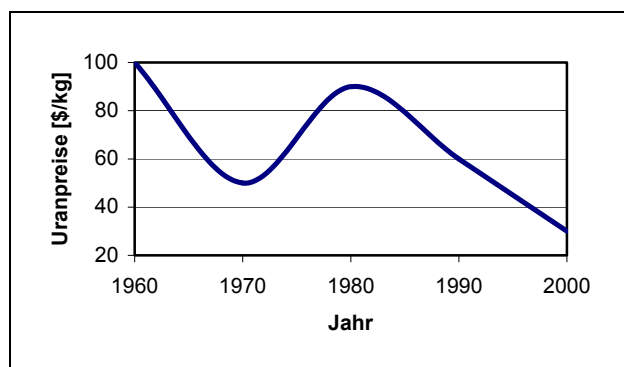
In den sechziger Jahren und bekräftigt durch die Ölkrise in den siebziger Jahren wurde mit einer

weltweiten Zunahme der Stromproduktion in Atomkraftwerken und damit auch mit einer Verknappung und Verteuerung von Uran gerechnet.

In dieser Situation wurde die Idee verfolgt, durch den Einsatz von sogenannten "schnellen Brütern" das Uran sehr viel effizienter zu nutzen. Dieser Reaktortyp produziert Energie auf der Basis der Spaltung von Plutoniumkernen, ist aber gleichzeitig so konfiguriert, dass auch Plutonium für den weiteren Betrieb des Reaktors "erbrütet" wird. Das in den üblichen kommerziellen KKW's (meistens Leichtwasserreaktoren¹) entstehende Plutonium hätte separiert und in den schnellen Reaktoren eingesetzt werden sollen. Eine weitere Idee ist, in den Leichtwasserreaktoren einen Teil des Urans durch Plutonium zu ersetzen. Abgebrannte Brennstäbe aus zivilen Reaktoren enthalten typischerweise ca. 96% Uran, 3% Spaltprodukte und knapp 1% Plutonium. Abfall sind bloss die Spaltprodukte. Uran und Plutonium, also etwa 97% des Materials aus abgebrannten Brennstäben, können nach der Abtrennung von den Spaltprodukten der Fabrikation von neuen Brennelementen zugeführt werden. In etlichen Leichtwasserreaktoren wurde daher begonnen, Brennstäbe, die Plutonium und Uran enthalten, sogenannte MOX² Stäbe, einzusetzen.

Aus diesen Gründen wurden Wiederaufbereitungsanlagen gebaut (Windscale 1969, La Hague 1966, Marcoule 1958, US West Valley 1966) und langfristige Verträge zur Separation von Plutonium aus abgebranntem Brennstoff abgeschlossen.

Weltweit wurden jedoch viel weniger Kernkraftwerke gebaut als noch vor einigen Jahrzehnten angenommen. Die Urannachfrage stieg demzufolge nicht im erwarteten Ausmass an. Auch militärisch wird kein neues Uran mehr gebraucht, es werden im Gegenteil grosse Mengen Uran (nach entsprechender Anreicherung) verkauft und zu Brennstäben verarbeitet. Weil sich zudem die leicht abbaubaren Uranvorkommen grösser als erwartet erwiesen, sank der Uranpreis massiv von 100\$ im Jahre 1960 auf momentan etwa 30\$ für 1kg Uran (Preisbasis: \$ von 1995).



Figur 3: Entwicklung des Uranpreises in den letzten 40 Jahren.

¹ In Leichtwasserreaktoren wird normales Wasser zur Kühlung und zum Abbremsen der Neutronen verwendet.

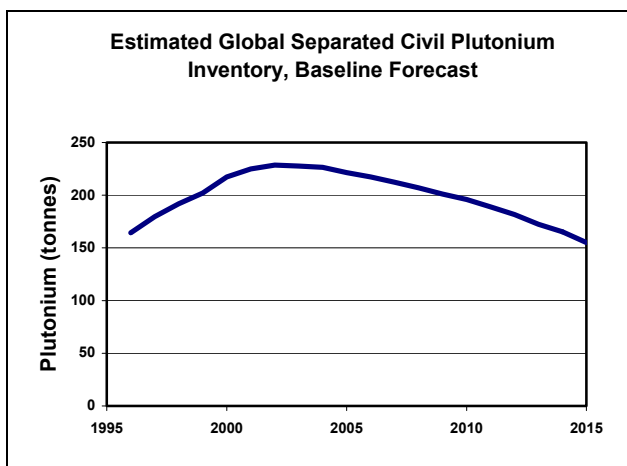
² **Mixed OXide**

Schnelle Brüter sind unter diesen Umständen nicht wirtschaftlich; ganz zu schweigen von den technischen Schwierigkeiten und der grossen Ablehnung in der Öffentlichkeit. Daher wird in den USA und Westeuropa auf schnelle Brüter verzichtet. Die Anlagen in Kalkar, Deutschland, in Dounreay, England und der Superphénix in Creys-Malville, Frankreich wurden stillgelegt. Monju in Japan steht seit 1995 aufgrund eines Unfalls, vielleicht definitiv, still.

Trotz reduzierter Nachfrage wird aber weiterhin Plutonium aus den Brennstäben separiert, da dies in sogenannten "baseload Verträgen" zwischen den Kernkraftwerken und den Aufbereitungsanlagen vereinbart worden ist. Zudem bestanden zeitweise Engpässe in der MOX Herstellung. Nicht alle Kernkraftwerke, die lizenziert sind MOX einzusetzen, bekamen auch genügend MOX. Letzteres könnte sich mit der im Oktober 2001 erfolgten Lizenzerteilung an die MOX Fabrikationsanlage (SMP) in Sellafield ändern, welche die weltweite MOX Produktionskapazität um knapp 50% erhöht.

Wie sehen die Prognosen aus?

Der Verzicht auf neue Separation sowie vermehrter MOX Einsatz könnten in Zukunft zu einer Abnahme der separierten zivilen Plutoniummengen führen.



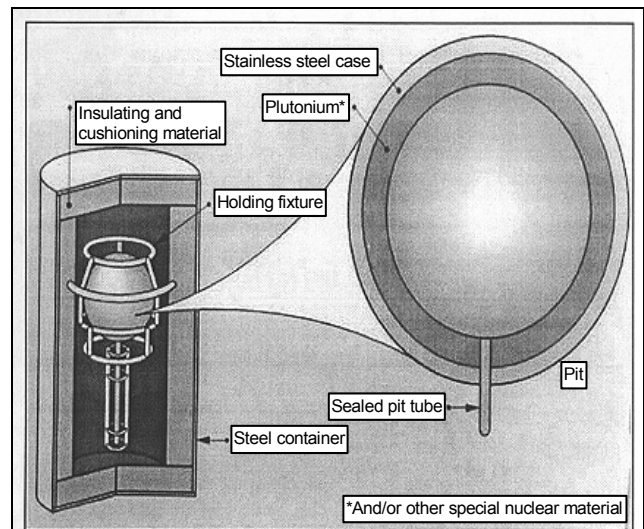
Figur 4: Im Juni 2000 schätzte ISIS (Institute for Science and International Security) den Verlauf der weltweit vorhandenen zivilen separierten Pu Mengen ab. Es gibt auch pessimistischere Schätzungen, die zwar ab 2002 einen flacheren Anstieg, aber auch später keine Abnahme der Mengen vorhersagen.

4. Was soll mit Plutonium geschehen?

Weltweit herrscht die Auffassung, dass Plutonium **proliferationssicher** sein muss, das heisst, es muss verhindert werden, dass Plutonium in falsche Hände gelangt. Es gibt, grob gesagt, drei Stufen, dieses Problem anzugehen. Die erste Stufe besteht in der sicheren Lagerung auf unbestimmte Zeit, die zweite im Herstellen des Zustandes der "minimalen Zugänglichkeit" und die dritte soll Plutonium für alle Zeiten vor jeglichem Zugriff schützen oder gar aus der Welt schaffen.

Stufe 1: Lagerung auf unbestimmte Zeit

Beim **militärischen**, nicht mehr gebrauchten Plutonium wird in einem ersten Schritt der Pu-"Pit" aus dem Sprengkopf ausgebaut und gelagert (Figur 5). Es bleibt so die maximale Flexibilität bezüglich zukünftiger ziviler Verwendung oder Entsorgung erhalten. Leider besteht aber auch die Möglichkeit, das Plutonium schnell wieder in Nuklearwaffen einzubauen.



Figur 5: Schematische Darstellung des Lagerungsbehälters eines Plutoniumpits. Mehr als 12'000 solcher Pits werden im Nuklearwerk Pantex in Amarillo, Texas unter strengsten Sicherheitsvorkehrungen aufbewahrt.

Die Glaubwürdigkeit von Abrüstungsbemühungen würde sicher erhöht, wenn das für überflüssig erklärte militärische Plutonium gleich wie das zivile Plutonium der Kontrolle durch die IAEA (International Atomic Energy Agency) unterstellt würde. Vermutlich müssten dazu die Pits aus Geheimhaltungsgründen vorher umgeschmolzen werden. Ende 2000 befanden sich nur gerade zwei Tonnen Plutonium aus Nuklearwaffen unter IAEA "safeguards", das heisst die IAEA weiss wo sich das Material befindet. Sie schreibt vor wie es gelagert und gesichert werden muss und führt regelmässige Kontrollen durch.

Bei separiertem, **zivilem** Reaktorplutonium entstehen durch zu lange Lagerung zusätzliche Probleme. Das Reaktorplutonium enthält mehr Pu^{241} als Waffenplutonium. Dieses Pu^{241} zerfällt in Am^{241} (Americium), welches ein starker γ -Strahler ist und die direkte Verarbeitung von Reaktorplutonium zu Brennelementen schon nach wenigen Jahren Lagerung verunmöglicht. Um die Spezifikationen der MOX-Produktionsanlagen wieder zu erfüllen, müsste das Americium zuerst vom Plutonium getrennt werden. (Kostenangabe 1994: 10\$ bis 28\$ pro Gramm Pu) Auch separiertes, ziviles Plutonium erfordert wegen der Proliferationsgefahr extrem gute Sicherungs- und Überwachungsmassnahmen. Die Kosten zur sicheren Lagerung werden auf 1\$ bis 5\$ pro Gramm Plutonium und pro Jahr geschätzt.

Stufe 2: Minimale Zugänglichkeit

1994 wurde eine Minimalanforderung für die Unzugänglichkeit von Plutonium aus Nuklearwaffen, der sogenannte "**spent-fuel standard**", definiert.

"spent-fuel standard"

"Make plutonium roughly as inaccessible for weapons use as the much larger stock of plutonium in civilian spent fuel": Plutonium soll für den Gebrauch in Nuklearsprengkörpern etwa so unzugänglich gemacht werden, wie dasjenige in abgebrannten zivilen Brennstäben

Plutonium ist zwar radioaktiv, die hauptsächlich vorhandene α -Strahlung ist aber zu kurzreichweitig und die β -, γ - und die Neutronen-Strahlungen sind zu schwach, um das Plutonium durch die Eigenstrahlung ausreichend vor unberechtigtem Zugriff zu schützen. Die γ -Strahlung in abgebrannten Brennstäben ist jedoch auch nach Jahrzehnten noch 100 bis 1000 mal stärker als die von Plutonium. Dank dieser Strahlung ist das in abgebrannten Brennstäben enthaltene Plutonium sehr viel besser vor Zugriff geschützt als separiertes Plutonium. Die etwas schwammige Definition des Standards gab zu Diskussionen Anlass. Schliesslich gibt es verschiedene Reaktortypen, verschiedene Brennstoffzusammensetzungen, verschieden grosse Abbrände³ und die abgebrannten Brennstäbe unterscheiden sich dementsprechend in ihren Strahlungseigenschaften stark. Als spent-fuel standard wird nun 30 Jahre alter Brennstoff aus einem Leichtwasserreaktor mit einem Abbrand von 33'000 [MWd/t]⁴ genommen.

Zum Erreichen dieses "spent fuel standards" für separiertes Plutonium gibt es grundsätzlich zwei Varianten, das "Verbrennen" von **MOX** in einem Reaktor, und die **Immobilisierung**.

A: MOX (Mixed OXyde) Stäbe bestehen hauptsächlich aus Uranoxyd und zu etwa 6 bis 7% aus Plutoniumoxyd.

Etwa 1/3 der Uranoxyd Brennstäbe eines derzeitigen Leichtwasserreaktors können durch MOX Brennstäbe ersetzt werden. In den MOX Stäben wird mehr Plutonium gespalten als neues erzeugt. Diese Abnahme wird durch den Plutonium Zuwachs in den Uranoxyd Stäben ungefähr kompensiert. Nach dem Abbrand ist das Plutonium in MOX und das neu erzeugte Plutonium im Uranoxyd von radioaktiven Spaltprodukten umgeben, entspricht damit dem "spent fuel standard". Das Plutonium in abgebranntem MOX ist von einer ungünstigen Isotopenzusammensetzung sowohl für Waffenzwecke als auch für einen erneuten Reaktoreinsatz.

³ Der Abbrand gibt an wie viel Energie mit einer bestimmten Brennstoffmenge erzeugt worden ist. Je höher der Abbrand, desto mehr Spaltprodukte befinden sich im abgebrannten Brennstoff.

⁴ Eine gebräuchliche Einheit für den Abbrand ist Megawatttage pro Tonne Brennstoff [MWd/t]

Die MOX Lösung ist nicht unbestritten. Nachfolgend einige Argumente für oder gegen diese Methode:

Argumente für MOX
<ul style="list-style-type: none">- Die Plutoniumlager entsprechen einem riesigen Energiepotential, das nicht weggeworfen werden soll.- Verminderung des Proliferationsrisikos, durch "Verbrennen" von Plutonium aus Waffenproduktion.- Mehr als 30 Jahre unfallfreie Erfahrung mit MOX
Argumente gegen MOX
<ul style="list-style-type: none">- Mehr Transporte mit Plutonium- Die totale Menge Plutonium im Reaktor ist erhöht, die Folgen eines schweren Unfalls wären daher schlimmer.- Die Herstellung von MOX Brennstäben ist wegen der höheren Radioaktivität von Pu und wegen aufwändigeren "safeguards" teurer als die von herkömmlichen Brennstäben aus Uran.- Wegen erhöhter Restzerfallswärme ist für abgebranntes MOX etwa 150 Jahre Zwischenlager notwendig, im Gegensatz zu zirka 50 Jahren bei normalen Uranbrennstäben.

B: Immobilisierung als "can in canister" ist eine von mehreren Immobilisierungsmethoden. Das Plutonium wird dabei in chemisch stabiles, keramisches Material eingebettet. Daraus werden flache Zylinderscheiben (Durchmesser ca. 7cm, Höhe ca. 2.5cm) hergestellt. Diese werden aufeinander gestapelt und in Glas eingegossen, welches mit hochradioaktiven Materialien vermischt worden ist. Das einst mit viel Aufwand separierte Plutonium wird also wieder mit Spaltprodukten zusammengebracht und als Abfall endgelagert.

Welche Methode nun günstiger, sicherer, schneller und damit besser geeignet ist, das separierte Plutonium proliferationsresistenter zu machen, lässt sich nicht abschliessend beurteilen. In den meisten Ländern fällt oder fiel der Entscheid zugunsten der MOX Variante aus.

Egal ob immobilisiert oder als MOX in einem Reaktor verwendet, in jedem Fall existiert am Schluss das Problem, geeignete Lagerstätten zu finden, in denen das Plutonium zusammen mit den radioaktiven Abfällen sicher endgelagert werden kann. Offenbar wird aber überall nur mittel- oder langfristig zwischengelagert.

Das weltweit erste geologische Endlager für zivile radioaktive Abfälle könnte Yucca Mountain im US-Staat Nevada sein, doch auch dieses wird wohl kaum wie ursprünglich geplant schon im Jahre 2010 in Betrieb genommen werden können, regt sich doch grosser Widerstand seitens der Bevölkerung von Nevada.

Stufe 3: Plutonium für alle Zeiten vor jeglichem Zugriff schützen

Plutonium, das den "spent fuel standard" erfüllt, birgt ein kleineres Proliferationsrisiko als separiertes Plutonium. Das Plutonium ist aber immer noch vorhanden und könnte mit aufwändigen chemischen Methoden von den hochradioaktiven Spaltprodukten getrennt werden. Wenn mehr als der "spent fuel standard" erreicht werden soll, dann müsste dies konsequenterweise nicht nur für das separierte Plutonium (ziviles und militärisches), sondern auch für die viel grössere Menge in den abgebrannten Brennstäben realisiert werden.

Kann Plutonium für alle Zeiten vor jeglichem Zugriff geschützt werden?

Dazu gibt es die verschiedensten, zum Teil verrücktesten Ideen und Vorschläge: Zunächst sind da diverse Methoden zu erwähnen, mit denen das Plutonium zwar nicht vernichtet, dafür aber so verteilt wird, dass es unerreichbar sein sollte:

- In den Weltraum / in die Sonne schießen
- Im Meer verteilen
- Plutonium wird im Untergrund um eine Atombombe herum angeordnet. Die Atombombe wird gezündet und die nukleare Explosion verteilt das Plutonium im umliegenden Gestein.

Keine dieser Ideen wird vernünftigerweise ernsthaft verfolgt. Ihre Ausführung wäre zu gefährlich für Mensch und Umwelt, zu teuer, zu langsam...

Der einzige Weg Plutonium zu zerstören, besteht darin, es zu spalten oder allenfalls geradzahlige Plutoniumisotope (Pu^{238} , Pu^{240} , Pu^{242} ..) in ungeradzahlige (Pu^{239} , Pu^{241} , Pu^{243} ..) zu verwandeln (Transmutation), um diese dann zu spalten. Dies kann nur in einem Reaktor, einem reaktorähnlichen System oder mit Hilfe eines Beschleunigers geschehen.

Nachfolgend einige der möglichen Verfahren:

- LWR (Leichtwasserreaktoren)

Damit in Leichtwasserreaktoren Plutonium vernichtet werden kann, müssen mehr als 1/3 der Brennstäbe aus MOX bestehen. Es ist möglich, Leichtwasserreaktoren zu bauen, die 100% MOX Stäbe enthalten. Diese Reaktortypen benötigen mehr und effizientere Kontrollstäbe als herkömmliche Leichtwasserreaktoren. Die in diesem Reaktortyp hauptsächlich vorkommenden langsamen Neutronen spalten nur Pu Isotope mit ungerader Massenzahl (Pu^{239} , Pu^{241} , Pu^{243} ..).

- Fast reactors (liquid metal reactors, schnelle Brüter)

Diese Reaktoren können so betrieben werden, dass mehr Plutonium verbraucht als erzeugt wird. Dabei spalten die vorwiegend schnellen Neutronen auch die Plutoniumisotope mit gerader Massenzahl (Pu^{238} , Pu^{240} , Pu^{242} ..).

- Non fertile fuel, oder IMF (Inert Matrix Fuel)

Das Uran in den MOX Brennstäben wird durch andere Materialien ersetzt, so dass kein neues Plutonium mehr erzeugt werden kann. Nebst den thermischen Eigenschaften sollten in diesem Ersatzmaterial auch die neutronischen Eigenschaften ähnlich wie diejenigen in MOX oder in Uranoxydstäben sein. Mit einzelnen Brennstäben bestehend aus den Oxiden von Zirkon, Plutonium, Yttrium sowie Erbium wurden in Leichtwasserreaktoren vielversprechende Versuche gemacht. Es gibt jedoch zur Zeit noch keinen Leistungsreaktor, der ausschliesslich uranfreien Plutoniumbrennstoff verwendet.

- Andere Methoden

wie beispielsweise beschleunigerbetriebene Systeme oder gasgekühlte Hochtemperaturreaktoren sind Konzepte, deren Entwicklung, eventuelle Lizenzierung sowie Realisierung noch Jahrzehnte in Anspruch nehmen würden.

Bei allen diesen Verfahren müsste für eine praktisch vollständige Zerstörung von Plutonium wiederholt aufbereitet werden. Dieses wiederholte Aufbereiten, Transportieren und Wiederverwenden von Plutonium würde die Umwelt- und Proliferationsrisiken während einiger Jahrzehnte vielleicht sogar Jahrhunderte erhöhen, bevor sie unter das heutige Niveau absinken.

5. Wirtschaftliche Aspekte

Die Kosten für eine annähernd vollständige Vernichtung von Plutonium würden natürlich stark von der gewählten Methode abhängen und sind extrem schwierig abzuschätzen. Es gibt jedoch umfassende, zuverlässige Angaben darüber, was die teilweise Vernichtung von Plutonium durch einmaliges Aufbereiten und Wiederverwenden kostet. Im Juni 2000 erschien eine vom damaligen französischen Premierminister Jospin in Auftrag gegebene Studie, welche Materialströme, Abfälle und finanzielle Aufwendungen des französischen Nuklearkomplexes untersucht. In Frankreich werden 65 bis 75% der abgebrannten Brennstäbe wieder aufbereitet und der grösste Teil des Plutoniums in 20 Reaktoren in Form von MOX eingesetzt. Die Studie zeigt, dass dies die Plutoniummenge im Abfall der 58 französischen Druckwasserreaktoren um ca. 15 bis 17% reduziert.

Die von Frankreich benötigte Strommenge könnte ohne Wiederaufbereitung und MOX Einsatz wesentlich günstiger produziert werden. Der Vergleich sämtlicher Kosten von der Brennstoffherstellung bis zur Abfallentsorgung liefert folgendes eindruckliche Ergebnis: Jedes dank Aufbereitung und Wiederverbrauch **nicht** in ein allfälliges Endlager gelangende Kilogramm Plutonium kostet die französischen Stromkonsumenten und Steuerzahler umgerechnet mehr als 250'000 SFr.

6. Wie gehen verschiedene Länder mit diesem Problem um?

USA	Aufgrund eines 1977 vom damaligen Präsidenten J. Carter gefällten und immer noch gültigen Entscheides werden in den USA keine zivilen Brennstäbe aufbereitet. Die Entsorgung der 34 Tonnen militärisch nicht mehr gebrauchten Plutoniums sollte ursprünglich auf zwei Arten geschehen. Es war geplant, 8.43 Tonnen zu immobilisieren und 25.57 Tonnen in Reaktoren zu "verbrennen". Die USA wollten sich diese zwei Möglichkeiten offen halten, einerseits weil dies schneller geht, und andererseits um flexibel zu bleiben, falls es aus irgendwelchen Gründen bei einer der beiden Methoden Schwierigkeiten geben sollte. Die Bush Administration favorisiert nun den MOX-Pfad. Im März 2001 wurde die Weiterentwicklung der Immobilisationstechnik bis auf Weiteres suspendiert und im Januar 2002 fiel der Entscheid, die ganzen 34 Tonnen Plutonium zu MOX zu verarbeiten.
Russland	Sieht Plutonium als wertvollen Energieträger an und möchte seine gemäss Vertrag mit den USA, abzubauenen 34 Tonnen militärisches Plutonium nicht wegwerfen. Russland wird wegen der vorrangigen Entsorgung des militärischen Plutoniums seine Vorräte an zivilem Plutonium (zirka 30 Tonnen) in nächster Zeit kaum abbauen können.
England	In Sellafield allein lagern zirka 60t Plutonium. Da schnelle Brüter keine Option mehr sind, bereitet die grosse Menge an Plutonium den Verantwortlichen, den Politikern und der Bevölkerung zunehmend Kopfzerbrechen. Zudem werden in nächster Zeit die Magnox Reaktoren abgestellt werden. Der Anteil an nuklear erzeugtem Strom wird damit von heute 26% auf zirka 3% im Jahr 2020 sinken und kein Plutonium verbrannt werden. Hier hat die Immobilisierungsvariante eine gute Chance, da der MOX-Weg den Bau von neuen moderneren Atomkraftwerken bedingen würde.
Frankreich	59 Kernkraftwerke produzieren 75% des national benötigten Stroms. Etwa 2/3 der abgebrannten Brennstäbe werden wiederaufbereitet und der grösste Teil des Plutoniums in etwa 20 Reaktoren in Form von MOX eingesetzt. Die hohen Kosten sorgen dafür, dass ein Ausstieg aus der Wiederaufbereitung zumindest in Erwägung gezogen wird.
Japan	Japan ist sehr am Einsatz von MOX interessiert und plant, alle seine Leichtwasserreaktoren in Zukunft mit MOX zu beladen. Bis 2010 sollen zirka 20 Reaktoren MOX verbrennen.
Deutschland	Es gibt Erfahrung mit MOX in deutschen AKWs seit den siebziger Jahren. Momentan wird in 11 von 12 dazu lizenzierten Kraftwerken MOX verbrannt. Ein Versuch der deutschen Regierung, aus den existierenden Aufbereitungsverträgen auszusteigen, scheiterte am Widerstand aus Frankreich und England. Nach Juli 2005 jedoch sollen keine Brennstäbe mehr zur Aufbereitung ins Ausland transportiert werden. Der Bundestag hat am 14. Dezember 2001 dem "Gesetz über den Atomausstieg" zugestimmt. Voraussichtlich werden somit die 19 Atomkraftwerke Deutschlands in den nächsten 20 Jahren schrittweise vom Netz genommen.
Schweiz	MOX wird in drei von insgesamt fünf Reaktoren (Beznau I+II und Gösgen) eingesetzt. Ende 2000 gab es folgende Mengen "schweizerischen" Plutoniums: <ul style="list-style-type: none"> - 0.6 Tonnen in unbestrahltem MOX - 8 Tonnen in abgebrannten Brennstäben bei den Reaktoren - 3 Tonnen in zur Wiederaufbereitung ins Ausland geschickten abgebrannten Brennstäben. Der Entwurf des (zukünftigen?) Kernenergiegesetzes enthielt ein Verbot jeglicher Wiederaufbereitung. Der Ständerat (Erstrat) hat im Dezember 2001 das Verbot zu einem zehnjährigen Moratorium abgeschwächt. Im Juni 2002 hat sich der Nationalrat für eine Beibehaltung der Wiederaufbereitung jedoch unter strengen Auflagen ausgesprochen. Das Volk wird voraussichtlich Ende 2003 über das (dann von beiden Räten abschliessend behandelte) Kernenergiegesetz sowie über zwei Moratoriumsinitiativen abstimmen können.

7. Schlussfolgerung

Finanziell lohnen sich die Wiederaufbereitung und das Recycling von abgebrannten Brennstäben überhaupt nicht. Auch die Verminderung der Plutoniummengen im Abfall ist ernüchternd. Uran ist genügend vorhanden und daher sehr günstig. Weil auch der Betrieb von schnellen Brütern für die nächsten Jahrzehnte sicher keine Option ist, gibt es keinen Grund, Plutonium zu separieren. Das Risiko des Stehlens und anschließenden Missbrauchs von abgetrenn-

tem Plutonium ist zwar klein, aber es steigt mit zunehmender Menge und mit Transporten zwischen Aufbereitungsanlagen, Lagerorten, MOX-Fabriken und Reaktoren.

Auch wenn per sofort jegliche Wiederaufbereitung gestoppt würde, würde es Jahrzehnte dauern, bis mit den vorhandenen und geplanten Einrichtungen sämtliches Plutonium den anzustrebenden "spent fuel standard" erfüllt.

Der Autor: Dr. Christoph Wirz