

Auf Basis der gesetzlich festgelegten, zu produzierenden Gesamtstrommenge in Deutschland, wird eine Abschätzung der durch den Reaktorbetrieb anfallenden Reststoffmengen für abgebrannten Uranbrennstoff, Plutonium und Minore Aktiniden vorgenommen. Verschiedene idealisierte Szenarien werden als limitierende Vorgaben betrachtet und mit einem realitätsnahen Szenario verglichen um Auswirkungen von verschiedenen Brennstoffzyklusoptionen für die verbleibende Betriebszeit aufzuzeigen. Insbesondere die Situation bezüglich der Plutoniumreduktion durch Verwendung von Mischoxid (MOX) Brennstoffen wird analysiert. Während im Falle einer durchgängigen direkten Endlagerung am Ende der Betriebszeit rund 160 t Plutonium verbleiben (oberes Limit) kann diese Menge bereits durch einfache Rezyklierung um etwa 40 t reduziert werden. Zweifache Rezyklierung könnte die Plutoniummenge sogar um nahezu 60 t verringern (unteres Limit). Durch die derzeit festgelegten Rahmenbedingungen wird die verbleibende Plutoniummenge bereits um rund 17 t verringert, wobei dieser Wert durch eine Weiterführung der Wiederaufbereitung in die Nähe des möglichen Wertes von 40 t gesteigert werden könnte. Als zusätzliches Szenario werden die Auswirkungen einer Laufzeitverlängerung auf die Aktinidenerzeugung für alle Szenarien betrachtet um eine Grundlage für zukünftige Diskussionen, wie sie in anderen Ländern bereits geführt werden, zu geben.

Anschriften der Verfasser:

Cornelis H.M. Broeders
Retired Senior Scientist of Research
Center Karlsruhe
Grenzstraße 12
76351 Linkenheim-Hochstetten

Bruno Merk
Forschungszentrum
Dresden-Rossendorf
Institut für Sicherheitsforschung
Postfach 51 01 19
01314 Dresden

Auswirkungen von verschiedenen Brennstoffzyklusoptionen auf die anfallenden Aktinidenmengen im deutschen Reaktorpark

Bruno Merk, Dresden und
 Cornelius H.M. Broeders, Linkenheim-Hochstetten

I Einführung

Deutschland befindet sich seit der Gesetzesänderung im Jahre 2002 bezüglich der Kernenergienutzung in einer international besonderen Situation. Nachdem zunächst bis 1994 die Wiederaufbereitung der abgebrannten Reaktorbrennelemente, mit abgeschlossener Plutoniumrückführung, gesetzlich vorgeschrieben war, wurde danach mit dem so genannten Artikelgesetz, einem Zusatz zum Atomgesetz (AtG), die direkte Endlagerung von Kernbrennstoffen als weiterer Entsorgungsweg neben der Wiederaufbereitung zugelassen [1,2]. Durch den so genannten „Atomkonsens“ von 2000/2001 (mit dem „Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren“ [3]) ist jetzt, im Gegensatz zu den meisten anderen Ländern, in denen Kernkraftwerke betrieben werden, die im Kernkraftwerkspark produzierte Gesamtstrommenge genau festgelegt und die Wiederaufbereitung von zusätzlichen Kernbrennstoffmengen seit 2005 eingestellt. Die jetzige Situation lässt eine relativ genaue Abschätzung der anfallenden Mengen an abgebranntem Brennstoff und auch an entstehendem Plutonium und Minoren Aktiniden zu. Gleichzeitig ist es möglich, anhand der Variation verschiedener Parameter deren Einfluss auf die Reststoffmengen zu beobachten. Mit Hinblick auf den Ressourcenverbrauch lassen sich die eingesetzten Uranmengen für verschiedene idealisierte Szenarien (direkte Endlagerung, einfache und 2-fache Plutonium Rezyklierung) analysieren und die im Rahmen dieser Szenarien verbleibenden Plutonium- und Minoren Aktinidenmengen abschätzen.

Im Folgenden werden zusätzlich 2 politische Rahmenbedingungen in Hinblick auf die produzierten Aktinidenmengen näher betrachtet: die gesetzlich festgelegte Beendigung der Wiederaufbereitung und damit der Brennstoffrezyklierung und eine mögliche Verlängerung der Laufzeiten der bestehenden Reaktoren. Die Veränderungen, sowohl in den benötigten Brennstoffmengen, als auch in den verbleibenden Plutonium- und Minoren Aktinidenmengen werden, für die verschiedenen Szenarien, abgeschätzt und mit der produzierten Strommenge in Relation gesetzt.

Die grundsätzliche wissenschaftliche Zielsetzung der weitestmöglichen Reduktion der endzulagernden Plutoniummasse unter gleichzeitiger Vermeidung der militärischen Wiederverwendbarkeit des Plutoniums wird vor dem, durch die Szenarien und die politischen Rahmenbedingungen, definierten Hintergrund diskutiert.

II Grundlagen

Langzeituntersuchungen für die Inventare im nuklearen Brennstoffkreislauf sind generell mit Unsicherheiten behaftet. Zum einen ist die Bestimmung der entstehenden Inventare nur mit zum Teil stark vereinfachenden Annahmen möglich, wobei eine experimentelle Verifikation nur beschränkt möglich ist. Zum anderen werden üblicherweise Einsatzstrategien angenommen deren Eintreten abzuwarten ist. In den letzten Jahren wurde eine Reihe von Aktivitäten zur Analyse dieser Problematik gestartet, auch mit Beteiligung der großen deutschen Forschungszentren und der deutschen Industrie.

Es wurden mehrere Rechencodes zu diesem Zweck entwickelt, wie z.B. NFCSim [4] in *Los Alamos*, DANESS [5] in *Argonne*, beide in USA, und COSI [6] bei *CEA* in Frankreich. Diese Codes sind i.A. sehr flexibel und können alle Komponenten mit geeigneten Modellen beschreiben, wie z.B. Brennstoff Herstellung, Einsatz, Zwischenlagerung, Transport, Wiederaufbereitung, usw. Im EU-Projekt RED-IMPACT [7] wird ein Teil der Partition und Transmutation (P&T) Aktivitäten in Europa koordiniert. Im *Forschungszentrum Karlsruhe* wurden u.A. Langzeit-Brennstoffkreislauf-Strategieuntersuchungen in Zusammenarbeit mit den Autoren von NFCSim [4] durchgeführt [8, 9, 10]. Für die Zukunft ist eine Kooperation mit den Entwicklern von COSI [6] geplant. In der vorliegenden Arbeit wird ein wohl definiertes Szenario beschrieben, nämlich die aktuelle Situation in Deutschland und die konkrete Planung für die Zukunft, einschließlich der in der Diskussion befindlichen Laufzeitverlängerung von Deutschen Reaktoren. Für solche Untersuchungen kann auf komplizierte Codes für Strategierechnungen verzichtet werden und stattdessen mit relativ einfachen Modellen mit besser validierten Auslegungscodes gearbeitet werden. Dazu werden im Folgenden die gleichen Verfahren eingesetzt wie in den Referenzen [11, bis 14], wo vergleichbare Studien präsentiert wurden. Ach bei diesen Rechnungen sind noch mehrere Näherungen notwendig, siehe Abschnitt II.B.

II-A Ausgangssituation

In den deutschen Leistungsreaktoren beläuft sich, nach den tabellarischen Angaben der Betriebsdaten der Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland in den *atw* Heften [15, 16, 17], die Bruttostromerzeugung bis zum Stichtag (31.12.1999) auf 114,6 Terawatttage (TWD). Die in der aktuellen Fassung des Atomgesetzes [3] festgelegte Reststrommenge bis zum Abschalten des letzten Leistungsreaktors im Jahre 2022 (Kernkraftwerk Neckarwestheim Block II) beläuft sich auf 109,3 TWD (netto), oder mithilfe der oben genannten Angaben in [15, 16, 17] umgerechnet auf etwa 115 TWD (brutto). Die Gesamtstrommenge summiert sich somit auf rund 230 TWD (brutto). Unter Verwendung eines Anlagenwirkungsgrades von $\eta=0.345$ ($\approx 34,5\%$) ergibt sich eine thermische Gesamtenergiemenge von etwa 666 TWD, die in einer idealisierten Reaktorbetriebszeit von etwa 33 Jahren zu produzieren sind.

Eine erste überschlägige Abschätzung nach Kessler [2] ergibt für diese Gesamtstrommenge etwa 16.650 t abgebrannten Brennstoffes unter der Voraussetzung einer Once-Through-Strategie, also direkter Endlagerung, eines Brutto-Anlagenwirkungsgra-

des von 34,5 % und eines mittleren Entladeabbrandes von 40 GWd/tHM (Gigawatttage pro Tonne Schwermetall). Dieser abgebrannte Brennstoff würde sich etwa wie folgt zusammensetzen: 15.763 t abgebranntes Uran, 704 t Spaltprodukte und 166 t Plutonium. Der abgeschätzte Anteil an Minoren Aktiniden beträgt etwa 17 t.

Eine ähnliche Überlegung ist, mit etwas größerem Aufwand, auch für das verbleibende Plutoniuminventar für einen Ansatz mit Wiederaufbereitung möglich. Nach Kessler [2] fallen in der Once-Through-Strategie in 16.650 t abgebranntem UOX Brennstoff rund 166 t Pu an. Folglich wurden in der bisherigen Wiederaufbereitung von rund 7.000 t abgebranntem Brennstoff [2] rund 70 t Pu abgetrennt. Dieses Pu genügt für einen MOX-Einsatz von etwa 10 Jahren bei gemittelt angenommenen 17,5 % MOX Anteil im gesamten Reaktorpark während dieser Einsatzzeit. Eine Mittelung über die gesamte betrachtete Reaktorbetriebszeit von 33 Jahren führt zu einem mittleren Gesamt-MOX-Anteil von etwa 5 %. Durch diesen MOX-Einsatz reduziert sich die Menge an eingesetzten UOX-Brennelementen um die besagten 5 % auf 15.800 t. Darin fallen dann insgesamt nur etwa 158 t Pu aus der reduzierten Menge UOX-Brennstoff an. Somit gehen aus abgebranntem UOX-Brennstoff etwa 88 t Pu ins Endlager, während 70 t Pu aus der Wiederaufbereitung durch den Einsatz in MOX-Brennstoff in die Reaktorkerne zurückgeführt werden. Diese rund 70 t Plutonium beinhalten zum Entladezeitpunkt etwa 13-14 % Pu-241. Diese rund 70 t Plutonium die in Form von MOX-Brennstoff eingesetzt werden reduzieren sich durch die Pu-Verbrennung bei einem mittleren Abbrand von 45 GWd/tHM in 3 Zyklen um etwa 25 %. Somit verbleiben aus dem eingesetzten MOX-Brennstoff etwa 52 t Plutonium. In der Summe ergibt sich somit 88 t aus dem UOX-Brennstoff und 52 t aus dem MOX-Brennstoff zu rund 140 t anfallendem Plutonium im Massenstrom abgebrannten Brennstoffes, der in die Endlagerung fließt. Die Aufhebung des Verbots der Wiederaufbereitung nach 2005 würde diese Plutoniummenge weiter reduzieren, wie im Abschnitt III.D diskutiert wird.

Der Zerfall von Pu-241 zu Am-241 bleibt in dieser Abschätzung unberücksichtigt. Würde dieser Effekt noch zusätzlich mit eingefügt, reduziert sich die gesamte Plutoniummenge nochmals um rund 5 % zum Betriebsende oder gesamt rund 10 % durch den anhaltenden Pu-241 Zerfall während der Lagerung.

II.B Angewandte Modelle und Rechenmethoden

Auch in der vorliegenden, relativ klar definierten, Situation müssen eine Reihe von

Näherungen vorgenommen werden. Der betrachtete deutsche Reaktorpark besteht aus 2 Reaktorlinien den Druck- und Siedewasser-Reaktoren mit jeweils einer stetigen Weiterentwicklung bezüglich des Brennelement Einsatzes, des Entladeabbrandes und der Reaktorregelung, wie z.B. die Einführung und Realisierung von abbrennbaren Neutronengiften [26]. Da für Leichtwasserreaktoren auf jedem Fall Zellrechnungen erforderlich sind, wurde für die vorliegenden Untersuchungen eine mittlere Brennstoffzelle verwendet. Es wurde dazu ein repräsentatives Druckwassergitter aus einem aktuellen Benchmark gewählt [18].

Die im Folgenden gezeigten Ergebnisse beruhen auf idealisierten Näherungsrechnungen, die im Rahmen des *KARlsruher PROgramm Systems (KAPROS)* [19] mit der Prozedur *KARBUS (KARlsruher BURNup System)* [20] durchgeführt wurden (siehe *Bild 1*). Dieses Verfahren wurde bereits in den Referenzen [11 bis 14] für eine Studie zur MOX-Rezyklierung in einem Druckwasserreaktor angewandt. Die Abbrandrechnungen werden auf der Basis von Zellabbrand Näherungen ausgeführt. Die Lösung für die verwendete Wigner-Seitz Zelle wird für die 69 Energiegruppen einer KAPROS Masterbibliothek auf ENDF/B-6.5 Basis mit Hilfe von Stoßwahrscheinlichkeiten nach den Verfahren des Cell Codes WIMS [21] bestimmt. Die ermittelten Neutronenflüsse werden anschließend für die Bestimmung der Eingruppenflüsse und Eingruppen-Querschnitte verwendet, die für die Abbrandrechnungen mit dem auf *KORIGEN* [22] basierenden KAPROS-Modul *BURNUP* benötigt werden. Dieser Zyklus aus Zellrechnung, Gruppenkondensation und Abbrandrechnung wird für jeden Zeitschritt wiederholt bis der angestrebte Abbrandzustand, beziehungsweise das Kritikalitätslimit erreicht ist. Das Kritikalitätslimit ist in den folgenden Rechnungen auf $k_{\infty} \approx 1,03$ festgesetzt, wie auch bei vergleichbaren Untersuchungen in Referenz [23] angewandt. Hierdurch wird den Verlusten durch Leckage in einem realen Reaktorkern Rechnung getragen. Zuletzt muss noch die Umladung der Brennelemente und damit die Anzahl der Zyklen, in denen die Brennelemente eingesetzt werden, in die Berechnung einbezogen werden. Dies wird durch die Näherung aus Referenz [11]

$$\frac{BU_{EOL}}{BU_{1,03}} = \frac{2x \text{ Zyklen}}{\text{Zyklen} + 1}$$

erreicht. Für den Fall von 4 Zyklen ergibt sich $2 \times 4 / (4+1) = 1,6$, das bedeutet dass der Entladeabbrand bei Entnahme des Brennelements (End of Life) das 1,6-fache des am Kritikalitätslimit $k_{\infty} \approx 1,03$ erreichten Abbrandes beträgt. Die gesamte Prozedur wurde kürzlich im Rahmen einer Diplomarbeit [24] am Isotope Correlation Experiment (ICE),

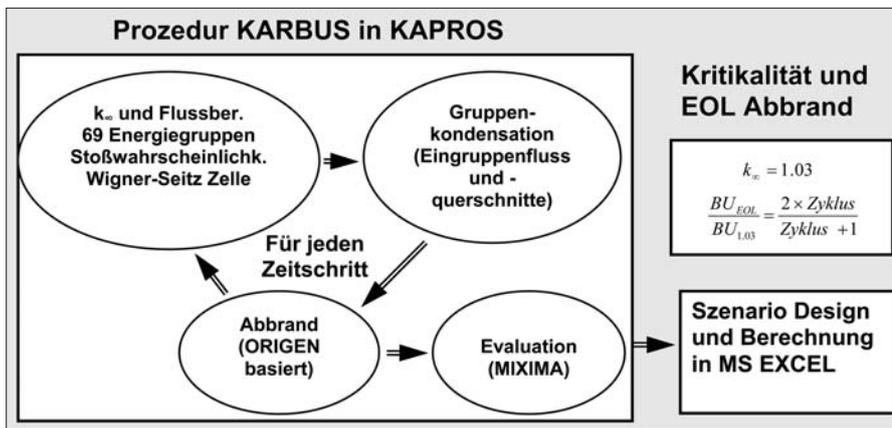


Bild 1: Schematische Darstellung des Ablaufes der Berechnungen

das in den siebziger Jahren im Kernkraftwerk *Obrigheim* durchgeführt wurde, erfolgreich überprüft [25]. Auch zeigt der neuere Vergleich von Abbrandrechnungen mit HELIOS 1.9 und KAPROS/KARBUS mit zeitlich veränderlicher Leistung sehr gute qualitative Übereinstimmung der Ergebnisse und verhältnismäßig geringe Abweichungen für die Aktinidenproduktion [38].

III Die verschiedenen Szenarien

III.A Once-Through-Szenario (OT)

Die folgende Zyklusstudie beruht auf den in der Ausgangssituation (Abschnitt II.A) beschriebenen Stromerzeugungsdaten für Deutschland. Für das Once-Through-Szenario (OT), also die so genannte direkte Endlagerung wie sie beispielsweise in den USA und in Schweden praktiziert wird, werden nur frische Uranoxid-Brennelemente (UOX) in den Reaktorkern eingesetzt. Das OT-Szenario stellt sowohl das obere Limit für den Verbrauch an UOX-Brennstoff als auch für die Plutoniumproduktion dar; es ist aber auch die Grundlage für alle folgenden Szenarien mit MOX-Einsatz, denn das benötigte Plutonium entsteht erst durch den Einsatz der UOX-Brennelemente im Reaktorkern. Für die Betrachtung der Stromerzeugung in deutschen Kernkraftwerken werden für ein gemitteltes Szenario eine Reihe von Abschätzungen und Annahmen benötigt.

Mittlere Abbrandentwicklung

Unter Berücksichtigung vorgegebener Daten für den mittleren Abbrand von 36 GWd/tHM im Jahre 1992 nach Kessler [2], einem postulierten Abbrandanstieg von etwa 1 GWd/tHM pro Jahr in der Brennelemententwicklung [26] und einem ökonomischen Abbrandlimit von etwa 65 GWd/tHM [27] kann ein rechnerisch gemittelter Abbrand über gesamte Reaktorparkbetriebszeit von ca. 44 GWd/tHM bestimmt werden. Dieser

gemittelte Abbrand wurde in bisherigen Rechnungen [9, 26, 27] vereinfacht als konstante Größe über die gesamte Betriebszeit des Reaktorparks angenommen. Diese Limitierung wirkt sich besonders bei der Betrachtung verschieden langer Betriebszeiten eines Reaktorparks – folglich im Falle von Laufzeitverlängerungen aus, denn der gemittelte Abbrand muss für jeden Fall neu bestimmt werden und unterscheidet sich aufgrund der Tendenz hin zu immer höheren Abbränden. Als Folge lassen sich die zeitlichen Verläufe der Ergebnisse des Referenzfalles und der Berechnung für eine Laufzeitverlängerung nicht wirklich vergleichen, nur die Endergebnisse zum Abschaltzeitpunkt sind aussagekräftig.

Dieses Problem wird hier durch einen etwas höheren Rechenaufwand und die Verwendung einer zeitabhängigen Abbrandentwicklung gelöst. Für jeden Abbrandschritt wird eine neue Zellrechnung durchgeführt, um den zeitlichen Verlauf des Abbrandes zu berücksichtigen. Für die folgenden Rechnungen wird die zeitliche Abbrandentwicklung über die Reaktorbetriebsdauer größtenteils linear angenähert, wobei ein stagnierender Anfangsabbrand und ein ökonomi-

sches Abbrandlimit [27] zusätzlich eingefügt sind. Die lineare Abbrandentwicklung ergibt sich aus den veröffentlichten Zahlen nach Weber [26]. *Bild 2* zeigt die angesetzte Abbrandentwicklung über eine Laufzeit von 33 Jahren und zusätzlich für eine postulierte Laufzeitverlängerung von 10 Jahren. Der Anfangsabbrand beträgt rund 31 GWd/tHM, wie er in den frühen 1980er-Jahren im Mittel (33 GWd/tHM für Druckwasserreaktoren (DWR) und 27 GWd/tHM für Siedewasserreaktoren (SWR)) durchaus üblich war. Der postulierte Anstieg beträgt rund 1 GWd/tHM pro Jahr [26] und endet mit dem ökonomischen Abbrandlimit von rund 65 GWd/tHM [27], das für die verbleibende Zeit konstant beibehalten wird. Dies bedeutet einen mittleren Abbrand von rund 44 GWd/tHM über die betrachtete Laufzeit von rund 33 Jahren und von rund 49 GWd/tHM für die Laufzeit von 43 Jahren, also inklusive der postulierten Laufzeitverlängerung.

Anfangsanreicherung und Gesamtzykluszeit

Um den Anstieg des Abbrandes zu erreichen, wird die Anfangsanreicherung des Brennstoffes von anfangs 3,2 % auf 5,4 % Uran-235 am Ende erhöht. Die Gesamtzykluszeit verändert sich ebenfalls entsprechend der Abbrandentwicklung von rund 716 auf 1.480 Tage. Es wird aber für jeden Abbrandschritt eine konstante Einsatzzeit von 940 Tagen angesetzt, um eine lineare Abbrandentwicklung zu erreichen. Dies bedeutet, dass innerhalb einer Kernbeladung in einem Reaktor oder im ganzen Reaktorpark Brennelemente mit verschiedener Anfangsanreicherung bzw. verschiedenem Zielabbrand eingesetzt werden, was durchaus der Realität entspricht.

Leistungsentwicklung

Die mittlere Stablängenleistung in einem Reaktorkern verringert sich im Verlauf des Abbrandes deutlich. Diesem Verhalten wird angenähert Rechnung getragen, indem die genäherte mittlere Brennstablängenleistung von 200 W/cm im Verlauf der jeweiligen Gesamtzykluszeit linear in einem Bereich von 150 % bis 50 % verändert wird. Die Leistungsbeeinflussung durch abbrennbare Neutronengifte, wie z.B. Gadolinium in modernen Brennelementen, wird hier wie in der gesamten Studie nicht berücksichtigt.

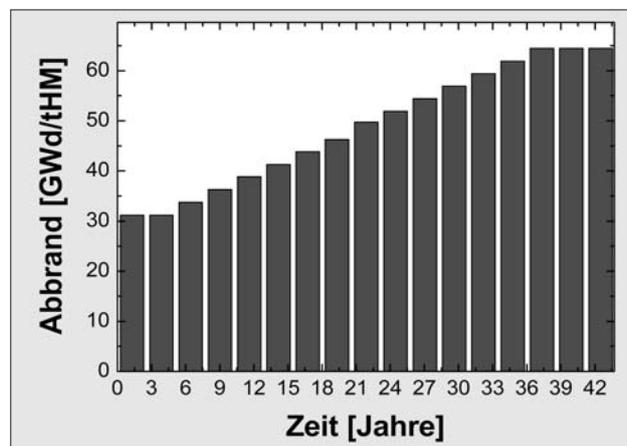


Bild 2: Genäherte zeitliche Abbrandentwicklung im deutschen Reaktorpark über die gesetzlich festgeschriebene Laufzeit und eine betrachtete Laufzeit Verlängerung um 10 Jahre

III.B Einfache idealisierte Plutoniumrezyklierung (MOX1)

Die einfache idealisierte Plutoniumrezyklierung stellt sowohl für den UOX-Brennstoffverbrauch als auch für die verbleibende Plutoniummasse das durch einfache Rezyklierung erreichbare untere Limit des Variationsbereiches dar. Plutonium wird in dieser Strategie in Form von Mischoxid-Brennelementen (MOX) einmalig (MOX1) in den Kern von Leichtwasserreaktoren zurückgeführt. Gleichzeitig liefert dieses Szenario die Daten für die Brennstoffkonfiguration für den idealisierten 2-fachen MOX-Einsatz.

Anfangsanreicherung und Zyklusdaten für einfache Rezyklierung

Die Zyklusdaten für MOX1 sind denen des jeweils gleichzeitig eingesetzten UOX Brennstoffes angeglichen, um identische Einsatzvoraussetzungen zu erreichen. Dies betrifft sowohl die jeweilige Gesamtzykluslänge, als auch den Entladeabbrand. Dies führt zu einer variablen Plutoniumbelastung des MOX Brennstoffes mit einem Anfangswert von 4,4 % spaltbarem Plutoniumanteil (Pu_{fiss}) in abgereichertem Uran mit 0,3 % U-235 Anteil zur letzten Brennstoffbelastung mit 7,1 % spaltbarem Plutoniumanteil (Pu_{fiss}) in Natururan mit 0,7 % U-235 Anteil. Hier muss festgehalten werden, dass diese Konfiguration nicht mehr zuverlässig in einem Reaktor eingesetzt werden kann da aus Sicherheitsabwägungen in einer ersten Abschätzung der Anteil an spaltbaren Plutoniumisotopen 7 % nicht überschritten werden sollte um eine zu starke Reduktion des Voidkoeffizienten zu vermeiden [11]. Der mittlere Anteil an MOX-Brennelementen, der in den Reaktorkernen eingesetzt wird, richtet sich für dieses Szenario nach der verfügbaren Plutoniummenge aus der Wiederaufbereitung und reduziert sich im Laufe der gesamten Betriebszeit von anfänglich 18 auf 11 %.

Leistungsentwicklung und Zeitskala

Die gemittelte mittlere Brennstablengeleistung ist für den MOX-Brennstoff ebenfalls auf 200 W/cm festgelegt, die lineare Leistungsvariation ist gegenüber UOX-Brennstoff etwas verringert und beträgt 140–60 %. Folgende Zeiten sind für MOX1-Brennstoff angesetzt: 3 Jahre für die Kühlung im Brennelementlagerbecken bis zum Transport, die Lagerung in der Wiederaufbereitungsanlage und die Wiederaufbereitung in der das Plutonium schließlich abgetrennt wird. Weitere 2 Jahre für MOX-Brennelementfertigung, Transport zum Kraftwerk und Lagerung bis zum Einsatz im Reaktor. Das während dieser Zeit aus, im abgetrennten Plutonium enthaltenen, Pu-241 durch Zerfall entstehende Am-241 muss für

den weiteren Brennstoffeinsatz berücksichtigt werden.

III.C Zweifache idealisierte Plutoniumrezyklierung (MOX2)

Die 2-fache idealisierte Plutoniumrezyklierung stellt das durch 2-fache Rezyklierung erreichbare untere Limit für UOX-Brennstoffverbrauch und die verbleibende Plutoniummasse dar. Plutonium wird in dieser Strategie in Form von Mischoxid-Brennelementen (MOX) 2-malig (MOX1 und MOX2) in den Reaktorkernen zurückgeführt.

Anfangsanreicherung und Zyklusdaten für 2-fache Rezyklierung

Die Zyklusdaten für MOX2 sind sowohl bezüglich Gesamtzykluslänge als auch bezüglich Entladeabbrand ebenfalls denen des jeweils gleichzeitig eingesetzten UOX-Brennstoffs angeglichen. Die dazu benötigte MOX-Brennstoffkonfiguration bewegt sich zwischen 7,0 % Pu_{fiss} in auf 1,1 % U-235 Anteil angereichertem Uran zu Beginn des MOX2-Einsatzes und ebenfalls 7,0 % Pu_{fiss} in auf 2,3 % angereichertem Uran in der letzten Brennstoff Konfiguration. Die Verwendung von angereichertem Uran ist durchweg notwendig um den geforderten Entladeabbrand zu erreichen, und das Kriterium des 7 %-igen Pu_{fiss} Anteils nicht zu überschreiten [11]. Der mittlere MOX-Anteil (von anfänglich 9 % zu letztlich 6 %) richtet sich hier ebenfalls nach der verfügbaren Plutoniummenge aus der Wiederaufbereitung.

Leistungsentwicklung und Zeitskala

Die Brennstablengeleistung und die Leistungsvariation sind mit MOX erster Generation identisch. Folgende Zeiten sind angesetzt: 10 Jahre für Kühlung im Brennelement Lagerbecken, Transport, Lagerung in der Wiederaufbereitungsanlage und Wiederaufbereitung, 2 Jahre für MOX-Brennelementfertigung, Transport und Lagerung bis zum Einsatz im Reaktor.

III.D Realitätsnahe Plutoniumrezyklierung (rMOX)

Nach den bisherigen idealisierten Szenarien wird nun ein MOX-Szenario entwickelt, das den Verhältnissen in den deutschen Kernkraftwerken Rechnung trägt.

Anfangsanreicherung und Zyklusdaten für realitätsnahe Rezyklierung

Die Zyklusdaten für rMOX sind ebenfalls denen des jeweiligen zum gleichen Zeitpunkt eingesetzten UOX-Brennelements angeglichen, die Leistungsvariation ist von MOX1 übernommen. Die Plutoniumbelas-

zung des MOX-Brennstoffes beträgt anfangs 5,7 % Pu_{fiss} in abgereichertem Uran mit 0,3 % U-235 Anteil und am Ende des MOX-Einsatzes 6,5 % Pu_{fiss} in abgereichertem Uran.

Folgende, gegenüber der idealisierten Betrachtung verlängerte Zeiten sind angesetzt: 8 Jahre für Kühlung im Brennelementlagerbecken, Transport, Lagerung in der Wiederaufbereitungsanlage und Wiederaufbereitung, 5 Jahre für MOX-Brennelementfertigung, Transport und Lagerung bis zum Einsatz im Reaktor. Als Grundlage für diese Werte wurde vorausgesetzt dass Plutonium das bereits längere Zeit im abgetrennten Zustand gelagert wurde mit frisch abgetrenntem Plutonium vermischt wird. Dieses Verfahren ist gängig um eine zu starke Verschlechterung des Plutoniumvektors aufgrund der verlängerten Lagerzeit in der Vergangenheit zu kompensieren. Eine Vermischung bezüglich des Plutoniumvektors ist allerdings in den Rechnungen nicht berücksichtigt. Der mittlere Anteil an MOX-Brennelementen die im rMOX-Szenario in den Reaktorkernen eingesetzt werden ergibt sich zu rund 15 %.

MOX Einsatzzeitraum

Ende 1998 waren rund 38 t Pu abgetrennt, wovon etwa 16 t bereits in MOX verarbeitet waren [2]. Zu dieser Zeit war der relative Stand des idealisierten Szenario 15,5 Jahre [30]. Dies bedeutet, dass knapp die Hälfte der vorgeschriebenen Gesamtstrommenge zu dieser Zeit bereits produziert war. Unter der Annahme dass die bereits verarbeitete Plutoniummenge auch bereits im Reaktor eingesetzt wurde kann, mit einigen Unsicherheiten, auf einen mittleren Beginn des rMOX-Einsatzes nach etwa 13 Jahren, unter der vorausgesetzten Annahme eines mittleren MOX-Einsatzes von 15 % in den Reaktorkernen, zurückgerechnet werden.

Verfügbare Plutoniummenge

Für die Wiederaufbereitung des in Deutschland anfallenden Kernbrennstoffes sind internationale Verträge abgeschlossen worden. Die Verträge belaufen sich auf die Wiederaufbereitung von 6.970 t abgebrannten UOX-Brennstoffs (Altverträge 5.540 t und Neuverträge nach dem Verzicht auf die eigene Wiederaufbereitung 1.430 t [2]). Das Ende der Wiederaufbereitung wurde, wie bereits erwähnt, für das Jahr 2005 gesetzlich festgelegt [3]. Unter Berücksichtigung des Zerfalls des Isotops Pu-241 ergibt sich, summiert zum jeweiligen Einsatzzeitpunkt, ein Wert von etwa 64,6 t Plutonium der in Form von fertigen Mischoxidbrennelementen in den deutschen Reaktorpark wieder eingesetzt wird. Dieser Wert liegt nahe an der Abschätzung von ca. 70 t Plutonium nach Kessler [2], insbesondere da in der Abschätzung der

	Einfacher MOX-Einsatz	Zweifacher MOX-Einsatz	Realitätsnaher MOX-Einsatz
Anreicherung	4,4 wt% in dep. U	7 wt% in 1,1 wt% U	5,7 wt% in dep. U
Pu_{fiss}	7,1 wt% in nat. U	7 wt% in 2,3 wt% U	6,5 wt% in dep. U
Zeitskala			
Lagerung/Transport	3 Jahre	10 Jahre	8 Jahre
Wiederaufb./Fabrikat.	2 Jahre	2 Jahre	5 Jahre
MOX-Anteil im Kern	18 % bis 10 %	24 % bis 16 %	≈ 15 %

Tab. 1: Benutzte Annahmen zum Einsatz von verschiedenen Mischoxid Brennstoffen

Zerfall von Pu-241 noch nicht berücksichtigt ist.

Die benutzten Annahmen sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

III.E Laufzeitverlängerung

Im Zuge der Diskussion um eine mögliche Verlängerung von Laufzeiten für deutsche Kernkraftwerke [31] wird zusätzlich eine Abschätzung der eingesetzten Uranmengen und der anfallenden Plutonium- und Minoren Aktinidenmassen für diesen Fall vorgenommen. Für eine angenommene Laufzeitverlängerung von 10 Jahren errechnet sich die zu produzierende Bruttostrommenge zu 310 TWd anstatt der bisher festgelegten 230 TWd. Dieser Wert ergibt sich aus folgender Abschätzung: Im Rahmen der Laufzeit Verlängerung wird für die zusätzlich zu produzierende Energiemenge der doppelte Wert der zwischen 2000 [15] und 2005 [32, 33] in den 17 Ende 2005 in Betrieb befindlichen Kernkraftwerken produzierten Energiemenge angesetzt. Daraus errechnet sich unter Verwendung des bisher angesetzten Wirkungsgrades $\eta=0,345$ eine thermische Gesamt-Energiemenge von 900 TWd.

IV Ergebnisse für den deutschen Reaktorpark

Vor dem Hintergrund der festgelegten zu produzierenden Strommenge im deutschen Reaktorpark ergibt sich für die angesetzten 33 Jahre eine eingesetzte UOX-Brennstoffmenge von rund 16.000 t dies ist in guter Übereinstimmung mit den Angaben von Salvatores et. al. von 16.840 t [9] und der Abschätzung aus Absatz II.A, was die Abbrandabschätzung bestätigt.

Alle zu einem Zeitpunkt gleichzeitig in den Reaktorkernen eingesetzten Brennstoffe sind für jeden Abbrandschritt so aufeinander abgestimmt, dass aufgrund der Anfangsanreicherung die gleiche Standzeit im Reaktorkern und annähernd der gleiche Entladeabbrand erreicht wird. In Bild 3 sind die Verläufe des unendlichen Multiplikationsfaktors für verschiedene gleichzeitig eingesetzte Brennstoffe zu sehen. Alle Kurven treffen sich entsprechend dem in den Grundlagen

(Absatz II.B) beschriebenen Verfahren beim Wert $k_{inf}=1,03$. Diese Differenz 0,03 stellt die Berücksichtigung der Verluste in einer realen Kernkonfiguration dar, die in einer Abschätzung unter Verwendung einer Zellrechnung nicht berücksichtigt wurden. Deutlich ist der sehr viel stärkere Abfall der Kritikalität im UOX-Brennstoff zu sehen der durch einen hohen Kritikalitätsüberschuss bei Einsatzbeginn kompensiert werden muss. Um den Kritikalitätsüberschuss und

damit auch die anfängliche Leistung zu begrenzen, werden in realen Systemen bei hoher Anfangsanreicherung abbrennbare Neutronengifte wie Gadolinium verwendet; dies wird aber in der Abschätzung nicht berücksichtigt. Die MOX-Brennstoffe fallen aufgrund ihrer guten Bruteigenschaften in der Kritikalität deutlich langsamer ab. Unterschreiten die Brennstoffe im Rahmen der Einsatzzeit den Kritikalitätsgrenzwert von 1,03 so bedeutet dies, dass sie im Betrieb ab diesem Zeitpunkt für den weiteren Abbrand Neutronen von außen – sprich von den umgebenden Brennelementen zugeführt bekommen müssen. Dies geschieht am Ende der Lebensdauer des Brennstoffes dadurch, dass im realen Kern jeweils verschieden stark abgebrannte Brennelemente gleichzeitig verwendet werden (Beladepfung). In Bild 3 zeigt sich ein weiterer Effekt, nachdem MOX-Brennstoff wesentlich langsamer in der Kritikalität abfällt, kann es attraktiv

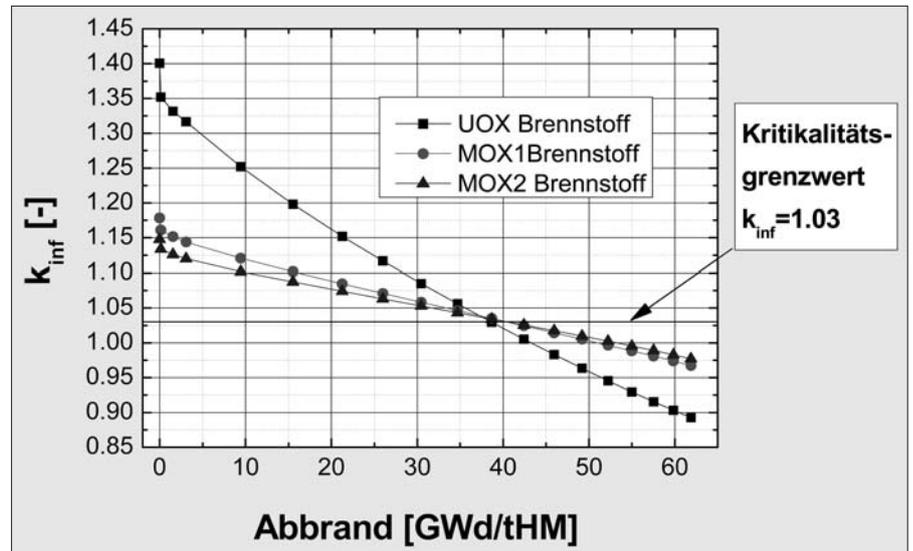


Bild 3: Entwicklung des unendlichen Multiplikationsfaktors über dem Abbrand für verschiedene gleichzeitig im Reaktorkern eingesetzte Brennstoffe mit identischer Einsatzzeit

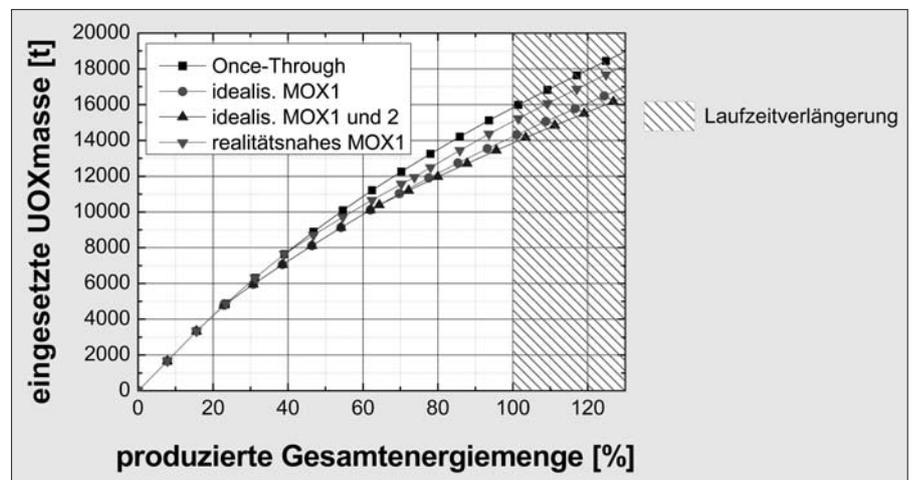


Bild 4: Abschätzung der eingesetzten UOX-Brennstoffmasse für verschiedene Szenarien über der produzierten Gesamtenergiemenge und im Falle einer Laufzeitverlängerung um 10 Jahre bei zeitabhängiger Abbrandentwicklung

sein, MOX-Brennelemente länger im Kern zu belassen als UOX-Brennelemente, was hier nicht berücksichtigt wird. Am Betriebsende müssen für den MOX-Brennstoff wesentlich weniger Neutronen zugeführt werden als dem UOX-Brennstoff bei gleichem Abbrand.

Bild 4 zeigt die zeitliche Entwicklung der eingesetzten UOX-Brennstoffmasse über der produzierten Gesamtenergiemenge. Als Gesamtenergiemenge ist hier die laut „Atomkonsens“ festgelegte zu produzierende Gesamtstrommenge von 230 TWd (brutto) angesetzt. Der nichtlineare Verlauf der UOX-Brennstoffmasse aufgrund des ansteigenden Abbrandes ist deutlich zu erkennen. Die Steigung der Kurve, also die eingesetzte UOX-Brennstoffmasse nimmt im Verlauf der gesamten Reaktorbetriebszeit kontinuierlich ab, dies ist eine direkte Folge des steigenden Abbrandes. Es wird aus immer weniger Brennstoff die gleiche Leistung erzeugt, oder anders formuliert aus einer definierten UOX-Menge wird aufgrund der höheren Anreicherung immer mehr thermische und durch die Wandlung elektrische Energie gewonnen, allerdings muss hierfür eine größere Menge Natururan zur Anreicherung aufgewendet werden. Bezüglich der Ressourcenschonung durch den Einsatz von Plutonium aus der Wiederaufbereitung lässt sich Folgendes festhalten. Durch einfaches Recycling MOX1 kann die eingesetzte UOX-Brennstoffmenge um etwa 10 % reduziert werden, 2-faches Recycling MOX2 verringert die benötigte UOX-Brennstoffmenge um rund 12,5 %; bereits das nur teilweise Recycling-rMOX, wie es durch die Einstellung der Wiederaufbereitung festgelegt wurde, führt zu einer UOX-Brennstoffersparnis von etwa 5 %.

Die zeitliche Entwicklung der eingesetzten UOX-Brennstoffmasse für die betrachteten verschiedenen Szenarien im Falle einer Laufzeitverlängerung zeigt der durch eine Schraffur markierte Bereich. Hier können die Veränderungen in der eingesetzten UOX-Brennstoffmasse, die durch die Laufzeitverlängerung hervorgerufen werden, direkt abgelesen werden. Grundsätzlich erhöht eine 10-jährige Laufzeitverlängerung die Energieproduktion um rund 35 %. Die für die zusätzliche Energieproduktion benötigte UOX-Brennstoffmasse beträgt für alle Szenarien rund 20 %, geringfügig mehr für das rMOX-Szenario und geringfügig weniger für das MOX2-Szenario. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien verstärken sich durch die verlängerte Laufzeit geringfügig.

Die Abschätzung der verbleibenden Plutoniummasse für die verschiedenen Szenarien ist in Bild 5 dargestellt. Hier zeigen sich im Gegensatz zur eingesetzten UOX-Brennstoffmasse deutlichere Unterschiede für die verschiedenen Szenarien. Im OT-

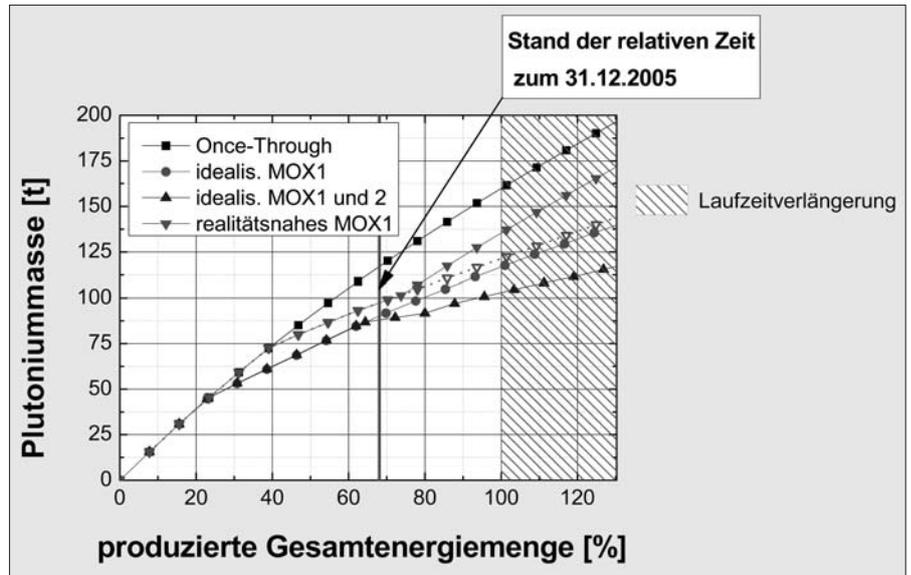


Bild 5: Abschätzung der verbleibenden Plutoniummasse für verschiedene Szenarien über der produzierten Gesamtenergiemenge und im Falle einer Laufzeitverlängerung um 10 Jahre bei zeitabhängiger Abbrandentwicklung. Die gepunktete Linie mit offenen Symbolen stellt eine vereinfachte Abschätzung des Einflusses einer Weiterführung der Plutonium Rezyklierung dar

Szenario verbleiben rund 160 t Plutonium nach Produktion der vorgegebenen Strommenge in den abgebrannten Brennelementen, die zur direkten Endlagerung vorgesehen sind. Diese Plutoniummenge reduziert sich durch alle Szenarien des MOX-Einsatzes. Im MOX1-Szenario fallen nur knapp 75 % der Menge des OT Szenario an, im MOX2-Szenario sind es knapp 65 % und im rMOX-Szenario rund 85 %. Eine detailliertere Betrachtung des Zeitverlaufes der verschiedenen Kurven zeigt, dass im rMOX-Szenario am Ende des MOX-Einsatzes (bedingt durch die Einstellung der Wiederaufbereitung) nahezu der Wert des idealen einfachen Recyclings (MOX1) erreicht wird. Das bedeutet, dass trotz des im Vergleich zum idealen Szenario späten Starts des MOX-Einsatzes über längere Zeit gesehen der gleiche Endwert erreichbar wäre. Dies verdeutlicht die gepunktete eingezeichnete Extrapolation für den Fall einer fortgesetzten Wiederaufbereitung. Eine detaillierte Rechnung würde aufgrund des leicht nicht-linearen Anstiegs der Plutoniumproduktion sogar ein noch besseres Ergebnis liefern. Durch die Beendigung der Wiederaufbereitung und des MOX-Einsatzes nachdem das abgetrennte Plutonium aufgebraucht ist steigt dann aber die verbleibende Plutoniummenge dem OT-Szenario folgend stärker an.

Eine Laufzeitverlängerung um 10 Jahre hat für die verschiedenen Szenarien leicht unterschiedliche Auswirkungen auf die verbleibende Plutoniummenge. Im Once-Through-Szenario erhöht sich die verbleibende Plutoniummenge um annähernd 25 %. Während im MOX1-Szenario rund 20 % und im MOX2-Szenario 15 % mehr Plutonium an-

fällt. Hier zeigt sich eine deutliche Auswirkung der Plutoniumrückführung in Form von MOX-Brennelementen. Im rMOX-Szenario zeigt sich die Auswirkung der Einstellung der Wiederaufbereitung in einem Anstieg der verbleibenden Plutoniummasse um annähernd 30 %, weil sich der Anteil des zurückgeführten Plutoniums im Vergleich zum direkt endgelagerten Plutonium verringert. Bezogen auf das Once-Through-Szenario können die verbleibenden Plutoniummassen nach einer Laufzeitverlängerung folgendermaßen bestimmt werden. Im MOX1-Szenario verbleiben rund 70 % des im Once-Through-Szenario anfallenden Plutoniums, im MOX2-Szenario rund 60 % und im rMOX-Szenario annähernd 90%. Die Extrapolation (gepunktet) zeigt allerdings, dass bei einer Fortsetzung der Wiederaufbereitung nahezu die Werte des MOX1 Szenarios erreichbar wären.

Die Abschätzung der Americiummasse zeigt sehr ähnliche Zeitverläufe für alle betrachteten Szenarien, siehe Bild 6. Insbesondere wenn man die verbleibenden Pu-241-Massen berücksichtigt, die als Vorläuferkerne für die Entstehung von Am-241 durch Zerfall vorhanden sind. Diese am Betriebsende nach 33 Jahren verbleibenden Pu-241 Massen sind für das OT-Szenario am kleinsten und für das MOX2-Szenario am größten und gleichen damit zumindest einen Teil des Unterschiedes in den Americiummassen relativ bald nach Betriebsende aus.

Die anfallenden Americiummassen im Falle einer Laufzeitverlängerung unterscheiden sich ebenfalls nur geringfügig für die verschiedenen betrachteten Szenarien. Für alle Szenarien steigt aufgrund der

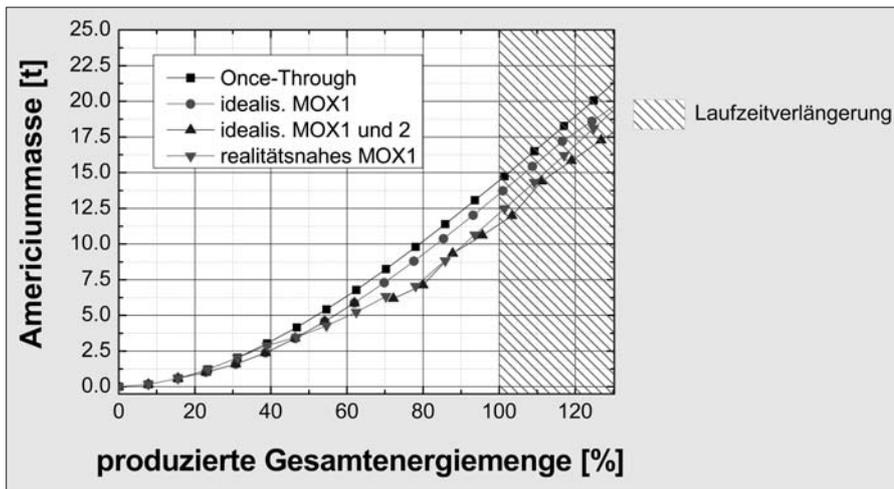


Bild 6: Abschätzung der entstehenden Americiummasse für verschiedene Szenarien über der produzierten Gesamtenergiemenge und im Falle einer Laufzeitverlängerung um 10 Jahre bei zeitabhängiger Abbrandentwicklung

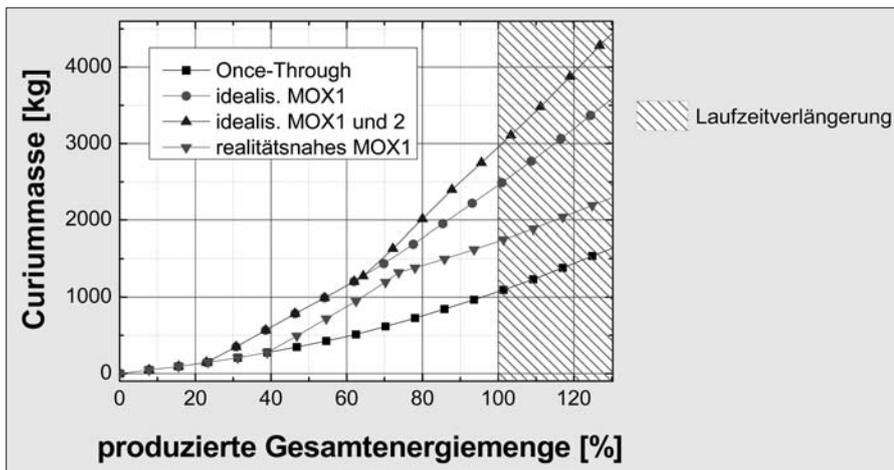


Bild 7: Abschätzung der entstehenden Curiummasse für verschiedene Szenarien über der produzierten Gesamtenergiemenge und im Falle einer Laufzeitverlängerung um 10 Jahre bei zeitabhängiger Abbrandentwicklung

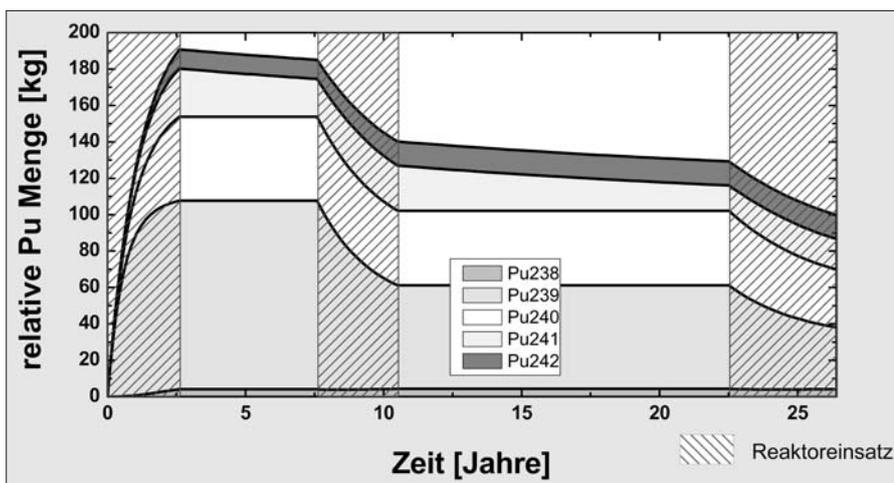


Bild 8: Zeitliche Entwicklung der relativen Plutoniummenge und -zusammensetzung bezogen auf eine Tonne eingesetzten Mischoxidbrennstoff zweiter Generation in der idealisierten 2-fachrecycling-Strategie bei zeitlich veränderlichem Abbrand für 4% angereicherter Uranbrennstoff

sich deutliche Unterschiede für die verschiedenen Szenarien. Das Ergebnis kann folgendermaßen zusammengefasst werden: Die Curiummasse steigt mit jeder Rückführung von Plutonium in den Reaktor stärker an. Durch die einfache Rückführung im MOX1-Szenario verdoppelt sich die Curiummasse etwa, durch die doppelte Rückführung im MOX2-Szenario verdreifacht sich die Curiummasse annähernd. Im rMOX-Szenario steigt die Curiummasse während der Zeit der MOX-Nutzung ebenfalls stark an im Vergleich zum Once-Through-Szenario, während sie in den restlichen Zeiten natürlich identisch zum Once-Through-Szenario ist.

Im Falle einer Laufzeitverlängerung kann das Ergebnis folgendermaßen zusammengefasst werden: in OT-Szenario und in den beiden idealisierten MOX-Szenarien steigt die Curiummenge aufgrund der Laufzeitverlängerung um rund 50 % an, im rMOX-Szenario um rund 35 %. Die Differenzen zwischen den einzelnen Szenarien steigen durch die Laufzeitverlängerung an.

V Reduktion von Plutonium

Zum Schluss soll hier noch die Plutoniumreduktion und die Veränderung der Plutoniumzusammensetzung, durch die Rückführung von Plutonium in Form von MOX-Brennelementen betrachtet werden.

Bild 8 zeigt die zeitliche Entwicklung der relativen Plutoniummenge und Zusammensetzung für 4 % angereicherter Uranbrennstoff als Ausgangsbasis. Das im Verlauf des ersten Reaktoreinsatzes entstehende Plutonium, mit der farblich gekennzeichneten Zusammensetzung, aus mehreren Brennstäben wird nach Lagerung und Wiederaufbereitung in Form von MOX1-Brennelementen in den Reaktor zurückgeführt. In dieser „Lagerungszeitspanne“ zerfällt ein Teil des Isotops Pu-241. Hier wird das Plutonium im Vergleich zu UOX-Brennstoff nun, aufgrund des gestiegenen Abbrandes, länger im Reaktor eingesetzt und mit der farblich gekennzeichneten Zusammensetzung entladen. In der folgenden Lagerungszeit zerfällt wiederum Pu-241. Das wiederaufbereitete Plutonium mehrerer MOX1-Brennelemente wird nun in MOX2-Brennelemente zusammengefasst. Die Plutoniumzusammensetzung verändert sich während des dritten wiederum längeren Reaktoreinsatzes entsprechend der farblichen Darstellung. Für die Produktion von 1.000 kg MOX2 ist rund 130 kg Plutonium der zur Produktion von MOX2-Brennelementen zur Verfügung stehenden Zusammensetzung notwendig. Diese reduzieren sich während des Reaktoreinsatzes auf rund 100 kg. Gesamt werden für die Produktion von

Laufzeitverlängerung die entstehende Americiummasse um rund 45 % an.

Die zeitliche Entwicklung der Curiummasse ist in Bild 7 dargestellt. Hier zeigen

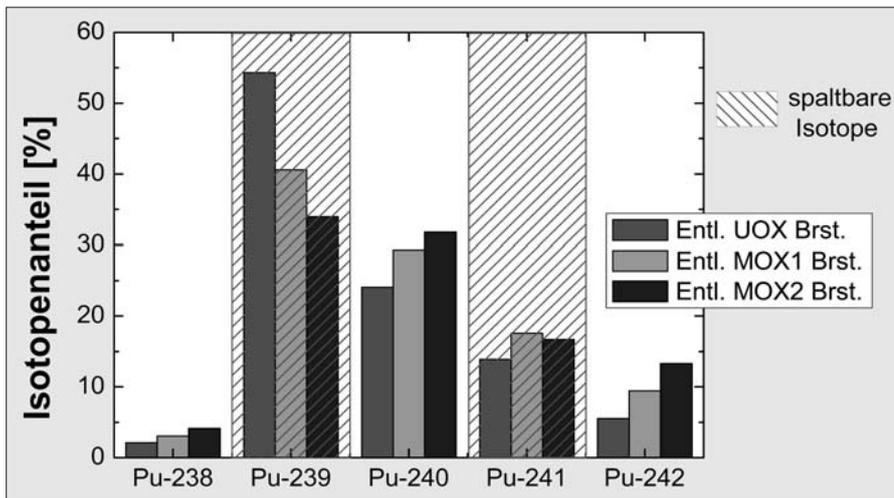


Bild 9: Plutoniumzusammensetzung und spaltbare Isotope am Einsatzende (End of Life) für die verschiedenen betrachteten Brennstoffe für 4 % angereichertem Uranbrennstoff

1.000 kg MOX2-Brennstoff knapp 200 kg Plutonium der aus dem Einsatz von 4,0 % angereichertem UOX-Brennstoff anfallenden Zusammensetzung benötigt. Die insgesamt im UOX-Brennstoffeinsatz anfallende Plutoniummenge reduziert sich also im Falle ein 2-fachen MOX-Einsatzes um annähernd die Hälfte.

Die Veränderung des Plutoniumvektors aufgrund des mehrmaligen Einsatzes des Plutoniums bei Entladung aus dem Reaktorkern ist in Bild 9 dargestellt. Deutlich sichtbar ist hier der Rückgang des Anteils der spaltbaren Plutoniumisotope, insbesondere Pu-239, durch den teilweise mehrmaligen Wiedereinsatz im Reaktor. Wenn zusätzlich in Betracht gezogen wird, dass der Pu-241-Anteil eine relativ kurze Halbwertszeit von 14,35 Jahren [34] hat, ist festzustellen dass durch die Rückführung des Plutoniums das Proliferationsrisiko reduziert wird. Dies gilt insbesondere im Falle der 2-fachen Rückführung im MOX2-Szenario.

VI Fazit

Grundsätzlich muss für alle oben geführten Berechnungen beachtet werden, dass jeder Reaktor in Deutschland eine individuelle Kernzusammensetzung (Beladung) besitzt. Diese Kernzusammensetzung variiert nach den Interessen des Anlagenbetreibers und Vorgaben der Genehmigungsbehörde. Zusätzlich verändert sich der Kern nach jedem Zyklus durch Umladung und teilweisen Austausch von Brennelementen, wobei die Standzeiten der Brennelemente, die sich gleichzeitig im Kern befinden, durchaus unterschiedlich sein können. Diese Unterschiede werden im angewandten Rechenmodell nicht einzeln berücksichtigt, sondern auf der Grundlage von Gleichgewichtsbeladungen gemittelt. Dies kann ins-

besondere wie bereits andiskutiert beim Einsatz von MOX-Brennstoff zu Verzerrungen des Ergebnisses führen. Ebenfalls werden MOX-Brennstoffe die nicht mit Plutonium aus der Wiederaufbereitung von Reaktor-brennstoff hergestellt werden, sondern aus Waffenplutoniumbeständen [35], nicht berücksichtigt

Die untersuchten Szenarien liefern dennoch belastbare Abschätzungen für die produzierten Aktinidenmengen in deutschen Kernkraftwerken unter sich ändernden (politischen) Rahmenbedingungen. Der optimierte Einsatz von in der Wiederaufbereitung abgetrenntem Plutonium führt dabei zu einer Mengenreduzierung der zu lagernden nuklearen Aktiniden. Im Rahmen der diskutierten Optionen ergibt sich für diese eine Differenz von rund 40 t Plutonium zwischen

dem optimierten MOX-Einsatz (ursprüngliche Option in Deutschland) und der direkten Endlagerung (Option in mehreren Ländern und seit 1993 in Deutschland erlaubt). Mischszenarien ergeben geringere Reduzierungen. So könnte eine Aufhebung des aktuellen Wiederaufbereitungsverbot für abgebrannte Brennelemente und der dadurch ermöglichte weitere MOX-Einsatz zu einer zusätzlichen Reduzierung des Plutoniuminventars um etwa 17 t führen, falls die Abschaltung der Kernkraftwerke in Deutschland entlang des „Atomkonsenses“ stattfindet. Obwohl im realitätsnahen MOX-Szenario (rMOX) der MOX-Einsatz im Vergleich zum idealisierten einfachen MOX(MOX1)-Szenario deutlich später (rund 6 Jahre) beginnt, wird zum postulierten Ende des MOX-Einsatzes (kein abgetrenntes Plutonium aufgrund der Einstellung der Wiederaufbereitung mehr vorhanden) schon nahezu die gleiche Plutoniummenge erreicht.

Eine mögliche Laufzeitverlängerung um 10 Jahre, wie sie in den vorausgegangenen Rechnungen betrachtet wird, bietet die Möglichkeit die produzierte Strommenge in Kernkraftwerken mit relativ geringem Brennstoffeinsatz zu erhöhen. Durch die lineare Abbrandentwicklung bis zu Erreichung des ökonomischen Abbrandlimits steigt der mittlere Abbrand (ca. 49 GWd/tHM) über die gesamte, 43-jährige Betriebszeit gegenüber dem mittleren Abbrand (ca. 44 GWd/tHM) für eine 33-jährige Betriebszeit deutlich an. Dies hat zur Folge, dass ein zusätzlicher Aufwand von rund 20 % an – allerdings im Mittel höher angereichertem – Brennstoff nahezu unabhängig vom betrachteten Szenario eine Erhöhung

	Once-Through (OT)	einfach MOX (MOX1)	zweifach MOX (MOX2)	Realitätsnahes MOX (rMOX)
ges. festgel. Laufzeit (gFL)				
Plutonium Masse [t]	~160	~117	~103	~135
Vergleich mit OT	100 %	-27 %	-35 %	-15 %
Americium Masse [t]	~14,5	~12	~11,5	~13,5
Vergleich mit OT	100 %	-17 %	-21 %	-7 %
Curium Masse [t]	~1,1	~2,4	~2,9	~1,7
Vergleich mit OT	100 %	+118 %	+163 %	+45 %
Laufzeitverlängerung				
Plutonium Masse [t]	~37	~23	~15	~37
Vergleich mit gFL	+23 %	+20 %	+14 %	+27 %
Americium Masse [t]	~7	~7,5	~6,5	~6,5
Vergleich mit gFL	+48 %	+63 %	+57 %	48 %
Curium Masse [t]	~0,6	~1,2	~1,5	~0,6
Vergleich mit gFL	+55 %	+50 %	+52 %	+35 %
Gesamt nach 43 Jahren				
Plutonium Masse [t]	~197	~140	~118	~172
Vergleich mit rMOX gFL	+45 %	+3 %	-13 %	+27 %
Americium Masse [t]	~21,5	~19,5	~18	~20
Vergleich mit rMOX gFL	+60 %	+44 %	+33 %	+48 %
Curium Masse [t]	~1,7	~3,6	~4,4	~2,3
Vergleich mit rMOX gFL	±0 %	+112 %	+159 %	+35 %

Tab. 2: Überblick über die anfallenden Aktinidenmassen für die verschiedenen Szenarien

der erzeugten Strommenge von rund 35 % ermöglicht. Somit sind die genannten 35 % zusätzliche Stromproduktion auch lediglich 20 % zusätzlichem abgebranntem Brennstoff gegenüber zu stellen. Auch die anfallende Plutoniummasse ist in allen Szenarien deutlich geringer als der Zuwachs in der Strommenge

Eine detaillierte Gegenüberstellung der Ergebnisse für die anfallenden Aktinidenmassen für die verschiedenen Szenarien ist in *Tabelle 2* dargestellt. Im Gegensatz zu den Plutoniummassen steigt die Masse anfallender Minoren Aktiniden überproportional im Vergleich zur zusätzlich produzierten Strommenge an, auch dies ist eine Folge des mit der Zeit ansteigenden Abbrandes. Es muss also im Falle der Rezyklierung eine erhöhte Produktion von Minoren Aktiniden in Kauf genommen werden. Minore Aktinide könnten aber in kurzzeit in Forschung und Entwicklung befindlichen Spezialanlagen mit Beschleuniger-getriebenen unterkritischen Anlagen (ADS) vernichtet (transmutiert) werden, siehe dazu z.B. das EU-Projekt EUROTRANS [36, 37]. Der Vergleich mit den Werten früherer Rechnungen mit über der Laufzeit gemitteltem Entladeabbrand [29] zeigt eine leichte Verringerung der verbleibenden Plutonium- und Americiummengen für alle Recycling Szenarien. Diese kleinen Unterschiede können sowohl modellierungsbedingt (betriebszeitabhängiger Entladeabbrand – laufzeitgemittelter Entladeabbrand) als auch näherungsbedingt sein (geringfügige Unterschiede im mittleren Abbrand). In der Gesamtheit der Ergebnisse und vor allem in deren Relation untereinander besteht aber weitgehende Übereinstimmung.

Zur generellen wissenschaftlichen Zielsetzung der Reduktion der endzulagernden Plutoniummasse gilt es Folgendes festzuhalten: Durch das Recycling von Plutonium in MOX-Brennstoff kann die gesamt anfallende Plutoniummasse maßgeblich reduziert werden – knapp 30 % bei einfacher Rezyklierung und rund 35% bei 2-facher Rezyklierung. In der derzeitigen Situation bedingt durch den Ausstieg aus der Wiederaufbereitung ist die Reduktion der Plutoniummasse auf rund 15% reduziert. Aus der rein wissenschaftlichen Zielsetzung wäre damit eine Wiederaufnahme der Wiederaufbereitung sicherlich wünschenswert, sowohl die politischen als auch die ökonomischen Randbedingungen können aber eine andere Sicht- und Herangehensweise bedingen. Interessant ist sicherlich die Möglichkeit trotz Laufzeitverlängerung bei einfacher Rezyklierung die gleiche endzulagernde Plutoniummasse zu erreichen wie im Falle der Fortführung der im Ausstiegsbeschluss festgelegten Betriebsweise. Zusätzlich gilt es festzuhalten, dass

die mittlere endzulagernde Plutoniummasse im Falle des MOX-Einsatzes mit zunehmender Betriebszeit von Kernkraftwerken sinkt.

Die Erfüllung der zweiten wissenschaftlichen Zielsetzung, der Verschlechterung der militärischen Nutzbarkeit (Non Proliferation) wird durch jeden Rezyklierungsschritt verbessert, denn der Anteil der spaltbaren Plutoniumisotope (insbesondere Pu-239) nimmt mit jedem Schritt ab. Hier gilt im Besonderen: Non Proliferation ist ein politisches Thema, dies bedeutet dass eine ökonomisch nicht attraktive zweite Rezyklierung sicherlich von den Kernkraftwerksbetreibern nicht angestrebt wird, sondern vom Gesetzgeber vorgegeben werden müsste.

VII Literatur

- [1] *Roser*: Zur Problematik der Wiederaufbereitung, *atw* Heft 11 November 1999
- [2] *Keßler, Kim, Gompper*: Wohin mit dem deutschen Plutonium, *atw* Heft 3 März 1999
- [3] Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren AtG, Stand 2003
- [4] *Bathke, Schneider*: NFCSim User's Manual, LANL Report LA-UR-04-8369, 2004.
- [5] *v.d.Durpel, Yacour*: DANESS v1.0 Users's Manual, ANL Nucl. Eng. Div. (2004)
- [6] *Boucher, Grouiller*: COSI: A Simulation Software for a Pool of Reactors and Fuel Cycle Plants", 13th Int. Conf. on Nuclear Engineering, Beijing, 2005
- [7] *Gudowski, Odoj, Gonzalez, Greneche, Boucher, Marivoet, Zimmermann, v.Lenza*: Impact of partitioning, transmutation and waste reduction technologies on the final nuclear waste disposal, RED-IMPACT Progress Report, 9th Information Exchange Meeting.P&T, Nîmes, Sept 25-29 2006
- [8] *Schneider, Salvatores, Knebel, Maschek, Schwenk-Ferrero, Wiese*: NFCSim Scenario Studies of German and European Reactor Fleets, LANL Technical Report LA-UR-04-4911, March 2004
- [9] *Salvatores, Schneider, Grouiller, Schwenk-Ferrero, Wiese, Delpech, Knebel*: P&T Potential for Waste Minimization in a Regional Context, 8th IEM on P&T, Las Vegas 2004
- [10] *Schwenk-Ferrero, Tromm*: Potential Fuel Cycle Strategies for Transmutation of German Nuclear Fuel Legacy, JK'06, Aachen, 2006.
- [11] *Broeders*: Investigations Related to the Burnup of Transuranium in Pressurized Water Reactors, FZKA 5784 Version März, 1999 (<http://inrwww.fzk.de>).
- [12] *Broeders*: Investigations on fuel utilization and transuranium buildup in PWRs, ICENES'96, Obninsk 1996 (<http://inrwww.fzk.de>).
- [13] *Broeders, Kessler*: The generation of denatured reactor Plutonium by different options of the fuel cycle, *atw* Heft 11 Nov. 2006
- [14] *Broeders, Kessler*: Fuel cycle options for the production and utilization of denatured Plutonium, angenommen für Veröffentlichung in NSE, Mai 2007.
- [15] *atw* Heft 2 Feb. 2000
- [16] *atw* Heft 1 Jan. 1996
- [17] *atw* Heft 2 Feb. 1989
- [18] *Porsch, Hesse, Zwermann, Bernnat*: Spezifikation eines DWR-Brennelementes, UO2 (4 w/o U-235) 18 x 18 – 24, für Vergleichsrechnungen, Interner GRS Bericht 2004.
- [19] *Broeders, Dagan, Sanchez, Travleev*: KAPROS-E: Modular Program System for Nuclear Reactor Analysis, Status and Results of Selected Applications, JK'04, Düsseldorf (2004) (<http://inrwww.fzk.de>)
- [20] *Broeders*: Entwicklungsarbeiten für die Neutronenphysikalische Auslegung von fortschrittlichen Druckwasserreaktoren (FDWR) mit kompakten Dreiecksgittern in hexagonalen Brennelementen, Diss. *Univ. Karlsruhe, KfK* 5072 (1992) (<http://inrwww.fzk.de>)
- [21] *Askew, Fayers, Kemsell*: A General description of the Lattice Code WIMS, Journal of British Nuclear Energy Society, 5, 564 (1966)
- [22] *Fischer, Wiese*: Verbesserte konsistente Berechnung des nuklearen Inventars abgebrannter DWR-Brennstoffe auf der Basis von Zell-Abbrand-Verfahren mit KORIGEN, *KfK* 3014 (1983)
- [23] *Shwageraus, Hejzlar, Kazimi*: Use of Thorium for Transmutation of Plutonium and Minor Actinides, Nuclear Technology 53, Vol. 147 (2004)
- [24] *Send*: Investigations for Fuel Recycling in LWRs, Diplomarbeit am *Forschungszentrum Karlsruhe* (2005) (<http://inrwww.fzk.de>)
- [25] *Koch, Schoof, Mainka* u.a.: The isotope correlation experiment, ICE, Final report. *KfK*-3337 (1982)
- [26] *Weber*: Brennelemententwicklung im Zeichen der Nachhaltigkeit, *atw* Heft 11 Nov. 2005
- [27] *Hesketh*: High Burn-up Fuels for LWRs, FJOHSS 2005, Karlsruhe 2005
- [28] *Kessler, Gompper, Broeders, Kiefhaber*: Moderne Strategien zur Beseitigung von Plutonium, *atw* Heft 1 Januar 2001
- [29] *Merk, Broeders*: Overview of the Amount of Plutonium Generated against the Background of the Fixed Electricity Amount Regulated by Law in Germany, 9th Information Exchange Meeting.P&T, Nîmes, Sept 25-29 2006 (<http://inrwww.fzk.de>)
- [30] *atw* Heft 2 Feb. 1999
- [31] *Fahrenholz, Fried*: Atomkraft als Spaltmaterial, *Süddeutsche Zeitung* 04.01.2006
- [32] *atw* Heft 7 Juli 2005
- [33] *atw* Heft 12 Dez. 2005
- [34] *Pfenning, Klewe-Nebenius, Seelmann-Eggebert*: Karlsruher Nuklidkarte, *FZK*, 6. Auflage 1995, korrigierter Nachdruck 1998
- [35] *Burtak*: Friedliche Verwertung von Plutonium aus Kernwaffen, *atw* Heft 6 Juni 1996
- [36] *Euratom* Research Projects and Training Activities, Volume II, EUR 21229, page 20 (2006), available as pdf file on: http://europa.eu.int/comm/research/energy/fi/fi_pubs/article_1186_en.htm
- [37] *Knebel, Abderrahim, Cinotti, Mansani, Delage, Fazio, Giot, Giraud, Gonzalez, Granget, Monti, Mueller*: European Research Programme for the Transmutation of High Level Nuclear Waste in an Accelerator Driven System, EUROTRANS, 9th Information Exchange Meeting. P&T, Nîmes, Sept 25-29 2006
- [38] *Merk*: Vergleich von Abbrandrechnungen mit HELIOS 1.9 und KAPROS/KARBUS mit zeitlich veränderlicher Leistung, Jahrestagung Kerntechnik 2008 □