

ZUKÜNFTIGE OPTIONEN FÜR DIE ENTSORGUNG VON HOCHRADIOAKTIVEN ABFÄLLEN

K. Kugeler *, J. U. Knebel **, R. Odoj *, P. W. Phlippen *, N. Pöppe ***

*Forschungszentrum Jülich / RWTH Aachen,

** Forschungszentrum Karlsruhe,

*** RWTH Aachen

1. Hochradioaktive Reststoffe aus dem Reaktorbetrieb

Beim Betrieb von Kernkraftwerken fallen hochradioaktive Abfälle an. Die abgebrannten Brennelemente, welche diese Stoffe enthalten, werden bei den heute weltweit kommerziell genutzten Leichtwasserreaktoren jährlich während einer Stillstandszeit aus dem Core entnommen und in ein Kompaktlager im Reaktorcontainment verbracht. In diesem wassergekühlten Zwischenlager befinden sich die Brennelemente in einer dichten Anordnung. Die Unterkritikalität wird durch boriierte Strukturen in den Traggestellen sichergestellt. Die Kühlung des Wasserbeckens geschieht durch redundant ausgeführte Kühlkreisläufe. Nach rund 3 Jahren werden die Brennelemente in Trockenlagerbehälter eingesetzt und in externe oder standortnahe Zwischenlager oder zu Wiederaufarbeitungsanlagen transportiert und dort zwischengelagert. Angaben über Mengen und Zusammensetzung dieser Abfälle sind in Abb. 1 enthalten.

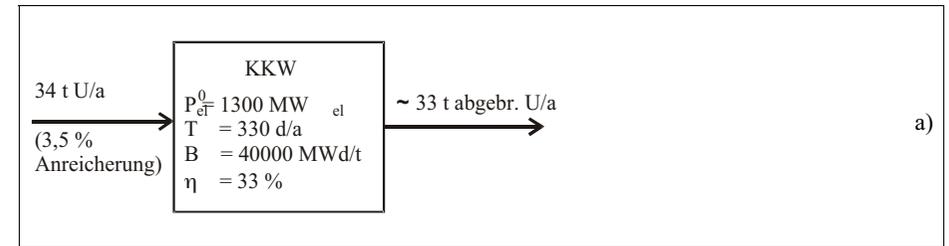
Für eine elektrische Leistung von 1300 MW_{el} benötigt man demnach rund 34 t/a an angereichertem Uran, wenn die Anlage mit 90 % Auslastung und einem Wirkungsgrad von 33 % in Betrieb war. Der mittlere Brennstoffabbrand konnte inzwischen auf etwa 40 000 MWd/t Uran gesteigert werden. Abb. 1 weist auch aus, dass die abgebrannten Brennelemente noch erhebliche Mengen an Spaltstoffen (U235, Pu239, Pu241) sowie neu gebildete minore Aktiniden enthalten. Diese Elemente sind teils unter den Aspekten der energetischen Nutzung, der Nonproliferation sowie der Langzeittoxizität bei der Endlagerung zu beachten.

Einige radioaktive Isotope haben relativ lange Halbwertszeiten, so Cs137 und Sr90 mit 30 bzw. 28 Jahren, die damit für Landkontaminationen nach schweren Störfällen relevant sind; andere wie Zr93, Tc99, J129, Cs135 haben sehr lange Halbwertszeiten von teils mehreren Millionen Jahren, diese haben daher für den Langzeitsicherheitsnachweis von Endlagern eine besondere Bedeutung. Abb. 1 enthält derartige Daten auch für die minore Aktiniden.

Die Aktivität dieser sehr langlebigen Isotope ist allerdings äußerst klein, z.B. beträgt die der Aktiniden rund 1000 Ci/t Uran im Vergleich zu einem Wert von etwa $2,2 \cdot 10^6$ Ci/t Uran für die Spaltprodukte nach der Entnahme aus dem Reaktor. Für alle Verfahrensschritte und Lagersysteme bei der Brennelementver- und -entsorgung müssen immer die sicherheitstechnischen Grundbedingungen bei der Nutzung der Kernenergie eingehalten werden:

- Sicherstellung der Unterkritikalität
- Sichere Abfuhr der Nachwärme und Einhaltung zulässiger Temperaturen
- Sicherer Einschluss der radioaktiven Stoffe in den Anlagen.

Diese Anforderungen müssen im Hinblick auf alle Störeignisse sowohl aus inneren als auch aus äußeren Ursachen erfüllt sein.



Isotope	frische Brennelemente	abgebrannte Brennelemente	Bemerkung
Uran 235	36	12,4	einschl. 4,8 kg U236
Uran 238	964	~ 935	
Plutonium	–	10,5	davon < 60 % spaltbar
minore Aktinide	–	~ 9	~ 5 kg Np ~ 3,5 kg Am ~ 0,5 kg Cm
Spaltprodukte	–	~ 42	< 4 kg Tc, J, Cs

Isotopenmengen (kg/t U)

Isotop	Halbwertszeit (a)	Aktivität (Ci/t Uran)
Zr 93	1 500 000	1,88
Tc 99	210 000	14,2
J 129	17 000 000	0,038
Cs 135	3 000 000	1,2
Cs 137	30	105 000
Sr 90	28	75 500

Isotop	Halbwertszeit (a)	Aktivität (Ci/t Uran)
Np 237	2 200 000	0,537
Pu 239	24 400	330
Pu 240	6 600	478
Pu 242	380 000	1,36
Am 243	8 000	17,4

Abb. 1: Hochradioaktive Reststoffe aus dem Reaktorbetrieb:
a) Mengen bei einem Druckwasserreaktor, b) Isotope in abgebrannten DWR - Brennelementen,
c) Langlebige Spaltprodukte ($ICi=3,7 \cdot 10^{10} Bq$) und d) langlebige Aktiniden

Dementsprechend sind die zeitlichen Verläufe von Aktivitäten sowie der Nachwärmeerzeugung für alle nachfolgenden Betrachtungen äußerst wichtig. Abb. 2 zeigt die beiden Größen als Funktion der Abklingzeit [1].

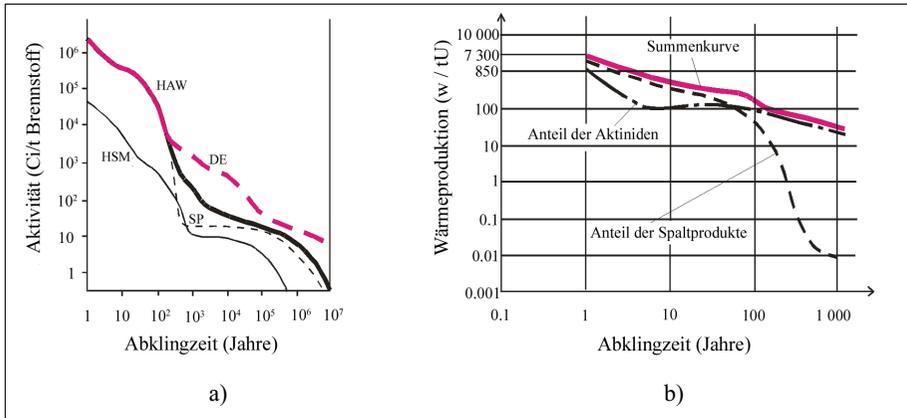


Abb. 2: Zeitliche Verläufe von a) Aktivität und b) Nachwärmeerzeugung abgebrannter Brennelemente (DWR, B = 40 000 MWd/t Uran).

HAW: Hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung, DE: direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente, SP: Spaltproduktanteil, HSM: Strukturmaterialien

2. Mögliche Entsorgungsstrategien für hochradioaktive Reststoffe

Grundsätzlich sind zwei prinzipiell verschiedene Wege der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle denkbar:

- direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente in geeigneten geologischen Formationen
- Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen mit anschließender Feintrennung der Aktiniden (Partitioning) und darauffolgender Umwandlung der Aktiniden durch kerntechnische Prozesse (Transmutation); Lagerung der radioaktiven Reststoffe, im wesentlichen von Spaltprodukten, in Glaskokillen in geeigneten geologischen Formationen.

Die Wege sind in Abb. 3 dargestellt. Modifikationen dieser Prinzipien sind möglich und könnten im Hinblick auf einige der später erläuterten Fragestellungen vorteilhaft sein. So könnten z.B. spezielle sehr langlebige Isotope, die durch die Feintrennung getrennt vorliegen, in besonders angepassten und aufwändiger gestalteten Endlagergebinden separat gelagert werden. Dies könnte etwa für minore Aktiniden oder für die vier in Abb. 1c) genannten sehr langlebigen Isotope sinnvoll sein, da deren Mengen auch vergleichsweise gering sind.

Alle Verfahrensschritte für Weg a) sind entwickelt wie z.B. Kompaktlager im Reaktorcontainment, Transport- und Lagerbehälter, Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente, Konditionierungsanlagen für abgebrannte Brennelemente zur Vorbereitung für die Endlagerung, Endlagerbehälter sowie die Techniken der Herstellung von Endlagerbergwerken in Salz, Granit, Tuff oder Ton. Auch die Einlagerung von Gebinden in derartige Endlagerstätten kann als technisch verfügbar angesehen werden. Strittig ist die Frage des Langzeitsicherheitsnachweises.

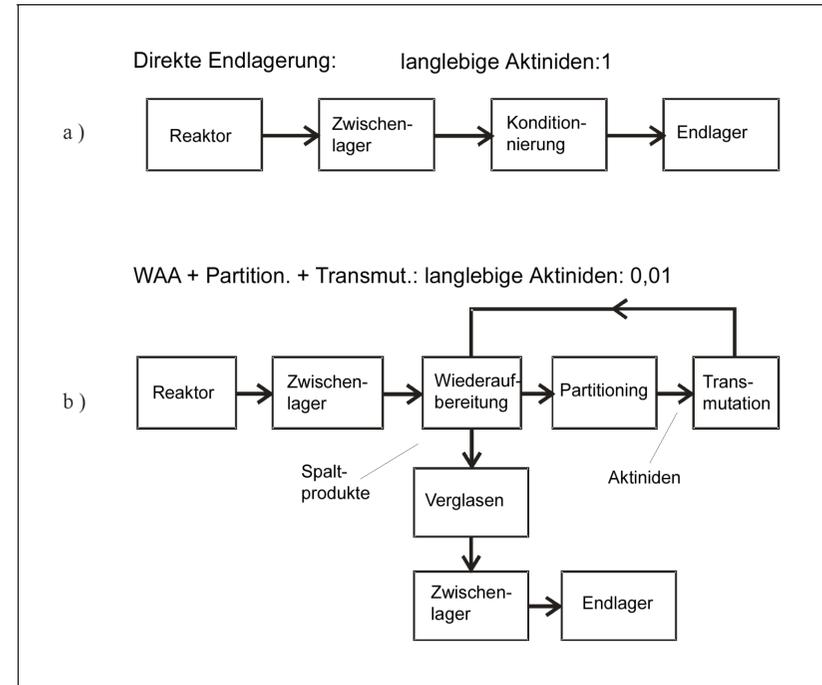


Abb. 3: Mögliche Entsorgungsstrategien für hochradioaktive Reststoffe

In Verfahrensweg b) kommt die Wiederaufarbeitung hinzu, die ebenfalls als voll entwickelt angesehen wird. Verglasungsverfahren für die Herstellung von Glaskokillen zur Aufnahme der hochradioaktiven Reststoffe aus der Wiederaufarbeitung sind ebenfalls entwickelt und werden industriell eingesetzt. Die Zwischenlagerung der Glaskokillen in Trockenlagerbehältern ist ebenso wie die Zwischenlagerung von Brennelementen Stand der Technik. Für die Endlagerung in geologischen Formationen sind ähnliche Konzepte wie für die direkte Endlagerung von Brennelementen entwickelt worden. Insgesamt werden alle Verfahrensschritte des Weges b) außer Partitioning und Transmutation als heute verfügbar angesehen. Für den Sicherheitsnachweis für die Endlagerung der Glaskokillen in geologischen Formationen gilt die

oben genannte Einschränkung ebenfalls. Bei Verfahrensweg b) kommen als wesentliche neue Prozessschritte das Partitioning, d.h. eine chemische Feintrennung für die Aktiniden, und die Transmutation z.B. mit Hilfe von Beschleunigern hinzu. Hier ist noch in großem Umfang Entwicklungsarbeit zu leisten, ehe ein ausreichender Stand der Technik in Hinblick auf die technische Anwendung erreicht wird.

Im Hinblick auf die Mengen, die für eine große 1300 MW_{el}-DWR-Anlage jährlich entsorgt werden müssen, stellen sich die beiden Verfahren folgendermaßen dar:

- Bei der direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente müssen pro Reaktorbetriebsjahr etwa 33 t Uran – entsprechend 59 Brennelementen – in geeigneten Behältern verpackt und eingelagert werden. Es werden rund 300 kg/a minore Aktiniden sowie etwa 350 kg/a Plutonium endzulagern sein.
- Beim Verfahrensweg mit Wiederaufarbeitung, Partitioning und Transmutation werden pro Reaktorbetriebsjahr wesentlich geringere Mengen endzulagern sein: rund 1,3 t Spaltprodukte in etwa 4 m³/a Glaskokillen, weniger als 1 kg/a minore Aktiniden, sowie weniger als 3 kg/a Plutonium.

Die großen Unterschiede bei den Gehalten an langlebigen Reststoffen im Endlager führen dann dazu, dass die zeitlichen Verläufe der Radiotoxizität der Abfallstoffe bei beiden Entsorgungswegen stark unterschiedlich sind (Abb. 4) [2], [3].

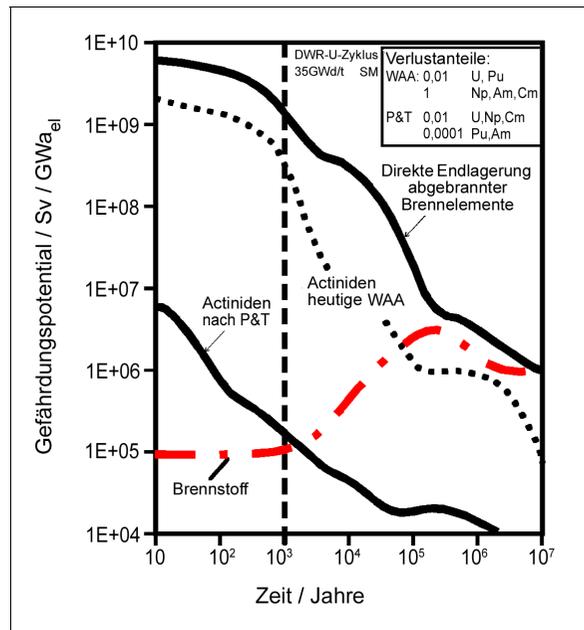


Abb. 4:

Radiotoxizität der Abfallstoffe bei beiden Entsorgungswegen (DWR, B = 35 000 MWd/t Uran)

Mit eingezeichnet ist die Radiotoxizität des Urans, welches ja ohnehin im Boden vorhanden ist und damit eine sinnvolle Bezugsbasis bildet. Die wesentlichen Folgerungen aus dieser Abbildung sind:

- bei der direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente ist ein Sicherheitsnachweis über rund 10⁶ Jahre notwendig,
- bei Einführung von Partitioning und Transmutation wäre der Nachweis nur über 10³ Jahre notwendig.

Ein Nachweis über 10⁶ Jahre wird als schwierig bis unmöglich eingeschätzt; der Nachweis der Rückhaltung der Radioaktivität im Endlager über einen Zeitraum von 1000 Jahren ist bei Einsatz bekannter Techniken möglich. Die Einführung von P+T-Verfahren würde damit die Realisierung praktisch geschlossener Stoffströme und, wie die folgenden Ausführungen zeigen werden, auch einer extrem guten Ausnutzung des Urans möglich machen.

3. Übersicht über Aspekte der Bewertung

Viele Gesichtspunkte sind zu analysieren und zu bewerten, um zu einer Beurteilung der Vorteile bzw. Nachteile eines neuartigen P+T-Verfahrens im Vergleich zur direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente zu gelangen. Im Sinne von Nutzwertanalysen müssen diese verschiedenen Aspekte dann gewichtet werden, um zu einer Gesamtbeurteilung zu kommen. Wenn allerdings bei einer Variante eine unlösbare oder überhaupt nicht beurteilbare Fragestellung auftaucht, könnte dies den Wert der Nutzwertanalysen zunichte machen und eine Variante zwingend erforderlich machen. Überhaupt wird die gesamte Problematik zudem noch von Fragen der Akzeptanz und damit der Politik überlagert. Nichtsdestoweniger ist zunächst eine vorurteilsfreie wissenschaftlich-technische Analyse aller relevanten Aspekte notwendig und hilfreich für die Entscheidungsfindung. Die beim Vergleich der Entsorgungswege zu beachtenden Aspekte sind technischer, sicherheitstechnischer und ökonomischer Natur und betreffen außerdem Umweltfragen sowie Akzeptanzfragen. Ohne dass die folgende Liste (Tab. 1) Anspruch auf Vollständigkeit erheben kann, seien folgende Punkte genannt, die dann später noch etwas ausführlicher behandelt werden:

- technische Realisierung
- Isotopenzusammensetzung der Abfälle
- Toxizitätsindizes
- Energetische Nutzung
- Plutoniumvernichtung
- Nonproliferationsaspekte
- Langzeitsicherheitsnachweis
- Störfallmöglichkeiten (von innen)
- Störfallmöglichkeiten (von außen)
- Gesamtrisiken
- Gesamtkosten
- Stand der Technik

Tab. 1: Aspekte des Vergleichs verschiedener Entsorgungskonzepte

Alle genannten Fragen müssen vergleichend und wissenschaftlich korrekt und überprüfbar beantwortet werden, ehe eine Entscheidung für die eine oder andere Entsorgungsvariante möglich wird. Auch vor der Investition größerer Mittel ist eine Abwägung der Vor- und Nachteile notwendig.

Bei einer zuverlässig und sicherheitstechnisch optimal ausgestalteten Langzeitzwischenlagerung abgebrannter Brennelemente, die realisierbar ist, steht für derartige Analysen und Entscheidungsprozesse auch ausreichend Zeit zur Verfügung.

4. Technische Realisierung von Entsorgungskonzepten

4.1 Direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente in geologischen Formationen

Beim Entsorgungsweg der direkten Endlagerung der abgebrannten Brennelemente [4] werden in einer Heißen Zelle in einer Konditionierungsanlage die Brennelemente demontiert und die Brennstäbe in geeignete Behälter eingesetzt. Hierfür wurde in Deutschland z.B. das in Abb. 5a) wiedergegebene Konzept entwickelt, in anderen Ländern bestehen teilweise recht unterschiedliche Vorstellungen über die Gestaltung derartiger Endlagergebäude.

In einer Zerlegezelle werden die Brennstäbe aus dem Brennelementverband herausgezogen und von dort entweder in voller Länge in einen großen Endlagerbehälter oder nach Zerschneiden in Stücke in einen kleineren Behälter (Pollux) eingesetzt.

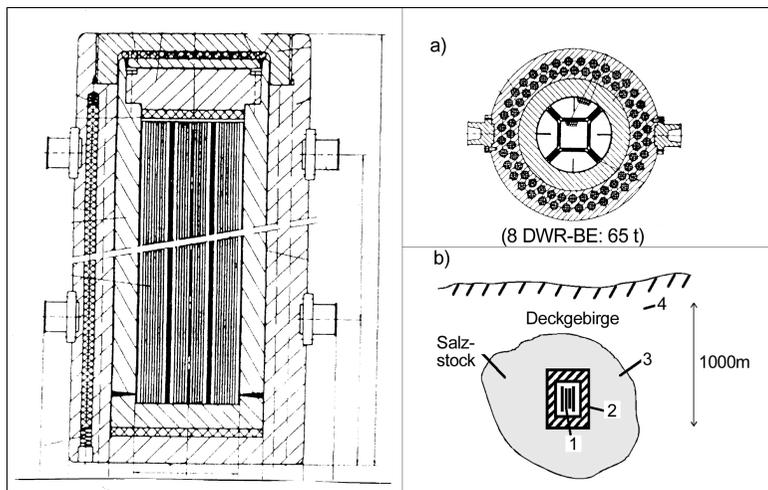


Abb. 5 : Direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente:

a) Endlagerbehälter. Beispiel: 8 DWR-Brennelemente in Behältern von rund 65 t; b) Anordnung der Endlagerbehälter im Salzgestein: 4 Barrieren gegen den Austritt von Radioaktivität

Nach der Verpackung der Brennstäbe in der Konditionierungsanlage stehen Endlagerbehälter für abgebrannte Brennelemente zur Einlagerung im geologischen Endlager bereit. Dies kann ein Salzbergwerk oder eventuell auch ein Lager im Granit sein. Die Endlagerbehälter sollen in horizontalen Stollen oder z.B. die kleineren Polluxbehälter in senkrechten Bohrlöchern im Salzstock eingesetzt werden. Bei diesem Endlagerkonzept wären die Brennstabhüllen (1), sofern sie nicht beim Beladevorgang der Endlagerbehälter bereits zerstört wurden, die Endlagerbehälter (2), der Salzstock (3) und das darüber liegende Deckgebirge (4) als Barrieren anzusehen, die die Bevölkerung vor der Wirkung von radioaktiven Stoffen schützen.

Bei anderen Brennelementen, die direkt endgelagert werden sollen, z.B. Elementen des Hochtemperaturreaktors, kommen als Barrieren Coated-Particle-Schichten, die die Brennstoffpartikel umgeben, hinzu. TRISO Coatings mit einer darin befindlichen Silizium-Carbid-Schicht haben hier offenbar besondere Vorteile im Hinblick auf die Rückhaltung von Radioaktivität im Endlager.

4.2 Wiederaufarbeitung, Partitioning und Transmutation sowie Endlagerung der Reststoffe in geologischen Formationen

In der Wiederaufarbeitung [5], [6] erfolgt eine Auftrennung der Bestandteile der abgebrannten Brennelemente – hier seien LWR-Brennelemente zugrundegelegt – in Strukturmaterial, Hüllrohre, Uran, Plutonium und Spaltprodukte. Uran und Plutonium werden rezykliert und zur Herstellung neuer Brennelemente eingesetzt. Die Spaltprodukte werden in flüssiger Form in speziellen Tanks gespeichert, bevor sie einer Verglasungsanlage zugeführt werden. Verfahrensbedingt enthalten die Spaltproduktlösungen (HAW) eine Restmenge an Uran, Plutonium sowie an minoren Aktiniden. Je nach Stand der Trenntechnik verbleibt ein geringer Anteil von derzeit etwa 1% des Urans und des Plutoniums im HAW-Waste. Tritium und Krypton 85 werden getrennt gewonnen und geeignet zwischengespeichert. Aufwändige Reinigungs- und Rückhaltprozesse sorgen heute dafür, dass die gesetzlichen Grenzwerte für Freisetzungen aus den Anlagen deutlich unterschritten werden. Die Prozessgebäude für die Wiederaufarbeitung enthalten eine Vielzahl von Reaktionsapparaten, Speicherbehältern, Rohrleitungen und Pumpen, die alle kritikalitätssicher ausgelegt sein müssen und für die die Nachwärmeabfuhr zuverlässig erfolgen muss, ohne dass zulässige Prozesstemperaturen überschritten werden. Die Barrierefunktion der genannten Komponenten als 1. Barriere gegen den Austritt von Radioaktivität muss ebenfalls gewährleistet sein. Gegen die heute üblichen angenommenen Einwirkungen von außen bieten dickwandige Betonstrukturen Schutz. Für zukünftige Annahmen sind neue Überlegungen anzustellen. Insbesondere sind in Wiederaufarbeitungsanlagen besondere Vorkehrungen gegen Spaltstoffentwertung zu treffen, da die Stoffe hier teilweise in praktisch reiner chemischer Form anfallen.

Nach der Phase der Lagerung in Tanks, die sehr zuverlässig gekühlt werden müssen, erfolgt ein Verglasungsprozess [7]. Die Herstellung von Glaskokillen erfolgt in einer Verglasungs-

anlage (s. Abb. 6). Hier wird ein Schmelzofen bei hohen Temperaturen, fast 1200°C, betrieben; ein kompliziertes Reinigungsverfahren zur Reinigung der Abgase des Prozesses ist nachgeschaltet. Die Glaskokillen (s. Abb. 7a) besitzen ein äußeres Edelstahlcanning, welches beim Herstellungsprozess bereits als Abfüllbehälter dient. Alle Prozessschritte des Verglasungsverfahrens laufen in Heißen Zellen ab und müssen wegen des hohen Aktivitätsinventars als besonders sensitive kerntechnische Anlage, in der die Radioaktivität in flüssiger und gasförmiger Form, z.T. unter sehr hohen Temperaturen gehandhabt wird, angesehen werden. Die Glaskokillen werden zunächst für mehrere Jahrzehnte zwischengelagert, um die Nachwärme vor der Einlagerung im Endlager hinreichend absinken zu lassen. Auch bei diesem Lagerkonzept (Trockenlagerbehälter) erfolgt die Abfuhr der Nachwärme allein durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung und freie Konvektion von Luft, wie dies auch bei Zwischenlagerbehältern für abgebrannte Brennelemente der Fall ist.

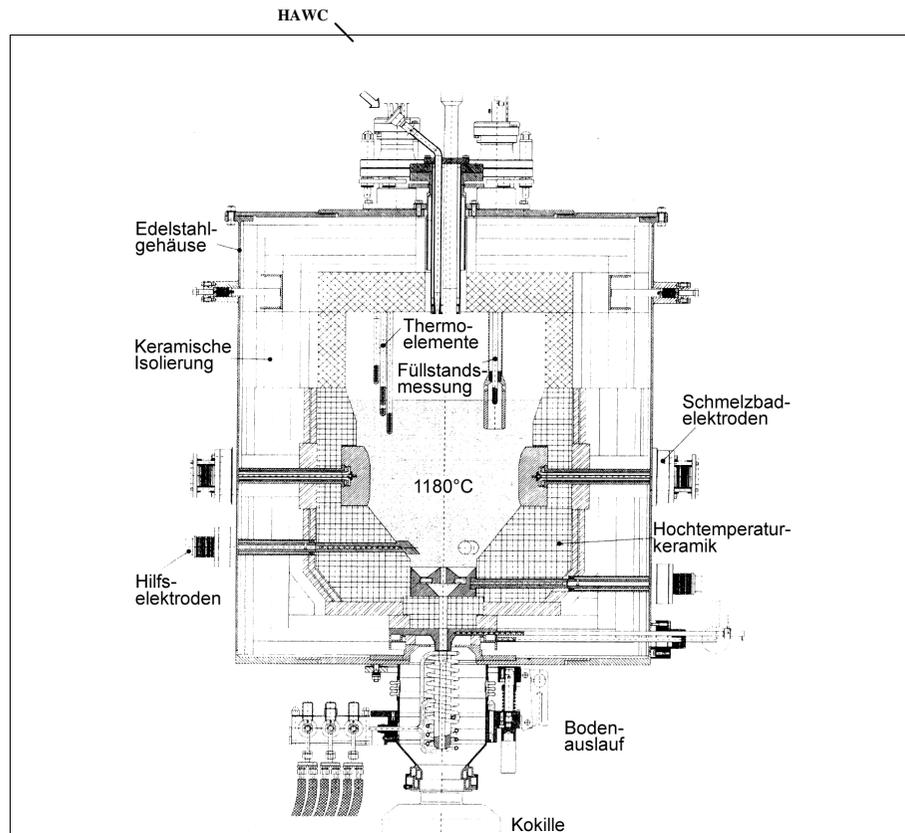


Abb. 6: Schmelzofen zur Herstellung von Glaskokillen, beladen mit hochradioaktiven Spaltprodukten (HAW)

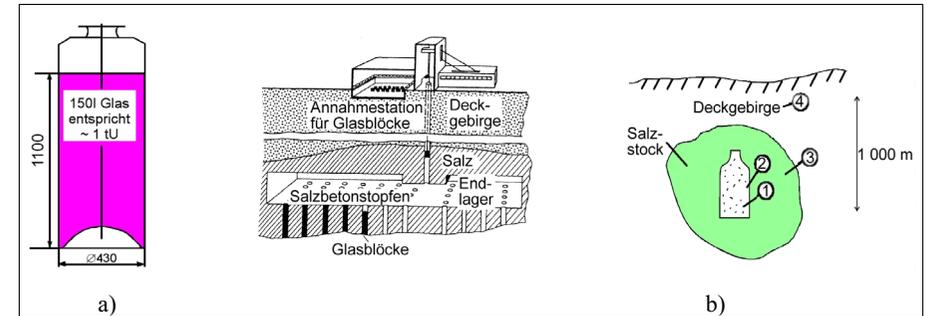


Abb. 7: Endlagerung von Glaskokillen, beladen mit Spaltprodukten (HAW): a) Glaskokille für die Aufnahme von Spaltprodukten (ein 150 l Glas enthält die Spaltprodukte von etwa 1 t Uran aus LWR), b) Konzept des Endlagers im Salzgestein für die Lagerung von Glaskokillen

Eine Glaskokille enthält die Spaltproduktmengen von rund 1 t Uran aus abgebrannten LWR-Brennelementen. Die maximale Leistung einer Glaskokille beträgt dann etwa 2,5 kW. Für diese Bedingungen ist die selbsttätige Nachwärmeabfuhr vom Behältersystem an die Luft der Lagerhalle zuverlässig auslegbar, ohne dass die maximalen Glastemperaturen einen Wert von 450°C übersteigen. Die Lagerbehälter sind in Hallen aufgestellt, die denjenigen für die Brennelementlagerbehälter entsprechen. Ebenso wie die Brennelementlagerbehälter sind die Glaskokillenlagerbehälter gegen die heute angenommenen Einwirkungen von außen ausgelegt. Für zukünftige Anforderungen werden auch hier neue Überlegungen notwendig werden. In anderen Ländern sind z.T. auch andere Lösungen für die Zwischenlagerung von Glaskokillen in Gebrauch, etwa in Gebäuden mit Lagerschächten. Nach Ablauf einer hinreichend langen Zwischenlagerzeit, mehrere Jahrzehnte sind vorteilhaft, werden die Glaskokillen in tiefen geologischen Formationen – Salz, Granit, Tuff und Ton werden hier für geeignet gehalten – endgelagert. Die Länge der Zwischenlagerzeit ist maßgebend für die mögliche Packungsdichte der Kokillen im Endlager, z.B. im Salz, da durch Zerfall ein Großteil der Nachwärme während der Zwischenlagerphase bereits an die Umgebungsluft abgegeben werden kann. Die Endlagerung der Kokillen kann in senkrechten Bohrlöchern oder in horizontalen Stollen im Bergwerk erfolgen (Abb. 7b)). Alle Verfahrensschritte bis zur Einlagerung der Kokillen müssen sehr sorgfältig im Hinblick auf Störungen von innen oder außen analysiert werden.

Nach der durchgeführten Lagerung und Verschließung des Endlagers mit geeigneten Materialien, z.B. Salzgruß, können nur extreme Bewegungen im Gebirge oder ein massiver Zufluss von Wasser über sehr lange Zeiten zu einer Gefährdung der technischen Barrieren gegen den Austritt von Radioaktivität (Glasmatrix (1), Edelstahlcanning (2) und evtl. äußerer Abschirm- oder Schutzmantel aus Gussmaterial) führen. Die geologischen Barrieren (Salzstock (3), Deckgebirge (4)) sorgen selbst nach Versagen der technischen Barrieren für eine Verzögerung des Transports von Radioaktivität in die Biosphäre. Auch wird in der Regel nach Austritt von

Radioaktivität aus dem Endlager eine starke Verdünnung durch Transport und Verteilung im Erdreich zu erwarten sein.

Wenn die angestrebte Reduktion der Radiotoxizität entsprechend Abb. 4 erreicht werden soll, muss sich an die Wiederaufarbeitung in Zukunft ein Partitioning- und Transmutationprozess [8], [9] anschließen. Hier werden zunächst in einer Feinreinigung die minoren Aktiniden Americium, Curium und Neptunium möglichst vollständig aus dem Abfallstrom, der der Verglasung zugeführt wird, abgetrennt. Je vollständiger diese Abtrennung gelingt, desto weniger Aktiniden werden ins Endlager verbracht. Erst wenn eine Abtrennung mit Werten für Cm < 0,01, Am < 0,001, Np < 0,01, U < 0,01, Pu < 0,01 gelingt, kann das gewünschte Ziel von P+T-Verfahren, dass die Radiotoxizität der Abfälle im Endlager schon nach rund 1000 Jahren unter derjenigen des Uranerzes liegt, erreicht werden.

Für das Partitioning werden Verfahren entwickelt, um die Aktiniden mittels flüssig/flüssig-Extraktion zu trennen. Ausgehend vom flüssigen hochaktiven Abfall aus der Wiederaufarbeitungsanlage (z.B. aus dem PUREX-Prozess für Leichtwasserreaktor-Brennelemente) schließen sich die Prozessschritte des Partitioning mit Abtrennung von Americium und Curium aus dem PUREX-Raffinat an. Im ersten Prozessschritt werden die dreiwertigen Aktiniden (Am, Cm) gemeinsam mit den Lanthaniden extrahiert und vom Großteil der Spaltprodukte getrennt. Hierfür ist der DIAMEX-Prozess vorgesehen.

Die Aktiniden/Lanthaniden-Trennung soll dann mit Hilfe des ALINA-Prozesses erfolgen (Actinide (III)-Lanthanide Inter-group separation in Acidic medium). So konnte z.B. Americium bereits zu > 99,91 quantitativ extrahiert werden. Zwischen Americium und den Lanthaniden wurden hohe Dekontaminationsfaktoren erreicht. Sicher ist der Partitioning-Prozess noch in den Anfängen, und umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind notwendig, um die geforderten Trennfaktoren und Restgehalte der Aktiniden im hochaktiven Abfall zu realisieren. Im Hinblick auf eine sicherheitstechnische Bewertung ist bereits absehbar, dass der Partitioning-Schritt eine erhebliche Ausweitung des Wiederaufbereitungsverfahrens darstellt und dass alle Sicherheitsüberlegungen, die im Zusammenhang mit diesem Verfahrensschritt anzustellen sind, hier voll übertragen werden müssen.

Auch im Hinblick auf Nonproliferationsaspekte werfen Prozesse, in denen reine Materialien wie Curium, Neptunium, Americium gewonnen werden, die als Spaltstoffe zu bewerten sind, ähnliche Fragen auf, wie dies heute für Plutonium und Uran bekannt ist. Wenn es zukünftig nicht zur anschließenden Transmutation der Aktiniden kommen sollte, können die abgetrennten Isotope, deren Mengen sehr klein sind, auch in speziellen, besonders zuverlässig ausgeführten Endlagergebänden in geologischen Formationen endgelagert werden.

Eine neue zukünftige Methode zur Umwandlung von Aktiniden besteht darin, unterkritische Beschleuniger-getriebene Systeme zu benutzen. Entsprechend Abb. 8a) soll ein Protonen-

strahl mit Hilfe von Linearbeschleunigern erzeugt werden. Charakteristische Werte für Protonenenergie und Stromstärke werden bei rund 1,5 GeV und 10 mA für eine technische Anlage liegen. Nach Umlenkung durch Magnetfelder wird der Strahl durch ein Protonenfenster in einen unterkritischen Reaktor eingeführt. Als Protonenfenstermaterial kommt z.B. Wolfram infrage. Der Protonenstrahl löst im Spallationstarget eine Spallationsreaktion aus; je nach Targetmaterial wird eine große Zahl von Neutronen freigesetzt, etwa 30 Neutronen bei Verwendung eines Bleitargets. Auch Blei-Wismut-Gemische wurden in diesem Zusammenhang vorgeschlagen. Target- und Blanketsystem werden mit Blei bzw. Blei-Wismut gekühlt. Die Reaktionswärme kann über einen Zwischenkreislauf zur Erzeugung von Dampf genutzt werden (Abb. 8b)). Ein Teil der im Dampfturbinenprozess erzeugten elektrischen Energie wird zur Erzeugung des hochenergetischen Protonenstrahls genutzt, ein Teil wird als Produkt der Anlage nach außen ins Netz abgegeben. Im Blanket sind Bestrahlungs Kanäle vorhanden, in denen Isotope wie Americium, Curium und Neptunium in starken Neutronenfeldern umgewandelt werden. Hierfür wurden verschiedene Brennelementformen und -modifikationen vorgeschlagen und im Detail geprüft. Das unterkritische, multiplizierende System erlaubt je nach Wahl von k_{eff} eine Neutronenvermehrung um einen Faktor 10 bis 20.

Die Abschaltung der Anlage erfolgt durch Abschaltung des Protonenstrahls. Danach muss, wie dies auch bei normalen kritischen Spaltreaktoren der Fall ist, die Abfuhr der Nachzerfallswärme sichergestellt werden. Hierfür können Wärmetauscherloops eingesetzt werden. Reaktivitätsstörfälle sind auszuschließen, wenn k_{eff} genügend weit von 1 entfernt ist. Hier ist ein Optimum für k_{eff} zu finden im Hinblick auf eine günstige Neutronenbilanz und den Ausschluss von Kritikalitätsstörfällen.

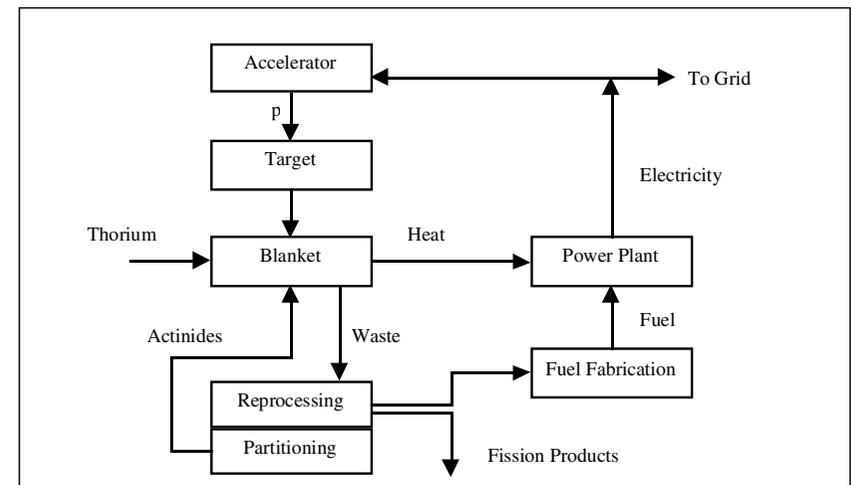


Abb. 8: Vorstellungen zum Konzept von Beschleuniger-getriebenen Transmutationsanlagen:
a) Grundkonzept

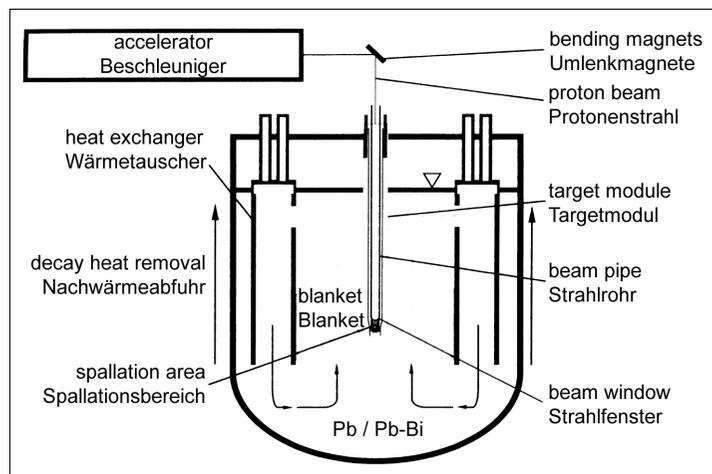
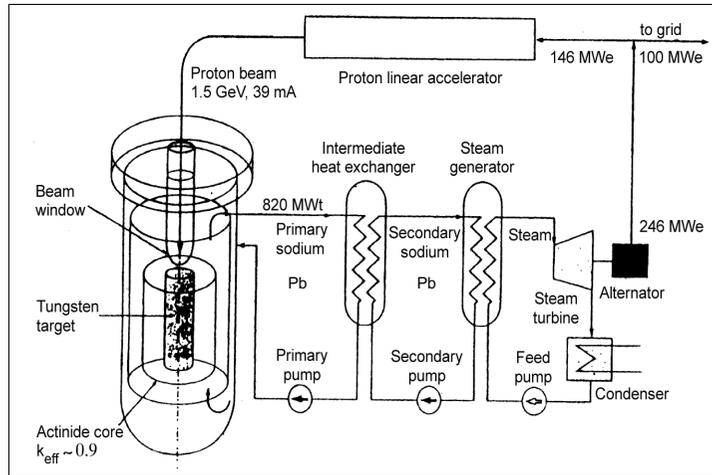


Abb. 8: Vorstellungen zum Konzept von Beschleuniger-getriebenen Transmutationsanlagen:
 b) Prinzipschema der Wärmeauskopplung (oben),
 c) Vorschlag für einen Transmutationsreaktor (unten)

Wesentlich für die Güte der Isotopenumwandlung ist die Art des Neutronenspektrums. Im Hinblick auf die Sicherheit des Transmutationssystems ist die Art und Gestaltung der Barrieren wesentlich. So sind die Wandungen des Primärsystems für den Transmutationsreaktor sowie das Containment zur Aufnahme des Transmutationsreaktors als unabhängige Barrieren anzusehen. Im Vergleich zu Spaltreaktoren ist offenbar eine Barriere weniger vorhanden. Besonders die neuen Anforderungen, die sich in Zukunft aus extremen äußeren Einwirkungen ergeben können, werden zu Modifikationen der Anlagenkonzepte, die heute diskutiert werden, führen müssen.

5. Toxizitätsindizes der Abfälle

Ganz ohne Zweifel weist der Entsorgungsweg WAA + P + T im Vergleich zur direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente erhebliche Vorteile im Hinblick auf das Gefährdungspotenzial auf (Abb. 9). Man erkennt wie wichtig eine weitgehende Abtrennung von Plutonium und minoren Aktiniden sowie deren möglichst vollständige Umwandlung sind. Ganz langfristig dominieren die Zerfallsketten der Spaltprodukte sowie einige Uranisotope das radiologische Geschehen. Eine gezielte Umwandlung auch dieser Stoffe erscheint schwierig und sehr aufwändig. Sie könnten jedoch nach Abtrennung in speziellen, besonders widerstandsfähigen und auslaugresistenten, Abfallgebinden endgelagert werden. Ihre Mengen sind sehr klein und machen damit besondere Aufwendungen möglich.

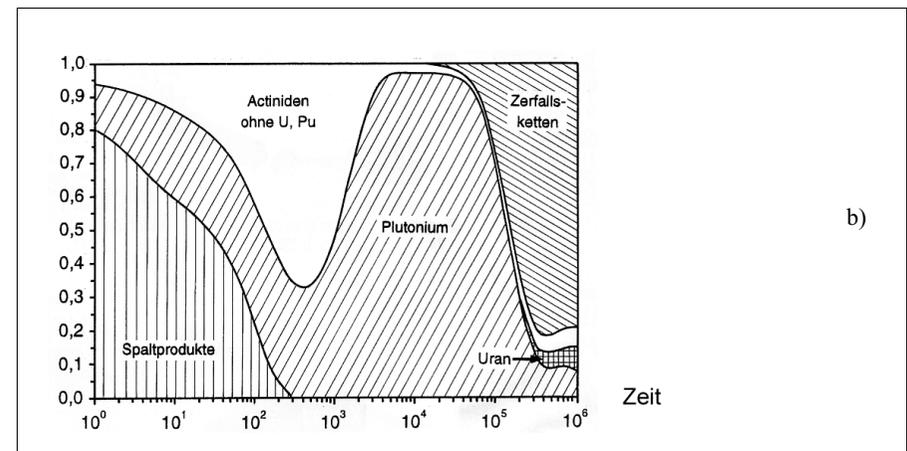
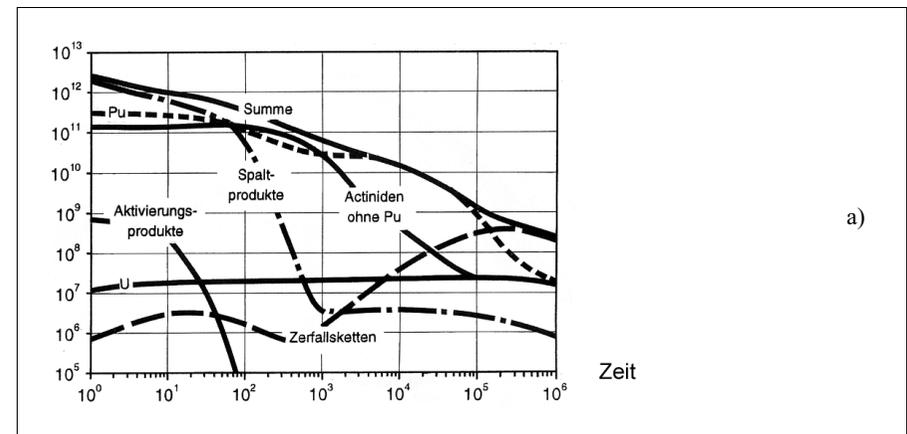


Abb. 9: Zeitlicher Verlauf der Toxizitätsindizes radioaktiver Abfallstoffe: a) Toxizitätsindizes bezogen auf 1 t Uran, b) Anteile am Toxizitätsindex für verschiedene Isotopengruppen

- Bei der direkten Endlagerung von Brennelementen wird das gesamte Plutonium ins Endlager verbracht;
- beim Thorium Einsatz anstelle von Natururan wird gegenüber der direkten Endlagerung von Brennelementen für das endzulagernde Plutonium ein Reduktionsfaktor von 10 bis 20 erreicht;
- bei Wiederaufarbeitung wird ein Reduktionsfaktor von 30 erreicht werden können;
- mit Wiederaufarbeitung sowie Partitioning und Transmutation wird ein Reduktionsfaktor von 50 möglich sein.

Allerdings steigen auch die Aufwendungen für die Prozessdurchführung mit abnehmendem Plutoniumgehalt der Endlagergebinde. Wie weit die Reduktion zu treiben ist, muss an Hand einer Optimierung des Gesamtprozesses im Hinblick auf Kosten und Risiken entschieden werden. Bei Einführung des Entsorgungsweges WAA + P+T bedürfen alle Verfahrensschritte, bei denen reine Stoffe, z.B. Plutonium, Americium, Curium oder Neptunium abgeschieden und gespeichert werden, einer sehr strengen, kontinuierlichen Spaltstoffüberwachung, die international nach den Regeln der IAEA durchgeführt werden muss. Besonders hoch angereicherte Materialien müssen hierbei weltweit lückenlos kontrolliert werden. Ein Isotopengemisch, wie es bei der Entsorgung mit direkter Endlagerung der abgebrannten Brennelemente vorliegt, ist hierbei natürlich zunächst günstiger zu beurteilen. Allerdings stellt sich bei dieser Variante die Frage, wie in späteren Zeiten nach der Einlagerung in ein Endlager der Missbrauch des dann dort vorhandenen Spaltstoffs zuverlässig vermieden werden kann. Bei der Entsorgung der deutschen Kraftwerke z.B. würden bei Verfolgung des Weges der direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente rund 100 t Plutonium mit einem Anteil von rund 60% spaltbaren Isotopen im Endlager vorhanden sein (Annahme: Entlademenge 500 t U/a, 20 a Betrieb, ~ 10 kg Pu/t U).

Im Leichtwasserreaktor mit LEU-Zyklus wird nicht nur Plutonium in größerer Menge erzeugt, sondern es werden auch minore Aktiniden mit einer Rate von etwa 9 kg/ t Uran gebildet. Bei WAA und P+T-Verfahren werden die entsprechenden Plutonium-, Uran- und minore Aktinidenmengen in fast reiner Form getrennt, gespeichert und weiterverarbeitet. Abb. 11 zeigt den Verlauf der Anzahl kritischer Massen während der Lagerzeit für relevante Transurane [10]. Sie müssen gegen Zugriff und Entwendung zuverlässig geschützt werden. Dies kann nur durch noch besser weiter entwickelte internationale Kontrollen geschehen.

Die Beurteilung, welcher Entsorgungsvariante unter diesem Gesichtspunkt der Vorzug zu geben ist, setzt also eine umfangreiche Analyse der Sicherung des waffenfähigen Materials über die gesamten Entsorgungswege voraus, ehe belastbare Aussagen über Vor- und Nachteile gemacht werden können.

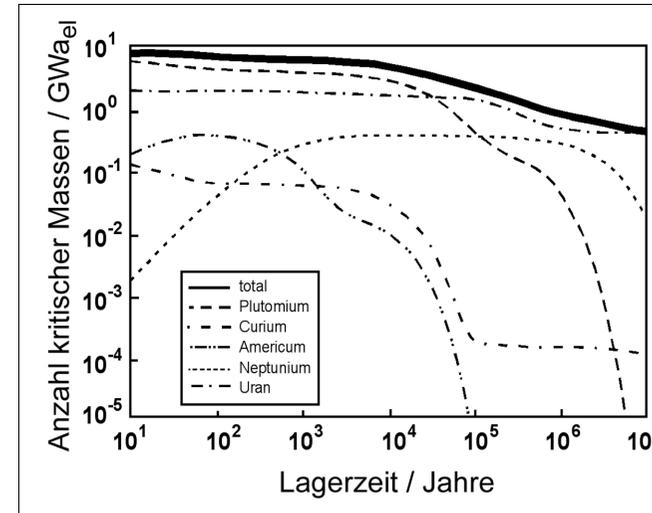


Abb. 11: Anzahl der kritischen Massen je GWa_{ei} für abgebrannte Brennelemente während der Lagerzeit im Endlager (total, Plutonium, Aktiniden)

8. Langzeitsicherheitsnachweis

Der Nachweis, dass bei der Endlagerung die radioaktiven Stoffe sicher über alle Zeiten im Endlager eingeschlossen bleiben, hat sich als ein wesentlicher Aspekt bei der Diskussion zur Akzeptanz der Kernenergie herausgestellt. Zunächst ist festzustellen, dass die technischen Bedingungen, unter denen die Radioaktivität im Endlager verbleibt, ungleich günstiger sind, als die in einem arbeitenden kommerziellen Reaktor. Sowohl das spezifische Aktivitätsinventar, die Temperaturen und Drücke, die Nachwärme und die Neutronendosen und Transienten, als auch die Lasten aus Annahmen über äußere Einwirkungen gefährden in einem Reaktor die Barrieren gegen den Austritt von Radioaktivität in weitaus stärkerem Ausmaß als in einem Endlager. Trotzdem bestehen in der Öffentlichkeit, insbesondere wegen der teilweise extrem langen Halbwertszeiten einiger Spaltprodukte und Aktiniden, Bedenken gegen die Realisierung von Endlagern.

Aus Endlagergebinden, die z.B. in einem trockenen Salzstock eingelagert sind, können aus inneren oder aus absehbaren äußeren Ursachen keine radioaktiven Stoffe entweichen. Erst beim extremen Störfall mit starkem, über sehr lange Zeiträume andauernden Wassereintritt ist langfristig eine Freisetzung und dann der Transport von radioaktiven Stoffen in die Ökosphäre denkbar. Im Normalbetrieb sorgt ein sehr effektives System von 4 unabhängigen Barrieren für die Rückhaltung der radioaktiven Inhalte der Endlagergebinde. Nach einem massiven Einbruch von Wasser in die Endlagerstätte kommt es zur lang andauernden Korrosion des Endlagerbehälters. Korrosionsraten für verschiedene Behältermaterialien wurden gemessen. Legt

man z.B. einen relativ hohen Wert für die Korrosionsrate von etwa $100 \mu\text{m/a}$ in Salzlauge zugrunde, so würde ein Behälter mit einer Wandstärke von 500 mm für einen Lagerzeitraum von rund 1000 Jahren einen sicheren Einschluss der Spaltprodukte bzw. Spaltstoffe ermöglichen. Danach ist ein Versagen durch Korrosion und Außendruck nicht auszuschließen. In dem genannten Zeitraum sind praktisch alle relevanten Spaltprodukte, so auch Cs137 ($T_{1/2}=30 \text{ a}$) und Sr90 ($T_{1/2}=28 \text{ a}$) zerfallen, so dass deren Radiotoxizität nach dem angegebenen Zeitraum schon weit unter derjenigen von Uranerz liegt. Durch die Langzeit-Korrosion von Eisen entsteht Wasserstoff mit einer spezifischen Menge von etwa $550 \text{ mN}^3/\text{t Eisen}$. Aller Voraussicht nach wird sich der Wasserstoff im Salzstock relativ schnell ausbreiten und letztendlich zu Wasser rekombinieren.

Die radiologische Belastung, die von einem Endlager ausgeht, wird dann durch die radioaktiven Stoffe bestimmt, die nach rund 1000 Jahren noch im Endlagergebäude enthalten sind. Im Falle abgebrannter Brennelemente sind dies neben den schon in Kapitel 1 angegebenen 4 äußerst langlebigen Spaltprodukten (Tc , J , Cs , Zr) die Aktiniden sowie alle Uranisotope.

Im Falle der Wiederaufarbeitung sind bis auf sehr geringe Reste an Uran und Plutonium noch minore Aktiniden im HAW enthalten und könnten im Endlager bei Störfällen freigesetzt werden.

Wie schon in Kapitel 2 gezeigt, tritt der Schnittpunkt der Radiotoxizität von WAA-Abfällen in Glaskokillen und von Uranerz schon nach 10^4 bis 10^5 Jahren auf.

Bei Realisierung von Partitioning- und Transmutationsverfahren ist der Restgehalt an Plutonium und minoren Aktiniden in den Abfallgebänden so niedrig, dass die Umweltauswirkungen bei Störfällen an diesem Lager äußerst niedrig wären. Nach etwa 1000 Jahren liegt die Radiotoxizität der Reststoffe bei Durchführung von P+T-Verfahren, wie bereits in Kapitel 2 dargestellt, ohnehin unter derjenigen von Uranerz.

Bei der Analyse des Wassereintruchs in ein Endlager müssen alle Ausbreitungsvorgänge in den geologischen Strukturen berücksichtigt werden. Hier ist die genaue Kenntnis der Transferfaktoren notwendig. Insbesondere die Wasserführung in den geologischen Strukturen, die das Endlager überdecken, hat einen großen Einfluss auf das Ausbreitungsverhalten. Abb. 12 zeigt das Ergebnis einer Analyse für ein Glaskokillenlager in Granit. Unterstellt sind hier zum einen der normale Wasserzufluss, zum anderen ein Wasserzufluss, der um einen Faktor 100 über dem Normalwert liegt [11].

Demnach liegt die zusätzliche radiologische Belastung aus den genannten beiden Fällen langfristig um mehr als einen Faktor 100 bis 10 unter den z.B. in der Schweiz gesetzlich festgelegten Grenzwerten. Diese wiederum liegen um einen Faktor 100 unter den mittleren radiologischen Belastungen aus der natürlichen Umgebungsstrahlung in der Schweiz.

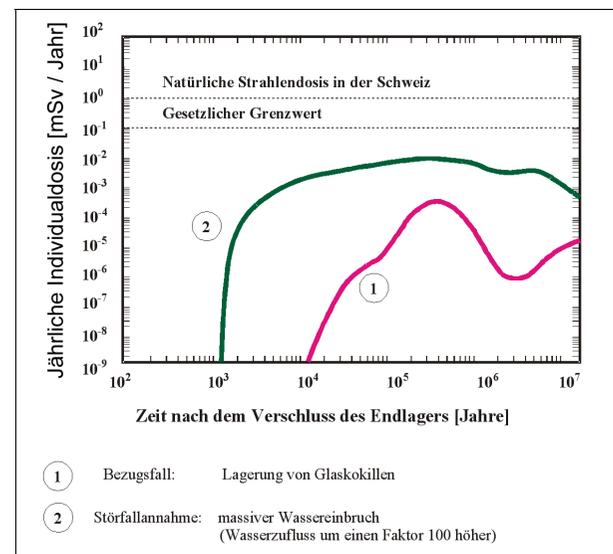


Abb. 12: Dosisbelastungen aus einem Endlager für Glaskokillen mit HAW (Granit)

Selbst dieser extreme Störfall stellt also keine nennenswerte Gefährdung der Umwelt dar. Ähnliche Ergebnisse ergeben sich bei der Analyse von Störfällen an Endlagern mit direkter Endlagerung abgebrannter Brennelemente. Abhängig vom Wirtsgestein sowie von der Technik der Endlagergebäude ergeben sich unterschiedliche jährliche Individualdosen, die sich in ähnlicher Höhe bewegen wie in Abb. 12 dargestellt.

Die generelle Aussage, dass die denkbaren radiologischen Belastungen durch Freisetzungen aus einem Endlager keine vergleichbaren Höhen wie die natürlichen Belastungen erreichen können und dass die wirklichen Risiken der Kernenergienutzung durch schwere Reaktorunfälle bestimmt wird, wird durch Ergebnisse der hier vorgestellten Art voll bestätigt.

Wenn Partitioning- und Transmutationsverfahren realisiert werden, werden die denkbaren Dosen nach einem Endlagerstörfall noch einmal um einen Faktor 100 niedriger erwartet. In jedem Fall dürfte dann ein Langzeitsicherheitsnachweis über einen längeren Zeitraum als 1000 Jahre entbehrlich werden.

9. Störfallmöglichkeiten

Die verschiedenen Entsorgungswege sind im Hinblick auf Störfälle recht unterschiedlich zu beurteilen, da die Verfahrenstechniken sowie der Zustand der hochradioaktiven Stoffe äußerst

unterschiedlich ist. Im Verfahrensablauf von WAA+P+T werden zusätzlich in verschiedenen Lagern hochaktive Abfallmengen oder Spaltstoffe gespeichert, teils als Endprodukte des Prozesses und teils zwischen den einzelnen Prozessschritten.

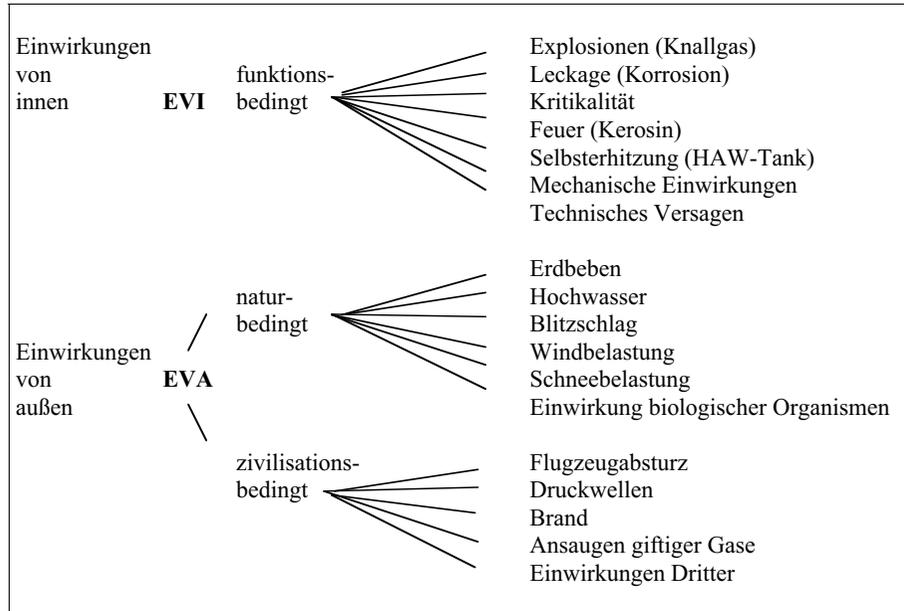


Abb. 13: Störfallannahmen für eine Wiederaufarbeitungsanlage und sinngemäß auch für eine Partitioninganlage

Nicht nur bei allen verfahrenstechnischen Prozessen, sondern auch bei allen Lagern müssen die wesentlichen Aspekte der kerntechnischen Sicherheit wie Unterkritikalität, Nachwärmeabfuhr, Einschluss der Radioaktivität und Abschirmung erfüllt sein.

Im Genehmigungsverfahren sind Einwirkungen von innen und außen zu behandeln. Abb. 13 zeigt eine Zusammenstellung von Ereignissen, die z.B. für eine Wiederaufarbeitungsanlage und damit auch sinngemäß für eine Partitioninganlage zu behandeln sind.

Schon heute und in Zukunft noch stärker werden die Risiken bei der Entsorgung wesentlich durch die Einwirkungen von außen mitbestimmt. Gegen die heute im Genehmigungsverfahren schon unterstellten Einwirkungen von außen (im wesentlichen sind dies Gaswolkenexplosion in der Nähe der nuklearen Anlage, Detonation von Kohlenwasserstoffgemischen in hinreichendem Abstand, Erdbebeneinwirkungen bis zu einer Stärke von rund 0,3 g, Absturz einer Phantom-Militärmaschine auf die nukleare Anlage) sind auch alle Anlagen der nuklearen Ent-

sorgung auszuliegen. Abb. 14 zeigt die entsprechend den genannten Anforderungen bekannten Belastungsannahmen wie sie von der Auslegung der Kernkraftwerke her bekannt sind [12].

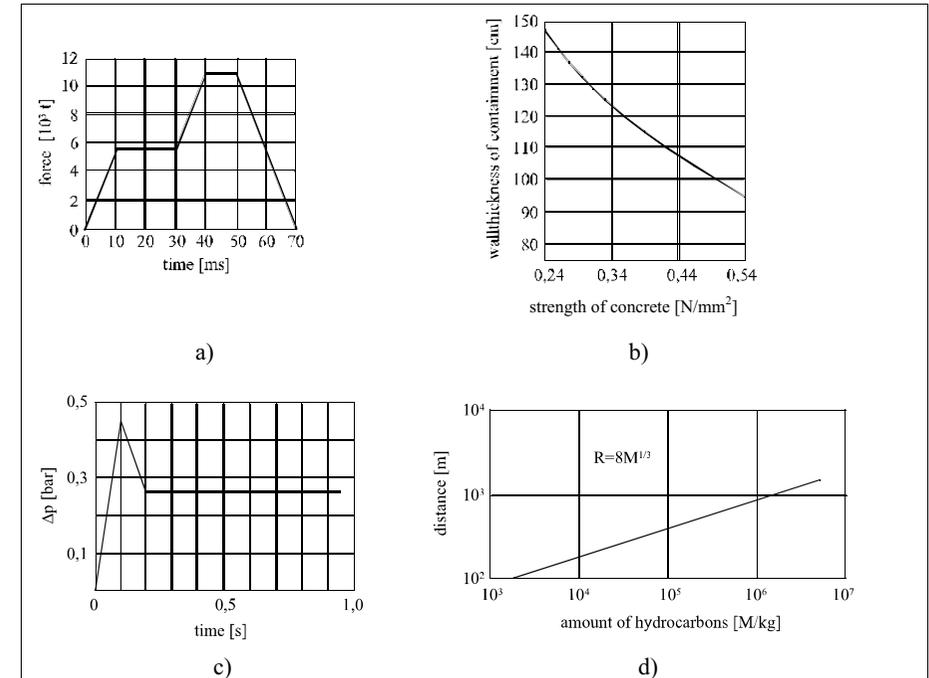


Abb. 14: Annahmen zu äußeren zivilisationsbedingten Einwirkungen auf Kernkraftwerke: a) Kraftverlauf auf das Reaktorgebäude beim Flugzeugabsturz, b) Wandstärke des Reaktorgebäudes zur Verhinderung von Penetration, c) Druckverlauf bei Gaswolkenexplosion und d) Abstands-Mengenrelation für detonationsfähige Stoffe

Nach den terroristischen Anschlägen am 11.09.2001 in den USA wird intensiv geprüft, welche Auswirkungen derartige extreme Einwirkungen von außen auf nukleare Anlagen hätten [13]. Insbesondere Wiederaufarbeitungsanlagen, Partitioninganlagen und Transmutationsanlagen, die alle komplexe Prozessanlagen enthalten, müssen dann in Zukunft wohl gegen verstärkte Einwirkungen von außen geschützt sein.

So wird vom gesamten Prozessgebäude beim terroristisch herbeigeführten Absturz eines Großraumflugzeuges eine wesentlich größere Stoßkraft aufzunehmen sein, und auch die erhöhte Penetrationswirkung größerer Triebwerks- bzw. Flugzeugteile von Großraumflugzeugen wird zu beachten sein. Auch die mitgeführten Kerosinmengen bei Großraumflugzeugen (bis zu 300 t) im Vergleich zu den bislang angenommenen 5 t Kerosin bei Militärmaschinen

schaffen neue Bedingungen für äußere Einwirkungen. Die erheblich größeren Brandlasten durch große Kunststoffmengen im Großraumflugzeug kommen hinzu.

So wird statt der bisherigen Spezifikation für Brandeinwirkung – Flammentemperaturen von 800°C über eine Dauer von einer halben Stunde – mit wesentlich höheren Flammentemperaturen und längeren Branddauern zu rechnen sein.

Bei dem Weg der direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente ist die hier angesprochene Problematik wesentlich einfacher zu beherrschen als bei WAA+P+T. Zwischenlagerbehälter sind gegen diese Einwirkungen ausgelegt, auch die Gebäude können durch unterirdische Anordnung gesichert werden.

Auch angenommene extreme Erdbebenbelastungen, die über die heutigen Annahmen hinausgehen, führen zu sehr unterschiedlichen Anforderungen an die Prozessschnitte bei den Entsorgungswegen Direkte Endlagerung und WAA+P+T.

Im Hinblick auf Terroranschläge und extreme Erdbebeneinwirkung sind daher insgesamt die beiden Entsorgungswege sehr unterschiedlich zu bewerten. Der Schutz der Prozessanlagen bei WAA- sowie P+T-Anlagen macht hohe technische Aufwendungen gegen derartige extreme Einflüsse notwendig. Dies wird sich in erhöhten Kosten für die Durchführung dieser Prozessschritte niederschlagen.

10. Stand der Technik

Die verschiedenen Verfahrensschritte bei den Entsorgungsoptionen weisen einen unterschiedlichen Stand der Technik auf (siehe Tab. 2).

Die Kompaktlagerung abgebrannter Brennelemente im Reaktorschutzgebäude für einige Jahre wird in praktisch allen Leichtwasserreaktoren seit Jahrzehnten durchgeführt. Dieses Verfahren ist auch in vielen Ländern noch in Gebrauch, um abgebrannte Brennelemente längerfristig zwischen zu lagern. Auch als Eingangslager für Wiederaufarbeitungsanlagen wird dieses Lagerprinzip seit langer Zeit verwendet. Die Technik der Lagerung im Wasserbecken ist insgesamt als technisch voll etabliert und bewährt anzusehen.

Die trockene Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente in Guss- oder Stahlbehältern ist ebenfalls seit mehr als 2 Jahrzehnten im erfolgreichen Einsatz [14], [15]. Auch Glaskokillen, die als besonders günstig für die Aufnahme von hochradioaktiven Reststoffen angesehen werden, lassen sich vorteilhaft in Gussbehältern transportieren und für lange Zeiten zwischenlagern. Diese Lagertechnik ist genehmigt und wird in zunehmendem Umfang praktiziert. Auch hierbei kann von einer etablierten Technik gesprochen werden.

Verfahrensschritt	Zeitdauer der Anwendung [a]	Beurteilung	Bemerkung
Brennelement-zwischenlagerung	50 ... 100	entwickelt + im Einsatz	kann noch weiter verbessert werden (physischer Schutz)
Brennelement-konditionierung	1	entwickelt	kann noch weiter verbessert werden
Brennelement-endlagerung		nahezu entwickelt	praktisch nicht nachweisbar
Wiederaufarbeitung	1	entwickelt + im Einsatz	Trennschärfe kann noch verbessert werden
Partitionierung	1	in Entwicklung	Trennschärfe muss noch verbessert werden
Glaskokillenherstellung	1	entwickelt + im Einsatz	Behälter können noch verbessert werden
Glaskokillen-zwischenlagerung	50...100	entwickelt + im Einsatz	kann noch weiter verbessert werden (physischer Schutz)
Glaskokillenenndlagerung	10 ³	nahezu entwickelt	nachweisbar
Transmutation	1	Entwicklung notwendig	sehr komplexe Verfahrenstechnik

Tab. 2: Hinweise zum Stand der Technik bei wesentlichen Verfahrensschritten

Die Wiederaufarbeitung von abgebrannten Leichtwasserreaktor-Brennelementen wird seit Jahrzehnten erfolgreich praktiziert, das gleiche gilt für Verglasungsanlagen zur Herstellung von Glaskokillen mit HAW-Beladung. Konditionierungsanlagen zur Herstellung von endlagerfähigen Gebinden, die mit LWR-Brennstäben beladen sind, gelten als Stand der Technik, wenn auch eine kommerzielle Nutzung gegenwärtig noch nicht ansteht.

Damit kann insgesamt festgestellt werden, dass die Verfahrensschnitte zur Realisierung der Option „direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente“ bis hin zum geologischen Endlager verfügbar und überwiegend erfolgreich langzeiterprobt sind. Das gilt im Übrigen auch für abgebrannte Brennelemente anderer Reaktoren, z.B. von Hochtemperaturreaktoren. Auch der Entsorgungsweg über Glaskokillen mit HAW kann als etabliert angesehen werden.

Partitioning-Verfahren befinden sich noch in der Entwicklung. In Tab. 3 ist der heute industriell und im Labormaßstab erreichte Stand bei Wiederaufarbeitung und Partitioning wiedergegeben. Insbesondere die ausreichende Abtrennung von Np, Am und Cm muss demnach noch entwickelt werden. Die Höhe der erreichbaren Trennschärfe beeinflusst die Radiotoxizität im Endlager direkt nach Ablauf der Spaltprodukt- und Plutoniumphase. Aussichtsreiche Ansätze zur Realisierung der notwendigen Verfahrenstechniken sind vorhanden und versprechen das notwendige Ziel zu erreichen.

Völlig neuartige Entwicklungen sind im Bereich von Transmutationsanlagen durchzuführen. So werden Protonenbeschleuniger, Targeteinrichtungen, Blanketsysteme und spezielle Kühlsysteme zu entwickeln sein. Protonenbeschleuniger für die Bereitstellung hochenergetischer Protonen mit einer hinreichend großen Stromstärke werden auf der Basis in Betrieb befindlicher Spallationsanlagen für ausführbar gehalten.

Element	Anforderung	Erreicht	
		Industrie (PUREX)	Labor
U	< 0,1%	0,2%	< 0,1%
Pu	< 0,05%	0,2%	< 0,1%
Np	< 1%	40%	< 5%
Am	< 0,05%	100%	0,1%
Cm	< 0,05%	100%	< 0,1%

Tab. 3: Schwermetallverluste bei Wiederaufarbeitung und beim Partitioning

Allerdings ist im Hinblick auf die Steigerung der Stromstärke des Protonenstrahles etwa ein Faktor 50 erforderlich, um Größenordnungen, die für die Transmutation relevant sein werden, zu erreichen. Weiterhin muss der Wirkungsgrad dieser Anlagen, d.h. das Verhältnis von Strahlenergie zu eingesetzter elektrischer Energie, verbessert werden. Ein kontinuierlicher Betrieb mit hoher Anlagenverfügbarkeit ist eine weitere unverzichtbare Anforderung an die Beschleunigeranlage und die sonstigen Komponenten des Transmutationsystems. Die Auslegung wirft neuartige Fragen im Hinblick auf Kühlung und Gestaltung auf. Hier kann auf Erfahrungen bei der Technik schneller Brutreaktoren zurückgegriffen werden. Die Entwicklung von Bleikreisläufen hat mit umfangreichen Testeinrichtungen begonnen. Das Protonenfenster stellt eine besonders sensitive Komponente jeder Spallationsanlage dar. Hier kommt es auf hinreichend lange Standzeiten und Techniken zum schnellen Auswechseln dieses Bauteils an. Verschiedene Lösungen für dieses Problem werden derzeit untersucht. Im Blanket der Transmutationsanlage sollen die Aktiniden möglichst effektiv umgewandelt werden und dies erfordert neuartige Brennstoff- bzw. Brennelementkonzepte. Verschiedenartige Vorschläge zur Gestaltung und Auslegung dieser Elemente sind bekannt und werden teils einer praktischen Überprüfung zugeführt.

Generell sei darauf hingewiesen, dass Transmutationsanlagen im Grundsatz eine neue Nuklear-technik darstellen und viele Fragen, wie z.B. das Betriebs- und Regelverhalten und insbesondere auch das Störfallverhalten noch grundlegende Analysen und Nachweise notwendig machen.

Im Hinblick auf den Stand der Technik der Endlagerung hochradioaktiver Reststoffe in geologischen Formationen ist folgendes anzumerken:

Die Herstellung der Endlagerbergwerke ist seit langem Stand der Technik. Dies gilt sowohl für die Endlagerung in Salzstöcken als auch im Granit. Die Handhabung kleinerer Gewichte, wie z.B. Pollux-Behälter zur Aufnahme von abgebrannten Brennelementen oder ähnlicher Behälter für Glaskokillen ist erprobt und ohne Schwierigkeiten im Bergwerk durchführbar. Die Manipulation großer Behälter – bis zu 65t für die Aufnahme abgebrannter Brennstäbe vorgesehen und geplant – macht sicher noch spezielle Tests vor einer kommerziellen Nutzung notwendig.

Insgesamt gilt die direkte Endlagerung von abgebrannten Brennelementen derzeit als technisch durchführbar. Wegen der extrem langen Zeiträume der Lagerung sind Nachweise zum Langzeitverhalten allerdings praktisch nicht durchführbar und das Genehmigungsverfahren muss sich auf Annahmen, die zumeist aus technischer Sicht sehr plausibel sind und durch geologische Analogie belegt werden, stützen. Dies allerdings wird oft von Gegnern der Kernenergienutzung nicht anerkannt und daher ist derzeit keine generelle Akzeptanz für die Endlagerung erreichbar.

Die Endlagerung von Glaskokillen, die mit HAW beladen sind, wird durch die relativ kürzeren (10^4 bis 10^5 a) notwendigen Nachweiszeiträume erleichtert. Bei Einführung von P+T-Verfahren werden die Bedingungen nochmals günstiger. Nach rund 1000 Jahren wird bei weitgehender Abtrennung der Aktiniden durch Partitioning und weitgehende Umwandlung der Isotope durch Transmutationsverfahren die Radiotoxizität der Abfälle unter derjenigen des Uranerzes liegen. Technische Realisierung und Nachweis über diesen Zeitraum sind als gegeben einzuschätzen.

11. Gesamtbewertung

Die Gefahr von schwerwiegenden Störereignissen mit Spaltproduktfreisetzungen ist bei dem komplexen Verfahrensablauf von WAA und P+T viel eher gegeben als bei der direkten Endlagerung. Besonders wichtig im Hinblick auf die Akzeptanz einer gewählten Entsorgungstechnik ist daher die Beurteilung der damit verbundenen Gesamtrisiken.

Aus vorliegenden Risikostudien ist ablesbar, dass offenbar die Risiken der Kernenergienutzung ganz überwiegend durch die Kernkraftwerke und deren denkbare schwere Störfälle bestimmt ist; die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten schwerwiegender radiologischer Folgen ist bei Entsorgungsanlagen um mehrere Größenordnungen kleiner als bei Kernkraftwerken. Zwischenlager weisen z.B. demnach relativ geringe Risikobeiträge auf. Beim Vergleich der unterschiedlichen Entsorgungswege sind insbesondere die neu hinzukommenden Risiken durch Partitioning-Verfahren, Speicher für Spaltprodukte oder Aktiniden, sowie für Transmutationsanlagen zu ermitteln und zu bewerten.

Der Frage der Höhe der Gesamtrisiken kommt damit bei der Beurteilung von Vor- und Nachteilen von P+T-Verfahren im Vergleich zur direkten Endlagerung insgesamt besondere Bedeutung zu:

- Die Radiotoxizität des Abfalls nimmt bei Durchführung von P+T-Verfahren stark ab; nach rund 1000 Jahren liegt sie unterhalb derjenigen von Uranerz.

- Die radiologischen Risiken bei der Durchführung komplexer Verfahren von WAA+P+T sind hoch, sie steigen mit dem Transmutationsgrad an. Dies sind Risiken, die unmittelbar bei der Prozessführung bestehen und nicht erst nach sehr langer Zeit während der Endlagerung möglicherweise auftreten können.

Auch im Hinblick auf die Gesamtkosten bestehen bei beiden Entsorgungswegen sicherlich erhebliche Unterschiede und es sind mehrere Parameter zu untersuchen, die diese Kosten beeinflussen. Es bestehen folgende Abhängigkeiten von der Zwischenlagerzeit der abgebrannten Brennelemente und vom Transmutationsgrad:

- Mit zunehmendem Transmutationsgrad steigen bei WAA+P+T die Umwandlungskosten und sinken die Endlagerkosten: eine Optimierung dieses Parameters ist notwendig.
- Mit zunehmender Zwischenlagerzeit steigen bei direkter Endlagerung abgebrannter Brennelemente die Zwischenlagerkosten und es sinken die Endlagerkosten. Auch hier ist eine optimale Zwischenlagerzeit zu finden. Sie wird mehrere Jahrzehnte betragen.

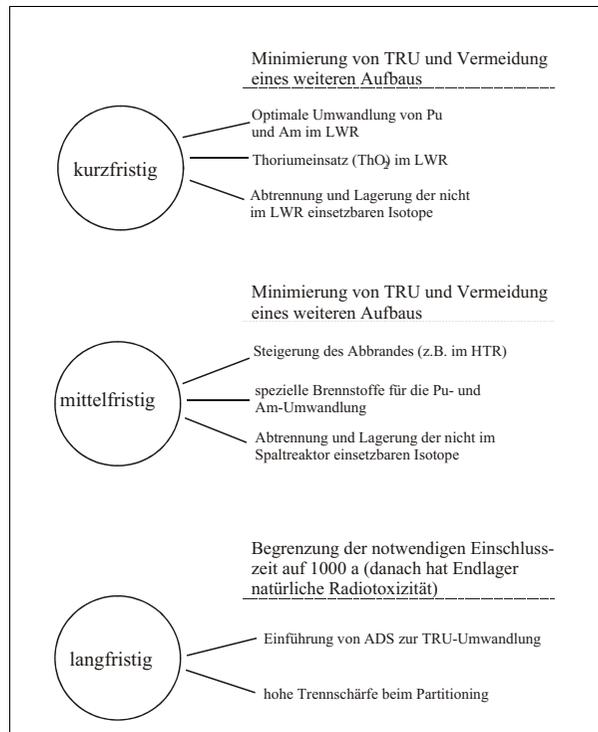


Abb. 15: Mögliche Strategien für die Kernbrennstoffver- und -entsorgung (TRU = Transurane, ADS = Accelerator Driven Transmutation)

Für die Vorgehensweise bei zukünftigen Ausrichtungen der Entwicklung und Realisierung von Brennstoff-Kreisläufen sei auf Abb. 15 verwiesen. Hier kann zwischen kurzfristigen, mittelfristigen und langfristigen Maßnahmen unterschieden werden.

Je nach Zeithorizont lassen sich damit Brennstoffwege realisieren, bei denen die Mengen an langlebigen radioaktiven Reststoffen immer kleiner werden, bis hin zur ADS-Strategie mit Begrenzung des Nachweises der Endlagersicherheit auf weniger als 1000 Jahre. Die Fragestellung der Nuklearen Entsorgung kann damit insgesamt ohne dauerhafte Belastung der Umwelt gelöst werden.

Literatur

- [1] G. Herrmann
Radioaktive Abfälle – Probleme und Verantwortung
Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1983
- [2] R. Odoj, P. W. Phlippen
Ist die Transmutationstechnik ein Weg, die langfristigen
Entsorgungsfragen zu lösen?, VDI-Berichte, Nr. 1271, 1998
- [3] KFK
Radioaktivität und Kernenergie,
Karlsruhe, 2001
- [4] H. Röthemeyer
Endlagerung radioaktiver Abfälle
VCH, Weinheim/New York/Basel/Cambridge, 1991
- [5] F. Baumgärtner
Nukleare Entsorgung, Band I, II, III
Thiemig Verlag, München, 1980
- [6] C. Keller, H. Möllinger
Kernbrennstoffkreislauf, Band II
Dr. A. Hüthig Verlag, Heidelberg, 1978
- [7] G. Rothetal
Verglasung hochaktiver Abfälle
Atomwirtschaft, 41. Jg., 1996, Heft 10
- [8] C. Rubbia et al
Conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier
CERN/AT/95-44 (ET), 1995
- [9] OECD
Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation
Euratom Report, 18898, 1999
- [10] T. Bodewig
Optimierte Umwandlung von Plutonium und Americium im Druckwasserreaktor,
Dissertation RWTH Aachen, Febr. 2004

- [11] Jahresbericht PSI, 1992
- [12] H. P. Berg, T. Schäfer
Stand von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet „Einwirkungen von außen“
auf Kernkraftwerke, Bfs, Dez. 1992
- [13] VDI
Die Sicherheitstechnische Auslegung von Kerntechnischen Anlagen in Deutschland
gegen Terrorismus, Stellungnahme, Düsseldorf, Nov. 2001
- [14] Deutsches Atomforum, Kerntechnische Gesellschaft, VP Gesellschaft Bautechnik,
VDI Gesellschaft Energietechnik, Standortnahe Zwischenlager,
Inforum Verlag, Bonn, 2001
- [15] RSK, FZ Jülich:
Zwischenlager-Workshop, Jülich, Januar 2001

