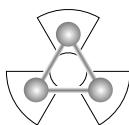


## Textvorschlag für Abschnitt 5.4.2 des Berichts der Endlagerkommission



**Institut für Festkörper-Kernphysik gGmbH** Institute for Solid-State Nuclear Physics  
Gemeinnützige Gesellschaft zur Förderung der Forschung IFK mit beschränkter Haftung  
Geschäftsführer/CEO: A. Huke, Amtsgericht Berlin-Charlottenburg, HRB 121252 B  
Leistikowstraße 2, 14050 Berlin, Germany  
[kontakt@festkoerper-kernphysik.de](mailto:kontakt@festkoerper-kernphysik.de)

Partitionierung und Transmutation (PuT) bedeutet die Auftrennung der Stoffe in abgebrannten LWR-Brennelementen und die Umwandlung der abgetrennten Transurane mittels Neutronenbeschuss in einem Kernreaktor in Spaltprodukte. Die Effizienz dieses Prozesses wird wesentlich durch die Partitionierung vorherbestimmt. Da Partitionierung eine Stofftrennung bedeutet, kann prinzipiell jedes geeignete Trennungsverfahren dafür eingesetzt werden. Vom BMWi und BMBF wurde zu dieser Thematik vor kurzem eine ausführliche Studie in Auftrag gegeben, zu der zahlreiche Wissenschaftler aus den renommiertesten nuklearen Forschungseinrichtungen (KIT, RWTH Aachen, GRS, HZDR, Forschungszentrum Jülich) unter Federführung der Akademie der Technikwissenschaften (Acatech) beigetragen haben<sup>[1]</sup>. Diese 2013 erschienene "Acatech-Studie" beschäftigt sich eingehend mit PuT-Szenarien und ihren Auswirkungen. Zwei nachfolgend von der Kommission in Auftrag gegebene Studien einzelner Privatunternehmen/-vereine stützen sich auf die Acatech-Studie<sup>[2][3]</sup>, lassen jedoch keine zusätzlichen Inhalte erkennen. Die Acatech-Studie soll hier deshalb als zentrales Vergleichsdokument herangezogen werden, wenn sie in Teilen auch kritikwürdig ist, wie unten gezeigt wird.

Die Radiotoxizität geologisch endzlagernder nuklearer Abfälle wird in den ersten 100-300 Jahren durch die stark wärmeentwickelnden Spaltprodukte (die "Asche" der Kernspaltung) dominiert. Anschließend bleiben im Wesentlichen Plutonium und in geringem Maße die minoren Aktiniden (zusammen kurz: Transurane) als mittelaktive Nuklide, die über geologische Zeiträume endzulagern sind. In einem abgebrannten Brennelement aus einem typischen Leichtwasserreaktor liegen beide Komponenten gemischt vor. Dies stellt an ein Endlager unnötig hohe Anforderungen, da es sowohl für die stark wärmeentwickelnden, jedoch vergleichsweise schnell zerfallenden Spaltprodukte, sowie gleichzeitig für die wenig aktiven, jedoch langfristig von der Biosphäre abzuschirmenden Transurane ausgelegt sein muss.

*Partitionierung* zielt darauf ab, diese Komponenten durch chemisch/physikalische Verfahren zu trennen und damit das Endlagerproblem zu vereinfachen. *Transmutation* ist ein weiterer möglicher Schritt, auch die Transurane zu "verbrennen", d.h. ebenfalls in Spaltprodukte umzuwandeln, die nur 100-300 Jahre zu lagern sind. Ein Endlager könnte damit entfallen.<sup>[4]</sup>

---

<sup>[1]</sup>Ortwin Renn, "Partitionierung und Transmutation - Forschung – Entwicklung – Gesellschaftliche Implikationen", 2013, ISBN 978-3-8316-4380-6. [http://www.acatech.de/fileadmin/user\\_upload/Baumstruktur\\_nach\\_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Projektberichte/acatech\\_STUDIE\\_Transmutationsforschung\\_WEB.pdf](http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Projektberichte/acatech_STUDIE_Transmutationsforschung_WEB.pdf)

<sup>[2]</sup>Brenk Systemplanung (2015). Gutachten zum Thema „Transmutation“ im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-MAT 45.

<sup>[3]</sup>Öko-Institut e.V., UHH-ZNF (2015). Gutachten "Transmutation" im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-MAT 48

<sup>[4]</sup>Es gibt eine weitere Verwendung des Begriffs "Transmutation", mit dem die Umwandlung durch Neutronenbeschuss der im nuklearen Abfall vorhandenen langlebigen Spalt- und Aktivierungsprodukte in kurzlebige oder stabile Kerne gemeint ist. Damit könnte die erwähnten Lagerzeit der Spaltprodukte von 100-300 Jahren noch verkürzt werden. Diese Methode soll hier nicht näher erörtert werden, kann aber zu einer weiteren Reduktion der langlebigen Abfallmenge auf wenige 10 Tonnen mit sehr geringen Lageranforderungen führen, von denen nur wenige Kilogramm hohe Einschlussvorkehrungen erfordern, wie unten erläutert wird.

Weder Partitionierung noch Transmutation stellen neuartige technische Verfahren dar. Transmutation läuft in jedem Kernreaktor ab, und eine eingeschränkte, partielle Form der Partitionierung wird seit Jahrzehnten im nasschemischen PUREX-Prozess zur industriellen Wiederaufarbeitung von Brennelementen angewendet. Weitere Partitionierung findet in ergänzenden gleichartigen nasschemischen Prozessen in kleinerem Maßstab auf dem PUREX-Stoffstrom angewendet statt zur industriellen Gewinnung von Radionukliden für medizinisch/technische Zwecke wie Cs-137, Jod-131, Am-241. Die Verfahren wurden jedoch für andere Zwecke entwickelt und nie gezielt in großem Maßstab zur Vernichtung oder Entschärfung nuklearer Abfälle eingesetzt.

Etwa ein Drittel der in Deutschland genutzten nuklearen Abfälle wurden zur sicheren Endlagerung und besseren Handhabung bereits im unpartitionierterem Zustand verlastet. Dies erschwert und verteuert somit eine nachträgliche Partitionierung, stellt jedoch keine grundlegende technische Hürde dar.

## Stand von Wissenschaft und Technik

Zur Einschätzung der vorhandenen und in Reichweite befindlichen Optionen zur Behandlung des nuklearen Abfallproblems gehört die Erfassung des Kenntnisstands in allen dazu relevanten Bereichen von Natur- und Ingenieurwissenschaften. Eine Einschränkung auf lediglich einen Teilbereich der implementierten Kerntechnik wird dem nicht gerecht. Dies umso mehr, da die Kerntechnik von jeher technisch interdisziplinär zusammengesetzt ist. Inhärent spezifisch ist nur ein kleiner Teil aus der angewandten Kernphysik. Größeren Anteil haben Maschinen/Anlagenbau, Material- und Fertigungstechnik, chemische Verfahrenstechnik. In allen diesen technischen Disziplinen wurden in der industriellen Praxis in den letzten Dekaden ganz erhebliche Fortschritte erzielt. In der Kerntechnik hingegen nicht. Es bestand kein ausreichender Wille über die etablierte Leichtwasserreaktortechnologie hinaus effizientere Technik zur Marktreife zu entwickeln. In Deutschland ist das an der in den 90er Jahren erfolgten faktischen Abwicklung der Kernforschungszentren in Karlsruhe und Jülich zu erkennen. Erst kürzlich wird weltweit koordiniert mit dem Generation IV International Forum<sup>[5]</sup> diese Entwicklung langsam wieder aufgenommen. Innerhalb der EU ist dies das SNETP-Programm<sup>[6]</sup>.

Der oft in Zusammenhang mit Partitionierung erwähnte hydrometallurgische (nasschemische) PUREX-Prozess ist für den Zweck der nuklearen Abfalltrennung denkbar ungeeignet<sup>[7]</sup>, wird jedoch häufig und fälschlich als die einzige mögliche Methode dargestellt. Die schnelle Beschaffung von waffenfähigem Plutonium durch das U.S.-Militär als Reaktion auf den Koreakrieg war Hauptzweck der „Plutonium-Uran Extraktion“. Bereits 1955 war eine erste Anlage betriebsbereit. Als militärische Maßnahme stand hier weder die Effizienz noch die zivile Nutzung im Vordergrund, lediglich die schnelle Plutoniumproduktion zählte. Dennoch hat man später versucht, PUREX auf die zivile Anwendung in Form von Wiederaufarbeitungsanlagen zu übertragen, indem mit dem rückgewonnenen Plutonium Mischoxid-Brennelemente (MOX) für Leistungsreaktoren produziert wurden. Durch die erwähnte Ineffizienz und ungenaue Trennung wurde dies jedoch nie konsequent durchgeführt.

---

<sup>[5]</sup>Moderne Entwicklungen der Generation IV <http://gen-4.org>

<sup>[6]</sup>Webauftritt der Sustainable Nuclear Energy Technology Platform: <http://www.snetp.eu>

<sup>[7]</sup>Beim PUREX-Verfahren kommt die Flüssig/Flüssig-Extraktion zum Einsatz. Es werden Löslichkeitsunterschiede zwischen hydrophilen und hydrophoben Lösungsmitteln ausgenutzt. Insbesondere die dabei eingesetzten organischen Lösungsmittel werden durch die ionisierende Strahlung zerstört und produzieren dadurch größere Mengen mittelaktiver Abfälle. Um dies einzuschränken, muß der bestrahlte Brennstoff 5-10 Jahre abklingen, was den PuT-Durchsatz erheblich verringert. Zudem ist das PUREX-Verfahren auf die Abtrennung von Uran und Plutonium beschränkt. Eine weitere Auftrennung erfordert weitere Extraktionsschritte mit weiteren spezifischen Lösungsmitteln. Die Flüssig/Flüssig-Extraktion erfordert ohnehin viele wiederholte Schritte, um eine akzeptable Auftrenngenaugkeit zu erzielen. Derartige Anlagen würden daher unnötig groß, teuer und langsam.

Das seit 60 Jahren praktisch unveränderte PUREX-Verfahren ist in Bezug auf die für eine Endlagerung notwendige Partitionierung somit auf keinen Fall Stand der Technik. Für die Stofftrennung gibt es weit präzisere und effizientere Verfahren. Diese werden von der Acatech-Studie<sup>[1]</sup> zwar größtenteils genannt, aber ohne sachliche Begründung nicht in die Szenarien einbezogen. So kommt man in der Acatech-Studie zum falschen Schluss, dass eine Endlagerung, wenn auch deutlich reduziert, weiterhin notwendig wäre. In Erkenntnis dieses Mangels wird das BMWi hierzu eine Ergänzungsstudie bei der Technischen Universität München in Auftrag geben, die jedoch frühestens 2017 fertiggestellt sein wird. In dieser sollen PuT-Szenarien basierend auf *pyrometallurgischen* Verfahren und ihre Auswirkungen auf die nukleare Abfallsituation genau analysiert werden.

Im Gegensatz zu den hydrometallurgischen (PUREX-ähnlichen) Verfahren eignen sich pyrometallurgische Verfahren besonders für die nukleare Abfalltrennung, bei denen die Stofftrennung ohne chemische Hilfsstoffe nur durch physikalische Methoden erfolgt. Insbesondere geeignet ist hier die fraktionierte Destillation/Rektifikation, wie sie in großindustriellem Maßstab für Erdölraffinierung, Meerwasserentsalzung und Auftrennung von Metallgemischen, z.B. zur Reinigung von Erz angewendet wird.

Als etabliertes Beispiel aus der industriellen Metallurgie sei hier die Gewinnung und Purifikation der Metalle der Titangruppe (Titan, Zirkonium, Hafnium) aus ihren geförderten Erzen nach dem Kroll-Verfahren angeführt, die als Blaupause für die nukleare Partitionierung dienen kann, sogar die Vorkonditionierung (Umwandlung der Oxide aus abgebrannten Brennelementen in Chloride) kann von diesem Beispiel übertragen werden. Dabei wird das Erz zunächst reduziert, chloridiert und dann per Destillation in die einzelnen Chloride bei deutlich über 1000 °C bis 1400 °C separiert. Anschließend wird das abgeschiedene Metallchlorid mit Alkalimetallen reduziert. Die Abtrenngenaugkeiten liegen bei 1 zu 1.000 bis 1 zu 100.000. Ein weiteres Beispiel ist die Gewinnung des zur Herstellung von Brennelementhüllrohren der Leichtwasserreaktoren benötigten Zirkoniums. Dafür wird eine noch höhere Abtrenngenaugkeit benötigt und auch erreicht<sup>[8]</sup>

Aber sogar für die nukleare Partitionierung selbst, wie sie hier erforderlich ist, kam ein solches Verfahren mit radioaktiven Stoffen bereits zum Einsatz, nämlich beim Flüssigsalzreaktor am US-amerikanischen Oak Ridge National Lab (ORNL), wo Destillation der Fluoridsalze im internen Kreislauf der Anlage angewandt wurde. Moderne Flüssigmakernreaktoren<sup>[9]</sup> sind nach dem Stand der Technik zugleich auch die effizienteste, kompakte und sicherste Option für die Transmutation (siehe Abschnitt unten).

## Zeiträumen und Kosten

### Partitionierung

Da pyrometallurgische Prozessanlagen Stand der Technik in der industriellen Chemie sind, ist lediglich eine Anpassung an nukleare Sicherheitsstandards durchzuführen. Die Radioaktivität der zu trennenden Stoffe ist für das technische Funktionsprinzip dieser Trennverfahren über Sicherheitsfragen hinaus nicht von Bedeutung. In der Acatech-Studie<sup>[1]</sup> wird einzig erwähnt, dass entsprechende Verfahren in der Nuklearindustrie in einem sehr frühen Stadium stecken, ohne zu erwähnen, dass Erfahrungen aus der konventionellen Industrie hier besonders zügig adaptiert werden können, da die Radioaktivität für den eigentlichen Prozess (im Gegensatz zu PUREX-ähnlichen Verfahren)

---

<sup>[8]</sup>Hafnium muss wegen seines hohen Neutroneneinfangswirkungsquerschnitts praktisch vollständig entfernt werden. Dazu wird auch die kompliziertere Extraktivrektifikation angewandt, um die azeotropen Gemische aufzutrennen.

<sup>[9]</sup>Hier werden zahlreiche Publikationen und Reports zum Flüssigsalzreaktor (Molten Salt Reactor, MSR) zusammengestellt.<http://energyfromthorium.com/pdf/>

nur von untergeordneter Bedeutung ist. Das BMWi beabsichtigt, eine entsprechende Ergänzungsstudie nachzureichen. Im Gegensatz zu hydrometallurgischen (PUREX-artigen) Verfahren muss nicht mit großen Mengen Hilfschemikalien in sich mehrfach wiederholenden Prozessschritten handelt werden, wodurch eine derartige Anlage deutlich effizienter und kleiner ist, ohne große Zusatzkosten gut gekapselt werden und somit in wenigen Jahren entwickelt werden kann.

Für das oben erwähnte Beispiel der Titan-Produktion sind die Kosten grob abschätzbar. Osaka Titanium Technologies<sup>[10]</sup> verkauft fertiges Titan für (umgerechnet) 10 \$/kg. Zwar würden die massebezogenen Kosten merklich höher liegen, man benötigt aber nicht den Durchsatz einer Titanproduktionsanlage von einigen 10000 Tonnen pro Jahr. Zum Vergleich: Deutschlands unverglaste abzutrennende Mengen an Transuranen und Spaltprodukten betragen 400 Tonnen. Daraus sind Kosten zu erwarten, die um mindestens eine Größenordnung unter denen für ein heute geplantes geologisches Endlager liegen. Der Zeitrahmen hängt nach der Entwicklung solcher Anlagen von der Kapazität und Anzahl der parallel betriebenen Partitionierungsanlagen ab, kann also je nach Investitionsaufwand bei wenigen Jahren bis wenigen Jahrzehnten liegen.

## Transmutation

Es ist eine politische Entscheidung, wie mit den nun abgetrennten 150 Tonnen Transuranen weiter zu verfahren ist. Sollen keine Reaktoren mehr gebaut werden, endet der PuT-Prozess hier, und die Transurane müssen geologisch endgelagert werden, allerdings zu deutlich reduzierten Kosten (siehe nächsten Abschnitt)

Ist Transmutation erwünscht, so müssen dafür passende Reaktoren gebaut werden. Bevorzugt setzt man hier Reaktoren mit Flüssigkernen wie den Flüssigsalzreaktor (MSR) ein, der als Forschungsreaktor in den 60er Jahren in nur wenigen Jahren entwickelt und mehrere Jahre betrieben wurde. Die Transmutationsrate steht zur erzeugten Wärmeleistung in festem Verhältnis und beträgt für die hier angesprochenen Mengen rund 400 Gigawattjahre (GWa). Die bei der Verbrennung erzeugte Wärme könnte sogar noch genutzt werden, z.B. zur Stromerzeugung, entsprechend ca. 150 GWa an Elektrizität. Damit könnte Deutschland gut 2 Jahre mit Elektrizität versorgt werden. In der Praxis würde man wohl eher 50 Jahre lang 5% des deutschen Strombedarfs decken, was sich durch 1-2 Reaktorblöcke realisieren ließe. Auch die Acatech-Studie<sup>[11]</sup> hebt die Vorteile der Transmutation wie effiziente Reststoffhandhabung und Proliferationssicherheit, hervor. Die in diesem Zusammenhang erwähnten Nachteile basieren jedoch auf speziellen, extrem teuren und für diesen Zweck nicht entwickelten Reaktortypen<sup>[11]</sup> die zusätzlich mit dem ungeeigneten PUREX-Verfahren (pyrometallurgische Partitionierungsverfahren werden in dem Zusammenhang gar nicht erwähnt) kombiniert werden. Das Potential der Flüssigkernreaktoren wird zwar erkannt, aber wiederum ohne nachvollziehbare Begründung verworfen.

Bei tatsächlicher Berücksichtigung aktuell verfügbarer Technologien lässt sich Transmutation somit für die gesamten transuranen Abfälle mit einer einzigen Anlage (2 Reaktorblöcke) umsetzen, die 50 Jahre lang läuft. Ohne Nutzung der Wärme entstehen Kosten, die vergleichbar mit dem Bau eines Leistungsreaktors sind. Mit Nutzung der Wärme entstehen zwar Zusatzkosten, z.B. durch den Bau von Turbinen, die aber mit Gewinn durch Stromverkauf wieder ausgeglichen werden können. Insgesamt kann die Bilanz dann sogar positiv sein. Man hat außerdem einen deutlichen Nutzeffekt für die Grundlast, wodurch der Ersatz der CO<sub>2</sub>-intensiven Kohlekraftwerke vorangetrieben werden kann.

---

<sup>[10]</sup> Internetauftritt von Osaka Titanium Technologies, siehe <http://www.osaka-ti.co.jp/e/>

<sup>[11]</sup> Es werden ausschließlich Reaktoren mit festem Brennstoff und schnellem Neutronenspektrum diskutiert. Dies ist zum einen der sehr teure natriumgekühlte Reaktor oder noch erheblich teurere beschleunigergetriebenen unerkritischen Systeme

## Auswirkungen auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland

Eine vollständige Trennung der nuklearen Abfälle nach Elementen ermöglicht eine stark optimierte Handhabung. Abgebrannte Brennelemente bestehen zu 96% aus Uran (Handhabung vergleichbar mit Blei), d.h. allein schon diese Abtrennung reduziert die endzulagernde Menge um einen Faktor über 20. Eine weitere Abtrennung der Spaltprodukte lässt nur ein Hundertstel der geologisch endzulagernden Menge, nämlich die oben erwähnten Transurane, übrig. Allein durch gut durchgeführte Partitionierung kann das Endlager nun

- in seiner Größe sehr deutlich reduziert werden und
- muss erheblich weniger wärmeentwickelnde Abfälle aufnehmen.

Es lässt sich aufspalten in ein Zwischenlager für die kurzlebigen Spaltprodukte, das nur wenige 100 Jahre betrieben werden muss, sowie ein tatsächliches Endlager, das auf etwa 15 Prozent der ursprünglichen Größe reduziert ist. Letzteres enthält die Transurane und 50 Tonnen Spaltprodukte mit Halbwertszeiten über 200.000 Jahren, welche nur wenige 100 Watt Wärmeleistung erzeugen. Da diese aber abgetrennt vorliegen, kann man sie sehr einfach in wenigen lang haltbaren Spezialbehältern aufbewahren, wodurch sich hier die Endlageranforderungen deutlich vereinfachen. Durch diese maßgeschneiderte Lagerung ergeben sich bereits erheblich reduzierte Kosten und ein Endlager kann früher Akzeptanz finden.

Soll nach der Partitionierung auch Transmutation angewendet werden, so kann dies mit 1-2 Reaktorblöcken, die 50 Jahre lang laufen, erreicht werden. Bei Entwicklung einer auf Flüssigbrennstoff basierenden Anlage kann dies mit wenig Platzbedarf in Kombination mit einer kompakten pyrochemischen Partitionierungsanlage auf dem Gelände heutiger oder dann stillgelegter Kernkraftwerke installiert werden.

Bei einem vollen PuT-Szenario verbleiben dann nur 400 Tonnen Spaltprodukte (sowie wenige 100 Tonnen neu gebildete Spaltprodukte), die zu 90% nach 100 Jahren und nach 300 Jahren praktisch vollständig abgeklungen sind. Es bleiben dann nur noch die oben erwähnten langlebigen Spaltprodukte (50 Tonnen + 20 weitere als Endprodukt der Transmutation) übrig. Dies entspricht einem Würfel der Kantenlänge 5 Meter. Diese Spaltprodukte jedoch haben nur noch ein Hundertstel der Radiotoxizität des ursprünglich abgebauten Naturangs; sie stellen also kaum noch ein Problem dar. Global betrachtet ist die Radioaktivität des Planeten damit sogar abgesenkt. Ein Großteil davon kann leicht im Parallelbetrieb des Flüssigspaltstoffreaktors durch Transmutation im weiteren Sinne (Neutroneneinfang der Spaltprodukte) sowie durch weitere fortgeschrittene Verfahren<sup>[12]</sup> weiter reduziert werden. Von den "problematischen" (mobile Radionuklide wie Cl-36 und C-14) Stoffen bleiben nur noch wenige Kilogramm, die leicht inertisiert und gelagert werden könnten, denn ebenfalls gehört hier zur ganzheitlichen Betrachtung, dass diese Radionuklide durch die aus dem Weltall einfallende hochenergetische Partikelstrahlung in großen Mengen in der Umwelt ständig nachproduziert werden.

Auch hier stützt sich die Acatech-Studie<sup>[1]</sup> lediglich auf den etablierten Brennstoffkreislauf, woraus man folgert, dass wärmeentwickelnde Radionuklide (Transurane) mit den sehr langlebigen Spalt- und Aktivierungsprodukten zusammen lagern müsste, weshalb sich für das (kleinere) Endlager die selben hohen Anforderungen wie bei einer direkten Endlagerung ergäben.

---

<sup>[12]</sup>Der dann noch verbleibende kleinere Teil könnte in der weiteren Entwicklung mit anderen Methoden der Kernphysik zur Transmutation neutralisiert werden. Dazu zählen beispielsweise direkte Reaktionen mit leichten Projektilkernen, induzierte Nukleonemission durch selektive Gammaquantenanregung mittels eines Röntgenlasers (XFEL) oder Pionenabsorption.

## Sicherheit und Proliferationsrisiken

Sollte lediglich die Partitionierung in Betracht gezogen werden, so sind die Transportmehraufwendungen im Vergleich zur direkten Endlagerung minimal bis nicht vorhanden. Da die Transurane nicht aufgetrennt vorliegen müssen, besteht kein zusätzliches Proliferationsrisiko. Die Gegenmaßnahmen sind identisch zu jenen, die bei der direkten Endlagerung getroffen werden. Vorteilhaft ist aber hier, dass nur ein deutlich kleineres Lager überwacht werden müsste.

Im Falle einer Strategie, die auch Transmutation einschließt, lohnt gerade unter dem Gesichtspunkt Proliferation die Entwicklung und Nutzung der oben erwähnten Flüssigkernreaktoren, da hier die Transurane nicht zwingend aufgetrennt werden müssten. Außerdem weisen diese nachgewiesenermaßen im Vergleich zu heutigen Reaktoren deutliche Sicherheitsvorteile auf, die direkt aus den speziellen Eigenschaften flüssiger Kerne (Schmelzsicherung, hoher prompt negativer Reaktivitätskoeffizient, Betrieb der Spaltstoff- und Kühlkreisläufe bei Normaldruck) resultieren. Diese inhärente passive Sicherheit zusammen mit der geringen Größe erlaubt ein ganzheitliches Sicherheitskonzept. Das gesamte System bestehend aus Partitionierungsanlage, Reaktor und Zwischenlager für die Spaltprodukte lässt sich unterirdisch nach militärischem Standard verbunkert zu überschaubaren Kosten installieren. Transporte fallen nicht zusätzlich an. Die höhere Dosisleistung infolge zusätzlicher Spaltprodukte tritt nur im Zwischenlager auf.

Der Bau des Containmentbunkers würde als erstes erfolgen und dann sukzessive Partitionierungsanlage und später der Reaktor eingebaut werden. Nach Abschluss der Transmutation ist das Zwischenlager für die Abklingzeit von 300 Jahren geschützt. Auch während des laufenden Reaktorbetriebs bedürfte es einer schweren bunkerbrechenden Lenkwaffe mit Nuklearsprengkopf um einen für die Bevölkerung gefährlichen Auswurf an radioaktiven Materialmengen zu bewirken.

Selbst unter der Annahme der klassischen PuT-Strategie mit höherem Umschlag an aufgetrennten Transuranen ist das Proliferationsrisiko als gering einzustufen. Die Acatech-Studie<sup>[1]</sup> sieht ebenfalls die Möglichkeiten der Proliferationsminderung durch "Einäscherung" der Transurane, ignoriert aber die Nutzbarkeit der Flüssigkernreaktoren und schließt somit auf einen hohen Transportsicherungsaufwand sowie auf "neue Sicherheitsaspekte" beim Betrieb der Transmutationsreaktoren. Das Reaktorplutonium ist jedoch kaum waffentauglich und die Abtrennung der kleinen Mengen Neptunium und Americium äußerst aufwendig<sup>[13]</sup>.

## Gesellschaftliche Aspekte

Bei Anwendung geeigneter State-of-Art-Methoden bewegt sich Partitionierung und Transmutation in einem Zeitrahmen unterhalb des für die bisher geplante Endlagerung vorgesehenen. Die Kosten liegen sogar deutlich unter denen für ein Endlager nach heutigen Vorstellungen und können bei entsprechender Nutzung der bei der Transmutation freigesetzten Energie sogar neutral gestaltet werden. Nachfolgende Generationen hätten damit erheblich umfangreichere Gestaltungsmöglichkeiten und würden nicht mit den geschaffenen Fakten eines Endlagers konfrontiert werden, welches für erheblich längere Zeiträume stabile staatliche Verhältnisse erfordert.

Das Atomgesetz erlaubt den Betrieb neuer kerntechnischer Anlagen, solange sie nicht gewerblich Strom erzeugen. Partitionierung ist auch keine Wiederaufarbeitung im Sinne des Atomgesetzes, was bereits dadurch impliziert ist, dass alternative Abfallentschärfungsmethoden enthalten sind. Die Installation und der Betrieb von PuT-Anlagen wäre also ohne Änderung des Atomgesetzes

---

<sup>[13]</sup>Americium ist zudem aufgrund von Spontanspaltung für Kernwaffen kaum tauglich. Längst ist diesbezüglich die Anreicherung von Natururan viel attraktiver und weitaus kostengünstiger. Die jüngste Atommacht, Pakistan, beschritt den Weg der Anreicherung und auch im Streit mit dem Iran geht es primär um Urananreicherung.

möglich. Nur für den Fall, dass eine weitere Kostenreduktion durch Nutzung der in den Transmutationsreaktoren erzeugten Wärme über gewerbliche Stromerzeugung erwünscht ist, muss das Atomgesetz geändert werden. Dies ist jedoch eine rein politische Entscheidung. Der gesamte Prozess in seinem Verlauf soll und sollte mit der Beteiligung der Bürger stattfinden, was die Akteure in die Pflicht nimmt, den jeweils aktuellen Stand sachgerecht darzulegen.

Selbst die in Deutschland vorgesehene Option der Endlagerung entbindet in den nächsten 50 bis 100 Jahren die Gesellschaft nicht von der Reststoffbehandlung, da dies ja gerade der diskutierte Einlagerungszeithorizont ist. Eine Zwischenlagerung von nicht proliferationsrelevanten Spaltprodukten, wie oben vorgeschlagen, von 300 Jahren wäre keine besondere Bürde mehr. Vielmehr sorgt dies für zusätzlichen Kompetenzerhalt, der vom Gesetzgeber ausdrücklich erwünscht und für diesen Zeitraum auch notwendig ist. Mit deutlich reduziertem Aufwand behielte man so Handlungsoptionen offen. Da sich zum einen technische Entwicklungen über 100 Jahre kaum abschätzen lassen, zum anderen schon mit heutiger Technologie eine deutliche Reduktion der nuklearen Abfälle über PuT möglich ist, wäre es verantwortungslos, diese Möglichkeiten zukünftigen Generationen vorzuenthalten. Auch in seiner Verantwortung für die Weltgemeinschaft kann Deutschland so einen entscheidenden Beitrag leisten, die Probleme, die mit dem weltweiten Ausbau der Kernenergienutzung einhergehen, zu lösen.

## Fazit

Die für Partitionierung und Transmutation benötigten Zeiträume liegen bei Anwendung aktueller Technologien unter jenen, die momentan für die Endlagerung abzusehen sind. Die dafür erforderlichen Anlagen existieren oder existierten und haben nur wenige Jahre Entwicklung benötigt<sup>[14][5]</sup>. Mit den heutigen stark verbesserten Möglichkeiten der Material- und Fertigungstechnik können derartige Anlagen erneut und besser gebaut werden. Während ein Endlager nur Kosten verursacht, besteht bei PuT-Anlagen die Möglichkeit, den kompletten Investitionsbedarf wieder einzuspielen.

Die kürzlich erschienene Acatech-Studie<sup>[1]</sup> beschäftigt sich ausführlich mit der PuT-Thematik und kommt im Schluss auf die Möglichkeit einer deutlichen Reduzierung der Endlagergröße. Dabei werden jedoch weder moderne Methoden der Stofftrennung noch moderne Reaktortypen berücksichtigt. Tut man dies, ist eine deutliche Kosten- und Zeitreduzierung zu erwarten, ein Endlager könnte möglicherweise sogar gänzlich entfallen. Diese Kritikpunkte werden z.Zt. in einer vom BMWi beauftragten Ergänzungsstudie über neue Partitionierungstechniken aufgegriffen, ergänzt und richtiggestellt.

Ein vollständiges PuT-Szenario kann in ca. 60 Jahren umgesetzt und oder abgeschlossen werden, benötigt lediglich 2 Reaktorblöcke, keine umfangreichen Nukleartransporte, kann proliferations- und konfliktsicher gestaltet werden und könnte ein geologisches Endlager obsolet machen. Im Vergleich dazu müssen mehr als 10 000 Tonnen ohne PuT endgelagert werden. Diese Alternativoption sollte daher durch ein entsprechendes F&E-Programm zügig in Gang gesetzt werden

---

<sup>[14]</sup>Molten Salt Reactor Experiment am Oak Ridge National Laboratory, siehe [http://moltensalt.org/references/static/downloads/pdf/NAT\\_MSRintro.pdf](http://moltensalt.org/references/static/downloads/pdf/NAT_MSRintro.pdf)