



DISKUSSIONSPAPIER der Entsorgungskommission

Partitionierung und Transmutation (P&T) als Option für die nukleare Entsorgung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	P&T-Konzepte und Technologien.....	2
3	Auswirkungen von P&T auf die Entsorgungssituation in Deutschland.....	5
3.1	Abfallmengen, Endlager Footprint	5
3.2	Sicherheitsaspekte	7
3.3	Kritikalitätsrisiken	9
3.4	Proliferationsrisiken.....	10
3.5	Zeitskalen	10
3.6	Soziale und ökonomische Aspekte	11
3.6.1	Gesellschaftliche Akzeptanz.....	11
3.6.2	Wirtschaftliche Aspekte	13
4	Zusammenfassung	13
5	Unterlagen	15

1 Einleitung

Bereits 1964 wurde erstmals die mögliche Umwandlung langlebiger Radionuklide in radioaktiven Abfällen durch Bestrahlung mit schnellen Neutronen zu kurzlebigen und stabilen Isotopen beschrieben [1]. Das als Transmutation bezeichnete Verfahren zielt auf die Reduzierung der Langzeitgefährdung, die von radiotoxischen Bestandteilen bestrahlter Brennelemente aus der Kernenergienutzung über lange Zeiträume ausgeht. Der Fokus derzeitiger Forschungsarbeiten liegt auf der Umwandlung langzeitradiotoxischer Transuranelemente wie Neptunium, Plutonium, Americium und Curium, den sogenannten minoren Actiniden. Die Transmutation von Spaltprodukten erwies sich bis auf wenige Ausnahmen als zu aufwendig. Voraussetzung für die Transmutation ist die vorherige Abtrennung der umzuwandelnden Elemente (Partitionierung) mit Hilfe chemischer Trennverfahren. Durch die Anwendung von Partitionierung und Transmutation (P&T) erwartet man zudem eine deutlich verringerte Wärmeproduktion der Abfälle nach einigen Jahrzehnten Abklingdauer und damit auch einen geringeren Flächenbedarf für ein benötigtes Endlager. Die Entwicklung von P&T-Konzepten ist nach wie vor Gegenstand internationaler Forschungsprojekte (z. B. EU-geförderte Projekte [2], [3]).

Nach dem Atomgesetz in seiner derzeit gültigen Fassung [4] ist die *„Abgabe von aus dem Betrieb von Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität stammenden bestrahlten Kernbrennstoffen zur schadlosen Verwertung an eine Anlage zur Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe (...) vom 1. Juli 2005 an unzulässig“* und damit auch P&T. Dennoch werden im Zusammenhang mit der anhaltenden Debatte zur Auswahl eines Endlagerstandorts für Wärme entwickelnde (hoch radioaktive) Abfälle in Deutschland auch P&T-Konzepte als möglicher Beitrag zur nuklearen Entsorgung diskutiert. Da großtechnische P&T-Anlagen derzeit nicht verfügbar sind, werden Konzepte wie Langzeitzwischenlagerung und Rückholbarkeitsoptionen zuweilen damit begründet, entsprechende technische Entwicklungen abzuwarten. Auch die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe beschäftigt sich im Rahmen des gesetzlichen Auftrags zur Prüfung von alternativen Entsorgungskonzepten mit P&T. Nach Vorgabe des Standortauswahlgesetzes vom 23.07.2013 [5] besteht eine ihrer Aufgaben in der *„ ... Beurteilung und Entscheidung der Frage, ob anstelle einer unverzüglichen Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen andere Möglichkeiten für eine geordnete Entsorgung dieser Abfälle wissenschaftlich untersucht und bis zum Abschluss der Untersuchungen die Abfälle in oberirdischen Zwischenlagern aufbewahrt werden sollen.“*

Die ESK hält es daher für geboten, Argumente pro und contra P&T anhand thematischer Spannungsfelder zu sammeln und gegenüberzustellen. Das vorliegende Papier beschreibt kurz unterschiedliche international verfolgte P&T-Konzepte und geht auf Möglichkeiten, Grenzen und Konsequenzen für die spezifische Situation in Deutschland ein. Eine recht detaillierte Analyse der Chancen und Risiken von P&T in Deutschland ist Publikationen der deutschen Akademie der Technikwissenschaften (ACATECH) zu entnehmen ([6], [7]). Das vorliegende Papier erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, soll jedoch dem Einstieg in eine weitergehende Diskussion dienen.

2 P&T-Konzepte und Technologien

International diskutierte P&T-Konzepte sind immer im Zusammenhang mit den jeweiligen nationalen Gegebenheiten und Randbedingungen zu betrachten. Die jeweils betrachteten Strategien verfolgen

unterschiedliche Zielsetzungen bezüglich der zu transmutierenden Abfallbestandteile und erfordern unterschiedliche Anlagen und Systeme. Allen Konzepten ist gemeinsam, dass kerntechnische Anlagen für die folgenden Behandlungsschritte benötigt werden:

- Handhabung und Öffnung von Transport- und Lagerbehältern sowie Entnahme der Brennelemente nach Zwischenlagerung,
- Zerlegen der Brennelemente und Trennung des Brennstoffs von Strukturteilen und
- Auflösung des abgebrannten Brennstoffs; chemische Abtrennung der Hauptkomponente Uran sowie des Plutoniums, um gegebenenfalls neuen Kernbrennstoff zu produzieren.
- Chemische Abtrennung der zu transmutierenden Elemente. Meist werden hier die sogenannten minoren Actiniden Neptunium, Americium und Curium betrachtet. Es existieren aber auch Vorstellungen, die Spaltprodukte gruppenweise aufzutrennen und entweder einem Transmutationsprozess zu unterwerfen oder sie bis zum Abklingen zwischen- bzw. endzulagern ([8], [9]),
- Herstellung von Matrices, in die die zu transmutierenden Radionuklide eingebaut werden und die sich zur Bestrahlung in Transmutationsanlagen eignen. Da eine vollständige Transmutation nicht in einem Schritt erfolgen kann, sind Vorrichtungen vorzusehen, in denen diese Matrices nach Bestrahlung aufgelöst und die nicht umgewandelten Radionuklide wiederum von Spaltprodukten abgetrennt und für weitere Bestrahlungsschritte behandelt werden,
- Bestrahlung der entsprechenden Radionuklide mit hochenergetischen Neutronen in geeigneten Anlagen, um sie zu transmutieren,
- Konditionierung der anfallenden radioaktiven Abfälle. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um Spaltprodukte, die zu zwischen- bzw. endlagerfähigen Produkten verarbeitet werden müssen, und
- Zwischen- und Endlagerung der anfallenden Abfälle, um sie in geeigneter Weise von der Biosphäre zu isolieren.

Für einzelne Behandlungsschritte, insbesondere für die ersten drei und die Zwischenlagerung, existieren bereits großtechnische Anlagen.

Die Ausgestaltung von P&T-Prozessen in den jeweiligen Konzepten kann sehr unterschiedlich sein. Einige Konzepte sehen die Ab- und Auftrennung von Transuranelementen und Spaltprodukten mit sehr komplexen Trennschemata vor, so dass für verbleibende radioaktive Abfälle nur mehr ein sehr geringer Flächen- bzw. Raumbedarf für ein Endlager in tiefen geologischen Formationen besteht (siehe z. B. [9]). Hier sollen auch vergleichsweise kurzlebige Spaltprodukte wie ^{137}Cs , ^{90}Sr abgetrennt und zum Abklingen der Aktivität oberirdisch zwischengelagert werden.

Der weitaus größte Teil der Arbeiten konzentriert sich auf die Transuranelemente wegen ihrer hohen Radiotoxizität. Die Diskussionen in den folgenden Kapiteln werden daher auch keine P&T-Konzepte

behandeln, die die Auftrennung und Transmutation von Spaltprodukten vorsehen. Für P&T von Transuranelementen sind Strategien beschrieben, bei denen alle Transuranelemente gemeinsam, gruppenweise oder einzeln abgetrennt und rezykliert werden. Americium besitzt dabei eine besondere Relevanz, da es nach Plutonium den größten Beitrag zur Langzeitradiotoxizität des bestrahlten Kernbrennstoffs liefert. Als Trennverfahren werden meist hydrometallurgische (Flüssig-flüssig-Extraktion mit nicht mischbaren Flüssigkeiten und selektiven Komplexbildnern) und pyrochemische (elektrochemische Trennverfahren in Salzschnmelzen) Prozesse vorgeschlagen. Die Eignung hydrometallurgischer Partitionierungsprozesse ließ sich bereits erfolgreich in halbertechnischem Maßstab demonstrieren. Ihre Realisierung in industriellem Maßstab in Form zusätzlicher Trennstufen in modifizierten Wiederaufarbeitungslagen erscheint in naher Zukunft machbar, während pyrochemische Verfahren bisher nur im Labormaßstab erfolgreich erprobt wurden und sicher noch längere Entwicklungsarbeiten erfordern.

Intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten laufen derzeit zur Art der Weiterverarbeitung der zu transmutierenden Elemente. An Matrices, in die die Radionuklide zur Bestrahlung einzubauen sind, werden hohe Anforderungen gestellt. Sie müssen aus Materialien bestehen, die einerseits den hohen Belastungen (intensive Neutronenbestrahlung, thermische Gradienten, Gasbildung etc.) in einem Transmutationsreaktor standhalten, andererseits aber auch relativ einfach aufzulösen sein müssen, um Rezyklierung zu ermöglichen. Unterschiedliche metallische, keramische (Oxide, Nitride, Carbide) oder auch Verbundwerkstoffe befinden sich in der Entwicklung. Gegenstand von Forschungsaktivitäten ist auch die Entwicklung langzeitstabiler und endlagerfähiger Konditionierungsmatrices für Abfallbestandteile, die sich nicht oder nur mit erheblichem Aufwand transmutieren lassen.

Als Bestrahlungs- bzw. Transmutationseinrichtungen werden u. a. sogenannte Reaktoren der vierten Generation diskutiert. Dies könnten z. B. die bereits weit in ihrer technischen Entwicklung fortgeschrittenen, mit flüssigem Metall gekühlten schnellen Reaktoren sein oder auch Salzschnmelzenreaktoren, die sich jedoch erst im Anfangsstadium ihrer Entwicklung befinden. In diesen Fällen handelt es sich um Leistungsreaktoren, die in erster Linie der Stromerzeugung dienen sollen. In Deutschland werden insbesondere reine Transmutationsreaktoren diskutiert. Hierbei handelt es sich um sogenannte Beschleuniger getriebene Reaktoren (engl.: accelerator driven systems, ADS), bei denen in einem Teilchenbeschleuniger hochenergetische Protonen erzeugt und auf ein Schwermetalltarget (bestehend aus Blei oder Blei/Bismut) geschossen werden. Dabei entstehen in einer Kernreaktion hochenergetische Neutronen, die zur Transmutation von Radionukliden verwendet werden können. Letztere Anlagen können unterkritisch betrieben werden, d. h. im Unterschied zu den Generation-IV-Anlagen wird keine selbsterhaltende Kettenreaktion erzeugt. Prinzipiell könnte die bei der Transmutationsreaktion freiwerdende Energie auch hier zur Stromerzeugung genutzt werden. Angesichts der politischen Entscheidung, aus der Nutzung der Kernenergie auszusteigen, werden ADS-Anlagen in Deutschland jedoch als reine Transmutationsmaschinen betrachtet. Während sich weltweit natriumgekühlte schnelle Leistungsreaktoren bereits im Betrieb bzw. im Bau befinden, gelten ADS-Systeme zwar als technisch machbar, werden aber erst in einigen Jahrzehnten großtechnisch zu realisieren sein.

P&T erlaubt in Kombination mit der Rezyklierung von Uran und Plutonium (Wiederaufarbeitung), Natururan wesentlich effizienter als Kernbrennstoff zu nutzen und den Aufbau von Transuranelementen in den entstehenden Abfällen zu minimieren. Ein solches Konzept ließe sich z. B. mit Hilfe eines schnellen natriumgekühlten Leistungsreaktors (schneller Brutreaktor) realisieren, in dem allerdings gleichzeitig durch Neutroneneinfangsreaktionen spaltbares Plutonium erzeugt werden soll und daneben minore Actiniden neu

entstehen. Schnelle Reaktoren können auch als Brenner betrieben werden, wobei in diesem Falle minore Actiniden enthaltende Brennstoffe eingesetzt werden und dabei weniger minore Actiniden durch Neutroneneinfang entstehen als transmutiert werden. Auch wird die Transmutation radiotoxischer Transuranelemente in einer zweigleisigen Strategie (double-strata) diskutiert. Dabei werden neben Leistungsreaktoren ADS-Systeme eingesetzt, deren Hauptaufgabe im Abbau unerwünschter minorer Actiniden oder Spaltprodukte besteht. Ihre Menge lässt sich auf diese Art und Weise minimieren.

Staaten (A), die weiterhin Kernenergie nutzen, und solche (B), die aus der Kernenergienutzung aussteigen, könnten im Rahmen sogenannter regionaler Strategien P&T gemeinsam im Rahmen von Systempartizipationsmodellen nutzen. Minore Actiniden im bestrahlten Kernbrennstoff des Landes (B) können dann transmutiert werden, während Uran und Plutonium von Land (A) weiterhin zur Stromerzeugung genutzt werden können. Von solchen Strategien wird die synergistische Nutzung von Anlagen und damit die Optimierung erforderlicher Ressourcen erwartet (Europäische Systempartizipation). Vor dem Hintergrund derzeitiger politischer und gesellschaftlicher Randbedingungen werden in Deutschland vor allem regionale P&T-Konzepte diskutiert ([6], [7]).

3 Auswirkungen von P&T auf die Entsorgungssituation in Deutschland

3.1 Abfallmengen, Endlager Footprint¹

Bis zum Ende der Nutzung der Kernenergie werden in Deutschland folgende Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle angefallen sein:

Ca. 10.500 Tonnen Schwermetall (tSM) in Brennelementen sind direkt endzulagern. Hinzu kommen ca. 8.000 Kokillen gefüllt mit verglasten Abfällen aus der Wiederaufarbeitung von 6.700 tSM im In- und Ausland und Brennelemente sowie Brennstäbe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren [10].

Daraus ergeben sich bei Verwendung von POLLUX-Behältern Abfallvolumina von 21.000 m³ an direkt endzulagernden Brennelementen, 1.400 m³ an verglasten bzw. kompaktierten Produkten der Wiederaufarbeitung und 5.700 m³ an Brennstoff aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren und der Pilotwiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) [11]. Dazu kommen ca. 300.000 m³ an radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. Diese Zahlen wurden in Tabelle 1 für das Szenario „Abstinenz“ (keine P&T-Anwendung) angenommen. Die in der Schachtanlage Asse II vorhandenen Abfälle und die Urantails aus der Anreicherung sind in dieser Aufstellung nicht enthalten. Nach aktuellen Zahlen im Nationalen Entsorgungsprogramm [10] könnten sich diese auf weitere ca. 300.000 m³ belaufen. Diese Zahlen wurden in Tabelle 1 für das Szenario „Abstinenz“ (keine P&T-Anwendung) angenommen. Im Falle der Anwendung von P&T verringert sich das Volumen an Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen, während die Menge an radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ansteigt. Die Mengen der jeweiligen anfallenden Abfälle hängen dabei von der Art der Abtrennung (hydro- oder pyrometallurgische Abtrennung) sowie der Anzahl der Rezyklierungen ab. Für das Szenario „Europäische Systempartizipation“ wird in der ACATECH-Studie [6] eine Reduzierung der Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle auf 9.500 bis 12.900 m³ abgeschätzt, während der Anfall an Abfällen mit

¹ Der Begriff Footprint wird im Zusammenhang mit der Endlagerung synonym zum Flächenbedarf des Endlagers verwendet. Der Flächenbedarf hängt vom Einlagerungskonzept, von der Wärmeleistung des Abfalls und dem Endlagerwirtsgestein ab.

vernachlässigbarer Wärmeentwicklung um 60.000 m³ zunimmt. Diese zusätzliche Menge an Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung resultiert aus der Aufarbeitung der LWR-Brennstoffe, der Fertigung und Aufarbeitung der Transmutationsbrennstoffe sowie dem Betrieb der Transmutationsanlagen. Für das Szenario „Anwendung in Deutschland“ kämen durch den Rückbau von P&T-Anlagen sowie der Anlagen zur Brennstofffertigung weitere 36.000 bis 49.000 m³ (ACATECH-Studie [6]) hinzu. Der Vergleich grob abgeschätzter Abfallmengen für die verschiedenen Szenarien ist in Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1: Abfallmengen in m³ [6]

Tabelle 1: Abfallmengen in m ³ [6]Szenario	Abstinenz (keine P&T- Anwendung)	Europäische Systempartizipation	Anwendung in Deutschland
Wärme entwickelnde Abfälle	≈ 28.000	9.500-12.900	9.500-12.900
Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung	≈ 300.000	≈ 360.000	≈ 400.000

Würde der Endlagerung ein P&T-Verfahren vorgeschaltet werden, könnte das Volumen der endzulagernden Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle auf ein Drittel reduziert werden. Dies ist im Wesentlichen der Abtrennung des Urans zu verdanken, wie sie auch bei der Wiederaufarbeitung ohne P&T durchgeführt würde. Wie mit dem abgetrennten Uran verfahren wird, ist letztendlich eine politische Entscheidung. Es könnte als Ressource in Reaktoren zur Energieerzeugung eingesetzt werden oder als Abfall mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung direkt der Endlagerung zugeführt werden. In jedem Fall wird auch bei Anwendung von P&T für die bisher angefallenen verglasten Abfälle, den nicht mit P&T behandelbaren abgebrannten Brennelementen aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren und die nach P&T verbleibenden Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle (verglaste Spalt- und Aktivierungsprodukte sowie Wärme entwickelnde Sekundärabfälle) ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle benötigt. Bestimmend für dessen Größe ist die Wärmeentwicklung. Diese sinkt für die Abfälle aus den P&T-Zyklen teilweise deutlich schneller als für abgebrannten Kernbrennstoff, der direkt endzulagern wäre. Allerdings ist zu beachten, dass der durch den Infrastrukturbereich eines Endlagers erzeugte Anteil des Footprints sowie der Anteil für die Einlagerung der bereits vorhandenen Wiederaufarbeitungsabfälle konstant bleiben würden. Nach [12] würde der Flächenbedarf dieses Endlagers bei Anwendung von P&T daher um maximal 50 % abnehmen. Zu beachten ist, dass eine deutliche Verringerung der Zerfallswärmeleistung (um mehrere Größenordnungen) je nach P&T-Zyklus unter Umständen erst nach einigen 100 Jahren erreicht wird. Um von der reduzierten Wärmeleistung bei der Auslegung eines Endlagers Kredit nehmen zu können, wäre daher eine entsprechende Zwischenlagerzeit erforderlich.

Des Weiteren muss für die Entsorgung der zusätzlich anfallenden Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung eine Lösung gefunden werden: Einlagerung in das Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle, Änderung des für Schacht Konrad festgestellten Plans oder Errichtung eines weiteren Endlagers für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung.

3.2 Sicherheitsaspekte

Sicherheitsaspekte sind in Zusammenhang mit dem Betrieb der P&T-Anlagen, den notwendigen Transporten radioaktiver Materialien, dem Betrieb der Entsorgungsanlagen (u. a. Puffer- und Zwischenlager, Konditionierungsanlagen, Endlager) sowie schließlich dem Langzeitverhalten des verschlossenen Endlagers zu betrachten.

In den meisten Publikationen zu P&T werden ausschließlich die Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit der Endlagerung diskutiert. Angesichts der Tatsache, dass die Errichtung mehrerer P&T-Anlagen erforderlich würde, die über Jahrzehnte zu betreiben wären, ist zu beachten, dass für ihren Betrieb ebenfalls umfassende Sicherheitsbetrachtungen durchzuführen sind. Das radiologische Gefährdungspotenzial von P&T-Anlagen für Mensch und Umwelt kann derzeit nicht quantitativ exakt abgeschätzt werden. Ein erklärtes Ziel der Entwicklung von Reaktoren der Generation IV ist unter anderem die Erhöhung der Sicherheitsstandards verglichen mit denen derzeit verfügbarer Anlagen. Für alle untersuchten Typen, unterkritische ADS-Systeme eingeschlossen, ist dabei eine sichere Abfuhr der Nachzerfallswärme sicherzustellen und damit die Eintrittswahrscheinlichkeit für schwere Störfälle gegenüber derzeitigen Reaktoren signifikant zu verringern. Sicherheitsbetrachtungen zu den geplanten Reaktortypen der Generation IV sind zwar verfügbar ([13], [14]), müssen allerdings zum jetzigen Zeitpunkt als vorläufig betrachtet werden. Potenzielle radiologische Auswirkungen durch weitere für P&T benötigte Einrichtungen sollten vergleichbar mit bestehenden Anlagen zur Wiederaufarbeitung oder Konditionierung von abgebrannten Brennelementen sein. Neben den Risiken durch die Anlagen selbst sind in diesem Zusammenhang auch mögliche Umweltauswirkungen durch die bei P&T entstehenden Sekundärabfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung zu nennen. Darüber hinaus könnte es zu einer Zunahme der erforderlichen Transporte des radioaktiven Materials zwischen den Anlagen (Kernkraftwerke, Zwischenlager, P&T-Anlagen) kommen, wobei die Zahl der Transporte sehr stark vom jeweils betrachteten Szenario („Europäische Systempartizipation“ und „Anwendung in Deutschland“) abhängt.

Einige Auswirkungen der Anwendung von P&T auf die Endlagerung wurden oben bereits erwähnt. Die Anwendung von P&T führt nach einer Abklingzeit zu einer verringerten Wärmeleistung und Gesamtaktivität sowie zu einem geringeren Anteil an radiotoxischen Transuranelementen im Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle. Dies bedeutet, dass die Aktivität (oder als gewichtete Größe die Radiotoxizität) nach ca. tausend Jahren vergleichbar mit der nach einer Million Jahren ohne Anwendung von P&T wäre (wobei die verglasten Abfälle hierbei nicht berücksichtigt wurden). In einer Reihe von Sicherheitsberichten wird die zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität als Indikator herangezogen, um das Sinken des vom Endlager ausgehenden Gefahrenpotenzials zu illustrieren und um über Vergleiche mit natürlich auftretenden Radiotoxizitätskonzentrationen die Wahl von Bewertungszeiträumen für die Sicherheit eines Endlagers nach Verschluss zu begründen [15]. Die Bewertung der Sicherheit eines Endlagers nach Verschluss erfolgt anhand von systematisch abzuleitenden Szenarien, die für das Einschlussverhalten des Endlagersystems relevant sind und bei nicht vollständigem Einschluss zu einer Belastung von Mensch und Umwelt mit radio- und chemotoxischen Stoffen führen können. Dabei sind für die einzelnen Abfallbestandteile Freisetzungsraten, Mobilität/Transportverhalten und Bioverfügbarkeit von Radionukliden und chemotoxischen Stoffen zu berücksichtigen. Die Bedeutung der einzelnen in den Abfällen enthaltenen Radionuklide ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Freisetzungsverhalten aus dem Abfallgebinde, Mobilität, Halbwertszeit und radiologischer Wirksamkeit.

In vielen Freisetzungsszenarien, die in der Vergangenheit für unterschiedliche Wirtsgesteine analysiert worden sind, bleibt die Bedeutung der Transurane wegen ihrer geringen Mobilität begrenzt. Entsprechend ergibt sich bei der Betrachtung von Abfallinventaren aus P&T-Zyklen ein begrenzter Einfluss dieser Zyklen auf die Langzeitsicherheit ([16], [17]). Vor diesem Hintergrund erscheint eine Begründung von Bewertungszeiträumen anhand von Radiotoxizitätsbetrachtungen (siehe oben) als nicht konsistent. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen jedoch, dass Transurane durchaus nicht immer immobil sind und geringe Mengen unter gewissen Bedingungen über Strecken von mehreren Kilometern transportiert werden können [18]. In einer systematischen Szenarienentwicklung ist zu prüfen, ob und unter welchen Umständen es z. B. zu einem kolloidgetragenen Transport von Transuranen kommen kann. Diesbezügliche Ungewissheiten könnten bei einer Transmutation von Transuranen umgangen werden.

Für einige Radionuklide (z. B. ^{14}C , ^{129}I) fehlen zuverlässige Aussagen zum Mobilitätsverhalten bzw. zur Rückhaltung in einem Endlager, weshalb in den Freisetzungsrechnungen für Langzeitsicherheitsbewertungen eine hohe Mobilität angenommen wird. Diese Radionuklide lassen sich nicht oder nur schwer transmutieren. Im Zuge der Entwicklung von P&T-Strategien könnten auch neue Konditionierungstechniken (z. B. Keramiken) entwickelt werden, die unter Umständen zu einer deutlichen Reduzierung der Freisetzung von Spalt- und Aktivierungsprodukten führen (siehe auch [8]). Damit ergäbe sich bei Szenarien, die einen Wasserzutritt zu den im Endlager eingelagerten Stoffen unterstellen, eine Verringerung von Ungewissheiten hinsichtlich des Freisetzungs- und Migrationsverhaltens dieser Nuklide.

Die genannten Szenarien unterstellen eine Freisetzung und einen fluidgetragenen Transport von Radionukliden in die Biosphäre. Wird dagegen ein künftiges menschliches Eindringen (human intrusion) in ein Endlager in Unkenntnis des vorhandenen Gefahrenpotenzials unterstellt, ergibt sich die Gefährdung des Eindringlings im Wesentlichen aus der Radiotoxizität des eingelagerten Materials, da dieses unmittelbar bioverfügbar wird. Entsprechende Rechnungen zeigen eine deutliche Reduzierung der Belastung eines Eindringlings für Abfallinventare, die sich aus der Anwendung von P&T ergeben ([13], [14]). Die Radiotoxizität des Abfalls aus P&T ist nach einigen hundert Jahren kleiner als die Radiotoxizität des für den Brennstoff eingesetzten Natururans. Die BMU-Sicherheitsanforderungen [19] fordern eine Optimierung des Endlagers im Hinblick auf derartige Szenarien. Sie wird als „nachrangig“ eingestuft und soll im Hinblick auf die Eintrittswahrscheinlichkeit und auf Konsequenzen für die Bevölkerung (also nicht für den Eindringling) erfolgen. Eine Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeit ergibt sich aus der oben beschriebenen Verringerung des Footprints.

Langzeitsicherheitsbetrachtungen sind naturgemäß mit Unsicherheiten und Ungewissheiten verbunden.

Die Unsicherheiten von (Modell-)Aussagen nehmen mit zunehmender Zeitdauer zu, insbesondere wenn sich die Prognose auf einen Zeitraum von einer Million Jahren erstrecken soll. Mit einer Minimierung der eingelagerten radiotoxischen Stoffe geht auch eine Verringerung der damit verbundenen Unsicherheiten einher. Der verringerte Footprint eines Endlagers könnte zu einer Verringerung von Ungewissheiten beitragen und gegebenenfalls die Anzahl der geeigneten Standorte erhöhen.

Zusammenfassend ist festzustellen: Durch P&T ergäben sich keine prinzipiellen Änderungen hinsichtlich der Langzeitsicherheit eines Endlagers für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle in Deutschland, es könnte jedoch einen Beitrag zur Eingrenzung oder Reduzierung von Unsicherheiten und Ungewissheiten leisten. Darüber hinaus besteht das Potenzial, den für die Einlagerung notwendigen Flächenbedarf zu verringern, was

die Standortauswahl erleichtern könnte. Dem gegenüber steht der Umstand, dass kerntechnische P&T-Anlagen über mehrere Jahrzehnte betrieben werden müssten und zusätzliche Mengen radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung zwischen- und endzulagern wären, gegebenenfalls mit zusätzlichen Ungewissheiten und mit zusätzlichem Platzbedarf in einem geeigneten Endlager.

3.3 Kritikalitätsrisiken

Unter Kritikalität versteht man eine nukleare Kettenreaktion, bei der spaltbare Nuklide mit Neutronen eine Kernspaltungsreaktion eingehen, in deren Folge wiederum Neutronen entstehen, die ihrerseits Spaltreaktionen verursachen. Die BMU-Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle [19] fordern den Nachweis des Ausschlusses des Auftretens kritischer Anordnungen für wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Entwicklungen des Endlagersystems. Das Auftreten unkontrollierbarer kritischer Anordnungen spaltbarer Materialien in einem Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle in der Nachverschlussphase gilt als äußerst unwahrscheinlich, ist für einige Szenarien allerdings nicht gänzlich auszuschließen [20]. Letzteres gilt insbesondere für die Endlagerung von Brennstoff mit geringerem Abbrand oder Mischoxidbrennstoff (MOX: Uran-Plutonium Mischoxid). Kritische Anordnungen können nur auftreten, wenn der Behälter korrodiert, Wasser zur Abfallform gelangt und hypothetische, sehr selektive geochemische Reaktionen ablaufen. Durch Behandlung von abgebrannten Brennstoffen mittels P&T sind Kritikalitätsereignisse in einem Endlager auch für unwahrscheinliche Endlagerentwicklungen auszuschließen, da die Abfälle aus P&T-Anlagen keine spaltbaren Materialien in nennenswerten Konzentrationen enthalten.

Demgegenüber sind jedoch mögliche Kritikalitätsrisiken in P&T-Anlagen zu betrachten, in denen spaltbares Material ab- und aufgetrennt und in einzelnen Schritten angereichert wird [6]. Durch entsprechende Maßnahmen können Prozesse so ausgelegt werden, dass kritische Anordnungen in Trennanlagen auszuschließen sind. Dennoch ist bei einigen P&T-Prozesskonzepten, wie z. B. bei der elektrochemischen Abscheidung von Actiniden, die Aufkonzentration zu kritischen Transuranmengen vorstellbar und muss durch technische Maßnahmen verhindert werden. Risiken durch überkritisches Verhalten in Transmutationsreaktoren sind insbesondere bei den unterkritisch betriebenen ADS-Systemen nicht zu erwarten.

Auch wenn Kritikalitätsrisiken bei der direkten Endlagerung und in P&T-Anlagen gering sind, so sind die Konsequenzen bei Eintritt für Mensch und Umwelt deutlich unterschiedlich zu bewerten. Das Auftreten einer nuklearen Kettenreaktion in einem Endlager in tiefen geologischen Formationen ist nur als Folge langsam ablaufender geochemischer Reaktionen denkbar, kann allerdings theoretisch über lange Zeiträume anhalten. Explosionsartige Exkursionen sind auszuschließen [20]. Die Konsequenzen werden auf das nahe Umfeld des Einlagerungsbereichs begrenzt bleiben. Dagegen können Kritikalitätsereignisse in kerntechnischen Anlagen unmittelbare radiologische Auswirkungen auf Betriebspersonal haben (siehe z. B. [21]). Im Unterschied zu Endlagern in tiefen geologischen Formationen befinden sich kerntechnische Anlagen zudem in der Biosphäre, mit entsprechend direkten Auswirkungen auf Mensch, Natur und Umwelt.

3.4 Proliferationsrisiken

Unter Proliferationsrisiken versteht man den möglichen Missbrauch spaltbaren Materials für militärische oder terroristische Zwecke. Prinzipiell sind Szenarien denkbar, in denen unautorisiert z. B. waffenfähiges Material entwendet wird. Plutonium in bestrahltem Kernbrennstoff aus Leistungsreaktoren mit einem hohen Abbrand ist wegen seiner Isotopenzusammensetzung (Gehalt an ^{240}Pu) für die Produktion von Kernwaffen weniger gut geeignet. Ausschließen lässt sich eine militärische oder terroristische Verwendung allerdings nicht [22]. Auch die Verwendung radiotoxischer Abfallbestandteile zur Herstellung „schmutziger Bomben“ ist denkbar.

Der Zugang zu bestrahlten Kernbrennelementen, die sich in einem verschlossenen Endlager in mehreren hundert Metern Tiefe befinden, ist nur erschwert und durch Anwendung bergbautechnischer Maßnahmen mit erheblichem Zeitaufwand möglich. Über einige hundert Jahre „schützt“ sich bestrahlter Kernbrennstoff darüber hinaus selbst, da bedingt durch die intensive Gamma-Strahlungsemission von Spaltprodukten eine Handhabung des bestrahlten Kernbrennstoffs nur in speziellen Anlagen mit effizienter Abschirmung und fernbedient erfolgen kann. Nach Zerfall relativ kurzlebiger Spaltprodukte – insbesondere von ^{137}Cs und ^{90}Sr (Halbwertszeiten jeweils ca. 30 Jahre) – nach ca. 300 Jahren wird der Handhabungsaufwand allerdings geringer werden. Während bei der direkten Endlagerung von abgebranntem Brennstoff auch Kernbrennstoffe, z. B. Plutonium, ins Endlager verbracht werden, ist dies bei der Anwendung von P&T-Konzepten praktisch auszuschließen.

Leichter erscheint der Zugriff auf Plutonium nach Abtrennung der stark strahlenden Spaltprodukte. Zivile Wiederaufarbeitungsanlagen und damit auch zukünftige Partitionierungsanlagen unterliegen zwar strengen internationalen Kontrollen. Dennoch wird bei der Entwicklung von Trennprozessen für P&T über proliferationsresistente Verfahren nachgedacht. Durch die gemeinsame Abtrennung von Uran, Plutonium und gegebenenfalls minoren Actiniden soll verhindert werden, dass reine Plutonium-Stoffströme entstehen. In diesem Fall wären aufwendige kerntechnische Anlagen erforderlich, um zunächst Plutonium abzutrennen und darüber hinaus kernwaffenfähiges Material herzustellen.

3.5 Zeitskalen

Gemäß Standortauswahlgesetz [5] und dem Nationalen Entsorgungsprogramm [10] plant der Gesetzgeber für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle folgenden zeitlichen Ablauf:

- Entscheidung über den Standort des Endlagers für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle bis 2031 und
- Inbetriebnahme des Endlagers ca. 2050.

Die Betriebszeit bis zum Verschluss wird in Abhängigkeit vom Endlagerungskonzept einige Jahrzehnte in Anspruch nehmen.

Bis zu einer großtechnischen Anwendung von P&T bedarf es – unabhängig von der ausgewählten Technik – noch umfangreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Gemäß [8] könnte P&T im Rahmen einer

Europäischen Systempartizipation frühestens ab 2040 im industriellen Maßstab realisiert werden. Voraussetzung ist, dass in einem relativ kurzen Zeitraum die entsprechenden internationalen Vereinbarungen getroffen und die rechtlichen Grundlagen geschaffen werden können sowie ein politischer und gesellschaftlicher Konsens herstellbar sein wird. Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass auch durch die Abhängigkeit von den jeweiligen P&T-Entwicklungsfortschritten im Partnerland Unwägbarkeiten bei entsprechenden Planungen entstehen werden. Bei einer rein nationalen Entwicklung wäre ein deutlich längerer Zeitraum zu erwarten.

Vor diesem Hintergrund erscheinen die Zeitskalen für den Bau eines Endlagers (gemäß StandAG) und die Entwicklung eines P&T-Konzepts – zumindest im Falle einer Europäischen Systempartizipation – zunächst kompatibel, da sowohl die Realisierung eines Endlagers als auch Bau und Inbetriebnahme einer P&T-Anlage voraussichtlich noch einige Jahrzehnte dauern werden.

Bei der Entwicklung und dem Vergleich von Endlagerkonzepten und -standorten sollten Abfallarten und Abfallmengen möglichst früh bekannt sein. Bei dem in Deutschland nun anlaufenden Standortauswahlverfahren ist daher grundsätzlich eine frühzeitige Entscheidung für oder wider die Anwendung von P&T zur Behandlung von bestrahltem Kernbrennstoff als sinnvoll anzusehen. Allerdings kann man davon ausgehen, dass die bei P&T anfallenden Abfälle zumindest keine Verschärfung der Anforderungen an einen Endlagerstandort für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle nach sich ziehen werden.

Die Planung eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen schließt damit eine parallele Verfolgung von P&T nicht aus. Daraus ergibt sich zwangsläufig, dass es in Anbetracht der kompatiblen Zeiträume keinerlei Grund gibt, ein Verfahren zur Auswahl und Errichtung eines Endlagers für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle zu verzögern, um etwa die technische Reife von P&T abzuwarten. Dagegen werden bei zusätzlichen Verzögerungen im Ablauf der Entsorgungsplanung solche Ungewissheiten größer, die z. B. mit der Zwischenlagerung von bestrahltem Kernbrennstoff über sehr lange Zeiträume (z. B. >100 Jahre) verbunden sind (siehe hierzu [23]).

Als sicher gilt, dass es aufgrund der gemäß [6] zu erwartenden Betriebsdauern von P&T-Anlagen zu verlängerten Zwischenlagerzeiten kommen und sich auch der Verschluss des Endlagers um Jahrzehnte verzögern wird. Zusätzlich ist sicherzustellen, dass auch für die bei Anwendung von P&T verstärkt anfallenden radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ein annahmefähiges Endlager zur Verfügung steht.

3.6 Soziale und ökonomische Aspekte

3.6.1 Gesellschaftliche Akzeptanz

Aufgrund der erheblichen gesellschaftlichen Kontroverse um die Endlagerung der radioaktiven Abfälle drängt sich die Frage auf, ob ein Entsorgungskonzept unter Einbeziehung der P&T eine größere gesellschaftliche Zustimmung fände.

Bisher sind weder auf nationaler noch auf europäischer Ebene repräsentative Erhebungen über die Einstellung der Gesellschaft zum P&T-Konzept vorhanden. Die letzten Eurobarometer Umfragen der

Europäischen Kommission aus den Jahren 2008 [24] bzw. 2010 [25] zur Kernenergienutzung beziehen keine Fragen zur Haltung der europäischen Bevölkerung zum P&T-Konzept mit ein.

Im nationalen Kontext beinhaltet die ACATECH-Studie [6] derzeit die ausführlichste Auseinandersetzung mit der gesellschaftlichen Dimension von P&T. Die im Rahmen der Studie befragten Vertreter von Umweltverbänden vertraten u. a. die Einschätzung, dass P&T derzeit in der Öffentlichkeit praktisch nicht bekannt ist. Ob eine bessere Kenntnis des P&T-Konzepts letztendlich zu mehr Zustimmung oder mehr Ablehnung in der Gesellschaft führen wird, konnte im Rahmen der ACATECH-Studie nicht geklärt werden.

Sehr unwahrscheinlich ist gemäß den Ergebnissen der ACATECH-Studie [6] eine positive Haltung der deutschen Öffentlichkeit zur Errichtung von P&T-Anlagen in Deutschland. Die Ergebnisse aus [25] zur Nutzung der Kernenergie sind zwar nicht unmittelbar auf P&T-Anlagen übertragbar, bestätigen aber die grundsätzlich skeptische Haltung gegenüber kerntechnischen Anlagen: In der Umfrage sprachen sich 52 % der befragten Deutschen für eine Reduzierung der Anzahl der Kernkraftwerke aus und nur 7 % für eine Erhöhung. Es ist nicht zu erwarten, dass sich diese Zahlen in den letzten fünf Jahren wesentlich geändert haben.

Somit käme höchstens die Beteiligung und/oder Nutzung von P&T-Anlagen in anderen EU-Ländern in Frage. Nach Einschätzung in [6] würden in diesem Fall Akzeptanzaspekte in der deutschen Öffentlichkeit am ehesten bei grenznahen Standorten eine Rolle spielen.

Unabhängig von der Entfernung zur Grenze wäre die Partizipation an europäischen P&T-Anlagen mit der Verbringung der abgebrannten Brennelemente aus deutschen Kernkraftwerken ins Ausland verbunden. Neben den Transportrisiken, die gemäß Einschätzung in [6] der Öffentlichkeit vermittelbar wären („*Wenn allerdings mit diesen Transporten die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland wesentlich entlastet wird, ist ein solcher Transport auch der Bevölkerung vermittelbar.*“) wirft diese Verbringung in der gesellschaftlichen und politischen Diskussion möglicherweise auch die Frage nach der ethischen Vertretbarkeit des Exports spaltbaren Materials auf. Umstritten wäre darüber hinaus gegebenenfalls die Frage, ob es mit der deutschen Politik des Ausstiegs aus der Kernenergienutzung vereinbar ist, die Kernenergienutzung in anderen Ländern durch den Export spaltbaren Materials zu unterstützen.

Wenn man eine solche europäische Option unterstellt, stellt sich die Frage, ob die Endlagerung der radioaktiven Abfälle nach Anwendung eines P&T-Konzepts mehr Zustimmung findet als eine möglichst zeitnahe Endlagerung ohne Behandlung der Brennelemente durch P&T.

Für eine höhere Zustimmung könnte sprechen, dass sich für das Endlager für die hoch radioaktiven Abfälle durch die Abtrennung der Actiniden (und anderweitige Verwendung in Generation-IV-Reaktoren oder Transmutation in ADS-Reaktoren in anderen europäischen Ländern) die in Kapitel 3.1 ausgeführten Optimierungen ergeben. Außerdem wäre zu erwarten, dass die verlängerte Zeitspanne bis zum Endlagerverschluss bei Anwendung von P&T von den Akteuren als positiv wahrgenommen wird, die für eine Verschiebung der Entscheidung bei der Endlagerung mit dem Argument plädieren, dass neuere bessere Technologien abgewartet werden sollen (siehe dazu Diskussion in Kapitel 3.5).

Andererseits vergrößert sich das endzulagernde Volumen radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. Sofern diese Abfälle nicht in einem der in Deutschland geplanten Endlager eingelagert

werden könnten, ist aus heutiger Sicht nicht zu erwarten, dass ein gegebenenfalls erforderlicher weiterer Endlagerstandort für die technologischen und Betriebsabfälle aus P&T zukünftig auf deutlich weniger Ablehnung stößt als derzeit ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle. Die derzeitigen Diskussionen um einen Standort für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle deuten auch nicht darauf hin, dass die Akzeptanz der Bevölkerung für einen Standort mit den durch P&T-Anwendung erreichbaren Optimierungen leichter zu erreichen wäre, da Details der Größe und einzulagernden Inventare bisher eher Randaspekte der Diskussion darstellen. Ein weiterer zeitlicher Aufschub sowie die erheblichen Kosten von P&T, die durch die bestehenden Rückstellungen nicht zu decken sind, könnten ebenfalls zu einer geringeren Zustimmung zum P&T-Konzept führen, wenn sich abzeichnet, dass erhebliche Kosten durch die öffentliche Hand zu tragen sind.

3.6.2 Wirtschaftliche Aspekte

Eine Kostenabschätzung für die Implementierung von P&T ist schwierig, da entsprechende Anlagen sich zum großen Teil erst in der Entwicklung befinden und zudem die erforderlichen Investitionen vom P&T-Konzept abhängig sind. Belastbare Zahlen für entstehende Kosten sind daher weder verfügbar noch in naher Zukunft zu erwarten. Eine vergleichende ökonomische Studie für unterschiedliche P&T-Konzepte ist in [26] beschrieben. Kostensteigerungen für den Strompreis wurden relativ zum Referenzkonzept „Direkte Endlagerung der ausgedienten Brennelemente“ abgeschätzt. Allen in dieser vergleichenden Studie betrachteten P&T-Konzepten ist jedoch die Annahme gemeinsam, dass mit abgetrenntem Uran und Plutonium weiterhin Strom produziert wird. Das einzige möglicherweise für Deutschland „passende“ Modell besteht in einer Europäischen Systempartizipation. Für eine solche Vorgehensweise wurde eine Strompreiserhöhung gegenüber der direkten Endlagerung von ca. 10 bis 20 % abgeschätzt. Szenarien, die einer solchen Schätzung zugrunde liegen, sehen vor, dass ein Teil der Anlagen z. B. sieben ADS-Anlagen über 30-40 Jahre in Deutschland betrieben werden müssten [6]. In einer weiteren europäischen Studie geht man für verschiedene P&T-Szenarien von einer Strompreiserhöhung von ca. 50 % aus, relativ zum Preis für Strom aus Kernenergie mit direkter Endlagerung des abgebrannten Kernbrennstoffs [8]. Eine ausschließlich nationale P&T-Lösung, bei der keine Absicht besteht mit P&T-Anlagen und den spaltbaren Actiniden Uran und Plutonium Strom zu erzeugen, wäre sicher mit derart hohen Kosten verbunden, dass sie aus ökonomischen Aspekten uninteressant ist [6].

4 Zusammenfassung

- P&T kann ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle nicht ersetzen, aber den Endlager Footprint verringern. Diese Reduktion wird begrenzt durch die bereits vorliegenden Transuranelement-haltigen verglasten Abfälle, die nicht durch P&T behandelt werden können. Darüber hinaus werden zusätzliche Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung erzeugt.
- Die Auswirkungen von P&T auf Resultate von Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager sind gering. Durch P&T umwandelbare Transuranelemente gelten unter Endlagerbedingungen als weitgehend immobil.

- Die gravierende Verringerung der Langzeitradiotoxizität des Abfalls aus P&T verglichen mit der direkten Endlagerung abgebrannten Brennstoffs kann dazu beitragen, Unsicherheiten in Langzeitsicherheitsprognosen für ein Endlager zu reduzieren. Dies gilt insbesondere für Human-intrusion-Szenarien.
- Der Abbau von Unsicherheiten in Langzeitsicherheitsprognosen ist abzuwägen gegen denkbare Risiken, die durch den Betrieb kerntechnischer P&T-Anlagen über mehrere Jahrzehnte und die Erzeugung weiterer radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung entstehen.
- Die Entwicklung eines separaten nationalen P&T-Konzepts für Deutschland erscheint unter den besonderen Randbedingungen in Deutschland (Ausstiegsbeschluss aus der Kernenergienutzung, geringe Akzeptanz für Kerntechnik in der Öffentlichkeit) und aus ökonomischen Gründen als wenig sinnvoll. Die Kooperation mit Staaten, die weiterhin auf Kernenergie setzen und P&T weiter entwickeln, im Sinne einer Systempartizipation stellt eine vorteilhaftere P&T-Strategie dar.
- Zeitskalen für die Entwicklung von P&T-Technologien und die Standortauswahl für ein Endlager erscheinen kompatibel. Daher ist eine parallele Entwicklung beider Prozesse denkbar. Eine Verzögerung von Endlagerprojekten durch Abwarten auf P&T ist daher nicht erforderlich.
- Eine höhere gesellschaftliche Akzeptanz für P&T im Vergleich zur direkten Endlagerung ist derzeit nicht erkennbar.
- Eine ökonomische Kosten/Nutzenanalyse für P&T ist derzeit nicht leistbar. Allerdings ist von deutlich erhöhten Kosten gegenüber einer direkten Endlagerung auszugehen.

5 Unterlagen

- [1] Steinberg, M., Wotsak, G., Manowitz, B., 1964. Neutron burning of long-lived fission products for waste disposal. BNL-8558, Brookhaven National Laboratory
- [2] CORDIS (Community Research and Development Information Service). SACSESS (Safety of Actinide Separation Processes). http://cordis.europa.eu/result/rcn/158019_en.html
- [3] CORDIS (Community Research and Development Information Service). Central Design Team (CDT) for a Fast-Spectrum Transmutation Experimental Facility. http://cordis.europa.eu/project/rcn/92883_en.html
- [4] Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 5 des Gesetzes vom 28. August 2013 (BGBl. I S. 3313)
- [5] Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz – StandAG), 23. Juli 2013
- [6] ACATECH-Studie, Dezember 2013. Hrsg.: O. Renn. Partitionierung und Transmutation; Forschung-Entwicklung-Gesellschaftliche Implikationen
- [7] ACATECH-Position, Februar 2014. Hrsg. Acatech. Partitionierung und Transmutation nuklearer Abfälle, Chancen und Risiken in Forschung und Anwendung
- [8] RED-IMPACT. Impact of Partitioning, Transmutation and Waste Reduction Technologies on the Final Nuclear Waste Disposal, Schriften des Forschungszentrums Jülich, Volume 15, ISBN 978-3-89336-538-8, 2008
- [9] Oigawa, H., et al., Int. Conf. On Advanced Nuclear Fuel Cycles and Systems (GLOBAL 2007), Boise, Idaho, 9-13 September (2007) in Potential Benefits and Impacts of Advanced Nuclear Fuel Cycles with Actinide Partitioning and Transmutation, OECD/NEA, 2011, NEA No. 6894
- [10] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Entwurf 06. Januar, 2015. Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm)
- [11] Bundesamt für Strahlenschutz. <http://www.bfs.de/de/endlager/abfaelle/prognose.html> Stand Mai 2015
- [12] W. Bollingerfehr, D. Buhmann, W. Filbert, J. Mönig, Auswirkungen von Partitionierung und Transmutation auf Endlagerkonzepte und Langzeitsicherheit von Endlagern für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), GRS-318, 2014

- [13] International Atomic Energy Agency, IAEA. International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO), <https://www.iaea.org/INPRO/>
- [14] An Integrated Safety Assessment Methodology (ISAM), Risk and Safety Working Group (RSWG), GenIV Forum, for Generation IV Nuclear Systems, GIF/RSWG/2010/002/Rev 1
- [15] OECD-NEA. <https://www.oecd-neo.org/rwm/reports/2004/nea4435-timescales.pdf>
- [16] CORDIS (Community Research and Development Information Service)
ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/fission/docs/euradwaste08/papers/paper-10-impact-of-advanced-pt-j-marivoet_en.pdf
- [17] CORDIS (Community Research and Development Information Service)
ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/fission/docs/euradwaste08/papers/paper-10-impact-of-advanced-pt-j-marivoet_en.pdf
- [18] Kersting, A. B., Efurud, D. W., Finnegan, D. L., Rokop, D. J., Smith, D. K. & Thompson, J. L. (1999). Migration of plutonium in ground water at the Nevada Test Site. Nature Vol. 397, 56-59
- [19] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle,
September 2010
- [20] Gmal, B., Hesse, U., Hummelsheim, K., Kilger, R., Krzykacz-Hausmann & Moser, E. F. (2004).
Untersuchungen zur Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für
ausgediente Kernbrennstoffe in unterschiedlichen Wirtsformationen, GRS-A-3240
- [21] Reaktor-Sicherheitskommission.
<http://www.rskonline.de/downloads/snkonsequenzenauskritikalitaetsunfalltokaimura.pdf>
- [22] Kankleit, E., Küppers C. & Imkeller, U. (1989). Bericht zur Waffentauglichkeit von
Reaktorplutonium, Arbeitspapier, IANUS-I/1989
- [23] Entsorgungskommission. Diskussionspapier zur verlängerten Zwischenlagerung bestrahlter
Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle (in Vorbereitung)
- [24] Europäische Kommission. Spezial Eurobarometer 297 – Einstellung zu radioaktiven Abfällen,
Befragung: Februar - März 2008, Bericht Juni 2008
- [25] Europäische Kommission. Spezial Eurobarometer 324 – Europeans and Nuclear Safety,
Befragung: September – Oktober 2009, Bericht März 2010
- [26] OECD-NEA. Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management, 2006