

# Partitioning & Transmutation (P&T)

von Dr. Joachim Knebel, Prof. Massimo Salvatores  
E-Mail [Joachim.Knebel@energie-fakten.de](mailto:Joachim.Knebel@energie-fakten.de)

## Hier die Fakten – vereinfachte Kurzfassung

Abgebrannte Brennelemente aus Kernkraftwerken sind hoch radioaktiv und müssen sicher und umweltverträglich entsorgt werden. Dafür gibt es heute zwei Optionen:

- 1) Im Falle des offenen Brennstoffkreislaufs (wie in Deutschland) wird der gesamte abgebrannte Kernbrennstoff generell als Abfall angesehen, der etwa 200 000 Jahre eine höhere Radioaktivität besitzen wird als das Natururan, aus dem der Brennstoff gefertigt wurde, und ebenso lange sicher endgelagert werden muss.
- 2) Bei dem geschlossenen Brennstoffkreislauf, der in Frankreich und Japan praktiziert wird, wird der abgebrannte Kernbrennstoff aufgearbeitet. Dabei wird das nicht verbrauchte Uran und Plutonium abgetrennt und als Wertstoff in den Brennstoffkreislauf zurückgeführt. Damit verkürzt sich die Zeit, in welcher die dann entstehenden radioaktiven Abfälle auf das Niveau von Natururan zerfallen sind, auf etwa 16 000 Jahre.

Eine weiter fortgeschrittene Option könnte in Zukunft in einer mehrfachen Rezyklierung des Brennstoffs und der Nutzung neuer Reaktorkonzepte bestehen. Dieses Verfahren wird *Partitioning & Transmutation* oder kurz *P&T* genannt. Es könnte die Entsorgung langlebiger hochra-

dioaktiver Abfälle von Grund auf verändern.

Das Hauptgefahrenpotential abgebrannter Kernbrennstoffe wird nach einigen hundert Jahren von nur wenigen Elementen, vor allem Plutonium, Neptunium, Americium und Curium bestimmt. Obwohl diese nur in verhältnismäßig niedrigen Konzentrationen vorkommen, sind sie eine Gefahr für alle Lebensformen, sollten sie in die Umwelt freigesetzt werden. Sie müssen daher vollständig isoliert von der Biosphäre (also z. B. in tiefen geologischen Formationen) über sehr lange Zeiträume sicher endgelagert werden.

Die Strategie von Partitioning & Transmutation (P&T) umfasst die chemische oder elektrochemische Abtrennung (Partitioning) von Plutonium und den Minoren Actiniden Neptunium, Americium und Curium von den kurzlebigen Radionukliden (hauptsächlich den Spaltprodukten) und ihre anschließende Umwandlung in stabile oder kurzlebige Isotope durch Neutronenreaktionen in speziellen Anlagen (Transmutation). Dadurch kann die Langzeitradioaktivität (Langzeitgefährdungspotential) des verbleibenden Abfalls beträchtlich reduziert werden: Etwa um einen Faktor von 10, wenn das gesamte Plutonium (Pu) abgetrennt und gespalten wird oder um einen Faktor von etwa 100, wenn zusätzlich die Minoren Actiniden transmutiert werden. Dies erfordert

allerdings eine mehrfache Abtrennung und Rezyklierung.

Bei dem P&T-Verfahren handelt es sich um eine mögliche technische Optimierung des Brennstoff- und Abfallmanagements, die in die Reihe der technischen Handlungsalternativen einzuordnen ist. Das Verfahren ermöglicht nicht nur eine Verringerung der hochradioaktiven Abfallmenge, sondern reduziert auch die damit verbundene langfristige Nachwärmerezeugung.

In Leichtwasserreaktoren ist eine vollständige Wiederverwendung der Transurane mit der etablierten Wiederaufarbeitungstechnik aufgrund der erhöhten Neutronendosis praktisch ausgeschlossen. Im Falle schneller Kernreaktoren erscheint das Problem der vollständigen Wiederverwendung der Transurane (TRU) im Hinblick auf die Neutronenphysik leichter lösbar zu sein. Alternativ kommen hierfür auch Beschleuniger getriebene, unterkritische Anlagen (Accelerator Driven Systems ADS) in Betracht.

Die Realisierung von P&T innerhalb fortgeschrittener Brennstoffkreisläufe bedarf sowohl politischer als auch technischer Entscheidungen. Ausgehend von dem gegenwärtigen internationalen Stand von Wissenschaft und Technik werden die größten Herausforderungen in der Trennchemie (Partitioning), im Bereich der Entwicklung fortgeschrittener Brennstoffe, in den Bereichen Werkstoffe und Tech-

nologien sowie bei der großtechnischen Demonstration der schnellen Reaktorsysteme selbst liegen.

Die potentiellen Vorteile von P&T sind einerseits aus industrieller Sicht zu bewerten. Andererseits sind die Auswirkungen auf eine Endlagerung langlebiger Radionuklide in tiefen geologischen Formationen auch aus Sicht der Gesellschaft von Bedeutung. Eine industrielle Realisierung des P&T-Verfahrens in absehbaren Zeiträumen wird vor allem dann möglich sein, wenn klare Vorteile im Hinblick auf die Akzeptanz der Endlagerung resultieren und eine starke politische Unterstützung vorhanden ist.

Der Einfluss von P&T auf geologische Endlagerkonzepte ist maß-

geblich, wenn auch nicht unermesslich hoch. Der Raumbedarf in einem geologischen Endlager wird etwa um einen Faktor 9 reduziert. Auch wenn mögliche Freisetzungsmechanismen der Radionuklide und die damit einhergehende potentielle Strahlenbelastung der Bevölkerung durch P&T kaum verringert werden, würde die deutliche Verringerung des Actinideninventars die Risiken insbesondere bei erhöhter Actinidenmobilität unter bestimmten geochemischen Bedingungen sowie die radiologischen Folgen beim unsachgemäßen Zutritt von Menschen in das Endlager vermindern.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Auch wenn P&T nie ein End-

lager in tiefen geologischen Formationen ersetzen kann, so hat diese Strategie das Potential, die Menge an schlussendlich endzulagernden langlebigen hochradioaktiven Abfällen deutlich zu verringern. In der gesellschaftlichen Debatte könnte diese technologische Option die Akzeptanz eines Endlagers erhöhen. Grundsätzlich sollte dabei der Aspekt der Rückholbarkeit berücksichtigt werden, um sich mittel- und langfristige Handlungsoptionen offen zu halten. Für die Realisierung von P&T sind noch erhebliche Anstrengungen in Forschung und Entwicklung erforderlich, die in enger internationaler Arbeitsteilung und unter deutscher Beteiligung erbracht werden.

# Partitioning & Transmutation (P&T)

von Dr. Joachim Knebel, Prof. Massimo Salvatores  
E-Mail [Joachim.Knebel@energie-fakten.de](mailto:Joachim.Knebel@energie-fakten.de)

## Hier die Fakten – Langfassung

### Begriffsbestimmung und Bedeutung

Die für die Stromerzeugung eingesetzten Kernkraftwerke erzeugen neben dem gewünschten Strom auch abgebrannte Brennelemente, die gegen neue Elemente ausgetauscht werden, sobald sie den vorgesehenen Abbrand erreicht haben. Diese abgebrannten Brennelemente sind hoch radioaktiv und müssen sicher, umweltverträglich und in einer für die Öffentlichkeit akzeptablen Weise entsorgt werden. Gegenwärtig werden weltweit zwei *Entsorgungsoptionen* verfolgt:

- 1) Die direkte Endlagerung des abgebrannten Brennstoffes, auch als „offener Brennstoffkreislauf“ oder im Englischen treffender als ‚Once Through‘ bezeichnet und
- 2) die Aufarbeitung und Rezyklierung des abgebrannten Brennstoffs, auch „geschlossener Brennstoffkreislauf“ genannt.

In der Praxis unterscheiden sich diese beiden Brennstoffkreisläufe im Wesentlichen durch die nach der Bestrahlung des Brennstoffs im Reaktor entstehenden Abfälle. Im Falle des so genannten offenen Brennstoffkreislaufs (üblich u.a. in den USA, Schweden und Deutschland) wird abgebrannter Brennstoff generell als Abfall angesehen, der etwa 200 000 Jahre eine höhere Radioak-

tivität besitzen wird als das Natururan, aus dem der Brennstoff gefertigt wurde, und ebenso lange sicher endgelagert werden muss. Dabei wird in einigen Ländern der Rückholbarkeit der Abfälle große Bedeutung beigemessen, um sich grundsätzlich Handlungsoptionen offen zu halten.

Bei dem alternativen geschlossenen Brennstoffkreislauf, der beispielsweise in Frankreich und Japan eingeführt ist, wird der abgebrannte Kernbrennstoff aufgearbeitet. Dabei wird das nicht verbrauchte und wieder verwendbare Uran und Plutonium abgetrennt und als Wertstoff in den Brennstoffkreislauf zurückgeführt. Im geschlossenen Brennstoffkreislauf wird damit die Zeit, in welcher die dann entstehenden radioaktiven Abfälle auf das Niveau von Natururan zerfallen sind, auf etwa 16 000 Jahre verkürzt. Dieser Zeitraum ist im Wesentlichen durch die sogenannten Minoren Actiniden MA (Neptunium, Americium und Curium) bestimmt, da die bei der Kernspaltung entstehenden Spaltprodukte nach etwa 500 Jahren das Radiotoxizitätsniveau von Natururan erreicht haben.

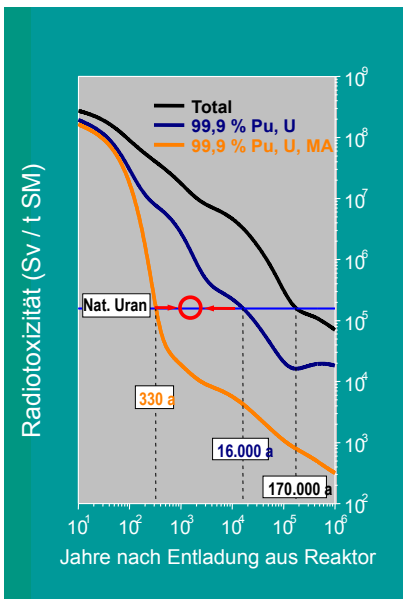
Eine weiter fortgeschrittene Option besteht in der Entwicklung *erweiterter geschlossener Brennstoffkreisläufe*, die auf einer mehrfachen Rezyklierung und neuen Reaktorkonzepten basieren. Dieses Verfahren wird *Partitioning & Transmutation*

oder kurz *P&T* genannt. Obwohl die grundsätzliche Machbarkeit dieses Verfahren wissenschaftlich nachgewiesen ist, könnten noch Jahrzehnte der Entwicklung erforderlich sein, bevor es praktisch einsetzbar ist. Der Grund ist die komplizierte Herstellung, Bestrahlung, erneute Abtrennung und Refabrikation derartiger Transmutations-Brennstoffe, die noch vom Stadium der Laborexperimente auf industrielle Fertigung weiterentwickelt werden muss. Gleichwohl stellt P&T einen potentiellen Durchbruch dar, der die gesellschaftliche und politische Debatte über die Entsorgung langlebiger hochradioaktiver Abfälle von Grund auf verändern könnte.

Tatsächlich wird das Hauptgefahrenpotential abgebrannter Kernbrennstoffe nach einigen hundert Jahren von nur wenigen chemischen Elementen bestimmt. Dies sind im Wesentlichen die Transuranelemente Plutonium, Neptunium und Americium und in geringerem Maße Curium sowie einige langlebige Spaltprodukte wie Jod und Technetium. Die Transuranelemente entstehen im Reaktor durch fortlaufenden Neutroneneinfang aus Uran.

Obwohl die Transuranelemente nur in verhältnismäßig niedrigen Konzentrationen im abgebrannten Kernbrennstoff vorkommen, sind sie doch eine Gefahr für alle Lebensformen, sollten sie in die Umwelt

LANGFASSUNG



Radiotoxizität in Sievert pro Tonne Schwermetall (SM) des abgebrannten Kernbrennstoffes in Abhängigkeit der gewählten Strategie: Schwarze Kurve – Direkte Endlagerung; Blaue Kurve – Abtrennung und vollständige Verbrennung von Plutonium (Pu) und Uran (U); Orange Kurve – Abtrennung und vollständige Verbrennung von Pu, Uran und Minoren Actiniden (MA).

freigesetzt werden. Sie müssen daher vollständig isoliert von der Biosphäre in tiefen geologischen Formationen über sehr lange Zeiträume sicher endgelagert werden.

Ein Maß für die potentielle Gefahr dieser Elemente ist deren Radiotoxizität, die sich aus ihrer Radioaktivität und weniger aus ihrer chemischen Form ergibt. Die Radiotoxizität hängt ab von der Strahlenart, der Strahlenergie sowie der Aufnahme und der Verweildauer der entsprechenden Elemente im menschlichen Organismus.

Die Strategie von Partitioning & Transmutation (P&T) umfasst die chemische oder elektrochemische Abtrennung (Partitioning) von Plutonium und den minoren Actiniden Neptunium, Americium und Curium von den kurzlebigen Radionukliden (hauptsächlich den Spaltprodukten) und ihre anschließende Umwandlung in stabile oder kurzlebige Isotope durch Neutronenreaktionen in speziellen Reaktoren (Transmutation). Da hauptsächlich Plutonium und die minoren Actiniden für die Langzeitradiotoxizität verantwortlich sind, kann durch Abtrennung und Spaltung dieser Nuklide die Langzeit-

radiotoxizität des verbleibenden Abfalls beträchtlich reduziert werden. Allerdings hat P&T keine oder nur eine geringe Auswirkung auf das Spaltproduktinventar der radioaktiven Abfälle und deren Radiotoxizität.

Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass das Radiotoxizitätsinventar um einen Faktor von 10 gesenkt werden kann, wenn das gesamte Plutonium (Pu) abgetrennt und gespalten wird. Dieser Faktor kann auf über 100 erhöht werden, wenn zusätzlich die Minoren Actiniden transmutiert werden. Dazu bedarf es allerdings einer nahezu vollständigen Spaltung der Actiniden, was wiederum eine mehrfache Abtrennung und Rezyklierung erfordert. Die Verluste bei dem Abtrennungsprozess und der Herstellung des neuen Transmutations-Brennstoffs müssen dabei deutlich unter 1%, wahrscheinlich im Bereich von 0,1%, liegen. Aufgrund dieser Prozessverluste und der nicht vollständigen Verbrennung wird man die ideale (orange) Kurve nicht ganz erreichen können. Die Effizienz von P&T lässt sich mit der Formel

$$\epsilon_{PT} = \frac{\epsilon_P \epsilon_T}{1 - (1 - \epsilon_T) \epsilon_P}$$

berechnen, wobei  $\epsilon_P$  und  $\epsilon_T$  die Effizienz für den Prozess des Partitioning und der Transmutation beschreiben. Im realen Prozess wird sich also ein Betriebszustand zwischen der orangen und der blauen Kurve ein-

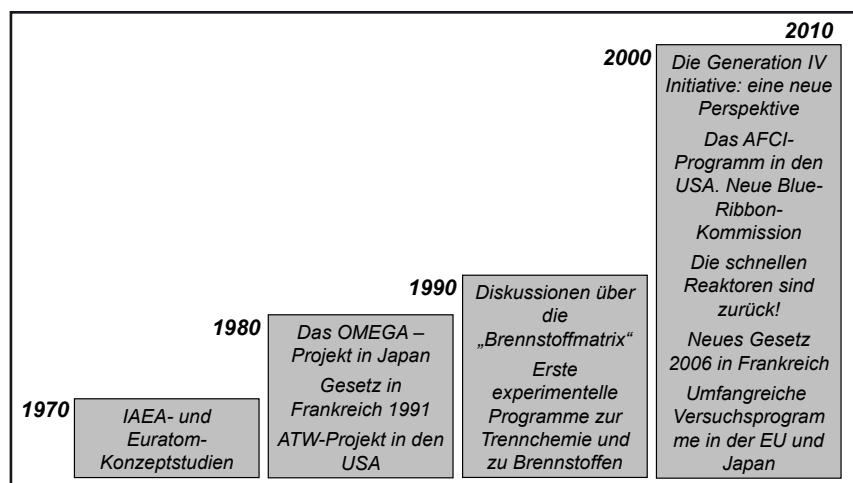
stellen. Außerdem müssen verbesserte Herstellungsverfahren und Fernhantiertechniken entwickelt werden, um die radioaktive Belastung und die Risiken für das Bedienungspersonal zu minimieren.

Das P&T-Verfahren ermöglicht nicht nur eine Verringerung der endzulagernden hochradioaktiven Abfallmenge, sondern reduziert auch die damit verbundene Nachwärmerzeugung und den Platzbedarf in einem Endlager.

**Bedeutung ‚schneller‘ Transmutationssysteme**

Seit den frühen 70er Jahren ist P&T immer eine internationale Unternehmung gewesen. Die meisten wissenschaftlichen Untersuchungen und Demonstrationsversuche wurden im Rahmen internationaler Kooperationen durchgeführt.

Die Transmutationsphysik zeigt deutlich, dass ‚schnelle‘ Reaktoren mit einem hochenergetischen Neutronenspektrum (kritische oder unterkritische Systeme, z.B. Beschleuniger getriebene Systeme (oder Accelerator Driven System ADS; in den USA auch Accelerator Driven Transmutation of Waste ATW)) gerade auch im Hinblick auf die im Rahmen des Generation-IV International Forums (GIF) untersuchten vier Kriterien (Wirtschaftlichkeit, Sicherheit, Umweltschutz, Nichtweiterverbreitung) besonders vorteilhaft sind.



Zeitliche Entwicklung und Schwerpunktsetzung der wissenschaftlichen Untersuchungen zu P&T

Dies bestätigen auch Studien zur Auslegung des Reaktorkerns und des gesamten Brennstoffkreislaufs. Während im Hinblick auf die Machbarkeit des Reaktorkerns die meisten Optionen (z.B. hinsichtlich der Kerngeometrie, der Art des Brennstoffs, des Kühlmittels, der verwendeten Materialien) möglich scheinen, sind die Auswirkungen auf den Brennstoffkreislauf (u.a. Kosten, Machbarkeit, Strahlenbelastung der Arbeiter usw.) von größerer Bedeutung. Der Einsatz von Transuranen in Leichtwasserreaktoren ist beispielsweise aufgrund der Notwendigkeit einer höheren Anreicherung des Kernbrennstoffes und der Begrenzung der Minoren Actinidenmenge zur Vermeidung ungünstigerer Reaktivitätskoeffizienten (Sicherheit) mit höheren Kosten verbunden. In Leichtwasserreaktoren ist eine vollständige Wiederverwendung der Transurane mit der etablierten Wiederaufarbeitungstechnik praktisch ausgeschlossen.

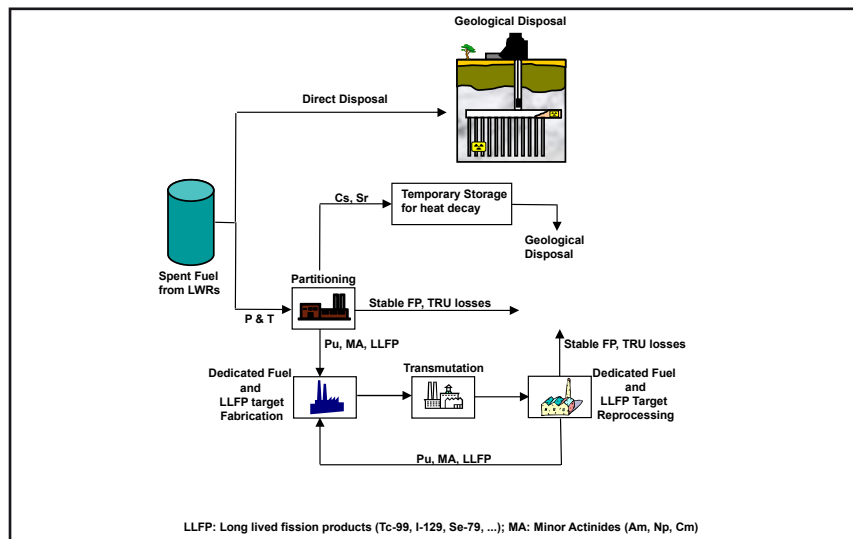
Im Falle schneller Reaktoren erscheint das Problem der vollständigen Wiederverwendung der Transurane (TRU) im Hinblick auf die Neutronenphysik leichter lösbar zu sein. Doch auch wenn die Schwierigkeiten bei weitem nicht so dramatisch sein mögen, die Folgen der TRU-Beladung des Brennstoffs können beträchtlich sein und sind oft Grund für die Zurückhaltung der Industrie, die potentiellen Vorzüge von P&T in naher Zukunft zu nutzen.

**Szenarien und Herausforderungen**

Die folgende Abbildung zeigt eine allgemeine Darstellung eines fortgeschrittenen Brennstoffkreislaufes mit P&T:

Die von unterschiedlichen Ländern verfolgten Strategien lassen sich mit folgenden drei Szenarien beschreiben:

- a) Nachhaltige Entwicklung der Kernenergie mit Einführung schneller Reaktoren in einem relativ nahen Zeitraum (etwa 2040 bis 2050);



Allgemeine Darstellung eines fortgeschrittenen Brennstoffkreislaufes im Vergleich zur direkten Endlagerung. LLFP: langlebige Spaltprodukte (Tc-99, I-129, Se-79); MA: Minore Actiniden (Np, Am, Cm).

- b) Fortgesetzte Nutzung von Leichtwasserreaktoren und Einführung von MA-Brennern bei verzögerter Einführung schneller Reaktoren;
- c) Verringerung des Transuraninventars auf der Grundlage allein von Leichtwasserreaktoren oder eines baldigen Ausstiegs aus der Kernenergie.

Die Realisierung von P&T innerhalb fortgeschrittener Brennstoffkreisläufe bedarf sowohl politischer als auch technischer Entscheidungen. Grundlagen für technische Entscheidungen werden der Fortschritt und die Ergebnisse in wichtigen F&E-Bereichen sowie die Verfügbarkeit der erforderlichen Infrastrukturen und Anlagen zu Demonstrationszwecken sein.

Ausgehend von dem gegenwärtigen internationalen Stand von Wissenschaft und Technik werden die größten Herausforderungen in der Trennchemie (Partitioning), im Bereich fortgeschrittener Brennstoffe, in den Bereichen Werkstoffe und Technologien sowie bei der großtechnischen Demonstration der schnellen Reaktorsysteme selbst liegen.

Auf dem Gebiet der Trennchemie besteht eine große Herausforderung in dem Nachweis der Machbarkeit der aussichtsreichsten Verfahren jenseits des Labormaßstabs, d.h. im vorindustriellen und industriellen Maßstab. - Im Bereich der fortge-

schrrittenen Brennstoffe müssen Brennstoffmatrices entwickelt werden, die große Mengen an Minoren Actiniden aufnehmen können. In diesem Zusammenhang spielt die Verfügbarkeit eines geeigneten Forschungsreaktors (Bestrahlungsanlage) eine wichtige Rolle. Nach der endgültigen Abschaltung des PHE-NIX-Reaktors in Frankreich gibt es in Europa keine Bestrahlungsanlage mehr, die über ein schnelles Neutronspektrum verfügt und in der hohe Werte für den Brennstoff-Abbrand und für Strahlenschäden zum Beispiel im Stahl des Struktur- und Hüllrohrmaterials erzielt werden können. Auch fehlt bisher noch eine industrielle Anlage für die Herstellung MA-haltiger Brennstoffe, obwohl der Einfluss von Minoren Actiniden auf Anlagen zur Brennstoffherstellung bereits Gegenstand von Voruntersuchungen war.

In den Bereichen Technologien und Werkstoffe wird schließlich eine kontinuierliche Unterstützung durch Versuchsanlagen und insbesondere Bestrahlungsreaktoren erforderlich sein, speziell für die Entwicklung innovativer und hochtemperaturfester Werkstoffe sowie Kühlmitteltechnologien und fluiddynamischer Simulationswerkzeuge. Die Herausforderung im Bereich der Werkstoffforschung liegt in der Entwicklung fortgeschrittener Simulationsverfah-

## LANGFASSUNG

ren zur Verbesserung der Vorhersage des Verhaltens neuer Materialien unter Bestrahlung und erschwerten Betriebsbedingungen.

### Potentielle Vorteile von P&T

Die potentiellen Vorteile von P&T (und generell von fortgeschrittenen Brennstoffkreisläufen mit schnellen Reaktoren der Generation IV) sind einerseits aus industrieller Sicht und nach industriellen Kriterien (z.B. Kosten und Nutzungsrisiken) zu bewerten. Andererseits sind die Auswirkungen auf eine Endlagerung langlebiger Radionuklide in tiefen geologischen Formationen aus der Sicht von Endlagerexperten und aus Sicht der Gesellschaft generell von Bedeutung. All diese Themen sind zurzeit Gegenstand zahlreicher Debatten, ein allgemeiner Konsens konnte bisher noch nicht erzielt werden.

Eine industrielle Realisierung des P&T-Verfahrens und fortgeschrittener Brennstoffkreisläufe im großen Maßstab auf nationaler oder regionaler (z.B. europäischer) Ebene wird vor allem dann möglich sein, wenn klare Vorteile im Hinblick auf die Durchführung und Akzeptanz der Endlagerung resultieren, wenn starke politische Unterstützung vorhanden ist und die wirtschaftliche Perspektive aus industrieller Sicht günstig ist.

Viele in letzter Zeit durchgeführte Studien haben gezeigt, dass der Einfluss von P&T auf geologische Endlagerkonzepte maßgeblich, wenn auch nicht unermesslich hoch, ist. Aufgrund der Verringerung der Abwärmeerzeugung des verbleibenden endzulagernden Abfalls ist eine effizientere Nutzung von Endlagerbergwerken nach Abklingzeiten von etwa 100 Jahren wahrscheinlich. Die Verringerung der Nachzerfallswärme um einen Faktor von etwa 3 ermöglicht die Reduzierung der erforderlichen Endlagerstrecken ebenfalls etwa um den Faktor 3. Die erforderliche Fläche reduziert sich damit etwa um

den Faktor 9. Grundsätzlich können mögliche Freisetzungsmechanismen der Radionuklide aus den Abfallgebunden in die Umgebung und die damit einhergehende potentielle Strahlenbelastung der Bevölkerung durch P&T kaum verringert werden. Diese Strahlenbelastung, z.B. mögliche Verunreinigungen von Wasser mit Jod oder Technetium, rührt hauptsächlich von den langlebigen Spaltprodukten her, für welche keine effektive Transmutationsstrategie angewendet werden kann. Es ist allerdings von Bedeutung, dass eine deutliche Verringerung des Actinideninventars der hochradioaktiven Abfälle (HAW) die Risiken insbesondere bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen in einem Endlager entscheidend reduzieren würde. Solche Entwicklungen sind z.B. eine erhöhte Actinidenmobilität unter bestimmten geochemischen Bedingungen oder die radiologischen Folgen beim unsachgemäßen Zutritt von Menschen in das Endlager.

Die Untersuchung angenommener oder nicht auszuschließender Vorkommnisse erfordert ein grundlegendes Verständnis der Geologie und des geochemischen Langzeitverhaltens der darin gelagerten Materialien, wie z.B. Kolloidbildung, Adsorption und Migration, welche für jede vorgesehene Endlagerformation (Salz, Granit, Ton) spezifisch untersucht werden müssen.

### Schlussfolgerungen

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Auch wenn P&T nie ein Endlager in tiefen geologischen Formationen ersetzen kann, so hat diese Strategie das Potential, eine wichtige technische Optimierung des Brennstoff- und Abfallmanagements in die Debatte einzuführen. Sie könnte aufzeigen, wie eine mengen- und volumenmäßige Verringerung der zu entsorgenden Nuklearabfälle erreicht werden kann, und dabei verdeutli-

chen, welche technischen Handlungsalternativen bestehen. Damit kann ein wichtiger Beitrag zur Debatte über anspruchsvolle Lösungsstrategien entwickelt werden. Diese ist sowohl für Stakeholder als auch für die Öffentlichkeit und die öffentliche Wahrnehmung der bestehenden Alternativen und Probleme des Abfallmanagements bedeutsam. Um die Vielzahl der Handlungsmöglichkeiten offen zu halten, sollte grundsätzlich der Aspekt der Rückholbarkeit der abgebrannten Brennelemente sowie die Rückholbarkeit der Restabfälle nach Partitioning und Transmutation berücksichtigt werden, um ein Recycling der hochradioaktiven Abfälle mithilfe zukünftiger technischer Entwicklungen zu ermöglichen. Diese Aspekte sind wichtig für eine nachhaltige Kernenergie.

Natürlich werden nationale Forschungsprogramme zur nuklearen Entsorgung und zu Kernbrennstoffkreisläufen durch die nationale Energiepolitik bestimmt und können hinsichtlich ihrer Zielsetzungen und Zeithorizonte beträchtlich variieren. Allerdings scheint das weltweite Wiederaufleben der Kernenergie die Entwicklung schneller Kernreaktoren und fortgeschrittener (geschlossener) Brennstoffkreisläufe in den Mittelpunkt des Interesses gerückt zu haben. Relativ kurzfristig wurden neue Projekte in Russland, Indien und China angestoßen und die publizierten Entwicklungspläne lassen darauf schließen, dass diese Entwicklungen in diesen Ländern früher verwirklicht werden könnten als in den westlichen Industrieländern. Innerhalb der OECD haben sich sowohl Japan als auch Frankreich zum Einsatz schneller Reaktoren und des damit verbundenen geschlossenen Brennstoffkreislaufes verpflichtet. Wichtige Entscheidungen in dieser Hinsicht stehen in Europa und Japan im Zeitraum von 2012 bis 2015 an.