



> Partitionierung und Transmutation nuklearer Abfälle

Chancen und Risiken in
Forschung und Anwendung

acatech (Hrsg.)

acatech POSITION

Februar 2014

Herausgeber:

acatech – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN, 2014

Geschäftsstelle
Residenz München
Hofgartenstraße 2
80539 München

Hauptstadtbüro
Unter den Linden 14
10117 Berlin

Brüssel-Büro
Rue d'Egmont/Egmontstraat 13
1000 Brüssel
Belgien

T +49 (0) 89 / 5 20 30 90
F +49 (0) 89 / 5 20 30 99

T +49 (0) 30 / 2 06 30 96 0
F +49 (0) 30 / 2 06 30 96 11

T +32 (0) 2 / 2 13 81 80
F +32 (0) 2 / 2 13 81 89

E-Mail: info@acatech.de

Internet: www.acatech.de

Koordination: Dr. Marc-Denis Weitze

Redaktion: Evelyn Glose, Sandra Lehmann

Layout-Konzeption: acatech

Konvertierung und Satz: Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS,
Sankt Augustin

Die Originalfassung der Publikation ist verfügbar auf www.utzverlag.de

> DIE REIHE acatech POSITION

In dieser Reihe erscheinen Positionen der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften zu technikwissenschaftlichen und technologiepolitischen Zukunftsfragen. Die Positionen enthalten konkrete Handlungsempfehlungen und richten sich an Entscheidungsträger in Politik, Wissenschaft und Wirtschaft sowie die interessierte Öffentlichkeit. Die Positionen werden von acatech Mitgliedern und weiteren Experten erarbeitet und vom acatech Präsidium autorisiert und herausgegeben.

> INHALT

KURZFASSUNG	7
PROJEKT	10
1 EINLEITUNG	12
2 CHANCEN UND RISIKEN VON P&T	16
3 P&T IM KONTEXT DER ENDLAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE IN DEUTSCHLAND	19
4 DIE VIER BASIS-SZENARIEN	21
5 DIE KONSEQUENZEN DER VIER SZENARIEN IM VERGLEICH	22
6 EMPFEHLUNGEN	25
LITERATUR	30

KURZFASSUNG

Im Juni 2011 verkündete die deutsche Bundesregierung die Energiewende und läutete damit das Ende der Kernenergienutzung zur Stromproduktion ein. Bis zum Jahr 2022 soll kein deutsches Kernkraftwerk mehr Strom produzieren. Allerdings ist noch nicht abschließend beantwortet, wo und wie die radioaktiven Abfälle endgelagert werden sollen. Insbesondere ein Endlager für hoch radioaktive, wärmeentwickelnde Abfälle existiert derzeit nicht. Diese machen zwar nur einen geringen Volumenanteil, aber 99 Prozent der gesamten Radioaktivität aller Abfälle aus kerntechnischen Anlagen aus. Am 26. Juli 2013 trat dann das Standortauswahlgesetz in Kraft: Ein Endlagerstandort für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle soll nun ergebnisoffen gesucht und ausgewählt werden können.

Für die Auswahl eines solchen Standortes ist insbesondere relevant, welche Art von Abfällen und welche Menge davon endgelagert werden soll. Die Technik der Partitionierung und Transmutation (P&T), durch die ein Teil der hoch radioaktiven, langlebigen Stoffe aus den abgebrannten Brennstäben in kurzlebige Spaltprodukte umgewandelt wird, wird gerade erforscht und entwickelt; sie könnte eine Möglichkeit sein, das Langzeit-Gefährdungspotenzial wärmeentwickelnder Abfälle zu verringern.

Bei der Partitionierung sollen die abgebrannten Brennstoffe aus Kernkraftwerken in Uran, das im Reaktor nicht gespalten wurde, Plutonium und die minoren Aktiniden (Neptunium, Americium und Curium) getrennt werden. Übrig bleiben die Spalt- und Aktivierungsprodukte, die in Glas eingeschmolzen werden und als wärmeentwickelnde Abfälle in einem entsprechenden Endlager zu entsorgen sind. Während der Partitionierung fallen außerdem Dekontaminations- und Spülwässer als Sekundärabfälle an. Das abgetrennte Uran kann in Ländern, die weiterhin Kernenergie nutzen, wieder in Reaktoren eingesetzt werden oder muss als vernachlässigbar wärmeentwickelnder Abfall in Deutschland endgelagert werden. Für die Sekundärabfälle (Dekontaminations- und Spülwässer) müssten nach derzeitiger Genehmigungslage Endlager für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle geschaffen werden.

Das Verfahren der Transmutation durchlaufen nur das Plutonium und die minoren Aktiniden. Sie werden in einer Transmutationsanlage mit schnellen Neutronen beschossen und dadurch zu mindestens 90 Prozent in kurzlebige oder stabile Atomkerne umgewandelt. Anschließend müssen die neu entstandenen Isotope als wärmeentwickelnde Abfälle mit geringerer Langzeit-Radioaktivität endgelagert werden. Bei einer Transmutationsanlage handelt es sich um eine (noch zu entwickelnde) kerntechnische Anlage, deren Sicherheitsanforderungen denjenigen für Reaktoren der vierten Generation entsprechen müssen. Die Anlage ist dadurch sicherer als die Kernreaktoren, die derzeit zur Stromerzeugung eingesetzt werden.

Die Grundlage für die Projektarbeit bildeten vier gesellschaftliche Entwicklungsszenarien; bei allen war vorausgesetzt, dass Deutschland aus der Kernenergienutzung aussteigt. Zwei Szenarien sehen keine großtechnische Anwendung von P&T in Deutschland vor: Im *Szenario „Abstinenz“* wird P&T in und von Deutschland nicht betrieben. Im *Szenario „Forschungspartizipation“* betreibt Deutschland Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im nationalen, europäischen und internationalen Rahmen, ohne P&T-Anlagen zu bauen. Die beiden anderen Szenarien sehen hingegen eine großtechnische Anwendung von P&T in Europa mit deutscher Beteiligung (*„Europäische Systempartizipation“*) bzw. in Deutschland selbst (*„Anwendung in Deutschland“*) vor. Die jeweiligen Konsequenzen dieser Szenarien wurden anhand eines breiten Methodenmixes erarbeitet und miteinander verglichen, um die spezifischen Chancen und Risiken abschätzen zu können.

CHANCEN VON P&T

- P&T kann zukünftig bei erfolgreicher industrieller Umsetzung das für die Endlagerung vorgesehene Volumen an wärmeentwickelnden Abfällen deutlich reduzieren, und zwar auf ein Drittel (nämlich von 28.000 auf 9.500 Kubikmeter). Dazu trägt insbesondere die Herauslösung des

Urans im ersten Schritt der Partitionierung bei. Gleichzeitig würde sich das Volumen der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle um etwa ein Drittel erhöhen (von ca. 300.000 auf ca. 400.000 Kubikmeter).

- Die Anwendung von P&T verringert einige Jahrhunderte nach der Einlagerung die Gesamtradioaktivität im Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und damit das Gefährdungspotenzial. Nach 1.000 Jahren befindet sich (wenn man von den bereits verglasten wärmeentwickelnden Abfällen absieht) ungefähr die gleiche Radioaktivität (oder als gewichtete Größe Radiotoxizität) im Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle wie nach 1.000.000 Jahren ohne Anwendung von P&T. Damit kann P&T zwar das Gefährdungspotenzial der eingelagerten Abfälle reduzieren, aber das Risiko einer Freisetzung aus dem Endlager wird nach gegenwärtigem Stand der Sicherheitsanalysen kaum beeinflusst.
- Die Gefahr, dass Plutonium aus dem Endlager entwendet und missbraucht wird, sinkt. Das abgetrennte Plutonium wird in Transmutationsanlagen umgewandelt, und so befinden sich nur noch vernachlässigbar kleine Mengen davon im Endlager. Dies ist besonders dann wichtig, sobald der Selbstschutz durch die hohe örtliche Strahlendosis erloschen ist.
- Nach Partitionierung können die mobilen Spalt- und Aktivierungsprodukte, die aus dem abgebrannten Brennstoff abgetrennt wurden und endgelagert werden müssen, besser konditioniert werden (also zum Beispiel in eine Matrix eingebunden werden, um die Reststoffe zu immobilisieren). Dies verringert das Risiko einer frühzeitigen Freisetzung aus dem abgebrannten Brennstoff und reduziert damit auch das Langzeitrisko einer Kontamination der Biosphäre.
- P&T reduziert durch die Abtrennung des Americiums nach 70 bis 100 Jahren die Wärmeentwicklung im Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle. Werden die Abfälle nach diesem Zeitraum endgelagert, verkürzen sich die Mindestabstände der Einlagerungsstrecken und Abfallbehälter, die wegen einer maximalen Auslegungstemperatur

einzuhalten sind. Eine vergleichbare Wärmereduktion durch natürlichen Zerfall ergäbe sich freilich auch nach einer entsprechend langen Zwischenlagerung ohne P&T.

RISIKEN VON P&T

- Die zu errichtenden P&T-Anlagen können Mensch und Umwelt gefährden. Das Risiko ist vergleichbar mit dem Betrieb von Anlagen zur Wiederaufarbeitung oder Konditionierung von abgebrannten Brennelementen und Kernreaktoren der vierten Generation.
- Für die Zeit von rund 150 Jahren, in denen P&T angewendet wird, besteht ein erhöhtes Missbrauchsrisiko von radioaktiven Stoffen durch Dritte: Nach der Partitionierung können je nach Prozess sowohl das Plutonium als auch die minoren Aktiniden in reiner oder vermischter Form vorliegen. Während ihres Transports zu den Transmutationsanlagen oder in ein Zwischenlager könnten diese entwendet werden. Diese Gefahr besteht ebenso aufgrund des längeren Offenhaltens des Endlagers.
- Da in Deutschland relativ geringe Abfallmengen partitioniert und transmutiert werden müssten, sind die Stückkosten pro Tonne Abfall hoch. Der Bau und Betrieb von P&T-Anlagen wird sich zumindest in Deutschland ökonomisch nicht lohnen – verglichen mit einer Endlagerung ohne P&T.
- Alle Anlagen, die mit Kerntechnik in Verbindung stehen, werden vom überwiegenden Teil der deutschen Bevölkerung abgelehnt. Der Neubau und Betrieb von P&T-Anlagen würde wahrscheinlich zu Widerstand in der Bevölkerung führen.
- Da Kernenergie in der Vergangenheit regelmäßig im Brennpunkt des Medieninteresses stand, könnten die Medien über Planung, Bau und Betrieb von P&T-Anlagen überwiegend negativ berichten.

Manche Chancen von P&T werden in Deutschland nicht oder nur teilweise zum Tragen kommen können, da der Ausstieg aus der Kernenergienutzung beschlossen ist. Um

das Für und Wider umfassend abwägen zu können, ist zum Beispiel zu klären, welche Bedeutung die Größe des Endlagers bei den möglichen Standorten überhaupt hat. Außerdem werden in Deutschland durch P&T ein Drittel mehr Sekundärabfälle in Form vernachlässigbar wärmeentwickelnder Abfälle anfallen, für die entsprechende Lager bzw. weitere Endlagervolumina geschaffen werden müssen. Einerseits ist aus ökonomischer, ökotoxikologischer und gesellschaftlicher Sicht nicht anzuraten, dass Deutschland im Alleingang P&T-Anlagen baut und betreibt. Andererseits erscheint es aus jetziger Sicht voreilig, die Forschungsarbeiten abubrechen und aus allen P&T-Optionen auszusteigen, da diese Chancen beinhalten. Sowohl die Grundlagenforschung als auch die technische Entwicklungsforschung sollten im Rahmen eines europäischen Forschungsverbundes fortgesetzt werden. Dadurch bleiben alle Handlungsoptionen offen, während die noch offenen Fragen im Zusammenhang mit dieser Technologie beantwortet werden. Kompetenz und Arbeitsplätze in der Nuklearforschung sowie Mitsprachemöglichkeiten in internationalen Gremien bleiben erhalten.

acatech EMPFEHLUNGEN IN KÜRZE:

- P&T-Forschung sollte im europäischen Kontext stattfinden.
- Eine zukünftige Beteiligung Deutschlands an P&T in Europa sollte geprüft werden.
- Die Forschungsbeteiligung sollte keine Pfadabhängigkeit in Richtung Anwendung von P&T bedeuten.
- Eine interdisziplinäre, umfassende Studie ist zu erarbeiten, die als Grundlage für die Entscheidung verwendet werden kann, ob sich Deutschland an P&T in Europa beteiligen soll. Diese Entscheidung steht voraussichtlich in 10 bis 15 Jahren an. Die Planung der Prozesse, wann und wie Verbände und Öffentlichkeit daran beteiligt werden, sollte rechtzeitig vorgenommen werden.
- Deutschland soll eine europäische Perspektive verfolgen und nationale Forschungsansätze im Auge behalten, indem es die gesetzlich festgelegten Ziele des Kernenergieausstiegs einbezieht.
- Die deutsche Industrie sollte die mögliche Umsetzung von P&T in Europa als Chance begreifen und gegebenenfalls nutzen.
- Die Forschung soll sich auf folgende zentrale Bereiche konzentrieren:
 - die effiziente Abtrennung (Partitionierung)
 - die effiziente Transmutation der abgetrennten Transurane
 - die sicherheitstechnische Bewertung der Anlagen
 - die Bewertung der gesellschaftlichen Implikationen aller Handlungsoptionen.
- Die Forschung muss sich interdisziplinär aufstellen, um Erkenntnisse aus dem wissenschaftlich-technischen Bereich bewerten und kommunizieren zu können.
- Eine Forschungsallianz sollte eingerichtet werden.

PROJEKT

Diese Position entstand auf Grundlage der acatech STUDIE *Partitionierung und Transmutation: Forschung – Entwicklung – Gesellschaftliche Implikationen* (Renn 2014).

> PROJEKTLEITUNG

Prof. Dr. Dr. h.c. Ortwin Renn, Universität Stuttgart/acatech

> PROJEKTGRUPPE

- Prof. Dr. Heinz Bonfadelli, Universität Zürich
- Prof. Dr. Armin Grunwald, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)/acatech
- Prof. Dr. Helmut Jungermann, TU Berlin
- Dr. Roman Lahodinsky, Universität für Bodenkultur Wien
- Prof. Dr. Alex C. Mueller, CNRS, Paris
- Dr. André Reichel, Zeppelin University Friedrichshafen

Die POSITION mit den Empfehlungen wurde verfasst von einer Redaktionsgruppe, bestehend aus der Projektgruppe sowie Dr. Concetta Fazio/KIT, Prof. Dr. Joachim Knebel/KIT und Dr. Bruno Merk/HZDR.

> REVIEWER

- Prof. Dr. Alfred Pühler, Universität Bielefeld/acatech Präsidium (Ltg.)
- Prof. Dr. Peter Weingart, Universität Bielefeld/acatech
- Dr. Alexander Stanculescu, Idaho National Laboratory/USA
- Prof. Dr.-Ing. Jörg Starflinger, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme, Stuttgart
- Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhl, Institut für Endlagerforschung der TU Clausthal

acatech dankt allen externen Fachgutachtern. Die Inhalte der vorliegenden Position liegen in der alleinigen Verantwortung von acatech.

Diese acatech POSITION wurde im November 2013 durch das acatech Präsidium syndiziert.

> AUFTRÄGE UND WEITERE BETEILIGTE

- Prof. Dr. Tobias Kronenberg, Kronenberg Institut für Wirtschaftsforschung (KIWi), Aachen
- Dr. Norbert Peinsipp, MinR a. D., Meckenheim
- Wolfgang Neumann, intac – Beratung, Konzepte, Gutachten zu Technik und Umwelt GmbH, Hannover

Beate Kallenbach-Herbert, Öko-Institut e.V., hat als externe Expertin an Sitzungen der Projektgruppe teilgenommen und im Experten-Delphi mitgewirkt.

> WISSENSCHAFTLICHE MITARBEITER

- Dr. Michael Ruddat, Universität Stuttgart
- Diana Gallego Carrera, Universität Stuttgart

> PROJEKTKOORDINATION

- Dr. Marc Denis Weitze, acatech Geschäftsstelle

> PROJEKTVERLAUF

Projektlaufzeit: 09/2012 – 06/2014

Das interdisziplinäre Forschungsprojekt gliederte sich in zwei Teilprojekte: In Modul A (Förderung durch das BMWi, Federführung durch das KIT) waren als Projektpartner DBE TECHNOLOGY GmbH, die Gesellschaft für Anlagen- und

Reaktorsicherheit mbH (GRS), das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen und das Forschungszentrum Jülich (FZJ) beteiligt. Modul B (Förderung durch das BMBF, Federführung durch acatech) wurde vom Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung der Universität Stuttgart (ZIRIUS) bearbeitet. Die Gesamtkoordination von Modul A und Modul B erfolgte durch die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech).

Auf Grundlage einer Analyse der wissenschaftlich-technischen Aspekte (Modul A) wurden die gesellschaftlichen Implikationen bewertet sowie Kommunikations- und Handlungsempfehlungen für die zukünftige Positionierung im Bereich P&T formuliert (Modul B).

> FINANZIERUNG

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen GESI2012A und GESI2012B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei acatech.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

acatech dankt außerdem dem acatech Förderverein für seine Unterstützung.

1 EINLEITUNG

Als die deutsche Bundesregierung im Juni 2011 die Energiewende verkündete, läutete sie damit gleichzeitig das Ende der Kernenergienutzung zur Stromproduktion ein. Bis zum Jahr 2022 soll kein deutsches Kernkraftwerk mehr Strom produzieren.¹ Allerdings ist die Frage nach der Endlagerung radioaktiver Abfälle noch nicht abschließend beantwortet. In Deutschland gibt es derzeit kein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente. Am 26. Juli 2013 trat das Standortauswahlgesetz in Kraft: Von nun an soll in einem wissenschaftsbasierten und transparenten Verfahren ein Endlagerstandort für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle ergebnisoffen gesucht und ausgewählt werden.² Drängend ist die Endlagerfrage auch auf europäischer und internationaler Ebene, zumal viele Staaten wie Frankreich, Spanien, Tschechien, USA oder China weiterhin auf die Stromproduktion aus Kernenergie setzen und damit auch künftig radioaktive Abfälle produzieren werden. Schweden, Finnland und Frankreich befinden sich im bzw. kurz vor dem Genehmigungsverfahren für den Bau von Endlagern für abgebrannte Brennelemente; erste Endlager sollen in rund 10 Jahren ihren Betrieb aufnehmen.

Für die Auswahl eines solchen Endlagerstandortes sind insbesondere die Art der Abfälle (wärmeentwickelnd oder vernachlässigbar wärmeentwickelnd) und deren Menge von Bedeutung (Kasten Seite 13). Europaweit gibt es bereits mehrere Endlager für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle.³ Auch in Deutschland existiert mit dem Endlager Morsleben (dieses befindet sich im Planfeststellungsprozess für die Stilllegung) eine solche Endlagerstätte, und mit dem Endlager Konrad (Salzgitter) wird in einigen Jahren eine zweite entstehen.⁴ Bislang ist aber weltweit noch kein Endlager für

wärmeentwickelnde Abfälle in Betrieb. Eine Lösung hierfür ist jedoch besonders wichtig, da wärmeentwickelnde Abfälle zwar nur einen geringen Volumenanteil, aber 99 Prozent der gesamten Radioaktivität aller Abfälle aus dem Betrieb von kerntechnischen Anlagen ausmachen.⁵ Bislang drohte die Suche und Wahl eines Endlagerstandorts für wärmeentwickelnde Abfälle weniger an wissenschaftlich-technischen Aspekten der Endlagerung zu scheitern, sondern eher an gesellschaftlichen Widerständen.⁶

Hinsichtlich der Langzeitsicherheit eines Endlagers ist neben Art und Menge der Abfälle auch die Dauer entscheidend, über die die Abfälle sicher aufbewahrt werden müssen. Eine Möglichkeit, das Langzeit-Gefährdungspotenzial wärmeentwickelnder Abfälle zu verringern, könnte Partitionierung und Transmutation (P&T) sein, eine Technik, die sich derzeit in Forschung und Entwicklung befindet.

Mit P&T werden die Aktiniden (Uran und Transurane) aus radioaktiven Abfällen abgetrennt (Partitionierung) und die Transurane mit langer Halbwertszeit in Nuklide mit kürzeren Halbwertszeiten umgewandelt (Transmutation), vgl. Abb. 2 (Seite 14). Dadurch nimmt die gesamte Radioaktivität und Radiotoxizität⁷ schneller ab.⁸ Bei der Partitionierung werden – ähnlich wie bei der Wiederaufarbeitung – Uran, Plutonium und die minoren Aktiniden (Neptunium, Americium und Curium) abgetrennt. Übrig bleiben die Spaltprodukte und die aktivierten Strukturmaterialien, die ins Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle verbracht werden müssen. Für einige langlebige Spalt- und Aktivierungsprodukte, die lange Zeit sicher aufbewahrt werden müssen, könnten dabei neuartige Abfallmatrizen (zum Beispiel Keramiken) entwickelt werden, um die Mobilisierung dieser

¹ Vgl. BMU 2011.

² Vgl. BMU 2013.

³ Zum Beispiel die Lager Loviisa und Olkiluoto in Finnland oder SFR Forsmark in Schweden.

⁴ Vgl. BFS 2012.

⁵ Vgl. BFS 2012.

⁶ Vgl. Hocke/Grunwald 2006.

⁷ Die Radiotoxizität bemisst sich anhand der Strahlenart, der Strahlenmenge sowie der Aufnahme und Verweildauer der entsprechenden Elemente im menschlichen Organismus.

⁸ Vgl. Knebel et al. 2013; Lübbert/Ahlswede 2008.

Bei der Energiegewinnung aus Kernkraft werden Uran und Plutonium gespalten. Die abgebrannten Brennelemente aus Kernkraftwerken sind hoch radioaktiv und müssen sicher und umweltverträglich entsorgt werden. Sie enthalten neben dem Uran, das im Reaktor nicht gespalten wurde, und seinen Spaltprodukten auch Transurane (Plutonium und die minoren Aktiniden Neptunium, Americium und Curium), die im Betrieb gebildet wurden, sowie Aktivierungsprodukte aus den verwendeten Werkstoffen der Brennelemente. Von den Transuranen geht nach einigen hundert Jahren ein Hauptgefährdungspotenzial aus. Ihre Radioaktivität sinkt erst nach mehreren hunderttausend Jahren auf das Niveau von Uran in natürlicher Zusammensetzung ab. Diese Radionuklide machen zwar nur etwas mehr als ein Prozent der Masse des wärmeentwickelnden

radioaktiven Abfalls aus (Abb. 1), sind aber langlebig und hoch radioaktiv (und damit wärmeentwickelnd). Sie müssen also sicher verwahrt werden. Entweder werden die abgebrannten Brennelemente vollständig als radioaktiver Abfall endgelagert oder sie werden aufgearbeitet. In Wiederaufarbeitungsanlagen werden das verbleibende Uran und das neu entstandene Plutonium aus den Brennstäben abgetrennt und in Kernreaktoren wiederverwendet. Bis 2005 transportierte auch Deutschland seine abgebrannten Brennelemente zur Wiederaufarbeitung ins französische La Hague und ins britische Sellafield. Nun ist der Transport der abgebrannten Brennstoffe gesetzlich verboten. Allerdings lagern noch immer Abfälle in den Anlagen im Ausland, die in Form sogenannter verglaster Abfälle nach Deutschland rückgeführt werden müssen.

Abbildung 1: Prozentualer Massenanteil des abgebrannten Brennstoffs aus Kernreaktoren

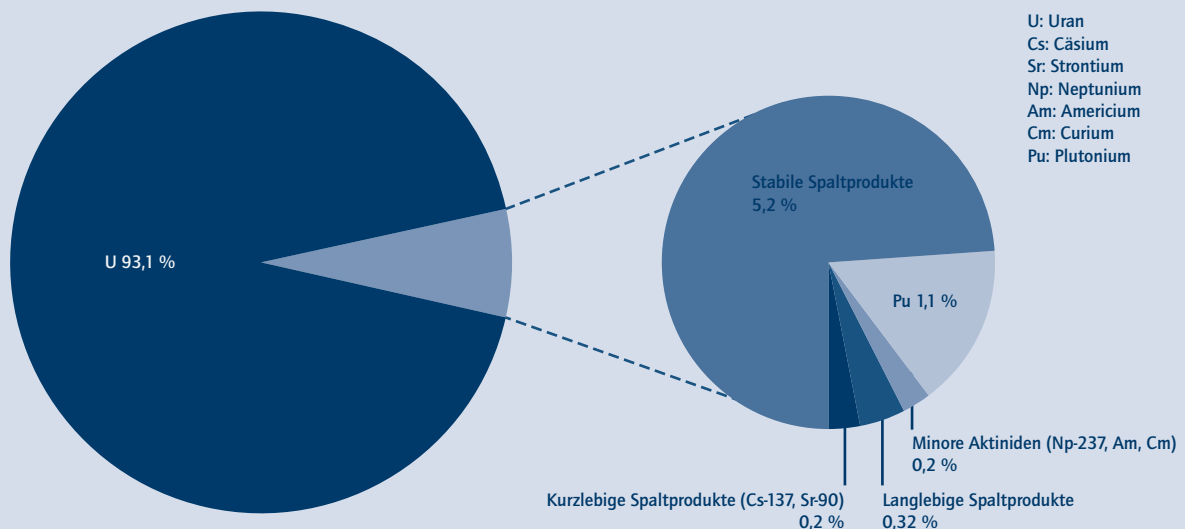
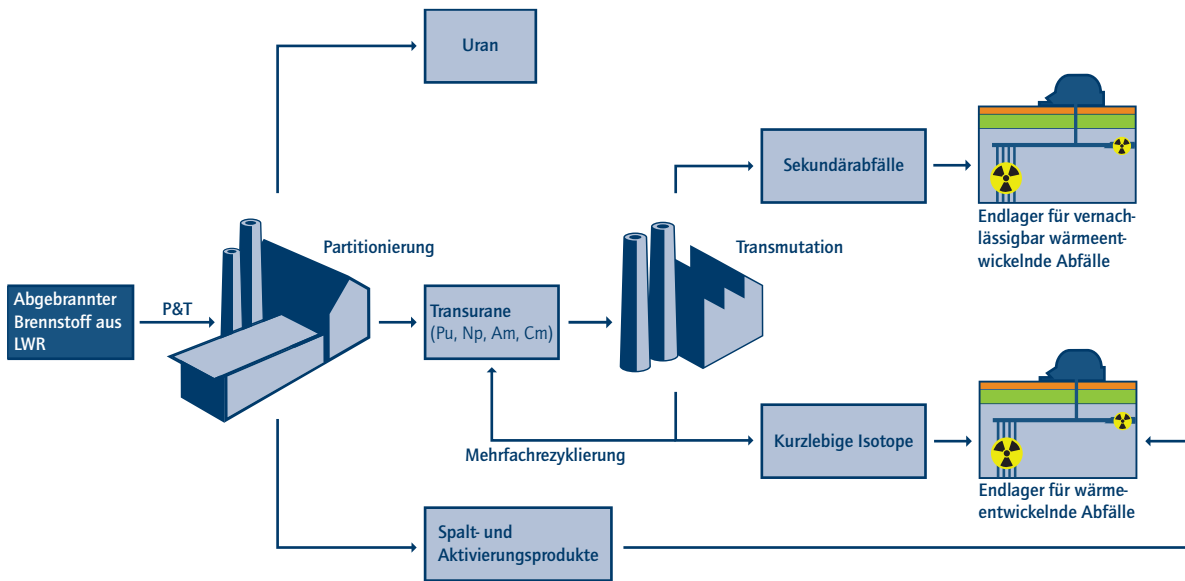


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Partitionierung und Transmutation.



Radionuklide im Endlager zu verlangsamen, falls eine Fixierung in Glas nicht ausreicht. Ohne Partitionierung liegen diese Radionuklide in den abgebrannten Brennelementen in teilweise leicht mobiler Form vor. Das abgetrennte Uran kann wieder in Reaktoren zur Kernenergienutzung eingesetzt werden oder muss als vernachlässigbar wärmeentwickelnder Abfall endgelagert werden. Für die durch P&T weiterhin entstehenden Sekundärabfälle (zum Beispiel Dekontaminations- und Spülwässer) müssen zusätzlich Endlager für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle geschaffen werden. Das Verfahren der Transmutation durchlaufen nur das Plutonium und die minoren Aktiniden. Sie werden in einer Transmutationsanlage mit schnellen Neutronen beschossen und dadurch zu mindestens 90 Prozent in kurzlebige oder stabile Atomkerne umgewandelt. Bei einer Transmutationsanlage handelt es sich um eine (noch zu entwickelnde) kerntechnische Anlage,

deren Sicherheitsanforderungen durch diejenigen für Reaktoren der vierten Generation vorgegeben sind und die dadurch sicherer ist als die Kernreaktoren, die derzeit zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Nach P&T müssen die neu entstandenen Isotope (Spaltprodukte) als wärmeentwickelnde Abfälle endgelagert werden. Nach tausend Jahren befindet sich ohne Einbeziehung der bereits verglasten Abfälle etwa die gleiche Radioaktivität (oder als gewichtete Größe Radiotoxizität) im Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle wie nach einer Million Jahren ohne Anwendung von P&T.

P&T-Verfahren werden seit den 1970er Jahren sowohl in Europa als auch im außereuropäischen Ausland erforscht.⁹ Bislang waren diese Forschungsaktivitäten in erster Linie naturwissenschaftlich-technische Arbeiten mit dem Ziel, die Machbarkeit und Eignung der P&T-Technologie zu prüfen und

⁹ Vgl. RED-IMPACT 2008; OECD 2011; Feder 2009; Knebel/Salvatores 2011.

zu demonstrieren. Es wurde untersucht, ob bzw. inwieweit P&T in großtechnischem Maßstab das Gefährdungspotenzial von radioaktiven Abfällen verringern kann.¹⁰

Dieses Positionspapier basiert darauf, dass Deutschland aus der Kernenergienutzung aussteigen wird. Weltweit wird die Nutzung der Kernenergie aber voraussichtlich ansteigen, und damit auch die radioaktiven Abfälle. Bei einer globalen Betrachtung zu P&T wäre also auch der steigende Bedarf an Endlagern zu berücksichtigen und die Rezyklierung im Sinne einer nachhaltigen Energieerzeugung.

Angesichts der Chancen und Risiken von P&T steht die deutsche Bundesregierung vor der Entscheidung, ob bzw. inwieweit solche Verfahren ein Baustein der nationalen nuklearen Entsorgungsstrategie sein könnten. In diesem Abwägungsprozess müssen technische bzw. sicherheitstechnische, ökologische, ökonomische und soziale Chancen und Risiken berücksichtigt werden. Mögliche Chancen können zum Beispiel sein, dass die gesamte Radioaktivität schneller abnimmt und sich das Endlagervolumen für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle reduziert. Aber auch der Kompetenzerhalt im Bereich der Kernenergie kann ein positiver Effekt sein.¹¹ Potenzielle Risiken sind beispielsweise das neu hinzukommende Ökotoxizitätspotenzial durch

die P&T-Anlagen für Mensch und Umwelt sowie Zeit und Kosten des Anlagenbaus, -betriebs und -rückbaus.¹² Ebenso in Betracht zu ziehen ist die Tatsache, dass sich P&T nur begrenzt auf die Endlagergröße auswirkt. Auch die Frage, wie die Standortbevölkerung dem Bau von P&T-Anlagen gegenüber eingestellt ist, ist zu klären.

Aus diesem Grund haben das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ein interdisziplinäres Forschungsprojekt in Auftrag gegeben, um die technischen und gesellschaftlichen Chancen und Risiken von P&T anhand von Szenarien zu untersuchen. Das übergeordnete Ziel war es, eine sachgerechte und ausgewogene Grundlage zu erarbeiten, anhand derer entschieden werden kann, wie sich Deutschland in Fragen der P&T-Forschung zukünftig positionieren möchte.

Die Ergebnisse wurden in der acatech STUDIE „Partitionierung und Transmutation: Forschung – Entwicklung – Gesellschaftliche Implikationen“¹³ zusammengefasst. In der vorliegenden acatech POSITION werden aufbauend auf den Ergebnissen der acatech STUDIE Empfehlungen zum künftigen Umgang mit P&T an Akteure aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft gegeben.

¹⁰ Vgl. Kettler/Heuters et al. 2011.

¹¹ acatech 2011.

¹² Vgl. Lübbert/Ahlswede 2008.

¹³ Renn 2013.

2 CHANCEN UND RISIKEN VON P&T

Die Anwendung von P&T ist mit Chancen und Risiken verbunden. Zunächst zu den Chancen: Um diese zu identifizieren und zu charakterisieren, sind einige Annahmen vorwegzuschicken. Die Autoren gehen davon aus, dass P&T auf alle abgebrannten Leichtwasserreaktor (LWR)-Brennelemente angewendet wird, die ansonsten direkt endzulagern wären; nicht durch P&T beeinflussbar sind insbesondere die bereits verglasten Abfälle aus der Wiederaufarbeitung. Weiter wird angenommen, dass nur die bei der Anwendung von P&T entstehenden wärmeentwickelnden Abfälle, also die durch Transmutation entstandenen neuen Isotope, in das dafür zu errichtende Endlager eingebracht werden, während die wiederverwertbaren Brennstoffe, also das abgetrennte Uran, auch weiter in Reaktoren eingesetzt werden könnten, zum Beispiel in Ländern, die weiterhin Kernenergie zur Stromversorgung nutzen:

- Würde man der Endlagerung ein P&T-Verfahren vorschalten, könnte man das Volumen der endzulagernden wärmeentwickelnden Abfälle deutlich reduzieren, und zwar auf ein Drittel. Das ist insbesondere der Abtrennung des Urans im ersten Schritt der Partitionierung zu verdanken. Es ist dann eine politische Entscheidung, wie mit dem herausgelösten Uran weiter umgegangen wird. Man kann es als Energieressource in Reaktoren weiter zur Energieerzeugung einsetzen oder auch direkt in ein Endlager überführen. Das benötigte Hohlraumvolumen, das in dem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle aufzufahren ist, verringert sich, und damit einhergehend auch die benötigte Endlagerfläche.
- In jedem Falle wird also in Deutschland ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle benötigt, und zwar für:
 1. die bereits verglasten wärmeentwickelnden Abfälle,
 2. die nicht mit P&T behandelbaren abgebrannten Brennelemente aus Prototyp- und Versuchskernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren,
 3. die nach P&T verbleibenden wärmeentwickelnden Abfälle (verglaste Spalt- und Aktivierungsprodukte sowie wärmeentwickelnde Sekundärabfälle).
- Zusätzlich wird nach jetziger Genehmigungslage ein zweites Endlager für die durch P&T entstehenden vernachlässigbar wärmeentwickelnden Sekundärabfälle (Dekontaminations- und Spülwässer) sowie für das abgetrennte Uran erforderlich, sofern es nicht im Ausland wiederverwendet wird.
- Die Anwendung von P&T verringert einige Jahrhunderte nach der Einlagerung die Gesamtaktivität im Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und damit das Gefährdungspotenzial. Nach tausend Jahren befindet sich ungefähr – wenn man von den bereits verglasten wärmeentwickelnden Abfällen absieht – die gleiche Radioaktivität (oder als gewichtete Größe Radiotoxizität) im Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle wie erst nach einer Million Jahren ohne Anwendung von P&T. Damit kann P&T zwar das Gefährdungspotenzial der eingelagerten Abfälle reduzieren, das Risiko einer Freisetzung aus dem Endlager wird nach gegenwärtigem Stand der Sicherheitsanalysen aber kaum beeinflusst.
- Durch die Anwendung von P&T reduziert sich die Gefahr, dass Plutonium aus dem Endlager entwendet und missbraucht wird. Dies ist insbesondere nach dem Erlöschen des Selbstschutzes wichtig, denn die das Plutonium umgebenden Spaltprodukte besitzen ca. dreihundert Jahre lang hohe Radioaktivität, bis ein Großteil in stabile Isotope zerfallen ist. Sofern das herausgelöste Plutonium in Transmutationsanlagen umgewandelt oder als Mischoxidbrennstoff erneut zur Energieerzeugung eingesetzt wird, befinden sich nur noch vernachlässigbar kleine Mengen an Plutonium im Endlager.
- Nach der Partitionierung können die aus dem abgebrannten Brennstoff abgetrennten und endzulagernden mobilen Spalt- und Aktivierungsprodukte besser konditioniert werden, also zum Beispiel besser in eine stabile Matrix eingebunden werden. Dies verringert deren frühzeitige Freisetzung aus dem abgebrannten Brennstoff und reduziert auch das Langzeitrisko einer Kontamination der Biosphäre. Hierfür müssen die wärmeentwickelnden

Abfälle jedoch in einer anderen Abfallmatrix als derjenigen für die abgebrannten Brennelemente eingebunden und somit immobilisiert werden. Welche verschiedenen Abfallmatrizen sich dafür eignen, muss aber ebenfalls noch weiter erforscht und entwickelt werden. Gegenwärtig werden zum Beispiel keramische Materialien als mögliche Matrix untersucht.

- P&T reduziert die Wärmeentwicklung im Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle ab einem Zwischenlagerzeitraum von 70 bis 100 Jahren. Findet die Endlagerung erst nach diesem Zeitraum statt, können die Mindestabstände der Einlagerungsstrecken und Abfallbehälter, die aufgrund einer maximalen Auslegungstemperatur eingehalten werden müssen, aller Voraussicht nach reduziert werden, wenn man die gebirgsmechanischen Auslegungsanforderungen beachtet. Eine vergleichbare Wärmereduktion durch natürlichen Zerfall ergäbe sich freilich auch nach einer entsprechend langen Zwischenlagerung ohne P&T.

Manche dieser Chancen werden in Deutschland nicht oder nur teilweise zum Tragen kommen können, da Deutschland aus der Kernenergienutzung aussteigen wird. Zweifellos kann die Endlagerfläche kleiner ausfallen, da durch die Abtrennung des Urans und der Transurane im Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle weniger Wärme freigesetzt und das Volumen der Abfälle reduziert wird. Im gesamten Abwägungsprozess ist aber zu klären, welche Bedeutung die Größe des Endlagers bei den möglichen Standorten überhaupt hat. Hier spielt die Masse der endzulagernden abgebrannten Brennelemente eine Rolle; diese ist aufgrund des Ausstiegs aus der Kernenergienutzung in Deutschland begrenzt. Außerdem muss man beachten, dass durch P&T radioaktiver Abfall anfallen wird, für den entsprechende Lagerkapazität bzw. weitere Endlagervolumina für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle geschaffen werden müssen.

Neben den oben genannten technischen Vorteilen liegen mögliche Chancen

- in der Festigung der international anerkannten Rolle Deutschlands als Treiber innovativer und zukünftiger Technologien,
- in der aktiven Mitwirkung Deutschlands in wichtigen internationalen Gremien, etwa hinsichtlich der Mitbestimmung von Sicherheitsstandards,
- in der Fähigkeit zu einer unabhängigen Sicherheitsbewertung auch ausländischer Anlagen und
- im Erhalt der anerkannt hohen inländischen Kompetenz auf dem Gebiet der Kerntechnik.

Abgesehen von diesen Chancen haben insbesondere die empirischen Erkenntnisse aus Expertenbefragungen im Rahmen der vorliegenden Studie folgende Risiken aufgezeigt:

- Gefährdungspotenzial für Mensch und Umwelt: Das radiologische sowie nicht-radiologische Ökotoxizitätspotenzial von P&T-Anlagen kann zwar nicht quantitativ exakt abgeschätzt werden, ist aber vergleichbar mit dem, das beim Betrieb von Anlagen zur Wiederaufarbeitung oder Konditionierung von abgebrannten Brennelementen und Kernreaktoren der vierten Generation entsteht, und somit niedriger als bei derzeitigen Leistungsreaktoren. Neben den Risiken durch die Anlagen selbst sind hierbei auch die durch P&T entstehenden erhöhten Mengen an Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung zu beachten sowie zusätzliche Transporte, die bei einem Endlagerkonzept ohne P&T nicht notwendig wären.
- Risiko des Missbrauchs radioaktiver Stoffe: Während der rund 150 Jahre, in denen P&T angewendet wird, besteht ein erhöhtes Missbrauchsrisiko durch Dritte: Nach der Partitionierung können je nach Prozess sowohl das Plutonium als auch die minoren Aktiniden in reiner Form vorliegen. Nun muss einerseits das radioaktive Material von Anlage zu Anlage (Zwischenlager, Anlagen zur Partitionierung und Transmutation) transportiert werden, andererseits müssen die Anlagen selbst in ausreichendem Maße gegenüber Zugriffen Dritter gesichert sein. Außerdem muss das Endlager bei

Anwendung von P&T länger offengehalten werden, als es nach einem Ausstieg aus der Kernenergienutzung erforderlich wäre. Dies führt ebenfalls zu einem erhöhten Missbrauchsrisiko von radioaktiven Stoffen.

- Kosten des Anlagenbaus, -betriebs und -rückbaus: Bei relativ geringen Abfallmengen (wie zum Beispiel in Deutschland) sind die Stückkosten pro Tonne Abfall hoch. Der Bau und Betrieb von P&T-Anlagen wird sich deshalb zumindest in Deutschland ökonomisch nicht lohnen, verglichen mit einer direkten Endlagerung ohne P&T. Allerdings sollten nicht allein ökonomische Gesichtspunkte eine Rolle spielen, wenn es um Belange zukünftiger Generationen geht.
- Akzeptanz der Bevölkerung: Alle Anlagen, die mit Kerntechnik in Verbindung stehen, werden vom überwiegenden Teil der deutschen Bevölkerung abgelehnt.

Der Neubau und Betrieb von P&T-Anlagen würde ebenfalls negativ bewertet und hätte wahrscheinlich Widerstände zur Folge.

- Negative Berichterstattung in den Medien: Das Thema P&T könnte für die Medien interessant werden, weil mit ihm Risiken für Umwelt und Gesundheit assoziiert würden und mögliche hohe Kosten sowie die potenziell kritische Haltung der Bevölkerung bzw. Standortgemeinden gegenüber P&T im Raum stehen. Dies gilt umso mehr, als die Kernenergie in der Vergangenheit regelmäßig im Brennpunkt des Medieninteresses stand. Deshalb könnte über Planung, Bau und Betrieb der Anlagen in den klassischen und modernen Massenmedien (Print, Fernsehen, Rundfunk, Internet) überwiegend negativ berichtet werden.

3 P&T IM KONTEXT DER ENDLAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE IN DEUTSCHLAND

Im Jahr 2022, nachdem alle deutschen Kernkraftwerke die Stromproduktion eingestellt haben werden, wird die Gesamtmenge an abgebranntem Brennstoff in Deutschland, der als nuklearer Abfall eingestuft ist, circa 10.500 Tonnen Schwermetall (t_{SM}) betragen. Zusätzlich wurden bis zum Jahr 2005 circa 6.700 t_{SM} an abgebranntem Kernbrennstoff in den Wiederaufarbeitungsanlagen in La Hague (Frankreich) und Sellafield (Großbritannien) behandelt und die dabei anfallenden wärmeentwickelnden Abfälle dort verglast.

Eine mögliche Partitionierung und Transmutation wurde in dieser Studie nur für den verbliebenen abgebrannten Brennstoff in Deutschland betrachtet. Die bereits verglasten Abfälle aus der Wiederaufarbeitung könnten theoretisch auch in P&T-Anlagen behandelt werden, dies ist aber aus ökonomischen wie ökologischen Gründen wenig sinnvoll, insbesondere da aus diesen Abfällen Uran und Plutonium bereits abgeschieden sind. In jedem Falle wird also in Deutschland ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle für

- (1) die bereits verglasten wärmeentwickelnden Abfälle,
- (2) die nicht mit P&T behandelbaren abgebrannten Brennelemente aus Prototyp- und Versuchskernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren,
- (3) die nach P&T verbleibenden wärmeentwickelnden Abfälle (verglaste Spalt- und Aktivierungsprodukte sowie wärmeentwickelnde Sekundärabfälle) sowie
- (4) nach jetziger Genehmigungslage ein zweites Endlager für die durch P&T entstehenden vernachlässigbar wärmeentwickelnden Sekundärabfälle benötigt.

In der Summe befände sich unter Berücksichtigung technisch möglicher Abtrennfaktoren nach tausend Jahren ungefähr die gleiche Gesamtradioaktivität im Endlager für hoch radioaktive, wärmeentwickelnde Abfälle wie sie ohne Anwendung von P&T erst nach einer Million Jahren erreicht würde. Berücksichtigt man zusätzlich alle bereits existierenden Abfälle (verglaster Abfall aus der Wiederaufarbeitung in Frankreich und Großbritannien sowie die abgebrannten

Brennelemente aus Prototyp- und Versuchskernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren), beträgt dieser reduzierte Zeitraum rund zehntausend Jahre.

Würde man vor der Endlagerung des wärmeentwickelnden Abfalls ein P&T-Verfahren vorschalten (inklusive der Abtrennung des Urans im Rahmen der Partitionierung), könnte man das Einlagerungsvolumen je nach Endlagerkonzept bis auf maximal ein Drittel reduzieren (nämlich von 28.000 auf 9.500 Kubikmeter), während sich gleichzeitig das Volumen der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle um bis zu 100.000 Kubikmeter erhöhen würde (dies entspricht einer Erhöhung um etwa ein Drittel). Ein Drittel der für die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle vorzusehenden Einlagerungsfelder ist für die bereits existierenden Abfälle aus der Wiederaufarbeitung vorgesehen und bleibt von P&T unberührt. Insgesamt nimmt der Flächenbedarf eines Endlagers mit wärmeentwickelnden Abfällen (ohne Berücksichtigung von Sekundärabfällen) und ohne durch P&T neu entstehende wärmeentwickelnde Abfälle daher um maximal 50 Prozent ab. So verringern sich das Hohlraumvolumen und die Einlagerungsfläche für das Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle, wohingegen die durch P&T entstehenden vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle nach jetziger Genehmigungslage in einem neuen Endlager eingelagert werden müssten. Die Menge an langlebigen, wärmeentwickelnden Sekundärabfällen aus der Wiederaufarbeitung steigt schätzungsweise um einen Faktor von zwei bis drei an, verglichen mit dem Verzicht auf P&T. Derartige Abfälle sind bereits aus der vorhergehenden Wiederaufarbeitung vorhanden und umfassen ca. zehn Prozent des Volumens aller im Ausland wiederaufbereiteten und zurückgeführten Abfälle. Sie bestehen vorwiegend aus den mittelfradioaktiven Dekontaminations- und Spülwässern.

Bei der Transmutation sind grundsätzlich verschiedene Reaktorkonfigurationen vorstellbar, wobei die Vor- und Nachteile stark von den vorgegebenen spezifischen Zielen abhängen.

In Deutschland sind solche Konfigurationen besonders interessant, bei denen nicht noch mehr spaltbares Material entsteht, da sie mit den Zielsetzungen des Kernenergieausstiegs vereinbar sind. Diese wären in einer Transmutationsanlage vom Typ ADS (Accelerator Driven System) oder in kritischen Reaktoren mit flüssigem Brennstoff möglich. Trotz umfangreicher Forschung und Entwicklung (F&E) für ADS in der Vergangenheit sind für die weitere Eignungsprüfung von P&T experimentelle Untersuchungen notwendig. Hierzu

zählen sowohl Bestrahlungsexperimente und Nachbestrahlungsuntersuchungen als auch Experimente, anhand derer man die Transienten und Störfälle beurteilen kann. Im Falle eines Salzschnmelzenreaktors müssten umfangreiche Versuche zur Thermodynamik und zur Stabilität des Brennstoff- und Trägersalzes durchgeführt werden. Ein wichtiger Schritt für beide Systeme sind Weiterentwicklung und Erprobung in größerem Maßstab und die Erfahrung beim realen Anlagenbetrieb eines Prototyps.

4 DIE VIER BASIS-SZENARIEN

Grundlage für die Projektarbeit waren insgesamt vier gesellschaftliche Entwicklungsszenarien (sog. Basis-Szenarien). Unter einem Szenario verstehen wir ein mögliches Zukunftsbild, wie die Gesellschaft als Ganzes oder ein bestimmter Teil davon aussehen kann.¹⁴ Dabei konzentrieren sich die Szenarien auf zentrale Merkmale wie zum Beispiel wirtschaftliche Entwicklung, Bevölkerungswachstum oder Bildungsstand. Im vorliegenden Fall waren die zentralen Merkmale die Chancen und Risiken, welche mit P&T verbunden werden können. Die Szenarien werden im nächsten Abschnitt zusammenfassend beschrieben. Sie bilden den Zeitraum von 2012 (Startjahr) bis 2150 (Zieljahr) ab und setzen voraus, dass Deutschland aus der Kernenergienutzung aussteigt.

Zwei Szenarien sehen keine großtechnische Anwendung von P&T in Deutschland vor. Im *Basis-Szenario 1 („Abstinenz“)* wird P&T in und von Deutschland nicht betrieben. Dieses Zukunftsbild dient als Bezugspunkt (Referenz-Szenario) für

den Vergleich mit anderen Szenarien. Im *Basis-Szenario 2 („Forschungspartizipation“)* betreibt Deutschland nationale Forschung im Rahmen europäischer Forschungsinitiativen und beteiligt sich an europäischen sowie internationalen Forschungsprogrammen. Im Land selbst werden jedoch keine eigenen P&T-Anlagen gebaut.

Die beiden anderen Szenarien sehen hingegen eine großtechnische Anwendung von P&T in Europa bzw. Deutschland vor. Im *Basis-Szenario 3 („Europäische Systempartizipation“)* betreibt Deutschland ein nationales Forschungsprogramm und beteiligt sich sowohl aktiv an internationalen Forschungsprogrammen als auch an europäischen Initiativen zur Errichtung von P&T-Anlagen. Im Land selbst werden jedoch wie im Szenario „Forschungspartizipation“ keine eigenen P&T-Anlagen gebaut. Im *Basis-Szenario 4 („Anwendung in Deutschland“)* schließlich wird P&T in Deutschland aktiv als ein Teil der Endlagerstrategie betrieben.

¹⁴ Gausemeier et. al 1996.

5 DIE KONSEQUENZEN DER VIER SZENARIEN IM VERGLEICH

Die skizzierten technischen Basis-Szenarien wurden auf der Grundlage eines breiten Methodenmixes um gesellschaftliche Entwicklungspfade erweitert, wobei Literaturrecherchen, Expertenworkshops, Telefoninterviews mit Umweltschutzgruppen und Bürgerinitiativen sowie Gruppendelphiverfahren¹⁵ kombiniert und durch fachspezifische ökologische, ökonomische und juristische Gutachten ergänzt wurden. Allerdings muss einschränkend gesagt werden, dass trotz dieses systematischen, multimethodischen Vorgehens aufgrund des langen Zeithorizonts und wegen der vielfältigen möglichen Entwicklungen große Unsicherheiten verbleiben, wie gesellschaftliche Optionen bewertet werden sollen.

Alle vier Szenarien gehen davon aus, dass der Beschluss der Bundesregierung zum Ausstieg aus der Kernenergienutzung bis zum Jahre 2022 und zur Endlagerung von wärmeentwickelnden, hoch radioaktiven Abfällen an einem Standort auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland weiterhin Bestand hat. Das bedeutet, dass in den Szenarien nicht vorgesehen ist, Uran zur Energieerzeugung in Deutschland zu nutzen. Allerdings wird angenommen, dass andere europäische Staaten weiterhin Kernenergie als Energiequelle nutzen werden. Unter diesen Annahmen lassen sich die vier Szenarien wie folgt skizzieren.

ABSTINENZ

Im Szenario „Abstinenz“ wird das P&T-Verfahren gar nicht auf die bis zum Ausstieg anfallenden abgebrannten Brennstoffe angewandt. Für dieses Szenario können die Mengen

an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen, die in einem Endlager in Deutschland entsorgt werden müssen, in sehr guter Annäherung bereits heute abgeschätzt werden. Dieses Zukunftsbild dient als Bezugspunkt für den Vergleich mit anderen Szenarien (Referenz-Szenario).

Da im Referenz-Szenario kein P&T angewendet wird, wirkt es sich nicht auf gesellschaftlich relevante Gesichtspunkte wie das Ökotoxizitätspotenzial, die Akzeptanz gegenüber P&T-Anlagen sowie juristische Aspekte aus. Allerdings kommen in diesem Szenario ökonomische Faktoren besonders zum Tragen. Falls sich Deutschland nicht an Forschung und Entwicklung von P&T beteiligt, könnten einerseits die nicht anfallenden Forschungsausgaben für P&T im Rahmen der Energiewende in andere energiepolitische Projekte investiert werden, zum Beispiel in den Bereichen erneuerbare Energien oder Netzausbau (Opportunitätskosten¹⁶). Andererseits ist dann jedoch eine Drittmittel-einwerbung für P&T insbesondere durch Förderinstrumente von EURATOM nicht mehr möglich. Außerdem ist davon auszugehen, dass durch Arbeitsplatz- und Kompetenzverlust im nukleartechnischen Bereich und insbesondere in Reaktorsicherheitsfragen ein indirekter ökonomischer Nachteil entsteht. Es ist sehr wahrscheinlich, dass international anerkannte Fachkräfte und Wissenschaftler ins Ausland abwandern. Daraus resultiert eine verminderte Kompetenz in nukleartechnischen Fragen im Inland und damit einhergehend ein etwaiger Verlust an Gestaltungsmöglichkeiten in internationalen Gremien wie der International Atomic Energy Agency (IAEA) oder der Nuclear Energy Agency (NEA). Zudem könnte die Abstinenzstrategie eine künftige Beteiligung an einer europäischen Lösung für P&T-Anlagen unmöglich machen.

¹⁵ Das Gruppendelphiverfahren ist ein Verfahren zur Technikfolgenabschätzung. Hierbei werden in einem iterativen Prozess Urteile von Experten unterschiedlicher Fachrichtungen eingeholt. Der Ablauf des Delphis gestaltet sich hierbei wie folgt: Fachleute geben zunächst in einer schriftlichen Befragung Urteile z. B. zu zukünftigen gesellschaftlichen Entwicklungen ab. Anschließend werden diese Urteile auf einem gemeinsamen Workshop vorgestellt, bevor in Kleingruppen der Fragebogen erneut diskutiert und ausgefüllt wird. In einer Plenumsrunde müssen dann abweichende Bewertungen begründet werden, woran sich wiederum eine Kleingruppendiskussion anschließt usw. Fragen, bei denen Einigkeit besteht, werden aussortiert. Das Ziel eines Gruppendelphis ist es, entweder übereinstimmende Urteile (Konsens) oder Begründungen für abweichende Urteile (Konsens über den Dissens) zu erhalten (Webler et. al 1991; Schulz/Renn 2009).

¹⁶ Unter Opportunitätskosten werden entgangene Gewinne verstanden, die aufgrund der Nicht-Nutzung einer Möglichkeit (Opportunität) entstehen.

FORSCHUNGSPARTIZIPATION

Im Szenario „Forschungspartizipation“ investiert Deutschland, so lange keine endgültige Entscheidung über die Durchführung oder den Verzicht auf das P&T-Verfahren getroffen wurde, in Forschung und Entwicklung sowohl im nationalen als auch im europäischen Rahmen. Diese Arbeiten sollen helfen, die anstehenden Herausforderungen besser zu verstehen sowie Nutzen und Risiken einer möglichen Weiterverfolgung von P&T abzuschätzen. Auf die in Deutschland zu entsorgenden Abfallmengen hat dieses Szenario zunächst keine Auswirkungen.

Es birgt gesellschaftlich gesehen voraussichtlich die meisten Chancen, während die Risiken gleichzeitig minimiert werden. Forschung und Entwicklung werden von der deutschen Bevölkerung prinzipiell eher wohlwollend aufgenommen, weshalb nur von vereinzelten Widerständen auszugehen ist. Insofern würde P&T seitens der Medien eher positiv bewertet, da in diesem Szenario Deutschland die Kompetenz behält, eigenständig die Sicherheit ausländischer P&T-Anlagen zu beurteilen und in internationalen Gremien wie der IAEA oder OECD/NEA mitzuwirken. Die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen in Deutschland sind weitgehend vernachlässigbar. Allerdings ergeben sich indirekte positive ökonomische Effekte: Kompetenzen und Arbeitsplätze bleiben erhalten und Deutschland bleibt auch zukünftig handlungsfähig.

EUROPÄISCHE SYSTEMPARTIZIPATION

Im Szenario „Europäische Systempartizipation“ beteiligt sich Deutschland nicht nur an europäischen Forschungsvorhaben, sondern auch an großtechnischen P&T-Anlagen auf europäischer Ebene. Dieser Ansatz erfordert eine enge Zusammenarbeit mit anderen europäischen Ländern innerhalb eines klar definierten normativen Rahmens und ermöglicht eine gemeinsame Entwicklung, Errichtung sowie

die gemeinsame F&E-Nutzung und den gemeinsamen Betrieb von europäischen Anlagen. Die technischen Analysen zeigen, dass die Verringerung des Aufkommens wärmeentwickelnder Abfälle, der thermischen Leistung und der Gesamtradioaktivität zu späteren Zeiten in Folge von P&T im europäischen Maßstab signifikant sein kann. Die Reduktion der thermischen Leistung und der Gesamtradioaktivität zu späteren Zeiten bewegt sich dabei mindestens zwischen ein und zwei Größenordnungen, die Verringerung der Radiotoxizität ist noch signifikanter. Allerdings ist wegen der bereits verglasten Abfälle aus der Wiederaufarbeitung, die nicht weiter behandelt werden sollen, der Effekt für ein Endlager in Deutschland begrenzt.

In einem solchen Szenario, in dem Europa die Anlagen gemeinsam nutzt und deren Kosten teilt, zeigen sich einige Chancen. Mögliche Vorteile für Deutschland liegen zum Beispiel in geringeren Investitionen, lediglich anteiligen Stilllegungs- und Forschungs- und Entwicklungskosten sowie im Verzicht auf den Bau neuer inländischer Anlagen. Problematisch könnte der damit verbundene Eindruck sein, dass sich Deutschland dadurch an den nuklearen Zielen der anderen europäischen Staaten indirekt beteiligt, wie etwa dem weiteren Ausbau der Kernenergie in Europa oder der Nutzung der in der Phase der Partitionierung gewonnenen Kernbrennstoffe für neue Reaktoren. Diese Ziele sind mit denen des deutschen Kernenergieausstiegs nicht vereinbar. Allerdings sind weitere detaillierte Studien erforderlich, um über die erwarteten Vorteile und Nachteile genauere Aussagen treffen zu können.

Für den Fall, dass eine oder mehrere europäische Anlagen errichtet werden, in denen auch deutsche Abfälle behandelt werden, muss ein entsprechender Transport der Abfälle dorthin gewährleistet werden. Transporte bedeuten immer auch zusätzliche Unfall- und Emissionsrisiken und vor allem Widerstände in der Bevölkerung. Wenn allerdings mit diesen Transporten die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland wesentlich entlastet wird, ist ein solcher Transport auch der Bevölkerung vermittelbar.

Im Vergleich zur Anwendung von P&T in Deutschland bestehen im europäischen Szenario Chancen, dass die Bevölkerung die Realisierung von P&T akzeptieren würde. Je nach Standort der Anlage(n) jenseits der deutschen Landesgrenzen kann in Deutschland mit moderater Akzeptanz gerechnet werden. Die deutschen Medien werden wahrscheinlich – wenn überhaupt – tendenziell negativ über Planung, Bau und Betrieb berichten. Allerdings spielt für Häufigkeit und Tendenz der Berichterstattung eine Rolle, ob die Anlage(n) grenznah- oder grenzfern von Deutschland gebaut werden. Durch die Aufteilung der Kosten auf mehrere Länder werden die finanziellen Belastungen aufgeteilt und sind somit eher tragbar. Allerdings können wegen eines erhöhten Abstimmungs- und Koordinationsbedarfs bei der Auftragsvergabe auch erhebliche Mehrkosten für Bau und Inbetriebnahme der P&T-Anlage(n) anfallen. Das Ökotoxizitätspotenzial, das die deutsche Bevölkerung betrifft, fällt geringer aus, sofern die P&T-Anlage(n) nicht nahe der Ländergrenzen gebaut werden. Die Beteiligung an europäischen Forschungsaktivitäten ermöglicht den Kompetenzerhalt in der Reaktorphysik und Anlagensicherheit in Deutschland sowie für Technologien für Hochtemperaturanwendungen und sichert Deutschland hierdurch auch in Zukunft die Kompetenz zur unabhängigen sicherheitstechnischen Beurteilung ausländischer P&T-Anlagen.

ANWENDUNG VON P&T IN DEUTSCHLAND

Im Szenario „Anwendung von P&T in Deutschland“ wird mindestens eine P&T-Anlage in Deutschland gebaut und betrieben.¹⁷ Dieses Szenario schließt ein, dass alle erforderlichen Anlagen (Partitionierung abgebrannter Brennstoffe, Fabrikations- und Transmutationsanlagen und

so weiter) entwickelt und errichtet werden. Dabei gibt es verschiedene technische Optionen. Wie im Szenario „Europäische Systempartizipation“ kann sich das Aufkommen wärmeentwickelnder Abfälle, die thermische Leistung und die Gesamtradioaktivität zu späteren Zeiten in Folge von P&T signifikant verringern. Allerdings ist wegen der bereits verglasten Abfälle, die nicht weiter behandelt werden sollen, der Effekt auch hier begrenzt.

Auf der gesellschaftlichen Ebene spricht wenig dafür, dass P&T nur in Deutschland angewendet werden soll. Die Akzeptanz für den Neubau von P&T-Anlagen durch potenzielle Anlagenstandortgemeinden sowie durch die deutsche Bevölkerung ist gering. Skeptische Medienberichte können dieses negative Meinungsbild verstärken. Für Mensch und Umwelt bestehen aufgrund des radiologischen sowie nicht-radiologischen Ökotoxizitätspotenzials von P&T-Anlagen zusätzliche Risiken. Aufgrund der relativ geringen Abfallmengen wird sich aus ökonomischer Sicht der Bau und Betrieb von einer oder mehreren P&T-Anlage(n) in Deutschland vermutlich nicht rechnen. Positiv anzumerken ist, dass der Betrieb einer P&T-Anlage in Deutschland den inländischen Kompetenzerhalt in der Reaktorphysik und Anlagensicherheit unterstützt, indem spezifische Konzepte für P&T entwickelt würden, die mit dem Ausstiegsbeschluss aus der Kernenergie vereinbar sind. Grundsätzlich sind auch verschiedene Kombinationen aus den Szenarien „Europäische Systempartizipation“ und „Anwendung von P&T in Deutschland“ vorstellbar, in denen Teile der Prozesse in Europa zusammengefasst werden, manche Anlagen aber national betrieben werden. Dieses Vorgehen wurde bereits in der Vergangenheit genutzt: Die Wiederaufarbeitung ist ein internationales Projekt, der Reaktorbetrieb hingegen ist national geregelt.

¹⁷ Eine präzise Aussage über die genaue Zahl der P&T-Anlagen ist zum jetzigen Zeitpunkt aufgrund verbleibender Unsicherheiten nicht möglich. Die Anzahl wird unter anderem vom Stand der Technik zum Zeitpunkt der Anlagenplanung abhängen.

6 EMPFEHLUNGEN

Basierend auf den dargestellten Kernaussagen gibt acatech die folgenden Empfehlungen:

POLITIK:

- **Eine Option, bei der P&T-Forschung im europäischen Kontext betrieben wird und die eine zukünftige Beteiligung Deutschlands an P&T in Europa prüft, erscheint nach den Bewertungen der verschiedenen Szenarien vorteilhafter als die beiden Optionen „Deutscher Alleingang“ oder „völliger Rückzug“:** Einerseits ist es aus ökonomischer, ökotoxikologischer, genehmigungstechnischer und gesellschaftlicher Sicht wenig attraktiv, dass Deutschland im Alleingang P&T-Anlagen baut und betreibt. Andererseits erscheinen ein Abbruch der Forschungsarbeiten und ein Ausstieg aus allen P&T-Optionen aus jetziger Sicht zumindest voreilig und angesichts der Chancen dieser Optionen auch nicht vernünftig. acatech empfiehlt, die Forschungsarbeiten sowohl im Bereich der Grundlagenforschung als auch im Bereich der technischen Entwicklungsforschung (Labormaßstab und Versuchsanlagen) im Rahmen eines europäischen Forschungsverbundes fortzusetzen. Das bestehende deutsche Forschungsprogramm sollte stets weiter verfolgt werden, verbunden mit dem Ziel, die deutsche Forschung in ein europäisches Forschungsprogramm zu integrieren und zu prüfen, ob eine Beteiligung an einer großtechnischen Umsetzung im europäischen Raum sinnvoll ist. Dadurch kann die in Deutschland hoch entwickelte Expertise in den europäischen Entwicklungsprozess von P&T einfließen, und alle wirtschaftlich und sachlich möglichen Optionen bleiben erhalten. Außerdem können die noch offenen Fragen im Zusammenhang mit dem Einsatz dieser Technologie beantwortet werden. Diese Option würde bedeuten, dass man die für die weitere P&T-Forschung jährlich investierten Mittel in ungefähr der gleichen Größenordnung wie bisher für die weitere Zukunft vorsieht und gegebenenfalls aufstockt, wenn europäische Demonstrationsprojekte eine deutsche Mitfinanzierung erfordern.
- **Forschungsbeteiligung sollte keine Pfadabhängigkeit in Richtung Anwendung von P&T beinhalten:** Die Entscheidung, ob die deutschen wärmeentwickelnden abgebrannten Brennelemente aus Leistungsreaktoren (und nicht verglasten Abfälle) in einer Transmutationsanlage reduziert werden sollen, sollte mittelfristig noch offen gehalten werden. Mittelfristig bedeutet zehn bis fünfzehn Jahre, wenn man den gegenwärtigen Zeitplan für einen Entscheidungsprozess über einen Endlagerstandort und dessen Erkundung zugrunde legt. Allerdings muss zeitnah entschieden werden, ob sich deutsche Forschungseinrichtungen im Auftrag der Bundesregierung an internationalen P&T-Projekten, wie zum Beispiel MYRRHA in Belgien beteiligen sollen. Dies würde acatech im Grundsatz begrüßen, allerdings müsste vorab geklärt werden, ob die Mittel auch effizient und zielgerichtet verwendet werden und ob das deutsche Engagement in diesen Projekten im Einklang mit dem Beschluss steht, aus der Kernenergie auszusteigen. Zu einem späteren Zeitpunkt, nach weitergehenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, kann besser abgeschätzt werden, wie die Chancen von P&T aus deutscher Sicht zu beurteilen sind. Des Weiteren besteht zu diesem Zeitpunkt dann ein besserer Überblick, ob nach dem bis dahin erreichten Stand von Wissenschaft und Technik das Risiko für den deutschen wie den europäischen Nuklearabfall erheblich reduziert werden kann. Es muss sichergestellt sein, dass mit der Forschungsbeteiligung keine mögliche Pfadabhängigkeit in Richtung einer großtechnischen Anwendung verbunden ist.
- **Eine interdisziplinäre, umfassende Studie als Grundlage für die Entscheidung, ob sich Deutschland an P&T beteiligen soll, und die besonders das Potenzial und die Herausforderungen bei einer europäischen Umsetzung betont, soll rechtzeitig vor der**

voraussichtlich in 10 bis 15 Jahren anstehenden Entscheidung über ein mögliches stärkeres Engagement in dieser Sache durchgeführt werden. Die Planung, wann und wie Verbände und Öffentlichkeit beteiligt werden, soll rechtzeitig beginnen: Neben den möglichen Vorteilen von P&T sind im Sinne einer rationalen und vorausschauenden Politik auch die negativen Konsequenzen zu bedenken, die sich durch P&T ergeben können. Deshalb empfiehlt acatech, vor der Entscheidung, ob Deutschland in potenzielle europäische P&T-Anlagen einsteigt, eine umfassende Studie zu den Chancen und Risiken solcher Anlagen auszuarbeiten, die auf bestehenden Vorarbeiten basiert, mögliche Entsorgungsstrategien (einschließlich Transport, Zwischenlagerung und Konditionierung) diskutiert und Gefährdungspotenziale für Mensch und Umwelt nach dem Stand der Forschung und Entwicklung zu P&T weiter differenziert. Diese Analyse sollte im Sinne eines ganzheitlichen Ansatzes neben den technischen und sicherheitstechnischen Merkmalen von P&T auch die sozialen, politischen, ökonomischen, juristischen/genehmigungsrechtlichen und kommunikativen Aspekte auf europäischer Ebene einbeziehen. Dabei sollen die dann vorliegenden aktuellen Forschungsergebnisse und die Erfahrungen aus anderen Ländern einbezogen werden. Ebenso ist anzuraten, Verbände und Öffentlichkeit an den Debatten zu beteiligen. Angesichts der voraussichtlich sehr komplexen nationalen und internationalen Entscheidungs- und Beteiligungsprozesse, die in einigen Jahren zu P&T anstehen, sollte rechtzeitig überlegt und geplant werden, wie diese zu gestalten sind.

- **Deutschland soll eine europäische Perspektive verfolgen und nationale Forschungsansätze im Auge behalten:** Der Beschluss, aus der Kernenergie auszusteigen, ist die Basis für die zukünftigen Arbeiten zu P&T. Technologische Möglichkeiten, wie man mit den nuklearen Abfällen umgehen kann, sind für zukünftige Generationen weiterhin wichtig. Schwerpunkte für zukünftige Arbeiten sind:

- **Europäische Zusammenarbeit suchen:** Für die Grundlagen- und Technologieforschung und für zukünftige Kooperationen zur möglichen Implementierung von P&T auf europäischer Ebene.
- **Spezifische Forschungsansätze für Deutschland entwickeln:** Die Zielsetzung für P&T unter den Bedingungen des Kernenergieausstiegs lautet, alle Transurane (Plutonium, minore Aktiniden) möglichst weitgehend zu verbrennen statt das Plutonium im Brennstoffkreislauf zu halten. Deswegen müssen alle Optionen zur Transmutation unter dem Blickwinkel des Ausstiegsbeschlusses beleuchtet werden. Die Transmutation kann nicht nur für den nachhaltigen Vollzug des Ausstiegs sehr wichtig werden, sondern auch, wenn es darum geht, die Akkumulation von Transuranen im Betrieb eines Leichtwasserreaktor-Parks zu vermeiden. Deutschland könnte hier eine wichtige Rolle für die nachhaltige Verbrennung von Transuranen übernehmen. Ist eine Entscheidung gefallen, welches Transmutationssystem erforscht werden soll, kann aufgrund grundlegender Fragestellungen und Lösungsansätze wiederum ein Großteil der Wissensbasis zusammen mit anderen EU-Partnern entwickelt werden.

WIRTSCHAFT:

- **Die deutsche Industrie sollte die mögliche Umsetzung von P&T in Europa als Chance begreifen und gegebenenfalls nutzen:** Die Industrie in Deutschland, speziell Anlagenbauer, Spezialunternehmen und Zulieferbetriebe, hat langjährige Erfahrung in der Herstellung und Lieferung von Hochtechnologie-Komponenten und Systemlösungen, die für Transmutationsanlagen von entscheidender Bedeutung sind. Dies sind unter anderem Komplettlösungen oder Bauteile für Protonenbeschleuniger, Elektro-, Leit- und Sicherheitstechnik, Messtechnik, Kraftwerkskomponenten wie Pumpen, Wärmetauscher,

Aggregate, Transformatoren sowie Spezialwerkstoffe, die oftmals in enger Wechselwirkung mit deutschen Forschungseinrichtungen entwickelt werden. Die Umsetzung von P&T im europäischen Kontext schafft für die deutsche Industrie neue Absatzmärkte für ihre Produkte und Leistungen, und kann so deren Umsatz steigern sowie Kompetenz und Arbeitsplätze sichern. acatech empfiehlt, dass sich deutsche Unternehmen im Sinne des Szenarios europäischer Systempartizipation an Ausschreibungen für europäische P&T-Anlagen beteiligen.

WISSENSCHAFT:

- **Die Forschung soll sich auf die folgenden zentralen Bereiche konzentrieren:** P&T weist eine Vielfalt an wissenschaftlichen Herausforderungen auf, die neben den natur- und ingenieurwissenschaftlichen auch sozialwissenschaftliche, ökologische und ökonomische Implikationen umfassen. Die Sicherheitsforschung nimmt eine herausragende, alle Bereiche überlagernde Bedeutung für P&T ein. Es lassen sich folgende maßgebliche Anforderungen an die Forschung stellen. acatech empfiehlt, die Forschung auf diese Bereiche zu konzentrieren:
 - **Effiziente Abtrennung (Partitionierung)** der langlebigen, hoch radioaktiven, wärmeentwickelnden Transurane aus den abgebrannten Brennelementen (sowie den abgebrannten Transmutationsbrennstoffen): Die Herausforderungen liegen darin, die Prozessverluste und Sekundärabfälle zu minimieren sowie sichere und möglichst wenig umweltbelastende Abtrennprozesse zu entwickeln und die Abfallströme zu konditionieren.
 - **Effiziente Transmutation der abgetrennten Transurane** in eigens zu diesem Zweck entwickelten Transmutationsanlagen: Die Anforderungen liegen bei der Sicherheit dieser Anlagen, einer hohen Transmutationsrate sowie der Minimierung der Rezyklierungszyklen und damit möglicher
- Umweltbelastungen und Verringerung der Nukleartransporte. Zudem sind Wirtschaftlichkeitsstudien (und entsprechende Optimierungen) im Zusammenhang mit den verschiedenen Konzepten zu Transmutationsanlagen vorzunehmen.
- **Weiterentwicklung von Methoden zur sicherheitstechnischen Bewertung von P&T-Anlagen:** Um Partitionierungs- und Transmutationsanlagen sicherheitstechnisch bewerten zu können, müssen geeignete Bewertungsmethoden entwickelt und bereitgestellt werden (Safety Approach). Außerdem nötig sind Rechenmodelle und die dafür notwendigen Software-Werkzeuge.
- **Erfassung und Bewertung der gesellschaftlichen Implikationen aller Handlungsoptionen.** Die technischen Lösungsoptionen müssen in ein wirtschaftliches, politisches und soziales Umfeld eingebettet werden. Dabei geht es nicht allein um Akzeptanz, sondern auch und vor allem um eine kohärente Integration in die demokratisch legitimierte Energiepolitik und die zunehmend partizipativ geprägte Planungskultur.
- **Die Forschung soll sich interdisziplinär aufstellen:** Diese Schlüsselbereiche (siehe Kasten Seite 28) können durch die Kombination unterschiedlicher wissenschaftlicher Disziplinen und Fachbereiche abgedeckt werden. Diese sind für die wissenschaftlich-technischen Aspekte: Radiochemie (Partitionierung, Konversion und Konditionierung), Reaktorphysik und Sicherheit, Transmutationsbrennstoffentwicklung, Thermohydraulik, Materialforschung und Technologieentwicklung, Grundlagenforschung für Komponentenentwicklung (wie zum Beispiel Beschleuniger und Neutronenspallationstarget). Zudem sind Rechts-, Geistes-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften heranzuziehen, wenn es um Fragen der institutionellen Regelungen, der Kosten-Nutzen-Vergleiche, der sozialen Akzeptanz und der rechtlichen Kompatibilität geht, jeweils mit Blick auf das Gesamtsystem der Entsorgung (einschließlich Transport, Zwischenlagerung, Konditionierung).

Aus technischer Perspektive stellen sich mit Blick auf zukünftige Forschung und Entwicklung zu P&T die folgenden zentralen Forschungsfragen:

– **Partitionierung:**

Die Forschungsfragen reichen von der Grundlagenforschung in der Radiochemie (Entwicklung hocheffizienter Extraktionsprozesse) im Labormaßstab bis hin zu Skalierungsuntersuchungen für eine industrielle Anlage mit dem Ziel, Plutonium und minore Aktinide aus abgebrannten LWR-Brennelementen abzutrennen und anlagenspezifische Transmutationsbrennstoffe herzustellen. Auch die Optimierung und Konditionierung der in der Abtrennung anfallenden Abfallströme fällt in diesen Bereich.

– **Anlagenspezifische Forschung:**

Ausgehend von einer Bewertung der Stärken und Schwächen verschiedener Transmutationsanlagen (kritische Reaktoren oder unterkritische Anlagen, fester Brennstoff oder flüssiger Brennstoff) bezogen auf die Zielsetzungen des Kernenergieausstiegs sind die aus Sicht der deutschen Politik erwünschten Strategie(n) zu Partitionierung und Transmutation festzulegen und daraus resultierend anlagenspezifische Forschungen voranzutreiben, so zum Beispiel:

▪ **ADS: Bereitstellung schneller Neutronen (Protonenbeschleuniger und Spallationsneutronenquelle)**

Hier ist eine Weiterentwicklung der heutigen supraleitenden Linearbeschleuniger anzustreben. Ziel ist eine sehr hohe Zuverlässigkeit in ununterbrochener Strahllieferung bei gleichzeitiger Preisoptimierung. Zudem wäre eine Weiterentwicklung „klassischer“, externer Spallationstargets anzustreben; Ziel ist hier eine Neutronenquelle mit hoher Leistung im Reaktorkern (Auslegung und Koppelung zum Beschleuniger, Sicherheit, Materialentwicklung, Thermohydraulik,

Neutronik und nukleare Daten). Weiterhin sollte die Entwicklung von brutstofffreien Brennstoffen, bei denen also keine neuen Transurane entstehen, für effiziente Transmutation vorangetrieben werden.

▪ **Reaktoren mit flüssigem Brennstoff:**

Safety Approach und Brennstoffaufbereitung

Es ist eine Strategie zur Bewertung der Anlagensicherheit in Reaktorsystemen mit flüssigem Brennstoff und integrierter Brennstoffreinigung zu entwickeln. Die kontinuierliche Spaltproduktabtrennung ist weiterzuentwickeln und zu optimieren.

– **Nukleare Daten und Reaktorphysik:**

Durch geeignete Experimente und verbesserte Modelle müssen die Unsicherheiten in den nuklearen Datenbanken verkleinert werden, sowohl grundsätzlich als auch insbesondere für die minoren Aktiniden. Speziell für ADS müssen durch Simulation und experimentelle Validierung (an sogenannten „Null-Leistungs-Reaktor-experimenten“) Sicherheitsparameter von schnellen unterkritischen Systemen untersucht werden. Speziell für Reaktoren mit Flüssigbrennstoff müssen Simulationstools zur Modellierung des strömenden Brennstoffes und der kontinuierlichen Brennstoffzufuhr und -reinigung erweitert werden.

– **Transmutation:**

Forschungsfragen betreffen hier insbesondere die sicherheitsrelevanten Aspekte (Validierung der anlagentypspezifischen Sicherheitsparameter für verschiedene Betriebszustände) und das „Transmutationspotenzial“ der Anlagen. Thermohydraulik, Brennstoffverhalten, Materialforschung und Technologieentwicklung (Modelle, Laborexperimente und auch 1:1-Komponententests) sind notwendig, um das Kühlmittel des Transmutationsreaktors sicher zu betreiben und müssen erforscht werden. Gleichmaßen sind Bestrahlungsexperimente für Transmutationsbrennstoff und Strukturmaterialien erforderlich.

- **Eine Forschungsallianz soll eingerichtet werden:** Aussagekräftige wissenschaftliche Bewertungen der P&T-Option können erzielt werden, indem die deutschen Forschungsaktivitäten in den Schlüsselbereichen gebündelt werden. Diese Bündelung kann durch die Einrichtung einer Forschungsallianz oder eines Kompetenzzentrums erfolgen mit den Zielen: (a) Entwicklung einer Forschungsstrategie mit einem zwischen den Akteuren abgestimmtem Arbeitsplan auch im Hinblick auf die Instrumente des Forschungsrahmenprogramms Horizon 2020 der Europäischen Kommission, (b) Priorisierung und Durchführung der Forschungsarbeiten mit Grundlagencharakter sowie (c) Identifikation und Durchführung von domänenübergreifenden oder themenspezifischen Projekten. Da ein solches Forschungsprogramm auf bereits laufenden Forschungsarbeiten und der Weiterentwicklung vorhandener Technologien (wie Wiederaufarbeitung, Brennstoffentwicklung, Schnelle Reaktoren) aufbaut, ist der Bedarf an Forschungsmitteln ungefähr so groß wie die bislang für diesen

Forschungsbereich aufgebrachten Mittel. Für einzelne europäische Initiativen oder Untersuchungen, die mit dem Kernenergieausstieg in Deutschland kompatibel sind, kann jedoch zusätzlicher Finanzbedarf anstehen. Grundsätzlich sollten die deutschen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den europäischen oder internationalen Kontext eingebunden werden, aber auch die durch den Kernenergieausstieg gegebenen Zielsetzungen widerspiegeln: Schließlich hätte P&T in Deutschland mit dem Beschluss, aus der Kernenergie auszusteigen, eine andere Zielsetzung: Während Plutonium und Uran bei den europäischen Partnern als Wertstoff betrachtet werden, gilt es hierzulande als Abfall. Die von deutschen Einrichtungen betriebenen Forschungsaktivitäten im europäischen und internationalen Kontext sind bereits heute so breit angelegt, dass auch Optionen einbezogen sind bzw. einbezogen werden können, die mit der Energiewende kompatibel sind und die eine möglichst effiziente und weitestgehende Verbrennung aller Transurane ermöglichen.

LITERATUR

acatech: *Den Ausstieg aus der Kernkraft sicher gestalten* (acatech POSITION), Heidelberg: Springer Verlag 2011.

AkEnd (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte): *Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte*, 2002. URL: www.bfs.de/de/endlager/faq/langfassung_abschlussbericht_akend.pdf [Stand: 10.02.2014].

BFS (Bundesamt für Strahlenschutz): *Konrad – Deutschlands erstes nach Atomgesetz genehmigtes Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle*, 2012. URL: http://www.bfs.de/de/bfs/publikationen/broschueren/endlager/konrad_leporello.html/printversion [Stand: 10.02.2014].

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) 2011: *Der Weg zur Energie der Zukunft – sicher, bezahlbar und umweltfreundlich. Eckpunktepapier der Bundesregierung zur Energiewende*. URL: <http://www.bmu.de/uebrige-seiten/der-weg-zur-energie-der-zukunft-sicher-bezahlbar-und-umweltfreundlich/> [Stand: 26.04.2013].

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit): *Standortauswahlgesetz tritt in Kraft*, 2013. URL: <http://www.bmub.bund.de/bmub/presse-reden/pressemitteilungen/pm/artikel/standortauswahlgesetz-tritt-in-kraft/> [Stand: 26.07.2013].

Feder, T.: „Need for clean energy, waste transmutation re-
vives interest in hybrid fusion-fission reactors“. In: *Physics Today* – 01/2009; 62(7). DOI:10.1063/1.3177219

Gausemeier, J./Fink, A./Schlake, O.: *Szenario-Management. Planen und Führen mit Szenarien*, München: Carl Hanser Verlag 1996.

Hocke, P./Grunwald, A.: *Wohin mit dem radioaktiven Abfall? Perspektiven für eine sozialwissenschaftliche Endlagerforschung*, Berlin: Edition Sigma 2006.

Kettler, J./Heuters M. et al.: „Konzept einer gasgekühlten beschleunigergetriebenen Transmutationsanlage – AGATE“. In: Bruno Thomauske (Hrsg.): *Aachen Nuclear Safety Reports (ANSR)*, Aachen: Zillekens 2011.

Knebel, J./Fazio, C./Maschek, W./Tromm, W.: „Was tun mit dem nuklearen Abfall?“. In: *Spektrum der Wissenschaft*, 02/2013, S. 34 – 41.

Knebel, J./Salvatores, M.: „Partitioning & Transmutation (P&T). Hier die Fakten – Langfassung“. In: *Energie-Fakten*, 2. März 2011. URL: www.Energie-Fakten.de, [Stand: 26.04.2013].

Lübbert, D./Ahlsweide, J.: *Transmutation radioaktiver Abfälle – Lösung der Endlagerproblematik?* (Nr. 61/08), Wissenschaftliche Dienste, Deutscher Bundestag, 2008.

OECD, Nuclear Energy Agency (NEA): *Potential Benefits and Impacts of Advanced Nuclear Fuel Cycles with Actinide Partitioning and Transmutation* (NEA Nr. 6894), Paris 2011.

RED-IMPACT: *Impact of Partitioning, Transmutation and Waste Reduction Technologies on the Final Nuclear Waste Disposal* (Synthesis Report), Jülich: Forschungszentrum Jülich 2008.

Renn, O. (Hrsg.): *Partitionierung und Transmutation: Forschung – Entwicklung – Gesellschaftliche Implikationen* (acatech STUDIE), München: Utz Verlag 2014.

Schulz, M./Renn, O. (Hrsg.): *Das Gruppendelphi: Konzept und Fragebogenkonstruktion*, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2009.

Webler, T./Levine, D./Rakel, H./Renn, O.: „The Group Delphi: A Novel Attempt at Reducing Uncertainty“. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 39, 1991, S. 253 – 263.

> BISHER SIND IN DER REIHE acatech POSITION UND IHRER VORGÄNGERIN acatech BEZIEHT POSITION FOLGENDE BÄNDE ERSCHIENEN:

acatech (Hrsg.): *Privatheit im Internet. Chancen wahrnehmen, Risiken einschätzen, Vertrauen gestalten* (acatech POSITION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2013.

acatech (Hrsg.): *Georessource Boden – Wirtschaftsfaktor und Ökosystemdienstleister. Empfehlungen für eine Bündelung der wissenschaftlichen Kompetenz im Boden- und Landmanagement* (acatech POSITION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2012.

acatech (Hrsg.): *Perspektiven der Biotechnologie-Kommunikation. Kontroversen – Randbedingungen – Formate* (acatech POSITION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2012. Auch in Englisch erhältlich (als pdf) über: www.acatech.de

acatech (Hrsg.): *Faszination Konstruktion – Berufsbild und Tätigkeitsfeld im Wandel. Empfehlungen zur Ausbildung qualifizierter Fachkräfte in Deutschland* (acatech POSITION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2012.

acatech (Hrsg.): *Anpassungsstrategien in der Klimapolitik* (acatech POSITION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2012.

acatech (Hrsg.): *Die Energiewende finanzierbar gestalten. Effiziente Ordnungspolitik für das Energiesystem der Zukunft* (acatech POSITION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2012. Auch in Englisch erhältlich (als pdf) über: www.acatech.de

acatech (Hrsg.): *Menschen und Güter bewegen. Integrative Entwicklung von Mobilität und Logistik für mehr Lebensqualität und Wohlstand* (acatech POSITION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2012.

acatech (Hrsg.): *Biotechnologische Energieumwandlung in Deutschland. Stand, Kontext, Perspektiven* (acatech POSITION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2012.

acatech (Hrsg.): *Mehr Innovationen für Deutschland. Wie Inkubatoren akademische Hightech-Ausgründungen besser fördern können* (acatech POSITION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2012. Auch in Englisch erhältlich (als pdf) über: www.acatech.de

acatech (Hrsg.): *Georessource Wasser – Herausforderung Globaler Wandel. Ansätze und Voraussetzungen für eine integrierte Wasserressourcenbewirtschaftung in Deutschland* (acatech POSITION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2012. Auch in Englisch erhältlich (als pdf) über: www.acatech.de

acatech (Hrsg.): *Future Energy Grid. Informations- und Kommunikationstechnologien für den Weg in ein nachhaltiges und wirtschaftliches Energiesystem* (acatech POSITION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2012. Auch in Englisch erhältlich (als pdf) über: www.acatech.de

acatech (Hrsg.): *Cyber-Physical Systems. Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion* (acatech POSITION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2011. Auch in Englisch erhältlich (als pdf) über: www.acatech.de

acatech (Hrsg.): *Den Ausstieg aus der Kernkraft sicher gestalten. Warum Deutschland kerntechnische Kompetenz für Rückbau, Reaktorsicherheit, Endlagerung und Strahlenschutz braucht* (acatech POSITION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2011. Auch in Englisch erhältlich (als pdf) über: www.acatech.de

acatech (Hrsg.): *Smart Cities. Deutsche Hochtechnologie für die Stadt der Zukunft* (acatech BEZIEHT POSITION, Nr. 10), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2011. Auch in Englisch erhältlich (als pdf) über: www.acatech.de

acatech (Hrsg.): *Akzeptanz von Technik und Infrastrukturen* (acatech BEZIEHT POSITION, Nr. 9), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2011.

acatech (Hrsg.): *Nanoelektronik als künftige Schlüsseltechnologie der IKT in Deutschland* (acatech BEZIEHT POSITION, Nr. 8), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2011.

acatech (Hrsg.): *Leitlinien für eine deutsche Raumfahrtspolitik* (acatech BEZIEHT POSITION, Nr. 7), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2011.

acatech (Hrsg.): *Wie Deutschland zum Leitanbieter für Elektromobilität werden kann* (acatech BEZIEHT POSITION, Nr. 6), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2010.

acatech (Hrsg.): *Intelligente Objekte – klein, vernetzt, sensitiv* (acatech BEZIEHT POSITION, Nr. 5), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009.

acatech (Hrsg.): *Strategie zur Förderung des Nachwuchses in Technik und Naturwissenschaft. Handlungsempfehlungen für die Gegenwart, Forschungsbedarf für die Zukunft* (acatech BEZIEHT POSITION, Nr. 4), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009. Auch in Englisch erhältlich (als pdf) über: www.acatech.de

acatech (Hrsg.): *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik in Deutschland. Empfehlungen zu Profilbildung, Forschung und Lehre* (acatech BEZIEHT POSITION, Nr. 3), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008. Auch in Englisch erhältlich (als pdf) über: www.acatech.de

acatech (Hrsg.): *Innovationskraft der Gesundheitstechnologien. Empfehlungen zur nachhaltigen Förderung von Innovationen in der Medizintechnik* (acatech BEZIEHT POSITION, Nr. 2), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2007.

acatech (Hrsg.): *RFID wird erwachsen. Deutschland sollte die Potenziale der elektronischen Identifikation nutzen* (acatech BEZIEHT POSITION, Nr. 1), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2006.

> acatech – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN

acatech vertritt die deutschen Technikwissenschaften im In- und Ausland in selbstbestimmter, unabhängiger und gemeinwohlorientierter Weise. Als Arbeitsakademie berät acatech Politik und Gesellschaft in technikwissenschaftlichen und technologiepolitischen Zukunftsfragen. Darüber hinaus hat es sich acatech zum Ziel gesetzt, den Wissenstransfer zwischen Wissenschaft und Wirtschaft zu unterstützen und den technikwissenschaftlichen Nachwuchs zu fördern. Zu den Mitgliedern der Akademie zählen herausragende Wissenschaftler aus Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen. acatech finanziert sich durch eine institutionelle Förderung von Bund und Ländern sowie durch Spenden und projektbezogene Drittmittel. Um den Diskurs über technischen Fortschritt in Deutschland zu fördern und das Potenzial zukunftsweisender Technologien für Wirtschaft und Gesellschaft darzustellen, veranstaltet acatech Symposien, Foren, Podiumsdiskussionen und Workshops. Mit Studien, Empfehlungen und Stellungnahmen wendet sich acatech an die Öffentlichkeit. acatech besteht aus drei Organen: Die Mitglieder der Akademie sind in der Mitgliederversammlung organisiert; das Präsidium, das von den Mitgliedern und Senatoren der Akademie bestimmt wird, lenkt die Arbeit; ein Senat mit namhaften Persönlichkeiten vor allem aus der Industrie, aus der Wissenschaft und aus der Politik berät acatech in Fragen der strategischen Ausrichtung und sorgt für den Austausch mit der Wirtschaft und anderen Wissenschaftsorganisationen in Deutschland. Die Geschäftsstelle von acatech befindet sich in München; zudem ist acatech mit einem Hauptstadtbüro in Berlin und einem Büro in Brüssel vertreten.

Weitere Informationen unter www.acatech.de