

Geschäftsstelle

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

Gutachten zum Thema „Transmutation“

Vorgelegt von:

Brenk Systemplanung GmbH, Aachen, 10. Oktober 2015

<p>Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-MAT 45</p>



Endbericht

Gutachten zum Thema „Transmutation“

BS-Projekt-Nr. 1506-08

erstellt im Auftrag der

Geschäftsstelle GSt StandAG
Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
Deutscher Bundestag
Platz der Republik 1, 11011 Berlin

durch die

Brenk Systemplanung GmbH
Heider-Hof-Weg 23
52080 Aachen

10.10.2015

Anmerkung:

Dieser Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers (BS) wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.



AUTOREN

Dieses Gutachten wurde von folgenden Bearbeitern erstellt:

- Dr. Thomas Möller
- Dr. Stefan Thierfeldt
- Dr. André Filby

Unterauftragnehmer:

- Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung - Nukleare Entsorgung und Reaktorsicherheit (IEK-6):
 - Prof. Dr. Dirk Bosbach
 - Dr. Guido Deissmann
 - PD Dr. Giuseppe Modolo
 - Dr. Andreas Wilden

Es wird versichert, dass dieser Bericht nach bestem Wissen und Gewissen, unparteiisch und ohne Ergebnisweisung angefertigt worden ist.

ERSTELLUNG, PRÜFUNG UND FREIGABE

erstellt	geprüft	freigegeben
Projektleiter	Geschäftsbereichsleiter	Geschäftsführung

ZUSAMMENFASSUNG

Das vorliegende Gutachten beinhaltet eine zusammenfassende Darstellung und technische Würdigung der Transmutation (einschließlich der vorherigen Partitionierung der zu transmutierenden Radionuklide, d. h. P&T) als Form des Umgangs mit abgebrannten Brennelementen und verglasten Abfällen aus dem Betrieb von Kernkraftwerken. Im Hinblick auf eine Anwendung von P&T auf die in Deutschland angefallenen und noch anfallenden Wärme entwickelnden Abfälle ergeben sich aus den durchgeführten Analysen die folgenden Schlussfolgerungen:

- P&T ist nur sinnvoll für die Behandlung abgebrannter Brennelemente aus Leistungsreaktoren, nicht jedoch für bereits verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle.
- P&T-Anlagen und -Prozesse sind großtechnisch noch nicht einsatzreif – eine Ausnahme bildet die Abtrennung von Uran und Plutonium in der Wiederaufarbeitung mit dem PUREX-Prozess. Großtechnische Prozesse und Anlagen für die Abtrennung der Minoren Actiniden, für die Fabrikation von Transmutationsbrennstoffen sowie deren Wiederaufarbeitung und Anlagen zur Transmutation sind derzeit nicht verfügbar und müssten noch entwickelt und erprobt werden.
- P&T von abgebrannten Brennelementen führt zu einer Reduzierung des Abfallvolumens an Wärme entwickelnden Abfällen sowie des Radionuklidinventars, der Radiotoxizität und der Wärmeleistung dieser hoch radioaktiven Abfälle. Allerdings werden durch P&T zusätzliche Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (Sekundärabfälle) erzeugt, deren Umfang bislang meist sehr konservativ abgeschätzt wurde.
- P&T kann ein Endlager für Wärme entwickelnde hoch radioaktive Abfälle nicht ersetzen, aber den Flächenbedarf für ein tiefegeologisches Endlager deutlich verringern.
- Die Auswirkungen von P&T auf Dosisbetrachtungen in Langzeitsicherheitsanalysen für tiefegeologische Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle (im Hinblick auf Genehmigungsverfahren) sind vergleichsweise gering, da die mittels P&T effizient transmutierbaren Transuran-Isotope (Plutonium und Minore Actinide) unter Endlagerbedingungen als weitgehend immobil anzusehen sind.
- Durch P&T wird das Inventar von Plutonium und Minoren Actiniden im Endlager von ca. 170 Mg auf wenige Mg reduziert.
- P&T führt zu einer deutlichen Verminderung der Radiotoxizität der Abfälle, hierdurch können Unsicherheiten in Langzeitsicherheitsprognosen für ein tiefegeologisches Endlager, insbesondere in Bezug auf Szenarien zum unbeabsichtigten menschlichen Eindringen in das Endlager („*human intrusion*“-Szenarien), reduziert werden.
- Die langlebigen mobilen Spalt- und Aktivierungsprodukte können nicht effizient transmutiert werden. Sie können allerdings im Rahmen von P&T-Strategien in besonders langzeitstabilen Abfallformen (z. B. in keramische Materialien) speziell konditioniert werden, was zu einer noch besseren Immobilisierung dieser Radionuklide in einem tiefegeologischen Endlager führt. Derartige Maßnahmen würden im Rahmen von P&T daher zu einer Verbesserung der Langzeitsicherheit eines Endlagers beitragen, wurden aber bislang noch nicht quantitativ im Rahmen von Sicherheitsanalysen berücksichtigt.

- Die Vorteile von P&T hinsichtlich der Langzeitsicherheit eines Endlagers für Wärme entwickelnde Abfälle sind den Risiken eines über mehrere Jahrzehnte erforderlichen Betriebs von P&T-Anlagen gegenüberzustellen. Die Verminderung des Proliferationsrisikos und des Kritikalitätsrisikos im Endlager infolge P&T ist gegenüber entsprechenden Risiken in den P&T-Anlagen abzuwägen.
- Bestimmte sicherheitsrelevante Aspekte (Anlagen-/Endlagersicherheit, Kritikalität, Proliferation) für Szenarien mit und ohne P&T betreffen unterschiedliche Generationen und Zeithorizonte.
- International wird P&T zumeist im Hinblick auf einen geschlossenen Brennstoffkreislauf mit schnellen Reaktoren betrachtet. Die Übertragbarkeit auf die deutsche Situation in Hinblick auf eine Behandlung von bestrahlten Brennelementen ist daher nur begrenzt gegeben.
- P&T wäre für Deutschland am ehesten in einem länderübergreifenden Ansatz sinnvoll (sogeannter regionaler Ansatz), eine deutsche nationale Lösung erscheint demgegenüber weniger sinnvoll.
- Eine belastbare Abschätzung der mit P&T verbundenen Kosten ist derzeit nicht möglich, allerdings ist im Vergleich zur direkten Endlagerung vermutlich von deutlich erhöhten Kosten auszugehen.
- Die Umsetzung von P&T würde in Deutschland erhebliche Änderungen des kerntechnischen Regelwerks auf Gesetzes- und Verordnungsebene mit sich bringen, einschließlich der Aufhebung des Verbots der Wiederaufarbeitung.
- Wesentlich umfangreicher wäre der Anpassungsbedarf für das untergesetzliche (technische) Regelwerk nicht zuletzt im Hinblick auf die sicherheitstechnische Bewertung, was insbesondere für die Durchführung von Genehmigungsverfahren eine wesentliche Voraussetzung darstellen würde. Der Zeitbedarf für derartige Anpassungen wäre erheblich.
- Die gesellschaftliche Akzeptanz von kerntechnischen Anlagen und damit auch P&T-Anlagen in Deutschland scheint gering zu sein. Eine höhere Akzeptanz für die Implementierung von P&T im Vergleich zur direkten Endlagerung bestrahlter Brennelemente ist derzeit nicht erkennbar.
- Die Beteiligung deutscher Wissenschaftler an der Forschung zu P&T könnte einen Beitrag zum Kompetenzerhalt in der Kerntechnik in Deutschland leisten und damit auch längerfristig die qualifizierte Mitarbeit Deutschlands in internationalen Gremien sichern.

INHALTSVERZEICHNIS

Seite:

1. EINLEITUNG	1
2. GRUNDLEGENDE ASPEKTE DER TRANSMUTATION.....	3
2.1. Grundlagen.....	3
2.1.1. Herkunft der durch P&T umzuwandelnden Radionuklide	3
2.1.2. Möglichkeiten der Umwandlung.....	3
2.1.3. Anwendung auf verglaste hoch radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung	4
2.2. Chancen und Risiken von P&T	5
2.2.1. Chancen:	5
2.2.2. Risiken:.....	6
3. TECHNISCHE SACHVERHALTE UND NOTWENDIGKEITEN	7
3.1. Abfallinventar in Deutschland.....	7
3.2. Technische Schritte und Anlagen im Prozess der Transmutation	9
3.2.1. Partitionierung der bestrahlten LWR-Brennelemente	10
3.2.2. Herstellung der Transmutationsbrennstoffe	10
3.2.3. Transmutation	11
3.2.4. Partitionierung des Transmutationsbrennstoffs und Refabrikation.....	11
3.2.5. Konditionierung, Zwischenlagerung und Endlagerung der Abfälle	11
3.2.6. Strategien und Szenarien zur Transmutation	12
3.3. Entwicklungsstand der notwendigen Schritte und Anlagen.....	13
3.3.1. Entwicklungsstand der trennchemischen Methoden.....	14
3.3.1.1. Hydrometallurgische Trennverfahren	14
3.3.1.2. Pyrometallurgische Trennverfahren.....	15
3.3.1.3. Existierende Wiederaufarbeitungsanlagen.....	16
3.3.2. Entwicklungsstand der Fabrikation von Transmutationsbrennstoffen	17
3.3.2.1. Arten von Transmutationsbrennstoffen	17
3.3.2.2. Fabrikationsverfahren.....	17
3.3.2.3. Fabrikationsanlagen	18
3.3.3. Entwicklungsstand der Transmutation.....	20
3.3.3.1. Reaktoren mit thermischem Neutronenspektrum (LWR)	20
3.3.3.2. Reaktoren mit schnellem Neutronenspektrum.....	20
3.3.3.3. Beschleunigergetriebene Systeme (ADS) mit einem schnellen Neutronenspektrum	21
3.4. Zwischenprodukte, Endprodukte und Nebenprodukte	22
3.5. Notwendige Infrastruktur für die Aufrechterhaltung des Transmutationsbetriebs... 24	
3.5.1. Erforderliche Infrastruktur	24



3.5.1.1.	Anlagenbedarf im regionalen Ansatz	25
3.5.1.2.	Anlagenbedarf im nationalen Ansatz	26
3.5.2.	Rechtliche, genehmigungstechnische und gesellschaftliche Aspekte	27
3.5.2.1.	Rechtliche Aspekte.....	27
3.5.2.2.	Genehmigungstechnische Aspekte.....	28
3.5.2.3.	Gesellschaftliche Aspekte	29
3.6.	Notwendige Maßnahmen der Sicherung während des gesamten Transmutationsbetriebs	31
4.	P&T-STRATEGIEN IN VERSCHIEDENEN LÄNDERN	33
4.1.	Diskussion und Entwicklungsstand in anderen Ländern	33
4.1.1.	Frankreich.....	33
4.1.2.	Belgien	34
4.1.3.	Tschechien.....	35
4.1.4.	Japan	36
4.1.5.	Südkorea	38
4.1.6.	USA.....	39
4.1.7.	Russland	40
4.2.	Übertragbarkeit auf die Situation in Deutschland	41
5.	ASPEKTE VON P&T HINSICHTLICH DER ENTSORGUNG HOCH RADIOAKTIVER WÄRME ENTWICKELNDER ABFÄLLE IN DEUTSCHLAND	42
5.1.	Abfallmengen und -charakteristika	42
5.2.	Dimensionierung eines Endlagers für Wärme entwickelnde Abfälle	43
5.3.	Sicherheitsaspekte.....	43
5.3.1.	Betriebssicherheit des P&T-Betriebs.....	43
5.3.2.	Langzeitsicherheit eines Endlagers für Wärme entwickelnde Abfälle	44
5.3.3.	Kritikalitätssicherheit	45
5.3.4.	Proliferationsrisiken und Safeguards	46
5.4.	Zeithorizonte	46
5.5.	Gesellschaftliche Aspekte	47
5.5.1.	Ökonomische Aspekte.....	47
5.5.2.	Kompetenzerhalt	48
5.5.3.	Gesellschaftliche Akzeptanz	48
5.5.4.	Abwägung von Risiken mit unterschiedlichen Zeitskalen.....	49
6.	LITERATUR.....	51



TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3.1:	Prognose der insgesamt anfallenden Mengen an radioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung, die in Deutschland endgelagert werden müssen (nach [BMU 15A,B]).	8
Tabelle 3.2:	Prognose des Gesamtanfalls endzulagernder Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland nach [BFS 15B]).	9
Tabelle 3.3:	Kapazität verschiedener Forschungseinrichtungen für den Umgang mit Minoren Actiniden [PAT 08].	20
Tabelle 3.4:	Übersicht über die in [ACA 13] abgeschätzten in Deutschland anfallenden radioaktiven Abfallströme für verschiedene P&T-Szenarien	23
Tabelle 3.5:	Abgeschätztes Actiniden- und Spaltproduktaufkommen in Wärme entwickelnden Abfällen in Deutschland für Szenarien ohne und mit P&T (modifiziert nach [ACA 13]).	24



ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

(nicht aufgeführt sind Akronyme als Projektbezeichnungen, die jeweils im Kontext erklärt werden)

acatech	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
ADS	beschleuniger-getriebenes System (engl. <i>accelerator driven system</i>)
AtG	Atomgesetz
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor, Jülich
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
CEA	<i>Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives</i>
DiD	<i>Defence in Depth</i>
DIN	Deutsche Industrienorm
DWR	Druckwasserreaktor
ESK	Entsorgungskommission
F&E	Forschung und Entwicklung
GenIV	Generation IV Reaktorsysteme
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
IMF	<i>Inert Matrix Fuel</i>
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
LWR	Leichtwasserreaktor
NEA	<i>OECD Nuclear Energy Agency</i>
MA	Minore Actinide
Mg	Megagramm (10^6 g = 1 Tonne)
MOX	Mischoxidbrennstoff (Uran/Plutonium)
MSR	Salzschmelzenreaktor (engl. <i>molten salt reactor</i>)
PUREX	<i>Plutonium Uranium Reduction Extraction</i>
P&T	Partitionierung und Transmutation
RSK	Reaktorsicherheitskommission
SM	Schwermetall
SSK	Strahlenschutzkommission
StandAG	Standortauswahlgesetz
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
SWR	Siedewasserreaktor
THTR	Thorium-Hochtemperaturreaktor, Hamm-Uentrop
TSO	<i>Technical Support Organisation</i>
UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
WENRA	<i>Western European Nuclear Regulators Association</i>
WWER	Wasser-Wasser-Energie-Reaktor

1. EINLEITUNG

Mit der Verabschiedung des Standortauswahlgesetzes vom 23.07.2013 (StandAG) durch Bundestag und Bundesrat soll die Suche nach einem Standort für ein Endlager für hoch radioaktive, Wärme entwickelnde Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland auf eine breite politisch und gesellschaftlich getragene Basis gestellt werden. Ziel des im StandAG beschriebenen mehrstufigen Standortauswahlverfahrens ist es, in einem transparenten und wissenschaftsbasierten Verfahren einen Standort in Deutschland für die Endlagerung insbesondere hoch radioaktiver Abfälle zu finden. Vor Beginn des eigentlichen Standortauswahlverfahrens trifft die pluralistisch besetzte „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (vgl. § 3 ff. StandAG) grundlegende Festlegungen u. a. bzgl. wissenschaftlich-technischer und gesellschaftlicher Entscheidungsgrundlagen und –kriterien für das Standortauswahlverfahren, Kriterien für Korrekturmöglichkeiten und Verfahrensrücksprünge, Anforderungen an Organisation und Durchführung des Verfahrens sowie der Öffentlichkeitsbeteiligung. Zudem besteht eine der Aufgaben der Kommission in der Erarbeitung von Vorschlägen *„zur Beurteilung und Entscheidung der Frage, ob anstelle einer unverzüglichen Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen andere Möglichkeiten für eine geordnete Entsorgung dieser Abfälle wissenschaftlich untersucht und bis zum Abschluss der Untersuchungen die Abfälle in oberirdischen Zwischenlagern aufbewahrt werden sollen.“* Im Rahmen der Betrachtung möglicher (alternativer) Entsorgungspfade wird von der Kommission auch das Verfahren der Transmutation als möglichem Beitrag zur nuklearen Entsorgung diskutiert.

In diesem Zusammenhang wurde die Brenk Systemplanung GmbH und ihr Unterauftragnehmer, das Forschungszentrum Jülich GmbH (Institut für Energie- und Klimaforschung IEK-6: Nukleare Entsorgung und Reaktorsicherheit), mit Schreiben vom 05.08.2015 mit der Erstellung eines Gutachtens zum Thema „Transmutation“ für die „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ beauftragt. Das Gutachten soll dabei eine umfassende Darstellung und technische Würdigung der Transmutation als Form des Umgangs mit abgebrannten Brennelementen und verglasten Abfällen aus dem Betrieb von Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren beinhalten. Dies umfasst zum einen die Darstellung wissenschaftlich-technischer Sachverhalte wie insbesondere

- der notwendigen Anlagen und Prozessschritte bei der Transmutation einschließlich Anlagengrößen/-anzahl und erforderlicher Zeiträume der Abfallbehandlung,
- dem (technischen) Entwicklungsstand der jeweiligen Verfahrens- und Prozessschritte,
- dem Zustand der bei der Transmutation anfallenden Zwischen-, Neben- und Endprodukte sowie dem Bedarf von deren weiterer Behandlung,
- der notwendigen Infrastruktur für die Aufrechterhaltung des Transmutationsbetriebs bis zur vollständigen Behandlung der Abfälle, einschließlich staatlicher, rechtlicher und gesellschaftlicher Aspekte, sowie
- notwendiger Sicherungsmaßnahmen während der gesamten Zeit des Transmutationsbetriebs.

Des Weiteren beinhaltet das Gutachten eine Analyse der wissenschaftlich-technischen und gesellschaftlichen Diskussionen zum Thema Transmutation in anderen Ländern inkl. Betrachtungen zu deren Übertragbarkeit auf die Behandlung hoch radioaktiver Abfälle in Deutschland, wobei wesentliche Diskussionsbeiträge aus Deutschland entsprechend berücksichtigt werden.



In Kapitel 2 werden hierzu zunächst einige Grundlagen der Transmutation beschrieben, die Anwendbarkeit des Verfahrens für bestimmte hoch radioaktive Abfallströme und die darin enthaltenen Radionuklide diskutiert sowie die generellen Chancen und Risiken der Transmutation als möglichem Beitrag zur nuklearen Entsorgung dargestellt. Die wissenschaftlich-technischen Sachverhalte und Randbedingungen der Transmutation wie Anlagen- und Prozesstechnik und deren Praxisreife, Art, Menge und Eigenschaften der anfallenden Produkte sowie zur erforderlichen Infrastruktur sind in Kapitel 3 dargestellt. Kapitel 4 enthält Betrachtungen und Analysen zum Entwicklungsstand und zur Diskussion der Transmutation in anderen Ländern und diskutiert die Übertragbarkeit auf die Situation in Deutschland. Die Konsequenzen von P&T als Form des Umgangs mit Wärme entwickelnden hoch radioaktiven Abfällen in Deutschland werden in Kapitel 5 betrachtet. Die in diesem Gutachten zitierte Literatur ist in Kapitel 6 zusammengestellt.

2. GRUNDLEGENDE ASPEKTE DER TRANSMUTATION

2.1. Grundlagen

2.1.1. Herkunft der durch P&T umzuwandelnden Radionuklide

Bei der friedlichen Nutzung der Kernenergie entsteht durch Kernspaltung eine Vielzahl von Radionukliden, die bis zu 5 % des abgebrannten Kernbrennstoffs ausmachen. Die meisten dieser Radionuklide haben Halbwertszeiten von deutlich unter 100 Jahren, während einige Radionuklide wesentlich längere Halbwertszeiten aufweisen. Im Hinblick auf den sicheren und nachhaltigen Umgang mit den bei der Kernenergienutzung anfallenden (hoch)radioaktiven Abfällen stehen zwei Gruppen an langlebigen Radionukliden im Fokus:

1. Radionuklide aus der Gruppe der Actiniden, wie z. B. Plutonium aber auch die Minoren Actinide Neptunium, Americium und Curium, aufgrund ihrer hohen Radiotoxizität und
2. langlebigere dosisrelevante Spalt- und Aktivierungsprodukte, die als relativ mobil in einem tiefeingeologischen Endlagersystem sowie der Umwelt im Allgemeinen angesehen werden (z. B. Kohlenstoff-14, Chlor-36, Selen-79 und Iod-129) aufgrund ebendieser Mobilität.

Die mögliche Umwandlung (Transmutation) langlebiger Radionuklide aus bestrahlten Brennelementen und radioaktiven Abfällen zu kurzlebigen und/oder stabilen Isotopen durch Bestrahlung mit Neutronen wird bereits seit einigen Jahrzehnten erforscht und diskutiert (vgl. u. a. [NEA 02]). Bei diesem Konzept handelt sich um einen erweiterten Brennstoffkreislauf, der auf einer mehrfachen Rezyklisierung und neuen Reaktorkonzepten basiert. Die Strategie umfasst dabei die chemische oder elektrochemische Abtrennung (Partitionierung) langlebiger Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen und ihre anschließende Umwandlung in stabile oder kurzlebige Isotope durch Neutronenreaktionen in speziellen Anlagen (Transmutation).

2.1.2. Möglichkeiten der Umwandlung

Die Umwandlung der mit Neutronen bestrahlten Elemente verläuft entweder über Neutroneneinfang- oder Spaltprozesse. Durch Spaltprozesse entstehen Beta- und/oder Gamma-Emitter mit wesentlich kürzeren Halbwertszeiten als die Ausgangsnuklide, daher ist insbesondere bzgl. der Actiniden die Spaltung der bei der Transmutation erwünschte Prozess. Der Neutroneneinfang erzeugt dagegen schwerere, manchmal ebenfalls langlebige Radionuklide. Für das thermische Neutronenspektrum ist der Spaltungs-Wirkungsquerschnitt von Nukliden mit gerader Massenzahl gering und der Neutroneneinfangquerschnitt am größten. Daher werden zur Transmutation überwiegend Anlagen bzw. Reaktoren mit einem schnellen, d. h. nicht moderiertem Neutronenspektrum in Betracht gezogen, da hier der erwünschte Spaltprozess bevorzugt auftritt, wohingegen der Aufbau von Elementen höherer Ordnungs- bzw. Massenzahl gering ist.

Praktisch alle Transmutationskonzepte zielen auf die Umwandlung von Plutonium sowie insbesondere der langlebigen Isotope der Minoren Actiniden (MA) Neptunium, Americium und Curium in kurzlebigere Spaltprodukte ab [ACA 13], wobei abgetrenntes Plutonium in Form von Uran-Plutonium-Mischoxid-Brennstoffen (MOX) bereits in heutigen Leichtwasserreaktoren (LWR) genutzt werden kann. Die Transmutation (langlebiger) Spaltprodukte (z. B. Technetium-99, Iod-129,

Cäsium-135) ist im Prinzip neutronenphysikalisch grundsätzlich möglich, allerdings fehlen bislang hierfür effiziente Verfahren ([SAL 05], [ACA 13]). Generell ist eine effektive Transmutation von langlebigen Spaltprodukten wesentlich schwieriger als diejenige von Actiniden. Durch Neutronenabsorption lassen sich z. B. Iod-129 und Technetium-99 zu jeweils stabilen Elementen (Xenon-130 bzw. Ruthenium-100) transmutieren. Allerdings sind die Wirkungsquerschnitte bzgl. des Neutroneneinfangs bei diesen Nukliden sehr gering, so dass lange Transmutationszeiten bei hohen Neutronenflussdichten erforderlich wären. Die Transmutation von Cäsium-135 und Zirconium-93 würde darüber hinaus die Trennung dieser Isotope von den übrigen stabilen Cäsium- bzw. Zirconium-Isotopen in den Abfällen voraussetzen.

Eine grundsätzliche Voraussetzung für die Transmutation ist die vorherige chemische Abtrennung (Partitionierung) der zu transmutierenden Radionuklide, weshalb dieses Konzept im Allgemeinen als Partitionierung und Transmutation (P&T) bezeichnet wird. Als Trennverfahren werden meist hydrometallurgische (Flüssig-flüssig-Extraktion mit nicht-mischbaren Flüssigkeiten und selektiven Komplexbildnern) und pyrometallurgische (elektrochemische Trennverfahren in Salzschnmelzen) Prozesse vorgeschlagen. Für die Actinidenabtrennung aus kommerziellen Brennstoffen aus Leichtwasserreaktoren (LWR) erscheinen die hydrometallurgischen Verfahren aufgrund des fortgeschrittenen Entwicklungsstandes und der langen industriellen Erfahrung mit dem PUREX-Prozess besser geeignet, da die hydrometallurgische Abtrennung von Uran und Plutonium bereits seit 60 Jahren erfolgreich im industriellen Maßstab betrieben wird.

Brennelemente aus anderen Reaktortypen als LWR (z. B. aus den Hochtemperaturreaktoren AVR/THTR oder aus Forschungsreaktoren) sind nur z. T. mit den gegenwärtigen Prozesstechnologien der Wiederaufarbeitung kompatibel und es existieren derzeit nur für bestimmte dieser Brennstofftypen etablierte Wiederaufbereitungsverfahren. Uranaluminid-Brennelemente mit Aluminium-Cladding (UAl_x-Al) aus Forschungsreaktoren lassen sich mit dem PUREX-Prozess wiederaufarbeiten und können chargenweise zusammen mit LWR-Brennelementen in existierenden Wiederaufarbeitungsanlagen verarbeitet werden. Für Forschungsreaktorbrennelemente mit Uransilicid-Brennstoff (z. B. U_3Si_2-Al , U_3Si-Al) müssten demgegenüber noch geeignete Verfahrensschritte zur Wiederaufarbeitung entwickelt werden. Gleiches gilt für die Brennelementkugeln aus den Hochtemperaturreaktoren AVR und THTR, für deren industrielle Wiederaufarbeitung noch kein Verfahren existiert. Die nachfolgenden Betrachtungen zur Wiederaufarbeitung und Partitionierung in den Abschnitten 3.2 und 3.3 beziehen sich daher vorwiegend auf LWR-Brennelemente aus Leistungsreaktoren.

Die potentielle Anwendung von P&T-Konzepten wird zumeist hinsichtlich der Transmutation von aus bestrahlten Brennelementen/Kernbrennstoffen abgetrennten Minoren Actiniden (sowie ggf. Plutonium) betrachtet (u. a. [MAG 03], [NEA 11A], [POI 12A], [ACA 13], [ESK 15]).

2.1.3. Anwendung auf verglaste hoch radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung

Eine Anwendung der Option P&T auf bereits verglaste hoch radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente ist zwar theoretisch möglich, wird allerdings aus ökonomischen und ökologischen Gründen als wenig sinnvoll angesehen (vgl. u. a. [ACA 13]), insbesondere, da aus diesen Abfallströmen Uran und Plutonium bereits abgetrennt wurden. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass

1. die in den Verglasungsanlagen hergestellten Borosilikatgläser nur schwer und nur mit aufwendigen Verfahren wiederauflösen wären,
2. die Minoren Actiniden dann nicht mit den heutigen hydrometallurgischen Verfahren abtrennbar wären, und
3. die in den verglasten Abfällen i. W. enthaltenen langlebigen Spalt- und Aktivierungsprodukte nicht effizient transmutierbar sind.

Zudem stellen die verglasten hoch radioaktiven Abfälle eine gezielt für die Endlagerung entwickelte Abfallform dar, deren Eignung als langzeitstabile Matrix für die tiefegeologische Endlagerung bereits in verschiedenen Langzeitsicherheitsbetrachtungen nachgewiesen wurde (vgl. z. B. [NAG 02], [HSK 05]).

Auch international ist die Anwendung von P&T auf verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle nicht etabliert und es finden hierzu auch praktisch keine Forschungsarbeiten statt. Nach [CEA 08] ist eine Abtrennung langlebiger Radionuklide aus bereits verglasten Abfällen im industriellen Maßstab aufgrund der erforderlichen technischen Entwicklungsschritte sowie hoher Investitions- und Betriebskosten als nicht-realistisch anzusehen. In [NNL 14] wird eine Anwendung von P&T auf bereits verglaste Abfälle aufgrund des hohen Aufwands bei sehr begrenztem Nutzen ebenfalls als unrealistische Option angesehen.

Daher wird nachfolgend im Rahmen dieses Gutachtens ausschließlich auf die Transmutation von Minoren Actiniden und Plutonium aus den in Deutschland anfallenden bestrahlten LWR-Brennelementen fokussiert.

2.2. Chancen und Risiken von P&T

Potenzielle Chancen und Risiken von P&T werden zum gegenwärtigen Zeitpunkt insbesondere in den folgenden Bereichen gesehen (vgl. u. a. [IAE 04], [NEA 11A], [ACA 13], [ESK 15]):

2.2.1. Chancen:

- Reduzierung des Volumens an endzulagernden Wärme entwickelnden Abfällen,
- Verringerung der Aktivität und Radiotoxizität der Abfälle im Endlager,
- Verminderung der (längerfristigen) Wärmegenerierung der Abfälle (nach einigen Jahrzehnten) und damit verbundene Reduktion der Wärmeleistung im Endlager,
- Möglichkeit zur verbesserten Konditionierung abgetrennter Spalt- und Aktivierungsprodukte (z. B. in keramischen Abfallformen),
- Reduzierung des Missbrauchsrisikos endgelagerter Abfälle durch Dritte,
- Innovationspotenziale in der Nukleartechnologie,
- Erschließung zusätzlicher Energiequellen,
- Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit,
- Schaffung hoch-qualifizierter Arbeitsplätze,
- Kompetenzerhalt,
- Sicherung von Einfluss in internationalen Organisationen sowie
- Mitwirkung an internationalen Forschungsprojekten.



2.2.2. Risiken:

- Fehlende technische Reife und Unsicherheiten über die Umsetzbarkeit der Technologie im großtechnischen Maßstab,
- hohe Persistenz möglicher Schäden durch ionisierende Strahlung im Falle eines Unfalls in einer P&T-Anlage,
- erhöhtes Missbrauchsrisiko durch Dritte für die Zeit der Anwendung von P&T (Proliferationsrisiko) und
- mangelnde gesellschaftliche Akzeptanz von neuen kerntechnischen Anlagen und deren längerfristigen Betriebs.

3. TECHNISCHE SACHVERHALTE UND NOTWENDIGKEITEN

Nachfolgend sind die technischen Sachverhalte und Notwendigkeiten zur Transmutation dargestellt. Nach Darstellung der in Deutschland zur Endlagerung anstehenden Mengen an hoch radioaktiven Abfällen (Abschnitt 3.1) werden zunächst die für die Transmutation erforderlichen Verfahrens- und Prozessschritte erläutert (Abschnitt 3.2), bevor in Abschnitt 3.3 der Entwicklungsstand der Anlagen bzw. Verfahren analysiert wird. Art, Mengen und Eigenschaften der im Rahmen der Transmutation anfallenden Zwischen-, End- und Nebenprodukte werden in Abschnitt 3.4 betrachtet. Die für einen Transmutationsbetrieb erforderlichen Infrastrukturen sowie Sicherungsmaßnahmen sind Gegenstand der Abschnitte 3.5 bzw. 3.6.

3.1. Abfallinventar in Deutschland

Die für die Transmutation erforderlichen Anlagengrößen und die erforderlichen Zeiträume werden durch die anfallenden Mengen an abgebrannten Brennelementen und hoch radioaktiven Abfällen sowie auch die erforderliche Anzahl an Transmutationszyklen wesentlich bestimmt. Für die in Deutschland anstehenden Mengen an abgebrannten Brennelementen und hoch radioaktiven Abfällen werden bereits seit Jahrzehnten Inventare und Prognosen erstellt, die durch den Beschluss zur Beendigung der Nutzung der Kernenergie zur Elektrizitätserzeugung nunmehr einen hohen Verlässlichkeitsgrad erreicht haben. Die Inventare an Wärme entwickelnden bzw. hoch radioaktiven Abfällen in Deutschland setzen sich im Wesentlichen zusammen aus

- bestrahlten Brennelementen aus Leichtwasserreaktoren (LWR, d. h. Siedewasserreaktoren (SWR) bzw. Druckwasserreaktoren (DWR) westlicher Bauart sowie aus WWER-Reaktoren sowjetischer Bauart (Kernkraftwerke Greifswald (KGR) und Rheinsberg (KKR)),
- HAW-Glaskokillen (CSD-V) mit verglasten Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung,
- verglasten mittelradioaktiven Abfällen, d. h. verglaste Spül- und Dekontaminationslösungen aus der Wiederaufarbeitung (CSD-B),
- kompaktierten Hülsen und Strukturteilen aus der Wiederaufarbeitung (CSD-C), die in Zukunft aus Frankreich zurückgeführt werden,
- bestrahlten Brennelementkugeln aus den Hochtemperaturreaktoren AVR (Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor, Jülich) und THTR (Thorium-Hochtemperaturreaktor, Hamm-Uentrop), sowie
- bestrahlten Brennelementen aus Prototyp- und Forschungsreaktoren.

Über die zeitliche Entwicklung und Prognose des Gesamtaufkommens an radioaktiven Abfällen wird in Dreijahreszeiträumen in den nationalen Berichten, die die Bundesregierung für die Überprüfungs-konferenzen der *Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management* erstellt, berichtet (vgl. u. a. [BMU 14]). Des Weiteren wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) als Grundlage für die Entsorgungsplanung und die Erstellung des „Nationalen Entsorgungsprogramms“ [BMU 15A] ein Verzeichnis radioaktiver Abfälle [BMU 15B] erstellt, das einen Überblick über den Bestand der in Deutschland angefallenen endzulagernden, bzw. endgelagerten radioaktiven Abfälle und bestrahlten Brennelemente zum Stichtag 31.12.2014 sowie eine Prognose über das erwartete radioaktive Abfallaufkommen bis zum Jahr 2080 gibt. Dieses Verzeichnis soll ebenfalls alle drei Jahre aktualisiert werden [BMU 15B].

Nach Angaben des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) [BFS 15A] betrug der kumulative Anfall an abgebrannten Brennelementen (BE) aus dem Betrieb von Leistungsreaktoren (Leistung > 50 MW) in Deutschland zum 31.12.2013 etwa 14.886 Mg SM¹. Davon gingen gemäß [BFS 15A] bis zum 01.06.2005 etwa 6.662 Mg SM zur Wiederaufarbeitung nach Karlsruhe (WAK), Frankreich (AREVA NC, vormals COGEMA, La Hague) und Großbritannien (Sellafield Ltd vormals BNFL, Sellafield).

Gemäß [BMU 15B] betrug der Bestand abgebrannter Brennelemente aus deutschen Leistungsreaktoren, die zum Stichtag 31.12.2014 in Deutschland lagerten und endgelagert werden müssen, etwa 8.380 Mg SM. Der Bestand an aus dem europäischen Ausland zurückgenommenen bzw. im Inland angefallenen verglasten hoch radioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung, die sich im Zwischenlager Gorleben und dem Zwischenlager Nord befinden, wird in [BMU 15B] mit 3.164 Kokillen in 113 Behältern angegeben. Die angefallenen und noch endzulagernden Brennelemente aus deutschen Versuchs- und Demonstrationsreaktoren (u. a. AVR, THTR) werden in 461 Behältern im Zwischenlager Ahaus, im Forschungszentrum Jülich und im Zwischenlager Nord gelagert [BMU 15B]. Nach [BFS 15A] wurden von den bis zum 31.12.2013 angefallenen ca. 190 Mg SM aus Versuchs- und Demonstrationsreaktoren ca. 180 Mg SM wiederaufgearbeitet (vgl. auch [BMU 14]). Die aus Forschungsreaktoren stammenden Mengen an bestrahlten Brennelementen sind um mehrere Größenordnungen geringer als die zu entsorgende Menge aus Leistungsreaktoren und beträgt nach [BFS 15A] (Stichtag 31.12.2013) ca. 1 Mg SM.

Insgesamt wird nach [BMU 15A] und [BMU 15B] davon ausgegangen, dass bis zum Ende des Betriebs der Leistungsreaktoren etwa 10.500 Mg SM ([BFS 15B]: 10.550 Mg SM) in Form abgebrannter Brennelemente (einschließlich der bereits angefallenen) anfallen werden, die endgelagert werden müssen. Aus den Nichtleistungsreaktoren (d. h. Versuchs-, Demonstrations- und Forschungsreaktoren) wird eine Abfallmenge im Umfang von 10 bis 12 Mg SM erwartet [BMU 15A] und [BMU 15B]. In Tabelle 3.1 sind die Prognosen (einschließlich des Bestands) der Mengen an in Deutschland endzulagernden radioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung entsprechend [BMU 15A] und [BMU 15B] aufgeführt.

Tabelle 3.1: Prognose der insgesamt anfallenden Mengen an radioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung, die in Deutschland endgelagert werden müssen (nach [BMU 15A,B]).

Abfallart	Anzahl Kokillen	Anzahl Behälter
Hoch radioaktive verglaste Abfälle aus Frankreich (CSD-V)	3.024	108
Mittelradioaktive verglaste Abfälle aus Frankreich (CSD-B)	140	5
Hochdruckkompaktierte mittelradioaktive Abfälle ¹⁾ aus Frankreich (CSD-C)	4.104	152
Hoch radioaktive verglaste Abfälle aus dem Vereinigten Königreich ²⁾	571	21
Hoch radioaktive verglaste Abfälle aus der WAK Karlsruhe	140	5
Gesamt:	7.979	291

¹⁾ zerkleinerte Hüllrohre und Strukturteile

²⁾ Kokillenmaße identisch mit CSD-V

¹ Mg: Megagramm (10⁶ g = 1 Tonne) SM: Schwermetall (Uran und Plutonium) im Brennstoff.

Die Prognosen zum Gesamtanfall endzulagernder Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle [BFS 15B] enthalten zudem Abschätzungen zu den Volumina der Abfallgebinde. Demnach beträgt das Bruttovolumen an insgesamt anfallenden hoch radioaktiven Abfällen (d. h. bestrahlten Brennelementen und Wiederaufarbeitungsabfällen) ca. 28.100 m³ (vgl. Tabelle 3.2). Dabei ist anzumerken, dass in [BFS 15B] im Vergleich zu [BMU 15A,B] eine geringfügig größere Menge an bestrahlten Brennelementen aus Leistungsreaktoren (10.550 Mg SM anstatt 10.500 Mg SM) sowie weniger verglaste hoch radioaktive Abfälle (3.719 statt 3.735 Kokillen) in Ansatz gebracht werden.

Tabelle 3.2: Prognose des Gesamtanfalls endzulagernder Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland nach [BFS 15B]).

Abfallart	Menge / Behälter	Abfallgebindevolumen [m ³]
aus der Wiederaufarbeitung		
Hoch radioaktives (HAW) Glas (CSD-V)	3.719 Kokillen	ca. 670
Mittelradioaktives (MAW) Glas (CSD-B)	140 Kokillen	ca. 25
Kompaktierte Abfälle (CSD-C) ¹⁾	4.104 Kokillen	ca. 740
direkt endzulagernde Brennelemente		
aus Leistungsreaktoren	10.550 Mg SM ¹⁾ (in POLLUX [®] Behältern)	21.000
aus PKA/IKA ²⁾	2.600 Mosaik II Behälter	3.400
aus THTR/AVR	457 CASTOR-THTR/AVR Behälter	1.970
aus Forschungsreaktoren	65 CASTOR-MTR 2 Behälter	160
sonstige		
WAK Karlsruhe u. a.	ca. 900 200-Liter Fässer	180
Gesamt:		28.100

¹⁾ Umrechnungsfaktor bei Verpackung in POLLUX[®]-Behälter: 1,96 m³/Mg SM [Bfs 15B]

²⁾ Pilotkonditionierungsanlage/Industrielle Konditionierungsanlage

3.2. Technische Schritte und Anlagen im Prozess der Transmutation

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen technischen Schritte, die zur Anwendung der Transmutation notwendig sind, und die benötigten Anlagen allgemein beschrieben, bevor in Abschnitt 3.3 der Entwicklungsstand der Schritte und Anlagen detaillierter dargestellt wird.

Generell sind im Rahmen einer P&T-Strategie zur Behandlung von bestrahlten Brennelementen aus Leistungsreaktoren (z. B. LWR) im Prinzip folgende technische Schritte erforderlich, die – abgesehen von den Transporten – in kerntechnischen Anlagen durchgeführt werden müssen (vgl. u. a. [NAS 15]):

- Partitionierung des LWR-Brennstoffs (Abtrennung von Uran, Plutonium und Minoren Actiniden),
- Herstellung des Transmutationsbrennstoffs,
- Transmutation der Radionuklide in einem schnellen Neutronenspektrum,
- Partitionierung des Transmutationsbrennstoffs und Refabrikation,
- Konditionierung, Zwischenlagerung und Endlagerung der Abfälle.

Zudem werden die aktuell international diskutierten Strategien und Szenarien der Transmutation kurz vorgestellt.

3.2.1. Partitionierung der bestrahlten LWR-Brennelemente

Die direkte Transmutation von bestrahlten LWR-Brennelementen ist nicht möglich, zunächst müssen die zu transmutierenden Stoffe aus diesen Brennelementen abgetrennt werden. Diese Abtrennung wird in einer großtechnischen Anlage durchgeführt, die mit den heute betriebenen Wiederaufarbeitungsanlagen (z. B. La Hague, Frankreich) vergleichbar ist.

Das Verfahren besteht aus folgenden prinzipiellen Schritten ([GLA 15], [TAY 15]):

- Antransport der bestrahlten Brennelemente aus Zwischenlagern.
- Handhabung und Öffnen der Transport- und Lagerbehälter und Entnahme der Brennelemente.
- Ggf. weitere Zwischenlagerung für einige Jahre zur weiteren Abkühlung.
- Zerlegung der Brennelemente: Separierung der Brennstäbe von den Strukturteilen.
- Zerkleinern der Brennstäbe.
- Auflösung des abgebrannten Brennstoffs aus den Hülsenabschnitten.
- Chemische Abtrennung von Uran, Plutonium und den Minoren Actiniden mit Hilfe eines geeigneten hydrometallurgischen oder pyrometallurgischen Verfahrens, abhängig von der gewählten Strategie zur Transmutation.
- Reinigung der Produkte und Überführung in feste Ausgangsverbindungen für die Herstellung der Transmutationsbrennstoffe.
- Reinigung und Rezyklierung von Prozessmedien.
- Abfallbehandlung und Konditionierung für die Endlagerung.
- Zwischenlagerung der Produkte und konditionierten Abfälle bis zur weiteren Verwendung.
- Abtransport der Produkte und konditionierten Abfälle.

3.2.2. Herstellung der Transmutationsbrennstoffe

Auch die Herstellung der Transmutationsbrennstoffe hängt wesentlich von der gewählten Strategie der Transmutation ab, insbesondere ob ein uranhaltiger oder ein uranfreier Transmutationsbrennstoff verwendet wird.

Die chemische Konversion der zu transmutierenden Elemente in ein festes und transportables Produkt findet hierbei direkt im Anschluss an die chemische Abtrennung noch in der Partitionierungsanlage statt. Dieses stellt das Ausgangsmaterial zur Herstellung des Transmutationsbrennstoffs dar. Die Herstellung des Transmutationsbrennstoffs findet dann in einer anderen Anlage statt, die sich aber auf demselben Gelände der Partitionierungsanlage befinden kann. Je nach gewählter Strategie wird der Brennstoff hergestellt unter Einbau der zu transmutierenden Radionuklide in entweder eine uranhaltige oder eine uranfreie Matrix. Insbesondere bei hohen Beladungen an Minoren Actiniden muss diese Brennstoffherstellung wegen der hohen Gamma- und Neutronenstrahlung hinter schwerer Abschirmung fernhantiert erfolgen.

Der Brennstoff wird dann in geeignete Hüllrohre eingefüllt, die Brennstäbe verschlossen und zu neuen Brennelementen zusammengefügt. Diese werden dann zur Transmutationsanlage transportiert.

3.2.3. Transmutation

Die Transmutation der Radionuklide mit schnellen Neutronen kann entweder in Leistungsreaktoren mit schnellem Neutronenspektrum der vierten Generation oder in speziell dafür ausgelegten Anlagen durchgeführt werden. Das könnten je nach gewählter Strategie beschleunigergetriebene unterkritische Systeme (engl. *accelerator driven systems*, ADS) oder Salzschnmelzenreaktoren (engl. *molten salt reactors*) sein.

Studien haben zwar gezeigt, dass die Transmutation von Minoren Actiniden auch in einem Leichtwasserreaktor der heutigen Bauart möglich scheint, allerdings nur mit geringen Mengen an Transuranen im Reaktor aufgrund negativer Rückkopplungen auf die Reaktorsicherheit [NEA 99].

3.2.4. Partitionierung des Transmutationsbrennstoffs und Refabrikation

Da aus physikalischen Gründen eine vollständige Transmutation der Radionuklide nicht in einem einzigen Zyklus erfolgen kann, müssen die in der Transmutationsanlage eingesetzten Brennstoffe nach der Bestrahlung erneut wiederaufgearbeitet werden. Dabei werden die nicht transmutierten Transuranelemente wie oben beschrieben erneut von Spaltprodukten separiert und für weitere Transmutationszyklen entsprechend rezykliert. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die bestrahlten Transmutationsbrennstoffe vor ihrer erneuten Partitionierung eine Zeit lang zwischengelagert werden müssen, um Wärmeleistung und Radioaktivität zu verringern.

Je nach gewählter Strategie kann der Transmutationsbrennstoff hohe Gehalte an Transuranelementen aufweisen und auch hohe Abbrände (d. h. sehr hohe Aktivitätsgehalte). Aufgrund dessen müsste unter Umständen ein anderes Verfahren zur Partitionierung des Transmutationsbrennstoffs eingesetzt werden als zur Partitionierung der Leichtwasserreaktorbrennelemente. Zudem müssen möglicherweise unterschiedliche Verfahren zur Abtrennung von Strukturteilen und zur Abtrennung und möglichen Rezyklierung der Brennstoffmatrix eingesetzt werden.

Bei einem Salzschnmelzenreaktor kann die Abtrennung der Spaltprodukte und Einspeisung frischen Brennstoffs im laufenden Betrieb erfolgen.

3.2.5. Konditionierung, Zwischenlagerung und Endlagerung der Abfälle

Im gesamten Prozess der Transmutation fallen Reststoffe an, die entsprechend konditioniert, zwischen- und endgelagert werden müssen.

Im Partitionierungsprozess werden die in den Leichtwasserreaktorbrennelementen enthaltenen sowie die bei der Transmutation erzeugten Spaltprodukte abgetrennt. Zudem fallen im chemischen Abtrennprozess Reststoffe an, die von der gewählten Art des Partitionierungsprozesses abhängen. Aufgrund der Mehrfach-Rezyklierung des Transmutationsbrennstoffs kommt es zu geringen Transuranverlusten in die Reststoffströme der chemischen Prozesse, insbesondere beim Auflösen der bestrahlten Brennstoffe.

Bei dem Verfahren fallen mehrere Abfallströme an:

- Spaltprodukte und – aufgrund von Verlusten – geringe Mengen Transuranelemente, für die die Verglasung das gegenwärtig etablierte Behandlungsverfahren darstellt und die als hoch radioaktiv bzw. Wärme entwickelnder Abfall entsorgt werden müssen.

- Waschlösungen aus der Prozessführung und Reinigung der Anlage: Diese können eingedampft werden und entweder ebenso verglast oder in anderer Form verfestigt werden.
- Strukturteile der Brennelemente: Diese können kompaktiert werden und müssen ebenfalls als hoch radioaktiver bzw. wärmentwickelnder Abfall entsorgt werden.
- Bei Verwendung eines Transmutationsbrennstoffs mit inerte Matrix muss diese spätestens zum Ende der Transmutation für die Endlagerung konditioniert werden.
- Schwach- und mittlradioaktive Abfälle aus dem Betrieb der Anlage (Filter, Schutzkleidung, Putzlappen etc.).

Beim Betrieb der Transmutationsanlage fallen vor allem schwach- und mittlradioaktive Abfälle aus dem Betrieb der Anlage an. Nur beim Salzschnmelzenreaktor mit Partitionierung im laufenden Betrieb fallen teilweise auch hoch radioaktive Abfallströme an.

Nach Beendigung der Transmutation müssen die verwendeten Anlagen und Reaktoren dekontaminiert und zurückgebaut werden. Dabei fallen die damit verbundenen Abfallströme an, die hauptsächlich schwach- und mittlradioaktiv sind, allerdings relativ große Volumina darstellen.

Die im gesamten Prozess der Transmutation anfallenden Abfälle werden in für die Zwischen- und Endlagerung optimierter Form konditioniert. Diese Abfälle werden dann bis zur Einlagerung in das entsprechende Endlager zwischengelagert.

3.2.6. Strategien und Szenarien zur Transmutation

Im internationalen Kontext werden eine Reihe von P&T-Konzepten diskutiert (u. a. [NIS 08], [NEA 11A], [NEA 13A]), die unterschiedliche Zielsetzungen und Strategien verfolgen. Dabei spielen die zu transmutierenden Abfallbestandteile, die verwendeten Anlagen zur Transmutation, die gesellschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen, und die gesamte Strategie der zivilen Nutzung der Kernkraft und des verwendeten Brennstoffkreislaufs eine Rolle. Dies wird für ausgewählte Länder in Abschnitt 4.1 näher erläutert.

Als mögliche Transmutationssysteme werden international kritische Reaktorsysteme mit thermischem Neutronenspektrum (Leichtwasser- und Hochtemperaturreaktoren), schnelle kritische Reaktorsysteme der vierten Generation, unterkritische beschleunigergetriebene Systeme und Salzschnmelzenreaktoren diskutiert. Die Funktionsweisen und Vor- und Nachteile der verschiedenen Konzepte werden ausführlich u. a. in [NEA 99] und OECD-NEA initiierten Konferenzen (u. a. [NEA 13B]) diskutiert.

Die P&T-Optionen, die im internationalen Rahmen untersucht werden, lassen sich in drei grundsätzlichen Strategien zusammenfassen.

1. Kontinuierliche Nutzung und Entwicklung der Kernenergie unter (zukünftigem) Einsatz von Reaktoren der vierten Generation (z. B. Frankreich). Dabei stehen die Erzeugung von elektrischem Strom und die Minimierung der entstehenden Menge an Wärme entwickelnden Abfällen und somit effizientere Nutzung eines zukünftigen Endlagers im Vordergrund. Plutonium, und teilweise auch Americium, werden als Ressource betrachtet und in schnellen Reaktorsystemen als Brennstoffe verwendet.
2. Reduzierung des Inventars an Minoren Actiniden und fortgesetzte Nutzung von Leichtwasserreaktoren. Hierbei wird Plutonium ebenfalls als Ressource für die Nutzung in Leichtwasserreakto-

ren betrachtet. Das Inventar an Minoren Actiniden wird durch Transmutationsanlagen reduziert, wobei hier unterschiedliche Anlagen in Betracht kommen. Diese Strategie wird oft als „*double strata strategy*“ bezeichnet.

3. Langfristiger Ausstieg aus der Kernenergienutzung und Minimierung des Transuraninventars (Plutonium und Minore Actinide) durch den Einsatz von Transmutationsanlagen. Hierbei bieten sich vor allem unterkritische, beschleunigergetriebene Anlagen an, aber auch Reaktoren mit schnellem Neutronenspektrum der vierten Generation werden diskutiert.

Zudem wird zwischen einer sogenannten regionalen und einer nationalen Lösung unterschieden (vgl. [ACA 13]). Bei der nationalen Lösung finden alle Verfahrensschritte im Inland statt, während bei der länderübergreifenden regionalen Lösung (vgl. [PAT 08], [ACA 13]) alle oder einige der zur Transmutation erforderlichen Verfahrensschritte im europäischen Ausland durchgeführt werden.

3.3. Entwicklungsstand der notwendigen Schritte und Anlagen

Zur Umsetzung eines nationalen oder regionalen P&T-Konzepts sind eine Reihe von Prozessschritten und Anlagen u. a. zur Partitionierung, zur Brennstoffherstellung, zur Transmutation und zur Abfallkonditionierung erforderlich (siehe Abschnitt 3.2.1). Der Entwicklungsstand für die verschiedenen Verfahrensschritte und Anlagen ist sehr unterschiedlich. Für die ersten Prozessschritte der Partitionierung von bestrahlten Brennelementen (Zerlegung der Brennelemente, Auflösen des Brennstoffs und Abtrennung von Uran und Plutonium) sowie zur Konditionierung von Wiederaufarbeitungsabfällen existieren seit längerem schon großtechnische Anlagen (z. B. in Sellafield, England und La Hague, Frankreich), wobei die angewendeten Verfahren einer kontinuierlichen Weiterentwicklung unterliegen.

Demgegenüber wurden diverse weitere für P&T erforderliche Verfahrensschritte wie die Separierung der weiteren zu transmutierenden Radionuklide (insbesondere der Minoren Actinide), die Herstellung von Transmutationstargets oder entsprechenden Brennstoffen und deren erneute Partitionierung für weitere Transmutationszyklen bislang lediglich im Labormaßstab erprobt.

Die Transmutation von langlebigen Radionukliden (insbesondere Actiniden) wird bereits seit einigen Jahrzehnten im internationalen Rahmen intensiv studiert. Dazu wurden verschiedenen Konzeptstudien durchgeführt und bewertet (u. a. [RED 08], [PAT 08], [NEA 13A], [ACA 13])). Die Fachwelt ist sich einig, dass eine effiziente Transmutation nur mit einem schnellen Neutronenspektrum gelingt. Vorgeschlagen wurde dabei:

- der Einsatz von schnellen, kritischen Reaktoren, in denen die zu transmutierenden Radionuklide Bestandteile des Brennstoffes in den Brennelementen sind (homogene Rezyklierung) oder
- der Einsatz von schnellen, kritischen Reaktoren, in denen die zu transmutierenden Radionuklide in separaten Transmutationsbrennstoffen in der Peripherie des Reaktorkerns bestrahlt werden sowie
- der Einsatz von unterkritischen beschleunigergetriebenen Systemen, in denen die Radionuklide in speziellen Targets konzentriert transmutiert werden.

Als transmutationsoptimierte Alternative bietet sich auch die Nutzung eines Systems mit flüssigem Brennstoff, z. B. eines Salzschnmelzenreaktors an [ACA 13].

Es ist aber festzuhalten, dass für jedes der oben aufgeführten Konzepte das Funktionsprinzip sowie das Transmutationspotential prinzipiell im Labormaßstab, bzw. in kleinen Demonstrationsanlagen nachgewiesen werden konnte. Allerdings existiert weltweit keine großtechnische Transmutationsanlage. In Belgien gibt es konkrete Pläne für den Bau einer europäischen experimentellen Demonstrationsanlage vom Typ ADS (MYRRHA). Frankreich plant mittelfristig (2025) den Bau eines schnellen natriumgekühlten Reaktorsystems (ASTRID) u. a. auch für Transmutationszwecke. In Russland sind ebenfalls schnelle Reaktoren in Planung (BN-1200) bzw. bereits in der Testphase (BN-800).

In den folgenden Abschnitten wird der Entwicklungsstand der einzelnen Prozessschritte und Anlagen näher beschrieben.

3.3.1. Entwicklungsstand der trennchemischen Methoden

3.3.1.1. *Hydrometallurgische Trennverfahren*

Der PUREX-Prozess ist heute das Standardverfahren zur Wiederaufarbeitung von Leichtwasserreaktor (LWR) Brennstoffen. Er hat eine großtechnische Reife erlangt und wird seit 60 Jahren in Ländern wie Frankreich, Japan, Großbritannien, Russland und Indien betrieben ([KOC 91], [TAY 15]).

Hauptziele der Technologie sind:

- Reduzierung des Volumens und der Radiotoxizität des hochaktiven Abfalls. Gegenwärtig wird der hochaktive Abfallstrom verglast und in Kokillen abgefüllt.
- Ressourcenschonung: Plutonium wird in MOX-Brennstoff rezykliert, Uran kann noch für LWRs oder schnelle Reaktoren genutzt werden.

Dabei werden heutzutage Abtrennraten für Uran und Plutonium von über 99,98 % erzielt [IAE 08].

Zurzeit wird auch an innovativen Technologien (COEX, NUEX, UREX) zur Wiederaufarbeitung gearbeitet, die auf dem PUREX-Prozess basieren [TAY 15]. Diese sind bereits weit entwickelt und können bald großtechnisch eingesetzt werden. Ziele sind eine erhöhte Proliferationssicherheit, da keine reinen Plutoniumströme anfallen. Diese Prozesse sind in ihrer Entwicklung weit fortgeschritten und daher bereits für eine zeitnahe industrielle Implementierung geeignet. Mit Hilfe eines modifizierten PUREX-Verfahrens gelingt auch die Abtrennung des Neptuniums. 2007 berichteten Wissenschaftler von der CEA, Marcoule (Frankreich) über eine erfolgreiche PUREX-Demonstration im halbertechnischen Maßstab, in der über 99 % des Neptuniums im ersten Extraktionszyklus abgetrennt werden konnten [BAR 07].

Den Minoren Actiniden Americium und Curium hat man bisher keine große Beachtung gewidmet. Diese gelangen zusammen mit den meisten Spaltprodukten in den flüssigen, hoch aktiven Abfall (PUREX-Raffinat), der zurzeit für die Zwischen- und Endlagerung zuerst konzentriert, anschließend kalziniert und danach in Glas eingeschmolzen wird. Die Eignung hydrometallurgischer Partitionierungsprozesse zur Abtrennung der Minoren Actiniden ließ sich bereits erfolgreich im halbertechnischen Maßstab mit echten Brennstofflösungen demonstrieren. Ihre Realisierung im industriellen Maßstab in Form zusätzlicher Trennstufen in modifizierten Wiederaufarbeitungslagen erscheint in naher Zukunft machbar.

Die meisten Partitionierungsstrategien, die zurzeit weltweit untersucht werden sind mit dem PUREX-Prozess kompatibel und beruhen auf einem zweistufigen Schema:

1. Abtrennung von Uran, Plutonium und eventuell Neptunium nach dem PUREX oder einem ähnlichen Verfahren und
2. weitere Abtrennung von Americium und/oder Curium aus dem Abfallstrom dieses Prozesses.

Eine besondere technische Schwierigkeit stellt hierbei allerdings die Trennung von Americium und Curium von den Lanthaniden dar, da diese ähnliche chemische Eigenschaften aufweisen und die Trennung daher anspruchsvoll ist. Die Trennung ist aber aus folgenden Gründen notwendig:

- Etwa ein Drittel der Spaltprodukte sind Lanthaniden.
- Das Massenverhältnis Lanthaniden/Actiniden ist ungünstig (großer Überschuss an Lanthaniden).
- Einige Lanthanide (z. B. Gadolinium) haben sehr große Neutroneneinfangquerschnitte und wirken daher als sogenannte Neutronengifte bei der Transmutation, d. h. sie fangen Neutronen ein und vermindern dadurch die Effizienz des Transmutationsprozesses.
- Lanthaniden bereiten Probleme bei der Brennstoffherstellung.

Daher wurden bis vor ca. 10 Jahren vor allem mehrstufige Trennprozesse entwickelt, neuere Entwicklungen gehen aber hin zu einstufigen Trennprozessen, bei denen die Minoren Actinide direkt aus dem PUREX-Raffinat abgetrennt werden können [NAS 06]. Eine Übersicht über jüngste Entwicklungen wird in [TAY 15] gegeben. Diese Prozesse wurden bisher hauptsächlich im Labormaßstab demonstriert, in einigen Fällen mit echten Brennstofflösungen und nur in wenigen Fällen im halbtechnischen Maßstab.

Die Herstellung von Transmutationsbrennstoffen mit Minoren Actiniden wird aufgrund der hohen Beta-, Gamma- und insbesondere der hohen Neutronendosis von Curium erschwert und erfordert eine fernhantierte Fabrikation hinter schwerer Abschirmung. Da Curium weder zur Langzeitradiotoxizität noch zur Langzeitwärmeleistung signifikant beiträgt, sind vielversprechende Prozesse zur Americium/Curium-Trennung sowie zur selektiven Extraktion von Americium aus dem PUREX-Raffinat in Entwicklung [TAY 15].

In Europa wurde die hydrometallurgische Abtrennung von Minoren Actiniden seit den frühen 1990er Jahren im Rahmen diverser europäischer und internationaler Projekte (NEWPART, PARTNEW, EUROPART, ACSEPT, SACSESS) vorangetrieben und die Entwicklungen auf dem Gebiet hochselektiver Extraktionsreagenzien sind sehr erfolgreich (vgl. [BOU 11], [MOD 15]). Auf flüssig-flüssig-Extraktion basierende Abtrennverfahren könnten den bereits großtechnisch verfügbaren PUREX-Prozess mittelfristig erweitern. Ihre Funktion konnte in heißen Labortests demonstriert werden. Dabei lagen die Abtrennverluste in den eigentlichen Trennprozessen weit unter 0,1 %. Auch grundlegende Untersuchungen haben zu einem besseren Prozessverständnis geführt und sind die Basis für die Weiterentwicklung der Extraktionsliganden und für die Optimierung der Abtrennprozesse. Die technische Realisierung dieser Prozesse ist sehr weit fortgeschritten und die großtechnische Implementierung erscheint daher zeitnah möglich, das heißt innerhalb weniger Jahrzehnte.

3.3.1.2. *Pyrometallurgische Trennverfahren*

Seit mehr als 50 Jahren werden pyrometallurgische Verfahren als Alternative zur hydrometallurgischen Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennstoffen entwickelt. Pyrometallurgische Verfahren basieren auf elektrochemischen Methoden wie Elektrolyse, Elektroraffination oder reduktiver

Extraktion in Hochtemperatur-Salzschmelzen. In einigen Ländern (insbesondere Russland, Japan, USA, Südkorea) werden pyrometallurgische Verfahren untersucht, bei denen Uran, Plutonium und die Minoren Actinide durch elektrolytische Fraktionierung aus Salzschmelzen abgetrennt werden. Ein wesentlicher Vorteil pyrometallurgischer Trennverfahren liegt in der guten radiolytischen Stabilität der Verfahrensmedien (Metall- und Salzschmelzen). Dies ist besonders vorteilhaft für die Aufarbeitung kurz gekühlter Brennstoffe mit hohem Abbrand (wie zum Beispiel Transmutationstargets). Für alle nichtwässrigen Verfahren sind die Abwesenheit des Reaktionsmediums Wasser und die Anwendung hoher Temperaturen kennzeichnend. Bei den chemischen oder physikalischen Trennmethode verbleiben die Kernbrennstoffe entweder im metallischen Zustand oder es erfolgt eine „trockene“ Konversion in einem geeigneten chemischen Medium (z. B. Salzschmelzen). Bei allen Varianten werden infolge der hohen Prozesstemperaturen die gasförmig vorliegenden Spaltprodukte gänzlich und die leicht flüchtigen festen Spaltprodukte teilweise freigesetzt und müssen aus dem Abgas entfernt werden. Die Folge ist eine sehr aufwändige Abgasbehandlung. Vorgesehen ist in fast allen Fällen eine Rezyklierung der eingesetzten Metall- und Salzschmelzen durch fraktionierte Destillation bzw. Sublimation.

Ein weiteres Merkmal sind die meist erheblich niedrigeren Dekontaminationsfaktoren im Vergleich zu den hydrometallurgischen Prozessen. Daher stellte man sich von vornherein auf eine fernbediente und strahlenabgeschirmte Fabrikation neuer Brennelemente ein. Jedoch befinden sich die pyrometallurgischen Verfahren, verglichen mit den hydrometallurgischen Verfahren, in einem weniger fortgeschrittenen Stadium und es besteht noch größerer Forschungsbedarf. Die industrielle Implementierung dieser Hochtemperaturprozesse wird aufgrund der teilweise unzureichenden Trenneffizienz und einer Reihe technischer Probleme (z. B. Materialkorrosion) noch einige Jahrzehnte benötigen. In einem erst kürzlich von der OECD/NEA veröffentlichten Statusbericht mit dem Titel „Pyrochemical Separations in Nuclear Applications“ [NEA 15A] finden sich detaillierte Informationen und weiterführende Literatur zu:

- nationalen Programmen zur pyrometallurgischen Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen,
- vergangenen und laufenden internationalen Kooperationen auf diesem Gebiet,
- zukünftigen Forschungsschwerpunkten zur Weiterentwicklung, sowie
- möglichen zukünftigen Anwendungen dieser Technologie.

3.3.1.3. Existierende Wiederaufarbeitungsanlagen

Weltweit gibt es vier große Anlagen für die zivile Wiederaufarbeitung von abgebrannten oxidischen Brennstoffen aus LWR Reaktoren mit einer Kapazität > 100 Mg SM pro Jahr (Mg SM/a), von denen sich zwei in Europa befinden:

- La Hague in Frankreich (max. Kapazität: 1.700 Mg SM/a),
- Thorp in Großbritannien (max. Kapazität: 1.200 Mg SM/a),
- Rokkasho Mura in Japan (max. Kapazität: 1.200 Mg SM/a),
- Mayak in Russland (max. Kapazität: 400 Mg SM/a).

In der Vergangenheit wurden auch kleinere Pilotanlagen betrieben (1 bis 100 Mg SM/a), um die Prozesstechnologie der kommerziellen Anlagen zu entwickeln. Die meisten Anlagen wurden jedoch in den 1960er Jahren gebaut und werden zurzeit zurückgebaut. Neben diesen großen Anlagen stehen in einigen Ländern (siehe Abschnitt 4.1) nur noch Forschungsanlagen zur Verfügung, in denen

fortgeschrittene wässrige und pyrometallurgische Trennverfahren an bestrahltem Brennstoff (wenige hundert Gramm bis einige Kilo pro Jahr) getestet werden können.

3.3.2. Entwicklungsstand der Fabrikation von Transmutationsbrennstoffen

3.3.2.1. *Arten von Transmutationsbrennstoffen*

Gegenwärtig werden hauptsächlich oxidische Brennstoffe in Kernkraftwerken zur Stromproduktion eingesetzt. In Abhängigkeit von der zum Einsatz kommenden Strategie zur Transmutation der langlebigen Actiniden und des gewählten Transmutationssystems, wurden in den vergangenen Jahren verschiedene neue Brennstofftypen und Targets untersucht und im Reaktorbetrieb (sowohl in thermischen, wie auch schnellen Reaktoren) getestet. Dabei wurden oxidische Brennstoffe verwendet, aber auch Carbide, Nitride, Metalle und sogenannte Inert-Matrix-Brennstoffe sind zur Transmutation von Minoren Actiniden vorgeschlagen worden. Die Herausforderungen bei der Entwicklung eines Transmutationsbrennstoffs liegen vor allem in:

1. Brennstofffertigung unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften der Minoren Actiniden (MA). Umgang mit Brennstoffen hoher Strahlenbelastung aufgrund des hohen Anteils an MA.
2. Um signifikante Transmutationsraten zu erzielen, sind hohe Abbrände (bis zu 250 GWd/Mg SM) erforderlich. Dies setzt hohe Ansprüche an den Brennstoff bezüglich der Spaltgasfreisetzung, des Brennstoffschwellverhaltens sowie der chemischen und mechanischen Wechselwirkung des Brennstoffs mit dem Hüllrohrmaterial. Dabei werden die Ansprüche an die bisherigen Reaktor-brennstoffe für schnelle Reaktoren bei weitem überschritten.
3. Bestrahlungstests zum Betriebsverhalten dieser Brennstoffe in Forschungsanlagen mit passendem Neutronenspektrum.
4. Komplexe Abtrennverfahren für die bestrahlten Transmutationsbrennstoffe. Diese unterscheiden sich deutlich von den bisherigen Abtrennverfahren aufgrund hoher Beladungen mit Transuranelementen und evtl. eines großen Anteils an inerter Matrix.

3.3.2.2. *Fabrikationsverfahren*

Die Abtrennung von Uran und Plutonium und die Fabrikation von MOX-Brennstoff ist Stand der heutigen Technik im industriellen Maßstab. Bei den fortschrittlichen Brennstoffkreisläufen und nuklearen Systemen zur Transmutation unterscheidet man die homogene und die heterogene Rezyklisierung.

Bei der homogenen Rezyklisierung, die vornehmlich in schnellen Reaktoren der vierten Generation (GenIV) erfolgen soll, werden dem uranbasierten Brennstoff Plutonium und kleinere Anteile von Minoren Actiniden (2 bis 5 %) beigemischt, so dass sich das Verhalten des Brennstoffes unter Berücksichtigung der Sicherheitsaspekte nicht wesentlich vom Standard-MOX-Brennstoff unterscheidet. Die Anwesenheit der Minoren Actinide erfordert wegen der dann weit erhöhten Gamma- und Neutronendosis sowie der erhöhten Wärmeentwicklung neue Herstellprozesse des frischen Brennstoffs, die fernhantiert hinter schwerer Abschirmung durchgeführt werden müssen [PIL 03]. Diese Herstellprozesse sind zwar im Labormaßstab demonstriert, im großtechnischen Maßstab aber noch nicht abschließend entwickelt worden und es bedarf weiterer intensiver F&E-Arbeiten zur Herstellung, Handhabung und zum Transport dieser Brennstoffe.

Bei der heterogenen Rezyklierung der Minoren Actinide soll konventioneller Brennstoff (z. B. MOX mit einem hohem Plutoniumanteil) der Hauptbrennstoff sein und die Transmutation der MA in den Randzonen eines schnellen Reaktorkerns erfolgen. Dabei werden plutoniumfreie Transmutationstargets mit einem deutlich höheren Anteil an MA (bis zu 30 % MA) eingesetzt. Diese könnten in kleineren technischen Einrichtungen hinter schwerer Abschirmung hergestellt werden.

Für die Transmutation in beschleunigergetriebenen Anlagen favorisiert man die Herstellung spezieller Inertmatrixbrennstoffe (engl. *Inert Matrix Fuel*, IMF) mit einem hohen Gehalt an Plutonium und Minoren Actiniden. Um die Netto-Transmutationsraten von Transuranen zu erhöhen und die Neubildung von Transuranen zu reduzieren, werden bevorzugt keramische oder metallische Matrixmaterialien favorisiert, die frei von Uran sind und zudem kleine Wirkungsquerschnitte für Reaktionen mit Neutronen besitzen. Der optimierte ADS-Brennstoff bestünde aus einem Plutonium/MA-Mischoxid, der in einer inerten Matrix eingebettet ist. Die Matrix sollte dabei transparent für Neutronen sein und eine hohe thermische Leitfähigkeit besitzen. Gegenwärtig werden im Rahmen von europäischen Vorhaben verschiedene Typen IMF mit an Molybdän-92 angereichertem metallischem Molybdän oder Magnesiumoxid als Matrix untersucht. Eine besondere Herausforderung ist die Rezyklierung dieser Brennstoffe durch hydro- oder pyrometallurgische Prozesse, da die Matrixelemente nach Möglichkeit vollständig abgetrennt und rezykliert werden sollen. Dies ist Gegenstand des laufenden europäischen Projekts ASGARD [ASG 15].

Betrachtet man die oben diskutierten Aspekte, so ist ersichtlich, dass Transmutationsbrennstoffe nicht nur eine simple Weiterentwicklung von herkömmlichen Reaktorbrennstoffen sind. Es besteht noch ein hoher Bedarf an F&E bezüglich der Zusammensetzung der Brennstoffe, ihrer Fabrikation sowie des Betriebsverhaltens. Die Herstellung der hier kurz vorgestellten innovativen Brennstoffe im industriellen Maßstab ist bislang nicht erprobt worden. Aufgrund der Anwesenheit von MA und Spaltprodukten ist immer ein hoher Strahlungspegel gegenwärtig, der einen Fabrikationsprozess und anschließende Qualitätskontrolle fernbedient hinter schwerer Abschirmung in alphasichtigen heißen Zellen erfordert. Hierzu eignen sich z. B. Sol-Gel-Fabrikationsverfahren, die automatisiert betrieben werden können. Weiterhin sind auch andere innovative Verfahren (z. B. Imprägnierung, Harzverfahren, Vipac, Spharepac etc.) vorgeschlagen worden, die noch intensiv auf ihre Einsatzfähigkeit zu erforschen sind ([KON 01], [NEA 05], [IAE 09], [POU 12]). Bis zur Lizenzierung eines solchen Brennstoffs sind noch viele Erkenntnisse nötig, die nur nach intensiven Bestrahlungstests sowie anschließenden Nachbestrahlungsuntersuchungen zu erwerben sind. Legt man die etwa 30 Jahre Entwicklungsarbeit für den in heutigen Leichtwasserreaktoren eingesetzten Oxidbrennstoff zugrunde, wird eine ähnliche Zeitspanne für die Entwicklung eines GenIV- bzw. ADS-Brennstoffes notwendig sein.

3.3.2.3. *Fabrikationsanlagen*

Heutzutage produziert in Europa nur eine Anlage kommerzielle Mengen an MOX, die MELOX-Anlage in Marcoule, Frankreich. 2006 wurde die belgische Anlage in Dessel (Kapazität 40 Mg/a) geschlossen, und die französische MELOX-Anlage erhielt eine Lizenzerhöhung von 145 auf 195 Jahrestonnen [IAE 03].

Die in Sellafield betriebene MOX-Anlage mit einer ursprünglichen Jahresleistung von 120 Mg MOX wurde auf 40 Mg/a heruntergefahren, die allerdings bis heute aufgrund verschiedener Probleme nie erreicht wurde. In Russland gibt es in der Mayak-Anlage eine kleine Kapazität von etwa

5 Mg/a und Indien betreibt in Tarapur eine MOX-Fabrik mit bis zu 50 Mg/a. In den USA wird zurzeit in Savannah River eine MOX-Anlage gebaut, in welcher militärisches Plutonium aus Kernwaffen der USA und Russlands (jeweils 34 Mg) in MOX Brennstoff umgewandelt werden soll. Allerdings ist der Bau aufgrund von hohen Kostensteigerungen gestoppt worden. In der Zwischenzeit wird der Bau zwar wieder vorangetrieben, aber die bereitgestellten Mittel werden wahrscheinlich nicht für einen Abschluss der Bauarbeiten ausreichen. Japan betreibt in Tokai-Mura eine MOX-Anlage (10 Mg/a) und plant für 2016 in Rokkasho-Mura den Betrieb einer neuen Anlage (130 Mg/a). Die japanischen Anlagen haben prozessbedingt als einzige Anlagen weltweit eine Lizenz zur Herstellung von MOX mit bis zu 50 % Plutoniumanteil. So soll z. B. der in der belgischen MYRRHA-Anlage zum Einsatz kommende MOX-Brennstoff (bis zu 30 % Plutonium) aus Japan geliefert werden. Sogar Frankreich beabsichtigt für die im September 2010 genehmigte ASTRID-Anlage („*Advanced Sodium Technical Reactor for Industrial Demonstration*“) den MOX-Brennstoff aus Japan zu beziehen.

Demgegenüber gibt es weltweit nur einige Forschungsanlagen, die mit signifikanten Mengen an Plutonium und Minoren Actiniden zur Herstellung von Transmutationsbrennstoffen umgehen können [IAE 09]. Die maximalen Umgangsmengen an MA nach [PAT 08] können aus Tabelle 3.3 entnommen werden.

In der Atalante-Anlage in Marcoule, Frankreich sind bereits verschiedene ADS-Brennstoffe sowie Americium-basierte Targets für Bestrahlungsuntersuchungen hergestellt worden. Die Bestrahlungen erfolgten im Hochflussreaktor in Petten, Niederlande, sowie in dem bereits 2009 stillgelegten PHENIX-Reaktor in Marcoule [NEA 05].

Die LEFCA-Anlage in Cadarache, Frankreich, wird zur Fabrikation von Americium- und Neptuniumtargets genutzt. Allerdings werden aus Strahlenschutzgründen deutlich kleinere als die genehmigten Umgangsmengen zur Pelletherstellung verwendet.

Im Institut für Transurane der Europäischen Kommission in Karlsruhe können im sogenannten MA-Labor Transmutationsbrennstoffe für Testzwecke hergestellt werden. Dieses Labor hat im Rahmen von europäischen Projekten bereits verschiedene experimentelle Brennstäbe im Modellmaßstab (sogenannte Pins) mit unterschiedlichen MA-haltigen Materialien (Metalle, Oxide, Inertmatrix) erfolgreich hergestellt.

Zu erwähnen ist auch die TRU-HITEC-Anlage in Japan. Diese Anlage besteht aus einer Heißzellenreihe in der MA-haltige Materialien für P&T-Zwecke hergestellt und nach Bestrahlung auch charakterisiert werden können.

In den Vereinigten Staaten gibt es in den großen nationalen Laboren des *Department of Energy* (DOE) verschiedenste Einrichtungen zur Herstellung von Transmutationsbrennstoffen, z. B. in den Argonne und Los Alamos National Laboratories.

Tabelle 3.3: Kapazität verschiedener Forschungseinrichtungen für den Umgang mit Minoren Actiniden [PAT 08].

Radionuklid	ATALANTE	LEFCA	MA-LAB	TRU-HITEC
Am-241	1,7 kg	650 g	2,0 kg	10 g
Am-242	2 g	1,05 g	0,1 g	-
Am-243	30 kg	650 g	34 g	0,2 g
Cm-243	110 g	-	0,14 g	-
Cm-244	70 g	-	5 g	0,02 g
Np-237	-	650 g	9,6 kg	10 g

3.3.3. Entwicklungsstand der Transmutation

Im internationalen Rahmen wird die Transmutation der Transurane in drei Anlagentypen untersucht [ACA 13]:

- Reaktoren mit einem thermischen Neutronenspektrum
- Reaktoren mit einem schnellen Neutronenspektrum
- Beschleunigergetriebene Systeme (ADS) mit einem schnellen Neutronenspektrum

Generell sind – unabhängig von der ausgewählten Technik – bis zu einer großtechnischen Realisierung von P&T noch umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich. Auch unter günstigen Randbedingungen wäre die Realisierung eines regionalen P&T-Konzepts im industriellen Maßstab frühestens nach 2040 möglich (vgl. u. a. [RED 08], [PAT 08], [ACA 13]).

3.3.3.1. *Reaktoren mit thermischem Neutronenspektrum (LWR)*

Prinzipiell ist es möglich, Transurane mit einem geringen Anteil von 2 bis 6 % im Kern eines Leichtwasserreaktors (LWR) zu transmutieren. Der Nachteil ist allerdings, dass sich Actiniden höherer Massen durch Neutroneneinfang aufbauen. Dies ist vor allem dadurch begründet, dass die meisten Transurane mit langsamen Neutronen nur sehr schlecht gespalten werden können. Lediglich die Isotope Plutonium-239 und Plutonium-241 sind mit thermischen Neutronen spaltbar. Bereits ein geringer Anteil von MA führt zu großen Problemen bei der Herstellung von frischen Brennstoffen (siehe Abschnitt 3.3.2). Auch Lagerung und Transport des frischen Brennstoffs sind problematisch. Eine weitere Option der Transmutation in LWR ist der Einsatz von uranfreiem Brennstoff. Dazu sind allerdings noch weitreichende Untersuchungen erforderlich. Die Transmutation in thermischen Anlagen erscheint daher nach heutigem Kenntnisstand als wenig aussichtsreich.

3.3.3.2. *Reaktoren mit schnellem Neutronenspektrum*

Die Transmutation im schnellen Reaktorsystem ist vorteilhafter gegenüber einem thermischen System, da das Verhältnis von Neutronenspaltquerschnitt zu Neutroneneinfangsquerschnitt günstiger ist und somit weniger Actiniden mit höheren Massen erzeugt werden als in derselben Zeiteinheit gespalten werden. Die Transmutationseffizienz in diesen Systemen ist im Wesentlichen unabhängig von der Kühlmitteloption (Natrium, Blei, Helium) und vom Brennstofftyp (Metall, Oxid, Nitrid oder Carbid). Schnelle Reaktorsysteme werden im internationalen Rahmen für die Transmutation der

Minoren Actiniden betrachtet und es ist grundsätzlich möglich, diese Reaktorsysteme so auszulegen, dass alle Transurane (einschließlich Plutonium) transmutiert werden. Für alle Optionen muss allerdings eine mehrfache Rezyklierung des abgebrannten Brennstoffs vorgesehen werden. Das *Generation IV International Forum* (GIF) hat seit 2000 die Option der Transmutation in schnellen Reaktorsystemen in die Zielsetzung „Minimierung des Nuklearen Abfalls“ aufgenommen. Allerdings besteht hier noch sehr großes Optimierung- und Entwicklungspotenzial. Die technische Möglichkeit der Transmutation von Plutonium und Minoren Actiniden wurde in dem PHENIX-Reaktor, einem natriumgekühlten schnellen Reaktor, nachgewiesen. Langjährige Erfahrungen insbesondere mit der Natrium- sowie mit der Bleitechnologie liegen in Frankreich und Russland vor. In der Vergangenheit wurden bereits 15 Experimentalreaktoren mit bis zu 400 MW_{th} und sechs kommerzielle schnelle Reaktoren mit einer elektrischen Leistung zwischen 250 und 1200 MW_e erfolgreich betrieben [ACA 13].

Geeignete Anlagen zur industriellen Transmutation von Radionukliden sind derzeit noch nicht verfügbar. Zwei große Anlagen sind in Bau (BN-800 in Russland, PFBR in Indien) und zusätzlich bestehen wichtige Entwicklungsprojekte auf internationaler Ebene (u. a. BN-1200), die mit großem Nachdruck verfolgt werden. Frankreich plant einen natriumgekühlten schnellen Versuchsreaktor (ASTRID), der zwischen 2020 und 2025 gebaut werden soll.

Als transmutationsoptimierte Alternative bietet sich auch die Nutzung eines Systems mit flüssigem Brennstoff, z. B. eines Salzschnmelzenreaktors an [ACA 13]. In den USA wurde am Oak Ridge National Laboratory in den 1960er Jahren das sogenannte *Molten Salt Reactor Experiment* (MSRE) über 4,5 Jahre betrieben. Die Technologie der Salzschnmelzenreaktoren hat in jüngster Zeit ein großes Interesse geweckt. In dem europäischen Forschungsprojekt EVOL [EVO 15] sowie im russischen MOSART-Vorhaben [IGN 14] beruht das Reaktordesign auf einem schnellen Neutronenspektrum, im Gegensatz zum MSRE, das aus einem graphitmoderierten Kern mit einem thermischen Neutronenspektrum aufgebaut ist. Ein Vorteil dieses Reaktorkonzeptes ist, dass der Reaktor im laufenden Betrieb nachgeladen werden kann und auch die Salzreinigung im laufenden Betrieb erfolgen kann. Dadurch wird eine aufwendige Multirezyklierung vermieden. Das hat zur Folge, dass auf Transporte verzichtet werden kann und die Actinidenverluste sehr gering sind.

3.3.3.3. Beschleunigergetriebene Systeme (ADS) mit einem schnellen Neutronenspektrum

Beschleunigergetriebene Systeme bestehen aus einem unterkritischen Reaktor, der mit einem Protonenbeschleuniger gekoppelt ist. Der Protonenbeschleuniger zielt auf ein Target im Kern des Reaktors, in dem durch Spallation Neutronen erzeugt werden. Erst durch diesen Prozess wird der Kern kritisch, und es kommt zur für die Transmutation notwendigen Kettenreaktion. Nach Abschaltung des Beschleunigers wird der Kern wieder unterkritisch und die Kettenreaktion stoppt. Für das Transmutationssystem „*Accelerator Driven System*“ (ADS) ist Europa mit seinen wissenschaftlichen Untersuchungen weltweit führend. Entsprechende Studien sind aber auch in den USA und in Japan durchgeführt worden.

Beschleunigergetriebene, unterkritische Systeme weisen aufgrund der Unterkritikalität des Kerns und des Einflusses der externen Neutronenquelle eine deutlich erhöhte neutronenphysikalische Stabilität auf. Diese Eigenschaft bietet die Möglichkeit zur Verwendung von brutstofffreiem (also uranfreiem) Brennstoff und ermöglicht damit sehr hohe Transmutationsraten. Teilweise kann Betriebserfahrung für den Brennstoff aus kritischen Reaktoren übernommen werden; für brutstofffreie

Brennstoffe zur optimierten Transmutation sind allerdings weitere Entwicklungen und Bestrahlungsexperimente erforderlich. Zudem sind die Abtrennverfahren für die abgebrannten ADS-Brennelemente noch zu entwickeln; was aufgrund der Notwendigkeit der mehrfachen Rezyklierung eine besondere Schwierigkeit darstellt. Seit den 1990er Jahren beschäftigen sich europäische Forschungseinrichtungen mit Designstudien zur Auslegung eines ADS. Im europäischen Projekt EUROTRANS war das Ziel der 5-jährigen Forschungsarbeiten, die technische Machbarkeit der Transmutation mittels ADS zu bewerten und zu demonstrieren [KNE 09]. Zwei ADS-Konzepte wurden in EUROTRANS bewertet: eine experimentelle Demonstrationsanlage (XT-ADS) und eine Industrielle Transmutationsanlage (EFIT). Mit GUINEVERE wurde die Kopplung der drei Komponenten Beschleuniger-Spallationstarget-unterkritischer Reaktor experimentell realisiert. Für die wichtigsten Komponenten und Technologien wurde eine umfangreiche Datenbasis geschaffen, die zur Weiterentwicklung experimenteller ADS und flüssigmetallgekühlter Transmutationsanlagen zur Verfügung steht. Eine internationale Versuchsanlage zur Transmutation mittels ADS (MYRRHA) im belgischen Mol (SCK•CEN) ist ebenfalls erst in der Planung, eine Realisierung ist nicht vor 2025 zu erwarten (vgl. Abschnitt 4.1.2).

3.4. Zwischenprodukte, Endprodukte und Nebenprodukte

Die im Rahmen der Transmutation anfallenden Zwischen-, End- und Nebenprodukte sind bezüglich Art, Menge und Eigenschaften vor allen Dingen von der gewählten Transmutationsstrategie und dem verwendeten Kernbrennstoffkreislauf abhängig.

Eine wesentliche Rolle spielt hier zunächst das im zu behandelnden Leichtwasserreaktorbrennstoff enthaltene Uran, da es ca. 95 % der Masse des Brennstoffs ausmacht und dabei insbesondere die Frage, ob dieses Uran als Abfall oder Wertstoff betrachtet wird. Im ersten Fall müsste es endlagergerecht konditioniert werden, ansonsten in einer stabilen Form bis zur weiteren Verwendung gelagert werden. Hierbei spielt auch eine Rolle, ob für die Transmutation eine uranhaltige oder uranfreie Matrix verwendet wird. Eine Abtrennung und mögliche weitere Nutzung von Uran stellt somit das mit Abstand größte Potential für eine Volumenreduktion des Wärme entwickelnden Abfalls dar.

Bei der chemischen Abtrennung von Plutonium und Minoren Actiniden werden diese in eine stabile feste Form als Zwischenprodukt überführt, das dann als Ausgangsmaterial für die Herstellung des Transmutationsbrennstoffs dient. Die Mengen dieses Zwischenprodukts richten sich nach der benötigten Menge für die Transmutationsbrennstoffherstellung, die wiederum von der Art des Reaktors abhängt. Generell ist die Menge aber eher begrenzt und das Material wird vollständig für die Herstellung des neuen Brennstoffs verwendet. Der Transmutationsbrennstoff stellt ein weiteres Zwischenprodukt dar, da er für eine Mehrfachrezyklierung erneut partitioniert werden muss. Aufgrund längerer Wartezeiten für die erneute Partitionierung des Transmutationsbrennstoffs können erhebliche Mengen anfallen, die zwischengelagert werden müssten.

Die bei der chemischen Abtrennung abgetrennten Spaltprodukte werden in eine für die Endlagerung geeignete Form überführt. In der Partitionierungsanlage fallen zudem weitere Abfallströme an, die ebenso konditioniert werden (vgl. Abschnitt 3.2.5). Im industriellen Maßstab hat sich hierzu die Verglasung als geeignete endlagerfähige Abfallform etabliert. Die Spaltprodukte und einige aus dem Prozess stammende Abfallströme stellen hoch radioaktive und Wärme entwickelnde Abfälle dar. Hinzu kommen noch kompaktierte Strukturteile, die ebenfalls als hoch radioaktive und Wärme

entwickelnde Abfälle endgelagert werden müssen. Zudem fallen schwach- und mittelradioaktive Abfälle an, die entsprechend konditioniert und endgelagert werden müssen. Dadurch vergrößert sich dieses Abfallvolumen.

Neben einer hydrometallurgischen Aufarbeitung wird international auch die pyrometallurgische Aufarbeitung untersucht. Hierbei fallen andere Abfallströme an (z. B. Salzschmelzen; vgl. [NEA 04]). Weitere Materialströme, die im Rahmen von P&T zu diskutieren sind, umfassen die Beschleunigertargets in ADS-Anlagen (z. B. Blei/Wismut), die gewechselt und/oder rezykliert werden müssen oder die Kühlmedien der Transmutationsanlagen (Natrium bzw. eutektische Blei-Wismut-Legierungen bei ADS). Diese müssen auch gereinigt oder erneuert werden, um sie von Kontaminationen und Aktivierungsprodukten zu befreien. Nach Ende des Transmutationsbetriebs müssen sie entsprechend entsorgt werden, d. h. entweder dekontaminiert oder vollständig konditioniert und in eine endlagerfähige Form überführt werden.

Die Eigenschaften der Endprodukte sind u. a. von den angewendeten Konditionierungsverfahren für die verschiedenen Abfallströme abhängig. Neben einer Verglasung der Spaltprodukte nach Abtrennung der Transuranelemente könnte auch die Möglichkeit genutzt werden, daraus weitere Radionuklide abzutrennen und in maßgeschneiderte Endlagermatrizes wie z. B. keramische Abfallformen einzubinden, die eine besonders hohe Korrosionsresistenz unter Endlagerbedingungen aufweisen und damit die Sicherheitsmargen eines Endlagers erhöhen könnten (vgl. [NEU 14]). In den letzten Jahren sind – komplementär zu den keramischen Matrizes zur Einbindung von Actiniden (vgl. u. a. [LUM 06], [EWE 07], [EWE 11]) – spezielle Keramiken zur Immobilisierung langlebiger Spaltprodukte wie z. B. Cäsium-135 ([CAR 07], [ANG 08]), Technetium-99 (u. a. [CAR 07], [HAR 12]) sowie auch Iod-129 (u. a. [NEN 07], [GRA 07]) entwickelt und untersucht worden.

Beim Rückbau der Anlagen zur Partitionierung und Transmutation entstehen weitere radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. Aufgrund von industriellen Erfahrungen aus dem Betrieb und Rückbau von kerntechnischen Anlagen sollte der Rückbau der Anlagen bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden, um den späteren Rückbau zu vereinfachen. Dies würde helfen Kosten und Abfälle einzusparen, da nicht die gesamte Anlage als radioaktiver Abfall entsorgt werden müsste, sondern nur einer kleiner Teil.

In der Untersuchung [ACA 13] wurden die Volumina an Wärme entwickelnden Abfällen und solchen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung für verschiedene Szenarien verglichen. Dabei sind auch die bereits verglasten Abfälle aus der Wiederaufarbeitung berücksichtigt, die selbst nicht behandelt werden sollen. Die Abschätzungen aus [ACA 13] sind in Tabelle 3.4 dargestellt.

Tabelle 3.4: Übersicht über die in [ACA 13] abgeschätzten in Deutschland anfallenden radioaktiven Abfallströme für verschiedene P&T-Szenarien

Abfallart	Ohne P&T	Anwendung von P&T in Deutschland	Europäische System- partizipation
Wärme entwickelnde Abfälle	ca. 28.000 m ³	9.500 – 12.900 m ³	9.500 – 12.900 m ³
Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung	ca. 300.000 m ³	ca. 400.000 m ³	ca. 360.000 m ³

Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass es sich bei dem in [ACA 13] angegebenen zusätzlichen Aufkommen an Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung infolge der Anwendung von P&T nur um eine grobe konservative Abschätzung handelt. Bei einer entsprechenden Prozess- und Anlagenoptimierung im Rahmen der weiteren Systementwicklung für P&T könnten die Mengen an anfallenden Sekundärabfällen in der Praxis deutlich reduziert werden.

In Tabelle 3.5 sind auf Basis der Untersuchung [ACA 13] die Inventare an Actiniden- und Spaltprodukten in Wärme entwickelnden Abfällen in Deutschland für Szenarien ohne und mit P&T abgeschätzt. Hierin sind auch die bereits angefallenen verglasten Abfälle aus der Wiederaufarbeitung mitberücksichtigt, die selbst nicht behandelt werden sollen. Das bei den P&T-Szenarien abgetrennte Uran könnte entweder weiterverwertet oder als Abfall mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung endgelagert werden. Für das nationale P&T-Szenario würde eine endzulagernde Restmenge an Transuranen (ca. 2 % des ursprünglichen TRU-Inventars) aus dem Inventar der letzten Transmutationsanlage verbleiben, welche jedoch mit entsprechenden Strategien noch verringert werden könnte [ACA 13].

Tabelle 3.5: Abgeschätztes Actiniden- und Spaltproduktaufkommen in Wärme entwickelnden Abfällen in Deutschland für Szenarien ohne und mit P&T (modifiziert nach [ACA 13]).

Radionuklidgruppe	Ohne P&T	P&T regionales Szenario	P&T nationales Szenario
TRU-Aufkommen	ca. 170 Mg (in 2022)	ca. 0,6 Mg	ca. 4 Mg ¹⁾
Spaltproduktaufkommen	ca. 630 Mg (in 2022) ²⁾	ca. 668 Mg ³⁾	ca. 800 Mg ⁴⁾
Uran	ca. 9.700 Mg (in 2022) ⁵⁾	ca. 2 Mg ⁶⁾	ca. 2 Mg ⁶⁾

¹⁾ Verluste aus der Wiederaufarbeitung und TRU-Inventar der letzten Transmutationsanlage

²⁾ 210 Mg in verglasten Abfällen + 420 Mg in abgebrannten Brennelementen

³⁾ 38 Mg aus der Transmutation von TRU sowie 630 Mg aus Abfällen aus 2022

⁴⁾ 170 Mg aus der Transmutation von TRU sowie 630 Mg aus Abfällen aus 2022

⁵⁾ in abgebrannten Brennelementen

⁶⁾ aus Wiederaufarbeitungsverlusten

Als Nebenprodukt von P&T kann insbesondere elektrischer Strom betrachtet werden. Selbst wenn die Transmutationsreaktoren nicht für die Stromproduktion optimiert sind, könnte ein Wärmeüberschuss der Anlage für eine Stromproduktion verwendet werden. Bei der chemischen Abtrennung der Spaltprodukte könnten daraus auch potentiell verwendbare Stoffe für eine weitere Verwendung abgetrennt werden, z. B. Technetium-99 für medizinische Anwendungen.

3.5. Notwendige Infrastruktur für die Aufrechterhaltung des Transmutationsbetriebs

3.5.1. Erforderliche Infrastruktur

Zur Durchführung und Aufrechterhaltung des Transmutationsbetriebs und der Wiederaufarbeitung der Transmutationsbrennstoffe bis zur vollständigen Behandlung der Abfälle sind eine Reihe von Einrichtungen und Systemen erforderlich, die im Folgenden dargestellt und diskutiert werden. Hierzu zählen die für die verschiedenen Verfahrensschritte erforderliche Anlageninfrastruktur (einschl. Transmutationsanlagen), die für Anlagenüberwachung und -versorgung (Elektrizität, Kommunika-

tion, Wasserversorgung etc.) notwendige Infrastruktur sowie die notwendigen Infrastrukturen für Material- und Abfalltransporte sowie die für die Abfallzwischenlagerung und Endlagerung erforderlichen Einrichtungen. Des Weiteren sind die entsprechenden Institutionen zur Genehmigung und Beaufsichtigung des Anlagenbetriebs (u. a. auch TSOs) und zur Sicherstellung des Strahlenschutzes sowie zur internationalen Kernmaterialüberwachung erforderlich.

Für die Aufrechterhaltung des Transmutationsbetriebes im internationalen Rahmen (regionaler Ansatz) bzw. für eine nationale Lösung sind die bestrahlten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren zu betrachten, die bis 2022 in Deutschland anfallen werden. Nach [BMU 15A] und [BMU 15B] entspricht dies einer Schwermetallmenge von ca. 10.500 Mg SM (vgl. Abschnitt 3.1), die nach [ACA 13] 170 Mg Transurane (davon 38 Mg Minore Actinide) enthalten.

Die Größe und Anzahl der Anlagen für den P&T-Betrieb sind von der Technologie der Wiederaufarbeitung und der anzuwendenden Transmutationstechnologie sowie der vorgesehenen Zeitspanne für die Umsetzung abhängig. Grundsätzlich werden für die Umsetzung von P&T folgende großtechnische Anlagen benötigt:

- eine Wiederaufarbeitungsanlage zur Abtrennung von Uran, Plutonium und Minoren Actiniden aus den bestrahlten LWR-Brennelementen und zur Rückgewinnung der nicht transmutierten Transurane aus den Transmutationsbrennelementen;
- eine Fabrikationsanlage zur Herstellung der Transmutationsbrennstoffe;
- eine oder mehrere Transmutationsanlagen mit schnellem Neutronenspektrum;
- eine Konditionierungsanlage und ein Zwischenlager für die anfallenden Abfälle (Wärme entwickelnd sowie mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung);
- Möglichkeiten zur Endlagerung von Wärme entwickelnden Abfällen und Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung.

3.5.1.1. *Anlagenbedarf im regionalen Ansatz*

Dieses Szenario unterstellt die Möglichkeit einer länderübergreifenden Durchführung von P&T auf europäischer Ebene (vgl. [PAT 08], [ACA 13]). In der PATEROS-Studie [PAT 08] wurden dazu die beteiligten Länder in zwei Gruppen unterteilt. Gruppe A beinhaltete Länder, die aus der Nutzung der Kernenergie aussteigen (z. B. Deutschland, Belgien, Spanien, Schweden, Schweiz), und Gruppe B Länder mit fortgesetzter Nutzung der Kernenergie (z. B. Frankreich). Hierbei müssten Länder der Gruppe A mit Ländern der Gruppe B kooperieren. Staaten der Gruppe B würden die nötige Infrastruktur bereitstellen (z. B. regionale Wiederaufarbeitungs- und Transmutationsanlagen), die dann gemeinsam von Ländern beider Gruppen genutzt würden, wobei die nötigen Entwicklungsarbeiten, Investitionen und späteren Leistungsaufgaben anteilmäßig geteilt würden. Dazu gehörten auch die Stilllegungskosten. In der PATEROS Studie, die auch in der acatech Studie herangezogen wurde, wurden für das europäische Gesamtkonzept 25 ADS-Transmutationsanlagen des Typs EFIT (jeweils 400 MW_{th}) angesetzt, deren Design im Rahmen des europäischen Projekts EUROTRANS entwickelt wurde, um das Inventar an Transuranelementen der Länder der Gruppe A auf Null zu reduzieren. Von diesen 25 ADS-Anlagen würden 6 bis 7 Anlagen für die Transmutation des deutschen Inventars an MA benötigt. Das Plutonium wird in diesem Szenario als Ressource für die Herstellung der ADS-Brennstoffe und auch teilweise für die zukünftige Nutzung in schnellen Reaktoren der Gruppe B genutzt.

Die bis zu 25 ADS-Anlagen würden entsprechend den in PATEROS getroffenen Annahmen zwischen 2045 und 2090 in Betrieb genommen. Zur Brennstoffherstellung für die ADS-Anlagen müsste der abgebrannte Brennstoff aus Ländern der Gruppe A ab 2040 wiederaufgearbeitet werden. Das abgetrennte Uran könnte entweder in das Ursprungsland zurückgeführt oder weiter als Ressource für Länder der Gruppe B genutzt werden (z. B. für Reaktoren mit schnellem Neutronenspektrum). Betrachtet man das Inventar an Minoren Actiniden von etwa 38 Mg in den deutschen abgebrannten Brennelementen, so würde für die Transmutation in den 6 bis 7 ADS-Anlagen eine Betriebszeit von 30 bis 40 Jahren erforderlich sein. Allerdings würden weniger Anlagen gebraucht, wenn man für die Transmutation einen längeren Zeitraum veranschlagen würde. Der Vorteil des regionalen Ansatzes wäre, dass in Deutschland keine Transmutationsanlagen gebaut werden müssten. Zusätzlich wären keine Anlagen für die Wiederaufarbeitung sowie die Brennstoffherstellung nötig. Allerdings müssten vermutlich die Wärme entwickelnden Abfälle in verglaste Form zurückgeführt werden. Dies gilt auch für die hochaktiven kompaktierten Strukturmaterialien (z. B. Hüllrohre).

3.5.1.2. *Anlagenbedarf im nationalen Ansatz*

Bei diesem Szenario wird angenommen, dass alle Schritte des P&T-Brennstoffkreislaufs in Deutschland umgesetzt werden. Zunächst müssten die abgebrannten Brennelemente wiederaufgearbeitet werden. Es müsste eine Wiederaufarbeitungsanlage für die Behandlung der abgebrannten LWR-Brennelemente (z. B. ähnlich der Anlage UP3 in La Hague, die eine Kapazität von 800 Mg/a aufweist) geplant, lizenziert, gebaut und betrieben werden. Diese müsste auch in der Lage sein, die MA abzutrennen. Des Weiteren wären eine Anlage zur Fabrikation der Transmutationsbrennstoffe sowie auch eine Anlage zur Wiederaufarbeitung der abgebrannten Transmutationsbrennstoffe erforderlich.

Im nationalen Ansatz würden 170 Mg Transurane (Plutonium und MA) einer Transmutation zugeführt werden müssen. In der Untersuchung [ACA 13] wurden dazu zwei Reaktoren mit schnellem Neutronenspektrum für die Transmutation betrachtet. Als Referenzsystem wurde ein EFIT-Reaktor, d. h. ein unterkritisches ADS-System mit Blei als Kühlmittel, und als Alternative ein kritischer schneller Reaktor mit Natrium als Kühlmittel (ASTRID-Typ) vorgeschlagen. Im EFIT-Reaktor kann Inertmatrixbrennstoff (IMF) auch zur Transmutation von Plutonium verwendet werden. Der ASTRID Reaktor ist für die Nutzung von MOX-Brennstoff und die Rezyklierung von MA ausgelegt. Dieser Reaktortyp kann allerdings auch für die Transmutation der deutschen TRU-Abfälle angepasst werden.

In [ACA 13] wurden für ein nationales P&T-Szenario in Deutschland exemplarisch zwei Fälle betrachtet, bei denen durchschnittlich sieben bis acht EFIT-ähnliche ADS-Anlagen mit IMF und einer Leistung von 400 MW_{th} bzw. sieben bis acht ASTRID-ähnliche schnelle Reaktoren mit Uran-TRU-Oxid als Brennstoff und einer Leistung von 1200 MW_{th} zur Transmutation eingesetzt würden. Für diese Szenarien wurden in [ACA 13] Betriebszeiträume zur Transmutation der o. g. TRU-Inventare von etwa 150 Jahren abgeschätzt. Durch Erhöhung der Leistung und Optimierung der Transmutationsanlagen ließe sich diese Dauer deutlich reduzieren. Generell haben nach [ACA 13] diese Abschätzungen allerdings nur vorläufigen Charakter und es sind zu deren Bestätigung noch detaillierte Untersuchungen notwendig.

3.5.2. Rechtliche, genehmigungstechnische und gesellschaftliche Aspekte

Die weiteren rechtlichen, genehmigungstechnischen und gesellschaftlichen Aspekte der Transmutation sind vielschichtig und entziehen sich einer systematischen technisch-wissenschaftlichen Darstellung. Sie werden hier übergreifend behandelt, um den Kontext einer – hypothetischen – Nutzung von P&T in Deutschland zu umreißen.

3.5.2.1. *Rechtliche Aspekte*

Die Grundlage der Nutzung der Kernenergie in Deutschland wird durch das Atomgesetz (AtG) und die auf seiner Basis erlassenen Verordnungen gebildet. Im Hinblick auf die Transmutation sind insbesondere die folgenden Vorschriften aus dem AtG von Bedeutung:

- § 2 Abs. 2 AtG zu den Begriffsbestimmungen „Radioaktive Stoffe“, „Kernbrennstoffe“ und „sonstige radioaktive Stoffe“, da durch die Transmutation eine Umwandlung von Kernbrennstoffen in sonstige radioaktive Stoffe erfolgt.
- § 2 Abs. 3a AtG zum Begriff der kerntechnischen Anlage, welcher eine Erweiterung auf Anlagen zu P&T bedürfte.
- §§ 3-4b AtG sowie §§ 19-22 StrlSchV: Regelungen zur Ein- und Ausfuhr von Kernbrennstoffen sowie radioaktiven Abfällen, falls eine regionale P&T-Anlage im Ausland betrieben werden würde. Beim P&T-Schritt ändern die Stoffe ihren Charakter (Kernbrennstoff wird zu radioaktivem Abfall in der Kategorie „sonstige radioaktive Stoffe“), so dass es sich de facto um einen Export von Kernbrennstoff und einen Import von radioaktiven Abfällen handeln würde.
- § 7 Abs. 1 AtG zur Errichtung neuer kerntechnischer Anlagen: Das Verbot: „Für Anlagen zur Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe werden keine Genehmigungen erteilt.“ wäre aufzuheben, um Anlagen zu P&T errichten zu können.
- § 9a Abs. 1 AtG zur Verwertung radioaktiver Reststoffe und Beseitigung radioaktiver Abfälle: Das Verbot „Die Abgabe von aus dem Betrieb von Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität stammenden bestrahlten Kernbrennstoffen zur schadlosen Verwertung an eine Anlage zur Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe ist vom 1. Juli 2005 an unzulässig.“ wäre aufzuheben, um Anlagen zu P&T betreiben zu können.
- § 9a Abs. 1a-1d AtG: Der Entsorgungsnachweis wäre bei Betrieb bzw. auch bei beabsichtigter Errichtung von Anlagen zu P&T völlig anders zu fassen, da der Entsorgungsnachweis dann nicht mehr von der Lagerkapazität für die verschiedenen Kategorien radioaktiver Abfälle abhängt, sondern auch wesentlich vom Umwandlungsgrad bei den P&T-Verfahren.
- § 14 sowie §§ 25ff AtG zur Haftpflichtversicherung, sonstigen Deckungsvorsorge und Haftung: Die Tatbestände wären um die besonderen Anforderungen, die sich aus dem Aktivitätsinventar in P&T-Anlagen ergeben, zu erweitern.

Des Weiteren wäre das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) geeignet zu erweitern, um auch Anlagen zu P&T zu erfassen, die von der dort in Anl. 1 Nr. 11 genannten Anlagen vermutlich nicht abgedeckt wären.

Nachgeordnete Verordnungen, insbesondere die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV), wären an verschiedenen Punkten anzupassen, insbesondere dort, wo es um die Behandlung radioaktiver Abfälle geht. Weitere Regelwerksteile wären zu überprüfen und anzupassen, darunter auch die An-

nahmekriterien für das Endlager Konrad, und Kriterien für noch nicht existierende Endlager für erst sehr viel später anfallende radioaktive Abfälle und Kernbrennstoffe wären völlig neu zu entwickeln.

Insgesamt macht diese kurze Einordnung der zu ändernden Abschnitte wesentlicher Rechtsvorschriften in der Kerntechnik deutlich, dass im Falle der Entscheidung für ein nationales oder regionales P&T-Programm ein politischer und gesellschaftlicher Konsens unabdingbar ist, um die entsprechenden Gesetzesvorhaben erfolgreich umsetzen zu können. Es wird deutlich, dass der Aufwand zur Schaffung der notwendigen rechtlichen Grundlagen für P&T in Deutschland erheblich ist. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass in der Vergangenheit die Weichen eindeutig auf die Aussetzung der Wiederaufarbeitung sowie den Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung gestellt wurden.

3.5.2.2. *Genehmigungstechnische Aspekte*

Die genaue technische Realisierung der verschiedenen Verfahrensschritte im Rahmen von P&T ist von den verfolgten Konzepten abhängig und derzeit nicht abschließend einschätzbar, wie im vorliegenden Gutachten an verschiedenen Stellen dargestellt wird. Generell sind für die Errichtung und Inbetriebnahme der Anlagen Genehmigungsverfahren durchzuführen, wobei hierzu notwendige technische Grundlagen (KTA-Regeln oder vergleichbare Regelwerksteile) zum Teil noch nicht existieren und erst geschaffen werden müssten. Es handelt sich hierbei um untergesetzliche Regelwerksteile, die üblicherweise von technische Gremien wie KTA, SSK, ESK, RSK, DIN, Gutachtervereinigungen usw. erarbeitet werden und ggf. vom zuständigen Ministerium (gegenwärtig dem BMUB) umgesetzt werden. Solche untergesetzlichen Regelwerksteile bilden eine ganz wesentliche Grundlage für die Durchführung von Genehmigungsverfahren.

Es ist an dieser Stelle nicht möglich, einen vollständigen Überblick über Themen zu geben, die im Falle der Umsetzung von P&T auf nationaler Ebene durch untergesetzliche Regelwerksteile abgedeckt werden müssten. In jedem Fall wären jedoch folgende Themenfelder abzudecken:

- für P&T zugelassene Verfahren,
- Materialwahl und konstruktive Ausführung wesentlicher Komponenten der P&T-Anlagen,
- Sicherstellung des sicheren Einschlusses der Radioaktivität durch konstruktive Ausführung der Anlagen,
- Maßnahmen zur Reduktion der Exposition des Personals,
- Maßnahmen zur Minimierung der Abgabe radioaktiver Stoffe in die Umwelt und somit zur Exposition der Bevölkerung,
- auslösende Ereignisse und mögliche Störfallszenarien; Berechnung der Folgedosen für diese Szenarien,
- Einhaltung von Sicherheitsgrenzwerten im Hinblick auf Normalbetrieb und Störfälle,
- die Stilllegung der Anlagen nach Ende ihrer Betriebszeit,
- Materialaufkommen aus der Stilllegung und dem Abbau der Anlagen (radioaktive Abfälle, freigelegte Anteile),
- usw.

Die Entwicklung dieser Vielzahl von untergesetzlichen Regelungen für die Sicherstellung der Genehmigungsfähigkeit bzw. die Fortschreibung existierender Regelungen des kerntechnischen Bereichs zur Einbeziehung von P&T würde, wie die Erfahrungen der letzten Dekaden zeigen, einen

erheblichen Aufwand für technische Gremien bedeuten, der sich über mindestens ein Jahrzehnt erstrecken würde.

Insbesondere wäre es zweifelhaft, ob ein Anforderungskatalog für sicherheitstechnische Nachweise konsensfähig wäre. Da die notwendigen sicherheitstechnischen Nachweise für die (neuartigen) Anlagen im Rahmen von Genehmigungsverfahren für eine Langzeitzwischenlagerung auf Grundlage hinreichend belastbarer Daten und Erkenntnisse sowie bzgl. eines generell abgestimmten Kriterienkatalogs zu führen wären, würde es zunächst einer Diskussion in der Fachöffentlichkeit, welche Kriterien anzulegen und welche Störfälle zu betrachten sind, bedürfen. Hierzu sind aber wiederum belastbare Daten aus dem (Probe-)Betrieb existierender Anlagen unabdingbar.

Die ebenfalls für die Erteilung einer Genehmigung notwendige Entsorgungsvorsorge kann nur dann nachgewiesen werden, wenn zumindest Konsens über die Verfügbarkeit eines geeigneten Endlagers besteht. Eine Entsorgung der Abfälle aus P&T würde zwar technisch im Endlager Konrad sowie im noch nicht näher geplanten Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle möglich sein, wie u. a. in Abschnitt 3.2 angesprochen wurde, allerdings stellt sich die Frage nach der zeitlichen Verfügbarkeit dieser Endlager und der zeitlichen Dauer der P&T-Maßnahmen. Der Nachweis der Entsorgungsvorsorge bei der Errichtung von P&T-Anlagen hängt daher ganz wesentlich vom zeitlichen Rahmen geplanter Endlager in Deutschland ab.

3.5.2.3. *Gesellschaftliche Aspekte*

Die gesellschaftlichen Aspekte einer evtl. P&T-Strategie lassen sich nur in groben Zügen umreißen. Zunächst sind die objektiv fassbaren Aspekte des Know-how-Erhalts und der Finanzierung über lange Zeiträume hinweg zu nennen:

- **Know-how-Erhalt:** Bei allen beteiligten Organisationen in Deutschland muss im Falle einer nationalen P&T-Lösung das erforderliche Know-how bis zur erst längerfristig realisierbaren Transmutation aufrechterhalten werden. Bereits jetzt wird ein Know-how-Verlust sowohl im Bereich der Nuklearindustrie als auch der Forschung im Zuge der Außerbetriebnahme aller Kernkraftwerke und deren nachfolgendem Rückbau befürchtet, dem durch verschiedene Programme entgegen gewirkt wird.
- **Fortgesetzte Finanzierung:** Die langfristige Finanzierung der Transmutation muss sichergestellt sein. Je nach Konzept führt dies zu einem nicht unerheblichen Aufwand, der sich z. B. auf die Strompreise auswirkt, den eine zukünftige Gesellschaft bei schlechter Wirtschaftslage oder anderen angespannten Randbedingungen ggf. nicht länger tragen möchte. Eine weitere Verteuerung des Strompreises birgt erhebliches Potential für das Schwinden der Akzeptanz in der Bevölkerung für eine Technologie, die ggf. als „überholt“ angesehen wird, da sie als Bestandteil der als beendet geglaubten Kerntechnik wahrgenommen wird.

Weitere Aspekte, die eher Gegenstand der gesellschaftlichen Diskussion sein würden, sind der Einsatz der zurückgewonnenen Kernbrennstoffe und die evtl. Notwendigkeit eines weiteren Endlagers.

- Nach dem Atomgesetz in seiner derzeit gültigen Fassung ist die Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente aus Leistungsreaktoren und damit auch P&T unzulässig, wie schon in Abschnitt 3.5.2.1 angesprochen wurde. Sofern die P&T-Anlagen allein zur Reduzierung nuklearer Abfälle (Volumen und Radioaktivität) und nicht zur Stromerzeugung oder der Wiederaufbereitung von

verwertbaren Brennstoffen dienen, ist P&T prinzipiell mit den Zielen des Kernenergieausstiegs vereinbar. Vor dem Hintergrund des Kernenergieausstiegs wäre allerdings zu entscheiden, ob man das bei der Partitionierung herausgelöste Uran in Reaktoren außerhalb Deutschlands zur Energieerzeugung zur Verfügung stellt oder direkt in ein Endlager für radioaktive Abfälle überführt. Verzichtet man auf die energetische Nutzung, so bleibt als Rechtfertigung einzig die Verbesserung der Endlagersicherheit und Reduzierung der Radiotoxizität der Abfälle. In diesem Fall steht die Rechtfertigung für den erheblichen Finanzbedarfs für P&T auf einer deutlich schmaleren Basis als bei energetischer Nutzung.

- Für die durch P&T anfallenden Sekundärabfälle (radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung) muss nach jetziger Genehmigungslage ein zusätzliches Endlager geplant, errichtet und betrieben werden, sofern das Endlager Konrad nicht erweitert werden könnte. Allerdings ist auch das gegenwärtig planfestgestellte Volumen bei Einbeziehung der Abfälle aus der Rückholung aus der Asse sowie von abgereichertem Uran nicht ausreichend. Die Frage der Endlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wird daher ohnehin weiter in der gesellschaftlichen Diskussion bleiben. Die Entsorgung zusammen mit verglasten Abfällen und anderen nicht Konrad-gängigen Abfällen stellt demgegenüber eine erhebliche Kostensteigerung dar.

Die Akzeptanz in der Bevölkerung für die Transmutation richtet sich ferner nach diversen Aspekten, so beispielsweise nach der allgemein herrschenden Einstellung zu Technologien, der Einstellung zur Umwelt, der Frage der Generationengerechtigkeit (keine spätere Generation soll über Gebühr von den Hinterlassenschaften der vorherigen Generationen belastet werden) und vielen anderen Aspekten. Die Frage der Generationengerechtigkeit würde allerdings schnell durch die Frage der langfristigen Finanzierbarkeit überlagert werden.

Die Kernenergie ist seit langem in der deutschen Bevölkerung umstritten und wird von großen Teilen kritisch gesehen. Insbesondere wird die Wiederaufarbeitungstechnologie überwiegend abgelehnt, da es unter anderem das Proliferationsrisiko erhöht. Außerdem müssen für die Anwendung von P&T neue kerntechnische Anlagen gebaut werden. Dem Bau dieser Anlagen dürfte die deutsche Bevölkerung kritisch gegenüber eingestellt sein, weil über die Anwendung von P&T ein Wiedereinstieg in die Kernenergie befürchtet werden könnte. Deshalb könnten Forschung und Entwicklung sowie Anwendungen in diesem Bereich grundsätzlich negative Reaktionen seitens der Bevölkerung hervorrufen [ACA 13].

Bürgerbewegungsgruppen und Umweltverbände haben grundsätzlich eine ablehnende Haltung zu P&T aufgrund von Sicherheitsbedenken, Nutzenpotential und ökonomische Gesichtspunkten. Die Sicherheitsbedenken beruhen insbesondere auf der allgemeinen Möglichkeit der Verknüpfung von militärischer und ziviler Nutzung der Kernenergie [ACA 13]. Das Nutzenpotential wird bei diesen Personengruppen als gering eingeschätzt, denn die Errichtung eines Endlagers für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle muss trotz P&T erfolgen, wobei die Meinung vertreten wird, dass die technische Beherrschbarkeit eines Endlagers auf Grund der langen Zeiträume auch mit P&T nicht gegeben ist [ACA 13]. Als ökonomische Gesichtspunkte werden unter anderem die erwarteten negativen Auswirkungen auf die Wohn- und Lebensqualität für die Standortgemeinden der P&T-Anlagen angeführt. Obwohl Arbeitsplätze vor Ort geschaffen werden würden und die Steuereinnahmen der Kommunen steigen dürften, wird von einer Beeinträchtigung der Wohn- und Lebens-

qualität der Bevölkerung durch ein erhöhtes Verkehrsaufkommen, Lärm und Veränderungen des Landschaftsbildes (Flächennutzung) ausgegangen [ACA 13].

Es kann daher vor diesem Hintergrund kein positives Fazit hinsichtlich der Akzeptanz von P&T in der deutschen Bevölkerung gezogen werden.

3.6. Notwendige Maßnahmen der Sicherung während des gesamten Transmutationsbetriebs

Für die Realisierung eines (nationalen) P&T-Konzepts sind verschiedene neu zu errichtende kern-technische Anlagen erforderlich. Zur Sicherung dieser Anlagen sind im Prinzip etwa die gleichen Anforderungen wie bei aktuell betriebenen kerntechnischen Anlagen (Kernkraftwerke, Anlagen des nuklearen Brennstoffkreislaufs) vorzusehen, z. B. bauliche Schutzmaßnahmen, permanent besetzte Sicherheitszentralen, Meldelinien und Unterstützung durch Sicherheitsorgane des Staates für den Fall einer Bedrohung, etc. Eine Besonderheit stellen die Anlagen zur Wiederaufarbeitung und zur Brennstofffabrikation dar, da durch das Vorliegen von abgetrenntem spaltbarem Material hier ein höheres Proliferationsrisiko bestehen kann. Neben Maßnahmen zur (Anlagen-)Sicherung sind auch die entsprechenden Überwachungseinrichtungen zur Anlagensicherheit sowie zur radiologischen Umgebungsüberwachung einzubeziehen.

Als kerntechnische Anlage muss eine Partitionierungs- und Transmutationsanlage die folgenden fundamentalen Schutzziele erfüllen:

- Kontrolle der Reaktivität,
- Kühlung der Brennelemente,
- Einschluss der radioaktiven Stoffe.

Diese Schutzziele können auf Basis des gestaffelten Sicherheitsbarrieren Konzeptes (*Defence in Depth*, DiD) nach INSAG-10 [IAE 96], den Anforderungen der Generation IV-Systeme (inhärente Sicherheit und passive Systeme) und den Anforderungen der *Western European Nuclear Regulators Association* (WENRA) [WEN 09], [WEN 12] umgesetzt werden. Derzeit erfolgt eine Harmonisierung der zukünftigen Methodik zur Sicherheitsbewertung im europäischen Rahmen mit den Euratom FP-7 *Safety Assessment for Reactors of Generation IV* (SARGEN-IV) [SAR 11] und dem Multinational Design Evaluation Programme (MDEP) [MDE 12] als Vorstufe zur Schaffung eines nuklearen Regelwerkes.

Eine genauere Betrachtung der Sicherheitsfunktionen zur Einhaltung der Schutzziele ist abhängig vom gewählten Design der Anlage. Am Beispiel einer ADS-Anlage werden die nötigen Sicherheitsmerkmale in [ACA 13] im Detail diskutiert, so dass an dieser Stelle nur die grundlegenden Merkmale erwähnt werden.

Bei einer ADS-Anlage handelt es sich um einen unterkritischen Reaktor, deren Leistung durch einen Protonenbeschleuniger, der eine externe Neutronenquelle treibt, bestimmt wird. Durch Abschaltung des Beschleunigers wird der Reaktor abgeschaltet, so dass der Zustand der Unterkritikalität einen Beitrag zur inhärenten Sicherheit des Systems leistet. Aufgrund der Kopplung eines unterkritischen Reaktors und eines Beschleunigers, der sowohl den Reaktorkernbehälter (fensterloses Target) als auch das Reaktorgebäude durchdringt, muss das gestaffelte Sicherheitsbarrierensystem und die postulierten Auslöseereignisse für Störfälle weiterentwickelt werden, denn das Protonen-

strahlrohr öffnet einen möglichen Pfad für die Freisetzung radiotoxischen Materials. Bei der Verwendung eines Strahlfensters bildet dies die topologische Fortsetzung der zweiten Sicherheitsbarriere. Das Spallationstarget und insbesondere das Strahlfenster erfahren durch den Beschuss der Protonen Strahlenschäden und Materialien werden aktiviert. Die Sicherstellung der Kühlung der Strukturmaterialien und die Integrität des Targetsystems erfordert eine hinreichende Wärmeabfuhr im Normalbetrieb, im Störfall und im Fall des abgeschalteten Protonenstrahls. Die Aktivierung der Anlagenkomponenten spielt eine entscheidende Rolle nach dem Abschalten des Beschleunigers und für die Langzeitsicherheit beim Rückbau der Anlage, so dass die Auslegung von Abschirmungen eine besondere Anforderung an den Strahlenschutz stellt.

Die Kritikalitätssicherheit bei Partitionierungsanlagen resultiert aus der Veränderung der Stoffströme infolge der Abtrennung der Minoren Actiniden. Um die Proliferationssicherheit zu gewährleisten, sollten alle Transurane gemeinsam partitioniert und gemeinsam als Brennstoff eingesetzt werden.

Grundsätzlich sind noch F&E-Arbeiten auf dem Gebiet der Sicherheitsbewertung zu erbringen. So sind z. B. die Rechenverfahren zur Kritikalitätsanalyse durch geeignete Experimente zu validieren [DIN 94], [ANS 07]. Eine qualitätsgesicherte Sammlung solcher Benchmark Experimente stellt das „*International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments*“ dar [NEA 11B], wobei zu den Minoren Actiniden nur eine geringe Anzahl an Experimenten enthalten sind, so dass an dieser Stelle noch Handlungsbedarf besteht.

Wie schon in Abschnitt 3.5.2 erwähnt, kann sich in der Zukunft die Sichtweise in der Bevölkerung zur Transmutation verändern, z. B. im Hinblick auf eine abnehmende Akzeptanz für das subjektiv empfundene Risiko (unabhängig vom realen Risiko) und im Hinblick auf die Bereitschaft, die Kosten für die Transmutation zu tragen. Vor diesem Hintergrund muss auch sichergestellt werden, dass die sicherheitstechnischen Voraussetzungen für die andauernde Sicherung und Überwachung der Anlagen weiterbestehen.

4. P&T-STRATEGIEN IN VERSCHIEDENEN LÄNDERN

4.1. Diskussion und Entwicklungsstand in anderen Ländern

F&E-Programme zum Thema P&T werden in einer Reihe von europäischen (v. a. Frankreich, Belgien, Russland) sowie außereuropäischen Ländern (z. B. USA, Japan) durchgeführt.

In Frankreich steht dabei die Entwicklung eines geschlossenen Brennstoffkreislaufs mit schnellen Reaktorsystemen im Vordergrund [POI 12A], [POI 12B], [POI 14], während in Belgien das ADS-Konzept im Rahmen des MYRRHA-Projekts verfolgt wird.

In den USA wurden in der Vergangenheit eine Reihe von Projekten zum Thema P&T durchgeführt, wobei insbesondere ein geschlossener Brennstoffkreislauf unter Nutzung von flüssigmetallgekühlten schnellen Reaktoren im Fokus stand. Daneben wurden auch Blei- und Blei-Wismutgekühlte ADS-Konzepte entwickelt, bei denen der Brennstoff in fester Form (als Oxid, Nitrid oder Carbid) oder auch in Form einer Salzschnmelze (*molten salt reactor*) vorliegen kann. Ende der 1990er Jahre wurde eine Roadmap zur Entwicklung einer beschleunigergetriebenen Transmutationsanlage erstellt (ATW-Konzept, *accelerator driven transmutation of waste*) [DOE 99].

Wie in vielen anderen Ländern fokussieren sich auch in Russland die kerntechnischen F&E-Arbeiten auf einen geschlossenen Brennstoffkreislauf. Zusätzlich erfolgt die Entwicklung eines speziell für die Transmutation vorgesehenen Salzschnmelzenreaktors, dem „*Molten Salt Actinide Recycler & Transmuter*“ (MOSART), in dem eine Online-Rezyklierung des verbrauchten Brennstoffs vorgesehen ist.

In Ländern wie China, Süd-Korea und Indien wird wie in Frankreich der geschlossene nukleare Brennstoffkreislauf angestrebt. Daher sind die F&E-Programme in diesen Ländern ebenfalls auf den Einsatz von schnellen Brutreaktoren (GenIV) fokussiert.

Im Folgenden werden die Vorgehensweisen der genannten Staaten im Hinblick auf Transmutation kurz umrissen, bevor in Abschnitt 4.2 die daraus folgenden Konsequenzen für die Situation in Deutschland diskutiert werden.

4.1.1. Frankreich

In Frankreich werden zurzeit 58 Leistungsreaktoren mit einer Leistung von insgesamt 63 GW_e zur Stromerzeugung betrieben. Damit deckt Frankreich seinen Strombedarf zu 75 %. Nach dem Reaktorunfall von Fukushima wurde auch in Frankreich ein Gesetz zur „Energiewende“ beschlossen, wobei die Ziele aber nicht mit denen in Deutschland vergleichbar sind. Im Rahmen dieses Gesetzes soll die Nutzung fossiler Energieträger bis 2030 im Vergleich zu 2012 um 30 % reduziert werden, der Gesamtenergiebedarf soll bis 2050 halbiert werden. Die nukleare Stromerzeugungskapazität wurde auf den derzeitigen Stand von 63,2 GW_e begrenzt und der Anteil an der Gesamtstromerzeugung soll bis 2025 von derzeit 75 % auf 50 % sinken. Dabei soll der Anteil erneuerbarer Energien bis 2020 auf 23 % und bis 2030 auf 32 % erhöht werden. Der Fortschritt wird alle 5 Jahre begutachtet ([CAN 15], [WNA 15A]).

Weiterhin hält Frankreich an den Plänen zur Einführung von Reaktoren mit schnellem Neutronenspektrum fest. Dazu soll 2025 die Demonstrationsanlage ASTRID (*Advanced Sodium Technologi-*

cal Reactor for Industrial Demonstration) in Betrieb gehen, um die industrielle Einführung von schnellen Leistungsreaktoren bis etwa 2050 zu erproben. Aktuelle Szenarien gehen davon aus, dass die bestehende Flotte von Leichtwasserreaktoren nach und nach durch Reaktoren der dritten Generation vom Typ EPR ersetzt werden, bis ab 2050 sukzessive schnelle Reaktoren der vierten Generation eingeführt werden. Dabei soll in den schnellen Reaktoren anfangs Plutonium aus den derzeit verwendeten MOX-Brennelementen verwendet werden. Später, mit steigender Zahl schneller Reaktoren, wird eine Rezyklierung sämtlicher Brennelemente (auch aus schnellen Reaktoren) angestrebt, wodurch die Gesamtmenge an Plutonium im Brennstoffkreislauf stabilisiert würde. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts soll dann die gesamte Reaktorflotte aus schnellen Reaktoren bestehen, wodurch auf den Einsatz von frischem Uran als Rohstoff verzichtet werden könnte [CHA 15]. Der bestehende Vorrat an abgereichertem Uran würde für die Brennstoffversorgung der schnellen Reaktoren über Jahrhunderte hinweg ausreichen und Frankreich weitestgehend unabhängig von Uranerz-Rohstoffimporten machen (vgl. [BAS 15]).

Eine Transmutation würde somit im Rahmen des geschlossenen Brennstoffkreislaufs stattfinden, wobei zunächst hauptsächlich Plutonium als Brennstoff verwendet wird. Da in Frankreich das Abfallaufkommen aufgrund der fortgeführten Nutzung der nuklearen Stromerzeugung prinzipiell nicht begrenzt ist, wird intensiv an Möglichkeiten zur Abfallminimierung geforscht, um ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle möglichst lange und effizient nutzen zu können. Durch die derzeit bereits etablierte Abtrennung von Uran und Plutonium aus den bestrahlten Brennelementen muss nur noch ein vergleichsweise kleiner Teil an Spaltprodukten in ein Endlager verbracht werden. Diese werden zurzeit durch Verglasung immobilisiert, das Glas enthält zurzeit auch die Minoren Actinide. Die Größe des hierfür notwendigen Endlagers wird maßgeblich von der Wärmeleistung der Abfallgebinde bestimmt. Aufgrund dessen verfolgt Frankreich intensive Forschung, um Americium ebenfalls abzutrennen, da es 65 % der Masse der Minoren Actiniden ausmacht und die Langzeitwärmeleistung der verglasten Abfälle dominiert. Studien haben gezeigt, dass durch eine Abtrennung des Americiums die verglasten Abfälle deutlich dichter gepackt werden könnten, was zu einer Verkleinerung des Endlagers um den Faktor 8 – 10 führen könnte, bzw. die 8 – 10-fache Menge an Abfällen in ein Endlager gegebener Größe eingebracht werden könnte [CHA 13]. Das abgetrennte Americium würde dabei in den Brennstoffkreislauf eingespeist werden, wo es langsam transmutiert würde. Eine spezialisierte Transmutationsanlage für Americium ist nicht vorgesehen. Die Menge an schwach- und mittelaktiven Abfällen würde dadurch um etwa 20 % erhöht werden, bezogen auf den derzeit in Frankreich etablierten Kernbrennstoffkreislauf (u. a. [POI 12B], [POI 14], [WAR 11]).

4.1.2. Belgien

Am belgischen Forschungszentrum SCK•CEN in Mol wird seit 1998 an der Realisierung des MYRRHA-Projektes gearbeitet. Hierbei handelt es sich um den beschleunigergetriebenen „*Multi-purpose HYbrid Research Reactor for High-technology Applications*“ (MYRRHA) [ABD 14], [DEB 14]. Mit diesem Projekt ist eine Mehrzweckanlage in Planung, u. a. um die Transmutation mit einem ADS-Reaktorsystem bis zur Demonstrationsreife zu entwickeln. MYRRHA soll als Demonstrator die technische Machbarkeit einer schwermetallgekühlten ADS-Anlage zeigen und auch als Neutronenquelle genutzt werden. Ein weiteres Ziel ist die Erforschung von Sicherheitsparametern für dieses unterkritische Reaktorsystem.

Als Kühlmittel wird in diesem Fall ein flüssiges Blei-Wismut-Eutektikum verwendet, das gleichzeitig auch als Spallationstarget verwendet wird. Als Brennstoff findet MOX mit einem Plutoniumanteil von bis zu 30 % Anwendung [ACA 13].

Diese europäische Demonstrationsanlage soll in den nächsten Jahren gebaut und ab 2025 betriebsbereit sein [ACA 13], allerdings ist die Finanzierung noch nicht abschließend geklärt. Deutschland beabsichtigt, sich über europäische Forschungsk Kooperationen an den wissenschaftlichen Fragestellungen des Projekts zu beteiligen.

Belgien beschloss 2003 den allmählichen Ausstieg aus der Verwendung der Kernenergie zu Zwecken der industriellen Stromerzeugung auf dem belgischen Staatsgebiet bis 2025, wobei dies unter den Vorbehalt gestellt wurde, dass unter anderem im Falle einer Bedrohung der Versorgungssicherheit des Landes dieser Beschluss einer Überprüfung unterzogen werden kann (beispielsweise wurde Anfang Oktober 2015 die Entscheidung getroffen, die Kernkraftwerke Doel-1 und Doel-2 bis 2025 zu betreiben).

Es wurde noch keine Standortentscheidung für die Lagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen getroffen. In Mol wird in 225 m Tiefe das Untertagelabor HADES (*High-Activity Disposal Experimental Site*) betrieben, um Ton als Wirtsgestein auf seine Eignung für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle zu untersuchen. 2009 startete ONDRAF/NIRAS ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm mit dem Ziel, den Nachweis zu erbringen, dass das geplante belgische Endlager sicher errichtet, betrieben und schrittweise verschlossen werden kann. Die Ergebnisse sollen in die Erstellung eines „*Safety and Feasibility Case (SFC1)*“ einfließen, den ONDRAF/ NIRAS zurzeit vorbereitet und der Voraussetzung für den Beginn eines Standortsuchverfahrens ist [HAV 14].

Bis 1994 war in Belgien die Wiederaufarbeitung der Brennstoffe in Kooperation mit Frankreich vorgesehen. Entsprechende Verträge wurden aber gekündigt, und es wurden seitdem keine neuen Verträge zur Wiederaufarbeitung geschlossen. Die direkte Endlagerung der bestrahlten Brennelemente wurde als Entsorgungsoption in das Entsorgungskonzept aufgenommen.

Es gibt somit zurzeit in Belgien keine aktiven Endlager. Für schwach radioaktive Abfälle wurden jedoch oberflächennahe und tiefengeologische Endlagerprojekte in der Nähe der Reaktorstandorte untersucht. Aktuell läuft das Genehmigungsverfahren für ein oberflächennahes Endlager für schwachaktive kurzlebige Abfälle am Standort Dessel [NEA 13C].

4.1.3. Tschechien

In Tschechien werden zurzeit in sechs Druckwasserreaktoren an den Standorten Dukovany und Temelin ca. 35 % der Stromproduktion des Landes erzeugt. Der Anteil der nuklearen Stromerzeugung an der Gesamterzeugung soll im Rahmen der CO₂-Einsparziele der Europäischen Union bis 2040 auf 46 % bis 58 % steigen [WNA 15B]. Die abgebrannten Brennelemente werden an den Reaktorstandorten erst nass, später dann in CASTOR-Behältern trocken gelagert. Eine Wiederaufarbeitung wird derzeit nicht betrieben und die Entscheidung darüber wird dem Betreiber der Reaktoren überlassen, der die Wiederaufarbeitung zurzeit aber als nicht ökonomisch betrachtet. Allerdings beteiligt sich Tschechien an den europäischen Forschungsprojekten zu P&T, vor allem im Bereich der pyrometallurgischen Partitionierung, da eine mögliche Anwendung eines Salzschmelzen-

reaktors in Betracht gezogen wird [UHL 02]. In der Forschungseinrichtung NRI Řež (Nuclear Research Institute Řež plc) wird in diesem Zusammenhang eine Testanlage für schwermetallgekühlte Reaktoren für materialwissenschaftliche Fragestellungen betrieben.

In Tschechien gibt es noch kein Endlager für abgebrannten Brennstoff und hoch radioaktive Abfälle, allerdings sind drei Einrichtungen für die Lagerung von schwach radioaktiven Abfällen aus der kommerziellen Stromproduktion und Abfällen, die außerhalb der kommerziellen Stromproduktion anfallen, in Betrieb.

Die Endlager Richard II und Bratrstvi wurden in Felskavernen errichtet und sind seit 1964 bzw. 1974 in Betrieb. Das Endlager Dukovany ist das größte der drei Lager und wurde speziell für alle schwach- und mittelaktiven Abfälle aus der Stromproduktion konzipiert. Es ist seit 1994 auf dem Gelände des dortigen Kernkraftwerks in Betrieb, wobei die Abfälle oberflächennah gelagert werden. Es soll alle schwach- und mittelaktiven Abfälle aus dem Betrieb der Kernkraftwerke Dukovany und Temelin bis zum Ende ihrer Laufzeit aufnehmen [NEA 15B].

Ein möglicher Standort für ein tiefengeologisches Endlager für hoch radioaktive Abfälle wird derzeit gesucht. Es soll bis 2050 lizenziert sein und ca. 2060 in Betrieb gehen.

Verantwortlich für den Bau und Betrieb der Endlager in Tschechien ist die RAWRA (*Radioactive Waste Repository Authority*), die 1997 gegründet wurde. Die RAWRA ist zudem verantwortlich für den beim Finanzministerium geführten Entsorgungsfonds für radioaktive Abfälle. Die Stromerzeuger zahlen in diesen Fonds ein, aus dem dann alle Entsorgungsaktivitäten bezahlt werden. Die RAWRA ist ebenso verantwortlich für die Überwachung des Endlagers Hostim, das 1997 geschlossen wurde [SUR 15].

4.1.4. Japan

Die Kernenergie war bis zur Reaktorunglück in Fukushima weitgehend unumstritten. Nach dem Reaktorunfall von Fukushima wurden in Japan alle Reaktoren zunächst abgeschaltet und der Ausstieg aus der Kernenergie diskutiert, was aber aus wirtschaftlichen Gründen nicht vollzogen wird. Es wurde beschlossen, elf Reaktoren stillzulegen und zurückzubauen (darunter die sechs Reaktoren des Kraftwerks Fukushima Daiichi). Die restlichen Reaktoren wurden und werden strengen Sicherheitsüberprüfungen unterzogen. In der Zwischenzeit wurde der Reaktor Sendai 1 wieder in Betrieb genommen, weitere Reaktoren sollen folgen. Aufgrund der schwierigen Rohstoffsituation in Japan wird die Kernenergie als unverzichtbar betrachtet und der Anteil der Kernenergie an der Stromerzeugung soll bis 2030 auf 20 bis 22 % steigen, mit einem Anteil von 22 bis 24 % an Kraftwerken mit erneuerbaren Energien und 56 % an fossilen Kraftwerken. Die fehlenden 25 % sollten durch Effizienzsteigerungen und Verbrauchssenkung eingespart werden [TAG 14].

In Zukunft sollen zudem schnelle Reaktoren mit einem geschlossenen Brennstoffkreislauf eingesetzt werden. Dazu soll die Wiederaufarbeitungsanlage Rokkasho Mura in Kürze wieder in Betrieb genommen werden. Zurzeit wird die Anlage mit bestrahlten Brennstoffen „heiß“ getestet [MIN 15]. Die gesellschaftliche Akzeptanz der Kernenergie hat sich durch das Reaktorunglück von Fukushima wesentlich verändert. Laut einer Umfrage der japanischen Nachrichtenagentur Jiji Press sprachen sich 2014 84,3 % für einen schrittweisen bzw. sofortigen Ausstieg aus der Kernenergie aus [NTV 14].

Aufgrund des Reaktorunfalls von Fukushima erfährt die Partitionierung und Transmutation von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in Japan ein starkes öffentliches Interesse. Das zuständige japanische Ministerium (*Ministry of Education, Culture, Sports, Sciences and Technology*) (MEXT) richtete 2013 eine Arbeitsgruppe zur Bewertung der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse auf dem Gebiet der Partitionierung und Transmutation ein. Obwohl die beschleunigergetriebenen Systeme (ADS) zur Transmutation nur als Backup für die schnellen Brutreaktoren angesehen werden, empfiehlt diese Arbeitsgruppe, die ADS-Technik von der Grundlagenforschung zur Demonstrationsreife zu bringen [NEA 15].

Auf dem Gelände des nationalen Forschungszentrums für Hochenergie, dem KEK in Tsukuba, wurde im Jahr 2009 die Beschleunigereinrichtung *Japan Proton Accelerator Research Complex* (J-PARC) fertiggestellt [ACA 13], [SAS 14]. An dieser Protonenbeschleunigereinrichtung ist eine Experimentiereinrichtung für die Transmutation angeschlossen (*Transmutation Experimental Facility* – TEF). Obwohl noch technische Bewertungen fehlen, um die Anlage in Betrieb nehmen zu können, empfiehlt die genannte Arbeitsgruppe, die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten hierzu weiter zu fördern [NEA 15]. Es handelt sich hierbei sowohl um Experimente mit flüssigmetallgekühlten Spallationstargets als auch mit kritischen Anordnungen [ACA 13].

Eine weitere Empfehlung dieser Arbeitsgruppe ist, dass parallel zur ADS-Technologie auch andere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Partitionierung und Transmutation gefördert werden sollen. Hierzu zählen unter anderem auch die Partitionierungsprozesse von Minoren Actiniden und Spaltprodukten als Transmutationsbrennstoff [NEA 15].

Des Weiteren konzentriert sich Japan auf die Entwicklung eines geschlossenen Brennstoffkreislaufs unter der Verwendung von schnellen natriumgekühlten Reaktoren der Generation IV mit allen dazugehörigen Teilbereichen. Die Arbeitsgruppe des zuständigen japanischen Ministeriums entwickelte den Monju-Forschungsplan, in dem der schnelle natriumgekühlte Brutreaktor Prototyp für die folgenden drei Bereiche als Kerngebiet ausgewiesen wird:

- Zusammenstellung von Forschungs- und Entwicklungsergebnisse inklusive Verifizierung der technischen Machbarkeit von schnellen Brutreaktoren der Generation IV,
- Forschung und Entwicklung zum Zweck der Reduzierung des Volumens und der Radiotoxizität des Abfalls durch die Verwendung von schnellen Brutreaktoren, sowie
- Forschung und Entwicklung zum Zweck der Etablierung von Sicherheitstechnologien für schnelle Brutreaktoren als Kernkraftwerke.

Ein weiteres Ergebnis der eingesetzten Arbeitsgruppe ist die Entwicklung einer Roadmap zur Realisierung eines Kraftwerkes auf Basis der ADS-Technologie und die Produktion von Transmutationsbrennstoff aus den radioaktiven Abfällen aus Leichtwasserreaktoren im Jahre 2050 [NEA 15].

Japan betreibt in Tokai-Mura eine Anlage zur Herstellung von MOX-Brennstoffen (10 Mg/a). Eine weitere Anlage (130 Mg/a) befindet sich in Rokkasho-Mura im Bau [ACA 13], die voraussichtlich 2016 in Betrieb genommen wird. Diese Anlagen haben prozessbedingt weltweit die einzige Lizenz zur Herstellung von MOX-Brennstoffen mit bis zu 50 % Anteil Plutonium, weshalb das in MYRRHA zum Einsatz kommende MOX (bis zu 30 % Plutoniumanteil) aus Japan geliefert wird [ACA 13].

Die Suche nach einem Standort für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle in Japan war bislang nicht erfolgreich. 2007 wurde das japanische Abfallgesetz überarbeitet, das seitdem die Lagerung von Transuranabfällen in geologischen Formationen vorsieht. Obwohl die Präfektur Kōchi 2007 Interesse bekundete, scheiterte das Projekt jedoch an der fehlenden Akzeptanz in der Bevölkerung. 2013 wurde beschlossen, zunächst geologisch geeignete Regionen zu identifizieren. Die *Nuclear Waste Management Organisation* (NUMO) ist auf der Suche nach einer geeigneten geologischen Formation zur Lagerung von hoch radioaktivem Abfall. Im Jahr 2015 stellte die NUMO der japanischen Regierung eine Liste mit möglichen Orten für ein tiefengeologisches Endlager vor, die unter Aufsicht der *Atomic Energy Commission* erstellt wurde. Die japanische Regierung entschied, Gespräche über eine Zustimmung eines tiefen geologischen Endlagers mit den betroffenen Präfekturen zu führen [WNA 15C]. In Mutsu City in der Präfektur Aomori wird derzeit an einem Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente gebaut, das nach derzeitigen Planungen im Oktober 2016 in Betrieb gehen soll. Dort sollen die Brennelemente für die Wiederaufarbeitung gelagert werden.

Japan und Frankreich haben im Mai 2014 eine Vereinbarung getroffen, um gemeinsam an der Entwicklung von natriumgekühlten schnellen Reaktoren im Rahmen des ASTRID Projekts zu arbeiten.

4.1.5. Südkorea

In Südkorea werden zurzeit 24 Kernreaktoren an 6 verschiedenen Standorten betrieben, die etwa 30 % der Stromproduktion des Landes liefern. An den Standorten Singori und Hanul sind weitere Reaktoren im Bau, wobei die Abschaltung der beiden ältesten Reaktoren in Hanul für 2028 und 2029 geplant ist.

Das Lagerungskonzept für verbrauchten Brennstoff in Südkorea sieht vor, dass die abgebrannten Brennelemente am jeweiligen Standort in Lagerbecken gelagert werden. Die bisherigen Kapazitäten für abgebrannte Brennelemente werden ab 2016 erschöpft sein, weshalb nach einer Lösung für den Umgang mit radioaktiven Abfällen gesucht wird. Als ein vielversprechender Lösungsansatz werden die Abtrennung von Actiniden aus dem verbrauchten Brennstoff und die Transmutation in schnellen Reaktoren angesehen, weshalb in der Vergangenheit verschiedene Techniken zur Verbesserung des Brennstoffkreislaufes („*advanced fuel cycle*“) und zum natriumgekühlten schnellen Reaktor entwickelt wurden. Basierend auf diesen Erfahrungen wurde die *Pyroprocess Integrated inactive Demonstration* (PRIDE)-Anlage gebaut, um die Machbarkeit des Pyroprozesses zu zeigen. In der Anlage werden seit 2015 Ablauftests, Sicherheitstests, Einzelkomponententests und Leistungstests mit Uransurrogaten durchgeführt ([NEA 13B], [CHO 14]). Außerdem plant Südkorea, mit der Unterstützung der USA einen natriumgekühlten schnellen Reaktorprototyp der Generation IV zu bauen, der 2028 fertiggestellt sein soll. Dieser Reaktor ist konzipiert, um Transurane aus verbrauchten Brennstoffen aus Druckwasserreaktoren wiederzuverwerten. Südkorea erhofft sich, aus diesem Projekt Erkenntnisse zu gewinnen, die für das Abfallmanagement in einem geschlossenen Brennstoffkreislauf genutzt werden können, und Synergieeffekte für die effiziente Nutzung von natürlichem Uran in GenIV-Reaktoren zu schaffen [NEA 13B].

Aufgrund der fast erschöpften Lagerkapazitäten an den Standorten der Kernkraftwerke wird eine zentralisierte Zwischenlagerstätte für den Wärme entwickelnden radioaktiven Abfall geplant, die 2024 in Betrieb genommen werden soll. Bis dahin sollen die bestrahlten Brennelemente in Lagerbehältern trocken gelagert werden [WNA 15D]. Ein tiefes geologisches Endlager ist für die Zukunft

vorgesehen, aber ob dort verbrauchter Brennstoff oder Partitionierungs- und Transmutationsabfälle eingelagert werden, ist abhängig von der diesbezüglichen Entwicklung der nationalen Politik [WNA 15D].

Bemerkenswert ist, dass der Standort für das Endlager für nicht Wärme entwickelnde Abfälle in Wölsöng durch einen Bürgerentscheid 2005 ausgewählt wurde, nachdem sich dort ca. 90 % der Wähler für das Endlager aussprachen. In Südkorea gab es eine hohe gesellschaftliche Akzeptanz für die Kernenergie vor dem Reaktorunfall von Fukushima ([NEA 10B], [WNA 15D]). Allerdings ist durch dieses Ereignis, aber auch durch einige Vorfälle in Südkorea selbst, die Akzeptanz in der Bevölkerung seitdem gesunken [CFR 13]. Der *Korea Herald* zitiert Zahlen des koreanischen *Ministry of Knowledge Economy*, wonach das Vertrauen der koreanischen Bevölkerung in die Sicherheit von Kernkraftwerken von 71 % im Jahr 2010 auf 34,8 % Ende 2012 gesunken ist [KOR 13].

4.1.6. USA

In den USA werden zurzeit 99 Reaktoren mit einer Leistung von etwa 100 GW_e betrieben. Der Anteil an der Stromerzeugung liegt bei 19,5 %. Nachdem ähnlich wie in Deutschland in den USA vormals eine Wiederaufarbeitung der Brennstoffe durchgeführt wurde, wird nach Protesten in der Bevölkerung seit 1977 die direkte Endlagerung der bestrahlten Brennelemente favorisiert. Als Endlagerprojekt wurde lange Zeit der Standort *Yucca Mountain* in Nevada untersucht, bis hin zur Einreichung des Genehmigungsantrags. Präsident Obama stoppte zwar 2009 das Projekt, dieser Stopp wurde aber gerichtlich außer Kraft gesetzt, bis die technische Evaluation des Genehmigungsantrags abschließend geprüft ist. Es werden allerdings keine finanziellen Mittel mehr für das Projekt zur Verfügung gestellt, zu-mal durch die politische Entscheidung hin zur direkten Endlagerung das Endlager *Yucca Mountain* ohnehin zu klein für die anfallenden hoch radioaktiven Abfälle wäre. Zurzeit gibt es keine konkreten Entwürfe für ein alternatives tiefegeologisches Endlager für hoch radioaktive Abfälle, diese sollen aber oberflächennah in einer zentralisierten Einrichtung zwischengelagert werden (*Blue Ribbon Commission*).

In der Vergangenheit wurden viele Projekte durchgeführt, die im Zusammenhang mit der Partitionierung und Transmutation von radioaktiven Abfällen standen, wobei überwiegend auf den geschlossenen Brennstoffkreislauf mit flüssigmetallgekühlten schnellen Reaktoren fokussiert wurde. Ein Beispiel hierfür ist der Integral Fast Reaktor (IFR). Hierbei handelt es sich um einen natriumgekühlten schnellen Brutreaktor, mit dem es möglich war, Transurane zu verbrennen und somit die Minoren Actiniden nach der Abtrennung aus den Wärme entwickelnden Abfällen der Leichtwasserreaktoren als Brennstoff zu verwenden. Die Forschungsarbeiten hierzu wurden im Jahre 1992 von der U.S.-Regierung unter Bill Clinton untersagt [ACA 13].

Zusätzlich wurde in den 90er Jahren ein Blei- bzw. Blei-Wismut-ADS-Konzept am *Los Alamos National Laboratory* (LANL) entwickelt, bei dem der Brennstoff als Salzschnmelze vorliegt. Dieses Konzept ist nicht über die Designphase hinausgekommen, führte aber Ende der 1990er Jahre zu einer amerikanischen Roadmap für die Entwicklung einer beschleunigergetriebene Transmutationsanlage (ATW-Konzept: Accelerator-driven Transmutation of Waste) [ACA 13].

Aktuell laufen Forschungsarbeiten in den USA auf dem Gebiet der Partitionierung und Transmutation stark eingeschränkt. Nach der (vorläufigen) Einstellung des *Yucca Mountain*-Endlagerprojekts wurde auch die bis dahin verfolgte Strategie zur Abtrennung langlebiger und stark Wärme entwi-

ckelnder Radionuklide hinfällig. Um eine Neuausrichtung der Forschung zu Abtrennprozessen zu ermöglichen und die Kompetenz zu bündeln wurde das „*SIGMA-Team for Minor Actinide Separation*“ gegründet, das sich aus den Großforschungseinrichtungen Oak Ridge, Los Alamos, Pacific Northwest, Savannah River, Argonne und Idaho sowie der Washington State University zusammensetzt. Schwerpunkt ist die Entwicklung von einfachen und robusten Methoden zur Partitionierung der Minoren Actiniden [ACA 13]. Das DOE unterstützt Projekte zur Partitionierung, wie z. B. die Untersuchung von chemischen Separationsmethoden von Actiniden zur Verbesserung der Endlagerfähigkeit [NEA 15D]. Es scheint aber so, als würde die U.S.-Administration abwarten und die internationalen Forschungsaktivitäten beobachten, die sich mit der Partitionierung und Transmutation befassen ([ACA 13], [TOD 15]).

Mit der WIPP (*Waste Isolation Pilot Plant*) befindet sich zwar ein Endlager in den USA in Betrieb. Dort werden allerdings nur Transuranabfälle aus der militärischen Nutzung der Kernspaltung in Salzgestein eingelagert. Diese Abfälle enthalten keine Spaltprodukte und sind damit kaum Wärme entwickelnd, beinhalten aber eine hohe Radiotoxizität durch die eingeschlossenen Actiniden. Für schwach radioaktive Abfälle werden mehrere Endlager in Barnwell, South Carolina, Richland, Washington, Clive, Utah und Oak Ridge, Tennessee betrieben.

In einer neuen Studie wurden über 4.398 verschiedene Brennstoffkreislaufszenerarien untersucht. Dabei zeigte sich, dass die vier aussichtsreichsten Optionen alle einen geschlossenen Brennstoffkreislauf mit Rezyklierung des Brennstoffs und dem Einsatz von Reaktoren mit schnellem Neutronspektrum vorsehen. Daher wird eine erneute Änderung des Entsorgungskonzeptes hin zur Wiederaufarbeitung und weg von der direkten Endlagerung wieder in Betracht gezogen ([GEH 15], [PAS 15], [WIG 15]).

4.1.7. Russland

In Russland werden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im kerntechnischen Bereich auf den geschlossenen Brennstoffkreislauf fokussiert [KAG 15]. Hierfür hilfreich sind die langjährigen Erfahrungen in der Schwermetalltechnologie, die die Forschungseinrichtungen vorweisen können. Das heutige Ziel der Forschung im Bereich der Partitionierung ist die Separation von einzelnen Radionukliden aus radioaktiven Abfällen zur Lagerung oder Transmutation. Der Schwerpunkt liegt hierbei in der Abtrennung von Americium zur Herstellung von neuen Brennstoffen aus Minoren Actiniden für neue Reaktorsysteme [NEA 15].

Seit 1982 wird im Kernkraftwerk Beloyarsk ein natriumgekühlter schneller Brutreaktor (BN-600) betrieben. Der Nachfolger (BN-800) befindet sich seit 2014 in der Testphase und wird voraussichtlich Ende 2015 den Volllastbetrieb erreichen. Hierbei handelt es sich um eine Weiterentwicklung mit dem Ziel der Verbrennung von Plutonium im Rahmen der Abrüstung von Atomwaffen [ACA 13]. Zusätzlich hierzu befindet sich der BN-1200, ebenfalls ein natriumgekühlter schneller Reaktor, in der Planungsphase. Neben der Weiterentwicklung der natriumgekühlten schnellen Reaktoren werden auch neue Reaktorkonzepte der Generation IV verfolgt. So sollen die mit schwerem Flüssigmetall gekühlten Reaktoren, die für den Einsatz in U-Booten entwickelt wurden, auch im Leistungsbetrieb eingesetzt werden. Der mit flüssigem Blei gekühlte Prototypreaktor BREST-300 (300 MW_e) soll ab 2016 in Seversk errichtet werden. Ein weiteres Reaktorkonzept, das verfolgt wird, ist der Salzschnmelzenreaktor – *Molten Salt Actinide Recycler & Transmuter* (MOSART)

[IGN 14]. Bei diesem Konzept wird das generelle Ziel verfolgt, die Machbarkeit der Transmutation von Transuranen in einem geschlossenen Brennstoffkreislauf zu untersuchen. Bei diesem Reaktortyp wird während des Betriebes ständig ein kleiner Volumenstrom des Salzes aufbereitet und gereinigt, so dass keine Wiederaufbereitung des Transmutationsbrennstoffs wie bei Festbrennstoffen nötig wird [ACA 13].

Forschungsarbeiten zum Thema ADS beschränken sich eher auf die Grundlagenforschung. In Dubna in der Nähe von Moskau werden an verschiedenen Beschleunigeranlagen experimentelle Untersuchungen zur Transmutation langlebiger, radiotoxischer Abfälle durchgeführt. Hierbei liegt aber der Fokus auf der experimentellen Bestimmung von nuklearen Daten wie z. B. Wirkungsquerschnitten für Spallation und Transmutation [ACA 13].

4.2. Übertragbarkeit auf die Situation in Deutschland

Von den in Abschnitt 4.1 beschriebenen Ländern verfolgt lediglich Belgien ein der Vorgehensweise in Deutschland ähnliches Szenario des Ausstiegs aus der Kernenergie bis 2025 und beabsichtigt, mit dem Bau und Betrieb von MYRRHA eine Forschungseinrichtung u. a. für die Transmutationsforschung zu betreiben, an der sich auch Japan beteiligen möchte.

Alle anderen in Abschnitt 4.1 beschriebenen Länder (inkl. Japan) führen die Nutzung von Kernkraftwerken zur Stromerzeugung fort, allerdings mit unterschiedlicher Intensität und unterschiedlichen Kernbrennstoffkreisläufen. Von den in Abschnitt 4.1 betrachteten Ländern ist nur in den USA und Belgien wie in Deutschland die direkte Endlagerung der bestrahlten Brennelemente vorgesehen, wobei die derzeitige politische Ausrichtung in den USA unsicher ist und eine mögliche Anwendung eines erweiterten Brennstoffkreislaufs mit schnellen Reaktoren ernsthaft in Betracht gezogen wird. In Tschechien wird die Entscheidung über eine mögliche Wiederaufarbeitung des Kernbrennstoffs den Kraftwerksbetreibern überlassen, die sie derzeit aber als nicht ökonomisch betrachten.

Am weitesten fortgeschritten in Bezug auf eine mögliche Anwendung der Transmutation von Plutonium und eventuell Americium in schnellen Reaktoren sind Frankreich und Russland. In diesen Ländern werden Konzepte verfolgt, innerhalb der nächsten Jahrzehnte Leistungsreaktoren mit schnellem Neutronenspektrum in Betrieb zu nehmen und fortgeschrittene Abtrennprozesse anzuwenden.

Aufgrund der aktuellen Gesetzeslage in Deutschland (vgl. Abschnitt 3.5.2.1) und insbesondere aufgrund des Widerstands der Bevölkerung gegenüber kerntechnischen Einrichtungen (vgl. Abschnitt 3.5.2.3) erscheint eine Anwendung von P&T in Deutschland als sehr unwahrscheinlich. Da in Frankreich und eventuell auch anderen europäischen Ländern in Zukunft wahrscheinlich Anlagen zur Anwendung von P&T genutzt werden, stellt somit die europäische Systempartizipation eine mögliche Alternative zur nationalen Lösung dar [CAS 15]. Die damit verbundenen vermehrten Transporte müssten allerdings von der Bevölkerung akzeptiert und die Behandlung der deutschen Abfälle müsste über internationale Verträge eindeutig geregelt werden. Damit eingeschlossen sind auch die Rücknahme der Abfälle aus der Behandlung und deren Endlagerung, der Verbleib und eine mögliche Nutzung des abgetrennten Urans und die energetische Nutzung der Transuranelemente. Die Notwendigkeit der Einrichtung eines Endlagers für Wärme entwickelnde Abfälle bleibt davon prinzipiell unberührt, auch wenn das Volumen der Abfälle insgesamt reduziert würde.

5. ASPEKTE VON P&T HINSICHTLICH DER ENTSORGUNG HOCH RADIOAKTIVER WÄRME ENTWICKELNDER ABFÄLLE IN DEUTSCHLAND

Im Hinblick auf einen möglichen Beitrag der Transmutation zur nuklearen Entsorgung in Deutschland werden nachfolgend verschiedene technisch-wissenschaftliche und gesellschaftliche Aspekte eines Einsatzes von P&T analysiert und diskutiert. Die Betrachtungen beschränken sich dabei generell auf die Anwendung von P&T zur Behandlung der in Deutschland angefallenen bzw. noch anfallenden bestrahlten Brennelemente (vgl. auch Abschnitt 2.2).

5.1. Abfallmengen und -charakteristika

Die Anwendung von P&T führt zu Änderungen in den Volumina der in Deutschland anfallenden, radioaktiven Abfälle, die endgelagert werden müssen. Durch Anwendung von P&T vermindert sich das Volumen an hoch radioaktiven Wärme entwickelnden Abfällen deutlich, wohingegen die Menge an radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung zunimmt (vgl. Abschnitt 3.4). Das konkrete Abfallaufkommen in den jeweiligen Kategorien würde dabei von den angewendeten Partitionierungsverfahren (d. h. hydro- oder pyrometallurgische Verfahren), der Anzahl der erforderlichen Rezyklierungsschritte sowie insbesondere auch der Strategie der Umsetzung von P&T in einer regionalen oder nationalen Lösung abhängen. Bei Anwendung von P&T könnte das Volumen an endzulagernden Wärme entwickelnden Abfällen auf ca. ein Drittel reduziert werden ([ACA 13], [ESK 15]), insbesondere durch die Abtrennung des Urans². Das Volumen an Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung würde demgegenüber um ca. 60.000 m³ (regionale Lösung) bzw. 100.000 m³ (nationale Lösung) zunehmen, wobei das größere Abfallaufkommen bei einer nationalen Lösung dem Rückbau der Anlagen zur Partitionierung und Brennstofffertigung sowie der Transmutationsanlagen geschuldet ist (vgl. [ACA 13]). Generell ist allerdings darauf hinzuweisen, dass die Abschätzungen zu dem zusätzlichen Abfallaufkommen bei Anwendung von P&T mit großen Unsicherheiten verbunden sind, da diese nicht anhand eines optimierten großtechnischen Prozesses erfolgten und (internationale) Erfahrungswerte fehlen. Daher könnte das zusätzliche Abfallaufkommen auch (erheblich) niedriger ausfallen.

Neben den Änderungen des Aufkommens an in Deutschland endzulagernden Wärme entwickelnden Abfällen würde sich durch Anwendung von P&T auch das Spektrum an endzulagernden Materialien deutlich ändern, da keine bestrahlten Brennelemente aus Leistungsreaktoren mehr endzulagern wären. In Fall einer Endlagerung vorgeschalteten P&T-Schritts würde das Spektrum der in ein Endlager zu verbringenden Wärme entwickelnden Abfälle i. W. bereits angefallene verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung, die im Rahmen des P&T-Verfahrens anfallenden hoch radioaktiven Abfälle (verglaste Spalt- und Aktivierungsprodukte sowie Sekundärabfälle) sowie ggf. nicht mit P&T behandelbare, bestrahlte Brennelemente aus Versuchs-, Demonstrations- und Prototypreaktoren sowie Forschungsreaktoren umfassen. Ggf. könnte P&T aber auch dazu genutzt werden, nicht effizient transmutierbare langlebigere mobile Spalt- und Aktivierungsprodukte bei der Partitionie-

² Die Art des Umgangs mit dem abgetrennten Uran, d. h. Einsatz als Ressource zur Energieerzeugung in Reaktoren (ggf. im Ausland) oder direkte Endlagerung als Abfall mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, ist prinzipiell eine politische Entscheidung.

rung abzutrennen und in maßgeschneiderten, besonders stabilen Abfallformen (z. B. keramische Materialien) langzeitstabil einzubinden und damit zu einer noch besseren Immobilisierung dieser Radionuklide in einem tiefeologischen Endlager beizutragen.

5.2. Dimensionierung eines Endlagers für Wärme entwickelnde Abfälle

Auch bei Anwendung von P&T wird weiterhin ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in Deutschland benötigt, d. h. P&T ist kein abschließender Entsorgungspfad und kann ein tiefes geologisches Endlager nicht ersetzen. Die industrielle Umsetzung von P&T zur Behandlung der angefallenen und noch anfallenden bestrahlten Brennelemente aus Leistungsreaktoren würde aber zu einer Reduzierung des – vom Endlagerkonzept, von der Wärmeleistung der Abfälle und den Charakteristika des Wirtsgesteins abhängigen – Flächenbedarfs („*Footprint*“) eines Endlagers für hoch radioaktive Wärme entwickelnde Abfälle führen. Ursächlich hierfür wäre neben dem verringerten Abfallaufkommen insbesondere die infolge der Transmutation der Actiniden – nach einigen Jahrzehnten Abklingdauer – verringerte Wärmeleistung der Abfälle. Aufgrund des konstant bleibenden Flächenbedarfs für die Einlagerung bereits vorhandener Abfälle aus der Wiederaufarbeitung sowie für den Infrastrukturbereich des Endlagers wäre nach [GRS 14] von einer Reduzierung des Flächenbedarfs für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle infolge der Anwendung von P&T von maximal 50 % auszugehen (vgl. auch [ACA 13], [ESK 15]). Um von der durch P&T verminderten Wärmeleistung der zukünftig anfallenden Abfälle allerdings Kredit nehmen zu können, wären entsprechende Zwischenlagerzeiten (mindestens 70 bis 100 Jahre, vgl. [ESK 15]) erforderlich.

Des Weiteren ist zu bedenken, dass die Anwendung von P&T zu einem zusätzlichen Anfall an radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung führt, die einer geordneten Entsorgung bedürfen. Mögliche Entsorgungsoptionen umfassen beispielsweise die Einlagerung in bestimmte Bereiche des Endlagers für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle, die Errichtung eines weiteren Endlagers für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in Deutschland, oder eine Erweiterung des Endlagers Konrad durch Änderung des festgestellten Plans.

5.3. Sicherheitsaspekte

Im Rahmen einer Diskussion von P&T als ergänzender Option bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle sind Sicherheitsaspekte u. a. im Zusammenhang mit dem Betrieb der P&T-Anlagen (inkl. der notwendigen Materialtransporte) und der Anlagen zur Abfallkonditionierung, dem Betrieb von (Langzeit)Zwischenlagern sowie der Betriebssicherheit und der Langzeitsicherheit eines tiefeologischen Endlagers zu betrachten.

5.3.1. Betriebssicherheit des P&T-Betriebs

Die Umsetzung einer P&T-Strategie würde die Errichtung und den Betrieb verschiedener kerntechnischer Anlagen (Partitionierungsanlagen, Brennstoffertigungsanlagen, Transmutationsanlagen) erfordern, die über Zeiträume von etlichen Jahrzehnten zu betreiben wären [ACA 13]. Nach [ESK 15] ist das radiologische Gefährdungspotential von P&T-Anlagen für Mensch und Umwelt derzeit quantitativ nicht exakt einschätzbar. Allerdings besteht ein erklärtes Ziel bei der Entwicklung von zukünftigen Reaktorsystemen (Generation IV) in der Erhöhung der Sicherheitsstandards im Vergleich zu derzeit verfügbaren Anlagen [KEL 14], [NEA 14]. Die potentiellen radiologischen Aus-

wirkungen durch weitere für P&T benötigte Einrichtungen sollten vergleichbar mit bestehenden Anlagen zur Wiederaufarbeitung oder Konditionierung von abgebrannten Brennelementen sein [ACA 13], [ESK 15]. Neben den Risiken durch die P&T-Anlagen wird in [ESK 15] auch auf potentielle Umweltauswirkungen durch die bei P&T entstehenden Sekundärabfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung hingewiesen. Des Weiteren ist die ggf. längerfristige (oberirdische) Zwischenlagerung der konditionierten P&T-Abfälle bis zur gewünschten Abnahme der Zerfallswärmeleistung zu nennen. Darüber hinaus wird es nach [ESK 15] zu einer Zunahme der erforderlichen Transporte radioaktiven Materials zwischen den verschiedenen Anlagen (Kernkraftwerke, Zwischenlager, P&T-Anlagen) kommen, wobei die Zahl der Transporte stark vom jeweils betrachteten P&T-Szenario, d. h. regionaler oder nationaler Lösung, abhängt.

5.3.2. Langzeitsicherheit eines Endlagers für Wärme entwickelnde Abfälle

Die Transmutation insbesondere von langlebigen Isotopen der Transuranelemente (Plutonium und insbesondere der Minoren Actiniden Americium, Curium und Neptunium) zielt auf die Reduzierung der langfristigen Radiotoxizität von (direkt endzulagernden) bestrahlten Brennelementen aus der Kernenergienutzung ab. Zahlreiche Untersuchungen [IAE 04] haben gezeigt, dass die Radiotoxizität um einen Faktor von 10 gesenkt werden kann, wenn das gesamte Plutonium abgetrennt und gespalten wird. Wenn zusätzlich die Minoren Actiniden transmutiert werden, kann der Faktor auf über 100 erhöht werden [IAE 04], so dass die Radiotoxizität der Abfälle nach ca. 1.000 Jahren derjenigen von nicht behandelten Brennelementen nach 1 Mio. Jahren entspricht. Allerdings steigen durch P&T infolge der Spaltung der Transurane die Spaltproduktinventare in den endzulagernden Abfällen an.

Im Rahmen der Betrachtung zur Langzeitsicherheit von tiefeingeologischen Endlagern stehen häufig die langlebigeren dosisrelevanten Spalt- und Aktivierungsprodukte wie Cäsium-135, Iod-129, Technetium-99, Selen-79, Chlor-36 und Kohlenstoff-14 im Vordergrund, die als relativ mobil in einem tiefeingeologischen Endlagersystem sowie der Umwelt im Allgemeinen angesehen werden. Demgegenüber gelten die durch P&T umwandelbaren Transuranelemente unter Endlagerbedingungen als weitgehend immobil, so dass ihre Bedeutung hinsichtlich einer Freisetzung über den Wasserpfad wegen der geringen Mobilität in vielen Szenarien begrenzt ist (u. a. [NEA 11A]). Dadurch ergibt sich in vielen Betrachtungen zu P&T auch nur ein begrenzter Einfluss der Transmutation der Transurane auf die Langzeitsicherheit eines tiefeingeologischen Endlagers (vgl. u. a. [MAR 08], [RED 08]). Nach [ESK 15] zeigen wissenschaftliche Studien allerdings, dass sich Transurane durchaus nicht immer immobil verhalten, sondern unter bestimmten Bedingungen, z. B. infolge kolloidalen Transports, wesentlich schneller migrieren können. Eine Transmutation der Transurane könnte daher Ungewissheiten bzw. Unsicherheiten bzgl. des Migrationsverhaltens von Transuranen im Langzeitsicherheitsnachweis eines tiefen geologischen Endlagers reduzieren. Des Weiteren führt die deutliche Verringerung der Radiotoxizität der Abfälle beim P&T-Konzept zu einer signifikanten Reduktion der mit einem zukünftigen (ungewollten) menschlichen Eindringen (human intrusion) verbundenen Belastungen. Zudem trägt der verringerte „Footprint“ des Endlagers zu den im Zusammenhang mit „human intrusion“-Szenarien in [BMU 10] geforderten Optimierung des Endlagers im Hinblick auf deren Eintrittswahrscheinlichkeit bei. Neben den Transuranen (wg. Radiotoxizität) und den langlebigeren Spalt- und Aktivierungsprodukten (wg. Mobilität) kann bei der direkten Endlagerung von bestrahlten Brennelementen aus Leistungsreaktoren das Zerfallsprodukt Radi-

um-226 (Zerfallsprodukt aus der Uran-238-Reihe) eine Rolle bzgl. der Langzeitsicherheit des Endlagers spielen, da es in bestimmten Szenarien in Zeiträumen >100.000 Jahren das dosisbestimmende Radionuklid ist [SKB 06], [SKB 11]. Eine Abtrennung und Transmutation der Mutternuklide Uran-238 bzw. Uran-234 aus den Abfällen im Rahmen von P&T würde entsprechende Ungewissheiten im Langzeitsicherheitsnachweis reduzieren.

Generell ergäben sich nach [ESK 15] allerdings durch P&T keine prinzipiellen Änderungen hinsichtlich der Langzeitsicherheit eines Endlagers für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle in Deutschland, wobei aber P&T einen Beitrag zur Eingrenzung oder Reduzierung von Unsicherheiten und Ungewissheiten leisten könnte. Zudem könnte im Rahmen der Entwicklung von P&T-Strategien auch eine verbesserte Immobilisierung der abgetrennten und endzulagernden mobilen Spalt- und Aktivierungsprodukte (im Vergleich zu den Endlagermatrizes bestrahlte Brennelemente bzw. Borosilikatglas) erfolgen, z. B. durch Einbindung in maßgeschneiderte keramische Materialien mit hoher Korrosionsresistenz [RED 08]. Dies könnte zu einer deutlichen Reduzierung der Freisetzung von Spalt- und Aktivierungsprodukten bei einem Wasserzutritt zu den Abfällen im Endlager führen und Ungewissheiten hinsichtlich des Freisetzungs- und Migrationsverhaltens dieser Radionuklide im Langzeitsicherheitsnachweis vermindern.

5.3.3. Kritikalitätssicherheit

Kritikalität bezeichnet eine sich selbst-erhaltende (spontane) nukleare Kettenreaktion, bei der spaltbare Nuklide (z. B. Uran-235, Plutonium-239) durch Neutronen gespalten werden, wobei infolge der Kernspaltung wiederum Neutronen entstehen, die weitere Spaltreaktionen verursachen und damit die Kettenreaktion erhalten. Der Ansatz von P&T würde dazu führen, dass – mit Ausnahme der sehr geringen Inventare in den bereits verglasten Wiederaufarbeitungsabfällen – praktisch kein spaltbares Plutonium und Uran in das Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle eingebracht würden. Demgegenüber wird bei der direkten Endlagerung der in Deutschland anfallenden bestrahlten Brennelemente von einem Transuraninventar der hoch radioaktiven Abfälle von ca. 170 Mg ausgegangen bei einem Uran-235-Inventar von ca. 53 Mg [ACA 13]. Generell gilt das Auftreten von Kritikalitätsstörfällen in einem Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle zwar als sehr unwahrscheinlich (vgl. [GRS 04], [GRS 09]), ist aber für einige Szenarien bei Endlagerung von bestrahlten Kernbrennstoffen mit niedrigem Abbrand oder bei direkt endgelagerten MOX-Brennelementen nicht vollständig auszuschließen.

Der Aspekt der Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers würde bei Anwendung von P&T entfallen, da die endgelagerten Abfälle keine nennenswerten Inventare an spaltbaren Materialien aufweisen. Damit würde dem in [BMU 10] für wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Entwicklungen des Endlagersystems geforderten Nachweis des Ausschlusses des Auftretens kritischer Anordnungen auch für unwahrscheinliche Entwicklungen Rechnung getragen. Dem gegenüberzustellen wäre jedoch das potentielle Auftreten von Kritikalitätsereignissen in P&T-Anlagen, insbesondere bei der selektiven Abtrennung von spaltbarem Material im Rahmen der Wiederaufarbeitung [ACA 13], wobei das Auftreten kritischer Anordnungen in den Trennanlagen durch geeignete technische Maßnahmen verhindert werden müsste. Risiken durch überkritisches Verhalten in Transmutationsanlagen sind nach [ESK 15] insbesondere bei den unterkritischen ADS-Anlagen nicht zu erwarten.

Generell ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Konsequenzen von Kritikalitätsereignissen für Mensch und Umwelt bei der direkten Endlagerung bestrahlter Brennelemente und in P&T-Anlagen sehr unterschiedlich sind. Während die Konsequenzen eines Kritikalitätsereignisses in einem tiefen geologischen Endlager auf das Nahfeld des Einlagerungsbereichs begrenzt sind [GRS 04], können Kritikalitätsereignisse in kerntechnischen Anlagen unmittelbare radiologische Auswirkungen auf Betriebspersonal sowie die umgebende Biosphäre haben (vgl. [RSK 00]).

5.3.4. Proliferationsrisiken und Safeguards

Bei der direkten Endlagerung von bestrahlten Brennelementen sind Proliferationsrisiken, d. h. die missbräuchliche Nutzung spaltbaren Materials (insb. Plutonium) für militärische oder terroristische Zwecke nicht auszuschließen. Die Anwendung von P&T kann dabei zu einer Reduzierung der Gefahr des Missbrauchs und des Diebstahls von Plutonium aus dem Endlager beitragen, da sich nach P&T nur noch vernachlässigbare Mengen an Plutonium im Endlager befinden, sofern das in der Wiederaufarbeitung abgetrennte Plutonium in Transmutationsanlagen umgewandelt oder als MOX-Brennstoff eingesetzt wird. Dieser Aspekt ist insbesondere nach Erlöschen des anfänglichen „Selbstschutzes“ der bestrahlten Brennelemente infolge des intensiven Gammastrahlungsfeldes der vergleichsweise kurzlebigen Spaltprodukte (insb. Cäsium-137 und Strontium-90) relevant (d. h. nach ca. 300 Jahren), wenn der Handhabungsaufwand für den bestrahlten Kernbrennstoff geringer geworden ist.

Andererseits könnte in bestimmten Prozessschritten bei der Partitionierung ein leichter missbräuchlicher Zugriff auf das abgetrennte Plutonium möglich sein. Zivile Wiederaufarbeitungsanlagen und demzufolge auch zukünftige Anlagen zur Partitionierung unterliegen allerdings generell strengen internationalen Kontrollen, die eine Entwendung von spaltbarem Material verhindern sollen (Safeguards). Zudem werden bei der Entwicklung von Partitionierungsverfahren für Transmutationskonzepte proliferationsresistente Verfahren angestrebt, bei denen durch Koextraktion die Entstehung reiner Plutonium-Stoffströme vermieden werden sollen.

5.4. **Zeithorizonte**

Hinsichtlich eines Einsatzes von P&T wären – unabhängig von der ausgewählten Technik – bis zu einer großtechnischen Realisierung noch umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich (vgl. Abschnitt 3.3). Auch unter günstigen Randbedingungen wäre gemäß der RED-IMPACT Studie die Realisierung eines regionalen P&T-Konzepts mit industriellem Maßstab frühestens nach 2040 möglich [RED 08].

Für die Endlagerung der angefallenen und noch anfallenden Wärme entwickelnden hoch radioaktiven Abfälle in Deutschland ist gemäß StandAG und [BMU 15] derzeit angestrebt, bis 2031 eine Entscheidung über den Standort des Endlagers zu treffen, das ca. 2050 in Betrieb genommen werden kann, wobei von einer Betriebszeit bis zum Verschluss von einigen Jahrzehnten ausgegangen wird (vgl. [ESK 15])³. Entsprechend [ESK 15] erscheinen daher die Zeitskalen für die Errichtung

³ Diskussionen in der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ zeigen allerdings, dass auch deutlich längere Zeiträume bis zur Standortauswahl, Implementierung und Verschluss eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle in Deutschland erforderlich sein könnten.

eines Endlagers entsprechend StandAG mit der Entwicklung von P&T-Konzepten – zumindest im Falle einer regionalen Lösung – kompatibel, da sowohl die Realisierung eines Endlagers als auch Bau und Inbetriebnahme von P&T-Anlagen voraussichtlich noch einige Jahrzehnte in Anspruch nehmen werden. Aufgrund der in [ACA 13] prognostizierten erforderlichen Betriebsdauern von P&T-Anlagen zur Behandlung aller in Deutschland vorhandenen bestrahlten Brennelemente würde sich allerdings der Verschluss des Endlagers um Jahrzehnte verzögern.

Generell sollten bei Entwicklung und Vergleich von Endlagerkonzepten und -standorten Informationen zu Art und Menge der endzulagernden Abfälle möglichst früh im Verfahrensablauf vorliegen. Daher wäre im Rahmen des Standortauswahlverfahrens nach StandAG prinzipiell eine frühzeitige Entscheidung bzgl. der Anwendung von P&T zur Behandlung von bestrahltem Kernbrennstoff sinnvoll. Nach [ESK 15] ist davon ausgehen, dass die bei P&T anfallenden Abfälle keine verschärfte Anforderungen an einen Endlagerstandort für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle zu Folge haben.

5.5. Gesellschaftliche Aspekte

5.5.1. Ökonomische Aspekte

Eine belastbare Kostenabschätzung für die Umsetzung von P&T-Strategien ist gegenwärtig schwierig, da entsprechende Verfahren und Anlagen sich zum großen Teil erst in der Entwicklung befinden (vgl. Abschnitt 3.3) und die erforderlichen Investitions- und Betriebskosten mit vom P&T-Ansatz (nationale Lösung vs. regionale Lösung) abhängig sind. Nach [ESK 15] sind derzeit keine belastbaren Zahlen für die entstehenden Kosten verfügbar noch in naher Zukunft zu erwarten.

Im Rahmen der Untersuchung [ACA 13] wurde ein ökonomisches Gutachten in Auftrag gegeben, wobei aufgrund des Entwicklungsstands der P&T-Technologie eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsbewertung im betriebswirtschaftlichen Sinn nicht möglich war. In [ACA 13] wurden jedoch die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeitsbewertung herausgearbeitet:

- Art, Anzahl, Kapazität und Produktivität der Anlagen,
- Nachfrage nach P&T-Dienstleistungen, also mögliche Kosteneinsparungen bei der Endlagerung,
- Räumliche Distanz der verschiedenen Anlagenteile und damit verbundene Transportkosten,
- zukünftige Strompreisentwicklung und Verwertbarkeit von elektrischem Strom als Nebenprodukt.

Aus Wirtschaftlichkeitsgründen wurde in [ACA 13] empfohlen, auf eine deutsche Insellösung zu verzichten und eher eine europäische Lösung anzustreben, bei der die Kapazität einer Wiederaufarbeitungsanlage von mehreren Ländern genutzt werden könnte. Für eine nationale Lösung wurde verdeutlicht, dass die Kosteneinsparungen im Bereich der Endlagerkosten durch die begrenzte Menge an mit P&T behandeltem Abfall wahrscheinlich relativ begrenzt sind. Obwohl die Erlöse aus der Verwertbarkeit von elektrischem Strom als Nebenprodukt möglicherweise nicht ausreichten, um die Kosten der Anlagen zu decken, würden sie dennoch zur Kostensenkung beitragen. Die Erlöse hängen dabei von Art, Produktivität und Eigenverbrauch der Anlage und zukünftigen Strompreisen ab, wobei die erzeugbare Elektrizitätsmenge durch die Menge der zu behandelnden Abfälle relativ gut abgeschätzt werden kann. Zusammenfassend wurde in [ACA 13] erläutert, dass die „Erlöse aus der Abfallbehandlung [...] möglicherweise nicht ausreichend [sind], um die Gesamtkosten

(*Investitionskosten, Betriebskosten und Rückbaukosten*) einer P&T Anlage zu decken“. Demnach wären auch private Investoren nicht bereit, in eine solche Anlage zu investieren.

Generell ist nach [ESK 15] eine ökonomische Kosten/Nutzenanalyse für P&T derzeit nicht leistbar, wobei allerdings in [ESK 15] von deutlich erhöhten Kosten gegenüber einer direkten Endlagerung ausgegangen wird.

5.5.2. Kompetenzerhalt

Nach [ACA 13] nimmt aufgrund des Generationswechsels und der geringen Zahl an Studierenden die Kompetenz im Bereich der Kerntechnik stetig ab, wobei dieser Trend durch die im Jahre 2011 eingeleitete Energiewende beschleunigt wurde. Hierdurch könnte es aufgrund von Personalengpässen zukünftig zu Verzögerungen sowohl beim Rückbau der Kernkraftwerke als auch bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle kommen [ACA 13]. Zudem wäre nach [ACA 13] zu befürchten, dass es in näherer Zukunft in Deutschland keine Institution mehr gibt, die das nötige Fachwissen aufweist, um die deutsche Politik mit Handlungsempfehlungen zu unterstützen (z. B. bzgl. des Neubaus oder der Laufzeitverlängerung von Reaktoren im benachbarten Ausland) und sich die deutsche Politik dann auf Handlungsempfehlungen auf europäischer Ebene (EURATOM) verlassen müssten.

Forschung und Entwicklung zum Thema P&T könnte geeignet sein, um in Deutschland einen Beitrag zu dem von Politik und Gesellschaft geforderten Kompetenzerhalt in der Kerntechnik zu leisten (vgl. [ACA 13]). Derartige Kompetenz kann nicht ausschließlich durch das Studium aktueller Fachliteratur und die Beobachtung internationaler Entwicklungen sichergestellt werden, sondern erfordert aktive Forschung unter Beteiligung an internationalen Forschungsprojekten. Eine Beteiligung an einer (europäischen) Transmutationsanlage könnte darüber hinaus auch den Erhalt der Kompetenz zum Betrieb einer kerntechnischen Anlage sicherstellen. Zudem würde hierdurch die in Deutschland in Zukunft noch vorhandene Kompetenz international sichtbar und glaubwürdig sein, was eine Grundvoraussetzung für eine auch in Zukunft effektive Mitwirkung in internationalen Gremien wie zum Beispiel der IAEA oder OECD/NEA ist. Zudem könnte die deutsche Wissenschaft durch ihre Forschungsarbeiten auf internationaler Ebene einen Beitrag zu einer zuverlässigen Bewertung der ökologischen, ökonomischen und sozialen Risiken der nuklearen Abfallbehandlung leisten [ACA 13].

5.5.3. Gesellschaftliche Akzeptanz

Sowohl die friedliche Nutzung der Kernenergie als auch die (tiefengeologische) Endlagerung radioaktiver Abfälle sind in Deutschland Gegenstand intensiver gesellschaftlicher Diskurse und Kontroversen. Im Hinblick auf P&T als möglicher Option zur Behandlung hoch radioaktiver Abfälle liegen gemäß [ESK 15] allerdings bislang weder auf nationaler noch auf europäischer Ebene repräsentative Erhebungen über die Einstellung der Gesellschaft zum P&T-Konzept vor.

Bezüglich der Situation in Deutschland erfolgte in [ACA 13] eine intensive Auseinandersetzung mit verschiedenen gesellschaftlichen Aspekten von P&T. Demnach ist nach Einschätzung von Umweltverbänden das P&T-Konzept derzeit in der allgemeinen Öffentlichkeit praktisch nicht bekannt, wobei allerdings in [ACA 13] nicht geklärt werden konnte, ob eine bessere Kenntnis des Konzepts zu mehr gesellschaftlicher Akzeptanz führen würde. Gemäß den Ergebnissen aus [ACA 13] ist eine zustimmende Haltung der Öffentlichkeit zu Errichtung und Betrieb von P&T-

Anlagen in Deutschland sehr unwahrscheinlich. Im Hinblick auf eine regionale Lösung unter Beteiligung und/oder Nutzung von P&T-Anlagen in anderen EU-Ländern würden Akzeptanzaspekte in der deutschen Öffentlichkeit am ehesten bei grenznahen Standorten eine Rolle spielen ([ACA 13], [ESK 15]). Die Verbringung bestrahlter Brennelemente aus deutschen Kernkraftwerken ins Ausland und damit verbundene Transportrisiken wären nach [ACA 13] der Öffentlichkeit vermittelbar.

Nach [ESK 15] deuten allerdings die derzeitigen Diskussionen zur Endlagerung Wärme entwickelnder hoch radioaktiver Abfälle und zur Standortauswahl nicht darauf hin, dass die Akzeptanz der Bevölkerung für einen Endlagerstandort mit den durch P&T-Anwendung erreichbaren Optimierungen (z. B. bzgl. Abfallvolumen, Radionuklidinventar und Radiotoxizität) höher wäre, da technische Details wie Abfallvolumina und Radionuklidinventare bisher keine zentrale Rolle in den Diskussionen einnahmen. In [ESK 15] wird daher die Schlussfolgerung gezogen, dass eine größere gesellschaftliche Akzeptanz für die Implementierung von P&T im Vergleich zur direkten Endlagerung bestrahlter Brennelemente derzeit nicht erkennbar ist.

5.5.4. Abwägung von Risiken mit unterschiedlichen Zeitskalen

In Abschnitt 5.3 wurde die Implementierung eines P&T-Konzepts im Vergleich zur direkten Endlagerung der in Deutschland anfallenden Wärme entwickelnden Abfälle hinsichtlich verschiedener Sicherheitsaspekte diskutiert. Dabei wird deutlich, dass die sicherheitsrelevanten Aspekte zum Teil unterschiedliche Zeithorizonte und -skalen betreffen (und ggf. unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten der Realisierung aufweisen), was bei einer Abwägung von Vor- und Nachteilen in geeigneter Weise zu berücksichtigen wäre⁴.

So betreffen die (realen) Risiken durch den Betrieb der P&T-Anlagen sowie die Transportrisiken die Bevölkerung während der Umsetzung des P&T-Konzeptes (d. h. in den nächsten Jahrzehnten), während die Verminderung (ggf. hypothetischer) Risiken infolge einer Verbesserung der Langzeitsicherheit eines Endlagers durch P&T erst die fernere Zukunft betreffen würde. Gleiches gilt für Kritikalitäts- und Proliferationsrisiken in Partitionierungsanlagen im Vergleich zur direkten Endlagerung von bestrahlten Brennelementen, wobei Kritikalitätsrisiken im Endlager eine Verkettung einer Reihe von langsam ablaufenden geochemischen Prozessen nach Kontakt der Abfallgebinde mit Wasser voraussetzen würde und die Auswirkungen auf den Nahbereich des Endlagers begrenzt wären.

Im Hinblick auf die Rechtfertigung der mit nicht vernachlässigbaren zusätzlichen Strahlenbelastungen verbundenen Tätigkeiten während des Betriebs der P&T-Anlagen müssten die damit verbundenen Dosisbelastungen der Beschäftigten in Relation zu dem Nutzen, d. h. einer potentiellen/hypothetischen Minimierung von ggf. von dem Endlager im Nachbetriebszustand hervorgerufenen Strahlenbelastungen der allgemeinen Bevölkerung infolge einer Mobilisierung von Radionukliden vom Einlagerungsbereich bis in die Biosphäre, gesetzt werden. Dabei wäre auch zu berücksichtigen, dass entsprechend [BMU 10] ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle nur genehmigungsfähig ist, wenn nachgewiesen wird, dass für wahrscheinliche Entwicklungen durch Freiset-

⁴ Beim regionalen Ansatz werden zudem bestimmte Risiken (z. B. durch Betrieb der Anlagen zur Wiederaufarbeitung, Brennstofffabrikation und Transmutation, sowie anteilige Transportrisiken) zum Teil ins Ausland verlagert, wogegen das Optimierungspotential für die Endlagerung in Deutschland zum Tragen käme.



zung von Radionukliden, die aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen stammen, für Einzelpersonen der Bevölkerung nur eine zusätzliche effektive Dosis im Bereich von 10 μSv im Jahr auftreten kann (triviale Dosis i. S. von ICRP 104 [ICR 07]).

6. LITERATUR

- [ABD 14] ABDERRAHIM, A.H., VAN DEN EYNDE, G., BAETEN, P., SCHYNS, M., VANDEPLASSCHE, D., KOCHETKOV, A.
Contribution of the European Commission to a European strategy for HLW management through partitioning and transmutation: Presentation of MYRRHA and its role in the European P&T strategy.
Proceeding of 13th Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Seoul, Republic of Korea, 23.-26.09.2014, 64–70, 2014.
- [ACA 13] ACATECH – DEUTSCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
Partitionierung und Transmutation: Forschung – Entwicklung – Gesellschaftliche Implikationen.
O. Renn (Hrsg.), 2013.
- [ANG 08] ANGELI, F., MCGLINN, P., FRUGIER, P.
Chemical durability of hollandite ceramic for conditioning cesium.
J. Nucl. Mater. 380, 59–69, 2008.
- [ANS 07] AMERICAN NATIONAL STANDARD
Validation of neutron transport methods for nuclear criticality calculations.
(ANSI/ANS-8.24-2007), 2007.
- [ASG 15] ASGARD PROJECT
Advanced fuelS for Generation IV reActors: Reprocessing and dissolution,
<http://asgardproject.eu>, aufgerufen am 02.10.2015.
- [BAR 07] BARON, P., MASSON, M., ROSTAING, C., BOULLIS, B.
Advanced separation processes for sustainable nuclear systems.
Proceedings GLOBAL 2007, 09.-13.09.2007, Boise, ID, USA, 537–540, 2007.
- [BAS 15] BASCHWITZ, A., MATHONNIERE, G., GABRIEL, S., ELEOUE, T.
Deployable nuclear fleet based on available quantities of uranium and reactor types – the case of fast reactors started up with enriched uranium.
Proceedings GLOBAL 2015, 20.-24.09.2015, Paris, France, Paper 5347, 2015.
- [BFS 15A] BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ
Abfallbestand, <http://www.bfs.de/DE/themen/ne/abfaelle/bestand/bestand.html>.
aufgerufen am 01.10.2015
- [BFS 15B] BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ
Abfallprognosen,
http://www.bfs.de/DE/themen/ne/abfaelle/prognosen/prognosen_node.html.
aufgerufen am 01.10.2015

- [BMU 10] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle - Stand 30. September 2010.
BMU, Berlin, September 2010.
- [BMU 14] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT
Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle - Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die fünfte Überprüfungskonferenz im Mai 2015
BMUB, Berlin, August 2014.
- [BMU 15A] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT
Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm)
BMUB, Berlin, August 2015.
- [BMU 15B] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT
Verzeichnis radioaktiver Abfälle (Bestand zum 31. Dezember 2014 und Prognose)
BMUB, Berlin, August 2015.
- [BOU 11] BOURG, S., HILL, C., CARAVACA, C., RHODES, C., EKBERG, C., TAYLOR, R., GEIST, A., MODOLO, G., CASSAYRE, L., MALMBECK, R., HARRISON, M., DE ANGELIS, G., ESPARTERO, A., BOUVET, S., OUVRIER, N.
ACSEPT- Partitioning technologies and actinide science: Towards pilot facilities in Europe.
Nucl. Eng. Des. 241, 3427–3435, 2011.
- [CAN 15] CANY, C., MANSILLA, C., DA COSTA, P., MATHONNIÈRE, G., DUQUESNOY, T., BASCHWITZ, A.
Nuclear power fleet replacement: an opportunity for the French energy mix?
Proceedings GLOBAL 2015, 20.-24.09.2015, Paris, France, Paper 5044, 2015.
- [CAR 07] CARTER, M.L., STEWART, M.W.A., VANCE, E.R., BEGG, B.D., MORICCA, S., TRIPP, J.
HIPed tailored ceramic waste forms for the immobilization of Cs, Sr, and Tc.
Proceedings GLOBAL 2007, 09.-13.09.2007, Boise, ID, USA, 1022–1028, 2007.
- [CAS 15] CHASHMORE, R., KOPPELMAN, B.
Proliferation resistance, used fuel and multinational approaches to the provision of fuel cycle services. In: Taylor, R. (ed.): Reprocessing and recycling of spent nuclear fuel, p. 579–601, Woodhead Publishing, 2015.
- [CEA 08] COMMISARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE
Treatment and recycling of spent nuclear fuel: Actinide partitioning – Application to waste management.
CEA, Saclay, France, 2008.

- [CFR 13] COUNCIL ON FOREIGN RELATIONS
Nuclear Power in South Korea's Green Growth Strategy - Green Growth Quarterly Update III-2013.
<http://www.cfr.org/south-korea/nuclear-power-south-koreas-green-growth-strategy/p31030>
CFR Report, New York, 2013.
- [CHA 13] CHABERT, C., COQUELET-PASCAL, C., SATURNIN, A., MATHONNIERE, G., BOULLIS, B., WARIN, D., VAN DEN DURPEL, L., CARON-CHARLES, M., GARZENNE, C.
Technical and economic assessment of different options for minor actinide transmutation: The French case.
Proceedings GLOBAL 2013, 29.09–03.10.2013, Salt Lake City, UT, USA, 140–149, 2013.
- [CHA 15] CHABERT, C., TIPHINE, M., KRIVTCHIK, G., ALLOU, A., SATURNIN, A., GIROTTO, J.L., SARRAT, P., HANCOCK, H., MATHONNIERE, G., GABRIEL, S., BASCHWITZ, A., FILLASTRE, R., GIFFARD, F.X., JASSERAND, F., BOULLIS, B., LEUDET, A., CARON-CHARLES, M., SENENTZ, G., CARLIER, B., VAN DEN DURPEL, L., GROSMAN, R., VAN DER WERF, J., LAUGIER, F., SETTIMO, D., GARZENNE, C.
Considerations on industrial feasibility of scenarios with the progressive deployment of Pu multirecycling in SFRs in the French nuclear power fleet.
Proceedings GLOBAL 2015, 20.-24.09.2015, Paris, France, Paper 5351, 2015.
- [CHO 14] CHO, I.
Development and operation experiences of PRIDE system.
International Pyroprocessing Research Conference, 19.-23.10.2014, Idaho Falls, ID, USA, 2014.
- [DEB 14] DE BRUYN, D., ABDERRAHIM, H.A., BAETEN, P., LEYSEN, P.
The MYRRHA ADS project in Belgium Enters the front end engineering phase.
Proceeding of 13th Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Seoul, Republic of Korea, 23.-26.09.2014, 230–237, 2014.
- [DIN 94] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG
Einsatz von Berechnungssystemen beim Nachweis der Kritikalitätssicherheit.
DIN 25478, 1994.
- [DOE 99] DEPARTMENT OF ENERGY
A roadmap for developing accelerator transmutation of waste (ATW) technology, a report to congress.
DOE/RW-0519, 1999.

- [ESK 15] ENTSORGUNGSKOMMISSION
Partitionierung und Transmutation (P&T) als Option für die nukleare Entsorgung
Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland.
Diskussionspapier der Entsorgungskommission, 18.06.2015.
- [EVO 15] EVOL
Evaluation and viability of liquid fuel fast reactor system.
http://cordis.europa.eu/result/rcn/159296_en.html, aufgerufen am 08.10.2015.
- [EWE 07] EWING, R.C.
Ceramic matrices for plutonium disposition.
Progress in Nuclear Energy 49, 635–643, 2007.
- [EWE 11] EWING, R.C.
Safe management of actinides in the nuclear fuel cycle: role of mineralogy. Comptes
Rendus Geoscience 343, 219–229, 2011.
- [GEH 15] GEHIN, J.C., OAKLEY, B., WORRALL, A., JENNI, K., TAIWO, T., WIGELAND, R.
An approach for assessing development and deployment risks in the DOE Fuel Cycle
Options Evaluation and Screening Study.
Proceedings GLOBAL 2015, 20.-24.09.2015, Paris, France, Paper 5267, 2015.
- [GLA 15] GLATZ, J.P., SOUČEK, P., MALMBECK, R.
Key challenges in advanced reprocessing of spent nuclear fuels. In: Taylor, R. (ed.):
Reprocessing and recycling of spent nuclear fuel. p. 49–62, Woodhead Publishing,
2015
- [GRA 07] GRAS, J.M., DO QUANG, R., MASSON, H., LIEVEN, T., FERRY, C., POINSSOT, C., DEBES,
M., DELBECQ, J.M.
Perspectives on the closed fuel cycle - Implications for high-level waste matrices.
J. Nucl. Mater. 362, 383–394, 2007.
- [GRS 04] GMAL, B., HESSE, U., HUMMELSHEIM, K., KILGER, R., KRZYKACZ-HAUSMANN, MOSER,
E.F.
Untersuchungen zur Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers
für ausgediente Kernbrennstoffe in unterschiedlichen Wirtsformationen.
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), GRS-A-3240, 2004.
- [GRS 09] GMAL, B., KILGER, R., KRZYKACZ-HAUSMANN, B., HERBERT, H.-J., MOSER, F.-E.,
PESCHKE, J.
Weiterführende Bearbeitung spezieller Themen im Rahmen generischer Sicherheits-
analysen zur Kritikalität von Kernbrennstoffen in der Nachbetriebsphase eines geolo-
gischen Endlagers.
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), GRS-A-3486, 2009.

- [GRS 14] BOLLINGERFEHR, W., BUHMANN, D., FILBERT, W., MÖNIG, J.
Auswirkungen von Partitionierung und Transmutation auf Endlagerkonzepte und Langzeitsicherheit von Endlagern für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), GRS-318, 2014.
- [HAR 12] HARTMANN, T., ALANIZ, A.J., ANTONIO, D.J.
Fabrication and properties of technetium-bearing pyrochlores and perovskites as potential waste forms. Procedia Chemistry 7, 622–628, 2012.
- [HAV 14] HAVERKAMP, B., VAN MARCKE, P.
Endlagerung hochaktiver und langlebiger radioaktiver Abfälle in Belgien - Stand der konzeptionellen Planung für ein zukünftiges geologisches Endlager. 3. Essener Fachgespräch Endlagerbergbau, 2014.
- [HSK 05] HAUPTABTEILUNG FÜR DIE SICHERHEIT DER KERNANLAGEN
Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston). HSK 35/99, 268 S., August 2005.
- [IAE 96] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
Defence in Depth in Nuclear Safety INSAG-10. IAEA, INSAG-10, Vienna, Austria, 1996.
- [IAE 03] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
Status and advances in MOX fuel technology. IAEA Technical Report Series 415, Vienna, Austria, 2009.
- [IAE 04] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
Implications of partitioning and transmutation in radioactive waste management. IAEA, Technical Reports Series 435, Vienna, Austria, 2004.
- [IAE 08] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
Spent fuel reprocessing options. IAEA, TECDOC 1587, Vienna, Austria, 2008.
- [IAE 09] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
Status of minor actinide fuel development. IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-4.6, Vienna, Austria, 2009.
- [IAE 10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
Assessment of partitioning processes for transmutation of actinides. IAEA, TECDOC 1648, Vienna, Austria, 2010.

- [IAE 13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
Options for management of spent fuel and radioactive waste for countries developing new nuclear power programmes.
IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.24, Vienna, Austria, 2013.
- [ICR 07] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION
Scope of radiological protection control measures – ICRP Publication 104.
Annals of ICRP 37, 2007.
- [IGN 14] IGNATIEV, V., FEYNBERG, O., GNIDOI, I., KONAKOV, S., KORMILITSYN, M., MERZLIAKOV, A., SURENKOV, A., UGLOV, V., ZAGNITKO, A.
“MARS: Story on molten salt actinide recycler and transmuter development by Rosatom in Co-operation with Euratom.
Proceeding of 13th Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Seoul, Republic of Korea, 23.-26.09.2014, 92–103, 2014.
- [KAG 15] KAGRAMANYAN, V., USANOV, V., KALASHNIKOV, A., KVYATKOVSKII, S.
Medium-term nuclear industry prospects associated with synergistic LWR/SFR system and related closed nuclear fuel cycle.
Proceedings GLOBAL 2015, 20.-24.09.2015, Paris, France, Paper 5115, 2015.
- [KEL 14] KELLY, J.E.
Generation IV International Forum: A decade of progress through international cooperation.
Progress in Nuclear Energy 77, 240-246, 2014.
- [KNE 09] KNEBEL, J., ABDERRAHIM, H.A., CARON-CARLES, M., DE BRYUN, D., DELAGE, F., FAZIO, C., GIOT, M., GONZALEZ, E., GRANGET, G., MANSANI, L., MONTI, S., MUELLER, A.C.
European research programme for the transmutation of high level nuclear waste in an Accelerator Driven System - Towards a demonstration device of industrial interest (EUROTRANS).
Proceedings FISA 09, 22.-24.06.2009, Prague, 286–316, 2009.
- [KOC 91] KOCH, G.
Chemical reprocessing of nuclear fuels. In: Ullmann`s Encyclopedia of Industrial Chemistry, A17, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1991.
- [KON 01] KONINGS, R.J.M.
Advanced fuel cycles for accelerator-driven systems: Fuel fabrication and reprocessing.
European Commission Report, EUR 19928EN, 2001.

- [KOR 13] KOREAN HERALD
Seoul to overhaul operator of scandals-hit nuclear power plant.
<http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20130108000766>
aufgerufen am 07.10.2015.
- [LUM 06] LUMPKIN, G.R.
Ceramic waste forms for actinides.
Elements 2, 365–372, 2006.
- [MAG 03] MAGILL, J., BERTHOU, V., HAAS, D., GALY, J., SCHENKEL, R., WIESE, H.W., HEUSENER, G., TOMMASI, J., YOUINOU, G.
Impact limits of partitioning and transmutation scenarios on the radiotoxicity of actinides in radioactive waste
Nuclear Energy, 42, 263–277, 2003.
- [MAR 08] MARIVOET, J., CUÑADO, M., NORRIS, S., WEETJENS, E.
Impact of Advanced Fuel Cycle Scenarios on Geological Disposal
ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/fission/docs/euradwaste08/papers/paper-10-impact-of-advancedpt-j-marivoet_en.pdf, aufgerufen am 05.10.2015
- [MDE 12] MULTINATIONAL DESIGN EVALUATION PROGRAMME
MDEP: Multinational Design Evaluation Programme.
Annual Report, 2012.
- [MIN 15] MINATO, K.
Development of closed nuclear fuel cycles in Japan. In: Taylor, R. (ed.): Reprocessing and recycling of spent nuclear fuel, Woodhead Publishing, 2015.
- [MOD 15] MODOLO, G., GEIST, A., MIGUIRDITCHIAN, M.
Minor actinide separations in the reprocessing of spent nuclear fuels: recent advances in Europe. In: Taylor, R. (ed.) Reprocessing and recycling of spent nuclear fuel. Woodhead Publishing, 245–287, 2015.
- [NAG 02] NATIONALE GENOSSENSCHAFT FÜR DIE LAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE
Project Opalinus Clay – Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis).
Nagra Technical Report NTB 02-05, 2002.
- [NAS 06] NASH, K.L., MADIC, C., MATHUR, J.N., LACQUEMENT, J.
Actinide separation science and technology. In: Morss, L.R., Edelstein, N.M., Fuger, J., Katz, J.J. (ed.): The chemistry of actinide and transactinide elements, 3rd edition, Springer, 2622-2798, 2006.

- [NAS 15] NASH, K.L., NILSSON, M.
Introduction to the reprocessing and recycling of spent nuclear fuels. In: Taylor, R. (ed.): Reprocessing and recycling of spent nuclear fuel, Woodhead Publishing, 3-25, 2015.
- [NEA 99] OECD - NUCLEAR ENERGY AGENCY
Actinide and fission product partitioning and transmutation - Status and assessment. OECD-NEA, Paris, 1999.
- [NEA 02] OECD - NUCLEAR ENERGY AGENCY
Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in advanced nuclear fuel cycles; A comparative study. OECD-NEA, Paris, 2002.
- [NEA 04] OECD - NUCLEAR ENERGY AGENCY
Pyrochemical separations in nuclear applications: A status report. OECD-NEA Report Nr. 5427, Paris, 2004.
- [NEA 05] OECD - NUCLEAR ENERGY AGENCY
Fuel and materials for transmutation, a status report. OECD-NEA Report No. 5419, Paris, 2005.
- [NEA 10A] OECD - NUCLEAR ENERGY AGENCY
National programmes in chemical partitioning: A status report. OECD-NEA Report No. 5425, Paris, 2010.
- [NEA 10B] OECD - NUCLEAR ENERGY AGENCY
Public attitudes to nuclear power. OECD-NEA Report No. 6859, Paris, 2010.
- [NEA 11A] OECD - NUCLEAR ENERGY AGENCY
Potential benefits and impacts of advanced nuclear fuel cycles with actinide partitioning and transmutation. OECD-NEA Report Nr. 6894, Paris, 2011.
- [NEA 11B] OECD - NUCLEAR ENERGY AGENCY - NUCLEAR SCIENCE COMMITTEE
International Handbook of evaluated criticality safety benchmark experiments. (NEA/NSC/DOC(95)03), Paris, 2011.
- [NEA 13A] OECD - NUCLEAR ENERGY AGENCY
Transition towards a sustainable nuclear fuel cycle. OECD-NEA Report No. 7133, Paris, 2013.
- [NEA 13B] OECD - NUCLEAR ENERGY AGENCY
Actinide and fission product partitioning and transmutation - Twelfth Information Exchange Meeting, Prague, Czech Republic, 24-27 September 2012. OECD-NEA NEA/NSC/DOC(2013)3, Paris, 2013.

- [NEA 13C] OECD - NUCLEAR ENERGY AGENCY
Radioactive Waste Management Programmes in OECD/NEA Member Countries
Belgium; 2013
<http://www.oecd-nea.org/rwm/profiles/>, aufgerufen 30.09.2015
- [NEA 14] OECD - NUCLEAR ENERGY AGENCY
Technology roadmap update for Generation IV nuclear energy systems.
Issued by the OECD Nuclear Energy Agency for the Generation IV International Forum, 63 S., 2014.
- [NEA 15] OECD - NUCLEAR ENERGY AGENCY
Actinide and fission product partitioning and transmutation - Thirteenth Information Exchange Meeting Seoul, Republic of Korea 23-26 September 2014
OECD-NEA NEA/NSC/R(2015)2, Paris, 2015.
- [NEA 15A]: OECD - NUCLEAR ENERGY AGENCY
Pyrochemical separations in nuclear applications, A status report.
OECD-NEA Report No. 5427, 2004.
- [NEA 15B] OECD - NUCLEAR ENERGY AGENCY
https://www.oecd-nea.org/rwm/profiles/Czech_Republic_profile_web.pdf
aufgerufen am 30.09.2015.
- [NEA 15C] OECD - NUCLEAR ENERGY AGENCY
https://www.oecd-nea.org/rwm/profiles/Japan_profile_web.pdf
aufgerufen am 30.09.2015.
- [NEA 15D] OECD - NUCLEAR ENERGY AGENCY
https://www.oecd-nea.org/rwm/profiles/US_profile_web.pdf
aufgerufen am 30.09.2015.
- [NEN 07] NENOFF, T.M., KRUMHANSL, J.L., GAO, H.H., RAJAN, A., MCMAHON, K.
Iodine waste form summary report.
Sandia National Laboratories Report SAND2007-6202, 2007.
- [NEU 14] NEUMEIER, S., BRANDT, F., BUKAEMSKIY, A.A, FINKELDEI, S., ARINICHEVA, Y., HEUSER, J., EBERT, E., SCHREINEMACHERS, C., WILDEN, A., MODOLO, G., BOSBACH, D.
Ceramic waste forms in innovative waste management strategies: Present status and perspectives.
Materials Research Society Fall Meeting, 30.11– 05.12.2014, Boston, MA, USA, 2014.
- [NIS 08] NISHIHARA, K., NAKAYAMA, H., MORITA, Y., OIGAWA, H., IWASAKI, T.
Impact of partitioning and transmutation on LWR High-Level waste disposal.
J. Nucl. Sci. Technol. 45, 84–97, 2008.

- [NNL 14] NATIONAL NUCLEAR LABORATORY
Minor actinide transmutation - Position paper.
NNL, Warrington, 2014.
- [NTV 14] N-TV
<http://www.n-tv.de/ticker/Mehrheit-der-Japaner-gegen-weitere-Atomkraft-Nutzung-article12917086.html>, am 28.05.14, aufgerufen am 29.09.2015
- [PAS 15] PASSERINI, S., FENG, B., FEI, T., KIM, T.K., TAIWO, T.A.
Analysis of transition to fuel cycle system with continuous recycling in fast and thermal reactors.
Proceedings GLOBAL 2015, 20.-24.09.2015, Paris, France, Paper 5060, 2015.
- [PAT 08] PATEROS
European roadmap for the deployment of P&T in a regional context.
Final report, <http://www.sckcen.be/pateros/deliverables/>, 2008.
- [PIL 03] PILLON, S., SOMERS, J., GRANDJEAN, S., LACQUEMENT, J.
Aspects of fabrication of curium-based fuels and targets.
J. Nucl. Mater. 320, 36–43, 2003.
- [POI 12A] POINSSOT, C., ROSTAING, C., GRANDJEAN, S., BOULLIS, B.
Recycling the actinides, the cornerstone of any sustainable nuclear fuel cycles.
Procedia Chem. 7, 349–357, 2012.
- [POI 12B] POINSSOT, C., ROSTAING, C., BARON, P., WARIN, D., BOULLIS, B.
Main results of the French program on partitioning of Minor Actinides, a significant improvement towards nuclear waste reduction.
Procedia Chem. 7, 358–366, 2012.
- [POI 14] POINSSOT, C., BOURG, S., OUVRIER, N., COMBERNOUX, N., ROSTAING, C., VARGAS-GONZALES, M., BRUNO, J.
Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems. Comparison between close and open fuel cycles.
Energy 69, 199–211, 2014.
- [POU 12] POUCHON, M.A., LEDERGERBER, G., INGOLD, F., BAKKER, K.
Sphere-pac and VIPAC fuel.
In: Konings, R.J.M. (ed.), Comprehensive Nuclear Materials. Elsevier, Oxford, 275–312, 2012.
- [RED 08] RED-IMPACT
RED-IMPACT: Impact of partitioning, transmutation and waste reduction technologies on the final nuclear waste disposal. Synthesis Report.
Schriften des Forschungszentrum Jülichs, Reihe Energie & Umwelt, Band 15, Jülich, 2008.

- [RSK 00] REAKTORSICHERHEITSKOMMISSION
Konsequenzen aus dem Kritikalitätsunfall in der JCO-Uranverarbeitungsanlage in Tokaimura, Japan, für deutsche Anlagen.
<http://www.rskonline.de/downloads/snkonsequenzenauskritikalitaetsunfalltokaimura.pdf>; aufgerufen am 04.10.2015
- [SAL 05] SALVATORES, M.
Nuclear fuel cycle strategies including partitioning and transmutation.
Nucl. Eng. Des. 235, 805–816, 2005.
- [SAR 11] SARGEN-IV CONSORTIUM
Proposal for a harmonized European methodology for the safety assessment of innovative reactors with fast neutron spectrum planned to be built in Europe (EURATOM FP7), 2011.
- [SAS 14] SASA, T., TAKEI, H., SAITO, S., OBAYASHI, H., NISHIHARA, K., SUGAWARA, T., IWAMOTO, H., YAMAGUCHI, K., TSUJIMOTO, K., OIGAWA, H.
J-PARC transmutation experimental facility programme.
Proceeding of 13th Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Seoul, Republic of Korea, 23.-26.09.2014, 85–91, 2014.
- [SKB 06] SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB
Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project.
SKB Technical Report TR-06-09, 2006.
- [SKB 11] SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB
Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project.
SKB Technical Report TR-11-01, 2011.
- [SUR 15] SURAO
<http://www.surao.cz/eng/ABOUT-SURAO/Funding>
aufgerufen am 30.09.2015.
- [TAG 14] TAGESSCHAU
<http://www.tagesschau.de/ausland/japan1330.html>, am 11.04.14, aufgerufen am 29.09.2015.
- [TAY 15] TAYLOR, R. (ED.)
Reprocessing and recycling of spent nuclear fuel.
Woodhead Publishing, 684 S., 2015.
- [TOD 15] TODD, T.A.
Development of closed nuclear fuel cycles in the United States. In: Taylor, R. (ed.):
Reprocessing and recycling of spent nuclear fuel, Woodhead Publishing, 2015.

- [UHL 02] UHLÍŘ, J., HRON, M., PRIMAN, V., VALVODA, Z.
Current status of Czech R&D programme in Partitioning and Transmutation.
Proceedings of 7th Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product
Partitioning and Transmutation, 14-16 October 2002, Jeju, Republic of Korea, 133–
138, 2002.
- [WAR 11] WARIN, D., POINSSOT, C., BOURG, S.
Future nuclear fuel cycles: Meeting sustainability through actinide recycling.
Proceedings GLOBAL 2011, 11.-16.12.2011, Makuhari, Japan, p. 478580, 2011.
- [WEN 09] WESTERN EUROPEAN NUCLEAR REGULATORS ASSOCIATION (WENRA)
WENRA Reactor Harmonization Working Group: Safety Objectives for New Power
Reactors, 2009.
- [WEN 12] WESTERN EUROPEAN NUCLEAR REGULATORS ASSOCIATION (WENRA)
WENRA Reactor Harmonization Working Group: Safety of new NPP designs, 2012.
- [WIG 15] WIGELAND, R., TAIWO, T., TODOSOW, M.
Investigation of benefits from U/TRU Recycle - Quantification and comparison to
U/Pu Recycle.
Proceedings GLOBAL 2015, 20.-24.09.2015, Paris, France, Paper 5238, 2015.
- [WNA 15A] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION
<http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/France/>
aufgerufen am 30.09.2015.
- [WNA 15B] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION
<http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/Czech-Republic/>
aufgerufen am 30.09.2015.
- [WNA 15C] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION
<http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/Japan--Nuclear-Fuel-Cycle/>
aufgerufen am 30.09.2015.
- [WNA 15D] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION
<http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-O-S/South-Korea/>
aufgerufen am 29.09.2015.