



Sachstand

Partitionierung und Transmutation

Partitionierung und Transmutation

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 091/22
Abschluss der Arbeit: 7. Februar 2023
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und
Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Lösungskonzepte	5
2.1.	Verfahren der Partitionierung	5
2.1.1.	Hydrochemische Partitionierung	5
2.1.2.	Pyrochemische Partitionierung	6
2.2.	Verfahren der Transmutation	6
2.2.1.	Kritischer Schneller Reaktor	6
2.2.2.	Beschleunigergetriebener Reaktor	7
2.2.3.	Salzschmelzereaktor	7
2.3.	Brennelementkreislauf und MOX-Brennelemente	7
2.4.	Radioaktive Abfallmengen aus der Kernenergienutzung für Zwischen- und Endlagerung	9
3.	Aktuelle Studienergebnisse zur Transmutation	11
3.1.	Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung	11
3.2.	Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors)	16
4.	Forschungsaktivitäten zur Transmutation	16
4.1.	Myrrha	18
4.2.	Fairfuels	20
4.3.	Weitere Beispiele für Forschungsaktivitäten	21

1. Einleitung

Die Entsorgung hochradioaktiver sowie schwach- und mittelradioaktiver Abfälle aus der Kernenergiegewinnung stellt eine große wissenschaftlich-technische und gesellschaftliche Herausforderung dar. Die abgebrannten Brennelemente¹ enthalten Uran, Transurane², stabile und auch radioaktive Spaltprodukte mit kurzer, mittlerer oder sehr langer Halbwertszeit³. Von diesen radioaktiven Materialien geht für einen langen Zeitraum ein hohes Strahlenrisiko aus. Ein sicheres Zwischen- und Endlager, insbesondere für die hochradioaktiven Nuklearabfälle, ist nach der Entnahme der Brennstoffe aus den Reaktoren, zwingend notwendig. Dazu soll der hochradioaktive Abfall in tiefen geologischen Schichten für eine Million Jahre gelagert werden. Parallel dazu soll geprüft werden, ob neben der direkten tiefeingeologischen Endlagerung alternative Entsorgungswege einen positiven Beitrag zur Aufgabe der Endlagerung leisten könnten.⁴

Eine derartige Alternative könnte die Partitionierung und Transmutation (P&T) sein. Dieser Ansatz aus den 70er Jahren soll die Endlagerung auf überschaubare Zeiträume von bis zu einem Jahrtausend begrenzen. Die Verfahren der Partitionierung trennen die Abfallströme. Die Transmutation spaltet im Wesentlichen die hochradioaktiven Isotope durch den Beschuss mit Neutronen in Isotope mit geringerer Radioaktivität.⁵

1 „Abgebrannte Brennelemente“ ist die Bezeichnung für die verbrauchten Brennelemente eines Kernreaktors.

2 Dazu zählen Plutonium und sogenannte minore Aktinide.

Aktiniden: Sammelbezeichnung für alle Elemente ab Actinium mit der Ordnungszahl 89. Dazu gehören also auch Thorium, Uran, Plutonium, Neptunium, Americium usw. Aktiniden sind metallisch und den Lanthaniden sehr ähnlich. Aktiniden sind spontan entzündlich an Luft. Für den kerntechnischen Bereich sind neben Uran, Plutonium und Thorium vor allem die minoren Aktiniden von Bedeutung.

Minore Aktiniden (MA): Üblicherweise Neptunium, Americium und Curium. Allgemeiner werden damit alle Transurane außer Plutonium bezeichnet. Plutonium gehört auch zur Elementgruppe der Aktiniden. Da aber in abgebrannten Uranbrennstoffen das transuranische Aktinidenelement Plutonium (neben Uran) dominiert, werden die anderen entstandenen transuranischen Elemente als minore Aktiniden bezeichnet.

Frieß, F. et al., Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2021030826033>

3 Die Halbwertszeit ist das Zeitintervall, in dem die Hälfte der Kerne eines radioaktiven Nuklids zerfallen ist. Kurze Halbwertszeiten führen zu einer hohen Strahlungsaktivität und lange Halbwertszeiten beinhalten eine niedrige Strahlungsaktivität. Es gibt radioaktive Halbwertszeiten im Bereich von weniger als einer Mikrosekunde bis zu einigen Quadrillionen Jahren.

4 Vgl. Auftrag aus dem StandAG 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/BJNR107410017.html

5 Deutscher Bundestag Wissenschaftliche Dienste (2008). Aktueller Begriff „Transmutation radioaktiver Abfälle – Lösung der Endlagerproblematik“, <https://www.bundestag.de/source/blob/190334/9d3598a576e9b674e0a4fc90b959b43f/transmutation-data.pdf>

Knebel, J. et al. (2013). „Was tun mit dem nuklearen Abfall?“, <https://www.spektrum.de/pdf/34-41-sdw-02-2013-pdf/1181017>

In der vorliegenden Arbeit werden Entwicklungszeiträume, sicherheitstechnische Anforderungen, Proliferationsrisiken und Zeit- und Kostenfaktoren des P&T-Ansatzes betrachtet und hierzu ein aktuelles Gutachten des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung sowie weitere Studien und internationale Forschungsansätze vorgestellt.

2. Lösungskonzepte

Die wichtigsten Verfahren, die nach gegenwärtigem Forschungsstand eine Rolle für P&T spielen könnten, sind:

- für die Partitionierung: pyrochemische und hydrochemische Trennverfahren für die erweiterte Wiederaufarbeitung,
- die Fertigung von speziellen transuranhaltigen Brennstoffen auf der Basis von Mischoxid (MOX) oder uranfreien Brennstofftypen und
- ein spezifischer Reaktor (entweder ein kritischer Schneller Reaktor, ein unterkritischer (beschleunigergetriebener) Reaktor oder ein Salzschnmelzereaktor) für die Transmutation.⁶

Auf die einzelnen Verfahren wird im Folgenden näher eingegangen.

2.1. Verfahren der Partitionierung

2.1.1. Hydrochemische Partitionierung

Das PUREX-Trennverfahren (Plutonium-Uranium Recovery by Extraction) ist das einzige Verfahren, das im großindustriellen Maßstab zur Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente angewandt wird. Beim PUREX-Verfahren wird der Brennstoff zerschnitten und in Salpetersäure aufgelöst. Diese wässrige Phase wird mit Hilfe eines Extraktionsmittels (als organische Phase bezeichnet und ist ebenfalls flüssig) vermengt. Die Nitrate des Urans und Plutoniums werden aus der wässrigen Phase herausgelöst, die Nitrate der Spaltprodukte verbleiben in der wässrigen Phase. Die wässrige und die organische Phasen setzen sich wieder voneinander ab. Das Verfahren muss mehrfach wiederholt werden. Die wässrige Phase ist jedoch kein chemisch reiner und isotopisch geeigneter Basisstoff für die Transmutation. Für die Transmutation müssen die minoren Aktinide abgetrennt werden, was bisher nur im Labormaßstab gelang. Mit dem PUREX-Verfahren

Kugeler, K. et al. (2004). „Zukünftige Optionen für die Entsorgung von hochradioaktiven Abfällen“, http://www.fze.uni-saarland.de/AKE_Archiv/DPG2004-AKE_Muenchen/Buch/DPG2004_PV04_Kugeler_Entsorgung_hochradioaktiverAbfaelle.pdf

Müller, A. et al. (2010). „Transmutation von radioaktivem Abfall“, <https://www.pro-physik.de/restricted-files/100576>

6 Friß, F. et al., Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2021030826033>

Ausführliche Beschreibung der physikalischen und technischen Hintergründe in: Osterhage, W., Frey, H. (2022). „Transmutation radioaktiver Abfälle – Von der Zwischenlagerung über die Endlagerung bis zur Transmutation“, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2022, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-38519-4>

kann zudem waffenfähiges Plutonium gewonnen werden. Im Rahmen der Transmutationsforschung wird auch das PUREX-Verfahren weiterentwickelt.⁷

2.1.2. Pyrochemische Partitionierung

Pyrochemische Verfahren verwenden Methoden wie Elektrolyse, Elektroraffination oder die reduktive Extraktion von Salzschnmelzen bei hohen Temperaturen. Der Kernbrennstoff wird hierfür in Salz- oder Metallschnmelzen gelöst und aus diesen abgetrennt. Im Vergleich zum PUREX-Verfahren fehlt es den pyrochemischen Verfahren derzeit an der großtechnischen Reife für den Einsatz als Wiederaufbereitungsverfahren für abgebrannte Brennelemente. Im Rahmen der Transmutation wird auch an pyrochemischen Verfahren weiter geforscht.⁸

2.2. Verfahren der Transmutation

Eine Transmutationsanlage beinhaltet einen Kernreaktor, der derzeit noch nicht entwickelt und vermutlich neu zu bauen ist. Es gibt derzeit Ansätze für Reaktoren: den kritischen Schnellen Reaktor, den unterkritischen (beschleunigergetriebener) Reaktor und den Salzschnmelzereaktor.⁹

2.2.1. Kritischer Schneller Reaktor

Schnelle und thermische Reaktoren unterscheiden sich in der Energie (Geschwindigkeit) der freien Neutronen im Reaktorkern. In einem thermischen Reaktor geben Neutronen einen Großteil ihrer Energie durch Stöße mit einem Moderator ab, bevor sie weitere Spaltungen auslösen. In den meisten kommerziellen Reaktoren wird Leichtwasser (Wasser, das nicht mit Deuterium angereichert ist) als Moderator und gleichzeitig als Kühlmittel verwendet (Leichtwasserreaktoren).

Bereits zu Beginn der Kernenergieforschung ist das Konzept des „Schnellen Brüters“ entwickelt worden. Vorteil dieses Konzepts ist die erhöhte Ausbeute der Uranreserven im Vergleich zur Verwendung thermischer Reaktoren. Mit schnellen Neutronen beschossen, entsteht aus Uran-238, das in thermischen Reaktoren nicht spaltfähig ist, Plutonium (Plutonium-239). Nach der Wiederaufarbeitung der abgebrannten Brennstoffe wären diese als Spaltstoff für weitere (thermische) Reaktoren verwendbar. Ein weiterer Vorteil ist das theoretische Potential zur Transmutation radioaktiver Abfallnuklide. Ein Nachteil des natriumgekühlten Schnellen Brüters ist das Kühlmittel.

7 Chemie.de „PUREX-Prozess“, <https://www.chemie.de/lexikon/PUREX-Prozess.html>

Osterhage, W., Frey, H. (2022). „Transmutation radioaktiver Abfälle – Von der Zwischenlagerung über die Endlagerung bis zur Transmutation“, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2022, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-38519-4>

8 Osterhage, W., Frey, H. (2022). „Transmutation radioaktiver Abfälle – Von der Zwischenlagerung über die Endlagerung bis zur Transmutation“, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2022, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-38519-4>

9 Osterhage, W., Frey, H. (2022). „Transmutation radioaktiver Abfälle – Von der Zwischenlagerung über die Endlagerung bis zur Transmutation“, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2022, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-38519-4>

Frey, H. (2022). „Kernenergie – Kraftwerkstypen, Entwicklungen und Risiken“, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2021, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-31512-2>

Natrium kann mit Luftfeuchte oder Wasser zu Natronlauge und Wasserstoff reagieren. Der so gebildete Wasserstoff kann explosionsartig reagieren.

2.2.2. Beschleunigergetriebener Reaktor

Beschleunigergetriebene Systeme (accelerator-driven systems, ADS) sind spezielle Schnelle Reaktoren, bei denen der Reaktorkern unterkritisch ausgelegt ist. Die Kettenreaktion ist nicht selbst erhaltend, es müssen zusätzlich Neutronen zugeführt werden. Dies geschieht mit Hilfe einer sogenannten „Spallationsquelle“. Die Spallationsquelle ist ein Protonenbeschleuniger, der hochenergetische Protonen auf ein Schwermetalltarget schießt. Dadurch entstehen zusätzlichen Neutronen, die durch die Kettenreaktion weiter vervielfältigt werden. Die beschleunigergetriebenen Reaktoren sind flexibel im Hinblick auf die Brennstoffzusammensetzung, jedoch komplexer in der Konzeption als andere Reaktoren. Ihr Einsatz soll zunächst für die Transmutation minorer Aktinide dienen. Für die Stromerzeugung sind sie derzeit nicht geplant. Größere Forschungsprojekte laufen in Europa, Indien und Japan.

2.2.3. Salzschnmelzereaktor

Im Gegensatz zu den anderen Reaktortypen liegt der Brennstoff von Salzschnmelzereaktoren (Molton Salt Reactor, MSR) in der Regel nicht in fester Form vor. Er wird in der Salzschnmelze, die als Kühlmittel dient, aufgelöst. Salzschnmelzereaktoren können zum Erbrüten von neuen Spaltstoffen und auch zur Transmutation von Aktiniden eingesetzt werden. Erste Forschungsaktivitäten gab es in den 50er Jahren. Bis heute ist es noch nicht gelungen, das Konzept, insbesondere dessen Sicherheitskonzept im Hinblick auf die Korrosionsbeständigkeit gegen die Salzschnmelze, umzusetzen.¹⁰

2.3. Brennelementkreislauf und MOX-Brennelemente

Für P&T-Szenarien kommen zwei Brennstoffkonzepte in Betracht. Dies sind Mischoxid(MOX)-Brennstoffe aus Uran, Plutonium und Minoren Aktiniden und uranfreie Brennstoffe mit inerten Trägermaterialien. Industrielle Erfahrungen bei der Fertigung von MOX-Brennstoffen aus Uran und Plutonium bestehen sowohl für Leichtwasser- als auch für Schnelle Brutreaktoren.¹¹

Der BN-800 ist ein russischer natriumgekühlter Schneller Brutreaktor, der nach zehn Jahren Bauzeit 2016 mit experimentellen MOX-Brennelementen und Uranbrennstoff in den kommerziellen

10 Deutscher Bundestag Wissenschaftliche Dienste (2020). „Thorium - Flüssigsalzreaktoren Sicherheitsaspekte“, <https://www.bundestag.de/resource/blob/803686/9029c1122daec9568e97bd6b32fdd019/WD-8-049-20-pdf-data.pdf>, WD 8 - 3000 - 049/20

11 Öko-Institut e.V. (2015). Gutachten „Transmutation“, https://www.bundestag.de/resource/blob/400438/f54e3da4bbe76395bce2e40721212379/kmat_48-data.pdf

Frieß, F. et al., Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2021030826033>

Betrieb übernommen wurde. Seine Betriebsgenehmigung am Standort Beloyarsk läuft bis 2025. Ursprünglich sollte der Reaktor waffenfähiges Plutonium zerstören.¹²

Der Hersteller Rosatom plant den Aufbau eines dualen Kraftwerks, das mit thermischen Neutronen- und Schnellen Neutronenreaktoren und einem geschlossenen Brennstoffkreislauf¹³ betrieben werden soll. Der geschlossene Brennstoffkreislauf soll laut herstellereigenen Angaben die Wiederverwendung abgebrannter Brennelemente anstelle ihrer Lagerung ermöglichen. Der Bau des ersten Kraftwerksblocks ist für die frühen 2030er Jahre geplant.¹⁴

Anfang Januar 2020 wurden 18 MOX-Brennelemente aus der Serienproduktion in den Kern¹⁵ des BN-800 Brutreaktors geladen. Die MOX-Brennstoffpellets basieren auf einer Mischung aus Derivaten des Kernbrennstoffkreislaufs wie Plutoniumoxid, das aus kommerziellen Reaktoren stammt, und abgereichertem Uranoxid, das aus der Defluorierung von abgereichertem Uranhexafluorid (UF₆), den Rückständen aus Urananreicherungsanlagen, stammt.¹⁶

Nach Aussage von Experten liegt der Gehalt an Plutonium im fertigen MOX-Brennstoff für den Einsatz in Schnellen Brutreaktoren bei 20 % und wird für die spätere Wiederaufarbeitung auf

12 IAEA (2023). „Power Reaktor Information System-BELOYARSK-4“, <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=451>

IAEA (2021). „Limited Scope Sustainability Assessment of Planned Nuclear Energy Systems Based on BN-1200 Fast Reactors“, <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1959web.pdf>

13 Geschlossener Brennstoffkreislauf: „Unter dem Begriff Brennstoffkreislauf (Brennstoffzyklus) werden in der Kerntechnik zusammenfassend alle Arbeitsschritte und Prozesse bezeichnet, die der Versorgung und Entsorgung radioaktiver Stoffe dienen, die zur zivilen Anwendung gehören. Der Begriff Kreislauf wird von Atomkraftgegnern kritisiert, da er einen geschlossenen Kreislauf impliziert. Jedoch ist auch bei Einsatz von Wiederaufarbeitung die Zufuhr frischen Urans nötig, und auch in diesem Fall entstehen radioaktive Abfälle, die sich durch die Betriebsmittel etc. der Wiederaufarbeitungsanlage sogar vermehren, und die durch das Auflösen der Brennstoffmatrix leichter freigesetzt werden können. Daher wird auch der Begriff Brennstoffkette als Alternative verwendet.“, <https://www.chemie.de/lexikon/Brennstoffkreislauf.html>

14 Rosatom (2022). „Russian specialists present reports at IAEA Conference on Fast Reactors“, https://www.rosatom.ru/en/press-centre/news/russian-specialists-present-reports-at-iaea-conference-on-fast-reactors/?sphrase_id=3668561

Khomyakov, Yu. S. et al. (2020). „Program for CNFC R&D using BN-800“, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1475/1/012020/pdf>

15 Aufgrund der erhöhten Neutronenstrahlung soll vermieden werden die MOX-Elemente an Positionen nahe am Rand des Kerns zu laden, um eine höhere Bestrahlung des Reaktordruckbehälters und damit einhergehender sicherheitskritischer Neutronenversprödung zu vermeiden. Aus: Frieß, F. et al., Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2021030826033>

16 Rosatom (2020). „ROSATOM manufactures the first full refueling batch of MOX fuel for BN-800 fast reactor“, https://www.rosatom.ru/en/press-centre/news/rosatom-manufactures-the-first-full-refueling-batch-of-mox-fuel-for-bn-800-fast-reactor/?sphrase_id=3668561

etwa 30 % begrenzt. Der begrenzende Faktor ist die Löslichkeit des Oxid-Brennstoffs in Salpetersäure.¹⁷

Die natriumgekühlten Schnellen Brutreaktoren sollen einen Beitrag zur Schließung des Brennstoffkreislaufs liefern, da Transuranabfall im schnellen Neutronenspektrum spaltbar ist. Die Umsatzrate für die Transmutation Minorer Aktiniden hängt u.a. vom verwendeten Brennstoff ab. Es gibt in der Fachwelt Überlegungen, dass der BN-800 unter entsprechenden Modifikationen mit uranfreen Brennstoffen zur Transmutation verwendet werden könnte. Schätzungen gehen davon aus, dass Transmutationsraten für den BN-800 von 36 kg Minore Aktiniden pro Jahr möglich wären. In speziell noch zu konzipierenden Reaktoren sollen bis zu 500 kg Minore Aktiniden pro Jahr transmutiert werden können.¹⁸ „Für den Reaktorbetrieb mit MA-MOX-Brennelementen (also MOX plus Minore Aktiniden) ergeben sich zusätzliche Anforderungen und offene Fragen. Es bedarf einer grundsätzlichen Kenntnis der Neutronenbilanz für einen MA-MOX-Brennstoff sowie der Leistungs- und Sicherheitsparameter, insbesondere in Hinblick auf die Reaktivitätskontrolle.“¹⁹ Hierfür ist weitere Entwicklungsarbeit zu leisten.

Durch einen entsprechend angepassten Reaktorbetrieb kann in dem schnellen Neutronenspektrum des Schnellen Brutreaktors auch waffenfähiges Plutonium produziert (erbrütet) werden.

2.4. Radioaktive Abfallmengen aus der Kernenergienutzung für Zwischen- und Endlagerung

Prognostizierte Mengen an hochradioaktiven Abfällen für ein Endlager bis zum Jahr 2080 sind rund 10.500 Tonnen bzw. 27.000 Kubikmeter je nach Behälterkonzept und Berechnungsgrundlage. Für schwach- und mittelradioaktive Stoffe kommen zu den heute angefallenen rund 120.000 Kubikmetern bis zum Jahr 2050 noch einmal rund 180.000 Kubikmeter hinzu. Diese insgesamt 300.000 Kubikmeter sollen später im Schacht Konrad²⁰ gelagert werden.²¹

17 Frieß, F. et al., Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2021030826033>

IAEA (2017). „The BN-800 Core with MOX Fuel“, <https://media.superevent.com/documents/20170620/11795dbfabe998cf38da0ea16b6c3181/fr17-405.pdf>

Kütt, M. et al. (2014). „Plutonium Disposition in the BN-800 Fast Reactor: An Assessment of Plutonium Isotopics and Breeding“, <https://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs22kutt.pdf>

18 Frieß, F. et al., Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2021030826033>

19 Frieß, F. et al., Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2021030826033>

20 Der Schacht Konrad ist ein stillgelegtes Eisenerz-Bergwerk im Stadtgebiet Salzgitter.

21 Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) (2023). „Aktueller Bestand“, <https://www.bge.de/de/abfaelle/aktueller-bestand/>

Neben neuen Prozessabfällen die schwach- und mittelradioaktiv wären, entstehen bei der Produktion der Kernenergie auch kernwaffenfähige Stoffe. Die Schätzungen liegen bei insgesamt etwa 170 t Plutonium allein in Deutschland, die abgetrennt werden müssten.

Für das gegenwärtig bestehende Entsorgungsproblem von Brennelementen stellt Transmutation aus verschiedenen Gründen derzeit keine Lösung dar. Zum einen bleibt das Entsorgungsproblem bestehen, da auch Transmutation nicht abfallfrei ist, zum anderen wird für die technische Entwicklung und der anschließenden Transmutation ein Zeitraum von mehreren Jahrzehnten angegeben.²²

Ein Endlager für hochradioaktive Abfälle wird auch bei mehrmaliger Transmutation erforderlich bleiben, da Transuran-Reste zurückbleiben, die einem Endlager zugeführt werden müssten. Zudem entstehen langlebige Spaltprodukte (sowohl bestehende als auch neu entstehende), die in einem Endlager eingelagert werden müssten. Hinzu kommt, dass nur ein Teil der hochradioaktiven Abfälle in Form von Brennelementen vorliegt.²³ Etwa 40 % der Abfälle²⁴ wurden im Rahmen der Wiederaufbereitung verglast²⁵, was die erneute Partitionierung deutlich anspruchsvoller macht.²⁶ Sollten Partitionierungs- und Transmutationsverfahren in den nächsten Jahrzehnten ent-

Das Verzeichnis radioaktiver Abfälle gibt einen Überblick über den Bestand der in Deutschland angefallenen endzulagernden, bzw. endgelagerten radioaktiven Abfälle und abgebrannten Brennelemente zum Stichtag 31. Dezember 2019 und eine Prognose über das erwartete radioaktive Abfallaufkommen bis zum Jahr 2080. Die Mengen werden in der Einheit für die Schwermetallmasse in Megagramm Schwermetall (Mg SM) angegeben. Dies ist ein Maß für den Brennstoffgehalt (Uran, Plutonium und Thorium) eines Brennelements. Vgl.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2019). „Verzeichnis radioaktiver Abfälle zum Stichtag 31.12.2019“, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nukleare_Sicherheit/20210805_verzeichnis_radioaktiver_abfaelle_bf.pdf

- 22 BASE (2022). „Transmutation hochradioaktiver Abfälle“, https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/kta-deutschland/p_und_t/partitionierung-transmutation_node.html

Frieß, F., Liebert, W. (2018). „Entschärfung der Atommüllproblematik durch Partitionierung und Transmutation? – Beiträge zur Einschätzung des Potenzials“, <https://www.nomos-elibrary.de/10.5771/9783845283562-347/entschaerfung-der-atommuellproblematik-durch-partitionierung-und-transmutation-beitraege-zur-einschaetzung-des-potenzials?page=1>

- 23 Nach BGE-Schätzungen etwa 10.500 Tonnen hochradioaktiver Abfälle allein aus Brennelementen bis zum Jahr 2080. <https://www.bge.de/de/abfaelle/aktueller-bestand/>

- 24 Nach derzeitigen Stand der Forschung eignen sich diese 40 % nicht für ein P&T-Verfahren.

- 25 Verglaste Abfälle: „Bei der Wiederaufarbeitung werden die abgebrannten Brennelemente durch einen chemischen Prozess mittels Salpetersäure in einzelne Komponenten aufgelöst. Uran und Plutonium werden zurückgewonnen. Aus ihnen fertigt man neue Brennelemente. Der Rest der Spaltstoffe wie z.B. Cäsium, Strontium, etc. wird mitsamt der Säure in flüssigem Glas gebunden. Das fertige Produkt bezeichnet man als Glaskokille. Diese zählt in die Kategorie des hochradioaktiven Abfalls.“, <https://www.base.bund.de/SharedDocs/Glossareintraege/DE/V/verglaste-abfaelle.html>

- 26 BASE (2022). „Transmutation hochradioaktiver Abfälle“, https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/kta-deutschland/p_und_t/partitionierung-transmutation_node.html

wickelt werden können, so müssten nach Modellrechnungen drei bis 23 dieser auf Transmutation ausgelegten Kernkraftwerke zwischen 55 und 300 Jahren betrieben werden, um einen Großteil der deutschen Transurane zu transmutieren.²⁷

Bei der Entwicklung der neuen Verfahrenstechniken, bei denen mit (hoch)radioaktiven Materialien umgegangen wird, müssen zudem die Kritikalitäts²⁸- und Reaktivitätskontrolle²⁹, die Wärmeabfuhr, der Strahlenschutz, der Umgang mit der schädigenden Wirkung von Strahlung auf die eingesetzten Materialien und die Analyse und Reduzierung möglicher Proliferationsrisiken³⁰ geklärt werden.³¹

3. Aktuelle Studienergebnisse zur Transmutation

3.1. Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung

Das vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) 2022 beauftragte Gutachten „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, erhebt den derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik zur Partitionierung und Transmutation (P&T) dieser von den Experten als „hypothetischen Entsorgungsoption“ bezeichneten Methodik. Das Gutachten liefert einen Überblick über die verschiedenen diskutierten P&T-Verfahrenstechnologien und -konzepte und stellt den internationalen Stand der Forschung und Entwicklung dar. Dabei betrachtet die Experten-Gruppe den technischen Reifegrad und die grundsätzliche Realisierbarkeit von P&T ebenso wie die Risiken und mögliche Auswirkungen auf die nukleare Entsorgung. Ziel der Entwicklung der modellierten Szenarien ist es, Auswirkungen auf in Deutschland vorliegende radioaktive Abfälle, notwendige Anlagen und Betriebszeiträume bis zur Stilllegung einschätzen zu können.³²

27 BASE (2022). „Transmutation hochradioaktiver Abfälle“, https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/kta-deutschland/p_und_t/partitionierung-transmutation_node.html

28 Kritikalität bezeichnet in der Kerntechnik sowohl die Neutronenbilanz einer kerntechnischen Anlage als auch den kritischen Zustand eines Kernreaktors oder einer Spaltstoffanordnung.

29 Reaktivität, eine Größe, die die Abweichung eines Kernreaktors vom kritischen Zustand beschreibt.

30 Proliferation bezeichnet hier die Nutzung für militärische Zwecke sowie der Herstellung von Kernwaffen.

31 Friß, F. et al., Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2021030826033>

Ausführliche Beschreibung der physikalischen und technischen Hintergründe in: Osterhage, W., Frey, H. (2022). „Transmutation radioaktiver Abfälle – Von der Zwischenlagerung über die Endlagerung bis zur Transmutation“, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2022, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-38519-4>

32 Friß, F. et al., Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2021030826033>

Die Gutachter treffen auf Basis ihrer modellierten hypothetischen P&T-Szenarien für die Behandlung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland folgende Kernaussagen:

„Nach dem gegenwärtigen Stand von Wissenschaft und Technik erscheinen P&T-Programme nur für die Behandlung abgebrannter Brennstäbe aus Leistungsreaktoren, aber nicht für bereits verglaste Abfälle praktikabel. Etwa 40% der in Deutschland angefallenen abgebrannten Brennstäbe wurden bereits wiederaufgearbeitet. Die dabei angefallenen Reststoffe (Spaltprodukte und Transurane) befinden sich in den verglasten Abfallgebinden. Sie wären für P&T nicht zugänglich und müssten direkt endgelagert werden müssten.

Ein P&T-Konzept verlangt nach einer Vielzahl von kerntechnischen Anlagen und ihrem langfristigen Betrieb. Der Wiedereinstieg in ein großskaliges kerntechnisches Programm wäre nötig. Dies würde dem Ausstieg aus der Kernenergienutzung entgegenstehen. Es erscheint fraglich, ob der gesellschaftliche Konsens hierzu hergestellt und insbesondere über die gesamte langfristige Dauer des Programms gehalten werden könnte. Die langen Umsetzungszeiträume widersprechen einer möglichst zügigen und sicheren Realisierung, Einlagerung und Schließung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle.

Die für P&T notwendigen kerntechnischen Anlagen stehen im großtechnischen Maßstab nicht zur Verfügung. Selbst in dem vermutlich am schnellsten realisierbaren Szenario, basierend auf Schnellen Reaktoren, MOX-Brennstoffen und hydrochemischer Wiederaufarbeitung, wäre noch mit einem erheblichen Forschungs- und Entwicklungsaufwand zu rechnen. Nur sehr bedingt könnte dabei auf bisherige Betriebserfahrungen in anderen Ländern zurückgegriffen werden, da spezifische Anforderungen für P&T noch erfüllt werden müssten.

Viele Jahrzehnte an Forschungs- und Entwicklungsarbeit wären vor der Realisierung eines P&T-Programms notwendig. Für die Qualifizierung von Transmutationsbrennstoffen, großtechnisch durchführbaren pyrochemischen Trennverfahren und dem industriellen Einsatz von beschleunigergetriebenen Systemen oder Salzschnmelzereaktoren gilt dies in besonderem Maße.

Es ist noch offen, ob der erforderliche technische Entwicklungsstand für eine großtechnische Umsetzung eines P&T-Programms erreicht werden kann. Die notwendigen Umsetzungszeiträume sind selbst mit massiven Unsicherheiten belastet und die Entwicklungsrissen erheblich.

Die Durchführung eines P&T-Programms in Deutschland würde mindestens den Einlagerzeitraum in ein Endlager für hochradioaktive Abfälle erheblich in die Zukunft verschieben. Der Beginn der Einlagerung in das Endlager für hochradioaktive Abfälle ist gegenwärtig für das Jahr 2050 geplant und soll mehrere Jahrzehnte dauern. Allein die Vorlaufzeit für die notwendigen Forschungs- und Entwicklungsaufgaben für die Realisierung eines P&T-Programms würde mehrere Jahrzehnte in Anspruch nehmen. Hinzu käme der Zeitbedarf für Genehmigungsverfahren und den Anlagenbau. Der Start eines P&T-Programms würde daher überhaupt erst nach Beginn der geplanten Einlagerung in ein deutsches Endlager erfolgen können. Unabhängig vom gewählten Szenario (die berechneten Umsetzungszeiträume liegen im Bereich von 55 bis 300 Jahre) würden hochradioaktive Abfälle, die aus P&T-Programmen entstanden sind und in das Endlager verbracht werden

müssten, noch deutlich nach Ende des geplanten Einlagerungszeitraums anfallen. Bei P&T-Programmen, die einen sehr hohen Forschungs- und Entwicklungsbedarf voraussetzen, ist sogar nicht auszuschließen, dass die großtechnische Umsetzung überhaupt erst nach Ende des geplanten Einlagerzeitraums beginnen könnte.

Die Menge an schwach- und mittelaktiven Sekundärabfällen würde sich infolge eines P&T-Programms erheblich vergrößern. Durch den Betrieb, die Stilllegung und den Rückbau der kerntechnischen Anlagen (Reaktoren, Wiederaufarbeitungsanlagen, ggf. Brennelementefabriken) entstehen signifikante Mengen vor allem an schwach- und mittelradioaktiven Sekundärabfällen. Diese können durchaus in der gleichen Größenordnung wie die für das Endlager Schacht Konrad vorgesehenen Mengen zur Einlagerung (303.000 m³) liegen. Absehbar ist dies bereits für P&T-Programme unter der Verwendung von Schnellen Reaktoren. Das Endlager Schacht Konrad ist für diese zusätzlichen Abfälle nicht ausgelegt und genehmigt. Entweder müsste das Endlager für hochradioaktive Abfälle entsprechend vergrößert oder ein weiterer Standort für schwach- und mittelaktive Abfälle gefunden werden.

Es würde in jedem Fall ein Endlager für hochradioaktive Abfälle gebraucht. In jedem betrachteten P&T-Szenario bleiben signifikante Mengen an hochradioaktiven Abfällen zurück. Das Inventar der Transurane wird im besten Fall bei einer Szenariodauer von 300 Jahren von etwa 150 Tonnen auf etwa 30 Tonnen reduziert. Die beiden anderen Szenarien mit Laufzeiten von 88 bzw. 55 Jahren liefern eine Reduktionsmöglichkeit auf etwa 140 bzw. 55 Tonnen. Es würden somit größere Mengen an langlebigen Radionukliden weiterhin vorliegen. Daher müsste auch im Falle der Durchführung eines P&T-Programms ein Endlager für hochradioaktive Abfälle gefunden, gebaut und betrieben werden. Überdies wären die hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung der Vergangenheit in ein Endlager zu verbringen.

Die Gesamtmenge an langlebigen Spaltprodukten, die sicher endgelagert werden muss, würde durch die Durchführung eines P&T-Programms ansteigen. Durch die in einem P&T-Programm immer stattfindende Kernspaltung der Transurane werden Spaltprodukte, insbesondere auch langlebige Spaltprodukte, zusätzlich zu jetzt bereits vorliegenden Mengen generiert. Für einige langlebige Spaltprodukte, die Leitotope für die Analyse der Langzeitsicherheit eines Endlagers sind (Technecium-99, Jod-129 und Cäsium-135), zeigt sich in den hypothetischen Szenarien dementsprechend ein Anstieg der endzulagernden Mengen. Je nach Szenario kann der Anstieg dieser Mengen massiv ausfallen. Dies gilt insbesondere, je besser die Spaltung der Transurane möglich wird und sich ihre Bestände entsprechend stärker reduzieren. Die zusätzlich zu entsorgende Tonnage an diesen drei Spaltprodukten kann im Szenario „SR“³³, in dem am meisten Transurane gespalten werden, von etwa 17 Tonnen bis auf knapp 27 Tonnen anwachsen. Die zusätzliche Generierung von Cäsium-135 ist in allen betrachteten Szenarien besonders auffällig. Der Effekt auf die Herausforderungen durch die Endlagerung in Deutschland wäre negativ.

33 Szenario „SR“ = unter Verwendung eines Schnellen Reaktors mit hydrochemische Wiederaufarbeitung. Der kritische Schnelle Reaktor wird mit einer speziellen Variante von MOX-Brennstoff betrieben.

Sicherheitsrisiken durch den langfristigen Betrieb von kerntechnischen Anlagen in einem P&T-Programm müssten in Kauf genommen werden. Für ein P&T-Programm würden verschieden- und neuartige Anlagen mit einem hohen Inventar an Transuranen an einer Reihe von Standorten benötigt. Daraus folgende Risiken sind auf dem heutigen Stand nicht eindeutig abschätzbar. Sie müssten aber vor einem potenziellen Einsatz der Technologien nachvollziehbar spezifiziert werden können. Es ist noch nicht geklärt, welche überzeugenden Vorkehrungen für den Ausschluss von Freisetzungsrissen von Radionukliden getroffen werden müssten. Dementsprechend sind die Erfolgsaussichten solcher notwendigen technologischen Entwicklungsschritte heute schwer einschätzbar. Die Herausforderungen übersteigen diejenigen, die aus dem deutschen Kernenergieprogramm der Vergangenheit bekannt sind. Vor allem durch die vielfache Rezyklisierung und die damit einhergehende Veränderung der Brennstoffzusammensetzung ist nicht ohne weitere Untersuchungen klar, ob die verwendeten Brennstoffe und Reaktordesigns langfristig sicher – über die Gesamtzeit der jeweiligen Szenarien – betrieben werden könnten.

Es entstünden Proliferationsrisiken durch den langfristigen Betrieb von kerntechnischen Anlagen in einem P&T-Programm. Praktisch das gesamte Plutonium von etwa 129 Tonnen, das in abgebrannten Brennstoffen vorliegt, müsste zu Beginn jedes der drei betrachteten Szenarien abgetrennt werden und läge dann separiert vor. Über längere Zeiträume würde dieses abgetrennte Plutonium an verschiedenen Anlagenstandorten vorliegen und es würde damit in vielfältiger Weise in den verschiedenen Anlagen hantiert werden. So bestünde langfristig ein direkter Zugriff auf waffenfähige nukleare Materialien. Auch nach Ende der jeweiligen P&T-Programme würden je nach Szenario unterschiedliche Mengen an Plutonium in abgetrennter (und unbestrahlter) Form verbleiben: etwa eine halbe Tonne beim Szenario „SR“ etwa 60 Tonnen mit dem ursprünglichen Isotopenvektor von proliferationsrelevantem sogenanntem Reaktorplutonium beim Szenario „ADS“³⁴ und etwa 30 Tonnen gleicher Zusammensetzung beim Szenario „MSR“³⁵. Wie mit den davon dauerhaft ausgehenden Proliferationsrisiken umgegangen werden könnte, ist unklar. Die während der Szenarien elementweise abgetrennten und gelagerten minore Aktiniden könnten ebenfalls Proliferationsrelevanz haben. Für alle Szenarien müssten proliferations-sensitive Technologien (z.B. Anlagen für die erweiterte Wiederaufarbeitung) entwickelt und schließlich betrieben werden. Es ist nicht absehbar, dass diese proliferationsresistent

34 Szenario „ADS“ = unter Verwendung eines beschleunigerbetriebenen System, (Accelerator-driven System) mit pyrochemischer Wiederaufarbeitung. Es werden uranfreie Brennstoffe eingesetzt, um ein Nachbrüten von Plutonium zu verhindern.

35 Szenario „MSR“ = unter Verwendung eines Salzschnmelzreaktors (Molten Salt Reactor) mit pyrochemischer Wiederaufarbeitung und uranfreiem Brennstoff.

ausgelegt werden könnten. IAEO-Safeguards³⁶ für neuartige Anlagentypen wie Spallationsneutronenquellen, beschleunigergetriebene Reaktoren, Salzschmelzreaktoren, sowie pyrochemische Wiederaufarbeitungsanlagen müssten erst noch entwickelt werden.

Die Genehmigungsfähigkeit der Anlagen in Deutschland ist derzeit nicht gegeben bzw. längerfristig unklar. Partitionierungs- und Transmutationsverfahren können mit den bisher in Deutschland betriebenen kerntechnischen Anlagen nicht umgesetzt werden. Der gegenwärtige Entwicklungsstand reicht nicht aus, um benötigte neuartige Anlagen für in Deutschland genehmigungsfähig halten zu können. Es existieren keine prinzipiell als genehmigungsfähig geltende Prototypen. Ob die über Jahrzehnte erforderliche Forschung und Entwicklung schließlich die erhoffte Genehmigungsfähigkeit erreichen könnte, ist ungewiss. Um überhaupt entsprechende Versuchsanlagen in Deutschland genehmigungsfähig zu machen, wären erhebliche Änderungen auf der gesetzgeberisch-regulatorischen Ebene notwendig. Es müsste insbesondere auch ein neues kerntechnisches Regelwerk erarbeitet werden.

Zentrale Ziele der deutschen Gesetzgebung würden mit einem in Deutschland durchgeführten P&T-Programms nicht befördert. Das Standortauswahlgesetz (2017) zielt auf die „bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor Wirkung ionisierender Strahlung“ und die „Vermeidung von unzumutbaren Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen“. Nach dem jetzigen Kenntnisstand und auf Basis der Ergebnisse der hypothetischen P&T-Einsatzszenarien dieses Gutachtens ist nicht absehbar, dass ein in Deutschland durchgeführtes P&T-Programm diese Zielsetzungen substantiell und in wissenschaftlich nachvollziehbarer Weise befördern könnte. Gegenläufige Effekte sind weit eher zu erwarten. Mögliche Vorteile sind nach heutigem Kenntnisstand nicht ausgeschlossen, stehen allerdings zahlreichen Nachteilen und Risiken gegenüber. So ist zu erwarten, dass zusätzliche Risiken während der Umsetzung sowie zusätzlich anfallende Sekundärabfälle und langlebige Spaltprodukte mögliche Vorteile im Endlager durch Reduktion von Mengen an Transuranen übersteigen. Die Durchführung eines P&T-Programms in Deutschland würde eine erhebliche Verschiebung von Lasten zu Ungunsten zukünftiger Generationen darstellen.“³⁷

Das Expertenteam kommt zu dem finalen Schluss, dass „die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle aus der Kernenergienutzung in Deutschland eine Aufgabe ist, die noch viele Jahrzehnte andauern wird.“ Aus ihren Erkenntnissen leiten die Gutachter ab, dass „eine Konzentration auf die Suche

36 Die internationale Atomenergie-Organisation (IAEA, International Atomic Energy Agency) ist eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen (VN) kontrolliert die Verwendung und verifiziert den Verbleib von Kernmaterial in kerntechnischen Anlagen im Rahmen der „Safeguards“-Abkommen, die sie mit ihren Mitgliedsstaaten abgeschlossen hat. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass Anlagen und Material allein der friedlichen Nutzung der Kernenergie dienen. https://wien-io.diplo.de/iow-de/internationale-organisation/iaeo/1906734#content_0

37 Friß, F. et al., Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2021030826033>

nach einem geeigneten, gesellschaftlich breit akzeptierten Standort für ein Endlager, seinen Ausbau und baldigen Betrieb sowie seine Verschließung zu empfehlen wäre.“³⁸

3.2. Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors)

Zu einer möglichen Lösung für den Klimawandel soll das Konzept des Small Modular Reaktors (SMR) entwickelt werden. Das Konzept sieht vor, dass mittels kleiner und vermeintlich günstiger und sicherer Reaktoren Energie bereitgestellt wird. Das Gutachten „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors)“ untersucht das Konzept des Small Modular Reaktors.

Mit dem Konzept des SMRs soll Strom mit geringem Treibhausgaspotential produziert werden können. Um weltweit den derzeit benötigten Strom bereitstellen zu können, müssten nach Aussage der Experten tausend bis zehntausend SMR-Anlagen gebaut werden. Ungeklärt sind dabei Fragen zu Sicherheit, Transport, Rückbau sowie zur Zwischen- und Endlagerung. Die Gutachter kommen zu dem Schluss, dass SMR zwar potenziell sicherheitstechnische Vorteile gegenüber großen Atomkraftwerken vorweisen, aber die hohe Anzahl an notwendigen Reaktoren die damit verbundenen Risiken wiederum erhöhen würde. Bei SMR-Anlagen besteht auch die Gefahr der Proliferation.³⁹

4. Forschungsaktivitäten zur Transmutation

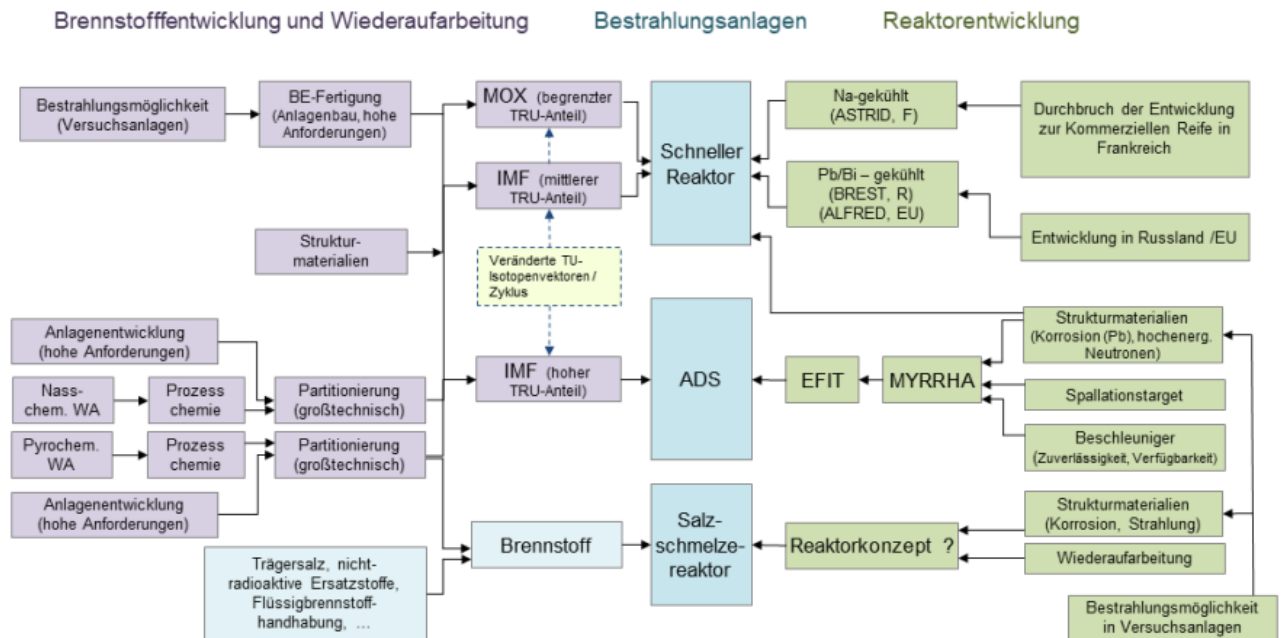
International gibt es sehr unterschiedliche Forschungsansätze für die Themenbereiche Wiederaufarbeitung und Abtrennung, Brennstoffertigung und Transmutationsanlagen. Die folgende Abbildung verdeutlicht die Abhängigkeiten, Voraussetzungen und Überschneidungen der geplanten Forschungs- und Entwicklungsarbeit an den drei grundsätzlichen Transmutationsverfahren schneller, metallgekühlter Reaktor (SR), beschleunigergetriebenes System (ADS) und Salzschnmelzereaktor (MSR). Dabei überschneiden sich die Aktivitäten wie die Wiederaufarbeitung, die Brennstoffertigung und die Entwicklung von Strukturmaterialien zu Schnellen Reaktoren und beschleunigergetriebenen Systemen in weiten Teilen. Für letzteres ist die Entwicklung eines

38 Frieß, F. et al., Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2021030826033>

39 Öko-Institut e.V. (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors)“, https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/berichte/kt/gutachten-small-modular-reactors.pdf;jsessionid=0178CE3C90FF509986ED3EE4D8DDE951.1_cid365?blob=publicationFile&v=6

BASE (2023). „Small Modular Reactors - Was ist von den neuen Reaktorkonzepten zu erwarten?“ https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/kta-deutschland/neue_reaktoren/neue-reaktoren_node.html

Teilchenbeschleunigers und uranfreien Brennstoffs notwendig⁴⁰. Die Entwicklungsaktivitäten für Salzschnmelzereaktoren sind im Wesentlichen auf dieses Reaktorsystem beschränkt.⁴¹



Im rechten Teil der Abbildung sind die notwendigen Voraussetzungen für die entsprechende Reaktorentwicklung schematisch aufgeführt. Die Entwicklung natriumgekühlter Reaktoren ist nach Aussage der Experten weiter fortgeschritten. „Mit dem geplanten (inzwischen aufgegebenen) französischen ASTRID-Reaktor war ein weiterer Durchbruch in Reichweite, der auch einen Einsatz in Deutschland zumindest denkbar werden ließ. In Russland wird die Entwicklung des BREST Reaktors vorangetrieben. Gegenwärtig finden Vorarbeiten am Reaktorstandort statt. Das europäische, bleigekühlte Reaktorkonzept ALFRED befindet sich noch im Designstadium.“⁴²

40 Uranfreie Brennstoffe verhindern das ständige Nachbrüten von Plutonium aus Uran-238 der bisher eingesetzten MOX-Brennstoffe, die nicht uranfrei sind.

41 Frieß, F. et al., Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2021030826033> E

42 Frieß, F. et al., Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2021030826033>

Die Entwicklungsarbeiten zu neuen Strukturmaterialien für die Transmutationsanlagen oder für die Hüllrohre der Brennstoffmaterialien hinsichtlich ihrer Korrosions- und Strahlungsbeständigkeit sowie der ihrer Standzeiten⁴³. Die Standzeiten hängen von der Anzahl der Transmutationszyklen ab, da bei jedem Zyklus ein unterschiedlicher Anteil der verschiedenen Elemente gespalten wird und sich die Eigenschaften des Brennstoffs ändern.

Im linken Teil der Abbildung führen die Experten ausgewählte Schritte auf, die zur Brennstofffertigung und Wiederaufarbeitung durchgeführt werden müssten. MOX-Brennstoffe mit einem deutlich limitierten Transurananteil oder uranfreie Brennstoffe (IMF) mit einem erhöhten Transurananteil können in Schnellen Reaktoren eingesetzt werden. Ein schon leicht erhöhter Transurananteil stellt hohe Anforderungen an die Fertigung der Brennelemente, da dabei Material mit hoher Aktivität und Wärmeentwicklung gehandhabt werden muss. Für beide Verfahrensarten der Partitionierung und Wiederaufbereitung der für die Transmutation benötigten Brennelemente ist die Prozesschemie noch nicht ausreichend weit entwickelt. Ebenso sind die Eigenschaften wie die Neutronenstrahlung und die sich entwickelnde Wärmeabfuhr der neuen Transmutationsbrennstoffe nicht bekannt. Bei Salzschnmelzereaktoren ist die Entwicklung von Trägersalzen, die den Brennstoff enthalten, notwendig.

Neue Materialien sind die Basis neben der Entwicklung des Spallationstargets und eines Beschleunigers und essentiell für die Umsetzung des europäischen ADS-Demonstrationsreaktors MYRRHA und seines Nachfolgers EFIT.

4.1. Myrrha

Seit den 90er Jahren arbeiten im europäischen Kontext Wissenschaftler an der Entwicklung eines beschleunigergetriebenen Demonstrationsreaktors für die Transmutation hochradioaktiven Abfalls. Beschleunigergetriebene Systeme sind derzeit das bevorzugte Konzept für eine Transmutationsanlage innerhalb europäischer F&E-Programme. Im Rahmen des Projekts „Myrrha“⁴⁴ forscht das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit 36 Partnern⁴⁵ im Kooperationsprojekt Gen IV⁴⁶ an Transmutation. Dabei sollen besonders problematische radioaktive Elemente gezielt aus den

43 Eine Standzeit ist die Zeitdauer, die ein Werkzeug bzw. Anlage arbeiten kann, ohne dass erhebliche Verschleißerscheinungen auftreten.

44 Myrrha = Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications

Magni, A. et al. (2022). „Extension and application of the TRANSURANUS code to the normal operating conditions of the MYRRHA reactor“, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549321005331?via%3Dihub>

45 Liste der Partner während des EU-Rahmenprogramms „Horizon 2020“ unter <https://cordis.europa.eu/project/id/662186>

46 Das Internationale Forum Generation IV (GIF) ist ein internationales Kooperationsprojekt mit dem Ziel die Durchführbarkeit und die Leistung von Nuklearsystemen der vierten Generation (GenIV) testen zu können und diese bis 2030 industriell verfügbar zu machen. GEN IV International Forum (2023). <https://www.gen-4.org/gif/>

abgebrannten Brennelementen abgetrennt und in weniger langlebige Isotope umgewandelt werden. Bisher gelang dies nur im Labormaßstab.⁴⁷

Myrrha soll nach Aussage der Entwickler der erste Prototyp eines Kernreaktors sein, der von einem Teilchenbeschleuniger angetrieben wird. Das System soll aus einem Protonenbeschleuniger bestehen, der einen Strahl an ein Spallationstarget leitet, das wiederum mit einem subkritischen Blei-Wismut gekühlten Schnellreaktor gekoppelt ist.⁴⁸

Der im belgischen Mol geplante Demonstrationsreaktor „Myrrha“ soll, nach vielen Verzögerungen, laut derzeitigem Planungsstand Mitte der 2030er Jahre in Betrieb gehen. Dort sollen zudem Bestrahlungsexperimente für die Entwicklung eines Brennstoffes für eine „European Facility for Industrial Transmutation“ (EFIT) durchgeführt werden.⁴⁹ Derzeit befindet sich der Reaktor noch im Bau. Anfang 2023 soll der Genehmigungsantrag bei der Provinz Antwerpen gestellt werden.⁵⁰ Die Kosten für den Bau des belgischen Myrrha-Reaktors werden derzeit auf 1,6 Milliarden Euro geschätzt. Die Finanzierung des Reaktors ist noch nicht gesichert.⁵¹

Experten haben zur Bewertung des Myrrha-Projekts auf Basis eines beschleunigergetriebenen P&T-Systems, das 10.500 Tonnen Transurane beseitigen soll, berechnet, dass sich die endzulagernde Spaltstoffmenge insgesamt um etwas mehr als ein Drittel erhöhen würde. Darunter wären auch stark wärmeentwickelnde Nuklide, für die eine daran angepasste Endlagerauslegung konzipiert werden müsste. Die Menge der besonders langlebigen Spaltprodukte würde um etwa 50 % ansteigen (von knapp 26 Tonnen auf etwa 13,5 Tonnen). Die Experten ziehen den Schluss, dass die weitgehende Beseitigung von Transuranen (inklusive der minoren Aktiniden) mit einer deutlichen Vergrößerung der Menge an langlebigen Spaltprodukten verbunden sein würde, die sicher

47 Myrrha (2022). „Nuclear waste treatment by MYRRHA“, <https://myrrha.be/myrrha-applications/nuclear-waste-treatment-myrrha>

Frieß, F., Liebert, W. (2018). „Entschärfung der Atommüllproblematik durch Partitionierung und Transmutation? – Beiträge zur Einschätzung des Potenzials“, <https://www.nomos-elibrary.de/10.5771/9783845283562-347/entschaerfung-der-atommuellproblematik-durch-partitionierung-und-transmutation-beitraege-zur-einschaetzung-des-potenzials?page=1>

48 Centre d'étude de l'énergie nucléaire (SCK•CEN) (2023). „Myrrha“, <https://www.sckcen.be/en/our-scientific-projects/myrrha>

49 Frieß, F. et al., Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2021030826033>

50 Myrrha (2022). „Update MINERVA/MYRRHA: 1st license is a fact“, <https://myrrha.be/news/update-miner-vamyrrrha-1st-license-fact>

51 Frieß, F. et al., Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2021030826033>

World Nuclear News (2018). „Belgian government approves funding for Myrrha“, <https://world-nuclear-news.org/Articles/Belgian-government-approves-funding-for-Myrrha>

endgelagert werden müssten. Eine direkte Endlagerung der vorhandenen Brennelemente wäre trotz Partitionierung und Transmutation auch im Rahmen des Myrrha-Projekts unabdingbar.⁵²

Der Forschungsreaktor Myrrha, dessen Inbetriebnahme für 2026 geplant ist, soll nicht nur Radioisotope produzieren, sondern auch die Grundlagenforschung und angewandte Materialforschung fördern. Im Rahmen der Forschungstätigkeiten sollen nicht nur Lösungen für die Entsorgung nuklearer Abfälle und für Methoden zur geologischen Tiefenentsorgung genutzt werden, sondern auch weniger invasive Therapien zur Krebsbekämpfung entwickelt werden.⁵³

4.2. Fairfuels

Das EU-Projekt FAIRFUELS (Fabrication, Irradiation and Reprocessing of FUELS and targets for transmutation) als Teil des 7. EURATOM-Rahmenprogramms (FP7) erforschte die effizientere Nutzung von spaltbarem Material in Kernreaktoren. Im Rahmen des Projekts wurde die Transmutation langlebiger radioaktiver Abfälle aus Aktiniden in GEN-IV-Reaktoren mit schnellem Neutronspektrum (Schnelle Brutreaktoren) oder in subkritischen beschleunigergetriebenen Systemen untersucht. Insbesondere befassten sich die Forscher mit dem Materialverhalten während der Bestrahlung der Brennstoffe, die die Aktinidenabfälle enthalten. Der Schwerpunkt der Untersuchung lag auf der Transmutation von Americium, da im Vergleich zu Uran- und Uran-Plutoniumoxid-Brennstoffen americiumhaltige Brennstoffe deutlich mehr Helium erzeugen. Dies kann zu einer verstärkten Brennstoffschwellung sowie zu einer erhöhten Druckbeaufschlagung der Brennstoffstifte führen.

Die Ergebnisse des Projekts dienen als Grundlage für die Bewertung und Auswahl von Transmutationsbrennstoffen, so dass in Zukunft gezieltere Anstrengungen zur Qualifizierung der vielversprechendsten Kandidaten unternommen werden können. Nächster Schritt bei der Qualifizierung von Transmutationsbrennstoffen wird die experimentelle Bewertung des Verhaltens unter nicht-normalen und Unfallbedingungen sein. Das FAIRFUELS-Projekt lief von 2009 bis 2015.⁵⁴

Weitere Überlegungen formieren sich unter der Initiative „ESNII“ (The European Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII)) der Plattform „SNETP-The Sustainable Nuclear Energy Technology Platform“.⁵⁵

52 Frieb, F., Liebert, W. (2018). „Entschärfung der Atommüllproblematik durch Partitionierung und Transmutation? – Beiträge zur Einschätzung des Potenzials“, <https://www.nomos-elibrary.de/10.5771/9783845283562-347/entschaerfung-der-atommuellproblematik-durch-partitionierung-und-transmutation-beitraege-zur-einschaetzung-des-potenzials?page=1>

53 <https://www.sckcen.be/en/our-scientific-projects/myrrha#anchor-applications>

54 Acatech (2018). „Partitionierung und Transmutation“, https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/acatech_STUDIE_Transmutationsforschung_WEB.pdf und EU-Datenbank Cordis <https://cordis.europa.eu/project/id/232624/reporting/de>

55 ESNII (2022). <https://snetp.eu/esnii/>

4.3. Weitere Beispiele für Forschungsaktivitäten

Im internationalen Kontext gibt es sehr viele und unterschiedliche Forschungsansätze für die Themenbereiche Partitionierung und Transmutation, die zum Teil im Rahmen der Kernreaktorentwicklung stattfinden.

Hauptziel der Forschungsaktivitäten in Japan ist beispielsweise ein geschlossener Brennstoffkreislauf unter der Verwendung kritischer, schneller Reaktoren. Seit Jahrzehnten wird in Japan auch an ADS geforscht.⁵⁶

Da Indien große Thorium-Vorkommen besitzt, liegt der Forschungsschwerpunkt auf neuen Kernreaktoren auf Basis eines Thorium-basierten Brennstoffs. In diesem Konzept soll aus Thorium-232 als Spaltmaterial Uran-233 erbrütet werden.⁵⁷

In den USA sind Forschungsaktivitäten zu pyrochemischen Abtrennverfahren wiederaufgenommen worden. Auch die in den 80er Jahren eingestellten Entwicklungen zum Schnellen Brüter wurden weitergeführt.⁵⁸ Ein Projekt zur Nutzung von MOX-Brennstoffen in Leichtwasserreaktoren zur Entsorgung von Waffenplutonium wurde eingestellt. In neuen Projekten soll nun an der Verdünnung des Plutoniums geforscht werden, dass im Rahmen der „Waste Isolation Pilot Plant“ (WIPP) in New Mexico entsorgt werden soll.⁵⁹

-
- 56 Frieß, F. et al., Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2021030826033>
- Pyeon, C. H., et al. (2020). „Special Issue on Accelerator-Driven System Benchmarks at Kyoto University Critical Assembly“, <https://doi.org/10.1080/00223131.2019.1680324>
- World Nuclear Association (2021). „Japan's Nuclear Fuel Cycle“, <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-fuel-cycle.aspx>
- 57 Frieß, F. et al., Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2021030826033>
- World Nuclear Association (2023). „Nuclear Power in India“, <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/india.aspx>
- 58 Frieß, F. et al., Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021). „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2021030826033>
- 59 World Nuclear Association (2021). „MOX fuel fabrication“, <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-fuel-cycle.aspx>

In den USA wird insbesondere an Salzschnmelzereaktoren geforscht. Die Forschungsprogramme haben bisher grundsätzliche Machbarkeitsstudien erarbeitet. Ein Prototyp konnte bisher noch nicht gebaut werden.⁶⁰

60 World Nuclear Association (2021). „Design Maturity and Regulatory Expectations for Small Modular Reactors“, <https://world-nuclear.org/getmedia/23cea1aa-8b63-4284-947a-a0273327fce0/smr-design-maturity-report-FINAL-June.pdf.aspx>