

**Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
K-Drs. 183**

Geschäftsstelle

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

**Entwurf des Berichtsteils zu Teil B – Kapitel 5.4.2
(Transmutation)**

Vorlage der AG 3 für die 23. Sitzung der Kommission am 14. März 2016

ERSTE LESUNG
BEARBEITUNGSSTAND: 03.03.2016

5. ENTSORGUNGSOPTIONEN UND IHRE BEWERTUNG

[...]

5.4 Optionen zur weiteren Beobachtung und ggf. Erforschung

[...]

5.4.2 Transmutation

1 Kapitel 5.4.2 Transmutation

2 In der AG 3 besprochener ENTWURF (Stand 03.03.2016)

3 Die Kommission hat das Verfahren der Transmutation als ein Thema identifiziert, dass
4 hinsichtlich seiner Relevanz für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe einer weiteren
5 Beobachtung bedarf, und hat zu den mit der Transmutation verbundenen Fragestellungen zwei
6 Gutachten eingeholt¹.

7
8 Transmutation zielt darauf ab, die beim Betrieb von Kernreaktoren entstehenden langlebigen²
9 Nuklide der Elemente Plutonium, Neptunium, Americium und Curium (sogenannte
10 Transurane) nach vorheriger Abtrennung (Partitionierung) in stabile oder kurzlebige Nuklide
11 umzuwandeln. Die Transmutation der im abgebrannten Brennstoff ebenfalls vorhandenen
12 langlebigen Spalt- und Aktivierungsprodukte wird in der Forschung hingegen praktisch nicht
13 verfolgt. In diesem Zusammenhang ist Transmutation auch für eine weitere Behandlung der
14 bereits verglasten hoch radioaktiven Wiederaufarbeitungsabfälle nach heutigem Stand von
15 Wissenschaft und Technik nicht geeignet. Für Brennelemente aus Forschungs- und
16 Prototypreaktoren sind die heute diskutierten Verfahren ebenfalls nicht anwendbar, so dass sich
17 die Anwendung des Verfahrens nur auf die Brennelemente aus Leistungsreaktoren bezieht.

18
19 Transmutation kann zu einer Verringerung, im besten Fall zu einer Eliminierung des Anteils
20 langlebiger Transurane am endzulagernden Radionuklidinventar führen. Sie ist aber keine
21 Entsorgungsoption zum langfristigen Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen, da auch bei
22 optimistischen Annahmen hoch radioaktive bzw. langlebige Abfälle verbleiben, die einer
23 Endlagerung, bedürfen.

24 5.4.2.1 Technologisches Gesamtsystem und technischer Entwicklungsstand

25
26 Die Umsetzung von "Partitionierung und Transmutation" (oder kurz "P&T") beinhaltet im
27 Wesentlichen drei Schritte: Abtrennung (Partitionierung), Brennstofffertigung und
28 Umwandlung (Transmutation).

29
30 Bei der Partitionierung (P) werden die abgebrannten Brennelemente in einer
31 Wiederaufarbeitungsanlage chemisch aufgelöst und die enthaltenen radioaktiven Stoffe in
32 verschiedenen Prozessschritten in mehrere Produktströme separiert. Dabei sind für die
33 Abtrennung der Transurane zwei Verfahren zu unterscheiden. Aus der Wiederaufarbeitung
34 stammt das für die Abtrennung von Uran und Plutonium aus abgebrannten Uranoxid-
35 Brennelementen entwickelte hydrometallurgische PUREX-Verfahren. Um zukünftig auch die
36 sog. Minoren Aktiniden (Neptunium, Americium, Curium) abtrennen zu können, ist eine
37 erhebliche technische Weiterentwicklung erforderlich. Die Machbarkeit einer Abtrennung
38 konnte gezeigt werden. Bisherige Versuche befinden sich aber noch im Labormaßstab. Ob eine
39 großtechnische Umsetzung mit den erforderlichen Wiedergewinnungsfaktoren im Bereich von
40 99,9% gelingt, ist aus heutiger Sicht offen. In einem noch früheren Entwicklungsstadium
41 befindet sich das Konzept der sog. pyrometallurgischen Verfahren, basierend auf
42 elektrochemischen Methoden bei hohen Temperaturen und unter Ausschluss von Sauerstoff.
43
44

¹ vgl. Brenk Systemplan (2015). Gutachten zum Thema „Transmutation“ und Öko-Institut et.al. (2015) Gutachten "Transmutation"

² unter langlebigen Radionukliden werden in dem hier diskutierten Zusammenhang Nuklide mit Halbwertszeiten von mehr als ca. 10.000 Jahren verstanden, kurzlebige Nuklide haben dementsprechend deutlich kürzere Halbwertszeiten

1 Aus den separierten Transuranen werden im nächsten Schritt frische Brennelemente gefertigt.
2 Auch die Entwicklung von Brennstoffen, die neben Plutonium die Minoren Aktinide enthalten,
3 befindet sich noch in einem relativ frühen Entwicklungsstadium – insbesondere für die
4 uranfreien Brennstoffe zum Einsatz in beschleunigergetriebenen Reaktoren (s.u.). Eine
5 Problematik bei Brennelementfertigung, -transport und -handhabung der Transmutations-
6 Brennelemente stellen die hohe Gammastrahlung und die, insbesondere von Curium
7 ausgehende, Neutronenstrahlung dar. Sie erfordern massive Abschirmungen und fernbediente
8 Handtierung und führten bereits zu Überlegungen, auf Abtrennung und Transmutation der
9 Curiumisotope zu verzichten. Für die uranfreien Brennstoffe existieren außerdem noch keine
10 Verfahren zur Abtrennung der Spaltprodukte von der Matrix, so dass über die resultierenden
11 Abfallprodukte hinsichtlich Volumen und Eigenschaften derzeit keine Aussagen möglich sind.
12

13 Die frischen Brennelemente werden letztlich in geeigneten Transmutationsreaktoren eingesetzt
14 und dort bestrahlt, um die Transurane zu spalten. Für die Transmutationsreaktoren und deren
15 Brennstoff werden international zwei Konzepte diskutiert. Zum einen sind dies "Schnelle
16 Reaktoren" mit Mischoxid-Brennstoffen, die eine Weiterentwicklung der Schnellen Brüter
17 darstellen. In Frankreich existiert derzeit ein Konzept für einen Prototypreaktor (sog. ASTRID-
18 Reaktor) als Schneller Brüter mit Optimierung für die Transmutation. Zum anderen werden
19 beschleunigergetriebene Reaktoren mit uranfreien Brennstoffen diskutiert, die durch eine
20 externe Neutronenquelle angefahren und gesteuert werden. Solche Anlagen existieren bisher
21 nur als Konzeptstudien. Ein erster beschleunigergetriebener Versuchsreaktor (MYRRHA) soll
22 mit wesentlicher Förderung durch die Europäische Union in Belgien errichtet werden. Daneben
23 besteht ein Konzept für einen europäischen Prototypen (sog. EFIT-Reaktor).
24

25 Die Transmutations-Brennelemente müssten nach erfolgter Transmutation erneut
26 wiederaufgearbeitet werden, um danach den Zyklus erneut zu durchlaufen. Da in jedem
27 Durchlauf nur ein Teil der Transurane umgewandelt werden kann, ergibt sich daraus eine
28 Vielzahl von erforderlichen Umläufen. Zwischen den verschiedenen Schritten sind zudem
29 Zwischenlager und Transporte verschiedener radioaktiver Stoffe erforderlich. Da der Prozess
30 nicht zu einer vollständigen Transmutation der langlebigen Minoren Aktiniden führt, sind im
31 Ergebnis nach wie vor hoch radioaktive sowie erhebliche Mengen schwach- und
32 mittelradioaktive (Sekundär-)Abfälle zu entsorgen.
33

34 5.4.2.2 Zeitrahmen und Kosten

35

36 Aufgrund des noch sehr frühen Entwicklungsstadiums erscheinen für die Entwicklung aller
37 notwendigen P&T-Technologien bis zur industriellen Reife aus heutiger Sicht zunächst
38 mindestens vier bis fünf Jahrzehnte erforderlich, ggf. auch deutlich mehr.
39

40 Bezogen auf das in Deutschland nach Beendigung der Kernenergienutzung vorhandene
41 Inventar abgebrannter Brennelemente und bei einer angestrebten Reduzierung der darin
42 enthaltenen 140 t Transurane auf 10 % des Ausgangswerts müssten anschließend
43 durchschnittlich zwischen fünf und sieben Transmutations-Reaktoren sowie die erforderliche
44 Infrastruktur zur Wiederaufarbeitung (Partitionierung) kontinuierlich über 150 Jahre in Betrieb
45 sein. Anfänglich könnten aufgrund der großen Menge an Transuranen auch 16 Reaktoren
46 erforderlich werden, nach 100 Jahren noch etwa 3 bis 4 Reaktoren. Gesamt-Betriebszeiten unter
47 100 Jahren lassen sich theoretisch nur mit deutlich mehr Reaktoren bzw. höheren
48 Reaktorleistungen oder unter der optimistischen Annahme eines höheren Transmutationsanteils
49 pro Zyklus erreichen. Unterstellt man geringere Reaktorleistungen können sich auch
50 Betriebszeiten von 200 bis 300 Jahren ergeben.
51

1 Über die Kosten eines P&T-Systems sind derzeit nur sehr grobe Abschätzungen mit großen
2 Bandbreiten möglich. Je nach Konzept wären für Forschung und Entwicklung 25 bis 60
3 Milliarden Euro zu veranschlagen, für die Bereitstellung der erforderlichen Anlagen weitere 40
4 bis 350 Milliarden Euro. Die mit Transmutationsanlagen erzeugbare elektrische Energie kann
5 hierzu lediglich einen Deckungsbeitrag liefern.

6 5.4.2.3 Auswirkungen auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland

8 Die Einflüsse einer umfassenden P&T-Strategie auf die Endlagerung können derzeit höchstens
9 qualitativ benannt werden. So könnten das Volumen, das Radionuklidinventar und die
10 Radiotoxizität der hoch radioaktiven Abfälle reduziert werden. Der Flächenbedarf für ein
11 entsprechendes Endlager könnte sich ebenfalls reduzieren, wobei aber das Endlagerkonzept und
12 die Wärmeleistung der Abfälle zum Zeitpunkt der Einlagerung einen größeren Einfluss auf den
13 Flächenbedarf ausüben als der Anteil der transmutierbaren Radionuklide. Um eine
14 nennenswerte Reduzierung der Wärmeleistung zu erreichen, müssten die durch P&T
15 entstehenden Spaltprodukte nach der Transmutation noch etwa 300 Jahre in einem obertägigen
16 Zwischenlager abklingen.

18 Der erforderliche Isolationszeitraum für die Endlagerung wird sich nicht verringern, da die
19 potenzielle Dosis, die langfristig aus der Endlagerung resultiert, nicht durch die Transurane
20 sondern durch die für P&T nicht zugänglichen langlebigen Spalt- und Aktivierungsprodukte
21 bestimmt wird. Die Transurane gelten unter Endlagerbedingungen als weitgehend immobil. Die
22 insgesamt vorhandene Spaltproduktmasse würde sich hingegen erhöhen, je nach
23 Transmutationskonzept sogar in etwa verdoppeln. Daneben ist wesentlich, dass die Abfälle aus
24 der Wiederaufarbeitung in Form verglasteter Abfallprodukte das langlebige Aktivitätsinventar
25 des Endlagers bestimmen und einer Transmutation aus heutiger Sicht nicht zugänglich sind.
26 Für bestimmte Szenarien des menschlichen Eindringens oder schneller Freisetzungen nach
27 unwahrscheinlichen Entwicklungen kann die durch P&T verringerte Aktivität des
28 endgelagerten Inventars zur Verringerung potentieller Dosisleistungen führen.

30 Die Menge der schwach- und mittlerradioaktiven Abfälle vergrößert sich durch die bei P&T
31 anfallenden Sekundärabfälle (z.B. Betriebs- und Rückbauabfälle) erheblich um
32 schätzungsweise 150.000 – 170.000 m³. Diese Abfälle besitzen jedoch vergleichsweise geringe
33 Halbwertszeiten. Im aktuellen Nationalen Entsorgungsprogramm Deutschlands gibt es hierfür
34 keinen Endlagerpfad.

36 Der Zeitpunkt für den Verschluss eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle würde sich
37 deutlich in die Zukunft verschieben, sei es durch eine spätere Inbetriebnahme oder eine längere
38 Offenhaltung. Verbunden wäre dies mit sicherheitstechnischen Konsequenzen und
39 Auswirkungen für die Sicherung.

41 5.4.2.4 Sicherheit und Proliferationsrisiken

43 Die Entwicklung von Transmutationsreaktoren mit gegenüber heutigen Leistungsreaktoren
44 erhöhter Sicherheit stellt eines der Kernziele der aktuellen internationalen Forschungs- und
45 Entwicklungsarbeiten auf diesem Gebiet dar. Allerdings weisen Transmutationsreaktoren
46 spezifische Störfallrisiken auf, die aus dem speziellen radioaktiven Inventar in den Anlagen,
47 den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Transmutationsbrennstoffe sowie den
48 Eigenschaften der zur Kühlung vorgesehenen Flüssigmetalle resultieren. Ob eine erhöhte
49 Sicherheit der Transmutationsreaktoren gegenüber heutigen Kernkraftwerken daher tatsächlich
50 erreicht werden kann ist aus heutiger Sicht offen.

1 Aufgrund der höheren Wärmeentwicklung, der hohen Dosisleistung und der
2 Kritikalitätssicherheit ergeben sich bei P&T teils deutlich höhere Anforderungen an den
3 Transport und die Zwischenlagerung der radioaktiven Materialien. Im Verhältnis zur
4 eingesetzten Tonne Schwermetall wäre im Vergleich zur heutigen Praxis mit einem Vielfachen
5 an Brennelement-Transporten und Handhabungsschritten zu rechnen, verbunden mit
6 erheblichen Anforderungen an den Strahlenschutz insbesondere des Personals.

7
8 Im Falle der großtechnischen Umsetzung einer P&T-Strategie in Deutschland würde während
9 der Betriebszeit mit einigen Tonnen abgetrennter Transurane jährlich umgegangen werden, von
10 denen insbesondere Plutonium, aber in geringerem Maße auch Neptunium und Americium zum
11 Bau von Kernwaffen missbräuchlich verwendet werden könnten. Bei den Anlagen zur
12 Wiederaufarbeitung und Brennstoffherstellung, bei denen diese Stoffe separiert gehandhabt
13 werden, bestünden über mehrere hundert Jahre (s.o.) kontinuierlich hohe Anforderungen an die
14 Spaltmaterialkontrollen, aber auch an die Anlagensicherung. Aus diesem Grunde geht die
15 Entwicklung in Richtung einer gemeinsamen Abtrennung der Minoren Aktiniden. Nach
16 erfolgter Transmutation wäre das Risiko einer Proliferation entsprechend reduziert bzw.
17 ausgeschlossen.

18
19 Dem gegenüber steht das Szenario einer Wiedergewinnung kernwaffenfähiger Stoffe aus einem
20 Endlager. Dies erfordert die Rückholung oder Bergung der Abfälle und die daran anschließende
21 Abtrennung der gewünschten Spaltstoffe. Diese Maßnahmen sind mit erheblichem Aufwand
22 verbunden, dürften für subnationale Akteure undurchführbar sein und würden durch
23 Maßnahmen der Spaltmaterialüberwachung detektiert werden.

24
25 Die Risiken aus der Umsetzung einer P&T-Strategie in einem Zeitraum von ca. 150 – 300
26 Jahren sind gegenüber einer möglichen Reduzierung potenzieller Risiken in der
27 Langzeitsicherheit eines geologischen Endlagers abzuwägen.

28 5.4.2.5 Gesellschaftliche und soziale Randbedingungen für die praktische Umsetzung

29
30 Die Nutzung einer P&T Strategie erfordert für die kommenden Jahrhunderte stabile staatliche
31 Verhältnisse inklusive einer entsprechenden Infrastruktur für Wissenserhalt, Ausbildung,
32 Betrieb, Forschung und Entwicklung. Damit würde eine P&T-Strategie die Verantwortung für
33 Behandlung und Endlagerung der hoch radioaktiven Abfälle weitgehend auf die zukünftigen
34 Generationen verlagern.

35
36 Eine Entscheidung für die Umsetzung von P&T setzt eine entsprechende Akzeptanz der
37 Bevölkerung voraus, die aufgrund der erforderlichen Zeitdauern für die technische
38 Verwirklichung auch von zukünftigen Generationen getragen werden müsste. Der heutige
39 gesellschaftliche Konsens zum Verzicht auf
40

41 *[die Kernenergienutzung]*

42 *[den Betrieb großmaßstäblicher kerntechnischer Anlagen]*

43 *[den Betrieb von Kernkraftwerken und anderen großmaßstäblichen kerntechnischen Anlagen]*

44
45 in Deutschland müsste aufgehoben werden. Die rechtlichen Rahmenbedingungen im
46 Atomgesetz müssten angepasst und untergeordnete Regelwerke geschaffen werden, um die mit
47 einer P&T-Strategie verbundene großtechnische Plutoniumnutzung in dem oben beschriebenen
48 technologischen Ausmaß zu ermöglichen. Des Weiteren wäre eine Verständigung bezüglich
49 der Finanzierung erforderlich, sowohl im Hinblick auf eine zügige Entwicklung als auch auf
50 eine spätere Umsetzung der Technologien. Selbst eine wie auch immer geartete Beteiligung
51

Kommentiert [MS1]: Zur „richtigen“ Formulierung konnte in der AG 3 kein Konsens gefunden werden.

1 europäischer Partnerländer wäre mit erheblichen politischen, gesellschaftlichen und
2 regulatorischen Anpassungen verbunden. Im europäischen Raum werden bisher nur in
3 Frankreich und durch die EURATOM konkrete Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten
4 verfolgt.

5
6 *[Transmutation auf der Grundlage beschleunigergetriebener Anlagen stellt keine unter
7 Endlagergesichtspunkten verfolgbare Strategie dar. Die Alternative über Generation IV –
8 Anlagen zur Verbrennung der langlebigen Minoren Aktiniden sind wegen des Exportverbots
9 von Brennelementen zur Wiederaufarbeitung gegenwärtig nicht zugänglich.]*

10
11 ~~*[Transmutation auf der Grundlage beschleunigergetriebener Anlagen stellt keine unter
12 Endlagergesichtspunkten verfolgbare Strategie dar. Die Alternative über Generation IV –
13 Anlagen zur Verbrennung der langlebigen Minoren Aktiniden sind wegen des Exportverbots
14 von Brennelementen zur Wiederaufarbeitung gegenwärtig nicht zugänglich.]*~~

Kommentiert [MS2]: Alternativvorschlag: Streichung des Absatzes

15 5.4.2.6 Fazit

16
17 Die Kommission ist unter Würdigung der oben beschriebenen Aspekte der Auffassung, dass
18 sich aus der von der Kommission bearbeiteten Endlagerthematik

19
20 *[unter Zugrundelegung des Verbots des Exports der Brennelemente zur Wiederaufarbeitung]*
21 ~~*[unter Zugrundelegung des Verbots des Exports der Brennelemente zur Wiederaufarbeitung]*~~

Kommentiert [Sal3]: Alternativvorschlag: Streichung des Absatzes

22
23 keine Argumente für eine Entwicklung einer Transmutationstechnologie ableiten lassen. Die
24 Kommission sieht in dieser Technologie unter den in Deutschland geltenden Randbedingungen
25 keine Vorteile für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Daher wird aus heutiger Sicht eine
26 aktive Verfolgung einer P&T-Strategie nicht empfohlen.

27
28 *Letzter Absatz, Erstfassung:*

29
30 *[Partitionierung und Transmutation mag nichts desto trotz als Forschungsthema auch
31 weiterhin von Relevanz sein, insbesondere wenn es gilt, über den in wenigen Jahren vollzogen
32 Ausstieg Deutschlands aus der Kernenergienutzung hinaus kerntechnische Kompetenz zu
33 erhalten und die Fähigkeit zur Teilnahme an und zur Beurteilung von internationalen
34 Entwicklungen zu wahren. Vor diesem Hintergrund mag es angebracht sein, die weitere
35 Entwicklung auf diesem Gebiet zu beobachten und den Erhalt der hierfür erforderlichen
36 Kompetenzen angemessen zu fördern. Die hiermit verbundenen übergeordneten Beweggründe
37 sind aber nicht in relevantem Umfang mit der Endlagerfrage verknüpft und liegen insofern
38 außerhalb des Beratungsauftrags der Kommission.]*

39
40 *Letzter Absatz, Modifikation nach der Sitzung am 22.02.2016:*

41
42 *[Es wird hiervon unabhängig erforderlich sein, über den in wenigen Jahren vollzogenen
43 Ausstieg Deutschlands aus der Kernenergienutzung hinaus kerntechnische Kompetenz zu
44 erhalten und die Fähigkeit zur Teilnahme an und zur Beurteilung von internationalen
45 Entwicklungen zu wahren. Die Beobachtung der weiteren Entwicklung von P&T als
46 Forschungsthema im internationalen Kontext kann ein Mittel hierzu sein. Die hiermit
47 verbundenen übergeordneten Beweggründe sind aber nicht in relevantem Umfang mit der
48 Endlagerfrage verknüpft und liegen insofern außerhalb des Beratungsauftrags der
49 Kommission.]*

50
51

1
2 *Letzter Absatz, Alternative: Streichung*
3 ~~*[Partitionierung und Transmutation mag nichts desto trotz als Forschungsthema auch*~~
4 ~~*weiterhin von Relevanz sein, insbesondere wenn es gilt, über den in wenigen Jahren vollzogen*~~
5 ~~*Ausstieg Deutschlands aus der Kernenergienutzung hinaus kerntechnische Kompetenz zu*~~
6 ~~*erhalten und die Fähigkeit zur Teilnahme an und zur Beurteilung von internationalen*~~
7 ~~*Entwicklungen zu wahren. Vor diesem Hintergrund mag es angebracht sein, die weitere*~~
8 ~~*Entwicklung auf diesem Gebiet zu beobachten und den Erhalt der hierfür erforderlichen*~~
9 ~~*Kompetenzen angemessen zu fördern. Die hiermit verbundenen übergeordneten Beweggründe*~~
10 ~~*sind aber nicht in relevantem Umfang mit der Endlagerfrage verknüpft und liegen insofern*~~
11 ~~*außerhalb des Beratungsauftrags der Kommission.]*~~
12

13 *Verwendete Literatur*

14 Brenk Systemplanung (2015). Gutachten zum Thema „Transmutation“ im Auftrag der
15 Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-MAT 45

16 Öko-Institut e.V., UHH-ZNF (2015). Gutachten "Transmutation" im Auftrag der Kommission
17 Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-MAT 48

18
19
20