

**Umzugsstudie über  
eine beschleunigergetriebene  
Neutronenquelle am Standort  
eines ehemaligen Kernkraftwerks**  
zwecks Produktion von  
Krebsmedikamenten, Fernwärme und  
geothermischer Energie sowie zur  
Entsorgung hochradioaktiver Abfälle

FEBRUAR 2025

## **Umsetzungsstudie über eine beschleunigergetriebene Neutronenquelle am Standort eines ehemaligen Kernkraftwerks**

zwecks Produktion von Krebsmedikamenten,  
Fernwärme und geothermischer Energie sowie zur Entsorgung  
hochradioaktiver Abfälle

### **Auftraggeber**

Bundesagentur für Sprunginnovationen SPRIND GmbH

### **Konzept & Koordination**

Dr. Guido Houben

### **Autoren**

Kapitel 2

Dr. Sevda Esen, Dr. Judit Groska, Dr. Franz Strohmer

Kapitel 3

Martin Andernacht, Dr. Klaus-Christian Fischer, Dr. Kai-Martin Haendel,  
Dr. Frank Meissner, Dr. Thomas Riekert

Kapitel 4

Niklas Hannappel, Prof. Dr. Herbert Posser, Katja Schramm

Kapitel 5

Dr. Maximilian Blaschke, Prof. Dr. Gunther Friedl, Linus Simons,  
Alexej Zolotukhin

### **Lektorat**

TechniText Translations GbR

### **Gestaltung**

Justine Gaxotte, Lydia Bertholet

# Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

**MARKTREIFE** und Inbetriebnahme einer Gesamtanlage bestehend aus beschleunigergetriebener Neutronenquelle sowie Recycling- und Verglasungseinheiten sind technisch bis etwa 2035 möglich.

**WIRTSCHAFTLICHKEIT** Bereits die erste Demonstrationsanlage (Investitionskosten bei sofortiger Errichtung von ca. 1,5 Mrd. EUR; jährliche Betriebskosten von gut 115 Mio. EUR) wäre mit den erwirtschafteten Erlösen aus medizinischen Radioisotopen, Rohstoffen für industrielle Zwecke, der Entsorgung atomarer Abfälle und Prozesswärme rentabel (Baukostenreduktion um ca. 30 % bei Nachnutzung ehemaliger AKW-Standorte). Der Nettobarwert beläuft sich je nach Szenario zwischen 1 und 7 Milliarden Euro. Da die Recyclingeinheit der Anlage bis zu vier Neutronenquellen versorgen kann, wären bei weiteren Einrichtungen signifikante Einsparungen zu erwarten.

**SICHERHEITSKONFORMITÄT** Das Anlagendesign entspricht generell den deutschen sowie internationalen Sicherheitsanforderungen und Regelwerken. Es erreicht grundsätzlich durch die unterkritische Auslegung und Bleiabschirmung einen sehr hohen Sicherheitsstandard und verhindert die Weiterverbreitung von hochradioaktivem Material, bedarf aber noch einer detaillierteren Ausarbeitung.

**RECHTSRAHMEN** Die Anlage fügt sich trotz ihrer Neuartigkeit in die Systematik des bestehenden Rechtsrahmens ein. Insbesondere die für sie wesentliche Beschleunigereinheit könnte ohne Änderungen der Rechtslage errichtet werden. Die Verarbeitung hochradioaktiver Abfälle setzt jedoch Gesetzesänderungen voraus.

**ROHSTOFFE UND GESELLSCHAFTLICHER NUTZEN** Der volkswirtschaftliche Wert der Anlage liegt neben der Unabhängigkeit, die sich aus den gewonnenen Rohstoffen (Cäsium, Krypton, Rhodium, Ruthenium, Strontium, Uran) ergibt, in der internationalen Reputation für den Forschungsstandort, der Entwicklung neuer Krebsmedikamente, der Attraktivität für die betroffenen Regionen (Arbeitsplätze, Zulieferer) und den CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch emissionsarme Energie (direkt: Prozesswärme und Geothermie, indirekt: Kreislaufwirtschaft statt Bergbau).

**GEOTHERMISCHE ENERGIE** Eine deterministische statt probabilistischer Sicherheitsanalyse des Endlagers sowie die Volumenreduktion der langlebigen Abfälle um knapp 90 % ermöglichen weitere Kosteneinsparungen bei der Zwischen- und Endlagerung sowie die oberflächennahe geothermische Nutzung der Endlagerbehälter z. B. für Wärmepumpen.

**ZEITRAHMEN UND GENERATIONENGERECHTIGKEIT** Die nicht wiederverwertbaren hochradioaktiven Abfälle des untersuchten AKW lassen sich absehbar innerhalb der Mindestbetriebsdauer der Anlage von 50 Jahren transmutieren. Nachfolgende Generationen werden durch die Reduktion der Radioaktivität der Abfälle von 1 Million auf unter 1 Tausend Jahre geschützt: Alle Aktinide und die für das geologische Endlager problematischen, wasserlöslichen Spaltprodukte wie Selen-79, Jod-129 und Technetium-99 werden zu über 99 % in einem sicheren, umweltschonenden und proliferationsresistenten Verfahren transmutiert. Eine Lösung für das Problem des „letzten Kerns“ wird vorgeschlagen (s. S. 85).

**FAZIT** Der Verzicht auf die Durchführung des geschilderten Programms in Deutschland auf der Basis von elektrochemischer Partitionierung und subkritischer Transmutation würde zahlreiche Nachteile und Risiken in Kauf nehmen und weiterhin eine erhebliche Verschiebung von Lasten zuungunsten zukünftiger Generationen darstellen.

# Executive Summary

This study funded by Germany's Federal Agency for Disruptive Innovations evaluates the technical readiness, legal framework as well as economical and societal costs & benefits of an accelerator-driven neutron source as well as of associated pyro-processing and vitrification units built on the site of a former nuclear power plant in Germany.

**SAFETY COMPLIANCE** Transmutex' plant design generally complies with German and international safety requirements and regulations. Due to its subcriticality and liquid lead shielding, it achieves a superior safety standard and is proliferation resistant, but a more detailed elaboration is needed (conceptual and engineering design).

**LEGAL FRAMEWORK** Despite its novelty, the facility fits into Germany's existing legal framework. In particular, the accelerator could be constructed right away. However, the reprocessing of spent fuel is currently prohibited as is converting the process heat into electricity.

**ECONOMIC VIABILITY** already the FOAK (over-night CAPEX of approx. EUR 1.5 billion; OPEX of EUR 115 million p.a.) would be profitable solely relying on revenues generated from medical radioisotopes, raw materials, fees for the disposal of nuclear waste and from process heat. Using an existing site reduces CAPEX by ca. 30 % and, depending on the scenario, results in an NPV of EUR 1 to 7 billion. As the pyro-processing unit can serve up to four ADS, significant cost reductions in addition to NOAK savings can be expected constructing further plants.

**SCALABILITY** and delivery of the 1<sup>st</sup> kWh from a complete net 220 MWe plant could be achieved by 2035 from a technical point of view.

**STRATEGIC INDEPENDENCE AND SOCIO-ECONOMIC BENEFITS** the raw materials extracted (Cesium, Krypton, Ruthenium, Strontium, Uranium) provide strategic and energy independence. Further benefits are the development of new cancer medication, the attractiveness for the regions affected (jobs, suppliers) and the CO<sub>2</sub> savings through low-emission energy (directly from process heat and geothermal energy, indirectly from recycling instead of mining).

**GEOTHERMAL ENERGY** A deterministic instead of probabilistic safety analysis of the repository and the reduction in volume of long-lived nuclear waste by almost 90 % enable further cost savings in interim and final storage as well as the near-surface geothermal use of the disposal containers.

**TIME FRAME AND INTERGENERATIONAL FAIRNESS** The non-recyclable high-level radioactive waste from the examined NPP can be transmuted within the plant's minimum operating lifetime of 50 years. This requires the reprocessing technology, demonstrated at Argonne National Laboratory and designed to be proliferation resistant to be legalized. Subsequent generations will be protected by reducing the radioactivity of the waste from 1 million to less than 1 thousand years: all minor actinides and the water-soluble fission products such as Selenium-79, Iodine-129 and Technetium-99, which are problematic for the geological repository, are transmuted to over 99 % in a safe, environmentally friendly and proliferation-resistant process. A solution to the problem of the "last core" is proposed.

In conclusion, the implementation of the described partitioning and transmutation program for existing long-lived nuclear waste would prevent numerous disadvantages and risks for future generations in comparison to current plans of unconditioned deep geological disposal.

# Inhaltsverzeichnis

|                  |                                                                                                   |            |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Kapitel 1</b> | <b>Einführung und Anlagenüberblick</b>                                                            | <b>7</b>   |
| 1                | Einführung                                                                                        | 8          |
| 2                | Anlagenüberblick                                                                                  | 10         |
| <b>Kapitel 2</b> | <b>Auswirkungen auf das geologische Endlager</b>                                                  | <b>16</b>  |
| 1                | Einleitung                                                                                        | 17         |
| 2                | Methodik                                                                                          | 18         |
| 3                | Zeitraahmen                                                                                       | 19         |
| 4                | Der Recycling-Ansatz von Transmutex                                                               | 20         |
| 4.1.             | Die einzelnen Schritte des Transmutex-Prozesses                                                   | 21         |
| 4.2.             | Anlieferung und Lagerung                                                                          | 21         |
| 4.3.             | Hüllrohrentfernung und Voloxidation                                                               | 22         |
| 4.4.             | Elektrolytische Reduktion                                                                         | 27         |
| 4.5.             | Elektroaffination                                                                                 | 30         |
| 4.6.             | Elektrolytische Gewinnung von Transuranen                                                         | 36         |
| 4.7.             | Anpassung der Anreicherungsstufe                                                                  | 39         |
| 4.8.             | Entfernung restlicher Aktinide (RAR)                                                              | 39         |
| 4.9.             | Entfernung von Lanthaniden                                                                        | 41         |
| 4.10.            | Lithiumchlorid Salzbehandlung                                                                     | 41         |
| 4.11.            | Eutektische Salzbehandlung                                                                        | 42         |
| 4.12.            | Abgasanlage                                                                                       | 43         |
| 4.13.            | Verglasung der verbleibenden hochaktiven Abfälle                                                  | 43         |
| 4.14.            | Entstehender mittelaktiver Abfall (MAW)                                                           | 46         |
| 5                | Berechnungsmethoden                                                                               | 48         |
| 5.1.             | Der Kern und die Abbrandberechnungen                                                              | 48         |
| 5.2.             | Radioaktive Zerfallsberechnungen mittels Bateman-Code                                             | 50         |
| 5.3.             | Anforderungen an die Datengenauigkeit                                                             | 53         |
| 6                | Berechnungsergebnisse                                                                             | 55         |
| 6.1.             | Direkte Entsorgungsoption im Jahr 2100                                                            | 55         |
| 6.2.             | Berechnung des Recycling-Ansatzes von Transmutex                                                  | 57         |
| 6.3.             | Transmutation bereits verglaster Abfälle                                                          | 59         |
| 6.4.             | Beschreibung der Outputströme                                                                     | 61         |
| 7                | Vergleich der erforderlichen Endlagerbehälter                                                     | 83         |
| 7.1.             | Speichervolumen und Reduktionsfaktor                                                              | 83         |
| 7.2.             | Verkürzung der Abklingzeit                                                                        | 84         |
| 8                | Zusammenfassung und Schlussfolgerung                                                              | 85         |
| 9                | Anhang                                                                                            | 86         |
| <b>Kapitel 3</b> | <b>Technische Machbarkeit und Sicherheitsanalyse</b>                                              | <b>103</b> |
| 1                | Einleitung                                                                                        | 104        |
| 2                | Überprüfung des Sicherheitskonzepts der START-Anlage                                              | 105        |
| 2.1.             | Übergeordnete Darstellung des geplanten Sicherheitskonzepts der START-Anlage                      | 105        |
| 2.2.             | Darstellung der deutschen Sicherheitsphilosophie und des deutschen Sicherheitskonzepts            | 108        |
| 2.3.             | Abgleich der grundlegenden Vorgehensweise im Statusbericht mit dem deutschen Regelwerk            | 116        |
| 3                | Exemplarische Bewertung der Sicherheitskonzepte einzelner Einrichtungen sowie der Ereignisanalyse | 118        |
| 3.1.             | Wärmeabfuhr                                                                                       | 118        |
| 3.2.             | Reaktivitätskontrolle / Unterkritikalität                                                         | 124        |
| 3.3.             | Ereignisanalyse                                                                                   | 128        |
| 4                | Standort                                                                                          | 132        |
| 5                | Fazit und erste Einschätzung zur Machbarkeit                                                      | 132        |

# Inhaltsverzeichnis

|                  |                                                                                |            |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Kapitel 4</b> | <b>Genehmigungsrechtliche Rahmenbedingungen</b>                                | <b>134</b> |
| 1                | Einleitung und Fragestellung                                                   | 135        |
| 2                | Analyse der genehmigungsrechtlichen Rahmenbedingungen                          | 135        |
| 2.1.             | Aussagen des Grundgesetzes zur Nutzung der Technologie                         | 135        |
| 2.2.             | Genehmigung des Vorhabens als kerntechnische Anlage nach § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG | 137        |
| 2.3.             | Notwendigkeit weiterer atom- oder strahlenschutzrechtlicher Genehmigungen?     | 154        |
| 2.4.             | Sonstige fachrechtliche Genehmigungserfordernisse                              | 156        |
| 2.5.             | Relevanz der Entsorgungsarchitektur für radioaktive Abfälle in Deutschland     | 157        |
| 2.6.             | Ergänzende Vorgaben des Völker- und Unionsrechts                               | 161        |
| 3                | Voraussetzungen der Nachnutzung von Einrichtungen früherer KKW                 | 162        |
| 3.1.             | Bedeutung der Übernahme für die Genehmigungsfähigkeit des START-Moduls         | 162        |
| 3.2.             | Möglichkeit der Übergabe von Einrichtungen und Anlagenteilen durch Betreiber   | 163        |
| 3.3.             | Ergebnis                                                                       | 166        |
| 4                | Finanzierung des Vorhabens durch den KENFO                                     | 167        |
| 4.1.             | Indirekte Finanzierung durch Erstattung von Entsorgungskosten                  | 167        |
| 4.2.             | Direkte Finanzierung durch KENFO                                               | 170        |
| 5                | Ergebnisse                                                                     | 171        |
| 5.1.             | Änderung gesetzlicher Ausschlussstatbestände                                   | 171        |
| 5.2.             | Weiterer rechtlicher Anpassungsbedarf                                          | 172        |
| <b>Kapitel 5</b> | <b>Betriebswirtschaftliche Analyse</b>                                         | <b>173</b> |
| 1                | Einleitung                                                                     | 174        |
| 2                | Einnahmen und Kosten                                                           | 174        |
| 2.1.             | Einnahmequellen                                                                | 174        |
| 2.2.             | Kosten                                                                         | 176        |
| 3                | Methodik                                                                       | 179        |
| 3.1.             | Untersuchungsaufbau                                                            | 179        |
| 3.2.             | Annahmen und Szenarien                                                         | 179        |
| 4                | Ergebnis                                                                       | 184        |
| 4.1.             | Positives Szenario                                                             | 185        |
| 4.2.             | Negatives Szenario                                                             | 187        |
| 5                | Diskussion                                                                     | 189        |
| 5.1.             | Business-Case und Vergütung der Transmutation                                  | 189        |
| 5.2.             | Limitationen und Ausblick                                                      | 190        |
| 6                | Fazit                                                                          | 192        |
| 7                | Anhang                                                                         | 193        |
| 7.1.             | Umsätze und Anlagenkapazitäten                                                 | 193        |
| 7.2.             | Cost of Goods Sold (COGS)                                                      | 194        |
| 7.3.             | Capex                                                                          | 196        |
| 7.4.             | Opex                                                                           | 200        |
| 7.5.             | Profit and Loss Statement (positiv)                                            | 202        |
| 7.6.             | Profit and Loss Statement (negativ)                                            | 204        |
| 7.7.             | Free Cash Flow Rechnung (positiv)                                              | 207        |
| 7.8.             | Free Cash Flow Rechnung (negativ)                                              | 208        |
|                  | <b>Endnoten</b>                                                                | <b>209</b> |

# 1 Einführung und Anlagenüberblick

|                    |    |
|--------------------|----|
| 1 Einführung       | 8  |
| 2 Anlagenüberblick | 10 |

# 1 Einführung

---

Diese von der Bundesagentur für Sprunginnovationen in Auftrag gegebene und von ihr finanzierte Studie befasst sich mit den Bedingungen und Auswirkungen einer beschleunigergetriebenen Neutronenquelle am Standort eines ehemaligen Siemens/KWU Druckwasserreaktors in Bayern. Dabei werden der technische Stand, Sicherheitsaspekte, der genehmigungsrechtliche Rahmen, Wirtschaftlichkeit sowie die Folgen für das geplante Endlager zur Entsorgung hochradioaktiver kerntechnischer Abfälle untersucht.

Teilchenbeschleuniger werden seit Langem zur Herstellung von Radioisotopen für medizinische und industrielle Zwecke verwendet. Eine Neutronenquelle kombiniert aus Hochleistungsbeschleuniger und Spallationsziel ermöglicht die Entwicklung neuartiger Krebsmedikamente, sogenannter Theranostika, und hat darüber hinaus Potenzial für die Produktion von Fusionsbrennstoffen sowie für die Entsorgung von hochradioaktiven Abfällen, d. h. Brennelementen aus ehemaligen Kernkraftwerken.

Es bietet sich aus genehmigungsrechtlichen, finanziellen, psychologischen und Sicherheitsgründen an, die beschleunigergetriebene Neutronenquelle nicht auf der „grünen Wiese“ zu bauen, sondern auf dem Gelände eines ehemaligen Atomkraftwerks. Eine Vielzahl bereits genehmigter Anlagenteile und Gebäude kann so sinnvoll nachgenutzt anstatt neu gebaut werden. Die Baukosten reduzieren sich dadurch um bis zu 30 %. Die dort dezentral zwischengelagerten bestrahlten Brennelemente (umgangssprachlich Atommüll genannt) müssen das Gelände zudem nicht zum Transport verlassen, um in der Anlage behandelt zu werden. Hinzu kommt, dass dort weiterhin durch den aktuell stattfindenden Rückbau mehrere Hundert qualifizierte Mitarbeiter zur Verfügung stehen und so einen vergleichbaren Arbeitsplatz erhalten. Die Bevölkerung in der Umgebung wiederum, die Jahrzehnte neben den bestrahlten Brennelementen mit dem Versprechen eines vorübergehenden Zwischenlagers gelebt hat, wäre für dessen sichere Entsorgung vermutlich dankbar.

Bayern verfügt zweifellos über das beste nuklearmedizinische und kerntechnische Ökosystem der Bundesrepublik Deutschland mit einer Vielzahl an Universitäten, Forschungszentren, Start-ups, spezialisierten mittelständischen Unternehmen und global agierenden Konzernen sowie einer 2023 vom Freistaat veröffentlichten Nuklearstrategie, die Transmutation explizit erwähnt und in die die Neutronenquelle zum Nutzen aller eingebettet werden kann. Aus diesen Gründen wurde für die Umgestaltungsstudie ein bayrischer Standort eines ehemaligen AKW zugrunde gelegt. Dieser 1400 MWe Druckwasserreakortyp ist baugleich mit Anlagen in anderen Bundesländern, sodass die Ergebnisse leichter übertragbar und replizierbar sind.

Nachdem sich die Endlagersuche für hochaktive Abfälle und bestrahlte Brennelemente in Deutschland um Jahrzehnte verzögert, deren Einlagerung sogar bis ins 21. Jahrhundert, bleibt nun ausreichend Zeit, ergänzende Maßnahmen zu ergreifen. Dazu zählt die subkritische Transmutation mittels beschleunigergetriebener Neutronenquelle, die den besonderen deutschen Sicherheitsbedürfnissen entspricht. Denn entweder hält man die jetzige, für die hochaktiven Abfälle geplante Endlagerform für wenig problematisch, dann lässt sich die Idee einer für eine Million Jahre sicheren Endlagerung ohne Transmutation vertreten. Oder aber man möchte auf jeden Fall die Kontamination des Tiefenwassers durch langlebige Spaltprodukte wie Selen-79, Jod-129 und Technetium-99 sicher ausschließen und die sichere Verwahrung der restlichen Nuklide bis zum Abklingen der Radioaktivität auf ein natürliches Maß innerhalb von 1000 Jahren garantieren. Dann bleibt nach heutigem Stand der Technik nur die elektrochemische Partitionierung und beschleunigergetriebene Transmutation der hochradioaktiven Abfälle. Die dazu notwendige Anlage wird weiter unten in ihrem Aufbau erläutert. Dabei handelt es sich um eine Zusammenfassung des etwa 450 Seiten umfassenden Statusberichts der Transmutex AG vom Juni 2024.

In Kapitel 2 wird von Dr. Franz Strohmer (Transmutex) und seinem Team sodann dargelegt, wie die in einem Zwischenlager des untersuchten Atomkraftwerks befindlichen abgebrannten Brennelemente mit dem Verfahren des Unternehmens transmutiert werden könnten. Bedingung für die Transmutation von Atommüll ist, dass die (auch bereits verglasten) Brennelemente aus dem Zwischenlager zuvor in ihre Bestandteile zerlegt bzw. aufgelöst und diese sortiert werden. 80 % des Volumens wird so durch Partitionierung und, wo nötig, Transmutation von hochradioaktiven in nicht-, schwach- oder mittlradioaktive Stoffe umgewandelt. Das elektrochemische Verfahren der Transmutex AG gewährleistet zwar bereits, dass dies proliferationssicher und umweltschonend geschieht. Durch den Bau der Partitionierungsanlage direkt am Brennelemente-Zwischenlager eines früheren AKW kann darüber hinaus ausgeschlossen werden, dass die Risiken hinsichtlich Proliferation, terroristischer Angriffe oder Flugzeugabstürze das gegenwärtige Niveau überschreiten.

Wir stehen heute vor der Wahl, ob wir als Gesellschaft unserer Verantwortung gerecht werden und die bestehenden hochaktiven Abfälle aus gut 50 Jahren ziviler Nutzung der Kernenergie nachhaltig und unter Nutzung der enthaltenen Wertstoffe zu entsorgen, oder nachfolgenden Generationen für Millionen von Jahren diese Problematik in nur probabilistisch sicher ausgelegten Endlagern hinterlassen wollen. Für den nicht zu transmutierenden Rest des Nuklidinventars („Restmüll“) sollte nach wie vor ein Tiefenlager gebaut werden, allerdings kann dieses für den nötigen Zeitraum von 1.000 Jahren deterministisch und daher nachweisbar sicher und wahrscheinlich oberflächennah ausgelegt werden. Da heutzutage bereits Behälter hergestellt werden können, die mit 10.000 Jahren Beständigkeit etwa zehn Mal so lange sicher sind, wie die verbleibenden Abfälle mit hoher Aktivität strahlen, bestünde im Fall einer oberflächennahen Lagerung sogar die Möglichkeit, die Restwärme von etwa 200 °C geothermisch z. B. für Wärmepumpen zu nutzen.

Für die Kombination eines hochleistungsfähigen Teilchenbeschleunigers mit einem Spallationsziel zur Neutronenquelle wurden in Kapitel 3 das Design und die Steuerungssoftware der Transmutex AG evaluiert, da die Anlagen dieses Unternehmens am weitesten fortgeschritten sind und daher voraussichtlich als erstes Marktreife erreichen werden. Der Evaluierung durch den internationalen Kernanlagendienstleister TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG unter der Leitung von Dr. Frank Meissner liegt der vollständige Statusbericht von Transmutex zugrunde, der zum Schutz von Betriebsgeheimnissen hier allerdings nur in Auszügen wiedergegeben werden kann.

Auch aus genehmigungsrechtlicher Sicht wäre es vorteilhaft, die Anlagen im Anschluss an die für ihre Genehmigung erforderlichen Gesetzesänderungen an Standorten ehemaliger Kernkraftwerke zu bauen, zumal diese in Deutschland in der Regel direkt an die Zwischenlager der abgebrannten Brennstäbe angrenzen. Dies wird in Kapitel 4 von Prof. Dr. Herbert Posser und seinen Anwaltskollegen Katja Schramm, LL.M. und Niklas Hannappel der Kanzlei für Öffentliches Wirtschaftsrecht Posser Spieth Wolfers & Partners dargelegt.

Es stellt sich abschließend die Frage, wie wirtschaftlich die Partitionierungs- und Transmutationsanlage wäre. Prof. Dr. Gunther Friedl und sein Team von der TUM School of Management (Dr. Maximilian Blaschke, Alexej Zolotukhin, Linus Simons) untersuchen dazu in Kapitel 5 die nötigen Investitions- und Betriebskosten sowie die zu erwartenden Einnahmen. Letztere ergeben sich zum einen aus Dienstleistungen für Dritte wie z. B. die Herstellung von Radioisotopen für Industrie und Medizin, der Transmutation von Spaltprodukten und Transuranen für den Staat sowie der Gewinnung wertvoller Metalle, Gase und Radioisotope im Zuge der Mülltrennung. Zum anderen wird bei dem Betrieb der Neutronenquelle viel Prozesswärme frei, die entweder in die Umwelt abgegeben oder aber wirtschaftlich genutzt werden kann, sei es in Form einer Fernwärmeversorgung der umgebenden Städte und Gemeinden oder aber zur Herstellung von Wasserstoff oder Strom.

Aus volkswirtschaftlicher Sicht stellt ein sicheres Endlager natürlich ein hohes gesellschaftliches Gut dar, vor allem für zukünftige Generationen. Zu den leichter quantifizierbaren makroökonomischen Auswirkungen (die jedoch nicht Teil dieser Studie sind) gehören zudem die Auswirkungen einer Neutronenquelle auf die Forschungslandschaft und deren internationale Reputation (Materialforschung, Medizin etc.). Darüber hinaus gehören auch die Aufträge für Baufirmen und Zulieferer sowie die ca. 300 neu entstehenden Vollzeit Arbeitsplätze. Da bislang kein Ort für ein Endlager gefunden wurde, geschweige denn eine realistische Kostenrechnung für das Endlager erstellt werden konnte, konnten in dieser Studie auch nur cursorisch die signifikanten Einsparungen benannt werden, die sich durch Transmutationsanlagen ergeben (z. B. für Behälter sowie eine deterministische Sicherheitsanalyse im Vergleich zu einer probabilistischen). Auch der volkswirtschaftliche Nutzen aus geothermischer Energie z. B. für den Einsatz von Wärmepumpen aus den noch mehrere Jahrzehnte ca. 200 °C heißen Behältern, die dank Transmutation zugänglicher gelagert werden können, lässt sich daher nur schätzen.

## 2 Anlagenüberblick

Die START-Anlage besteht erstens aus einer Neutronenquelle, die einen Teilchenbeschleuniger mit einem Transmutationsreaktor unter Verwendung eines Spallationsziels koppelt. Die Hauptaufgabe der Neutronenquelle besteht darin, den problematischen hochradioaktiven Atom Müll aus dem Uranbrennstoffkreislauf umzuwandeln.

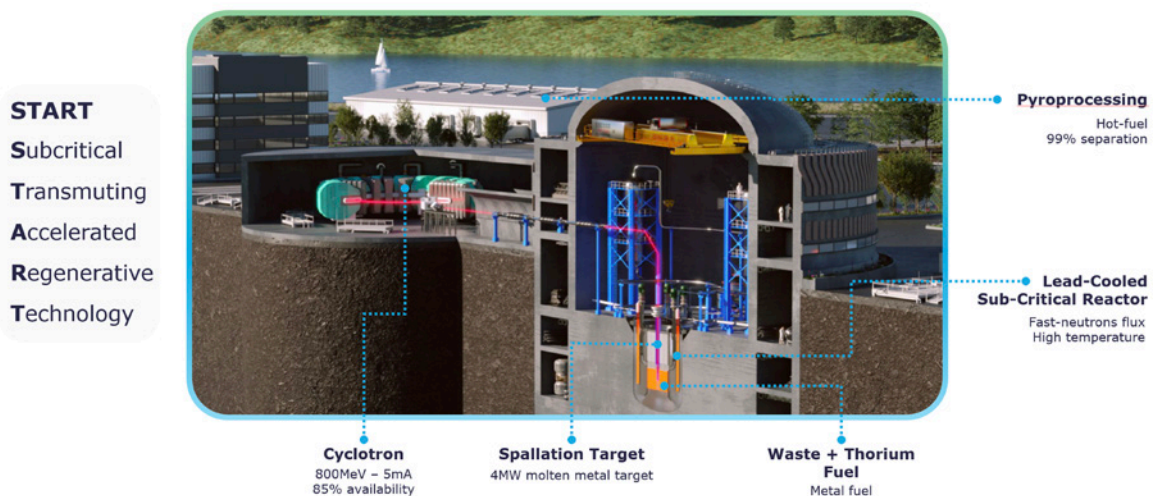


ABBILDUNG 1

Zeichnung des START-Systems.

Zweitens ist eine Abfallrecyclinganlage notwendiger Teil der START-Anlage. Sie besteht aus Abtrennungs- und Fertigungseinheiten sowie Brennstoff- und Abfalllagereinheiten und einer Verglasungsanlage. In dieser Anlage werden abgebrannte Brennelemente zu neuen Thoriumtransuranischen (Th-TRU) Brennelementen für das START-System aufbereitet und in START umgewandelte Spaltfragmente für die endgültige geologische Lagerung verglast. Die Kapazität der Recyclinginfrastruktur reicht für bis zu vier Neutronenquellen. [ABBILDUNG 2](#) veranschaulicht die Nomenklatur aus Neutronenquelle („Spallation-Enhanced Transmuter“ in der Mitte) und der Recyclinganlage (rechts).

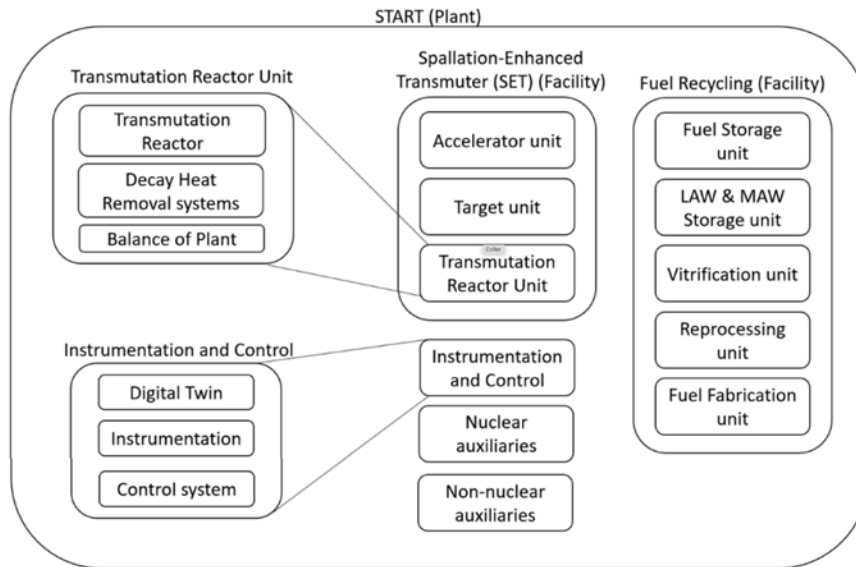


ABBILDUNG 2 Nomenklatur der START Anlage.

Das vorgeschlagene System ist eine unterkritische Vorrichtung, bei der die Kernspaltungsreaktion nicht wie bei einem kritischen Kernreaktor selbsterhaltend ist. Die Spaltneutronen allein können keine Kettenreaktion aufrechterhalten, da der Kern unterkritisch ausgelegt ist, d. h.  $k_{\text{eff}} < 1$ . Stattdessen hängt die Fortführung der Reaktion immer von einer äußeren Neutronenzufuhr ab, die hier durch einen Teilchenbeschleuniger in Verbindung mit einem Spallationsziel induziert wird. Die unterkritische Auslegung erhöht das Sicherheitsprofil der Anlage entscheidend.

Die Effektivität der Transmutation hängt vom Energiespektrum der Neutronen ab, die mit den radioaktiven Nukliden interagieren. Schnelle Neutronen sind besonders wirksam bei der Transmutation aller Aktinide, die mit ca. 1,5 % einen kleinen, aber besonders langlebigen Bestandteil der hochradioaktiven Abfälle darstellen. Schnelle Neutronen haben eine höhere Wahrscheinlichkeit, eine Spaltung der schweren Isotope zu induzieren. Dies führt zu einer effizienteren Aufspaltung dieser langlebigen Isotope in kurzlebige oder stabile Fragmente. Reaktoren mit schnellem Neutronenspektrum können auch mehr spaltbares Material erzeugen, als sie verbrauchen.

Als Kernkühlmittel wurde flüssiges Blei gewählt. Blei ist für Neutronen durchlässig und ermöglicht daher die Nutzung eines harten Neutronenspektrums, was wiederum eine hohe Transmutationsrate der Aktinide zur Folge hat. Gleichzeitig wird Blei aufgrund seiner sehr hohen Neutronenausbeute als Spallationsmaterial verwendet. Blei ist daher eine logische Wahl, um zwei Hauptfunktionen der Anlage zu unterstützen.

Aus sicherheitstechnischer Sicht bietet Blei weitere Vorteile. Es hat einen hohen Siedepunkt, der den Betrieb bei hohen Temperaturen und atmosphärischem Druck ermöglicht. Der atmosphärische Druck erlaubt eine einfachere und sicherere mechanische Konstruktion des Primärkühlkreises (im Vergleich zu einem unter Druck stehenden Primärkühlmittelkreislauf) und verringert die Folgen einer Freisetzung des Primärkühlmittels unter unfallartigen Bedingungen, bei denen die Integrität des Primärkühlkreises gefährdet ist. Die hohe Betriebstemperatur des Primärkühlmittels führt zu einer effizienteren Energieübertragung durch den Dampferzeuger in den Sekundärkreislauf. Die Tatsache, dass START auch im laufenden Betrieb immer unterkritisch betrieben wird, und der Umstand, dass nach Ausbleiben des erregenden Protonenstrahls beim Abschalten des Beschleunigers die Kernreaktionen innerhalb von 2 Millisekunden

abbrechen, schließen Kritikalitätsunfälle durch das Design aus. Blei hat als Kühlmittel einen so hohen Siedepunkt, dass die komplette Nachzerfallswärme vom Kühlmittel aufgenommen werden kann. Selbst wenn ein lokales Sieden unterstellt wird, wird durch einen negativen Dampfblasenkoeffizienten die Reaktivität abgesenkt.

Zu den weiteren Vorteilen von Blei gehören seine chemische Trägheit und seine hohe Wärmekapazität, wodurch ein stabiles Medium mit hoher thermischer Trägheit entsteht. Das Transmutationsreaktordesign basiert auf den Erkenntnissen aus dem ALFRED-Reaktor Design, einem europäischen Forschungsprojekt für einen kritischen, bleigekühlten Reaktor. Der Transmutationsreaktorkern hat einen maximalen  $k_{\text{eff}}$ -Wert von 0,98, was eine Sicherheitsmarge zur Kritikalität ( $k_{\text{eff}} = 1$ ) bietet. START umfasst Energieerzeugung, Transmutation und Brennstoffherzeugung im selben Kern. Um alle Funktionen gleichzeitig zu ermöglichen, müssen die Brennelemente regelmäßig aufbereitet und nachgeladen werden. Dazu wird derzeit eine rotierende Lademaschine im Deckelbereich des Reaktors konzipiert, mit welcher Brennelemente versetzt werden können.

Die Neutronenquelle liefert die Neutronenpopulation, die erforderlich ist, um ein Gesamtneutronenniveau konstant auf unterkritischem Niveau zu halten. Dies wird dadurch erreicht, dass der hochenergetische Protonenstrahl auf das Target trifft und dabei einen bekannten und festen Neutronenfluss durch einen als Spallation bekannten Prozess freisetzt. Die Spallationsneutronen werden somit in Bezug auf Spektrum und Fluss durch den Protonenstrahl gesteuert, der von einem externen Beschleuniger bereitgestellt wird. Wenn kein Protonenstrahl mehr bereitgestellt wird, hört die Erzeugung von Spallationsneutronen umgehend auf und die Kernreaktion kommt innerhalb von zwei Millisekunden zum Erliegen.

Die Energie des auf das Spallationsziel treffenden Strahls ist der wichtigste Faktor, der bestimmt, wie viele Neutronen erzeugt werden. **ABBILDUNG 3** zeigt die Neutronenproduktionskapazität pro Proton und Energie in einem Bleitarget im Vergleich zur Energie der Protonen. Die maximale Neutronenproduktion liegt bei ca. 1,2 GeV. 800 MeV wurden als Kompromiss zwischen der Effektivität der Neutronenproduktion und dem Entwicklungsaufwand/ den Herstellungskosten des Beschleunigers gewählt.

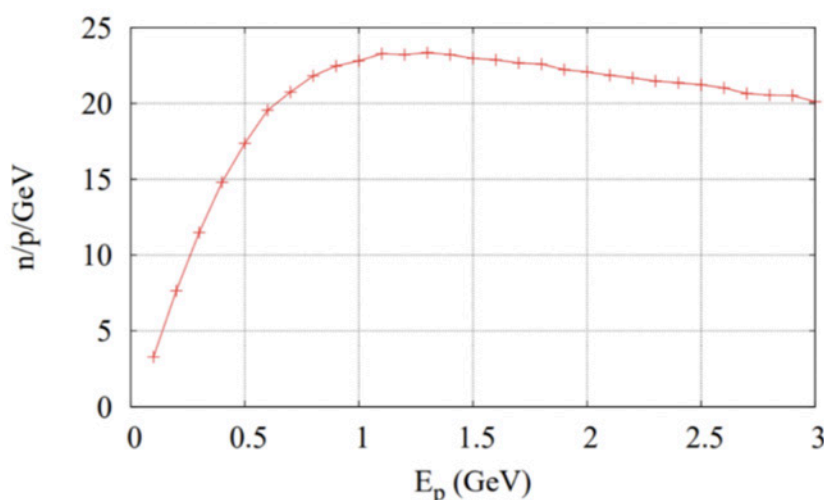
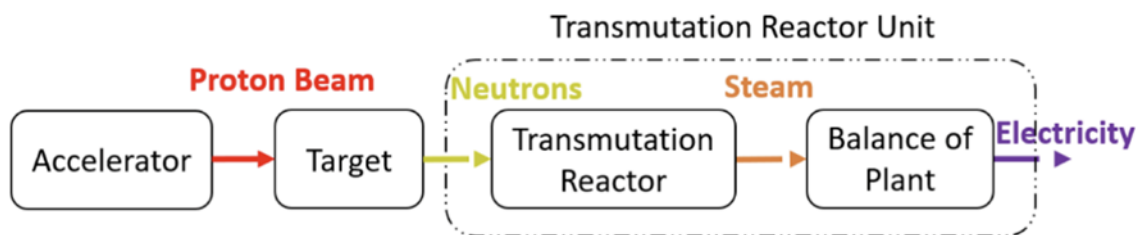


ABBILDUNG 3

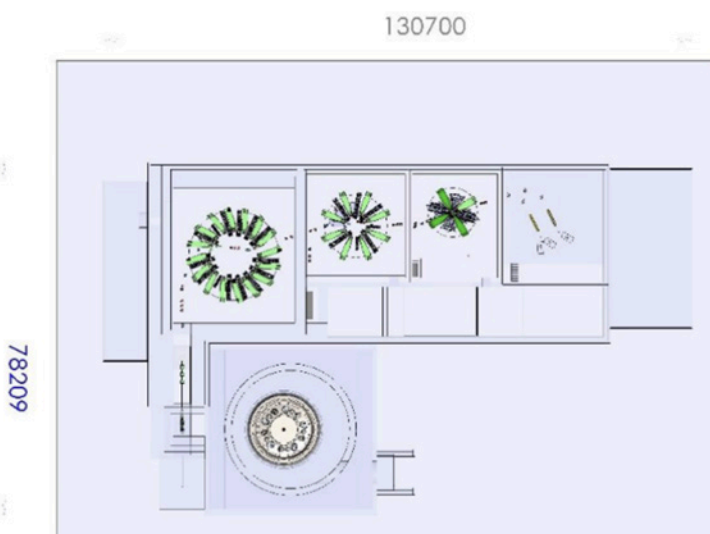
MCNP6 Monte Carlo Simulation des Verhältnisses Anzahl der erzeugten Neutronen zur eingesetzten Protonenenergie in GeV für ein zylindrisches Blei-Target ( $L=60$  cm,  $D=20$  cm).

Außerdem steigt die Fähigkeit, Neutronen zu erzeugen, linear mit dem Strom des Protonenstrahls an. Ein hoher Strom ist daher vorteilhaft. Tatsächlich haben europäische, chinesische und japanische Forschungsgruppen ADS-Forschungsprojekte entwickelt, die Strahlströme von 10 mA bis 30 mA berücksichtigen. Transmutex wählte 5 mA Spitzenstrom als angemessenen Strahlstrom, der basierend auf dem heutigen Stand der Technik eine sofort umsetzbare Weiterentwicklung bestehender Beschleuniger und Spallationsquellen zulässt.

Der gewählte Beschleuniger ist daher eine 800-MeV-Maschine mit einem Strahlstrom von 5 mA, was zu einer Strahlleistung von 4 MW führt. Das Design ist von der Hochintensitäts-Protonenbeschleuniger-Maschine (HIPA) des Paul-Scherrer-Instituts (PSI) inspiriert, die ein Zyklotron zur Beschleunigung von Protonen auf 590 MeV verwendet. Angesichts der Anforderungen an den Beschleuniger wird das START-Zyklotron das leistungsstärkste der Welt sein. Es wird und muss auch das zuverlässigste Zyklotron der Welt sein. Ein Hauptziel bei der Entwicklung des Zyklotrons ist es, eine hohe Zuverlässigkeit zu erreichen, um die Betriebsanforderungen des Reaktors zu erfüllen, die Folgendes vorsehen: maximal eine Strahlunterbrechung von mehr als 20 Sekunden pro Jahr, eine von mehr als 3 Sekunden pro Woche, zehn von mehr als eine Sekunde pro Tag, fünfzig von mehr als 0,1 Sekunden pro Tag und zehntausend Strahlunterbrechungen von weniger als 0,1 s pro Tag. **ABBILDUNG 4** zeigt, wie die Teilsysteme der Neutronenquelle (Beschleuniger, Target und Transmutationsreaktor) miteinander interagieren, **ABBILDUNG 5** zeigt eine Draufsicht auf die Neutronenquelle und **ABBILDUNG 6** zeigt eine Querschnittsansicht des Reaktorgebäudes.



**ABBILDUNG 4** Diagramm der elementaren Bestandteile der Neutronenquelle.



**ABBILDUNG 5** Ansicht des Beschleuniger- und Reaktorgebäudes. Maße in mm. Die Abmessungen sind etwa 130 m x 80 m.

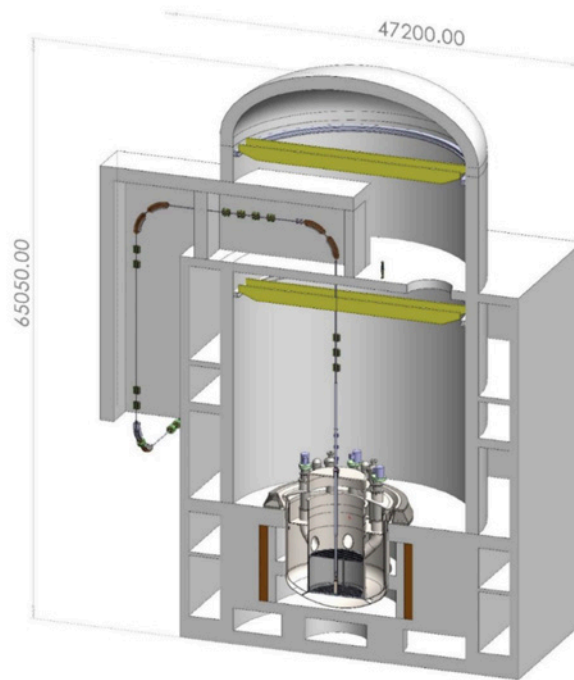


ABBILDUNG 6 Reaktorgebäude mit Strahlführung des Protonenstrahls und dem Transmutationsreaktor. Maße in mm.

Andere START-Subsysteme bieten die nötige Unterstützung für die Steuerung der Neutronenquelle. Diese sind für die Handhabung des vor Ort eintreffenden Abfalls, dessen Recycling und Verglasung ausgelegt (s. ABBILDUNG 7).

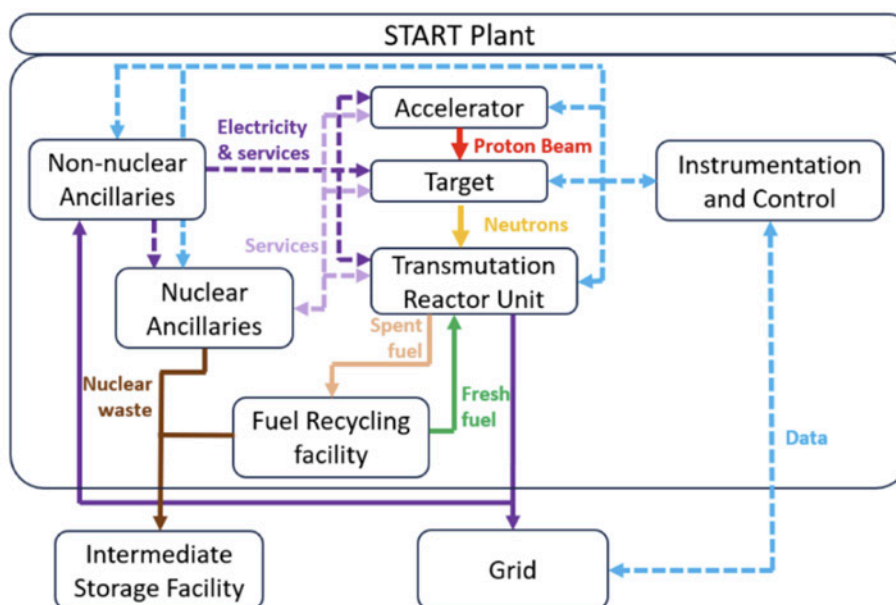


ABBILDUNG 7 Vereinfachte Darstellung einer START-Anlage.

Beim Transmutationsprozess werden 604 MWth Energie frei, die in brutto 260 MWe Strom umgewandelt werden könnten, von denen zur Eigenstromversorgung ca. 36 MW veranschlagt werden müssen.

Das Instrumenten- und Kontrollsystem ist für die Gewährleistung des sicheren und effizienten Betriebs der Neutronenquelle verantwortlich. Es steuert alle seine Systeme der Neutronenquelle, vom Beschleuniger bis zum Turbinengenerator. Das Kontrollsystem profitiert von einem digitalen Zwilling, der parallel zum System läuft und es dem Kontrollsystem ermöglicht, zukünftige Ereignisse vorherzusehen und entsprechend zu reagieren.

Die Brennstofflagereinheit beherbergt das Lager für Brennelemente, in dem sowohl abgebrannte aus externen Kernkraftwerken, abgebrannte nach ihrer Verwendung in der Neutronenquelle und Brennelemente, die in die Neutronenquelle eingesetzt werden sollen, gelagert werden. Die Größe des Lagers ist auf die Anzahl der Neutronenquellen in der Anlage ausgelegt.

Die Aufbereitungseinheit ist ein Schlüsselement für die Wiederverwertung von Nuklearabfällen. In dieser Anlage werden die abgebrannten Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren elektrochemisch zu Materialien verarbeitet, die von der Neutronenquelle verwendet werden können. Außerdem werden die im START Reaktor benutzten Brennelemente nach ihrer Verwendung im Kern recycelt und wieder in den Kern eingesetzt.

Die Brennstoffherstellung ergänzt die Recyclingeinheit, indem sie neue Brennelemente herstellt, die wiederum von der Neutronenquelle verwendet werden.

Eine Verglasungseinheit wird zur Konditionierung des verbleibenden hochaktiven Abfalls in eine stabile verglaste Form verwendet. Das endgültige hochaktive Abfallprodukt, das aus der START-Anlage stammt, ist in seiner endgültigen Form für die Lagerung in einem tiefen geologischen Endlager geeignet und qualifiziert.

## 2 Auswirkungen auf das geologische Endlager

|                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 Einleitung</b>                                                                | <b>17</b> |
| <b>2 Methodik</b>                                                                  | <b>18</b> |
| <b>3 Zeitrahmen</b>                                                                | <b>19</b> |
| <b>4 Der Recycling-Ansatz von Transmutex</b>                                       | <b>20</b> |
| 4.1. Die einzelnen Schritte des Transmutex-Prozesses                               | 21        |
| 4.2. Anlieferung und Lagerung                                                      | 21        |
| 4.3. Hüllrohrentfernung und Voloxidation                                           | 22        |
| DEMONTAGE DER STRUKTURELLEN ELEMENTE                                               | 22        |
| SCHNEIDEN DER BRENNSTÄBE                                                           | 23        |
| HÜLLROHRENTFERNUNG                                                                 | 24        |
| VOLOXIDATION                                                                       | 25        |
| VERDICHUNG DES PULVERS                                                             | 26        |
| 4.4. Elektrolytische Reduktion                                                     | 27        |
| SALZ                                                                               | 28        |
| ANODE                                                                              | 29        |
| KATHODE                                                                            | 29        |
| KATHODENPRODUKT                                                                    | 30        |
| 4.5. Elektroraffination                                                            | 30        |
| ELEKTROCHEMISCHE REAKTION DER TRANSURANE                                           | 32        |
| ANODE                                                                              | 33        |
| KATHODE                                                                            | 34        |
| ELEKTRO-REFINERSALZ                                                                | 36        |
| ELEKTORAFFINATION ABGEBRANNTER, METALLISCHER BRENNNELEMENTE AUS START              | 36        |
| 4.6. Elektrolytische Gewinnung von Transuranen                                     | 36        |
| 4.7. Anpassung der Anreicherungsstufe                                              | 39        |
| 4.8. Entfernung restlicher Aktinide (RAR)                                          | 39        |
| 4.9. Entfernung von Lanthaniden                                                    | 41        |
| 4.10. Lithiumchlorid Salzbehandlung                                                | 41        |
| 4.11. Eutektische Salzbehandlung                                                   | 42        |
| 4.12. Abgasanlage                                                                  | 43        |
| 4.13. Verglasung der verbleibenden hochaktiven Abfälle                             | 43        |
| TECHNOLOGIE UND HISTORISCHER HINTERGRUND                                           | 45        |
| 4.14. Entstehender mittelaktiver Abfall (MAW)                                      | 46        |
| <b>5 Berechnungsmethoden</b>                                                       | <b>48</b> |
| 5.1. Der Kern und die Abbrandberechnungen                                          | 48        |
| 5.2. Radioaktive Zerfallsberechnungen mittels Bateman-Code                         | 50        |
| 5.3. Anforderungen an die Datengenauigkeit                                         | 53        |
| <b>6 Berechnungsergebnisse</b>                                                     | <b>55</b> |
| 6.1. Direkte Entsorgungsoption im Jahr 2100                                        | 55        |
| ABKLINGBERECHNUNGEN DER BRENNNELEMENTE AUS DER VORSTUDIE                           | 55        |
| 6.2. Berechnung des Recycling-Ansatzes von Transmutex                              | 57        |
| 6.3. Transmutation bereits verglaster Abfälle                                      | 59        |
| 6.4. Beschreibung der Outputströme                                                 | 61        |
| WIEDERAUFBEREITETES URAN (REPU)                                                    | 61        |
| U/TRU PRODUKT FÜR START                                                            | 61        |
| DER LETZTE KERN („THE LAST CORE PROBLEM“)                                          | 65        |
| JOD-129                                                                            | 68        |
| TECHNETIUM-99 UND CÄSIUM-ISOTOPE                                                   | 70        |
| SELEN-79 UND STRONTIUM-90                                                          | 72        |
| RHODIUM                                                                            | 73        |
| PARAMETER DER DURCH DEN RECYCLINGPROZESS VON TRANSMUTEX ERZEUGTEN HAW GLASKOKILLEN | 73        |
| PARAMETER UND GRENZWERTE DES BEHÄLTERS CASTOR®HAW28M                               | 75        |
| TRANSMUTEX OXID BRENNSTOFFRECYCLING                                                | 77        |
| SOFORTIGE VOLLSTÄNDIGE SPALTUNG                                                    | 80        |
| TRANSMUTEX START METALLISCHE BRENNNELEMENTAUFBEREITUNG                             | 81        |
| <b>7 Vergleich der erforderlichen Endlagerbehälter</b>                             | <b>83</b> |
| 7.1. Speichervolumen und Reduktionsfaktor                                          | 83        |
| 7.2. Verkürzung der Abklingzeit                                                    | 84        |
| <b>8 Zusammenfassung und Schlussfolgerung</b>                                      | <b>85</b> |
| <b>9 Anhang</b>                                                                    | <b>86</b> |

# 1 Einleitung

---

Ziel dieses Kapitels ist es zu zeigen, wie sich das von Transmutex vorgeschlagene Verfahren auf das Volumen, die Abklingzeit und die Nachzerfallswärmeentwicklung hochradioaktiver Abfälle auswirkt. Diese Parameter der aktuell in zwölf dezentralen Zwischenlagern in der Nähe ehemaliger Kernkraftwerke und in den weiteren Zwischenlagern in Ahaus, Jülich, Lubmin und Gorleben untergebrachten Abfälle sind die wesentlichen Entscheidungsparameter für das geplante geologische Endlager.

Die in einem geologischen Endlager mögliche Anzahl der abgebrannten Brennelemente (SFA) mit Endbehältern und anderen wärmeentwickelnden Abfallbehältern pro Volumen hängt stark vom Wirtsgestein ab. Die Abklingwärmeproduktion der Abfälle ist einer der wichtigsten Entscheidungsparameter für die Endlagerungsdichte, d. h. das Verhältnis von Packungseinheiten pro ausgehobenem Wirtsgesteinsvolumen für die Lagerung dieser Einheiten. Diese Dichte hat einen starken Einfluss auf die Investitionskosten des Speichers, da sie das Volumen des auszubauenden Wirtsgesteins bestimmt.

Die Ergebnisse sind aufgrund der Datenmenge und -qualität repräsentativ für die Situation abgebrannter Brennelemente in Deutschland und damit bundesweit relevant. Der untersuchte Druckwasserreaktor verfügte über einen Reaktorkern, der aus 193 Brennelementen (FA) mit einem quadratischen Design und 61 Steuerstäben bestand. Die Bruttomasse pro Brennelement betrug rund 832 kg und enthielt rund 0,54 Tonnen Schwermetall als Oxidbrennstoff. Die meiste Zeit der Betriebszeit wurden BE aus Uranoxid mit einer Anreicherung von etwa 4,6 % Uran-235 mit oder ohne zusätzliches Gadoliniumoxid verwendet. In den Jahren 1998-2019 wurden im Kern auch Uran-Plutoniumoxid (MOX) Brennelemente verwendet.

Der Betreiber stellte für diese Studie die Daten aller 1426 abgebrannten Brennelemente zur Verfügung, die in der Anlage während der Betriebsdauer produziert wurden. Die Daten enthalten grundlegende Informationen wie etwa Brennelementtyp, ursprüngliche Anreicherung und Schwermetallgehalt, Abbrand, Datum der Entnahme aus dem Kern und Informationen zur Lagerung. Zu den wichtigsten Daten gehört die jeweilige Nuklidzusammensetzung der abgebrannten Brennelemente (SFA) zu einem Referenzdatum, welche die nuklearen Eigenschaften bestimmt. Die erhobenen 800-900 Nuklide entsprechen über 99 % des gesamten Aktivitätsgehalts und mehr als 99 % des gesamten Massengehalts und lagen zum Erstellen der Studie in dieser Qualität vor. Diese extrem umfangreichen Daten der Brennelemente können aus Sicherheits- und Platzgründen hier nicht wiedergegeben, aber bei nachweisbar wissenschaftlichem Interesse u. U. zur Verfügung gestellt werden.

Der Großteil der abgebrannten Brennelemente befindet sich in Behältern des Typs CASTOR V/19 oder Transnucleaire TN24 (Trockenlagerung) oder derzeit noch im Abklingbecken (Nasslagerung), siehe auch [ABBILDUNG 8](#). Ein kleinerer Teil wurde seinerzeit zur Wiederaufarbeitung an COGEMA (Frankreich) geschickt. Diese 335 Brennelemente wurden mittels PUREX-Verfahren wiederaufgearbeitet und die Aufarbeitungsrückstände in Glaskokillen verglast. Die Anzahl und Inventardaten dieser Kokillen standen für diese Studie noch nicht zur Verfügung. Prinzipiell ist das Verfahren von Transmutex aber auch für die Behandlung dieser bereits verglasten Abfälle geeignet (s. [Kapitel 2\\_6.3.](#)).

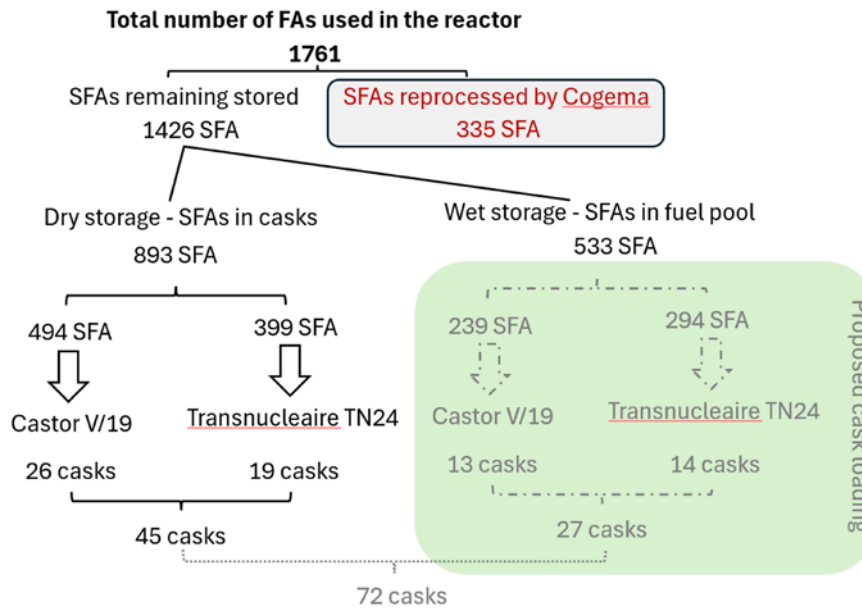


ABBILDUNG 8

Daten über den Lagerort der abgebrannten Brennelemente für diese Studie, einschließlich der vorgeschlagenen Beladung mit SFA, die sich derzeit im Becken für abgebrannte Brennelemente des Kraftwerks befinden.

## 2 Methodik

Die Studie vergleicht die Anzahl der Transport- und Lagerbehälter, die 1426 abgebrannte Brennelemente enthalten und für die Lagerung im Zwischenlager vorgesehen sind, mit der Anzahl der mit Glaskokillen gefüllten Behälter, welche sich nach Behandlung mit dem Transmutex-Verfahren als hochradioaktiver Abfall ergeben. Der Vergleich konzentriert sich auf die Verringerung des Volumens hochradioaktiver Abfälle und die Verkürzung seiner radioaktiven Lebensdauer, d. h. die Zeit, bis das Aktivitätsniveau der entsprechenden Menge an natürlichem Uranerz erreicht ist.

Diese Art des Vergleichs wird verwendet, da in Deutschland derzeit noch keine Entscheidung über einen endgültigen Standort für ein geologisches Endlager für hochradioaktive Abfälle getroffen wurde. Daher können weder ein Endlagerbehälter noch Wirtsgesteinsbedingungen definiert und verwendet werden. Die in dieser Studie gewählte Glaszusammensetzung entspricht den Parametern der Gesellschaft für nukleare Sicherheit, den meisten Parametern der Qualifizierung der Verglasungsanlage Karlsruhe (VEK) und der Spezifikation der von der Wiederaufbereitungsanlage in Sellafield erzeugten Glaszusammensetzung, die in Deutschland und in der Schweiz bereits für Endlagerzwecke zugelassen sind.

Für die 533 aktuell im Abklingbecken befindlichen Brennelemente geht Transmutex von deren Verladung sowohl in CASTOR V/19- als auch Transnucleaire TN 24-Behältern aus. Es wurden zwei Hersteller für die Behälter gewählt, um eventuelle Probleme in der Lieferkette beider Hersteller zu vermeiden. Auf dieser Grundlage würden 27 Behälter benötigt (13 CASTOR V/19 und 14 Transnucleaire TN24). Das Minimum von 26 Behältern könnte erreicht werden, wenn nur Transnucleaire TN24-Behälter verwendet würden. Darüber hinaus wird für die Abfälle aus den Hüllrohren und Strukturbauteilen der Brennelemente die sich daraus ergebende Anzahl von schwachaktiven Abfallbehältern für die Einlagerung in das schwachaktive Endlager „Schachanlage Konrad“ berechnet.

### 3 Zeitrahmen

Angesichts der derzeitigen Annahmen für die Bestimmung eines Endlagerstandorts in Deutschland wurde der 1. Januar 2100 als Startzeitpunkt für die Einlagerung der Abfälle in das künftige geologische Endlager gewählt. Um eine gemeinsame Berechnungsgrundlage zu haben, wurde der 15. April 2033 als Bezugsdatum für das Nuklidinventar aller Brennelemente verwendet. In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass das vorgestellte Verfahren ab dem 1. Januar des Jahres 2035 angewendet werden kann. Einen entsprechenden Zeitplan für die verschiedenen Vorgänge zeigt **ABBILDUNG 9**.

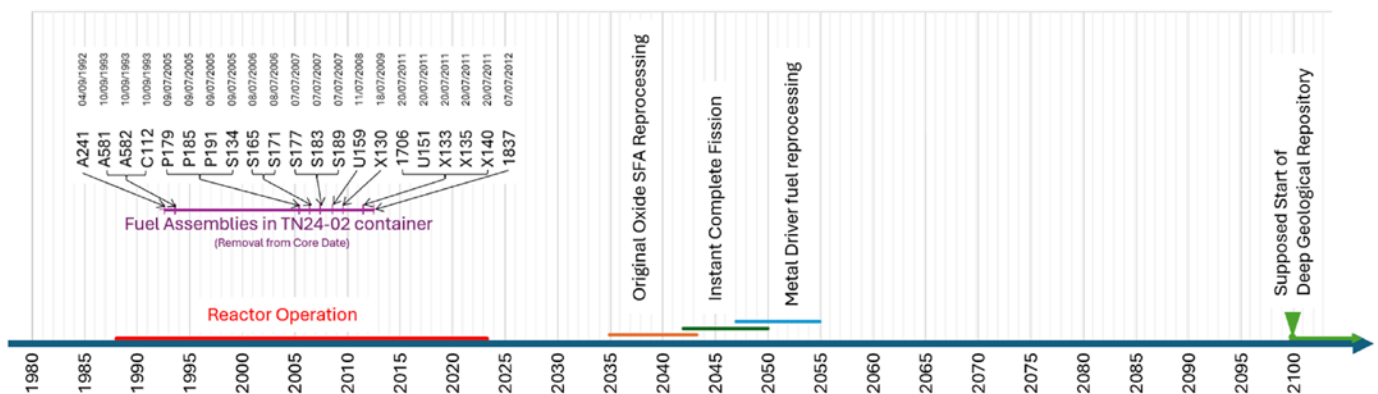


ABBILDUNG 9

Ein Zeitplan, der die Betriebszeit des untersuchten Kernreaktors, die Entnahme von 21 Brennelementen aus dem Kern des Behälters TN24-02, das Recycling von 1426 Brennelementen durch Transmutex, den Betrieb von START, in dem die Spaltung von Transuranen stattfindet, und ein mögliches Datum für die Eröffnung des geologischen Tiefenlagers umfasst.

Es ist geplant, die Verarbeitung ab 1. Januar 2035 in einer Anlage mit einer Jahreskapazität von 100 Tonnen zu beginnen. Die Bearbeitungsreihenfolge der Brennelemente berücksichtigt deren Behälterbeladung: Solche im selben Behälter werden nacheinander als Charge verarbeitet. Das Aufbereitungsdatum eines Behälters wird in den Ergebnistabellen durch den Durchschnitt der einzelnen Aufbereitungsdaten der im Behälter befindlichen Brennelemente dargestellt.

Für die sofortige vollständige Spaltung des abgetrennten Uran-/Transuran-Nuklid-Gemischs, das bei der Verarbeitung entsteht, wird ein Näherungswert angenommen. Für die Abfallberechnung wurden die eigentlich in verschiedenen Zyklen verlaufenden Spaltungs-/Transmutationsreaktionen der Transurane in einem Schritt berechnet. Der Zeitpunkt dieser sofortigen vollständigen Spaltung wurde so gewählt, dass er sieben Jahre nach der Bearbeitung der ursprünglichen abgebrannten Brennelemente liegt, also zwischen den Jahren 2042 und 2050. Das Recycling der aus dem START-Betrieb resultierenden Abfälle (als Spaltprodukte der sofortigen vollständigen Spaltung) erfolgt nach fünf Jahren Abkühlungszeit zwischen den Jahren 2047 und 2055. Die Daten der von Transmutex erzeugten hochaktiven, verglasten Abfälle werden mit den Daten der ursprünglichen abgebrannten Brennelemente für die direkte Endlagerung zum Jahr 2100 rechnerisch verglichen.

Die aus dem Transmutex-Betrieb resultierenden hochaktiven Abfälle werden verglast und als Glas-kokillen in CASTOR HAW28-Behälter verpackt. Die erforderliche Anzahl an Behältern basiert auf der für das Jahr 2100 berechneten Menge dieser Abfälle und ihren nuklearen Eigenschaften und wird mit der berechneten Anzahl an Behältern verglichen, die zur Lagerung der 1426 aktuellen Brennelemente bei direkter Entsorgung erforderlich sind.

## 4 Der Recycling-Ansatz von Transmutex

Transmutex verfolgt ein elektrochemisches Partitionierungsverfahren in einer Hochtemperatur-Salzschmelze, das vom Argonne National Laboratory (ANL) entwickelt und am Brennstoff des EBR-II-Reaktors im Zeitraum von 1964-1994 getestet wurde. Bei diesem Recyclingverfahren kann das Uran in reiner metallischer Form zurückgewonnen werden, während das Plutonium und alle anderen Transurane in einer Metalllegierung mit einem geringen Urananteil anfallen. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass weder wässrige Lösungen noch Säuren verwendet werden. Es folgt zudem den strengen Sicherheitsgrundsätzen der Nicht-Weiterverbreitung und trennt kein reines, spaltbares Material ab. Die Transurane werden im Gemisch mit etwas Uran gewonnen; diese Legierungen können daher nicht als waffenfähiges Material verwendet werden.

Das Verfahren ermöglicht die Abtrennung zahlreicher radioaktiver und stabiler Spaltprodukte (wie Edelmetalle), der Transurane mit einem Teil des Urans sowie des restlichen rezyklierten Urans als sauberes Produkt aus abgebranntem Brennstoff. Das zurückgewonnene saubere Uran (RepU) besteht größtenteils aus U-238 in Mischung mit künstlichem U-236, etwas verbleibendem U-235 sowie einigen anderen Uranisotopen und kann als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Brennelementen (z. B. ERU) verwendet werden, die derzeit bereits von Kernkraftwerken weltweit im Einsatz sind. Die Abhängigkeit von außereuropäischen Uranherstellern sowie die mit dem Abbau verbundenen ökologischen Schäden können durch diesen Recyclingprozess reduziert werden.

Damit unterscheidet sich das elektrochemische Verfahren entscheidend vom nasschemischen PUREX-Verfahren (Plutonium-Uran-Reduktions-Extraktion), mit dem der Begriff Wiederaufbereitung negativ konnotiert ist. Letzteres wurde erstmals während des Zweiten Weltkriegs in Los Alamos entwickelt, und zwar nicht zur Verarbeitung der nuklearen Abfälle, sondern zur Gewinnung von Plutonium und Uran. Es handelt sich zudem um ein relativ ineffizientes und umweltbelastendes Verfahren. Die minoren Aktinide und die verbleibenden Transurane des abgebrannten Uranoxidbrennstoffs werden zusammen mit den Spaltprodukten als nutzloser Abfall betrachtet und in Kokillen verglast, wodurch diese Abfälle auf lange Zeit hochradioaktiv bleiben. Es gibt auch einige langlebigen Spaltprodukte wie Technetium-99, Selen-79 und Jod-129, die aufgrund ihrer verschiedenen, möglichen Oxidationsstufen eine hohe Mobilität aufweisen, sodass sie für ein geologisches Tiefenlager eine besondere Sicherheitsbetrachtung und Vorkehrungen brauchen, damit ihr Kontakt mit dem Tiefengrundwasser auf lange Zeit ausgeschlossen werden kann<sup>1</sup>.

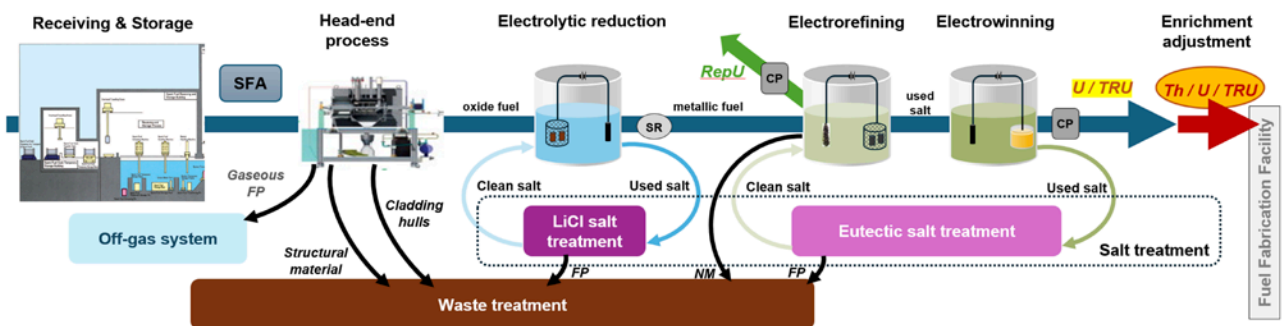
Im START-System werden die abgetrennten Transurane daher in einem schnellen Neutronenspektrum verwendet, das durch einen Spallationsprozess in flüssigem Blei ausgelöst wird. Dieser Prozess ermöglicht die vollständige Spaltung/Transmutation der Transurane in mehreren Kernzyklen. Die ursprüngliche pyrochemische Aufbereitung von ANL wurde von Transmutex um die Abtrennung der Spaltprodukte Cäsium, Strontium, Krypton und Rhodium für medizinische oder industrielle Zwecke erweitert. Die langlebigen Spaltprodukte Technetium-99, Jod-129 und Selen-79 werden zusätzlich abgetrennt, um sie im Neutronenspektrum von START zu stabilen Produkten zu transmutieren.

Insgesamt enthält der aus diesem Prozess resultierende Abfall fast keine wärmeentwickelnden Transurane (weniger als 1 % des ursprünglichen Gehalts im abgebrannten Brennstoff). Er enthält nur noch Spuren von spaltbarem Material und unterschreitet innerhalb von weniger als 1000 Jahren das Aktivitätsniveau einer äquivalenten Menge natürlichen Uranerzes (die genaue Zerfallszeit hängt vom Abbrand und der Art des verwendeten Brennstoffs ab). Aufgrund der fehlenden langlebigen Aktinide und Spaltprodukte Selen, Jod und Technetium erfordern diese Rückstände keine probabilistische Sicherheitsanalyse für das Endlager. Der Gesamtreduktionsfaktor für das Volumen hochradioaktiver Abfälle liegt in der Regel im Bereich von 5 bis 10 (d. h. mindestens 80 % Volumenreduktion im Endlager).

4.1.

## Die einzelnen Schritte des Transmutex-Prozesses

Die wichtigsten Schritte in der Recyclinganlage - die dem Weg des spaltbaren Materials im Falle von abgebranntem Oxidbrennstoff folgen - sind die Annahme und Lagerung der Brennelemente, der sogenannte Head-End-Prozess (die Entfernung der Strukturelemente und der Hüllrohre und die Voloxidation), die elektrolytische Reduktion, die Elektroraffination, die elektrolytische Gewinnung, die Behandlung des Kathodenprodukts (CP), die Salzbehandlung, das Abgassystem, die Abfallbehandlung und die Anreicherungsanpassung (siehe die Darstellung dieser grundlegenden Schritte in [ABBILDUNG 10](#)).

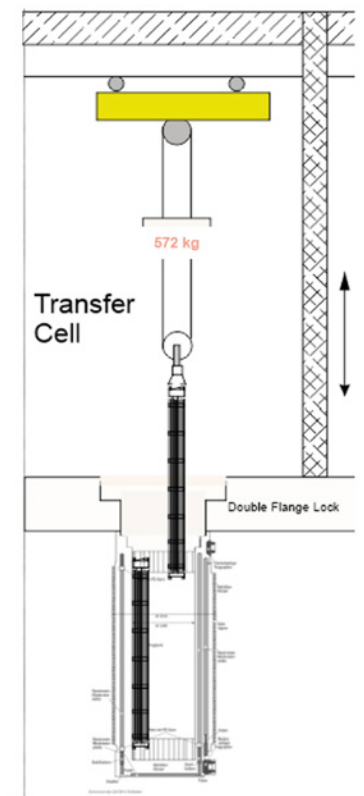


**ABBILDUNG 10** Flussdiagramm des abgebrannten Brennstoffs aus oxidischen LWR Brennelementen durch die Recyclinganlage.

## 4.2.

## Anlieferung und Lagerung

Transmutex kann für die Lagerung der abgebrannten Brennelemente entweder Brennelementlagerbecken oder die trockene Lagerung in Behältern verwenden. Beide technischen Lösungen sind möglich. Da in Deutschland der größte Teil der abgebrannten Brennelemente bereits trocken in Lagerbehältern in Zwischenlagern am Rande ehemaliger Atomkraftwerke steht, wird Transmutex seine Anlage für die Annahme von Lagerbehältern konzipieren. Grundsätzlich können alle Arten von Lagerbehältern, die derzeit in Deutschland verwendet werden, eingesetzt werden. Die Recyclinganlage wird ein Doppelflansch-Verschlusssystem verwenden, das die Entnahme der Brennelemente ermöglicht, ohne dass der Behälter in eine heiße Zelle überführt werden muss. Während dieses Prozesses wird der Behälter an eine heiße Transferzelle mit einem Doppelschleusensystem angedockt, das es ermöglicht, den Behälter von der Seite der heißen Zelle aus zu öffnen und seinen Inhalt in die Transferzelle zu übernehmen. Während des Entladevorgangs bleibt der Behälter außerhalb der Transferzelle und seine Außenfläche wird nicht kontaminiert. Der grundlegende Aufbau ist in [ABBILDUNG 11](#) dargestellt.



**ABBILDUNG 11** Aufbau der Transferzelle mit Doppelflanschverschluss.

### 4.3.

## Hüllrohrentfernung und Voloxidation

Der sogenannte Head-End-Prozess besteht aus fünf großen Abschnitten:

- Demontage der strukturellen Elemente,
- Schneiden der Brennstäbe,
- Entfernen der Hüllrohrabschnitte,
- Voloxidation,
- Pulververdichtung.

### DEMONTAGE DER STRUKTURELLEN ELEMENTE

Das Brennelement wird von der Transferzelle in eine heiße Zelle gezogen (s. [ABBILDUNG 12](#)). Dort wird das Gewicht erfasst und die Brennelementnummer visuell überprüft (um zu bestätigen, dass das richtige Brennelement behandelt wird). Außerdem werden Neutronen- und  $\gamma$ -Messungen durchgeführt. Schließlich werden sogenannte FORK-Messungen durchgeführt, um nachzuweisen, dass ein echtes Brennelement behandelt wird. Eine Umlenkvorrichtung bringt das Brennelement aus einer vertikalen Position in eine horizontale Position auf dem Klemmtisch. Die Brennelementkassette wird auf dem Klemmtisch in einem großen horizontalen Schraubstock fixiert. Die Stäbe und der Fuß werden durch Schneiden der Strukturelemente entfernt. Das Schneiden der Stäbe in diesem Zustand und damit eine Kontamination mit Spaltprodukten wird vermieden. Bei metallischem Brennstoff werden auch andere notwendige Komponenten wie der Brennelementkasten entfernt, bis ein freier Zugang zu den Brennstäben besteht (s. [ABBILDUNG 13](#)). Diese Strukturelemente können so als mittelradioaktiver Abfall entfernt und in das Metallabfallbehandlungssystem überführt werden. Die heiße Zelle ist mit Luft gefüllt, aus der Feuchtigkeit entfernt und Wärme über erzwungene Konvektion abgeführt wird.



ABBILDUNG 12

Die heiße Zelle zum Abscheren abgebrannter Oxidbrennelemente in der Wiederaufbereitungsanlage La Hague.

© Sydney Jezequel/ Les films de Roger Leenhardt /AREVA

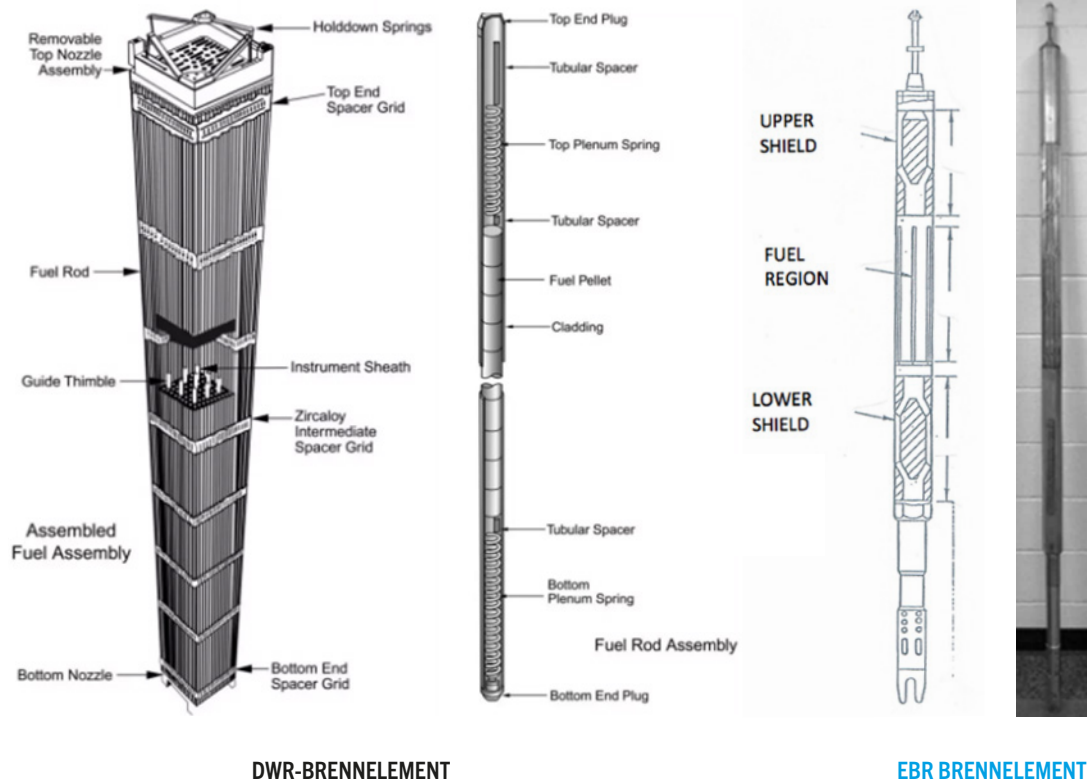


ABBILDUNG 13

Links: Hauptkomponenten von DWR-Brennelementen<sup>2</sup>.  
Rechts: Hauptbestandteile von EBR-II-Treiber-Brennelementen  
(metallischer Brennstoff)<sup>3</sup> und ein Foto<sup>4</sup> des EBR-II-Treiber-Brennelements.

### SCHNEIDEN DER BRENNSTÄBE

Die entnommenen Brennstäbe werden in der heißen Zelle mit einer Schneidvorrichtung in kleinere Stücke geschnitten werden (s. ABBILDUNG 14). Dabei wird das Brennmaterial freigelegt. Entweichende Gase (wie Xenon, Krypton, Kohlendioxid usw.) aus dem Inneren der Brennstäbe werden durch das Abgassystem aufgefangen. Die nicht brennstoffhaltigen Teile des Stabs werden entfernt und als mittelaktiver Abfall in das System zur Behandlung metallischer Abfälle geleitet. Der Abschnitt des Stabs, in dem sich noch das feste Brennstoffgemisch befindet, wird in kleine, etwa 1 cm lange Stücke geschnitten. Diese werden gesammelt und zur Voloxidationszelle transportiert.

Die Atmosphäre in dieser heißen Zelle besteht aus Luft, wenn es sich um Oxidbrennstoff handelt, und aus Argon, wenn es sich um metallischen Brennstoff handelt. Es gibt auch eine Menge luftgetragener Aktivität in Form von festen Partikeln. Bei der Anordnung der Brennstäbe für das Schneiden und beim Sammeln der Brennstababschnitte werden Wärmeentwicklung und Kritikalität berücksichtigt. Brüterbrennstoff (Blanket) wird getrennt vom Treiberbrennstoff gesammelt. Prinzipiell wird es zwei verschiedene Aufarbeitungslinien geben, je eine für oxidischen und eine für metallischen Brennstoff.

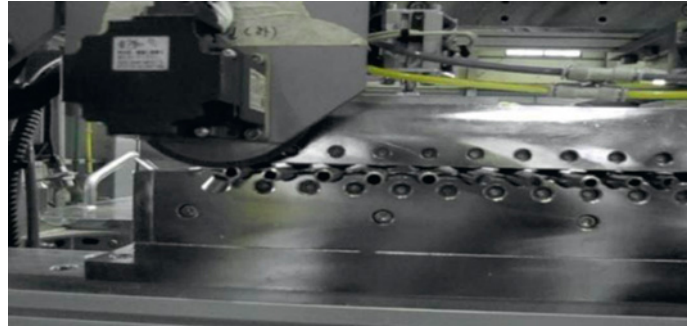


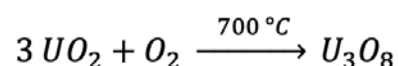
ABBILDUNG 14 Ausrüstung zum Schneiden von Stangen<sup>5</sup>.

### HÜLLROHRENTFERNUNG

Die Stababschnitte aus dem vorherigen Vorgang enthalten nun das gesamte Brennstoffmaterial. Das Brennstoffoxid verbleibt normalerweise innerhalb der Hüllrohrabschnitte. Besonders hoch abgebrannter Brennstoff hat eine starke mechanische Verbindung mit dem Hüllrohrmaterial. Die Hüllrohrentfernung ist der Vorgang, bei dem die Hüllrohrabschnitte und das Brennstoffmaterial aufgrund ihrer unterschiedlichen Masse und Geometrie voneinander getrennt werden, bevor die Arbeiten in der Salzschnmelze beginnen. Dies kann bei Oxidbrennstoff mit hohem Abbrand problematisch sein, denn es besteht in solchen Fällen eine chemische Wechselwirkung zwischen dem Brennstoff und dem Hüllrohrmaterial.

Bei metallischen Brennstoffen ist die Hüllrohrentfernung ein rein physikalischer Prozess in einer Argon-Atmosphäre, wobei die Möglichkeit besteht, diesen Schritt zu überspringen und die Stababschnitte mit der Umhüllung direkt in den Elektrorefiner einzuführen.

Bei Oxidbrennstoff wird die oxidative Hüllrohrentfernung als erster Teil des Voloxidationsverfahrens eingesetzt. Der hohe Abbrand von Oxidbrennstoff führt zu einer Reaktion des Brennstoffs mit dem Hüllrohrmaterial. Dieser Effekt führt dazu, dass der Brennstoff nicht mehr vollständig vom Inneren des Hüllrohrs getrennt werden kann, was für die Abtrennung des Hüllrohrmaterials völlig unerwünscht ist, da der Anteil des Kernbrennstoffs im Hüllrohrmaterial bei der Entsorgung als mittelaktiver Abfall (MAW) begrenzt ist. Neben der chemischen Umwandlung führt die oxidative Vorbehandlung auch zu einer Veränderung der Konsistenz des Brennstoffs, was die Trennung vom Hüllrohr erleichtert. Bei der oxidativen Hüllrohrentfernung werden die Stababschnitte und der Brennstoff auf 500-700 °C erhitzt und bei sauerstoffhaltiger Luftatmosphäre mehrere Stunden lang (je nach Abbrand) auf dieser Temperatur gehalten. Die chemische Reaktion des Urandioxids mit Sauerstoff wird im Folgenden beschrieben. Diese Reaktion verändert die Kristallstruktur des Brennstoffs, setzt die darin eingeschlossenen Gase frei (Tritium als Wasserdampf, Kohlenstoff-14 als Kohlendioxid usw.) und führt zu einer Fragmentierung und Pulverisierung des Brennstoffs.



Am Ende der oxidativen Hüllrohrrentfernung wird der pulverisierte Brennstoff physisch von den Hüllrohrabschnitten getrennt und Brennstoffoxid wird im Voloxydationsverfahren weiter erhitzt. Die freigesetzten Gase werden dem Abgassystem zugeführt. Die abgetrennten Hüllrohrabschnitte werden weiter gereinigt und dann in der Anlage zur Behandlung von Metallabfällen als MAW behandelt. In der Regel reicht in diesem Stadium eine Behandlung der Hüllrohrabschnitte mit Ultraschall aus, um den voloxidierten Brennstoff komplett von ihnen zu trennen. Dazu werden die Hüllrohrabschnitte in einem Gitterkorb mit Ultraschall behandelt, sodass das Brennstoffpulver durch den Gitterkorb in eine Auffangwanne fallen kann (siehe auch [ABBILDUNG 15](#)).

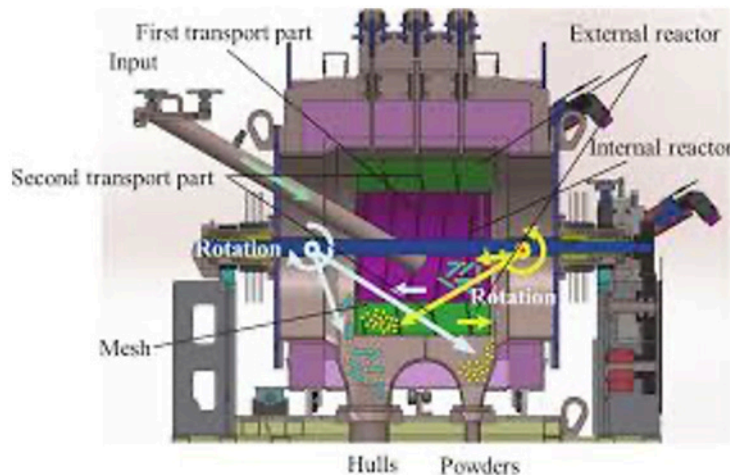


ABBILDUNG 15

Schematische Darstellung einer Anlage zur oxidativen Hüllrohrrentfernung<sup>6</sup>.

## VOLOXIDATION

Der Voloxidationsvorgang umfasst den oben beschriebenen Schritt der oxidativen Hüllrohrrentfernung mit einem zusätzlichen Erhitzungsprogramm bis ca. 1250 C im Vakuum (reduzierter Druck von Luft oder Argon). Im Inneren der Voloxidationsanlage (siehe ein Beispiel in [ABBILDUNG 16](#)) setzt das fragmentierte und pulverisierte Brennstoffpulver flüchtige und halbflüchtige Spaltprodukte frei, die vom Abgassystem aufgefangen werden, während sich die Korngröße und die chemische Form während des Vorgangs deutlich ändern. Das Brennstoffpulver wird in der Regel sehr feinkörnig. Die Entfernung der verschiedenen Elemente oder Nuklide ist in [TABELLE 1](#) zusammengefasst.

| Element oder Nuklid | H-3 | C-14 | Kr-85 | I-129 | Cs | Tc   | Ru   | Rh   | Te   | Mo   | Rb |
|---------------------|-----|------|-------|-------|----|------|------|------|------|------|----|
| Beseitigung [%]     | 100 | 100  | 100   | 100   | 98 | 92,3 | 97,6 | 82,7 | 53,3 | 61,7 | 96 |

TABELLE 1

Prozentuale Entfernung (%) der Spaltprodukte durch das fortgeschrittene Voloxidationsverfahren<sup>7</sup>

Die Entfernung dieser Spaltprodukte (vor allem der Cäsiumisotope) an einem frühen Zeitpunkt des Prozesses verringert die Gesamtaktivität und die Wärmeproduktion erheblich (etwa um den Faktor 2 bei einem fünf Jahre abgeklungenen DWR-Brennelement), was für die weitere Aufarbeitung der verbleibenden Brennelementinhaltsstoffe von Vorteil ist. Weniger Verunreinigungen in der Salzschnmelze im nächsten Schritt ermöglichen eine längere Nutzung des Salzes und haben den Vorteil, dass die Installationen in den Zellen weniger starken Strahlenpegeln ausgesetzt sind. Die Abtrennung mehrerer Produkte, des Technetiums, des Jods, der Edelmetalle Ruthenium- und Rhodium, des Cäsiums und des Kryptons, beginnt in diesem Schritt innerhalb des Abgassystems. Der Trennungsprozess ist weniger kompliziert als die Gewinnung dieser Elemente aus der Salzschnmelze im nächsten Schritt. Das Voloxidationsprogramm ist auf die Art der aufzuarbeitenden Brennelemente zugeschnitten und hinsichtlich seines Temperaturprofils, der Zeitabläufe und der Gaszusammensetzung in der Zelle optimiert.



ABBILDUNG 16 Foto eines Voloxidationsgeräts in PRIDE bei KAERI®.

### VERDICHUNG DES PULVERS

Die Korngröße des Brennstoffmaterials kann im Voloxidator zwischen weniger als 1 mm und etwa 10 mm variieren (was der ursprünglichen Pelletgröße nahekommt). Das feine Pulver ist in der Salzschnmelze schwer zu handhaben und muss daher verdichtet werden. Dies kann in der Voloxidationsanlage erfolgen, oder es kann eine andere Verdichtungsanlage für die Fraktion der Körner mit weniger als 1 mm verwendet werden. Ein Beispiel für das durch Verdichtung in der Voloxidationsanlage in PRIDE bei KAERI erhaltene Brennstoff-Material ist in ABBILDUNG 17 dargestellt.



ABBILDUNG 17 Uranoxidgranulat nach der Voloxidation in Argonatmosphäre in PRIDE, KAERI®.

#### 4.4.

### Elektrolytische Reduktion

Bei der elektrolytischen Reduktion wird der Oxidbrennstoff mit Hilfe von Elektronen, die von einer externen Stromquelle geliefert werden, in eine metallische Form überführt, die später im Elektro-raffineriebetrieb verwendet werden kann. Die Reaktion findet in einer Anlage mit einer inerten (Platin-) Anode und einer Stahlkorbkathode statt, die den Oxidbrennstoff in geschmolzenem LiCl/Li<sub>2</sub>O-Salz bei 650 °C in einer Argonatmosphäre ohne Feuchtigkeit enthält. Eine schematische Darstellung des Verfahrens und ein Foto einer Elektroreduktionsanlage (in der PRIDE-Demonstrationsanlage) sind in **ABBILDUNG 18** dargestellt.

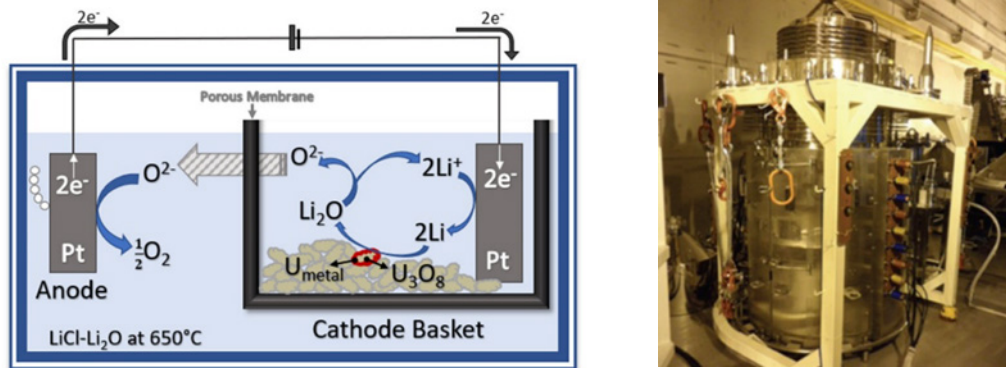


ABBILDUNG 18

Links: Eine allgemeine schematische Darstellung des elektrochemischen Reduktionsprozesses<sup>9</sup>.  
Rechts: Der elektrolytische Reduktionsapparat PRIDE mit einer Kapazität von 50 kg-pro Uranbatch<sup>8</sup>.

Während des elektrolytischen Reduktionsprozesses werden die Aktiniden, Lanthaniden und Übergangsmetalloxide reduziert, und an der inerten Anode entsteht Sauerstoff (siehe Reaktionsbeispiele in Gleichung (2) und (3)). Währenddessen lösen sich die Spaltprodukte der Alkali- und Erdalkalimetallloxide in der Salzschnmelze auf (siehe Reaktionsbeispiele in Gleichung (4), (5) und (6) auf der nächsten Seite).

**Reduktion von Aktiniden-, Lanthaniden- und Übergangsmetalloxiden (sie bleiben ungelöst):**

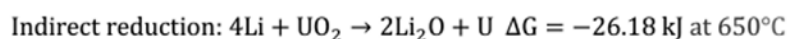
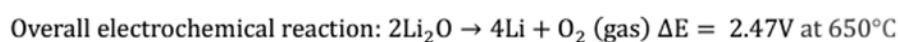
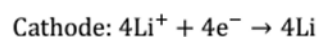
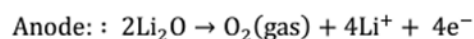
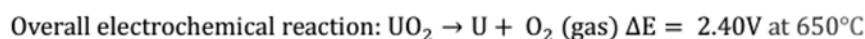
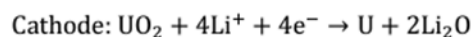
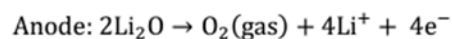
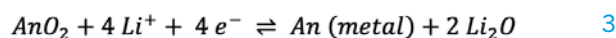
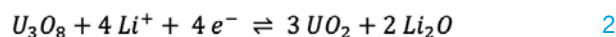


ABBILDUNG 19

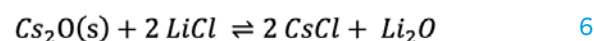
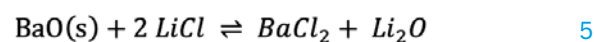
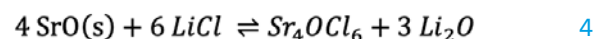
Primärreaktionen bei der Umwandlung von Urandioxid in metallisches Uran<sup>10</sup>.

Zwischen den Potenzialen der direkten und der indirekten Reduktion besteht nur ein geringer Unterschied (0,07 V). Daher wird ein gewisser Beitrag der indirekten Reduktion erwartet, da das Anodenpotenzial während des Prozesses nur geringfügig ansteigt. Wenn sowohl das Potenzial (zur Auswahl der Reaktionen) als auch der Strom (zur Anpassung der Reduktionsgeschwindigkeit an die Diffusionsgeschwindigkeit) gesteuert werden, kann eine Umwandlungsrate von mehr als 99 % erreicht werden<sup>11</sup>.

### SALZ

Es gibt mehrere mögliche Salzschnmelzen aus Chlorid- und Fluoridsalzen ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{LiCl}/\text{CaCl}_2$ ,  $\text{LiF}/\text{CaF}/\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{LiCl}/\text{KCl}/\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{LiCl}/\text{Li}_2\text{O}$  usw.). Die Fluoridsalze sind generell korrosiver und problematischer in der Handhabung als Chloridsalze. Der  $\text{CaCl}_2$ -Gehalt des verwendeten Salzes muss möglichst niedrig sein, weil bei der Abtrennung der Spaltprodukte Strontium und Barium das als Verunreinigung enthaltene Calcium mit entfernt wird und die abgetrennten Spaltprodukte so mit Calcium verunreinigt werden. Transmutex hat Lithiumchlorid für diese Reaktion ausgewählt, weil in dieser Salzschnmelze die Löslichkeit von  $\text{Li}_2\text{O}$  besser ist als im  $\text{LiCl}/\text{KCl}$ -Eutektikum und der Reduktionsprozess daher effizienter ablaufen kann. Reste des  $\text{LiCl}$ -Salzes (ohne den  $\text{Li}_2\text{O}$ -Gehalt) verunreinigen daher auch nicht den nächsten Schritt, das Elektroraffineriesystem. Das eingesetzte Dilithiumoxid ist ein Reaktionspartner im Anodenprozess, da es elektrochemisch aktiv ist und den primären elektrischen Ladungsträger in der indirekten Reduktionsreaktion der Aktinidenoxide darstellt. Die  $\text{Li}_2\text{O}$ -Konzentration sollte etwa 2 % im  $\text{LiCl}$ -Salz betragen. Oberhalb der Löslichkeitsgrenze können Ausfällungen beobachtet werden. Für die effektive Reduktion von Plutonium- und Americiumoxid zu den Metallen ohne Ausfällungen im Salz,<sup>12, 13</sup> gilt eine maximale  $\text{Li}_2\text{O}$ -Konzentrationsobergrenze von 3,3 %. Die Löslichkeit von  $\text{Li}_2\text{O}$  verringert sich mit zunehmender Konzentration der Verunreinigungen, insbesondere bei höherem  $\text{CsCl}$ -Gehalt. Da der Hauptbestandteil des Brennstoffs Uran ist, das sich nicht im Salz auflöst, kann das Salz viele Male wiederverwendet werden. Wenn ein bestimmter Grenzwert für die Verunreinigungen erreicht ist, muss das Salz gereinigt und wiederverwendet werden (siehe einen späteren Abschnitt über Lithiumchlorid Salzbehandlung). Durch die hohe Entfernungseffizienz für Cäsium (98 %) während des Voloxidationsschritts werden lange Standzeiten für das Reduktionssalzgemisch erreicht. Die Hauptverunreinigungen im Salz sind Strontium und Barium, der Rest des Cäsiums löst sich ebenfalls aus dem Brennstoff.

#### Auflösung von Alkali- und Erdalkalimetalloxiden im Salz:



Der Halogenidgehalt des Brennstoffs wird ebenfalls durch das Salz im Reduktionsschritt aufgefangen. Die 100%ige Entfernung von Jod durch den Voloxidationsschritt (und auch der Bromgehalt dürfte sich verringern) ermöglicht es, den Einfluss dieser Elemente in diesem Reaktionsschritt als unbedeutend zu betrachten.

### ANODE

Das für die elektrochemische Reduktion verwendete Anodenmaterial kann inert sein, z.B. Platin, Wolfram, Molybdän oder Gold. In diesem Fall entwickelt sich an der Anode Sauerstoffgas. Während des Prozesses ist die Bildung einer Oxidschicht auf der Oberfläche der Platinanode zu beobachten, und das Anodenpotenzial steigt. Die Entfernung von Cs, Se, Te, I und Br durch den Voloxidationsprozess verhindert den Angriff dieser Spaltprodukte auf die Platinanode und verlängert somit die Lebensdauer der Anode.

Die Verwendung einer reaktiven Grafitanode anstelle einer inerten Anode hat gegenüber inerten Anoden einen Kostenvorteil. Allerdings reagiert das entstehende Kohlendioxidgas mit dem Salz und erzeugt Karbonate. Außerdem verursacht Grafit eine Verunreinigung des Urans mit Urancarbid im reduzierten Produkt, weshalb dieses Anodenmaterial von Transmutex nicht empfohlen wird.

Das genaue Anodenmaterial wird in der Konzeptionsphase ausgewählt.

### KATHODE

Die Kathode stellt den elektrischen Kontakt zum oxidischen Brennstoffmaterial her, dem Brennstoffmaterial selbst und einem Behälter, der es aufnimmt - dem Kathodenkorb (siehe [ABBILDUNG 20](#)). Der Behälter muss in der Lage sein, die freie Diffusion des Salzes zu ermöglichen und gleichzeitig das Oxid-Brennstoffmaterial wirksam einzuschließen. Die Struktur des Behälters sollte porös und stabil gegen thermische und mechanische Stöße sein. Die größere Korngrößen des Oxidbrennstoffs nach der Verdichtung ermöglicht eine größere Porengröße/Maschenweite des Kathodenbehälters, es ist leichter zu handhaben, zu transportieren und aus dem flüssigen Salz herauszufiltern, aber die Reaktion ist etwas langsamer, da die Reduktion von außen nach innen im Korn erfolgt. Die Korngröße wird mit dem Verdichtungsschritt zwischen 1-10 mm eingestellt. Als Kathodenkorb wird ein Netzkorb aus rostfreiem Stahl gewählt (der am häufigsten verwendete Behälter, obwohl seine leitende Beschaffenheit die Umwandlungseffizienz verringert) anstelle eines porösen Magnesia-Filters (nichtleitend, aber mit zu kleinen Poren, was Probleme beim  $\text{Li}_2\text{O}$ -Transport verursacht).

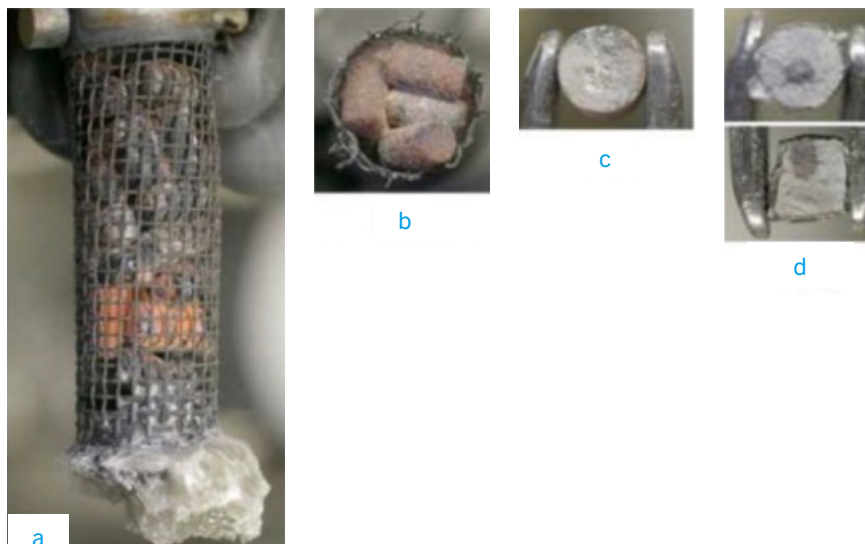


ABBILDUNG 20

Kathodenprodukt nach elektrolytischem Reduktionstest <sup>14</sup>.

(a) Äußeres Erscheinungsbild des Kathodenkorbs; (b) Innenseite des Kathodenkorbs;  
(c) Querschnitt eines reduzierten Oxidpellets; (d) Querschnitt eines teilweise reduzierten Oxidpellets.

### KATHODENPRODUKT

Das reduzierte metallische Brennstoffmaterial wird nach Abschluss der Reduktionsreaktion mit dem Kathodenkorb aus der Salzschnmelze entfernt. Auf der Oberfläche des reduzierten Materials verbleibt immer eine beträchtliche Menge an Salz (20-30 %), das entfernt werden muss. Es ist geplant, sauberes LiCl-Salz zu verwenden, um das reduzierte Brennstoffprodukt von der verbleibenden Li<sub>2</sub>O- und Spaltproduktkontamination durch Abspülen zu reinigen. Anschließend wird das restliche LiCl-Salz durch Vakuumdestillation entfernt. Der Druck (<100 mTorr) und die Temperatur (>1000 °C) können so eingestellt werden, dass das Salz mit seinem Strontium- und Bariumgehalt vollständig verdampft wird<sup>15</sup>. (Der verdampfte strontiumhaltige Teil des Salzes wird in die Masse des gebrauchten LiCl-Salzes überführt und zusammen behandelt). Nicht umgesetzte Oxide können durch Schmelzen der reduzierten Metalllegierung entfernt werden, wobei das Uranoxid in den elektrolytischen Reduktionsschritt zurückgeführt wird, um erneut an der Reduktion zum Metall teilzunehmen. Das metallische Produkt wird in den nächsten Schritt, die Elektroraffination, überführt. Das reduzierte Brennstoffmaterial generiert deutlich weniger Wärme und besitzt weniger Aktivität als der Brennstoff vor dem Reduktionsschritt, da Alkali- und Erdalkalimetallspaltprodukte (wie Sr) mit dem Salz entfernt werden.

4.5.

### Elektroraffination

Der Elektroraffineriebetrieb für die Verarbeitung abgebrannter Brennelemente wurde vom Argonne National Laboratory unter Verwendung des abgebrannten metallischen Brennstoffs des Experimental Breeder Reactors II (EBR-II) entwickelt. Der Raffineriebetrieb verwendete einen Anodenkorb mit metallischen abgebrannten Brennelementen in Form von Stäben mit einer festen inerten Kathode für die Rückgewinnung von sauberem metallischem Uran und eine zweite Kathode mit flüssigem Cadmium für die Rückgewinnung von Transuranen mit Uran und einigen Lanthaniden<sup>4</sup>. Die ursprüngliche Mark-IV-Elektrorefinerieausrüstung und eine schematische Zeichnung des Prozesses sind in [ABBILDUNG 21](#) dargestellt.

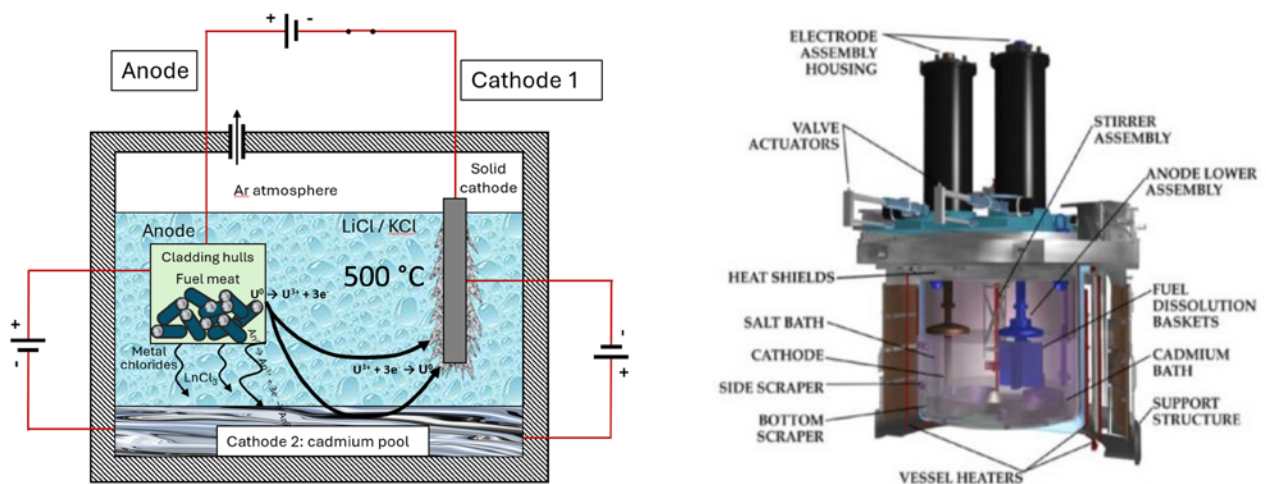


ABBILDUNG 21

Allgemeine schematische Zeichnung des Original-Elektrorefiner-Prozesses auf der linken Seite und das schematische Bild des Mark-IV-Elektrorefiners<sup>16</sup> auf der rechten Seite.

Die Trennung des Prozessschritts der Uran-Elektrorefination vom Prozessschritt der elektrolytischen Gewinnung (vgl. [ABBILDUNG 22](#)) ist eine von KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) vorgeschlagene Entwicklung<sup>8</sup>. Dabei wird eine kompakte, aber komplexe Konstruktion gegen zwei einfachere ausgetauscht. Diese Auftrennung hat mehrere Vorteile, z. B. wird die Möglichkeit einer Kontamination des wiederaufbereiteten Uranprodukts mit Cadmium beseitigt, der Betrieb des Elektrogewinnungsprozesses bei niedrigeren Temperaturen (geringerer Cd-Verlust) ermöglicht, und der parallele Betrieb der beiden Anlagen erlaubt höhere Durchsätze.

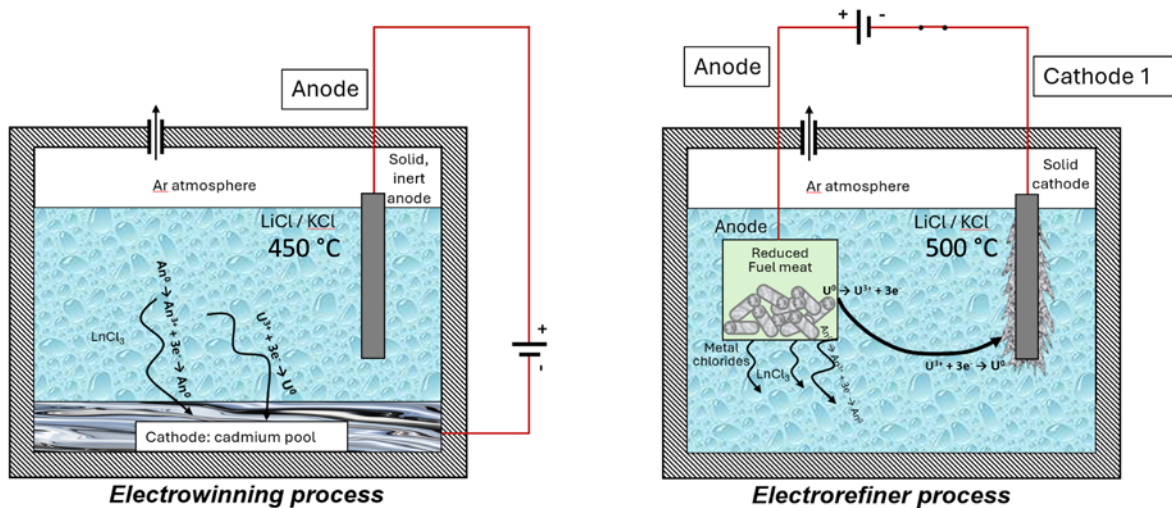


ABBILDUNG 22 Allgemeine schematische Darstellung des Elektrorefinierungsverfahrens ohne Cadmium-Pool auf der linken Seite und des Elektrogewinnungsverfahrens mit Cadmium-Pool auf der rechten Seite.

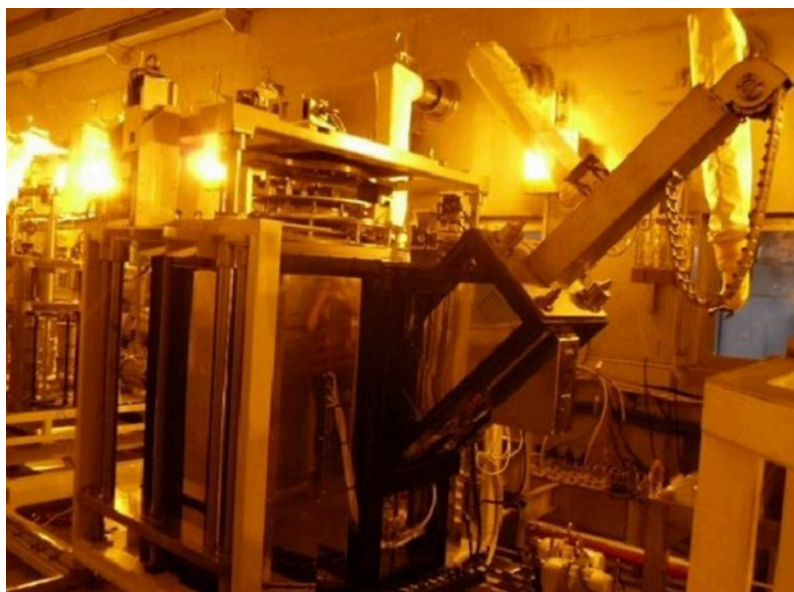


ABBILDUNG 23 Hochdurchsatz-Elektrorefination im technischen Maßstab mit einer Kapazität von 50 kg pro Ansatz, PRIDE KAERI<sup>8</sup>.

Das metallische abgebrannte Brennstoffprodukt wird von der elektrolytischen Reduktionsstufe zum Elektrorefiner in den Anodenkorb überführt. Dieser liegt als Elektrode gegen eine inerte Feststoffkathode im  $\text{LiCl/KCl}$ -Eutektikum bei 500 °C unter Argonatmosphäre vor. Ein Beispiel für eine Elektroraffination ist in [ABBILDUNG 23](#) dargestellt. Es ist vorgesehen, eine ähnliche Konstruktion zu verwenden.

Zu Beginn des Elektroraffinierungsvorgangs wird der Anodenkorb gefüllt und in die Salzschnmelze eingesetzt. Die saubere Kathode wird eingesetzt. Die Masse des Salzes wird auf den gewünschten Wert eingestellt. Die  $\text{UCl}_3$  Konzentration im Salz wird (mit zusätzlichem  $\text{UCl}_3$  Salz) auf 5-9 % eingestellt. Die Anlage wird unter Ar-Atmosphäre geschlossen. Danach wird die Spannung angelegt und auf dem gewünschten Wert gehalten. Der Strom wird verfolgt. Die Uran- und Plutoniumkonzentrationen werden im Salz mit speziellen (elektrochemischen) Sensoren<sup>17</sup> kontinuierlich gemessen. Das Uran, die Transurane und die Lanthanoide werden zu dreiwertigen Kationen oxidiert und als Chloride im Salz aufgelöst. Die Übergangsmetalle werden nicht oxidiert, sie bleiben im Anodenkorb. An der Kathode werden die Urankationen zu reinen metallischen Uranablagerungen reduziert und in dendritischer Form an der Kathode abgeschieden. Diese Reaktion dominiert den ersten Schritt, sie ist beendet, wenn:

- der Strom unter einen bestimmten Grenzwert fällt
- das Potenzial eine bestimmte Grenze erreicht
- die Transuran-Konzentration einen bestimmten Grenzwert erreicht
- die Radioaktivität oder die Wärmeproduktion einen bestimmten Grenzwert erreicht.

In den ersten beiden Fällen ist der lösliche Metallgehalt im Anodenkorb aufgebraucht. Der Vorgang endet mit dem verbrauchten Salz, das im nächsten Betriebszyklus mit neuen oder entleerten und gereinigten Elektroden wiederverwendet wird. In den letzten beiden Fällen muss das verbrauchte Salz in die elektrolytische Gewinnung überführt werden. Das saubere Salz wird im nächsten Betriebszyklus mit einer neuen oder gereinigten Kathode und dem gebrauchten Anodenkorb (mit zusätzlichem metallischem Brennstoff) verwendet.

### ELEKTROCHEMISCHE REAKTION DER TRANSURANE

Die treibende Kraft der Reaktion im Elektrorefiner ist der Unterschied in der freien Energie der Chloridbildung aus den Metallen (siehe [ABBILDUNG 23](#)) im Anodenkorb. Durch die Aufrechterhaltung des richtigen Potentials in der Elektrorefiner-Zelle (das Elektrodenpotential der  $\text{U} / \text{U}^{3+0}$  Reaktion) können die Metalle im Anodenkorb nach diesen Werten als Uran, „edlere“ (wie Zr, Cd, Fe, Mo...) und „unedlere“ (hauptsächlich Transurane und Thorium, Lanthaniden, Alkali- und Erdalkalimetalle) Elemente gruppiert werden. Ab einer bestimmten  $\text{UCl}_3$  -Konzentration im Salz und unter Ausnutzung des Potentials wird nur das Uran als reines Uran an der Kathode abgeschieden (wenn keine nennenswerte Menge an „edleren“ Elementen im Salz gelöst ist). Von den Metallen am Anodenkorb werden die „edleren“ Elemente nicht oxidiert und verbleiben im Anodenkorb, die „unedleren“ Elemente werden oxidiert und im Salz gelöst (auf der Grundlage ihres Oxidationspotentials werden die „unedleren“ zuerst gelöst).

Wenn die Konzentration des gelösten Uranchlorids im Vergleich zu den Transuranen durch Abscheidung an der Kathode zu niedrig wird, ändert sich das Kathodenpotential und die Abscheidung von Transuranen beginnt.

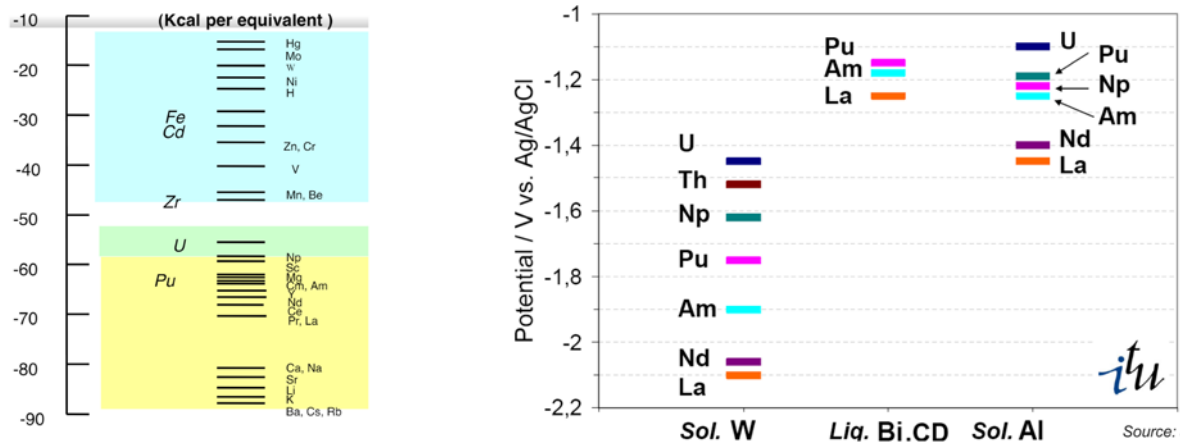
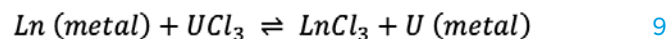
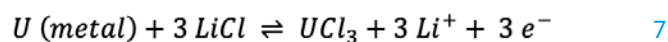


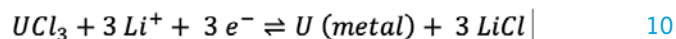
ABBILDUNG 24

Links\*: Freie Gibbs-Energien der Bildung verschiedener Chloride auf einer Stahlkathode Rechts<sup>19</sup>: Reduktionspotentiale einiger Aktiniden und Lanthaniden ( $M^{3+}/M^0$ ), ( $Am^{2+}/Am^0$ ) und ( $Th^{4+}/Th^0$ ) auf verschiedenen kathodischen Materialien<sup>18</sup>.

Anodische Auflösung von Uran und anderen Metallen im Anodenkorb „unedler“ als Uran:



Kathodische Abscheidung von Uran auf der Kathode:



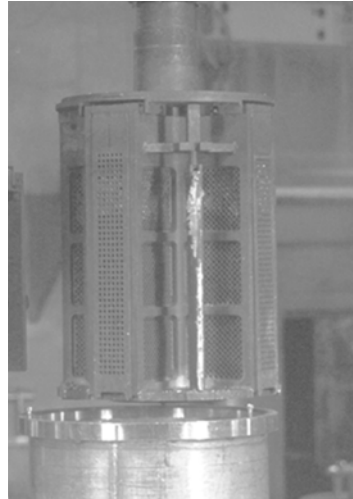
## ANODE

Die Anode ist ein Metallkorb mit einer Porengröße, die groß genug ist, um das Salz durchzulassen, und klein genug, um die verbleibenden festen Metalle aufzunehmen. Das Material ist normalerweise Stahl. Ein Beispiel ist in [ABBILDUNG 25](#) gezeigt. Die Gestaltung der Anode und die Wahl des Materials werden in der Konzeptionsphase festgelegt.

Nach Beendigung des Betriebszyklus der Elektroraffination wird der Anodenkorb entfernt, und das verbleibende Anodenprodukt vom anhaftenden Salz durch Vakuumdestillation gereinigt. Es geht in dieser Form als MAW in den metallischen Abfallstrom. Dazu wird gegebenenfalls noch einmal mit Salz gewaschen und destilliert.

ABBILDUNG 25

Foto des Treiberbrennstoff-Anodenkorbs (DAB) in der FCF, USA. Das Fassungsvermögen des DAB fasst zerhackten Brennstoff aus drei Brennelementeinheiten. Die typische Ladung liegt zwischen 13 und 17 kg HEU. DAB beladen mit zerkleinertem Brennstoff (links), DAB bei der Entladung mit auf dem Tisch verschütteten Hüllen (rechts) <sup>4</sup>.



### KATHODE

Das Kathodenmaterial ist ein inertes Metall, in der Regel Stahl. (Die Verwendung eines reaktiven Materials wie Aluminium würde zu einem legierten Kathodenprodukt führen, das sowohl Uran als auch Transurane enthält). Das Uran wird auf der Oberfläche als reines Metall in dendritischer Form abgeschieden und wächst zur Anode hin. Die Kathode und die Kathodenprodukte sind dargestellt in [ABBILDUNG 26](#).

Um die ursprüngliche Geometrie in der Elektrorefinerzelle beizubehalten und einen direkten Kontakt mit der Anode zu vermeiden, dreht sich die Kathode während des Betriebs (der Grund für die unterschiedlichen Richtungen der Dendriten) und die Dendrite werden entweder periodisch oder kontinuierlich von der Kathode abgeschabt. Die herabfallenden Dendrite werden in einem Korb unterhalb der Kathode aufgefangen.

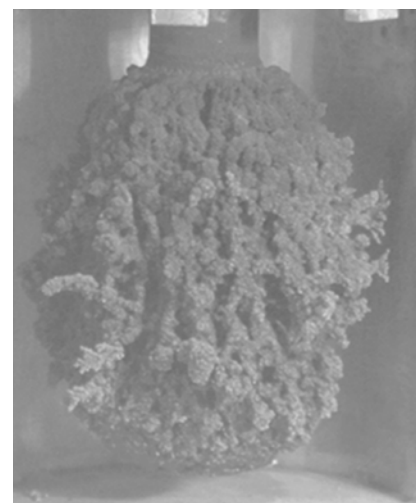
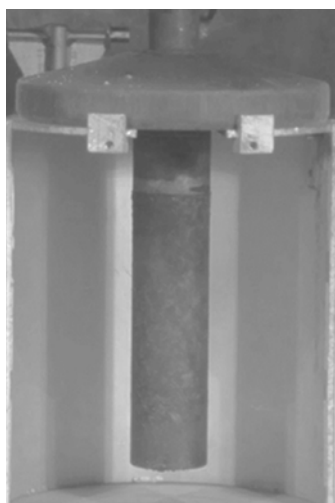


ABBILDUNG 26

Foto des festen Kathodendorns (SCM). Von links nach rechts: blanker Dorn (6,35 cm OD), elektronisch gereinigte Uranmetallablagerung (25,4 cm OD und 25,4 cm hoch), elektronisch gereinigte Ablagerung von Uran/Zirkonium-Legierung (FCF, USA) <sup>4, 17</sup>.

Nach Beendigung des Betriebszyklus der Elektroraffination wird die Kathode entfernt und das Kathodenprodukt vom anhaftenden Salz gereinigt (durch Salzspülung und anschließende Vakuumdestillation in der Kathodenprozessoranlage - siehe [ABBILDUNG 27](#)). Das reine Uran wird dann zu Metallblöcken geschmolzen (siehe [ABBILDUNG 28](#)) und gelagert. Ein kleiner Teil des Uranbarrens wird chloriert und bereits im Verarbeitungsprozess verwendet, um die ursprüngliche  $UCl_3$ -Konzentration im Salz des Elektrorefiners zu Beginn eines jeden Zyklus anzupassen.

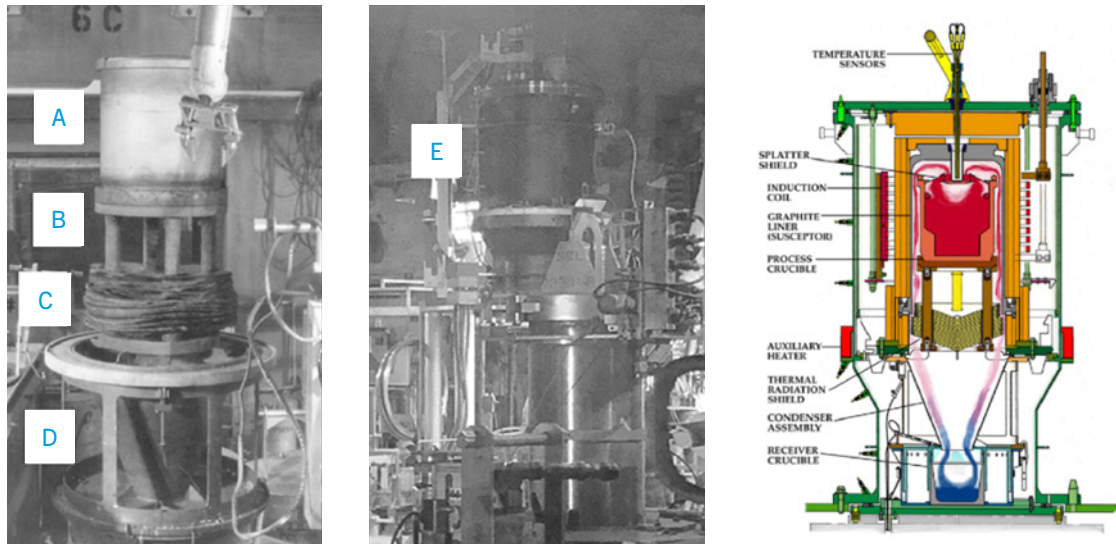


ABBILDUNG 27

Der Kathodenprozessor in FCF, USA [4]. Links: Tiegelstapel mit Zirkonioxidschichteten Grafittegel oben und Hitzeschilden unten. Mitte: Gesamtansicht des Ofens des Kathodenprozessors. Grafit-Produkttegel (A), Grafit-Sockel (B), Tantal-Hitzeschilde (C), Kondensatorbereich (D), Vakuum-Induktionsofen (E). Rechts: Schematische Darstellung der Kathodenprozessorausrüstung<sup>19</sup>.

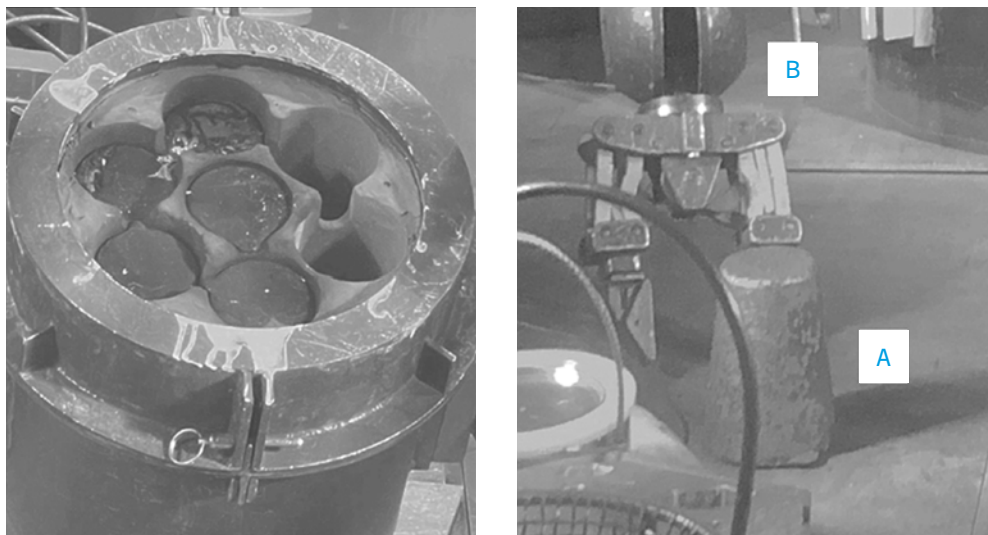


ABBILDUNG 28

Fotos von kleinen HALEU-Blöcken, die in der Regel 3 oder 7 kg wiegen. 7-kg-Barren noch in der Form (links) und 7-kg-Barren, die aus der Form genommen wurden (rechts). Kleiner HALEU-Block (A), ferngesteuerte Manipulatorhand (B) <sup>4</sup>.

**ELEKTRO-REFINERSALZ**

Das eutektische LiCl/KCl-Salz löst mit den Raffinierungszyklen mehr und mehr Aktiniden und Spaltprodukte. Wenn der Gehalt an Transuranen oder Spaltprodukten eine bestimmte Grenze erreicht, muss das Salz in die elektrolytische Gewinnung zurücküberführt werden.

Mit der Entwicklung eines neuen Hochtemperatur-Transportsystems<sup>20</sup> kann das Salz heiß und in flüssiger Form transportiert werden. Die in der Salzschnmelze vorhandenen festen Partikel werden durch Filtration entfernt.

**ELEKTROAFFINATION ABGEBRANNTER, METALLISCHER BRENNNELEMENTE AUS START**

Der metallische, abgebrannte START-Brennstoff wird in Form von Stababschnitten geliefert, möglichst ohne Hüllrohrabschnitte. Er enthält noch eine beträchtliche Menge an Alkali- und Erdalkalimetallen und anderen Spaltprodukten, da es nicht die Voloxidations- und elektrolytischen Reduktionsverfahren durchlaufen hat, bei denen viele Spaltprodukte, einschließlich der wärmeproduzierenden, entfernt wurden. Das bedeutet, dass die Oberfläche der Stababschnitte kleiner ist und das Salz viel mehr Spaltprodukte auflöst und häufiger recycelt werden muss, und dass die Abtrennung bestimmter Spaltprodukte aus dem Salz schwieriger ist als beim Oxidbrennstoff. Der metallische Brennstoff aus dem START Reaktor verwendet Thorium als Grundmaterial. Thorium hat im eutektischen Salz ein ähnliches elektrochemisches Verhalten (Standardpotential) wie Uran, sodass das chemische Verhalten im Salz und auch im Kathodenprodukt ähnlich ist. Das Kathodenprodukt ist in diesem Fall eine Uran-Thorium-Legierung in einer weniger dendritischen Form. Im Kathodenprozessor wird dem Kathodenprodukt aus Thorium-Uran-Legierung wiederaufbereitetes oder abgereichertes Uran zugesetzt, bevor es zu homogenen Blöcken geschmolzen wird. Das Verhältnis von Uran-238 zu Uran-233 im Endprodukt muss aus Gründen der Nonproliferation einen bestimmten Wert erreichen (Isotopenverdünnung), bevor es an Kunden geliefert werden kann. Das Altsalz wird dem nächsten Schritt, der elektrolytischen Gewinnung, zugeführt, wenn der TRU-Gehalt hoch genug ist oder es zu viel Spaltproduktkontamination enthält.

## 4.6.

**Elektrolytische Gewinnung von Transuranen**

Das Salz aus dem Elektroaffineriebetrieb wird in die elektrolytische Gewinnung überführt, um die Aktinide durch elektrochemische Reaktionen homogen und gruppenselektiv zurückzugewinnen. Das LiCl/KCl-Salz enthält erhebliche Mengen an Aktiniden- und Spaltproduktchloriden. Die Anode ist ein inertes Metall, die reduktive Extraktion der Aktiniden erfolgt an einer reaktiven Metallkathode, z. B. an geschmolzenem Cadmium, Wismut oder Aluminium. Bei der elektrolytischen Abscheidung der Aktiniden an der Kathode werden ihre chemischen Aktivitäten (die Aktivitätskoeffizienten) durch die Bildung einer intermetallischen Verbindung mit dem Kathodenmaterial reduziert, wie z. B.  $\text{PuCd}_6$  und  $(\text{U}, \text{Pu})\text{Cd}_{11}$ . Eine flüssige reaktive Kathode kann Aktinide lösen und an der Kathode stabilisieren, während auf einer inerten festen Kathode die Ablagerung nur schwer zu stabilisieren sind, aber hohe Trennfaktoren erreicht werden können. Die Reduktionspotenziale von Aktiniden und Lanthaniden auf verschiedenen Kathodenmaterialien sind in [ABBILDUNG 24](#) (W=Wolfram/Wolfram, inert) dargestellt, und ein Diagramm über den Trennungsfaktor zwischen Plutonium und Cer bei Verwendung verschiedener reaktiver Kathodenmaterialien findet sich in [ABBILDUNG 29](#).

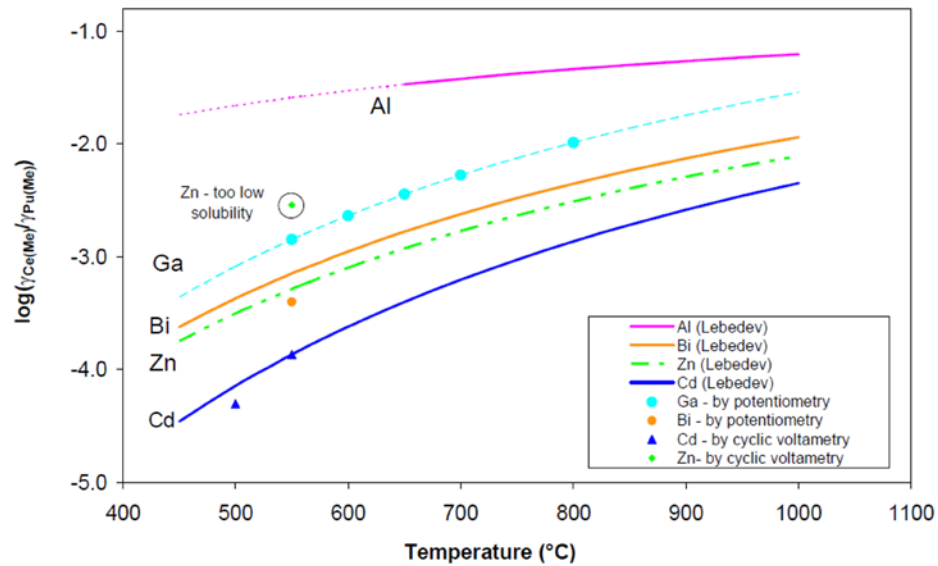


ABBILDUNG 29 Vergleich des Verhältnisses  $\gamma_{\text{Ce(Me)}} / \gamma_{\text{Pu(Me)}}$  in verschiedenen metallischen Lösungsmitteln als Funktion der Temperatur<sup>14</sup>.

Die Reihenfolge der Selektivität für die Plutoniumreduktion im Vergleich zur Reduktion von Cer (Lanthaniden) bei den betreffenden Flüssigkathoden ist wie folgt:  $\text{Al} > \text{Ga} > \text{Bi} > \text{Zn} > \text{Cd}$  bei einer bestimmten Temperatur<sup>14</sup>. Dies bedeutet, dass Aluminium die größte Abscheidungseffizienz in Chloridsalzen hat. Allerdings hat nur Cadmium einen so niedrigen Siedepunkt (767 °C), dass es von den metallischen Aktiniden durch Destillation wirtschaftlich sinnvoll abgetrennt werden kann. Bei den anderen flüssigen Kathodenmaterialien ist die oxidative Aktiniden-Rückextraktion das derzeit vorgeschlagene Trennverfahren. Daher wird für die elektrolytische Gewinnung eine flüssige Cadmiumkathode (LCC) verwendet. Die Temperatur beträgt 450 °C, um den Dampfdruck des Cadmiums im System zu senken.

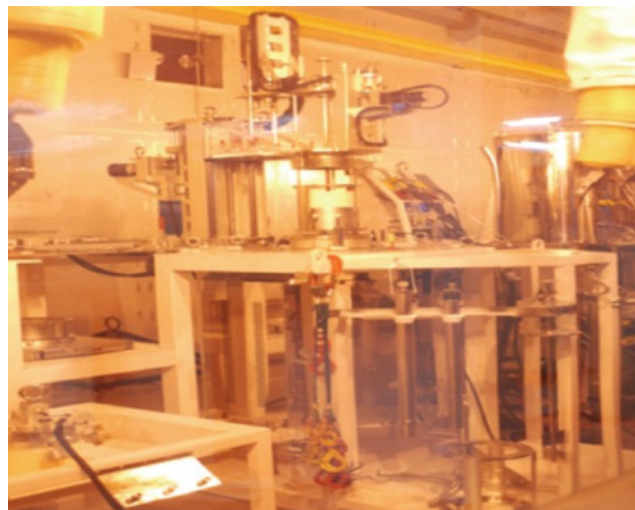


ABBILDUNG 30 PRIDE LCC Elektrogewinnungsanlage<sup>8</sup>.

Das LiCl/KCl-Salz enthält metallische Chloride wie  $\text{UCl}_3$ ,  $\text{PuCl}_3$ ,  $\text{AmCl}_3$  und  $\text{LaCl}_3$ . Bei Anlegen des richtigen Potenzials werden die Aktinidenchloride an der Cadmiumoberfläche zu ihren metallischen Formen reduziert. Die Aktinidenmetalle lösen sich in dem flüssigen Cadmium, bis ihre Konzentration die Löslichkeitsgrenze (Sättigung) erreicht. Nach der Sättigung werden hauptsächlich festes Uranmetall und die feste intermetallische Verbindung  $\text{PuCd}_6$  gebildet. Aufgrund der engen Reduktionspotentiale der Aktiniden kann das restliche Uran im Salz nicht von den Transuranen getrennt werden. Einige Lanthanidenspaltprodukte werden ebenfalls in der Kathode gesammelt. Dies ist ein proliferationsresistentes Merkmal, das dieses Verfahren im Vergleich zum PUREX proliferationssicher macht. Das Verfahren wird in Korea durch KAERI bereits im Technikumsmaßstab durchgeführt, die [ABBILDUNG 31](#) und [ABBILDUNG 32](#) zeigen Installationen aus diesem Technikum.



ABBILDUNG 31

Foto der LCC-Elektrodeneinheit im technischen Maßstab und eines neuen Cadmiumbarrens. Bei der LCC-Einheit handelt es sich um einen Berylliumoxid-Tiegel, der 26 kg Cadmium enthält und für die TRU-Rückgewinnungsexperimente nach der Verarbeitung des EBR-II-Deckelbrennstoffs in einem Elektrorefiner verwendet wurde<sup>21</sup>.

Das metallische Uran wächst in dendritischer Form aus dem flüssigen Cadmium in Richtung Gegenelektrode. Die Dendriten werden, bevor sie die Oberfläche erreichen, durch ein Netz oder ein Sieb gebrochen, das sie regelmäßig in das Cadmium zurückdrängt, was zu einer besseren Ausbeute führt.

ABBILDUNG 32

Foto des fertigen LCC-Blocks mit einigen Uran-Dendriten, die sich auf der Oberfläche des LCC-Blocks gebildet haben<sup>22</sup>.



Die elektrolytische Gewinnung ist beendet, wenn die Konzentration der Aktinide im Salz unter einen bestimmten Grenzwert gesunken ist. Dann werden die Anode und die Cadmiumkathode entfernt, und das Salz wird in den Prozess der Rückgewinnung von Restaktiniden überführt. Das Cadmium lässt man langsam erstarren, das restliche Salz kann physikalisch von oben entfernt werden. Die metallischen Aktinidablagerungen werden am Boden konzentriert. Der Cadmiumbarren wird zum Kathodenprozessor transportiert, wo das verbleibende Salz verdampft wird, der restliche Cadmiumgehalt wird durch Destillation in die elektrolytische Gewinnung zurückgeführt und das verbleibende Aktinidkathodenprodukt (U/TRU-Produkt) wird geschmolzen und zu Barren verarbeitet. Diese U/TRU-Barren werden als Ausgangsmaterial für die Produktion von START Brennelemente in die Anreicherungsstufe überführt.

Bei der Aufarbeitung von metallischem START-Brennstoff wird derselbe Vorgang durchgeführt, lediglich die Nuklidzusammensetzung ist eine andere, sodass Aktiniden-Blöcke entstehen, die auch Thorium enthalten (Th/U/TRU). Diese Th/U/TRU-Blöcke werden ebenfalls in die Anreicherungsstufe zur Herstellung von frischen START Brennelementen überführt.

4.7.

### Anpassung der Anreicherungsstufe

Die Anpassung der Anreicherung erfolgt in einem kombinierten Schritt, der im Wesentlichen wieder eine Elektroraffination enthält. Im ersten Schritt werden berechnete Mengen an Uran/Thorium und Uran/Thorium/Transuran-Metallbarren in den Anodenkorb eines Elektrorefiners überführt und aus frischem LiCl/KCl-Salz, dem etwas Thoriumchlorid zugesetzt wird, wird die U/Th-Legierung entfernt, bis die gewünschte Anreicherung an TRU in der Salzschnmelze erreicht ist. Das Kathodenprodukt ist eine Thorium-Uran-Legierung (Th/U), die wiederum für die Herstellung von Brutbrennstoff verwendet werden kann. Die erforderliche TRU-Anreicherung in der Salzschnmelze wird durch gezielte Entfernung von Th/U-Kathodenprodukt erreicht. Um den Brennstoff mit der gewünschten Anreicherung an TRU zu erhalten, ist mit der verbliebenen Salzschnmelze nur noch der Schritt der elektrolytischen Gewinnung, gefolgt von den oben erwähnten Kathodenverarbeitungsvorgängen, durchzuführen. Der resultierende Barren aus Aktinidenlegierung enthält hauptsächlich Thorium, maximal 1 % Uran und die erforderliche Masse an Transuranen zur Anreicherung (welche später im START Reaktor der Spaltung / Transmutation unterworfen werden). Diese Metalllegierung dient der Herstellung von START Brennelementen und wird daher als Barren an die Brennstoffherstellung überführt.

4.8.

### Entfernung restlicher Aktinide (RAR)

Das verbrauchte Salz aus der elektrolytischen Gewinnung wird in die RAR-Stufe überführt. Ziel ist es, den Rest des Aktinidgehalts aus dem Abfallstrom zu entfernen. Die Anforderung besteht darin, mehr als 99,9 % der Aktinide im Vergleich zum ursprünglichen Gehalt des Brennstoffs zu entfernen. Dies kann durch eine mehrstufige reduktive Gegenstromextraktion mit flüssigem Wismut erreicht werden<sup>23</sup>, siehe auch [ABBILDUNG 33](#):

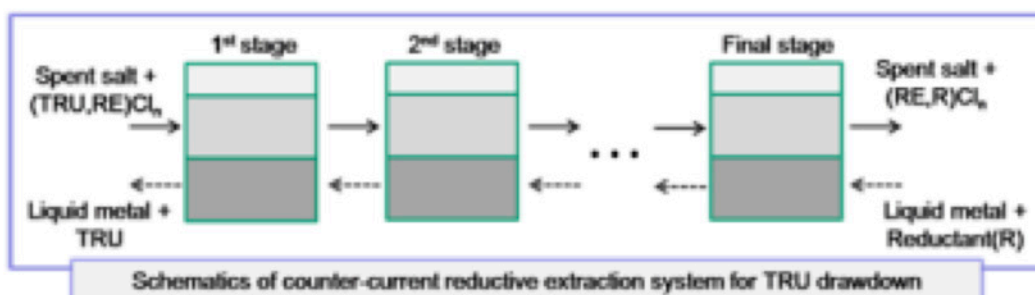


ABBILDUNG 33

Schema der reduktiven Gegenstromextraktion für die Rückgewinnung von TRU-Resten<sup>23</sup>.

Das verwendete Salz aus der elektrolytischen Gewinnung enthält eine geringe Anzahl von Aktiniden und eine wesentlich größere Anzahl von Lanthaniden sowie einige andere Spaltprodukte als Chloridsalze. Die verbleibenden Aktiniden werden durch Zugabe von Lithium als Reduktionsmittel selektiv dem flüssigen Wismut entzogen.

| Recovery Yield [%] |          |             |             |
|--------------------|----------|-------------|-------------|
| Elements           | 2 stages | 3 stages    | 4 stages    |
| U                  | 99.99976 | 99.99999966 | 99.99999999 |
| Np                 | 99.98561 | 99.99983545 | 99.99999811 |
| Pu                 | 99.96815 | 99.99945714 | 99.99999073 |
| Am                 | 99.87715 | 99.99586504 | 99.99986059 |
| Pr                 | 28.50892 | 28.30503614 | 28.18009275 |
| Ce                 | 28.80722 | 28.64376113 | 28.53589354 |
| Nd                 | 32.11181 | 32.46418015 | 32.60166812 |
| La                 | 9.56794  | 8.92449747  | 8.80613917  |
| Gd                 | 2.09572  | 2.02301214  | 2.01748524  |
| Y                  | 0.03482  | 0.03455888  | 0.03451451  |

TABELLE 2

Erwartete Ausbeute bei der reduktiven Gegenstromextraktion der Aktinide<sup>23</sup>.

Wismut ist selektiver für Aktinide als Cadmium, flüssiges Aluminium ist noch selektiver. Das Flüssigmetall für den RAR wird in der Konzeptionsphase ausgewählt. [ABBILDUNG 33](#) zeigt eine berechnete Rückgewinnungsausbeute der reduktiven Gegenstromextraktion mit einer Aktinidenrückgewinnung von über 99,9 % selbst bei einer dreistufigen Extraktion. [ABBILDUNG 34](#) zeigt einige Fotos von einem vierstufigen Gegenstromextraktor mit KCl-LiCl/Cd.



ABBILDUNG 34

(a) Vierstufiger Gegenstromextraktor mit KCl-LiCl/Cd-System zur Abtrennung von Aktiniden von Lanthaniden; (b) Die Ausrüstung auf der linken Seite war in einer Handschuhbox mit einem Hitzeschild abgedeckt (ABBILDUNG mit freundlicher Genehmigung des CRIEPI)<sup>14</sup>.

Die zurückgewonnenen Aktinide werden zusammen mit einigen Lanthaniden zur elektrolytischen Gewinnung zurücktransportiert, um recycelt zu werden, während das verbrauchte Salz in die Lanthanidentfernung überführt wird.

## 4.9.

**Entfernung von Lanthaniden**

Die Lanthanide im verwendeten LiCl/KCl-Salz (aus dem RAR-Schritt) werden im oxidativen Fällungsschritt durch Einblasen von Sauerstoffgas aus dem Salz entfernt. Nach Abschluss der Fällung setzt sich das Salz in zwei Schichten ab: eine obere reine Salzschrift und eine untere Lanthaniden-Niederschlagsschicht. Die obere Reinsalzschrift kann mechanisch von der Niederschlagsschicht getrennt und als Reinsalz wiederverwendet werden. Das anhaftende Salz aus der Fällungsschicht wird durch Destillation zurückgewonnen, die verbleibenden Lanthanidenoxide und Oxychloride werden als HAW in die Verglasungsanlage weitergeleitet. Ein Beispiel für die bei der Lanthaniden-entfernung verwendete Ausrüstung ist in [ABBILDUNG 35](#) dargestellt.

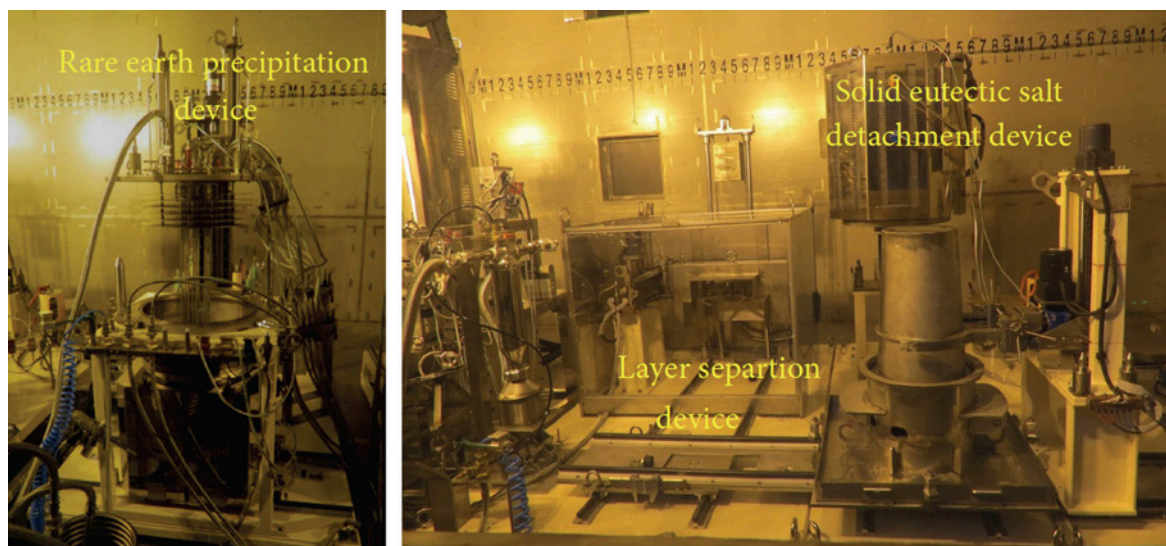


ABBILDUNG 35

Foto der PRIDE-Trennanlage für Seltene Erden im technischen Maßstab (maximale Chargengröße: 25 kg eutektisches Salz/Charge)<sup>8</sup>.

## 4.10.

**Lithiumchlorid Salzbehandlung**

Das verwendete LiCl aus dem elektrolytischen Reduktionsschritt enthält hauptsächlich Erdalkalimetallchloride (wie Strontium und Barium) und einige andere Verunreinigungen (wie das Cäsium, das nicht durch Voloxidation entfernt wurde). Die Verunreinigungen der Spaltprodukte (sowohl Alkali- als auch Erdalkalimetallchloride) können aufgrund ihrer unterschiedlichen Löslichkeiten in der Schmelzphase und in der festen Kristallphase durch einen Schichtkristallisationsprozess in einem kleinen Volumen des LiCl-Salzes konzentriert werden.

Das gebrauchte, geschmolzene LiCl-Salz wird in den Kristallisator überführt. Eine plattenförmige Kristallisatoreinheit wird in das Salzbad abgesenkt. Die Kristallisatorplatten werden von der Innenseite her durch Druckluft<sup>24</sup> gekühlt. Das grundlegende Phänomen im Kristallisator ist die Gefrierpunktniedrigung: Je höher die Schadstoffkonzentration in der Lösung ist, desto niedriger ist der Schmelzpunkt des Systems, sodass es bei einer niedrigeren Temperatur gefriert. Daher kann sich sauberes Salz an den Oberflächen des Kristallisators sammeln, während konzentrierte Salzlösung am Boden zurückbleibt. Die Kristallschicht kann im nächsten elektrolytischen Reduktionsschritt als sauberes Salz aus dieser Schicht wiederverwendet werden, das Strontium wird aus der Lösung abgetrennt und der Rest des konzentrierten Salzes wird als HAW in die Verglasungseinheit geleitet.



ABBILDUNG 36 Kristallbildungsmerkmale an der Außenfläche des Kristallisators.

#### 4.11.

### Eutektische Salzbehandlung

Das verwendete LiCl/KCl-Salz aus der elektrolytischen Gewinnung nach der RAR- und Lanthanid-entfernung enthält noch einige Spaltprodukte, insbesondere im Fall des Recyclings abgebrannter metallischer Brennelemente von START, da keine vorherige Entfernung von Alkali- und Erdalkali-metallen stattgefunden hat.

Die Schmelzkristallisation kann auch in diesem Fall eingesetzt werden. In neueren Studien wurde die Schmelzkristallisation in der umgekehrten vertikalen Bridgeman-Konfiguration erforscht<sup>25</sup>. In diesem Fall befindet sich das verwendete Salz in einem langen vertikalen Rohr und wird langsam von einem heißeren Bereich zu einem kälteren Bereich nach oben gezogen. Bei dieser Technik bewegt sich die Gefrierzone von oben nach unten, die Verunreinigung konzentriert sich in derselben Richtung in der verbleibenden flüssigen Lösung. Eine mehrmalige Wiederholung des Vorgangs verbessert das Trennergebnis. Aus der konzentrierten Salzlösung ist die Strontiumabtrennung nach derselben Methode wie der Reinigung des LiCl vorgesehen. Die verbleibenden Spaltprodukte werden als HAW in die Verglasungseinheit überführt.

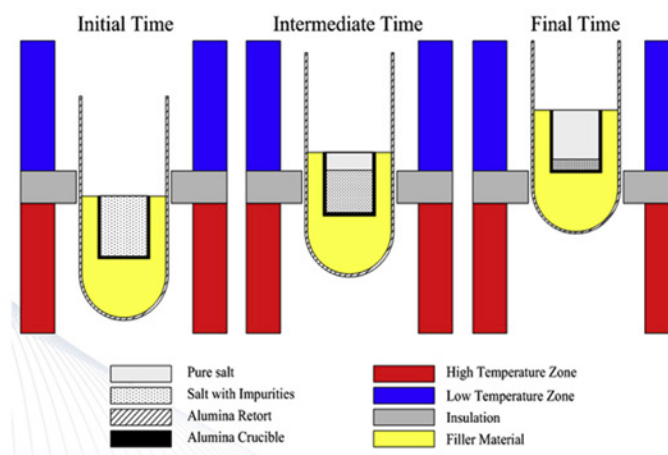


ABBILDUNG 37 Schematische Darstellung des (reverse vertical Bridgeman) Kristallzüchtungsprozesses.

## 4.12.

**Abgasanlage**

Das Abgassystem hat mehrere Funktionen. Es ist mit allen heißen Zellen verbunden, sorgt in ihnen für die erforderliche Schutzatmosphäre sowie in einigen Fällen für die Luftkühlung, filtert die Luft von in ihr befindlichen festen und gasförmigen Verunreinigungen, reduziert (oder sorgt in einigen Fällen für) den Sauerstoff- und Wasserdampfgehalt und hält die erforderlichen Druckunterschiede zur Vermeidung von Verunreinigungen (aus dem Unterdruckbereich) aufrecht. Die wichtigsten gasförmigen Verunreinigungen werden im Voloxidationsprozess erwartet, wo eine intensive Filterung erforderlich ist (spezielle Filter für diesen Zweck existieren bereits). Das Abgassystem befindet sich in der Entwicklung und umfasst verschiedene Vorrichtungen für die Abtrennung der Spaltprodukte sowie die Umwandlung in verschiedene wertvolle Rohstoffe. Es sind dies:

- Cs-137 als -Strahlungsquelle aus dem Cäsiumgehalt,
- Technetium-99dioxid als Transmutationstarget im START Reaktor
- Jod-129 als Bleisalz zur Transmutation
- die Edelmetalle Rhodium und Ruthenium als nicht radioaktive, abtrennbare Edelmetalle
- Krypton-85 als Spurengas für die industrielle Leckageerkennung im Flugzeugbau

## 4.13.

**Verglasung der verbleibenden hochaktiven Abfälle**

Das START-Verfahren trennt abgebrannte Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren (LWR) in ihre Bestandteile auf. Der TRU-Anteil des abgebrannten Brennstoffs, der bis zu 1,5 Gew.-% beträgt, wird bei START zur Transmutation verwendet, die Spaltprodukte werden abgetrennt und teilweise für industrielle oder technische Zwecke zur Verfügung gestellt, während der Rest der Spaltprodukte den hochaktiven Abfall (HAW) bildet. Die Verglasung von HAW wurde als Methode für die langfristige stabile Lagerung in Endlagern gewählt. Dieses Problem ist in der Vergangenheit in vielen Ländern gelöst worden. Bereits im EKRA-Bericht<sup>26</sup> wird die Verglasung als Lagerform für die Langzeitlagerung von HAW im geologischen Tiefenlager erwähnt. Glasformen mit hochaktiven Abfällen sind eine geeignete Lagerform für das zukünftige, geologische Tiefenlager in der Schweiz.

Eine der verfügbaren Verglasungstechnologien heißt PAMELA. Diese Verglasungstechnologie wurde in einem belgisch-deutschen Projekt seit den frühen 1970er Jahren entwickelt. Auf deutscher Seite war vor allem das Institut für Nukleare Entsorgungstechnik (INE) des Kernforschungszentrums Karlsruhe (KfK) beteiligt. Zwischen 1976 und 1983 wurden drei Generationen elektrischer Glasschmelzöfen entwickelt und in inaktiven Versuchsanlagen betrieben, die insgesamt mehr als 100 Tonnen nicht aktives Surrogat-Glas produzierten<sup>27</sup>. In Europa verwenden die Wiederaufbereitungsanlagen in Sellafield und La Hague ihre eigenen Verglasungsprozesse, die derzeit unter Patentschutz stehen. Transmutex hat sich für das PAMELA-Verfahren entschieden, weil es frei von Schutzrechten ist, denn das Verglasungsverfahren wurde in Deutschland mit Bundesmitteln entwickelt und ist daher allgemein verfügbar. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist sein einstufiger Charakter. Der Abfallschlamm wird in einem Schritt in das flüssige Borosilikatglas überführt und es ist keine Vorkalzinierung oder Vorbehandlung des Abfallmaterials erforderlich. Diese Eigenschaften ermöglichen eine kompakte Anlagenbauweise.

Die Pamela-Verglasung ist ein einstufiges Verfahren<sup>28</sup>. Es basiert auf einer flüssigkeitsgespeisten keramischen Schmelzwanne, in der die hochradioaktive Spaltproduktlösung direkt - zusammen oder getrennt mit der inaktiven Glasfritte - in die Glasschmelzwanne eingespeist wird, wo die Prozessschritte Verdampfen, Kalzinieren und Schmelzen gleichzeitig stattfinden. Das Funktionsprinzip der Keramikschmelzwanne beruht auf der Joule-Erwärmung, die genutzt werden kann, da Glas bei hohen Temperaturen ein guter elektrischer Leiter ist. Ein elektrischer Wechselstrom, der zwischen den in das Glas getauchten Elektroden fließt, erzeugt durch den Joule-Effekt Wärme. Die abgeleitete Widerstandswärme hält die Temperatur des geschmolzenen Glases aufrecht und schmilzt das zugeführte Material. Der Schmelzofen hierfür ist aus hochkorrosionsbeständigen, feuerfesten Materialien hergestellt. Die Stromzufuhr erfolgt über vier Paare von Inconel-690-Plattenelektroden, die auf zwei Ebenen des Schmelzraums bei 1150-1200° Celsius angeordnet sind.

Die Entleerung des Glases kann durch einen Bodenablauf oder durch einen luftunterstützten Überlauf erfolgen. Zwei Heizkreise werden verwendet, um die Glastemperatur im Auslasskanal des Bodenablaufs für den Beginn des Glasflusses zu erhöhen. Zur Beendigung des Glasflusses muss nur ein Heizkreislauf abgeschaltet werden. Ein ähnliches Heizsystem wird für die Befüllung der Kanister mit geschmolzenem Glas durch das Bodenablaufsystem verwendet. Die Abgase der Keramikschmelzwanne müssen in einem mehrstufigen Verfahren gereinigt werden, bevor sie in die Umwelt erfolgen abgelassen werden können.

Die Schmelzöfen der dritten Generation mit der Bezeichnung K-3 stellten die Referenz für den aktiven Betrieb dar. Abgesehen von einigen geringfügigen Änderungen waren sie identisch mit den späteren radioaktiven PAMELA-Schmelzöfen. Der K-3-Schmelzofen diente zur Demonstration des kalten Prozesses und wurde 1983 in einer maßstabsgetreuen Versuchsanlage betrieben (siehe [ABBILDUNG 38](#)). Später wurde dieser Schmelzofen für die inaktiven Tests der PAMELA-Anlage in Mol verwendet. Ein Schema des K-3-Schmelzofens ist in [ABBILDUNG 38](#) gezeigt. Aus Gründen der mechanischen Stabilität in Bezug auf Transport und Dichtheit ist der Schmelzofen vollständig von einem Gerüst aus rostfreiem Stahl umschlossen. Der Ofenraum ist mit vier unabhängigen Sätzen von Inconel-690-Plattenelektroden ausgestattet, mit zwei unteren Sätzen entlang des Schmelzraumbodens und zwei oberen Sätzen einige Zentimeter unterhalb des Mindestglasfüllstandes im oberen Bereich des Schmelzraums. Die Elektroden sind an gegenüberliegenden Wänden des Schmelzraums angebracht. Die Anordnung von vier unabhängigen Elektrodengruppen ermöglicht es, die Leistung nach Bedarf zu variieren und zu verteilen. Die normale Leistungsverteilung beträgt 60-70 % für die oberen Elektroden (wegen des höheren Verbrauchs in der Nähe der Prozesszone an der Oberfläche) und 30-40 % für die unteren Elektroden. Die maximale Leistungsaufnahme für den Schmelzofen liegt im Bereich von 100 kW.

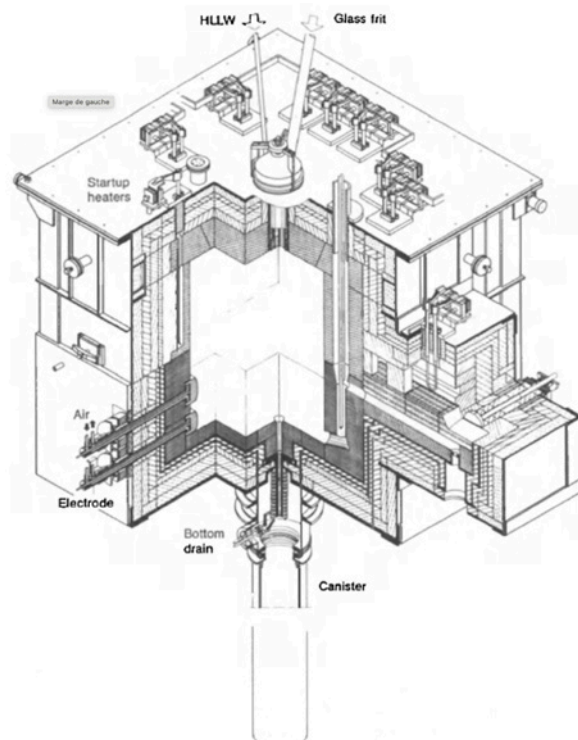


ABBILDUNG 38 Illustration des K-3-Schmelzofens<sup>29</sup>.

### TECHNOLOGIE UND HISTORISCHER HINTERGRUND

Zur Verringerung des Risikopotenzials von 60 m<sup>3</sup> hochaktivem Flüssigabfall aus 20 Jahren Wiederaufarbeitung in der deutschen Wiederaufarbeitungsanlage WAK (Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe), die 10 km nördlich des Stadtzentrums von Karlsruhe liegt, wurde beschlossen, die flüssige hochaktive Abfalllösung in Glaskokillen zu überführen. Am Institut für Nukleare Entsorgungstechnik (INE), Karlsruhe wurde eine 1:1-Prototypanlage für die Verglasung (PVA) gebaut und die PAMELA-Verglasungstechnologie mit nicht-aktiven Proben getestet. Die großtechnische Verglasungsanlage Karlsruhe (VEK) wurde zwischen 1999 und 2005 errichtet. Zwischen September 2009 und November 2010 wurden aus den 60 m<sup>3</sup> hochaktiven flüssigen Abfällen der WAK 140 Glaskokillen erzeugt. Die Kokillen bestanden aus einem Edelstahlbehälter, in den das geschmolzene Borosilikatglas mit allen Spaltprodukten direkt aus dem Schmelzofen eingefüllt wurde. Die Glaskokillen wurden durch Verschweißen mit einem Deckelflansch noch in der heißen Zelle der Verglasungsanlage verschlossen. Nach der Dekontamination und der Prüfung auf Kontaminationsfreiheit wurden sie in eine Zwischenlagerzelle gebracht, wo sie mit Umgebungsluft gekühlt wurden. Alle aus dem Betrieb der WAK stammenden Kokillen wurden in Transportbehälter des Typs CASTOR HAW 20/28 CG verladen und im Februar 2011 per Bahn in das hochaktive Zwischenlager Nord in Greifswald überführt. Diese in der VEK verwendeten Glaskokillen und deren Qualifizierung für eine zukünftige Endlagerung in einem geologischen Endlager bilden auch die Grundlage für die Glaskokillen, die in der Verglasungsanlage der START Anlage hergestellt werden. Die genauen Parameter der Glaskokillen finden sich im [Kapitel 2\\_6.4.8](#). Die Parameter für die in der START Anlage erzeugten Glaskokillen entsprechen den AGRA-Abfallparametern auf der Grundlage der Sellafield-Glasformen von MIRAM14 (siehe Abfalltyp WA-U-KG-K1-HAA im NAGRA-Bericht NTB 22-05)<sup>30</sup>. Der Höchstwert für potenziell spaltbares Material liegt bei 70 g pro Kokille.



ABBILDUNG 39 | Glaskokille beim Schweißen des Deckelflanschverschlusses in VEK <sup>31</sup>.

#### 4.14.

### Entstehender mittelaktiver Abfall (MAW)

Die Hauptbestandteile von mittlradioaktiven Abfällen, die aus der Verarbeitung abgebrannter Brennelemente stammen, sind Kopf- und Fußteil der Brennelementgerüste und deren mechanischen Strukturelemente, die Hüllen und einige Metalle (Basismetalle und Übergangsmetalle), die vom Brennstoffmaterial abgetrennt werden. Sie können mit einer mechanischen Hochdruckpresse gesammelt und verdichtet werden. GNS in Deutschland bietet ein Kompaktierungssystem FAKIR (siehe in [ABBILDUNG 40](#)) an, das für diese Verdichtung eine Kraft von 12 000 kN einsetzt<sup>32</sup>.



ABBILDUNG 40 FAKIR Verdichtungsgerät.

Die verdichteten Metallabfälle können in den Behälter vom Typ MOSAIK II direkt nach der Verdichtung eingefüllt werden (siehe in [ABBILDUNG 41](#)). Diese Behälter entsprechen dem MIRAM-Abfalltyp RA-B-MX-M2-SMA, wie er in der Schweiz bereits für die Lagerung und Entsorgung von Reaktoreinbauten verwendet wird, und sind auch in der Schachtanlage Konrad als Abfalllagerbehälter<sup>33</sup> qualifiziert.

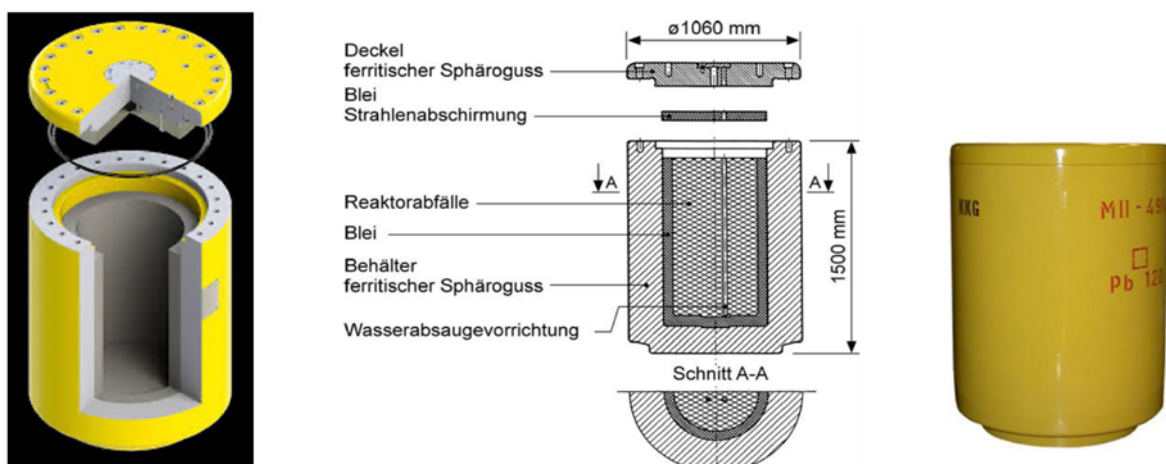


ABBILDUNG 41 MOSAIK II-Behälter.

Dieser Behälter bietet ein abgeschirmtes Innenvolumen von 490 l. Für die Volumenberechnung wird ein Verhältnissfaktor von 7 000 kg/m<sup>3</sup> verwendet (was mit den Verdichtungsergebnissen und der Dichte von Edelstahl/Inconel-Material übereinstimmt). Für die MAW-Berechnung wird angenommen, dass das gesamte Innenvolumen des MOSAIK II-Behälters (= 490 l)<sup>34</sup> gefüllt ist. Dies bedeutet, dass bei überwiegend stahlbasierten MAW-Materialien (490 l/MOSAIK\*7000 kg/m<sup>3</sup> MAW=) 3430 kg MAW in einen MOSAIK II-Container geladen werden können.

Der Aktivitätsgehalt von MAW ist um mehrere Größenordnungen geringer als der von HAW, sodass die Lagerung von MAW weniger anspruchsvolle Anforderungen an das Endlager stellt. Die Hauptaktivität in diesem MAW-Abfall stammt aus der Aktivierung von Ni-Legierungen (Inconel 600 und Inconel 750), die für die Niederhalterfedern im Kopf des SFA verwendet werden. Das wichtigste Radionuklid ist Ni-63. Für Urandioxid- und Mischoxidbrennelemente wurde das mittlere Gewicht der Strukturelemente für die Brennelemente zu 223,2 kg pro Brennelement rechnerisch bestimmt. Die Daten der verwendeten Brennelemente sind für wissenschaftlich Interessierte in [ANLAGE 1](#) aufgeführt.

Mit dem Durchschnittsgewicht lässt sich das Gesamtgewicht des Struktur- und Verkleidungsmaterials abschätzen (1426 FA \* 223 kg MAW/FA = 317'998 kg MAW), welches in (317'998 kg MAW / 3'430 kg/MOSAIK=) 92,7 MOSAIK II-Container geladen werden könnte.

**TABELLE 3** zeigt die Masse des MAW, wie er aus der Wiederaufbereitung jedes Brennelementtyps resultiert, und die Berechnung der erforderlichen Endlagerbehälter (MOSAIK II-Behälter) für diese Art von Abfall. Nur 2,4 Gew.-% des MAW stammen direkt aus der Wiederaufarbeitung, 97,6 % stammen aus Hüllrohren und Strukturelementen der Brennelemente.

| SFA-Typ                                                    | Hüllrohre und Strukturelemente |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| MAW Masse pro Brennelement                                 | 223 kg                         |
| Masse für 1426 aufgearbeitete Brennelemente                | 317 998 kg                     |
| Durchschnittliche Masse des Brennstoffoxids pro BE         | 5,54 kg                        |
| Masse für 1426 aufbereitete BE (hauptsächlich Edelmetalle) | 7 902 kg                       |
| MAW-Masse insgesamt für 1426 BE                            | 325 900 kg                     |
| Masse pro MOSAIK II-Behälter                               | 3 430 kg                       |
| Anzahl der MOSAIK II-Behälter                              | 95                             |

TABELLE 3

Anzahl der MOSAIK II-Behälter für MAW aus der Wiederaufarbeitung von 1426 SFAs eines Konvoi-Reaktors zur Lagerung in der Schachanlage Konrad.

Die berechneten 95 MOSAIK-II-Behälter sind für die Einlagerung in das schwach aktive Abfallendlager der Schachanlage Konrad vorgesehen.

## 5 Berechnungsmethoden

Bei der Berechnung von Nuklidkonzentrationen in Kernreaktoren müssen zwei Effekte berücksichtigt werden:

- Die Brennstoffentwicklung im Reaktorkern wird hauptsächlich von neutroneninduzierten Reaktionen wie Spaltung, Brüten und Aktivierungsreaktionen im Kern bestimmt. Dieser Prozess ist während des Einsatzes des Brennelements wichtig, um seine Reaktivität und seinen Anreicherungsstatus nachzuweisen. Diese Art von Berechnungen wird vor und während des Betriebs des Reaktors durchgeführt und dient dem Nachweis des sicheren Betriebs gegenüber der Sicherheitsbehörde. Normalerweise liegt diese Art von Berechnungen in der Verantwortung des Betreibers. Sie werden vom Betreiber mit Unterstützung des Originalherstellers (OEM) des Reaktors durchgeführt.
- Der spontane Zerfall der radioaktiven Nuklide, insbesondere der erzeugten Spalt- und Aktivierungsprodukte. Dieser Prozess muss bereits in der Phase der Neutronenreaktion berechnet werden. Er beschreibt den Zerfall des radioaktiven Materials in den Brennstäben. Es ist das Hauptverfahren zur Beschreibung des Zerfalls der Spaltprodukte und aller radioaktiven Nuklide nach Beendigung der Kernspaltung. Diese Berechnungen sind für die Betriebsphase eines Reaktors und für die Lagerung abgebrannter Brennelemente unerlässlich. Sie werden daher auch vom Betreiber durchgeführt, da wichtige Parameter wie Radioaktivität und Nachzerfallswärme einen direkten Einfluss auf den Betrieb haben.

### 5.1.

#### Der Kern und die Abbrandberechnungen

Für die Entwicklung der Neutronenreaktionen, die Spaltungs-, Brut- und Aktivierungsreaktionen im Kern beschreiben, müssen folgende Parameter berücksichtigt werden:

- die Position des Brennelements im Kern,
- seine Anreicherung,
- der Kühlmittelfluss durch das Brennelement an seiner spezifischen Kernposition,
- die Kühlmitteltemperatur,
- die Betriebszeit des Reaktors und seine Leistung,
- andere Parameter wie Borsäurekonzentration usw.

Normalerweise wird diese Art von Berechnung vom Betreiber eines Kernkraftwerks durchgeführt, da er Zugang zu allen erforderlichen Betriebsdaten seiner Anlage hat. Diese Berechnungen dienen der Auslegung der Kernbeladungszusammensetzung und zeigen, dass die Kernbeladung dem Rahmen der Betriebsgenehmigung und der nuklearen Sicherheit entspricht. Diese Berechnungen werden für die verschiedenen Betriebsjahre des Reaktors verwendet und ein Brennelement wird für verschiedene Jahre in verschiedenen Kernpositionen berechnet, bis sein Lebenszyklus abgeschlossen ist. Diese Lebensdauer der Brennelemente im nuklearen Brennstoffkreislauf des untersuchten Reaktors hatte meist eine Dauer von 4-7 Jahren mit meist jährlichen Abschaltungen, d. h. die frischen Brennelemente wurden im ersten Jahr eingesetzt und wechselten dann während der nächsten Abschaltungen ihre Position, bis sie am Ende des letzten Betriebsjahres des BE aus dem Reaktor entfernt wurden. Während der gesamten Zykluszeit wurden der Zustand und die Zusammensetzung der BE verwendet, um z. B. nach einem Betriebsjahr ihre verbleibende Anreicherung und Aktivität an ihrer neuen Position im Kern zu berechnen.

Die in Deutschland häufig für diese Zyklusberechnung des Kerns verwendete Software war das traditionelle KORIGEN<sup>35</sup>, das vom Forschungszentrum Karlsruhe unter Verwendung des ORIGIN-Codes von Oak Ridge für die Isotopen- und Abreicherungsrechnung für die DWR-Kerne in den Blöcken A und B von Biblis entwickelt worden war. In dieser Studie verwendete der Betreiber einen deterministischen, gitterbasierten Code CASMO5, der für den deterministischen Ansatz im Wesentlichen die gleichen nuklearen Bibliotheken verwendet wie die moderne Version von SCALE (die neueste evaluierte Version der ORIGIN-Familie). Sowohl der CASMO- als auch der KORIGEN-Code ermöglichen die Bewertung des Nuklidinventars, der Erschöpfung und des Abbrands des in den Reaktorkern geladenen Kernbrennstoffs. Die Nukliddichte des Brennstoffs ändert sich während der Betriebszeit des Reaktors aufgrund von neutroneninduzierten Reaktionen (Spaltung und Einfang) und radioaktiven Zerfällen. Die Genauigkeit der Berechnungen des Brennstoffabbaus im Reaktorkern, d. h. der zeitabhängigen Konzentration von Aktiniden und Spaltprodukten, die bei Spaltungen entstehen, hängt von der Zusammensetzung des frischen Brennstoffs und den Bestrahlungsbedingungen ab, wie z. B. der Reaktorkernauslegung, der spezifischen Reaktorleistung, dem Kernmanagementschema (Umschichtung), d. h. einer Brennstoffbestrahlungsgeschichte, die das auf den Brennstoff auftreffende Neutronenfeld (Neutronenflussdichte) bestimmt. Daher mussten KORIGEN und CASMO für eine Standard-Brennstoffabbrandstudie mit relevanten, vorgenerierten nuklearen Datenbibliotheken versorgt werden, um die Nukliddichte, die Aktivitätsdichte, die verzögerte Neutronenproduktionsrate, die spezifische Zerfallswärme und die kumulative Spontanspaltung, Absorption, den Zerfall und die Spaltreaktionen jedes relevanten Nuklids zu einem bestimmten Zeitpunkt zu berechnen. Um die Verteilung der Spaltprodukte korrekt zu berechnen, benötigt KORIGEN auch direkte Daten zur Spaltausbeute der relevanten spaltbaren Aktiniden. Für die  $(n,\gamma)$  und  $(n,2n)$  Reaktionen werden Verzweungsverhältnisse zum Grundzustand und zu metastabilen Zuständen verwendet. Schließlich mussten für jedes betrachtete Nuklid genaue Zerfallsdaten bereitgestellt werden. Für Studien zum Abbrand von Brennstoff in thermisch kritischen Reaktoren aktualisiert KORIGEN die Neutronenreaktionsraten für jeden Abbrandschritt. Nach der Abschaltung des Reaktors ist die Zerfallswärme (Energie, die durch den Zerfall instabiler Kerne erzeugt wird), die mit KORIGEN bewertet werden kann, die wichtigste Wärmequelle, die für die Reaktorauslegung und Sicherheitsstudien von Bedeutung ist. Ein weiterer Anwendungsbereich von KORIGEN ist die Modellierung der Entwicklung des radioaktiven Inventars. KORIGEN schätzt die Nuklidzusammensetzung des abgebrannten Kernbrennstoffs nach der Entladung der Brennelemente aus dem Reaktorkern, verfolgt die durch radioaktive Zerfallsprozesse und Spontanspaltungen verursachten Änderungen der Nukliddichten und leitet daraus Schlüsseigenschaften des radioaktiven Inventars in Abhängigkeit von der Lagerungszeit des abgebrannten Brennstoffs ab:

- Molare Konzentrationen oder Massen (g) für Nuklide und Elemente
- Radioaktivität (Bq oder Ci)
- Gesamt- und Gamma-Wärmefreisetzung (W)
- Radiotoxizität bei Verschlucken (relativ)
- Radiotoxizität bei Inhalation (relativ)

Heute werden in der Regel fortschrittlichere, modernisierte deterministische Codeversionen wie CASMO/SIMULATE oder SCALE<sup>36</sup> verwendet, die aktualisiert wurden und neben den klassischen reaktorphysikalischen Berechnungen (Abbrand, Restanreicherung, Isotopenkonzentrationen, Nachzerfallswärme, ...) zusätzliche Module wie Kritikalitätssicherheit, Strahlenabschirmung, Monte-Carlo-Transport, Materialspezifikation und Querschnittsverarbeitung und mehr bieten.

Nach der Entfernung des BE aus dem Kern kann CASMO auch zur Berechnung des weiteren Zerfalls der Spaltprodukte und aller im Brennstoff vorhandenen Kernelemente verwendet werden. Normalerweise wird die Anzahl der Nuklide kurz nach der Entfernung des BE aus dem Kern verwendet. Diese Liste der Nuklide unmittelbar nach der Entfernung des BE aus dem Kern ist sehr umfangreich (ca. 2000 Nuklide in den ersten Tagen), was auf die große Zahl kurzlebiger Spaltprodukte zurückzuführen ist. Für die Wiederaufarbeitung, auch nach vielen Jahren des Zerfalls, ist ein Minimum von 99 % der Brennstoffmasse und 99 % der Gesamtaktivität der BE-Zahl erforderlich.

## 5.2.

### Radioaktive Zerfallsberechnungen mittels Bateman-Code

Für die Berechnung in dieser Studie wird ein spezifischerer Code verwendet, der sich auf eine schnelle Berechnung der nuklearen Zerfallsketten eines gegebenen nuklearen Inventars konzentriert. Die Aufgabenstellung für die Planung einer Wiederaufarbeitungssequenz beinhaltet verschiedene Zerfallsberechnungen, die für unterschiedliche Fraktionen des Brennstoffmaterials präzise durchgeführt werden müssen.

Historisch gesehen wurde die Berechnung von radioaktiven Zerfallsketten bereits 1910 von Harry Bateman beschrieben. Zusammen mit Ernest Rutherford, der das Modell 1905 beschrieb, lieferte er die analytische Lösung.

Der Aufbau oder der Zerfall eines Nuklids  $i$  kann zu einem Zeitpunkt  $t$  durch die Zerfallsrate  $\lambda$  beschrieben werden, hier die Formel für das Nuklid 1<sup>st</sup>:

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -\lambda_1 N_1(t)$$

Für die Mengen der Nuklide im  $k$ -ten Schritt einer Zerfallskette, bei denen auch das Vorhandensein des Ausgangsnuklids berücksichtigt werden muss, entwickelt sich die Gleichung für die gesamte Zerfallskette:

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = -\lambda_i N_i(t) + \lambda_{i-1} N_{i-1}(t) \quad \text{und} \quad \frac{dN_k(t)}{dt} = -\lambda_{k-1} N_{k-1}(t)$$

Dabei ist  $N$  das isotopische Inventar des jeweiligen Nuklids  $i$ . Diese Gleichungen können durch Verteilungsfaktor auf verzweigte Fälle angepasst werden. Für  $i=2$  sind sie leicht zu lösen, für längere Zerfallsketten werden die Gleichungen bald sehr komplex. Bateman fand eine allgemeine explizite Formel für die Beträge, indem er die Laplace-Transformation der Variablen verwendete:

$$N_n(t) = N_1(0) \times \left( \prod_{i=1}^{n-1} \lambda_i \right) \times \sum_{i=1}^n \frac{e^{-\lambda_i t}}{\prod_{j=1, j \neq i}^n (\lambda_j - \lambda_i)}$$

Im Grunde wird diese Gleichung auch von KORIGEN, SCALE usw. zur Berechnung der Zerfallsketten verwendet. Die Berechnung wird jedoch immer komplexer, da viele Nuklide auf unterschiedlichen Wegen zerfallen und die Verzweungsverhältnisse aus Datenbanken abgelesen werden müssen. Darüber hinaus müssen für transuranische Isotope zusätzlich die spontane Neutronenemission und die spontane Selbstspaltung berechnet werden, da beide Effekte einen großen Einfluss auf die Zerfallswärmeentwicklung des jeweiligen transuranischen Nuklids haben.

Der von Transmutex verwendete Bateman-Code verwendet für diese Aufgabe die folgenden Datenbanken:<sup>37</sup> :

- Die EAF-2010-Wirkungsquerschnittsbibliothek für neutroneninduzierte Aktivierung<sup>38</sup>
- Die Brookhaven evaluierte Nukleardatenbibliothek ENDFB (Version VIII.0, VII.1, VII.0)
- Die Datenbank der Kernenergiebehörde für Neutronen, Zerfallsdaten, Spaltausbeuten, dpa und Neutronenaktivierung in der Version JEFF (3.3, 3.1.1, 3.1)
- Die Datenbank der japanischen Atomenergiebehörde für Kernreaktionen, Zerfall, thermische Neutronenstreuung, Spaltproduktausbeuten in der Version JENDL (5, DDF15, FPD-2011 und FPD-2000)
- Die UK-Zerfallsbibliothek UKHEDD in der Version (2.4 und 2.6)
- Die UK-Aktivierungsprodukt-Abklingdatenbibliothek UKPADD in den Versionen (6.1, 6.5, 6.8, 6.10, 6.11 und 6.12)

Für Zerfallsberechnungen kann man mit dem Transmutex Bateman-Code relativ schnell die für die Wiederaufbereitung wichtigen Daten auswerten. Beispiele sind:

- Die Masse der Nuklide in der Brennstoffzusammensetzung, alle Schwermetalle, Spalt- und Brutprodukte, Spaltgase und stabile Isotope. Diese Berechnung ist wichtig, um die Gesamtmasse vom Beginn der Berechnung an konstant zu halten (> 99 % der ursprünglichen Brennstoffmasse des BE).
- Die Alpha-, Beta- und Gamma-Emissionsrate jedes einzelnen Nuklids
- Die Zerfallswärme für die Emission von
  - Schweren Teilchen (Alpha, Neutronen, Spaltproduktfraktionen) einschließlich der Neutronenemission spontaner Neutronenemissionen und der thermischen Auswirkungen der spontanen Spaltung transuranischer Isotope
  - Elektronen- und Positronenemissionen, z.B. wichtig für die Emission von mittellanglebigen Spaltprodukten, z.B. Sr-90 oder Cs-137
  - Emission von Gamma- und Röntgenstrahlung und die anschließende Erwärmung durch Gamma- und Röntgenstrahlung

Für jede SFA muss diese Bateman-Berechnung während des Aufbereitungsprozesses mehrmals durchgeführt werden.

- Berechnung der anfänglichen Nachzerfallswärme für das SFA, um zu entscheiden, ob die Nachzerfallswärme niedrig genug ist, um die Wiederaufarbeitung zu beginnen. Im Rahmen der ersten Berechnung wird auch die Nachzerfallswärme für eine direkte Endlagerung im Jahr 2100 ermittelt. Die Ergebnisse werden auch zur Neuberechnung der Wärmelast des Zwischenlagerbehälters verwendet, in den die SFA derzeit geladen ist.

- In einem ersten Schritt wird die Nuklidzusammensetzung zum Zeitpunkt der Wiederaufarbeitung des SFA berechnet. Die weiteren Berechnungen konzentrieren sich auf den Anteil der Spaltprodukte, die für die Glaskokillenerzeugung zur Einlagerung der HAW im Endlager verwendet wird. In diesem Schritt sind die Masse der Nuklide, ihre Emissionsraten und die Zerfallswärme die wichtigsten Parameter zur Berechnung der endgültigen Kokillenzusammensetzung. In diesem Schritt wird die Abtrennung von stabilen oder radioaktiven Spaltprodukten berechnet, die in der Industrie oder Medizin verwendet werden können, z. B. Rhodium, Krypton, Cäsium, Strontium sowie die Massen von Technetium-99, Jod-129 und Selen-79, die zur Transmutation in START abgetrennt werden. Für die Effizienz der Abtrennung werden die Umsetzungsraten und Ausbeuten wissenschaftlicher Veröffentlichungen verwendet (zahlreiche Arbeiten in dieser Richtung wurden z. B. in Korea durchgeführt).
- Berechnung der transuranischen Metallzusammensetzung (TRU), die für die Transmutation im beschleunigergetriebenen START-Reaktor verwendet wird, um sicherzustellen, dass dieser Brennstoff verarbeitet und verwendet werden kann. Die TRU-Menge wird für die Berechnung des Sofortspaltungsprozesses benötigt. Der TRU-Anteil ist ein Ergebnis der anfänglichen Bateman-Berechnung der SFA.
- Berechnung der Spaltprodukte, die bei der Sofortspaltung entstehen. Die Menge der Spaltprodukte, die bei der Spaltung des TRU in START entsteht, wird berechnet. Wichtigste Parameter sind hier die Nuklidmasse, die Emissionsraten und die Nachzerfallswärmeproduktion. Diese zweite Fraktion an anfallenden Spaltprodukten wird ebenfalls verglast. Für die endgültige Glaskokillenproduktion werden die Grenzwerte für die Beladung der Glaskokillen mit Spaltprodukten berücksichtigt. Wie die erste Spaltproduktberechnung berücksichtigt auch diese zweite Berechnung Nuklide, die für Industrie und Medizin potenziell nützlich oder für die Transmutation abtrennt werden können.
- Berechnung der Metallzusammensetzung der Transurane (TRU), die für die Transmutation im beschleunigergetriebenen START-Reaktor verwendet wird, um sicherzustellen, dass dieser Brennstoff verarbeitet und verwendet werden kann. Die TRU-Menge wird für die Berechnung des Sofortspaltungsprozesses verwendet. Der TRU-Anteil ist ein Ergebnis der anfänglichen Bateman-Berechnung der SFA.
- Berechnung der Spaltprodukte, die bei der Sofortspaltung entstehen. Die Menge der Spaltprodukte, die bei der Spaltung des TRU in START entsteht, wird berechnet. Wichtigste Parameter sind hier die Nuklidmasse, die Emissionsraten und die Nachzerfallswärmeproduktion. Diese zweite Fraktion von Spaltprodukten wird der Glasformpräparation zugesetzt. Für die endgültige Glasformpräparation wird der Grenzparameter für die Beladung der Glasform mit Spaltprodukten berechnet. Wie die erste Spaltproduktberechnung enthält auch diese zweite die Nuklide, die für Industrie und Medizin potenziell nützlich oder für die Transmutation abtrennbar sind.
- Während der Wiederaufarbeitungsschritte muss das gesamte Inventar eines abgebrannten Brennelements (SFA) ständig über alle Aufarbeitungsschritte hinweg berechnet werden. Es ist aus Sicherheitsgründen nötig, zu jedem Zeitpunkt im Prozess das Zellinventar und die im Prozessschritt involvierten Massen und Aktivitäten angeben und überprüfen zu können. Spaltbares Material muss aus Sicherheitsgründen (Absicherung der Unterkritikalität) zusätzlich bilanziert und laufend überwacht werden. Das Spaltproduktinventar ist ebenso wichtig für die Berechnung der Zerfallswärme des endgültigen hochaktiven Abfalls. Die abgetrennten stabilen Nuklide werden ebenfalls bilanziert. Deren Mengen haben eher eine wirtschaftliche Bedeutung für den Prozess.

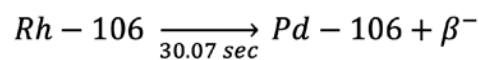
## 5.3.

**Anforderungen an die Datengenauigkeit**

Die von den Betreibern von Kernkraftwerken durchgeführten CASMO-, KORIGEN- oder SCALE-Berechnungen haben für die SFA in der Regel die Anforderung, dass 99 % der Gesamtaktivität der SFA dargestellt werden. Diese Anforderung kann bereits ein oder zwei Jahre nach der Entfernung des SFA aus dem Kern erreicht werden, und eine Nuklidliste von etwa 350 Nukliden pro SFA ist für diesen Zweck ausreichend. Diese Beschreibung des nuklearen Inventars ist ausreichend, um die Zerfallswärme und die Hauptaktivitätsniveaus von Alpha-, Beta- und Gammastrahlern für den Strahlenschutz zu berechnen. Auch für Sicherungszwecke ist diese Anzahl von Nukliden in der Regel ausreichend, da der Hauptgehalt an Schwermetallen enthalten ist, um zu zeigen, wie das restliche spaltbare Material gelagert wird. Der Betreiber stellte für diese Studie in einem ersten Schritt für 911 SFA Datensätze zur Verfügung, die zu Beginn dieser Studie für jedes SFA ~95 % der ursprünglichen Brennstoffmasse enthielten. Für die Vorstudie wurden diese Datensätze (entsprechend ~95 % der ursprünglichen Brennstoffmasse mit ~350 Nukliden pro SFA) für 21 SFA verwendet, um die Größenordnung des HAW-Volumenreduktionsfaktors zu demonstrieren. Natürlich war dieser erste Faktor zu optimistisch, da einige schwach aktive und einige stabile Spaltprodukte, die normalerweise auch in den Glaskokillen entsorgt werden, vernachlässigt wurden.

Für die Wiederaufarbeitungstätigkeit besteht die zusätzliche Anforderung, mindestens 99 % der Masse des Brennstoffmaterials in die Berechnung einzubeziehen. Die Notwendigkeit dieser hohen Genauigkeit der Massenbilanz wird am Beispiel der Nuklidliste des SFA SNF-KWU-FA\_1704\_30\_O demonstriert. Der Datensatz ist in Anhang B aufgeführt. Diese zusätzliche Anforderung, 99 % der Masse des Brennstoffmaterials einzubeziehen, ist für die Wiederaufarbeitung aus folgenden Gründen notwendig:

- Einige stabile Spaltprodukte sind in einer Liste, die sich nur auf den Aktivitätsgehalt von 99% konzentriert, nicht enthalten, da diese stabilen Nuklide nicht zur Aktivität beitragen. In Bezug auf den Massenstrom sind sie jedoch für die Wiederaufbereitung wichtig. Ein Beispiel ist Palladium-106, ein stabiles Zerfallsprodukt, das aus Rhodium-106 entsteht, das bei der thermischen Spaltung von Uran-235 mit einer Spaltausbeute von 0,41 % gebildet wird.<sup>39</sup>



- Rhodium-106 zerfällt unter  $\beta$ -Zerfall zu Palladium-106 mit einer Halbwertszeit von 30,07 Sekunden. In einer Liste von Nukliden, die 95 % der Masse des Brennstoffmaterials ausmacht, ist Palladium-106 nicht aufgeführt, obwohl der Ausgangsstoff Rhodium-106 (aufgrund seines Aktivitätsbeitrags) aufgeführt ist.
- Es gibt weitere stabile sekundäre Spaltprodukte, die zur ursprünglichen Masse des Brennstoffs beitragen. Einige von ihnen sind in [TABELLE 4](#) aufgelistet. Sie tragen aufgrund ihrer relativ hohen Spaltausbeute erheblich zur Gesamtmasse der Spaltprodukte des SFA bei.

| Stabiles Spaltprodukt | Spaltausbeute [%]  | Übergeordnetes Nuklid | Zerfall                                                        | Halbwertszeit                     |
|-----------------------|--------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Xe-132                | $4,276 \pm 0,0043$ | Te-132                | Te-132 ( - , $\beta$ ) I-132<br>I-132 ( - , $\beta$ ) Xe-132   | 3 d 4 h 52 min<br>2 h 17 min 42 s |
| Mo-95                 | $6,498 \pm 0,072$  | Nb-95                 | Nb-95 ( - , $\beta$ ) Mo-95                                    | 34 d 23 h                         |
| Rh-103                | $3,103 \pm 0,084$  | Ru-103                | Ru-103 ( - , $\beta$ ) Rh-103                                  | 39 d 6 h                          |
| Pd-106                | $0,41 \pm 0,011$   | Ru-106                | Ru-106 ( - , $\beta$ ) Rh-106<br>Rh-106 ( - , $\beta$ ) Pd-106 | 1 a 6 d<br>30,07 s                |

TABELLE 4

Einige wichtige stabile Spaltprodukte, die im ursprünglichen Nuklidinventar der Vorstudie über abgebrannte Brennelemente nicht enthalten waren.

- Die in den ursprünglichen Datensätzen fehlenden Nuklide tragen zu den industriellen Nutzkstoffen bei, die bei der Partitionierung abgetrennt werden können. Insbesondere die Isotope Rhodium-103 und Rhodium-106 müssen aus wirtschaftlichen Gründen als Seltene Erden/Edelmetalle betrachtet werden.
- Diese Nuklide sind für die Berechnung der Zerfallswärme oder des Aktivitätsgehalts des resultierenden HA nicht sehr bedeutsam, haben aber einen Einfluss auf das Volumen der verglasten HAW, da sie zur Gesamtmenge an Abfalloxid beitragen, die in die endgültige Glaskokille verfüllt werden kann. Diese Menge ist auf 24 Gew.-% des Gesamtglasinventars einer Kokille begrenzt. Daher waren die Ergebnisse der SFA in der Vorstudie in Bezug auf das HAW-Volumen tendenziell zu optimistisch.
- Die Geschichte der Wiederaufbereitungsprojekte in Deutschland zeigt am Fall Wackersdorf, dass eine Wiederaufbereitungsanlage in einer demokratischen Gesellschaft nur mit der Zustimmung der Mehrheit der Bevölkerung gebaut werden kann. Dieser Aspekt hat sich in der Vergangenheit<sup>40</sup> bewährt und ist möglicherweise ebenso wichtig wie die technische und sicherheitstechnische Leistungsfähigkeit einer solchen Anlage. Transmutex verfolgt daher für seine künftige Recyclinganlage eine No-Emission-Philosophie. Zu diesem Zweck ist es unerlässlich, die Berechnung der Recyclingschritte mit höchster Genauigkeit in Bezug auf die Massen- und Aktivitätsbilanz durchzuführen. Ein Prozentsatz von 99 % sowohl für den Massen- als auch für den Aktivitätsgehalt ist daher eine notwendige Voraussetzung für die Ausgangsdatsätze einer Wiederaufbereitungsberechnung.

Aufgrund des Zeitaufwands für die Neuberechnung der Abbranddaten mit höherer Genauigkeit wurden die detaillierteren Datensätze vom Betreiber nach Abschluss der Vorstudie übermittelt. Diese genauen Datensätze wurden für diese Hauptstudie und für alle in den folgenden Kapiteln dargestellten Ergebnisse verwendet. Die Abbranddaten von 1426 SFA beruhen auf Datensätzen, die für jede SFA zwischen 800 und 900 Nuklide enthalten. Diese Daten repräsentieren mehr als 99 % des Aktivitätsgehalts und mehr als 99 % des Massengehalts der SFA und eignen sich gut für Wiederaufbereitungsberechnungen.

## 6 Berechnungsergebnisse

### 6.1.

#### Direkte Entsorgungsoption im Jahr 2100

##### ABKLINGBERECHNUNGEN DER BrenNELEMENTE AUS DER VORSTUDIE

Im ersten Schritt der Berechnung wurde der Inhalt des Behälters TN24-02, der 21 SFA aus dem Reaktor enthielt, bis zum Bezugsdatum 1. Januar 2100 mit den genaueren Datensätzen neu berechnet. Der SFA-Gehalt des Behälters TN24-02 und seine Basisdaten finden sich in der Anlage 2.

Die Gesamtzerfallswärmebelastung des Behälters am 1. Januar 2100 wurde mit 11,2 kW (24 KW im 15. April 2033) und einem Radioaktivitätsinventar von 36,5 PBq berechnet. Diese Berechnungsdaten stimmen mit den Grenzwerten des Behälters TN24 (30 kW) überein, die in der Literatur<sup>41</sup> veröffentlicht wurden.

Die Differenz zwischen der ursprünglichen Masse des Schwermetalls, das zur Herstellung des Brennelements verwendet wurde, und der Menge des Brennelementes (ohne Sauerstoff) des SFA, die mit den Daten auf der Grundlage der verbesserten Kernberechnungsdatensätze gefunden werden konnte, stellt das Minimum der fehlenden Nuklide im ursprünglichen Datensatz dar. Diese Differenz beträgt etwa 1 kg von 11 234 kg ursprünglichem Gesamtschwermetall. Das bedeutet, dass die Berechnung mit den verbesserten Datensätzen nun 99,1 % der ursprünglichen Schwermetallmasse des Brennstoffs enthält und nur 0,89 % in dieser Studie nicht berücksichtigt werden. Diese Datensätze sind daher hinreichend genau, um bei den Recyclingberechnungen zuverlässige und repräsentative Ergebnisse zu erzielen. Die detaillierten Ergebnisse dieser Berechnung der 21 Brennelemente finden sich für die 800-900 berücksichtigten Nuklide aggregiert in Anlage 4 wieder. Für die restlichen 1405 berechneten Brennelemente liegen entsprechende Datensätze als Ausgangspunkt für diese Berechnungen vor, werden aber aufgrund der Datenmenge nicht als Anlage beigefügt.

Für den Fall der direkten Entsorgung wurden Zerfallsberechnungen bis zum 01.01.2100 für die übrigen 1405 Brennelemente auf der Grundlage von Datensätzen mit 800 bis 900 Nukliden pro Brennelement durchgeführt. Diese Berechnungen wurden in zwei Schritten durchgeführt:

##### - Schritt 1:

Die bereits in Zwischenlagerbehälter verladenen SFA (494 SFA in 26 CASTOR V/19 und 399 SFA in 19 Transnucleaire TN24-Behältern) wurden zum 1. Januar abklingen lassen. Es handelt sich dabei um insgesamt 45 Behälter mit 893 Brennelementen, die Ergebnisse der Abklingberechnungen sind für die einzelnen Behälter in [TABELLE 5](#) zusammengefasst.

Der Inhalt jedes Behälters wurde berechnet, indem für jedes einzelne, im Behälter geladene Brennelement das abgeklungene Inventar rechnerisch zum 1. Januar 2100 ermittelt wurde und die Summe der Inventare aller in einem Behälter geladenen Brennelemente für den jeweiligen Behälter bestimmt wurde.

##### - Schritt 2:

Die 533 SFA, die sich derzeit noch im Brennelementlagerbecken des Reaktors befinden, wurden virtuell in 13 CASTOR V/19- und 14 Transnucleaire TN24-Behälter geladen (siehe auch Anlage 8). Es wurde dabei angenommen, dass nicht alle Behälter von einem Hersteller bezogen werden können. So wurde ein nahezu ausgeglichenes Verhältnis von CASTOR- zu Transnucleaire-Behältern berücksichtigt, da man davon ausgehen sollte, dass

dies für die Lieferkapazitäten der Hersteller die wahrscheinlichere Variante sein wird. Die Tabelle unten zeigt die vorgeschlagenen 72 Behälter, die in jeden Behälter geladenen BE-Nummern und den Gesamtgehalt an Schwermetallen in jedem Behälter. Für die Beladung der Behälter wurde die Zerfallswärme zum Referenzdatum (15.04.2033) verwendet, um eine ausgeglichene (ähnliche) durchschnittliche Wärmeproduktion pro SFA in jedem Behälter zu erhalten. Dann wurde der Zerfall des Materials in den in die Behälter geladenen BE bis zum 1. Januar 2100 berechnet. Die Übersicht für die 72 virtuell beladenen Behälter ist in der folgenden Tabelle enthalten. Die Spalte Referenz enthält die Kapitel in der Anlage mit den detaillierten Verzeichnissen:

| Derzeitiger Lagerort | Art des Behälters                    | Anzahl der Brennelemente | Anzahl der Behälter | Referenz |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------------|---------------------|----------|
| Zwischenlager        | CASTOR V/19                          | 494                      | 26                  | Anlage 2 |
|                      | Transnucleaire TN24                  | 399                      | 19                  | Anlage 3 |
| Nasslager            | Vorgeschlagen von TMX in CASTOR V/19 | 239 von 533              | 13                  |          |
|                      | Vorgeschlagen von TMX in TN24        | 294 von 533              | 14                  |          |
| <b>Gesamtzahl</b>    |                                      | <b>1426</b>              | <b>72</b>           |          |

TABELLE 5

Anzahl der gelagerten Brennelemente und die Anzahl der benötigten Zwischenlagerbehälter mit Verweis auf detailliertere Daten. Die Referenzzahl der für die direkte Entsorgung verwendeten Behälter wird 72 sein.

Anlage 6 zeigt die berechneten Brennstoffmassen, Aktivitätsinhalte und Nachzerfallswärme für die vorhandenen 45 Behälter im Zwischenlager zum 1. Januar 2010 auf sowie für die vorgeschlagenen (13+14=) 27 Behälter für die Brennelemente, welche sich derzeit noch im Lagerbecken der Anlage befinden.

Insgesamt werden 72 Transport- und Lagerbehälter benötigt, um die in dieser Studie betrachteten 1426 SFA im Zwischenlager zu lagern. Die Anzahl von 72 Behältern wird für den Vergleich der direkten Endlagerung mit der Menge an verglasten Abfällen verwendet, die durch das von Transmutex vorgeschlagene Recyclingverfahren entstehen.

## 6.2.

## Berechnung des Recycling-Ansatzes von Transmutex

Transmutex schlägt ein Partitionierungs- und Transmutationskonzept vor, bei dem der abgebrannte Oxidbrennstoff aus den derzeitigen thermischen Reaktoren (als HAW betrachtet) in qualifizierte Abfallprodukte umgewandelt wird, die aus einer kleineren Menge HAW (als verglaste Abfälle), verschiedenen wertvollen Rohstoffen und Radioisotopen, sowie dem abgetrennten Transurangehalt zusammen mit etwas Uran und Lanthaniden (U/TRU) bestehen. Dieses Uran/Transuran-Gemisch wird unter Zugabe von Thorium weiterverarbeitet, um START-Brennstoff herzustellen, bei dem der transuranische Anteil die spaltbare Anreicherung darstellt, die den Reaktor nachher unterkritisch treibt (der frische START-Brennstoff enthält eine signifikante Menge an spaltbarem Material). Das mehrfache Recycling ermöglicht die kontinuierliche Spaltung/Transmutation des ursprünglichen Transuran-Anteils im schnellen Neutronenspektrum des unterkritischen START-Kerns. Bei der Wiederaufarbeitung des abgebrannten START-Brennstoffs werden aus dem metallischen, abgebrannten Brennstoff die Spaltprodukte abgetrennt und als HAW verglast; der Hauptanteil, eine Thorium-Uran-Transuranlegierung, wird als neues Brennstoffmaterial genutzt und wiederum mit weiteren Transuranen angereichert (Anreicherungsanpassung), um den nächsten START-Treiberbrennstoff herzustellen. Der verbliebene Transurangehalt des abgebrannten START-Brennstoffs wird dabei immer wieder vollständig in den Kern zurückgeführt, wobei die erneute Anreicherung immer wieder mittels frischer Transurane aus der Aufarbeitung von abgebranntem Brennstoff aus thermischen Reaktoren erfolgt. Mit diesem mehrstufigen Ansatz kann der gesamte TRU-Gehalt eines abgebrannten Oxidbrennstoffinventars vollständig gespalten/transmutiert werden. Die oben erläuterten allgemeinen Schritte auf dem Weg von spaltbarem Material und Kernbrennstoff in der START-Anlage sind in [ABBILDUNG 42](#) dargestellt.

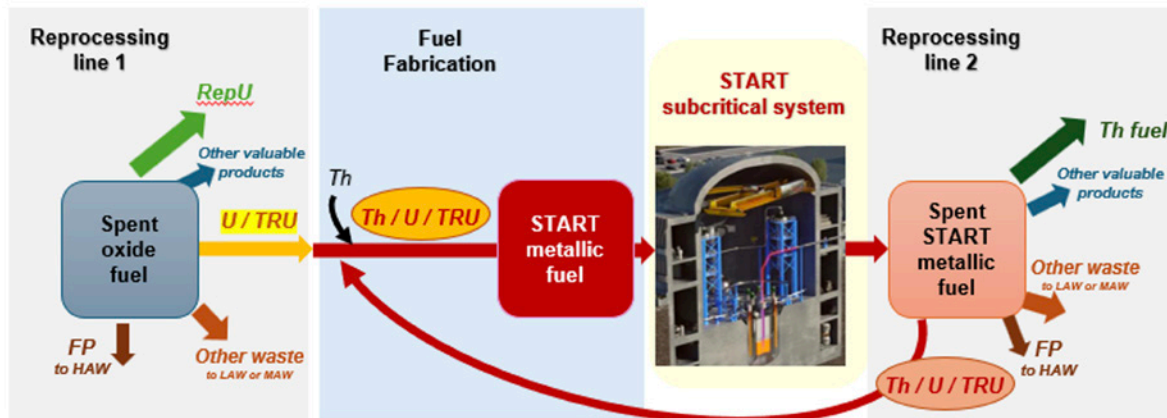


ABBILDUNG 42

Allgemeine Schritte auf dem Weg von spaltbarem Material und Kernbrennstoff in der START-Anlage.

Das Transmutex-System wurde in den aktuellen Berechnungen mit einem 3-Stufen-Ansatz simuliert:

- Die abgebrannten BE werden in der **Oxidlinie der fortgeschrittenen Partitionierungsanlage von Transmutex** verarbeitet. Die verschiedenen Ausgangsströme sind:
  - Zurückgewonnenes Uran (RepU),
  - Von Transmutex wiederverwendetes Uran/Transuran-Legierungsgemisch (U/TRU)
  - Langlebige Spaltprodukte zur Transmutation wie I-129, Tc-99 und Se-79
  - Verglaster hochaktiver Abfall für die restlichen Spaltprodukte (HAW)
  - MAW-Metalle (vor allem Hüllrohrmaterial und strukturelle Elemente der BE)
  - Isotope für die medizinische Verwendung, wie Cäsium-139 und Strontium-90
  - Freizugebende, nicht radioaktive Stoffe
  - Abgetrennte Edel- und Seltenerdenmetalle für industrielle Zwecke (Industrie)

Die Masse, die Aktivitäten und die Wärmeproduktion der Nuklide im erzeugten, verglasten HAW-Ausgangsstrom wurden berechnet, und die Anzahl der für diesen Strom erforderlichen Endbehälter wurde ermittelt. Etwa 95 % des Urananteils im abgebrannten Brennstoff werden bei der Aufbereitung als RepU entfernt, während knapp 100 % der TRU mit etwa 5 % Uran und einigen Lanthaniden im U/TRU-Anteil separiert werden.

- Es wird davon ausgegangen, dass weitere 95 % des Urananteils aus dem U/TRU-Teil während des Brennstoffherstellungsprozesses entfernt werden, wenn der Th/U/TRU-Treiberbrennstoff hergestellt wird. Es wird davon ausgegangen, dass der TRU-Anteil und das verbleibende Uran im START-Reaktor während mehrerer Zyklen vollständig gespalten/transmutiert werden. Dieses Phänomen wird in dieser Studie durch die Berechnung in einem einzigen Schritt als **sofortige vollständige Spaltung** berechnet. (Im Falle des Lanthanidgehalts wird in diesem Schritt keine Änderung berücksichtigt.) Die sofortige vollständige Spaltung im Kernbrennstoff der Neutronenquelle wird sieben Jahre nach der Wiederaufbereitung des Oxids berechnet.
- Die Spaltprodukte der gespaltenen Aktinide werden in START nach einer weiteren fünfjährigen Abkühlungsphase ohne den RepU- und U/TRU-Ausgangsstrom aufgrund des vollständigen Spaltungsansatzes verarbeitet.

Die Masse, die Aktivitäten und die Wärmeproduktion der Nuklide im verglasten HAW-Ausgangsstrom wurden berechnet, und die Anzahl der für diesen Abfallstrom erforderlichen Glaskokillen berechnet.

Die Summe der endgültigen hochaktiven Kokillen, die für die verglasten HAW aus den beiden Wiederaufbereitungslinien benötigt werden, wird berechnet. Für die Zwischenlagerung dieser Abfälle wird ein CASTOR®HAW28M-Behälter vorgeschlagen. Jeder Behälter kann 28 verglaste HAW-Glaskokillen aufnehmen. Die Anzahl der erzeugten CASTOR®HAW28M-Behälter wird dann mit der Gesamtzahl von 72 Behältern verglichen, die derzeit bzw. bis zum 01.01.2100 für die Zwischenlagerung verwendet werden (CASTOR V/19 und TN24). Für die noch im Brennelementlagerbecken befindlichen Brennelemente wird davon ausgegangen, dass diese nach der Planung des Betreibers in 13 CASTOR V/19 und 14 TN24-Behälter umgelagert werden.

## 6.3.

**Transmutation bereits verglaster Abfälle**

Als Abfallgebinde für die aus der Wiederaufarbeitung resultierenden hochaktiven Abfälle wurden in der Vergangenheit Edelstahlbehälter verwendet, in welchen die Rückstände der Wiederaufarbeitung in Borosilikatglas eingeschmolzen wurden. Die Wiederaufarbeitung in Frankreich und das kurzzeitig in Deutschland durchgeführte Wiederaufbereitungsverfahren beruhten auf dem PUREX-Prozess<sup>42</sup>. Bei diesem Prozess werden Uran- und Plutoniumisotope von den Spaltprodukten und minoren Aktiniden getrennt. Uran- und Plutoniumisotope werden getrennt der Herstellung von Mischoxidbrennelementen zugeführt, während die Spaltprodukte mit den minoren Aktiniden verglast in Borosilikatglas in Edelstahlbehälter zu sogenannten Kokillen vergossen wurden. Für die Zusammensetzung des entstehenden Borosilikatglases bestehen die in der TABELLE 6 aufgeführten Nominal- und Grenzwerte.

Neben den Spaltstoffen liegen die meisten minoren Aktinide aus der Wiederaufarbeitung in diesen hochaktiven Glaskokillen heute noch vor und sollten bei einer Transmutation der hochaktiven Abfälle in Deutschland nicht außer Acht gelassen werden. Stand 2022 liegen derzeit neben den ca. 20 400 m<sup>3</sup> verpackten Brennelementen ca. 700 m<sup>3</sup> verglaste Abfälle in Kokillen aus der Wiederaufarbeitung vor<sup>43</sup>.

Diese Kokillen sind lager- und transportstabil und stehen genauso wie abgebrannte Brennelemente für die Transmutation zur Verfügung. Die Möglichkeit, die radioaktiven Nuklide aus dem Glas zurückzugewinnen, wurde in Savannah River, Georgia, USA, bereits untersucht. Dort hat man Mitte der neunziger Jahre die Möglichkeit untersucht, Lösungen, welche die Nuklide Americium und Curium im Kilogrammmaßstab enthielten, aus Sicherheitsgründen zu verglasen, weil die zur Lagerung verwendeten Tanks alt und die Lagersysteme unzeitgemäß waren. Die erzeugten Kokillen aus Borosilikatglas sollten als Zwischenlager- und Transportform genutzt werden, um die Isotope Americium und Curium für die Produktion von Californium-252 später sicher nutzen zu können. Dazu sollten die Kokillen zunächst gelagert und später in das Oak-Ridge-National Laboratory in Tennessee, USA transportiert werden. Zur Rückgewinnung der verglasten Nuklide wurde ein mit 38 % beladenes Borosilikatglas in Partikel zwischen 200 und 500 µm Korngröße gemahlen und bei 110 °C mit 8 molarer Salpetersäure ausgelaugt. Bereits nach zwei Stunden konnten 98 % der im Glas ursprünglich enthaltenen Radioisotope gelöst werden<sup>44</sup>. Bereits 1996 wurde die Auslaugungsrate von Curium aus Borosilikatglas mit 8 molarer Salpetersäure bei 110 °C bestimmt. Die Versuche zeigten, dass nach acht Stunden alle Aktinide und Lanthanide aus dem Glas gelöst sind und vom ungelösten Silikat abfiltriert werden können<sup>45</sup>. Es wurden auch experimentell die zu erwartenden Auslaugungsraten für Americium/Curium-Mischungen unter Rühren (0,04 g/hcm<sup>2</sup>) und statisch (0,0082 g/hcm<sup>2</sup>) ermittelt<sup>47</sup>.

Das abfiltrierte Silikat kann für die spätere Verglasung der Spaltstoffe zum Aufbau der Glasmatrix wiederverwendet werden, sodass aus dieser Aufarbeitung keine Abfälle verbleiben. Diese Verwendung kann die zur Verglasung eingesetzte Glasfritte ersetzen und ist daher für das Abfallvolumen nicht weiter relevant. Die eingesetzte Salpetersäure wird durch Destillation gereinigt und wiederverwendet. Hier müssen nur geringe Nitratverluste durch die Lösungsvorgänge ersetzt werden.

| Element    | Recovery - 2 hr<br>(%) | Recovery - 4 hr<br>(%) | Recovery - 8 hr<br>(%) |
|------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Boron      | 96.3                   | 97.1                   | 98.9                   |
| Aluminum   | 98.6                   | 101.2                  | 105.7                  |
| Barium     | 99.2                   | 104.1                  | 107.6                  |
| Lead       | 100.9                  | 103.6                  | 106.4                  |
| Lanthanum  | 107.2                  | 107.4                  | 108.6                  |
| Cerium     | 102.7                  | 101.0                  | 102.5                  |
| Neodymium  | 103.2                  | 103.3                  | 104.5                  |
| Samarium   | 103.9                  | 103.5                  | 104.6                  |
| Europium   | 106.2                  | 106.1                  | 107.2                  |
| Gadolinium | 104.6                  | 103.2                  | 105.0                  |
| Curium     | 102.8                  | 93.7                   | 106.5                  |

TABELLE 6

Auslaugung von Lanthaniden und Actiniden aus Borosilikatglas in Abhängigkeit von der Auslaugungsdauer<sup>47</sup>.

Für die Verwendung der in Kokillen verglasten minoren Aktinide stehen derzeit zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

- Die in der Auslaugung erhaltenen Lösungen könnten in pyrometallurgische Wiederaufbereitungsverfahren integriert werden. Dazu würde die nitratsaure Lösung aus der Auslaugung eingedampft, die festen Rückstände dem Voloxidationsprozess unterworfen und zusammen mit den Abfällen aus Brennelementen aufgearbeitet. Diese Methode gilt als technisch erprobt und wurde im Abschnitt oben beschrieben.
- Eine direkte Verwendung des mit Spaltstoffen und Aktiniden beladenen, feingemahlten Borosilikatglases in der Reduktionsstufe des pyrometallurgischen Aufarbeitungsprozess. Da die Reduktionstemperatur von 1000 – 1200 °C oberhalb des Schmelzpunktes des beladenen Borosilikatglases liegt, besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass auch die verglasten Aktinide und Lanthanide reduziert werden und somit in den Wiederaufbereitungsprozess integriert werden können. Diese zweite Möglichkeit bedarf allerdings einer experimentellen Bestätigung, weil die direkte Aufschmelzung des Glases im Aufarbeitungsprozess von Transmutex noch nicht nachgewiesen wurde.

## 6.4. Beschreibung der Outputströme

### WIEDERAUFBEREITETES URAN (REPU)

Mehr als 90 % des Brennstoffmaterials jedes abgebrannten Brennelements besteht aus Uranmetall, das wiederverwendet werden kann (siehe die Zusammensetzung von SFA A241 in dieser Studie, dessen Uranisotopenzusammensetzung in [TABELLE 7](#)). Dieses Uran besteht hauptsächlich aus dem Uran-Isotop U-238, dem Hauptisotop im natürlichen Uranerz. Normalerweise gibt es zwischen 0,1 und 0,5 % Resturan-235 und ~0,3 % Uran-236, das als Brutprodukt aus Uran-235 entsteht und darauf hinweist, dass dieses Uran in einem Reaktor verwendet wurde (dies sind Standarddaten für verbrauchten Uranoxidbrennstoff).

| Uran-Isotop  | Gehalt im BE [g/t] <sub>HM</sub> | Isotopenkonzentration im Uran [Prozentsatz] |
|--------------|----------------------------------|---------------------------------------------|
| U-230        | 1,0411E-11                       | 0,0000%                                     |
| U-231        | 8,3629E-12                       | 0,0000%                                     |
| U-232        | 0,00034508                       | 0,0000%                                     |
| U-233        | 0,0017602                        | 0,0000%                                     |
| U-234        | 123,66                           | 0,0129%                                     |
| U-235        | 4.599,3                          | 0,4813%                                     |
| U-235M       | 0,00063209                       | 0,0000%                                     |
| U-236        | 3.161,9                          | 0,3309%                                     |
| U-237        | 3,4521                           | 0,0004%                                     |
| U-238        | 947,640                          | 99,1744%                                    |
| U-239        | 0,28696                          | 0,0000%                                     |
| U-240        | 0,000032505                      | 0,0000%                                     |
| U-241        | 0,46546                          | 0,0000%                                     |
| <b>Summe</b> | <b>955.529</b>                   | <b>100 %</b>                                |

TABELLE 7

Isotopenzusammensetzung des Uranmetalls im oxidischen Uranbrennstoff eines abgebrannten Brennelements. Die Zahlen beziehen sich auf 1000 kg abgebranntes Brennelement-Oxid, die verbleibende Menge von ~ 44,4 kg abgebranntes Brennelementmaterial entfällt auf Spaltprodukte und Transurane.

### U/TRU PRODUKT FÜR START

Was die Masse betrifft, so tragen die transuranischen Nuklide in einer Größenordnung von etwa 1,5 % zur Brennstoffmasse des  $\text{UO}_2$  im abgebrannten Brennelement bei. Der genaue Prozentsatz des Transurangehaltes hängt vom individuellen Abbrand des BE ab. In Bezug auf die Lebensdauer und die Zerfallswärmeproduktion sind diese Nuklide sehr bedeutsam und der Hauptgrund für die Transmutation in START (siehe [TABELLE 8](#)). Diese Nuklide können im schnellen Neutronenspektrum von START gespalten/transmutiert werden, wobei ähnliche Spaltprodukte wie bei der Spaltung von Uran-235 entstehen und eine ähnliche Menge an Energie während der Spaltung erzeugt wird.

| Isotop  | Halbwertszeit     | Wahrscheinlichkeit im thermischen Spektrum | Wahrscheinlichkeit im schnellen Spektrum |
|---------|-------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|
| Np-137  | 2,1 Mio. Jahre    | 3%                                         | 27%                                      |
| Pu-238  | 87 Jahre 255 Tage | 7%                                         | 70%                                      |
| Pu-239  | 24 110 Jahre      | 63%                                        | 85%                                      |
| Pu-240  | 6561 Jahre        | 1%                                         | 55%                                      |
| Pu-241  | 14 Jahre 146 Tage | 75%                                        | 87%                                      |
| Pu-242  | 375 000 Jahre     | 1%                                         | 53%                                      |
| Am-241  | 432 Jahre         | 1%                                         | 21%                                      |
| Am-242m | 16 h 1 min 12 sec | 75%                                        | 94%                                      |
| Am-243  | 7370 Jahre        | 1%                                         | 23%                                      |
| Cm-242  | 162 Tage 19 Std.  | 1%                                         | 10%                                      |
| Cm-243  | 29 Jahre 36 Tage  | 78%                                        | 94%                                      |
| Cm-244  | 18 Jahre 36 Tage  | 4%                                         | 33%                                      |

TABELLE 8

Halbwertszeit und Spaltungswahrscheinlichkeit einiger Transurane im thermischen und schnellen Neutronenspektrum<sup>46</sup>.

Während des Recyclingvorgangs werden diese Nuklide in der Flüssigcadmiumelektrode des Elektrorefiners bei Potentialen zwischen 2,36 und 2,80 Volt abgeschieden, was höher ist als das Abscheidungspotential von Uran bei 2,31 V. Der geringe Unterschied zum Potential der Uranabscheidung bewirkt, dass sich auch eine kleine Menge Uran in der Flüssigcadmiumkathode abscheidet. Eine vollständige Trennung der Transurane vom Uran kann daher nicht erreicht werden. Diese Tatsache macht die Abtrennung der transuranischen Isotope proliferationsresistent. Für diese Proliferationsresistenz gibt es im Wesentlichen zwei Gründe:

- Die Tatsache, dass mindestens 1 Gew.-% des ursprünglichen Urangehalts zusammen mit den transuranischen Isotopen in der zweiten Flüssigmetallektrode abgeschieden wird. Diese Mischung mit Uran macht das Material nur für den Reaktorbetrieb brauchbar.
- Die Tatsache, dass die individuellen transuranischen Isotope nicht voneinander getrennt werden können. Obwohl Plutonium den Hauptbeitrag leistet, wird die Isotopenzusammensetzung für militärische Anwendungen nicht nützlich sein, da es weiterhin enthält:
  - Pu-238, das relativ schnell zerfällt, wodurch sich die Wärmeentwicklung des Materials so stark erhöht, dass es nicht mehr für Waffen verwendet werden kann.
  - Pu-240, das eine hohe Spontanspaltungsrate aufweist, was bedeutet, dass das Plutonium in einem Waffensystem kontinuierlich viele Hintergrundneutronen erzeugt, die die Waffenausbeute durch vorzeitiges Starten der Kettenreaktion verringern können.

- Am-241 (das aus dem Zerfall von Plutonium-241 mit einer Halbwertszeit von 14 Jahren resultiert und sich daher im Laufe der Zeit in reaktorfähigem Plutonium anreichert). Es sendet hochgradig durchdringende Gammastrahlen aus, die die radioaktive Belastung des Personals, das mit dem Material umgeht, erhöhen.
- Cm-244, das eine hohe Neutronenemissionsrate von 2 MeV Neutronen (die zur Selbstspaltung von Waffenmaterial führen könnte) und eine hohe Zerfallswärmeproduktion aufweist.
- Ca. 1 % Resturan, das an der Cadmiumkathode mit abgeschieden wird.

Diese Nuklide werden im flüssigen Cadmium aus der Salzschnmelze des Elektrorefiners aufgefangen und das Cadmium anschließend zur Wiederverwendung abdestilliert. Die transuranische Legierung wird als Legierung zur Herstellung von START-Brennstoff abgetrennt. Zu diesem Zweck werden Thoriummetallpellets mit einem Gehalt von 26 bis 29 Gew.-% an transuranischen Isotopen als START-Treiberbrennstoff hergestellt. Dieser Brennstoff wird in START verwendet, und der Gehalt an transuranischen Isotopen wird in der derzeitigen Auslegung bis auf ~20 Gew.-% transuranischer Isotope am Ende des Reaktorzyklus reduziert. Eine Zusammensetzung des START-Kerns für diesen Zweck ist in [ABBILDUNG 43](#) unten dargestellt.

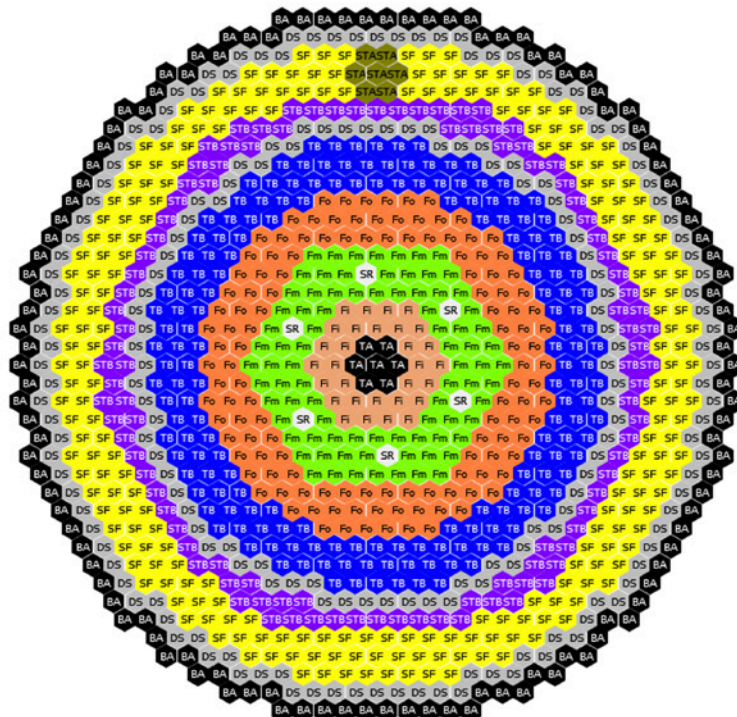


ABBILDUNG 43 | START-Kern für den Transmutationsbetrieb.

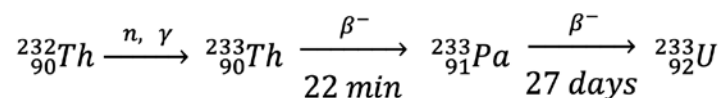
**Strukturelle und funktionelle Elemente in ABBILDUNG 43:**

| Typ  | Beschreibung                                                                    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------|
| BA:  | Struktur des Kernbehälters                                                      |
| TA:  | Spallationstarget für die Erzeugung von Spallationsneutronen                    |
| STA: | Spent-Target-Bereich für Abkühlung/Zerfall des Targets                          |
| DS:  | Dummy-Brennelemente zur Abtrennung von Neutronenbereichen                       |
| SR:  | Absorberstäbe zur Absenkung der Reaktivität während BE-Wechsel und BE-Shuffling |

| Typ | Nummer | Beschreibung                                                                                                                       |
|-----|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SF: | 233    | Positionen für verbrauchten Brennstoff für den Treiberbrennstoff der Positionen Fo, Fm und Fi für dessen Nachzerfall und Abklingen |
| STB | 102    | Abgebrannte Thorium-Brutelemente, Kühlung und Abklingposition nach dem Brüten                                                      |
| TB: | 174    | Thorium/Uran-Brennstoff für das Brüten von Uran-233                                                                                |
| Fo: | 126    | Äußerer Brennstoff für die Transmutation von TRU mit einem TRU-Gehalt von bis zu 29 Gew.-%.                                        |
| Fm: | 84     | Mitteltreibender Brennstoff für die Transmutation von TRU mit einem TRU-Gehalt von bis zu 28 Gew.-%.                               |
| Fi: | 30     | Innerer Brennstoff für die Transmutation von TRU mit einem TRU-Gehalt von bis zu 25 Gew.-%.                                        |

Anschließend wird der Brennstoff wiederaufgearbeitet und erneut mit transuranischen Isotopen angereichert. Im Allgemeinen werden pro Reaktorzyklus etwa 40 % der transuranischen Isotope umgewandelt. Beim derzeitigen Entwicklungsstand von START wird ein Modell mit einer thermischen Reaktorleistung von ca. 600 MW verwendet. Er ist nicht für die ausschließliche Verbrennung von TRU optimiert, sondern ist für einen Betrieb geplant, bei dem die Spaltung von TRU zur Erzeugung von U-233 durch Brüten aus Th-232 genutzt wird. Das Kerndesign in ABBILDUNG 43 ist einen Zwitter, der in der Lage ist, TRU zu verbrennen und gleichzeitig eine beträchtliche Menge an Uran-233 zu erzeugen. Pro erzeugter thermischer Energie von 1 TWh verbrennt der Reaktor 30 kg Transurane und erzeugt etwa die gleiche Menge Uran-233 (30 kg).

Aus diesem Grund enthält der innere Kern des START Reaktors Brennstoff, der mit einem durchschnittlichen Prozentsatz von 28 Gew.-% mit Transuranen angereichert ist. Um die Spallationsneutronen optimal zu nutzen, nimmt die Anreicherung mit zunehmender Entfernung vom Spallationsziel leicht zu. Die Anreicherung steigt von ~26 % für die inneren Brennelemente Fi (siehe ABBILDUNG 43) auf ~28 % für die mittleren Brennelemente Fm und auf 29 Gew.-% für die äußeren Brennelemente Fo. Der gesamte Blanket-Bereich TB enthält eine Thorium-1 %-Uran-Legierung zum Erbrüten von Uran-233:



Diese Anlage soll (beim derzeitigen Entwicklungsstand) an 330 Tagen im Jahr in Betrieb sein, was einer thermischen Reaktorenergie von 4,475 TWh/Jahr entspricht. START wird 30 kg TRU pro 1 TWh erzeugter thermischer Energie verbrauchen, was zu einem Jahresverbrauch von 134 kg TRU führt. START benötigt daher eine kontinuierliche Wiederaufbereitung des eigenen abgebrannten Brennstoffs und des abgebrannten Oxidbrennstoffs aus Leichtwasserreaktoren, um den Kernbrennstoff mit neuen transuranischen Isotopen anzureichern. Dieser Zyklus kann fortgesetzt werden, bis der Vorrat an abgebrannten Brennelementen aus Leichtwasserreak-

toren vollständig verbraucht ist. Für den gesamten Transurangehalt der 1426 abgebrannten Brennelemente, der sich auf 14 058 kg beläuft, muss das derzeitige START-Kernkonzept theoretisch etwa 98 Jahre lang betrieben werden. Diese Zeit wird sich erheblich verkürzen, wenn z. B. die derzeitige Brutdecke TB (siehe [ABBILDUNG 43](#)) ebenfalls mit TRU-haltigem Brennstoff gefüllt wird. Dadurch erhöht sich die TRU-Beladung im Kern um ~ 74 % (siehe die Positionen TB in [ABBILDUNG 43](#), die in diesem Fall ebenfalls mit TRU gefüllt werden). Mit diesem zukünftigen Kernmuster kann eine deutlich niedrigere Betriebszeit erreicht werden, die für die Verbrennung des TRU-Anteils erforderlich ist.

### **DER LETZTE KERN („THE LAST CORE PROBLEM“)**

Wenn START so betrieben werden soll, dass nur TRU verbrannt und die verbleibenden HAW so wiederaufbereitet werden, dass das Gesamtvolumen minimiert wird, dann wird sehr oft die Frage nach dem letzten Kern diskutiert. Im Einzelnen wird die Frage gestellt: Wie kann eine Flotte von START-Blöcken, die seit mehreren Jahrzehnten in Betrieb sind, ihre Kerne herunterfahren, um das Problem des letzten Kerns zu minimieren, wenn keine abgebrannten Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren mehr für die Versorgung mit frischem TRU zur Verfügung stehen? Die Befürchtung ist, dass die gesamte letzte Kernladung eines START-Reaktors am Ende seines letzten Zyklus entsorgt werden muss, weil die TRU-Anreicherung im Treiberbrennstoff so gering ist, dass kein weiterer Betrieb möglich ist. Dieses Problem besteht in der Tat auch bei klassischen Brennerkernen schneller Reaktoren und hat einen großen Einfluss auf die Effizienz der Abfallmengenreduzierung, insbesondere aus dem Grund, dass die letzten Treiberbrennelemente noch eine hohe Menge an langlebigen TRU-Isotopen enthalten.

Für START ist dieses Problem lösbar und die Antwort ist recht einfach. Das letzte Kernproblem der Flotte kann in einem ersten Schritt auf das letzte Kernproblem eines einzigen START-Reaktors minimiert werden, der den verbrauchten Kernbrennstoff der anderen START-Reaktoren übernehmen kann. Die gesamte Kernladung eines START-Reaktors kann wiederaufbereitet und in den Nachbarblock transferiert werden. Auf diese Weise kann eine schrumpfende Zahl von START-Reaktoren betrieben werden, sodass immer mehr mit leeren Kernen zur Stilllegung anstehen. Auf diese Weise können die verbleibenden START-Reaktoren mit Kernbrennstoff bestückt werden, der die notwendige Anreicherung von TRU aus verbrauchten Kernbrennstoffbündeln stillgelegter START-Reaktoren erhält. Auf diese Weise kann das letzte Kernproblem der Flotte auf das letzte Problem einer Einheit reduziert werden. Jetzt wird der Zwitter-Charakter des START-Kerns wichtig.

Für die planmäßige Außerbetriebnahme eines START-Reaktors werden zwei Schritte berücksichtigt:

#### **Schritt 1: Die Reduzierung des TRU-Gehalts des Kerns auf einen Quasi-Null-Gehalt:**

START kann U-233 aus Thoriummetall erzeugen. Der verbrauchte Kernbrennstoff von START, der z. B. einen TRU-Gehalt von 15 Gew.-% und weniger aufweist, kann mit Uran-233 wieder angereichert werden, wenn kein TRU mehr aus Oxidbrennstoff oder externem Kernbrennstoff verfügbar ist. Der Kernaufbau, wie er in [ABBILDUNG 43](#) dargestellt ist, wird einschließlich der mit Thorium/Uranlegierung gefüllten Brutzone für die Anreicherung von Uran-233 verwendet. Für den Betrieb von START ist es wichtig, Energie im inneren Kernbereich zu erzeugen (siehe Fi, Fm, Fo in [ABBILDUNG 43](#)). Dieser Bereich kann mit TRU-angereichertem Brennstoff, aber auch mit Uran-233-angereichertem Brennstoff beladen werden. Beide Typen erzeugen genügend Neutronen, um den verbleibenden TRU-Anteil in diesem Brennstoff zu spalten. Derzeit werden Mischungen aus U-233 und TRU sowie heterogene Kernaufbauten mit TRU- und U-233-angereichertem Brennstoff diskutiert. In beiden Fällen kann der verbleibende Transurananteil geringerer Anreicherungsgrade schließlich transmutiert werden. Natürlich werden die letzten Kernladungen immer mehr U-233 enthalten und die Effizienz der Transmutation der wenigen

Transurane wird in den letzten Zyklen abnehmen, da die verbleibenden transuranischen Isotope hauptsächlich Am-241, Np-137, Cm-242 und Cm-244 sein werden. Solange jedoch beim Brüten in der TB-Zone U-233 erzeugt wird, das im nächsten Zyklus zur Spaltung von TRU verwendet werden kann, wird der TRU-Gehalt durch diesen Abfahrvorgang fast auf null reduziert. Am Ende dieses ersten Schritts wird der Kern von START aus einer Treiberbrennstoffzone bestehen (Fi, Fm, Fo siehe [ABBILDUNG 43](#)), die nur mit Uran-233 angereichert ist. Jetzt ist es an der Zeit, zu Schritt 2 der Außerbetriebnahme überzugehen.

### Schritt 2: Die Verkleinerung des Kerns von START:

Im zweiten Schritt der Außerbetriebnahme von START wird der Brutbereich (siehe TB in [ABBILDUNG 43](#)) durch leere Dummy-Brennelemente ersetzt werden. Die Kühlpositionen für den Brüterbrennstoff (STB) und die Kühlpositionen für den abgebrannten Kernbrennstoff werden schrittweise reduziert (ebenfalls durch den Austausch mit Dummy-Brennelementen). Dies führt zu einem Kernaufbau, der in [ABBILDUNG 44](#) dargestellt ist.

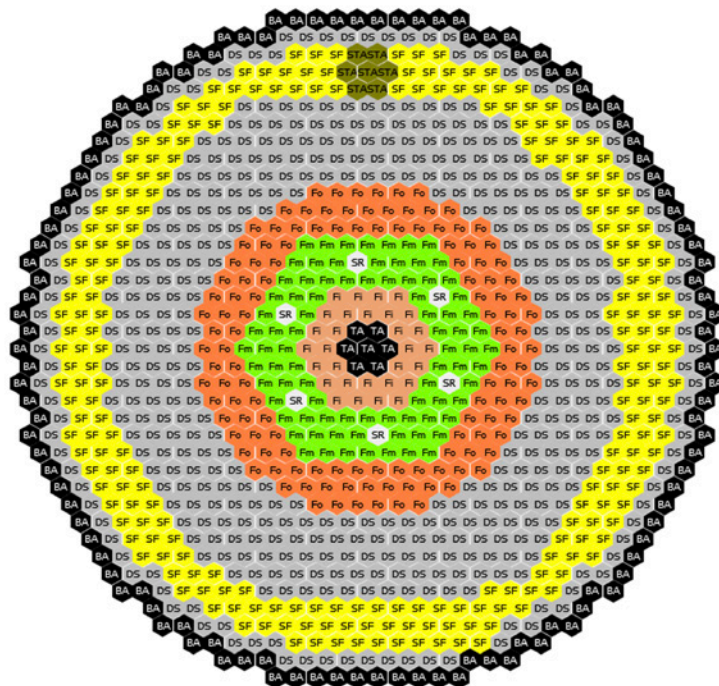


ABBILDUNG 44

Kernabbildung des START-Kerns für die Außerbetriebnahme Schritt 2.

| Typ  | Beschreibung                                                                    |                                                                                                                           |
|------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BA:  | Struktur des Kernbehälters                                                      |                                                                                                                           |
| STA: | Spent-Target-Bereich für Abkühlung/Zerfall des Targets                          |                                                                                                                           |
| DS:  | Dummy-Brennelemente zur Abtrennung von Neutronenbereichen                       |                                                                                                                           |
| SR:  | Absorberstäbe zur Absenkung der Reaktivität während BE-Wechsel und BE-Shuffling |                                                                                                                           |
| Typ  | Nummer                                                                          | Beschreibung                                                                                                              |
| SF:  | 240                                                                             | Positionen für verbrauchten Brennstoff für den Treiberfuel der Positionen Fo, Fm und Fi für deren Kühlung und Nachzerfall |
| Fo:  | 126                                                                             | Äußerer Brennstoff für die Transmutation des verbleibenden U-233-Gehalts                                                  |
| Fm:  | 84                                                                              | Mittlerer Brennstoff für die Transmutation des verbleibenden U-233                                                        |
| Fi:  | 30                                                                              | Innerer Brennstoff für die Transmutation des verbleibenden U-233-Gehalts                                                  |

Der innere Kern mit den Treiberbrennelementen ist weiterhin in Betrieb, um das restliche U-233 zu verbrennen. Von Zyklus zu Zyklus wird die Anzahl der Brennelemente reduziert. Gleichzeitig kann auch die Fläche für die Kühlung des abgebrannten Brennstoffs reduziert werden. Im Endzustand besteht der Kern nur noch aus einer Reihe innerer Treiber-Brennelemente (= 12 Fi) um das Spallationstarget, wie in **ABBILDUNG 45** dargestellt. Es wird derzeit technisch diskutiert, ob es möglich ist, auch diese verbleibenden letzten zwölf Brennelemente nahezu vollständig durch Spaltung alleine mit Spallationsneutronen vom Uran zu befreien.

Theoretisch kann die Anlage in diesem Modus so lange betrieben werden, bis der Uran-233-Gehalt auf nahezu null heruntergebrannt ist (normale abgebrannte Brennelemente haben einen Spaltstoffgehalt von weniger als 0,5 %). In diesem Zustand verbraucht die Anlage Energie für die Spallation, die Erwärmung des Bleis usw. Schließlich enthält der Kern kein spaltbares Material mehr und kann außer Betrieb genommen werden. Die Aufarbeitung der abgebrannten Brennelemente und die Abtrennung der Spaltprodukte laufen während der gesamten Außerbetriebnahme Phase in geringerem Umfang weiter.

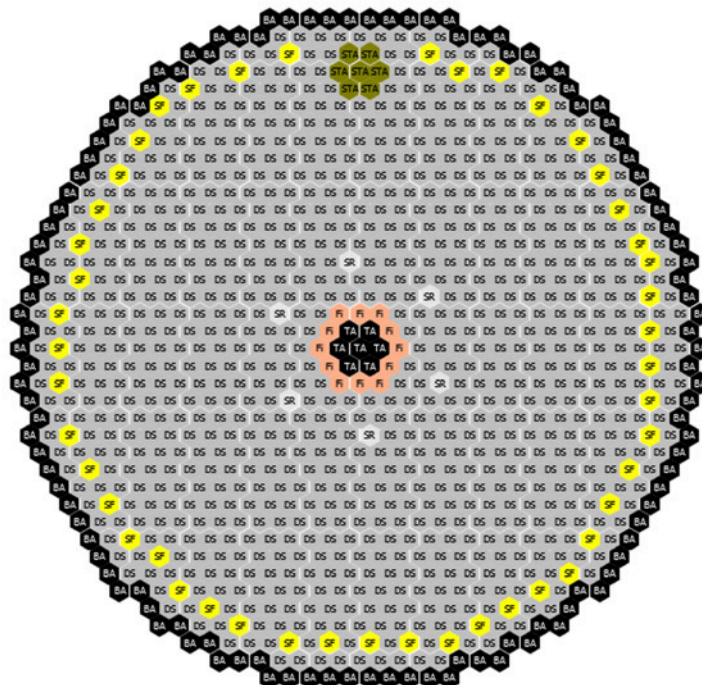


ABBILDUNG 45 Kernabbildung des START-Kerns am Ende der Außerbetriebnahme Schritt 2.

| Typ  | Beschreibung                                                                    |                                                                                     |
|------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| BA:  | Struktur des Kernbehälters                                                      |                                                                                     |
| STA: | Spent-Target-Bereich für Abkühlung/Nachzerfall des Targets                      |                                                                                     |
| DS:  | Dummy-Brennelemente zur Abtrennung von Neutronenbereichen                       |                                                                                     |
| SR:  | Absorberstäbe zur Absenkung der Reaktivität während BE-Wechsel und BE-Shuffling |                                                                                     |
| Typ  | Nummer                                                                          | Beschreibung                                                                        |
| SF:  | 46                                                                              | Positionen für verbrauchten Brennstoff aus den Positionen FO, FM und FI zur Kühlung |
| Fi:  | 12                                                                              | Innere Brennstoffzone für die Transmutation des verbleibenden U-233-Gehalts         |

### JOD-129

Wie in [Kapitel 2\\_4.3.1](#) beschrieben, ist eine oxidierende Behandlung des hochabgebrannten Brennstoffs notwendig, um das Brennstoffmaterial gründlich von der inneren Hülloberfläche zu trennen. Neben der chemischen Umwandlung der Brennstoffmaterialstruktur führt auch die oxidative Vorbehandlung zu einer Veränderung der Konsistenz des Brennstoffs, wodurch sich dieser leichter vom Hüllrohr trennen lässt. Bei dieser oxidativen Vorbehandlung und bereits beim Zersägen der Brennstäbe in kleine (meist ca. 1 cm lange) Rohrabchnitte gehen ein Teil des Spaltproduktes I-129 sowie gasförmige Spaltprodukte, z. B. Kr-85, He-3, He-4 und Tritium, in die Gasatmosphäre der Sägezelle über. Dieser Effekt wird verstärkt, wenn der Brennstoff unter Verwendung von Sauerstoff weiter oxidativ behandelt wird, sodass Jod-129 aus der Zellabluft der Säge- und Voroxidationszellen isoliert werden kann. Die oxidative Behandlung bis ca. 500 °C bewirkt, dass sich der Brennstoff aus dem Hüllrohr löst und die geschnittenen Hüllrohrteile leicht vom Brennstoffmaterial getrennt werden können. In der Regel kann der Prozess durch Rütteln der Hüllrohrteile in einem Metallkorb abgeschlossen werden. Dabei werden das elementare Jod oder Jodid ausgetrieben. Die im Brennstoff vorhandenen Jodide werden in dieser Phase zu elementarem Jod oxidiert und in dieser Form ebenfalls in die Zellenabluft ausgestoßen. Jod, das bereits in oxidierte Form (d. h. als Jodat) vorliegt, wird nicht ausgetrieben und verbleibt vorerst im Brennstoffgemisch. Da alle abgebrannten Brennelemente zum Zeitpunkt ihrer Aufbereitung bereits seit mehr als fünf Jahren aus dem Reaktor entfernt sind, ist das einzige radioaktive Jodisotop I-129. Stabiles Jod-127 entsteht bei der thermischen Spaltung von U-235 etwa zu 25 % im Vergleich zu Jod-129. Alle anderen radioaktiven Spaltprodukte des Jods sind aufgrund ihrer kurzen Halbwertszeiten bereits nach fünf Jahren abgeklungen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass bis etwa 500 °C das einzige verbleibende radioaktive Jod-Isotop Jod-129, zusammen mit stabilem Jod-127, während der Voloxidationsphase<sup>47</sup> weitgehend ausgetrieben werden kann. Bei Temperaturen unter 500 °C sind die Spaltedelgase und Tritium (und CO<sub>2</sub>, SeO<sub>2</sub>) die einzigen Bestandteile des Brennstoffs, die gleichzeitig mit Jod flüchtig sind.

Die Abtrennung von Jod aus dem Abgas ist in KWU-Druckwasseranlagen bereits technisch gelöst.<sup>48</sup>

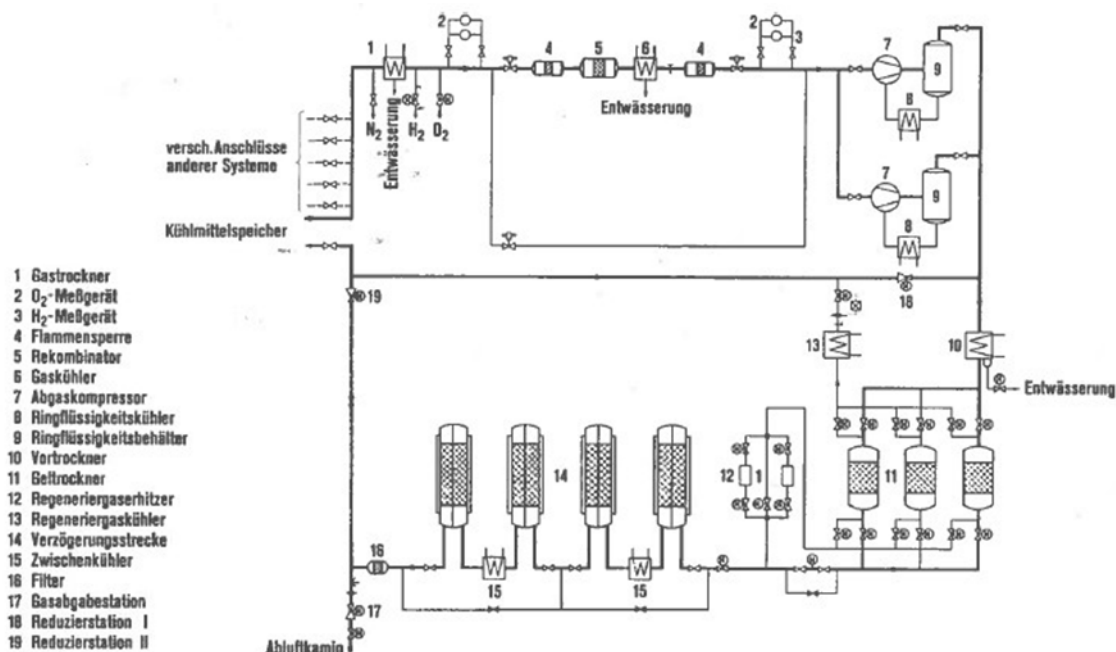


ABBILDUNG 46

Abgassystem eines KWU-Druckwasserreaktors.

Im Ringflüssigkeitsbehälter 9 wird die Zellenabluft abwechselnd mit 5 °C kalter Blei-(II)-Acetatlösung gewaschen. Radioaktives Jod-129 (und stabiles Jod-127) bilden mit Blei unlösliches Blei-(II)-Jodid, eine gelbe, kristalline Verbindung, die filtriert, getrocknet und zu Salztalotten gepresst werden kann. Unter diesen Bedingungen wird auch Selen aus dem Gas abgetrennt. In Form von gepressten Salzpellets kann Bleijodid auch für die Transmutation verwendet werden. Die Form und Größe der Pellets kann an die Bedürfnisse des Bestrahlungssystems angepasst werden.

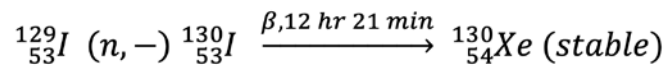
Da ein Teil des Jod-129 auch als Jodat im Brennstoff vorhanden sein kann, ist davon auszugehen, dass dieser Anteil bei der Voloxidation zunächst im Brennstoffgemisch verbleibt und nicht in die Gasphase der Prozesszelle übergeht. Mit einem Wechsel der Oxidationsstufe von Jodat zu Jodid, z. B. während der Reduktionsphase, wird die Oxidationsstufe Null des elementaren Jods überschritten. In dieser Phase ist ein Transfer von Jod-129 in die Zelloft zu erwarten. Diesem Umstand wird Rechnung getragen und die Zellenabluft wird auch während der Reduktionsphase von Jod gereinigt.

Die Frage nach der Auswahl eines geeigneten Targetmaterials für die Transmutation von Jod-129 war bereits Gegenstand verschiedener Untersuchungen. Aufgrund seines niedrigen Schmelzpunktes von 113,5 °C (extrem flüchtig) und seiner korrosiven Eigenschaft im Vergleich zu technischen Behältermaterialien erscheint elementares Jod für diesen Zweck als ungeeignet.

Für den Einsatz in beschleunigergetriebenen Systemen mit flüssigem Blei als Kühlmittel wird die Verwendung von Blei-(II)-Jodidpulver als Transmutationsmaterial in Betracht gezogen. Im Prinzip gibt es zwei Möglichkeiten:

- In beschleunigergetriebenen Bleireaktoren ist es möglich, ein thermisches Neutronenfeld vom Reaktor abzukoppeln, um medizinische Nuklide zu erzeugen. Dieser Bereich befindet sich in einem Bleiblock, der die äußere Gefäßoberfläche berührt und mit Wasser auf Umgebungstemperatur gekühlt werden kann. Dies ist der ideale Ort für die Transmutation von Jod-129. In diesem Bereich könnten auch Instrumente zur Überwachung der bei der Transmutation entstehenden Xenon-Isotope eingesetzt werden. Diese Methode hat den Vorteil, dass das Target in festem Zustand nicht oder kaum mit dem üblichen Hüllrohrmaterial reagiert und die Menge des zu erzeugenden Xenongases bei der Druckauslegung des Stabes leicht berechnet werden kann. Die Menge an Blei-(II)-Jodid wird so festgelegt, dass die Druckfestigkeit des Stabes auch bei 100 % Transmutation erhalten bleibt. Durch die Verwendung von Pulver ist eine vollständige Freisetzung des Xenons in den Plenumbereich des Stabes zu erwarten.
- Die Bestrahlung eines Stabes im Reaktorbehälter erscheint unrealistisch. Die kältesten Bereiche in beschleunigergetriebenen Bleireaktoren haben eine Temperatur von 420 °C, was den Schmelzpunkt von Blei-(II)-Jodid von 402 °C übersteigt. Flüssige Jodide sind sehr korrosiv<sup>49</sup> und die Qualifizierung eines austenitischen Hüllrohrs für den Einsatz im Reaktor scheint sehr komplex zu sein. Eine Lösung bietet eine Auskleidung/Einlage aus Silizium- oder Aluminiumoxid, die das Blei-(II)-Jodid absorbieren kann und so die Korrosion des Hüllrohrs verhindert. Das bei der Transmutation erzeugte Xenon lässt sich leicht aus dem geschmolzenen Salz freisetzen.

Aufgrund der relativ hohen thermischen Stabilität von Blei(II)-Jodid wird Transmutex dieses Salz für die Transmutation im externen Bleifenster des Reaktors verwenden. Dort kann das Target vorübergehend in einem System bestrahlt werden, das Instrumente zur Messung der Menge und Isotopenzusammensetzung des erzeugten Xenongases enthält. Die Transmutationsreaktion läuft nach den unten dargestellten Reaktionen ab:



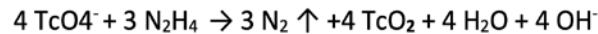
Es muss davon ausgegangen werden, dass auch I-128, I-131 und I-132 erzeugt werden. Diese Isotope haben relativ kurze Halbwertszeiten (I-128: 25 min, I-131: 8d 31 min und I-132: 2h 18 min) und zerfallen in stabile Isotope (Xe-128, Te-128, Xe-131 und Xe-132). Aus diesem Grund ist es wichtig, dass durch die Transmutation von I-129 erzeugte Gas mithilfe der Massenspektrometrie zu messen. Das Verhältnis der Isotope Xe-128, Xe-130, Xe-131 und Xe-132 gibt Aufschluss über den Stand der Transmutationsreaktion von I-129.

### TECHNETIUM-99 UND CÄSIUM-ISOTOPE

Die Grundlage für die Abtrennung des Cäsiumpertechnetats stammt aus einem Problem der Verglasung von Lösungen hochradioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung. In verschiedenen Anlagen wurde beobachtet, dass sich die Abgassysteme der Verglasungsanlagen (entweder die Glasöfen beim PAMELA-Verfahren oder die Kalzinierungsöfen bei dem von Sellafield und AREVA verwendeten Verfahren) mit einem stark strahlenden, kristallinen, weißen Feststoff zusetzen. Eine Analyse in Sellafield<sup>50</sup> ergab, dass es sich bei der Substanz um Cäsiumpertechnetat handelt. Ähnliche Ablagerungen fanden sich auch im Abgassystem und in Behältern der Karlsruher Verglasungsanlage VEK. In den Jahren 2018 und 2019 wurde ein Verfahren entwickelt, um diese Ablagerungen mechanisch durch Sandstrahlen zu entfernen. Aus dem so gewonnenen Gemisch aus Strahlgut und der entfernten Ablagerung konnte durch Sublimation die reine Cäsiumpertechnetatverbindung isoliert werden. Bereits 2019 wurde ein Verfahren zur Abtrennung der Isotope von Cäsium und Technetium aus Cäsiumpertechnetat vorgeschlagen und auf der KONTEC 2019 in Dresden als bester Plenarvortrag prämiert („Verfahren zur Abtrennung von Cäsium und Technetium aus Spaltabfällen und deren Verwertung und Entsorgung“). Das Verfahren sieht die folgenden Schritte vor, die auch für den Einsatz in Abgassystemen von Wiederaufbereitungsanlagen patentiert sind:<sup>51</sup>

- Abtrennung des Cäsiumpertechnetats von dem Zellabgas der Voloxidationszelle aus dem Gemisch des abgebrannten Brennstoffmaterials beim Voloxidationserhitzen auf 600 °C (ebenso wie nächster Schritt nach der Jodentfernung). Bei der Verglasung nach dem PAMELA-Verfahren beträgt die Temperatur des Borosilikatglases zeitweise ca. 600 °C
- Auffangen des Cäsiumpertechnetats an den Oberflächen eines kalten Abgaskühlers  
Das Cäsiumpertechnetat kristallisiert aus der Zellenabluft an den kalten Kühlflächen eines Abgas-/Sublimationskühlers. Die Kristallisation kann durch Messung der Dosisleistung leicht verfolgt werden. Diese Abtrennung führt in der Regel zu einem recht sauberen Produkt, das direkt für die weitere Verarbeitung verwendet werden kann. Wenn eine weitere Reinigung erforderlich ist, kann das Produkt erneut durch Sublimation gereinigt werden. Zu diesem Zweck ist es ratsam, Technetium (siehe Punkt i) zu verwenden, das aus dem Anodenschlamm gewonnen wird, in dem Molybdän als Verunreinigung auftreten kann.
- Ablösung des kristallisierten Cäsiumpertechnetats mit warmem Wasser. Die Löslichkeit von Cäsiumpertechnetat in Wasser beträgt 8,79 g/l bei 40 °C. Die Pertechnetatlösung hat eine rötliche Farbe.

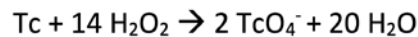
- Die chemische Abtrennung des Technetiums vom Cäsium erfolgt mit Hydrazin in wässriger Lösung. In der Regel wird der noch warmen, wässrigen Lösung von Cäsiumpertechnetat die doppelte stöchiometrische Menge Hydrazin in Form von konzentrierter Hydrazinlösung zugesetzt und die Lösung bis zum nächsten Tag stehen gelassen. Die Reduktion im leicht alkalischen Milieu erfolgt vollständig über Nacht und das entstandene Technetium(IV)-Oxid wird als Dihydrat ausgeschieden. Ähnlich wie Permanganat reagiert Pertechnetat im Alkalischen nur bis zur Oxidationsstufe +4; erst in einer stark sauren Lösung wird die Oxidationsstufe +2 erreicht:



Die Lösung kann filtriert oder der Feststoff durch Zentrifugation von der Cäsiumlösung getrennt werden. Es ist wichtig, das Filtrat/den Rückstand gründlich mit Wasser zu waschen, um anhaftendes Cäsium zu entfernen. Die  $\gamma$ -Dosisleistungsmessung am Filter ist hier sehr hilfreich, da Technetium-99 ein reiner  $\beta$ -Strahler ist und somit die vollständige Abtrennung des starken  $\gamma$ -Strahlers Cäsium-137 leicht nachgewiesen werden kann.

- Die Verarbeitung von Technetiumdioxid erfolgt durch Trocknung an der Luft bei bis zu 400 °C. Da das Technetiumdioxid als Mischhydrat mit einem oder zwei Molekülen Wasser ausfällt, ist dieser Schritt wichtig, um eine leicht kalkulierbare, wasserfreie Ausgangssubstanz für die spätere Transmutation zu erhalten.
- Das wasserfreie Technetiumdioxid muss unter Ausschluss von Sauerstoff getrocknet, gelagert und weiterverarbeitet werden. Technetiumdioxid neigt dazu, bei höheren Temperaturen mit Luftsauerstoff zu reagieren. Zum Beispiel verwandelt sich Technetiumdioxid bei etwa 450 °C in Gegenwart von Sauerstoff in Technetium(VII)-oxid. Das wasserfreie Oxid kann durch Verdichtung und Sinterung bei etwa 900 °C zu Pellets verarbeitet werden.
- Das in der wässrigen Lösung verbleibende Cäsiumhydroxid wird im Gemisch mit überschüssigem Hydrazin bis zum Sieden erhitzt, wobei das Hydrazin verkocht. Die verbleibende Hydroxidlösung wird mit Salzsäure neutralisiert und anschließend vorsichtig eingedampft. Das auskristallisierte Cäsiumchlorid kann in einem Trockenofen bei 110 °C vom Wasser befreit werden. Das trockene Cäsiumchlorid kann direkt zur Herstellung hochaktiver Strahlungsquellen verwendet werden. Eine Variante wäre das Pressen von Salztabletten in Form von Aluminiumkapseln für hochaktive Quellen. Die Salztabletten werden in die Kapseln eingelegt (Heißzellenaktivität) und anschließend in einer Umverpackung im Strahlenrohr der Quelle versiegelt. Die Strahlenquellen werden an der Außenseite von Kontaminationen befreit und dann zum Transport in den Abschirmcontainer gelegt.
- Für den kontinuierlichen Betrieb einer Cäsiumpertechnetat-Abscheidung aus der Abluft einer Vergasungszelle wurde in der Patentschrift KTE 2018 eine entsprechende Vorrichtung mittels zweier abwechselnd betriebener Abgaskühler beschrieben. Die Vorrichtung sieht vor, dass die Abscheidung des Pertechnetats aus dem Abgas kontinuierlich erfolgt. Das Cäsiumpertechnetat sublimiert bei ca. 600 °C unter oxidierenden Bedingungen aus dem Brennstoff und kann an kalten Kühlflächen eines Abgaskühlers auskristallisiert werden. Durch Auflösen mit warmem Wasser erhält man einerseits eine Lösung von Cäsiumpertechnetat, andererseits werden die Kühlflächen vom Salz befreit und stehen für die Rekristallisation zur Verfügung. Durch die abwechselnde Nutzung der Abgaskühler zur Kristallisation und zur Ablösung des Cäsiumpertechnetats kann die Zellenabluft kontinuierlich vom Cäsiumpertechnetat gereinigt werden. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass ein System zur Entfernung des Cäsiumpertechnetats aus der Zellenabluft einer Prozesszelle technisch ebenso machbar ist. Der Nachweis des chemischen Verfahrens wurde bei KTE mit Rheniumpertechnetat als Ersatz für Technetium am Institut für Nukleare Entsorgung (INE) in Karlsruhe experimentell getestet.<sup>52</sup>

Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass das gesamte Technetium-99 den Brennstoff während der Voroxidation verlässt. Daher werden Reste von Technetium-99 aus dem verbleibenden Anodenschlamm nach der pyrometallurgischen Abtrennung der minoren Aktiniden entfernt. Der Anodenschlamm enthält Edelmetalle wie Niob, Palladium, Rhodium und Ruthenium (die letzten beiden entweichen, ähnlich wie Technetium, während der Voloxidation nicht in die Gasphase) sowie Reste von Technetium-99 und Molybdän. Alle Metalle liegen in der Oxidationsstufe 0 vor, d. h. es handelt sich um Metallschlamm, der mit Wasser aufgenommen werden kann. Dieser Schlamm wird mit Wasserstoffperoxid im leicht alkalischen Bereich (pH 8-9) oxidativ in wässriger Lösung behandelt. Die Suspension wird über einen längeren Zeitraum bei 45 °C gerührt. Die Reaktion zum Pertechmetat ist an der rötlichen Färbung des Pertechmetat-Ions erkennbar:



Das gelöste Pertechmetat kann durch Filtrieren vom Edelmetallschlamm getrennt werden. Die Fällung mit Cäsium, die Abtrennung und gegebenenfalls die Reinigung durch Sublimation erfolgt in gleicher Weise wie bei dem in den Schritten c - f beschriebenen Verfahren. Eine Reinigung von eventuell in geringem Umfang mitgerissenem Molybdän (das in geringem Umfang zu Molybdaten oxidiert wird) kann durch Fällung als Cäsiumpertechmetat erfolgen. Müssen die Chargen des gefällten Pertechmetats mit den von der Voroxidation abgetrennten Chargen gereinigt werden, eignet sich die Sublimation des Cäsiumsalzes zur Reinigung.

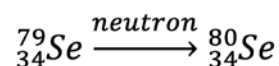
### SELEN-79 UND STRONTIUM-90

Selen-79 und Strontium-90 werden aus dem Abgas der Voloxidationszelle bei Temperaturen abgetrennt, die deutlich höher sind als die für die Abtrennung des Cäsiumpertechmetats verwendeten Temperaturen. Für beide Isotope wird das Verfahren zur Abtrennung derzeit in zwei neuen Patentanmeldungen beschrieben. Daher wird in diesem Kapitel nicht auf die technischen Einzelheiten eingegangen. Selen-79 wird als Bleiselenid gewonnen, eine in Wasser völlig unlösliche Verbindung, die in Pellets gepresst und direkt zur Transmutation in START verwendet werden kann.

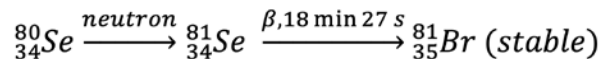
Strontium-90 wird als Strontiumsulfat-Salz abgetrennt. Das trockene Sulfat wird in der Form sein, in der es für medizinische oder industrielle Anwendungen geliefert werden kann. Das Strontium-90-Sulfat wird eine Reinheit aufweisen, die es erlaubt, es als Rohstoff für medizinische Anwendungen zu verwenden. Ein Bereich ist die externe Bestrahlung von Bindehautwucherungen am Auge (Pterygium-Bestrahlung), die subkutane Behandlung von Krebstumoren an Schilddrüse und Hoden. Bei Knochenkrebs werden derzeit mit Strontium-90-Salz gefüllte Ampullen in das Knochengewebe in der Nähe des Tumors oder in diesen selbst eingebracht.

Selen-79 ist im Hinblick auf die Mobilität in geologischen Endlagern bedenklich, da es leicht in verschiedene Oxidationszustände (von -2 bis +4) übergehen kann, was es empfänglich dafür macht, im Grundwasser gelöst zu werden, wenn es in das Endlager gelangt.

Selen-79 kann in START in Selen-80 umgewandelt werden, das stabil ist. Für diese Anwendung kann das abgetrennte Bleiselenid (PbSe) direkt verwendet werden:



Für den Fall, dass Selen-81 aus bereits transmutiertem Selen-80 durch einen zweiten Neutroneneinfang erzeugt werden sollte, zerfällt das Selen-81 schnell in stabiles Brom-81:



Die Transmutation von Selen-79 stellt daher heute kein technisches Problem mehr dar. In START wird die Transmutation für dieses Isotop in der Brutzone des Reaktors durchgeführt (siehe Position TB in [ABBILDUNG 43](#)).

## RHODIUM

Die Abtrennung von Rhodium basiert nicht auf radiologischen Herausforderungen im Abfall. Rhodium ist ein radiologisch stabiles, hochwertiges Edelmetall, das sowohl in der Industrie als auch bei der Herstellung von Schmuck verwendet wird. Sein Preis pro Kilogramm liegt bei etwa 150 000 €. Es besteht ein klares wirtschaftliches Interesse, Rhodium aus den Spaltprodukten abgebrannter Kernbrennstoffe abzutrennen. Rhodiumdioxid verlässt während der Hochtemperaturphase der Voloxidationsstufe den Brennstoff bei Temperaturen von über 500 °C. Bei 850 °C reagiert es mit Sauerstoff in der Gasphase zu Rhodiumtrioxid, das bei 950 °C zu Rhodiummetall und Sauerstoff zerfällt<sup>53</sup>.

KAERI<sup>54</sup> beschreibt in Anlehnung an Hollemann, dass bei der Verflüchtigungsreaktion mit Luft Dirhodiumtrioxid (Rh<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) in einem Temperaturbereich zwischen 500 und 1035 °C das Brennstoffmaterial verlässt und sich Rhodiummetall unter Luft an heißen Oberflächen mit einer Temperatur von über 1034 °C absetzt. Von diesen Oberflächen kann Rhodium mit konzentrierter Schwefelsäure gelöst werden. Die schwefelsaure Lösung kann dazu verwendet werden, das Rhodiummetall durch Elektrolyse an einer Rhodiumkathode<sup>55</sup> abzutrennen. Enthält dieser Niederschlag noch radioaktive Spuren, so kann der Prozess der Auflösung in Schwefelsäure und der Elektrolyse wiederholt werden. Das abgeschiedene Rhodiummetall kann von der Kathodenelektrode entfernt und durch Schmelzen des Edelmetalls unter Argon-Atmosphäre zu Barren verarbeitet werden.

## PARAMETER DER DURCH DEN RECYCLINGPROZESS VON TRANSMUTEX ERZEUGTEN HAW GLASKOKILLEN

In dieser Studie werden die im GRS-Bericht „Untersuchung zur Rückführung radioaktiver Abfälle aus der Wiederaufbereitung“ zitierten Parameter von Glasformen verwendet. Dieser Bericht bezieht sich auf Glaskokillen aus Sellafield, die mit verglasten hochaktiven Abfällen aus der Wiederaufbereitung deutscher abgebrannter Brennelemente in Sellafield in der Vergangenheit<sup>56</sup> beladen wurden. Diese Glaskokillen haben eine maximale Bruttomasse von 530 kg, einen Durchmesser von 43 cm und eine Höhe von 1,34 m. Das Gewicht des leeren Edelstahlzylinders mit Deckelflansch beträgt 94 kg. Für die maximale Konzentration bestimmter Radionuklide in der Glaskokille werden die folgenden Werte des GRS-Berichts verwendet<sup>57</sup>:

|                   |       |               |
|-------------------|-------|---------------|
| <sup>90</sup> Sr  | 4.220 | TBq / Kokille |
| <sup>106</sup> Ru | 33    | TBq / Kokille |
| <sup>134</sup> Cs | 76    | TBq / Kokille |
| <sup>137</sup> Cs | 6.500 | TBq / Kokille |
| <sup>144</sup> Ce | 22    | TBq / Kokille |
| <sup>154</sup> Eu | 101   | TBq / Kokille |
| <sup>241</sup> Am | 1.500 | g / Kokille   |
| <sup>244</sup> Cm | 40    | g / Kokille   |

TABELLE 9

Grenzparameter der HAW-UK-Glasformen.

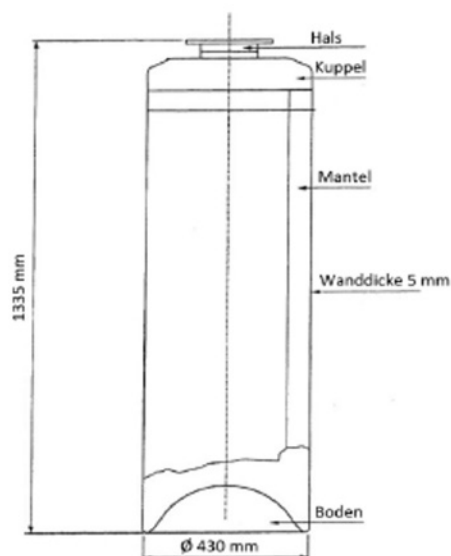


ABBILDUNG 47

Schematische Darstellung einer Glaskokille und Foto einer Glaskokille während des Schweißvorgangs am Verschlussflansch<sup>58</sup>.

Darüber hinaus werden für die radiologische Bestandsaufnahme einige Parameter der in Deutschland hergestellten VEK-Glaskokillen<sup>59</sup> und einige Parameter von MIRAM 14 in der Schweiz für Sellafield-Glaskokillen WA-U-KG-K1-HAA verwendet<sup>60</sup>:

| Parameter                                                                                                   | Nominaler Durchschnittswert |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Maximales Bruttogewicht der Glaskokille                                                                     | 530 kg                      |
| Gesamtgewicht der Glasladungen                                                                              | 437 kg                      |
| Abfallanteil des Glaskörpers                                                                                | 104,8 kg = 24 %.            |
| Maximale $\beta$ -Aktivität insgesamt                                                                       | 9,4 E13 Bq                  |
| Maximale gesamte $\beta$ -/ $\gamma$ -Aktivität                                                             | 2,7 E15 Bq                  |
| Höchstmasse an spaltbarem Material                                                                          | $\leq 70$ g                 |
| Maximale Abklingwärmeleistung am Tag der Beladung des Behälters                                             | $\leq 2000$ W               |
| Maximale Abklingwärmeleistung zum Stichtag für den Eintritt in das Endlager (in dieser Studie 01.01. 2100). | $\leq 500$ W                |

TABELLE 10

In dieser Studie verwendete Parameter zur Qualifizierung von Glaskokillen. Aktivität bedeutet die Gesamtaktivität der emittierenden Nuklide.

### PARAMETER UND GRENZWERTE DES BEHÄLTERS CASTOR®HAW28M

Für den Transport aus der Wiederaufbereitungsanlage werden die Glaskokillen in CASTOR®HAW28M-Behälter verpackt. Diese Behälter sind speziell für den Transport und die Zwischenlagerung von Kokillen mit wärmeentwickelnden, verglasten HAW-Abfällen aus der Wiederaufarbeitung von Brennelementen konzipiert. Der CASTOR®HAW28M kann mit bis zu 28 HAW-Glaskokillen mit einer maximalen Masse von 14,8 Tonnen beladen werden, die im Inneren des Behälters an einem vierstufigen Kupferblechkorb befestigt sind. Auf jeder Ebene befinden sich sieben Glasformen. Bei einem Leergewicht von etwa 100 t hat ein beladener CASTOR®HAW28M somit eine Masse von 114,2 t<sup>61</sup>. Nach Angaben des Herstellers GNS sind diese Behälter für eine maximale Wärmebelastung von 56 kW<sup>62</sup> geeignet.

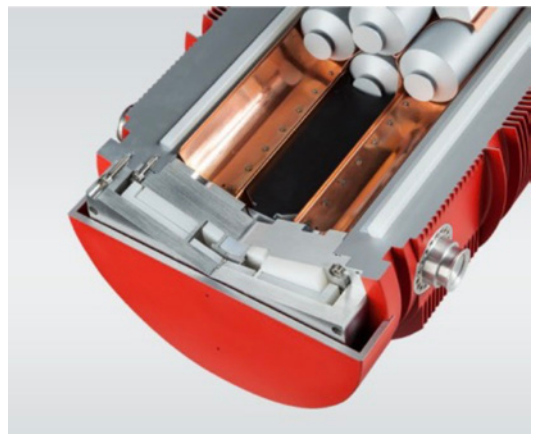
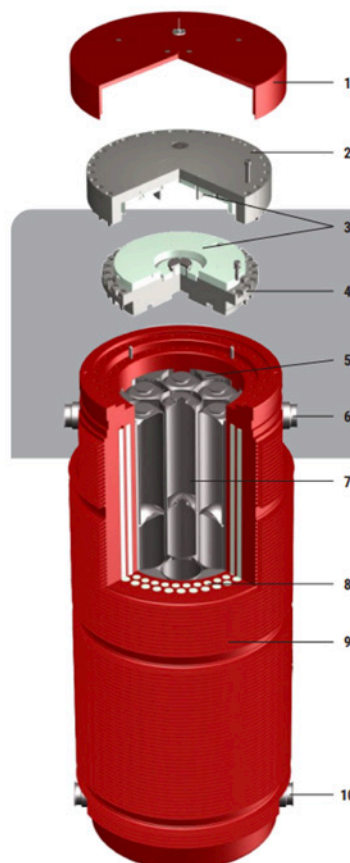


ABBILDUNG 48

CASTOR HAW28M für Transport und Lagerung von 28 Glasformen mit je 2 kW Nachzerfallswärme.

**CASTOR® HAW28M**  
Transport and Storage Cask  
for Vitrified Waste



- Dual purpose cask specially designed for transport and storage of vitrified waste from reprocessing
- Fully compliant with the acceptance criteria in La Hague and Sellafield
- Based on over 40 years of experience and the proven design principle of the CASTOR® family

#### DESCRIPTION

The CASTOR® HAW28M is designed for the transport and interim storage of up to 28 canisters [7] with heat-generating vitrified waste from the re-processing of spent fuel.

The cask consists of the thick-walled cylindrical cask body [9] made of ductile cast iron. For neutron moderation axial boreholes are drilled into the cask wall and filled with polyethylene moderator rods [8]. In addition, there are shielding elements in the basket [5], a moderator plate at the bottom and a multi-part moderator plate [3] on the top of the metal sealed primary lid [4]. In the storage configuration, a secondary lid [2] is tightly secured to the cask body and a protection lid [1] attached.

On the outside wall, radial cooling fins are machined to improve the heat transfer to the environment. Four trunnions are bolted for handling and fixing the cask onto the transport equipment [6, 10]. For transport on public routes the cask can be equipped with shock absorbers.

ABBILDUNG 49

CASTOR HAW28M für Transport und Lagerung von 28 Glaskokillen mit je 2 kW Nachzerfallswärme.

| Tragfähigkeit                                            |               |
|----------------------------------------------------------|---------------|
| Max. 28 Formen mit verglasten, hochradioaktiven Abfällen |               |
| Maximale Gesamtwärmebelastung                            | 56 kW         |
| Maximaler Gesamtaktivitätsgehalt                         | 1 270 E 15 Bq |
| Abmessungen und Gewicht in der Lagerkonfiguration        |               |
| Gesamthöhe                                               | 612 cm        |
| Äußerer Durchmesser                                      | 243 cm        |
| Höhe des Schachts                                        | 518 cm        |
| Durchmesser der Welle                                    | 135 cm        |
| Gewicht des Fasses leer                                  | ~100 t        |

TABELLE 11

Technische Daten des CASTOR HAW28M<sup>9</sup>.

Die Grenzwerte für die Glasformen und den CASTOR HAW28-Behälter, die in dieser Studie berücksichtigt wurden, sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

| Parameter                                                    | 1 Glasform | CASTOR HAW28 |
|--------------------------------------------------------------|------------|--------------|
| Anzahl der Glasformen in einer ELB                           | -          | 28           |
| Bruttogewicht des Glas- und Stahlzylinders [kg]              | 530        | 14 840       |
| Gewicht des leeren Edelstahlzylinders mit Deckelflansch [kg] | 94         | ---          |
| Gewicht der Glasfüllung [kg]                                 | 437        | 12 236       |
| Maximaler Ladungsgehalt im Glas [%]                          | 24         | ---          |
| Maximaler Ladungsinhalt im Glas [kg]                         | 104,9      | 2937,2       |
| Maximale Gesamtaktivität [Bq]                                | 2,7E+15    | 1 270 E +15  |
| Maximale Alpha-Aktivität [Bq]                                | 9,40E+13   | 2,6 E +15    |
| Maximale Beta- und Gamma-Aktivität [Bq]                      | 2,7E+15    | 7,5 E +16    |
| Höchstmaß an spaltbarem Material [g]                         | 70         | 201 600      |
| Am-241 [g/Kokille]                                           | 30         | 42 000       |
| Cm-244 [g/Kokille]                                           | 40         | 1 120        |
| Sr-90 [Bq]                                                   | 4,22E+15   | 1,18E+17     |
| Ru-106 [Bq]                                                  | 3,30E+13   | 9,24E+14     |
| Cs-134 [Bq]                                                  | 7,60E+13   | 2,13E+15     |
| Cs-137 [Bq]                                                  | 6,50E+15   | 1,82E+17     |
| Ce-144 [Bq]                                                  | 2,20E+13   | 6,16E+14     |
| Eu-154 [Bq]                                                  | 1,01E+14   | 2,83E+15     |
| Maximale Wärmeentwicklung im Glas pro Form [kW]              | 0,5        | 56           |
| Durchmesser der Glasform [cm]                                | 43         | ---          |
| Höhe der Glasform [m]                                        | 1,3        | ---          |

TABELLE 12

Grenzwerte für die verglasten Glasformen in dem in dieser Studie verwendeten CASTOR HAW28B-Behälter.

### TRANSMUTEX OXID BRENNSTOFFRECYCLING

In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass alle Brennelemente nach mindestens zehn Jahren Abklingzeit recycelt werden; längere Abklingzeiten stören nicht und sind eher vorteilhaft, weil die Nachzerfallswärme geringer ist. Diese Brennelemente (mit ihrem mindestens 10 Jahre alten Bestand) durchlaufen ein vereinfachtes Wiederaufbereitungsschema (siehe [ABBILDUNG 50](#)).

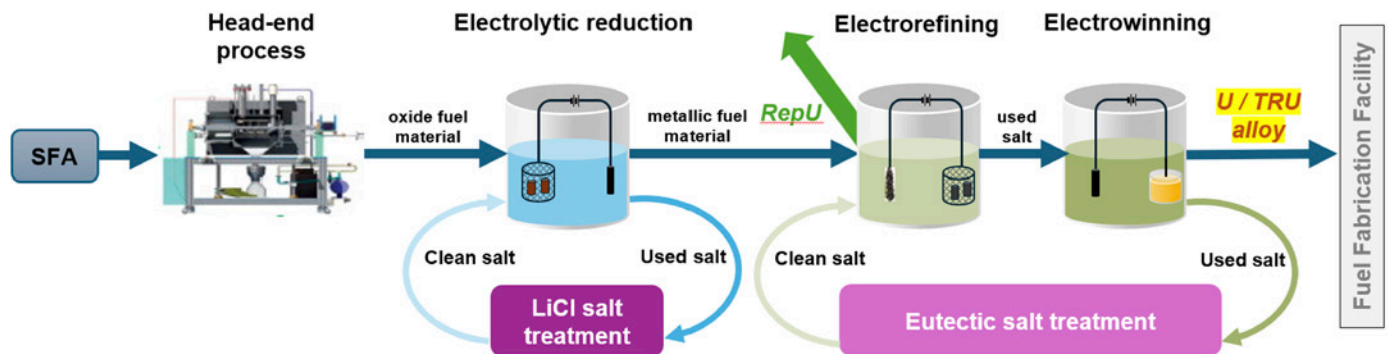


ABBILDUNG 50

Eine Illustration des vereinfachten Schemas der Oxidwiederaufbereitung mit den grundlegenden Schritten.

Die Berechnungen durch das Wiederaufbereitungsschema haben folgende Logik:

- In jedem Prozessschritt (siehe auch in [TABELLE 13](#)) wird ein Teil des Brennstoffs entfernt (die Entfernungsfaktoren dazu sind in [TABELLE 14](#) aufgeführt). So werden im ersten Recyclingschritt, dem Head-End-Prozess, bestimmte Elemente (mit all ihren Isotopen) aus dem Brennstoff entfernt. Im Head-End-Prozess sind das die Elemente Helium, Xenon, Krypton, Wasserstoff, Kohlenstoff, Technetium, Cäsium, Selen, Rhodium und Ruthenium. Das verbleibende Nuklidgemisch geht in den nächsten Recyclingschritt.
- Die Prozessschritte werden mit dieser Logik schrittweise durchführen und die entsprechenden Nuklide mit ihren Entfernungsfaktoren schrittweise entfernt und den Ausgangsströmen zugeordnet (real: aus dem Brennstoffgemisch entfernt). Nach dem letzten Prozessschritt sind also alle Nuklide in die jeweiligen Ausgangsströme aussortiert.

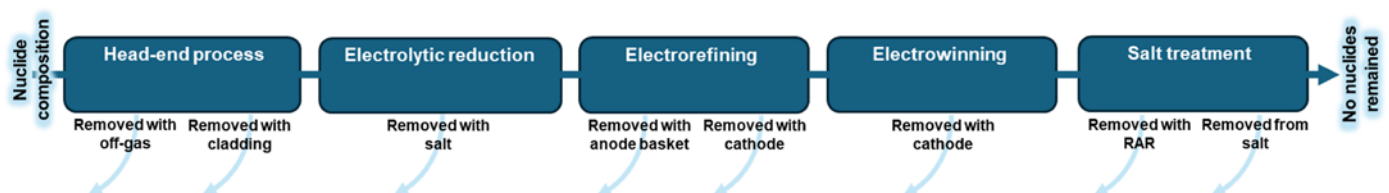


ABBILDUNG 51

Die Entfernungsschritte innerhalb der grundlegenden Schritte der Wiederaufbereitung in einem vereinfachten Schema der Oxidwiederaufbereitung.

**TABELLE 13** gibt einen Überblick über die Ausgangsströme, die für den Recyclingprozess verwendet werden. Beim Head-End-Prozess sublimiert z. B. Cäsiumpertechnetat in das Abgas. Die chemische Trennung liefert Cäsiumchlorid für Industrie und Medizin und Technetiumdioxid für die Herstellung von Transmutationspellets.

| Head-End Prozess   |                           | Elektrolytische Reduktion   | Elektrorefiner              |                      | Elektro-Gewinnung    | Salzbehandlung       |                           |                            |
|--------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------|
| Entfernt mit Abgas | Entfernt mit Decladding   | Entfernt mit Salzsäuremelze | Entfernt mit Anodenkorb     | Entfernt mit Kathode | Entfernt mit Kathode | Entfernt mit RAR     | Entfernt von Salz         |                            |
| He, Xe             |                           |                             |                             |                      |                      |                      |                           | Inaktive Abgabe            |
| C-14, Tritium      |                           |                             |                             |                      |                      |                      |                           | Niedrig aktiver Abfall     |
|                    | Hüllrohr, Kopf- & Fußteil |                             | Übergangs- und Basismetalle |                      |                      |                      |                           | MAW-Metalle                |
| Tc, Se, I          |                           |                             | Tc                          |                      |                      |                      |                           | Transmutation              |
| Cs, Kr, Ru, Rh     |                           | Sr                          |                             |                      |                      |                      |                           | Industrie, Medizin         |
|                    |                           |                             |                             | U                    |                      |                      |                           | Wiederaufgearbeitetes Uran |
|                    |                           |                             |                             |                      | U, Pu, Am, Np, Cm... | U, Pu, Am, Np, Cm... |                           | Recycelt von Transmutex    |
|                    |                           | Ba, einige FP               |                             |                      |                      |                      | Lanthaniden und andere FP | Verglaste Abfall HAW       |

TABELLE 13

Darstellung der grundlegenden Prozessschritte der Wiederaufbereitung und ihrer Ausgangsströme. Die aufgeführten Elemente sind Beispiele für die Hauptakteure.

IN TABELLE 14 wird der Zusammenhang zwischen Wiederaufbereitungsschritten und Ausgabeströmen während des Recyclingprozesses veranschaulicht, mit Hinweisen auf die Elemente, die im aktuellen Prozessschritt abgetrennt werden.

Eine einfache Übersicht über die wichtigsten Materialmassen, die in den verschiedenen Ausgangsströmen während der Oxidbrennstoff-Wiederaufbereitungsschritte aller 1426 SFA gesammelt werden, ist in TABELLE 15 dargestellt.

TABELLE 14

Einige Elemente mit ihren Entfernungsfaktoren im Head-End-Prozess und ihre Zuordnung zu den Ausgangsströmen.

| Entfernte Elemente mit ihren Abscheidungseffizienzen und Output-Strömen im Head-End-Prozess Off-Gas-System |         |                   |                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------|------------------------|
| Gruppe                                                                                                     | Element | Entfernungsfaktor | Ausgangsstrom          |
| Edelgase                                                                                                   | Er      | 1                 | Inaktiv, Abgabe        |
|                                                                                                            | Ne      | 1                 | Inaktiv, Abgabe        |
|                                                                                                            | Ar      | 1                 | Inaktiv, Abgabe        |
|                                                                                                            | Kr      | 1                 | Industrie              |
|                                                                                                            | Xe      | 1                 | Industrie              |
|                                                                                                            | Rn      | 1                 | Aktiv, Abgabe          |
| Nichtmetalle                                                                                               | H       | 1                 | LAW                    |
|                                                                                                            | C       | 1                 | LAW                    |
|                                                                                                            | N       | 1                 | LAW                    |
|                                                                                                            | O       | 1                 | Inaktiv, Abgabe        |
|                                                                                                            | P       | 1                 | LAW                    |
|                                                                                                            | S       | 1                 | LAW                    |
|                                                                                                            | Se      | 0,53              | Transmutation          |
| Halbflüchtige                                                                                              | Mo      | 0,96              | MAW                    |
|                                                                                                            | Tc      | 0,92              | Ziel der Transmutation |
|                                                                                                            | Ru      | 0,98              | Industrie              |
|                                                                                                            | Rh      | 0,83              | Industrie              |
|                                                                                                            | Te      | 0,53              | LAW                    |
|                                                                                                            | I       | 1                 | Ziel der Transmutation |
|                                                                                                            | Cs      | 0,98              | Industrie              |
|                                                                                                            | Rb      | 0,96              | LAW                    |

| Entferntes Material durch Partitionierung             | Zweck                         | Masse [kg]     |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------|
| Uran                                                  | Wiederverwendung              | 675'731        |
| Technetium                                            | Transmutation in START        | 863            |
| Selen                                                 | Transmutation in START        | 30             |
| Jod                                                   | Transmutation in START        | 236            |
| U/TRU                                                 | START unterkritischer Reaktor | 52'449         |
| Cäsium                                                | Industrie / Medizin           | 2'391          |
| Strontium                                             | Medizin                       | 562            |
| Rhodium                                               | Industrie                     | 456            |
| Metalle und Übergangsmetalle (ohne Tc und Rh)         | MAW                           | 7'902          |
| Lanthanide, Reste andere Metalle                      | HAW                           | 11'560         |
| <b>Ursprünglicher Schwermetallgehalt der 1426 BEs</b> |                               | <b>765'696</b> |

**TABELLE 15** Übersicht über die wichtigsten Stoffausträge beim Recycling der 1426 abgebrannten, oxidischen Brennelemente.

Die verbleibenden hochaktiven Spaltprodukte gelangen in die Verglasungsanlage und werden dort zu hochaktiven Glaskokillen verarbeitet. Es wird davon ausgegangen, dass mit diesem Strom kein Prozesssalz in das Glas gelangt, da die Nuklide größtenteils als Metalle aus dem Salz entfernt und als Oxide ins Glas eingebracht werden. Die Zerfallswärme und die Aktivitäten wurden mit dem Bateman-Code bis zum 01.01.2100 berechnet. Die Ergebnisse für die 21 abgebrannten Brennelemente im Behälter TN24-02 SZL sind zusammengefasst in Anlage 12. Für die 21 wiederaufbereiteten BE werden formal 0,19 Glasformen für die Lagerung der entstandenen verglasten HAW benötigt. Der MAW aus dem ursprünglichen Brennstoff der 21 Brennelementen beträgt 7902 kg. Dieser Metallabfall kann in (7902 kg MAW / 3'430 kg/MOSAIK =) 2,3 MOSAIK II-Behälter geladen werden. Eine detaillierte Beschreibung zur Berechnung des MAW findet sich weiter unten.

Für alle 1426 Brennelemente ergibt sich für die Endlagerung der Hüllrohrabschnitte und der strukturellen Elemente der Brennelemente eine Gesamtzahl von 95 MOSAIK II-Behälter, die für den mittelaktiven Abfall aus der Wiederaufbereitung erforderlich sind. Obwohl diese Zahl im Vergleich zur Anzahl der HAW-Behälter groß erscheint, sind die Größe und die Wärmeproduktion kleiner, sodass auch das erforderliche Volumen in einem Lager für mittelaktive Abfälle (z. B. Schachanlage KONRAD) durch eine kompakte Lagerung niedrig ausfällt.

Die Ergebnisse für HAW aus allen 1426 SFAs aus der Oxidwiederaufbereitung wurden gruppiert nach vorhandenen und geplanten Behältern zusammengefasst. Formal wären 127,2 Glaskokillen für die Lagerung der verglasten hochaktiven Abfälle aus der Oxidwiederaufbereitung erforderlich, die in (127,2 Formen /28 Formen/Behälter=) 4,5 CASTOR HAW28-Behältern gelagert werden könnten. Verglichen mit den 72 Lagerbehältern für SFAs ( $72 \cdot 4,5 = 67,5$  Behälterreduzierung) würde dies eine ( $67,5/72 =$ ) 93,8 % Volumenreduzierung bedeuten, wenn nur die Oxidwiederaufbereitung berücksichtigt würde. Hier wird in den nächsten Kapiteln der HAW aus der Transmutation der Transurane dazugerechnet, daher macht auch die Angabe mit angebrochenen Glaskokillen und Behältern Sinn, weil die Spaltstoffe aus der Transmutation zu diesen Kokillen addiert werden.

### SOFORTIGE VOLLSTÄNDIGE SPALTUNG

Aus den Oxid-Wiederaufbereitungs-Ausgangsströmen kann das gewonnene Uran als größter Massenanteil endgelagert oder verkauft werden. Der U/TRU-Anteil wird für die Spaltung/Transmutation im unterkritischen Kern von START verwendet. Dieser Strom wird im sogenannten „Anreicherungsanpassungsschritt“ weiterverarbeitet, um die vordefinierte TRU-Anreicherung im START-Treiberbrennstoff zu erreichen. In diesem Schritt wird davon ausgegangen, dass der Urangehalt um weitere 95 % reduziert wird (Uran wird dabei durch Thorium ersetzt).

Etwa 7 Jahren nach den einzelnen Oxidwiederaufbereitungsschritten können neu erzeugte Brennelemente als Treiberbrennstoff für den inneren Kernbereich von START verwendet werden. Für diese Verwendung wird eine vollständige, sofortiger Kernspaltung berechnet: Die verbleibenden Aktiniden werden als vollständig gespalten betrachtet. Die ursprünglich vorhandenen Lanthanide werden in diesem Schritt unverändert belassen. Das erste Datum der Kernspaltung ist der 01.01.2042, das letzte der 01.01.2050.

Der folgende, zusammengefasste Anteil an Transuranen, der aus den 1426 abgebrannten Brennelementen stammt und im unterkritischen Kern von START transmutiert wird, ist in der folgenden Tabelle aufgeführt. Der bei dieser Transmutation entstehende hochaktive Abfall wird im folgenden Abschnitt berechnet.

| Element oder Elementgruppe   | Masse [kg]    |
|------------------------------|---------------|
| Lanthanoide                  | 2'826         |
| Uran                         | 1'778         |
| Neptunium                    | 496           |
| Plutonium                    | 11'554        |
| Americium                    | 1'909         |
| Curium                       | 100           |
| <b>Schwermetall in Summe</b> | <b>18'663</b> |

TABELLE 16

Übersicht über das für die weitere Spaltung in START verwendete U/TRU-Produkt, das aus der Aufarbeitung von 1426 abgebrannten Brennelementen resultiert.

### TRANSMUTEX START METALLISCHE BRENNLEMENTAUFBEREITUNG

Nach der sofortigen vollständigen Spaltung wurde mit dem Bateman-Code eine weitere Abklingzeit von 10 Jahren vor dem nächsten Wiederaufbereitungsschritt berechnet. Diese Abklingzeit ist auch für abgebrannte START Brennelemente erforderlich, damit die Nachzerfallswärme auf ein Maß zurückgeht, dass eine Aufarbeitung in heißen Zellen technisch möglich ist.

Die Aufarbeitung dieser Brennelemente ähnelt nach der Abklingzeit dem Verfahren, wie es in [ABBILDUNG 50](#) beschrieben. Im Unterschied dazu wird in diesem Fall kein Uran abgetrennt, die Reduktionsphase wird ausgelassen, weil es sich bereits um metallischen Brennstoff handelt, und die Aktinide sind in mehreren Zyklen total transmutiert worden, sodass lediglich Thorium wiedergewonnen wird, welches für die spätere Brennelementherstellung wiederverwendet werden kann. Diese vereinfachte Wiederaufarbeitung separiert im Wesentlichen die Spaltprodukte, die bei der Transmutation der Transurane in START entstehen, und ist in der folgenden [ABBILDUNG 52](#) dargestellt. Rein rechnerisch werden diese Spaltprodukte bis zum Jahr 2100 abklingen, bevor sie in einem Endlager eingelagert werden. Für deren Berechnung werden ihre Masse, ihre Nachzerfallswärme und die Aktivitätswerte mit dem Bateman-Code berechnet. Die Ergebnisse wurden zusammengefasst und die erforderlichen Kokillen und Endlagerbehälter unter Berücksichtigung der Grenzwerte für die Kokillen berechnet.

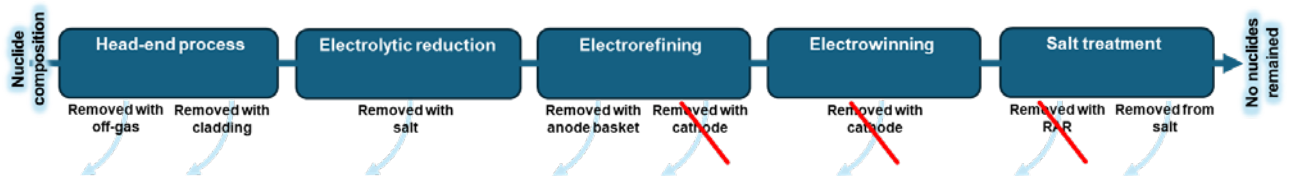


ABBILDUNG 52 Die Entfernungsschritte in einem vereinfachten Schema nach sofortiger vollständiger Spaltung.

Die Anzahl der Kokillen wird in diesem Fall durch das Limit der Nachzerfallswärme pro Kokille bestimmt. Theoretisch resultiert aus den 21 Brennelementen für diesen Aufarbeitungsschritt eine Nachzerfallsleistung von 1476 W, die rechnerisch auf 2,95 Glasformen verteilt werden muss.

Für den HAW aus der Wiederaufbereitung des gesamten START Treiberbrennstoffs, der aus dem Transuran-Gehalt der ursprünglichen 1426 Brennelemente stammt, wurde die erforderliche Anzahl an Glaskokillen berechnet. Basierend auf diesen Ergebnissen sind zum 01.01.2100 157,8 Glaskokillen erforderlich. Dabei stellt die Nachzerfallswärme im Glas von 79,9 kW den limitierenden Parameter für die Anzahl der benötigten Kokillen dar. Sie ist erheblich höher als die Nachzerfallswärme im HAW aus der Wiederaufbereitung von Oxiden, was zu erwarten ist, da die Abkühlzeit der Spaltprodukte erheblich (Jahrzehnte) kürzer ist. Es ist jedoch von Vorteil, den gesamten HAW vor der Verglasung zu mischen. Die Auswirkung dieser Mischung ist in der [TABELLE 17](#): 'Erforderliche Kokillenzahl zur Endlagerung der Spaltprodukte aus der Spaltung der Actinide gemäß des Recyclingansatzes von Transmutex.' klar ersichtlich, weil durch die Mischung mit den weniger heißen HAW insgesamt ein weniger wärmeproduzierendes Abfallprodukt hergestellt werden kann und dann wieder die maximale Oxidmasse, welche bei der Verglasung ins Glas maximal eingebracht werden darf, die Anzahl der erforderlichen Glaskokillen bestimmt. Es ist also auch chargenweise sinnvoll, den HAW aus der oxidischen Aufarbeitung eines BE mit dem HAW aus der Transmutation seiner Transurane zu vermischen, weil dadurch die Gesamtanzahl an Glaskokillen optimiert wird.

**TABELLE 12 :** Grenzwerte für die verglasten Glasformen in dem in dieser Studie verwendeten CASTOR HAW28B-Behälter' wurden die Grenzwerte pro Kokille für einige Nuklide überprüft. Es ist klar zu erkennen, dass die Nuklidgrenzwerte für die erzeugten Glaskokillen weit unterschritten werden. Insgesamt bleibt die in das Glas beim Verglasungsprozess einbringbare Oxidmasse im HAW der limitierende Grenzwert für die Bestimmung der Kokillenzahl.

Die Gesamtzahl der aus den beiden Aufbereitungslinien resultierenden verglasten Glaskokillen und die Anzahl der zur Aufnahme erforderlichen Endlagerbehälter sind in **TABELLE 17** für die Aufarbeitung der 1426 Brennelemente dargestellt. Für die Zwischenlagerung der endgültigen HAW aus der Aufbereitung der 1426 SFA sind 230 Glasformen erforderlich. Der begrenzende Parameter für die Beladung der Glasformen ist die Masse des in das Glasgemisch eingebrachten Oxids. Wie in **TABELLE 18** gezeigt wird, ist der Gehalt an Cäsium-137 und Strontium-90 weit von dem oberen Grenzwert, der für die Kokillen laut **TABELLE 9** gilt, entfernt.

|                                                                                                        | Masse der Nuklide im HAW [kg] | Masse der Oxide im Glas [kg] | Alpha-Aktivität [Bq] | Beta- oder Gamma-Aktivität [Bq] | Radioaktivität [Bq] | Zerfallswärme [kW] |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------|
| HAW aus der Wiederaufbereitung der SFAs                                                                | 11'559,9                      | 13'342,9                     | 8,46E+11             | 9,51E+16                        | 9,51E+16            | 7,5                |
| HAW aus der Wiederaufbereitung des TMX-Treiberkraftstoffs                                              | 9'350,6                       | 10'739,5                     | 3,62E+08             | 1,11E+18                        | 1,11E+18            | 78,9               |
| <b>Gesamtsumme</b>                                                                                     | <b>20'910,5</b>               | <b>24'082,4</b>              | <b>8,47E+11</b>      | <b>1,21E+18</b>                 | <b>1,21E+18</b>     | <b>86,4</b>        |
| Grenzwerte pro Glaskokille                                                                             |                               | 104,9                        | 9,40E+13             | 7,50E+15                        | 9,60E+15            | 0,5                |
| Anzahl der erforderlichen Glaskokillen auf der Grundlage der individuellen Grenzwerte für eine Kokille |                               | <b>229,57</b>                | 0,0090               | 161,03                          | 125,80              | 172,86             |

**TABELLE 17**

Erforderliche Kokillenzahl zur Endlagerung der Spaltprodukte aus der Spaltung der Actinide gemäß des Recyclingansatzes von Transmutex. Die Zahlen berücksichtigen die Spaltprodukte aus der Transmutation aller Transurane aus 1426 Brennelementen.

|                                                                  | Spaltbares Material [g] | Am-241 [g]  | Cm-244 [g]   | Sr-90 [Bq]      | Ru-106 [Bq]     | Cs-134 [Bq]     | Cs-137 [Bq]     | Ce-144 [Bq]     |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| HAW aus der oxidischen Wiederaufbereitung der Brennelemente      | 2,50                    | 4,96        | 0,024        | 3,29E+16        | 6,59E+03        | 1,79E+05        | 1,15E+16        | 8,01E+03        |
| HAW aus der Wiederaufbereitung der START Transmutation           | 0,00                    | 0,00        | 0,000        | 1,73E+17        | 1,27E+00        | 1,94E+07        | 3,68E+17        | 3,55E-01        |
| <b>Gesamtsumme</b>                                               | <b>2,50</b>             | <b>4,96</b> | <b>0,024</b> | <b>2,06E+17</b> | <b>6,59E+03</b> | <b>1,96E+07</b> | <b>3,79E+17</b> | <b>8,02E+03</b> |
| Grenzwerte für 1 Glasform                                        | 70                      | 1500        | 40           | 4,22E+15        | 3,30E+13        | 7,60E+13        | 6,50E+15        | 2,20E+13        |
| Erforderliche Glasformen auf der Grundlage von Nuklidgrenzwerten | < 0,01                  | < 0,01      | < 0,01       | 48,7            | < 0,01          | < 0,01          | 58,4            | < 0,01          |

**TABELLE 18**

Erforderliche Glaskokillen auf der Grundlage von Nuklidgrenzwerten bei der Wiederaufbereitung der abgebrannten Brennelemente und bei der Wiederaufbereitung der vollständig gespaltenen Actiniden im Transmutex-Ansatz.

## 7 Vergleich der erforderlichen Endlagerbehälter

### 7.1.

#### Speichervolumen und Reduktionsfaktor

Vergleicht man die Anzahl der Behälter für die direkte Entsorgung und die Anzahl der Behälter für die Lagerung von Glaskokillen nach dem Recyclingansatz von Transmutex (siehe in [TABELLE 19](#)), dann ist erkennbar, dass die erreichbare Volumenreduzierung für das Lagervolumen von HAW bei 89 % liegt. Mit anderen Worten: Durch den Recyclingansatz von Transmutex kann ein Reduktionsfaktor für das HAW-Volumen von 8,8 erreicht werden. Die daraus resultierenden hochaktiven Abfälle würden nur noch 11 % des bei direkter Einlagerung nötigen Volumens in einem zukünftigen geologischen Tiefenlager einnehmen, was die Entsorgungskosten und den ökologischen Fußabdruck verringern könnte. Es muss erwähnt werden, dass der im geologischen Endlager erreichte Reduktionsfaktor auch von den in diesem Vergleich verwendeten Endlagerbehältern abhängt. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass abgeschirmte CASTOR HAW28M-Behälter verwendet werden, da die Abschirmung in einem tiefen Endlager nicht erforderlich ist. Aufgrund fehlender Daten kann in dieser Studie nur die Reduzierung auf der Grundlage der Verpackung des Zwischenlagerbehälters verwendet werden. Der Reduktionsfaktor wird sich aber in dieser Größenordnung bewegen. Vergleicht man die Daten der Vorstudie, in der ein Gesamtreduktionsfaktor des HAW-Volumens von 8,9 berechnet wurde, so hat sich der Volumenreduktionsfaktor geringfügig auf 8,8 geändert. Diese Änderung spiegelt die Verwendung genauerer Datensätze wider, die nun auch niedrigaktive oder stabile Spaltprodukte enthalten und letztlich die Glasmenge in den Kokillen leicht erhöhen. Dieser Effekt war erwartet worden. Andererseits wird sich der Reduktionsfaktor erhöhen, wenn aus bestimmten Gründen nur CASTOR V/19-Behälter für die Verpackung der restlichen 533 SFA aus dem Pool verwendet werden, da diese Behälter nur 19 statt 21 SFA enthalten (wie in Transnucleaire TN24).

|                                                                                                        |              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Anzahl der derzeit vorhandenen Container, die mit SFAs beladen sind                                    | 45           |
| Anzahl der vorgeschlagenen neuen Container für die Verladung von SFAs aus dem Brennelementelagerbecken | 27           |
| <b>Gesamtzahl der Behälter mit direkter Entsorgung im Endlager</b>                                     | <b>72</b>    |
| Gesamtzahl der erforderlichen Glaskokillen für HAW nach Transmutex                                     | 229,6        |
| Anzahl der Glasformen in voll beladenem Lagerbehälter CASTOR HAW28M                                    | 28           |
| <b>Gesamtzahl der benötigten CASTOR HAW28M Lagerbehälter</b>                                           | <b>8,2</b>   |
| <b>Unterschied</b>                                                                                     | <b>-63,8</b> |
| Unterschied im Volumenbedarf [%]                                                                       | -89 %        |
| <b>Reduktionsfaktor</b>                                                                                | <b>8,8</b>   |

TABELLE 19

Vergleich der Anzahl der benötigten Endlagerbehälter bei direkter Entsorgung und beim Ansatz von Transmutex für das untersuchte Zwischenlager.

## 7.2.

**Verkürzung der Abklingzeit**

Die Verringerung der Abklingzeit der Radioaktivität wurde ebenfalls berechnet. In dieser Studie wurde die Radioaktivität der Schwermetallmenge (Uran für UOX-Brennstoff und teilweise Plutonium für MOX-Brennstoff) als Referenz herangezogen, die für die Erzeugung der 1426-Brennelemente in frischem Zustand verwendet wurde. Die erzeugten 223 Kokillen aus der Aufarbeitung nach Transmutex werden mit ihrer Radioaktivität mit der Radioaktivität dieser Schwermetallmasse verglichen. Im Detail stellt sich die Frage, wann die Radioaktivität der zu lagernden Abfälle das Level der Radioaktivität des entnommenen Uranerzes erreichen wird. Es ergeben sich 447,6 Tonnen für den Schwermetallgehalt der bereits in Behälter verladenen Brennelemente und Brennelemente mit einem Schwermetallgehalt von 288,1 Tonnen sind noch im Brennelementlagerbecken der Anlage vorhanden. Insgesamt wird daher von einem Schwermetallinventar der 1426 Brennelemente der Anlage von 735,7 Tonnen ausgegangen. Die Radioaktivität der HAW-Glaskokillen wird daher mit dem Wert des natürlichen Uranerzes verglichen, der der Schwermetallmenge in den 1426 frischen Brennelementen entspricht, die sich auf 765,7 Tonnen Schwermetall beläuft.

Für die Brennelemente wurde der Abklingvorgang der Gesamtradioaktivität der 1426 SFA verwendet, wie er unter der Bedingung einer direkten Entsorgung stattfinden würde. Für die nach dem Recycling erzeugten HAW-Glasformen wurde der Radioaktivitätswert der erzeugten 229,6 Glasformen verwendet und abgeklungen.

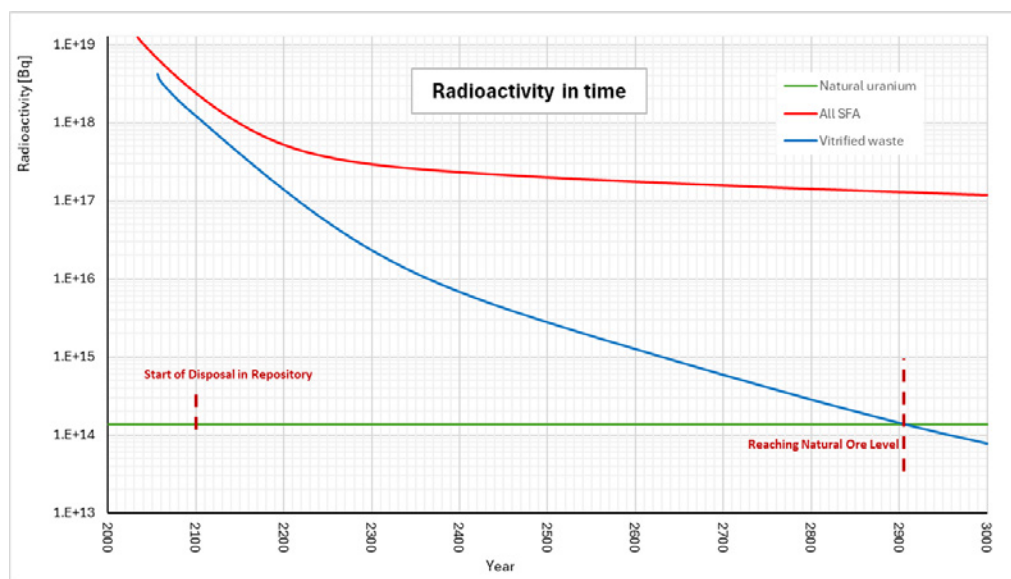


ABBILDUNG 53

Abklingkurven: Radioaktivität von 1426 SFAs (direkte Entsorgung, in rot) im Vergleich zur Radioaktivität der Glasformen (erzeugt durch Recycling mit dem Transmutex-Verfahren, in blau). Die grüne Referenzlinie stellt die Radioaktivität des natürlichen Uranerzes dar (das die gleiche Menge an Schwermetallen wie die ursprünglich zur Fertigung der 1426 Brennelemente verwendet wurde).

Die Zerfallskurven zeigen, dass die erzeugten Glasformen nach etwa 810 Jahren (ab dem Jahr 2100) das Niveau der äquivalenten Menge natürlichen Uranerzes erreichen. Die Berechnung der 1426 abgebrannten Brennelemente bei direkter Entsorgung erreicht dieses Niveau nach 35 bis 40 Millionen Jahren. Dies ist ein Reduktionsfaktor in Bezug auf die Zerfallszeit von mindestens 43 000 (diese Zahl liegt so hoch, weil sehr genaue Ausgangsdaten mit 800 bis 900 Nukliden pro Brennelement verwendet wurden).

## 8 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In dieser Studie wird die direkte Endlagerung von 1426 abgebrannten Brennelementen, die aus dem Leistungsbetrieb einer Konvoi-Anlage stammen, mit der Lagerung der aus diesen 1426 Brennelementen entstehenden hochradioaktiven Glaskokillen für den Fall verglichen, dass alle Brennelemente nach dem Ansatz von Transmutex rezykliert werden. Dieser Ansatz umfasst die Aufarbeitung aller Brennelemente, die Rückführung von Rohstoffen in die Kreislaufwirtschaft, die Abtrennung der transuranischen Isotope, ihre zyklusweise Transmutation im schnellen Neutronenspektrum eines START Reaktors und die Verglasung der nach der Transmutation verbleibenden hochradioaktiven Abfälle.

Im Ergebnis kann das Volumen der hochradioaktiven Abfälle mit dem beschriebenen Verfahren im Vergleich zu einer direkten geologischen Endlagerung um den Faktor **8,8**, d. h. **um 89 %**, verringert werden. Der begrenzende Faktor, der die Anzahl der Glasformen bestimmt, ist die Masse des Oxids, das in die entstehenden Glasformen geladen werden kann.

Die Ergebnisse sind sowohl aussagekräftig als auch relevant. Zum einen wurde eine große Anzahl von Brennelementen verwendet, zum anderen wurden auch unterschiedliche Arten von Brennstoff (wie Uranoxid, Mischoxid und Gadolinium-haltiger Brennstoff) berücksichtigt. Man erhält daher einen repräsentativen Überblick über die Situation der abgebrannten Brennelemente in deutschen Druckwasserreaktoren.

Die Genauigkeit der Abbranddaten der verwendeten Brennelemente ist hoch, da zwischen 800 und 900 Nuklide pro Brennelement für die Berechnungen verwendet wurden, die mehr als 99 % der Masse des Brennstoffs und 99 % des Aktivitätsgehalts jedes Brennelementes ausmachen. Diese hohe Genauigkeit - das ist auch ein Ergebnis dieser Studie - ist notwendig, wenn die Aufarbeitung der Brennelemente alle stabilen Spaltprodukte einschließen soll, die für den Nachweis ihres wirtschaftlichen Wertes als Seltene Erden oder Edelmetalle von Bedeutung sind.

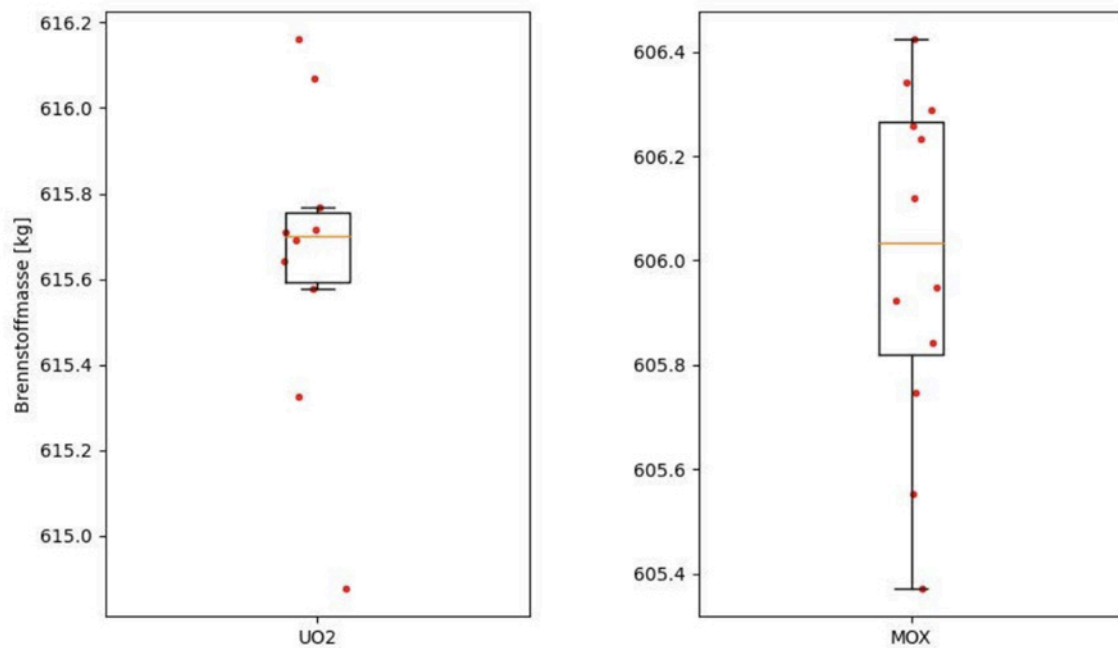
Die nach dem gezeigten Verfahren verbleibenden verglasten Abfälle erreichen durch Zerfall die Radioaktivität der ursprünglich zur Herstellung verwendeten Menge natürlichen Uranerzes in etwa **810 Jahren**. Das ist **40 000-mal schneller** als die Abklingzeit bei der direkten Endlagerung, die benötigt wird, wenn die unbehandelten hochradioaktiven Abfälle direkt in einem geologischen Endlager entsorgt würden.

Diese Studie zeigt auch, dass die beschleunigergetriebene Transmutation der transuranischen Nuklide abgebrannter Brennelemente eine Energiequelle für viele Jahre darstellen kann.

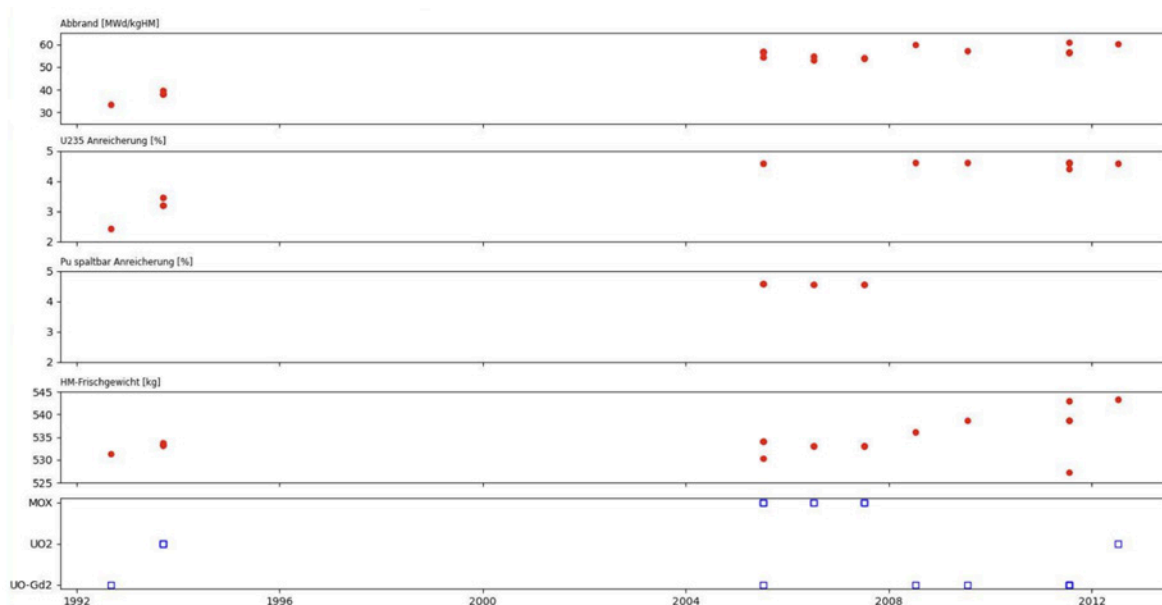
Die Transmutation ermöglicht die nahezu vollständige Entfernung der transuranischen Nuklide aus den hochradioaktiven Abfällen und die Entfernung und Transmutation von langlebigen, potenziell grundwasserlöslichen Spaltprodukten wie Technetium-99, Jod-129 und Selen-79. Technisch ist dieses Verfahren heute möglich und kann durch zahlreiche Referenzen in den USA und Südkorea belegt werden.

Diese Studie zeigt darüber hinaus, dass signifikant genaue Datensätze für die Berechnung von abgebrannten Brennelementen notwendig sind, um eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft in der Zukunft bei der Aufarbeitung dieser Abfälle zu ermöglichen.

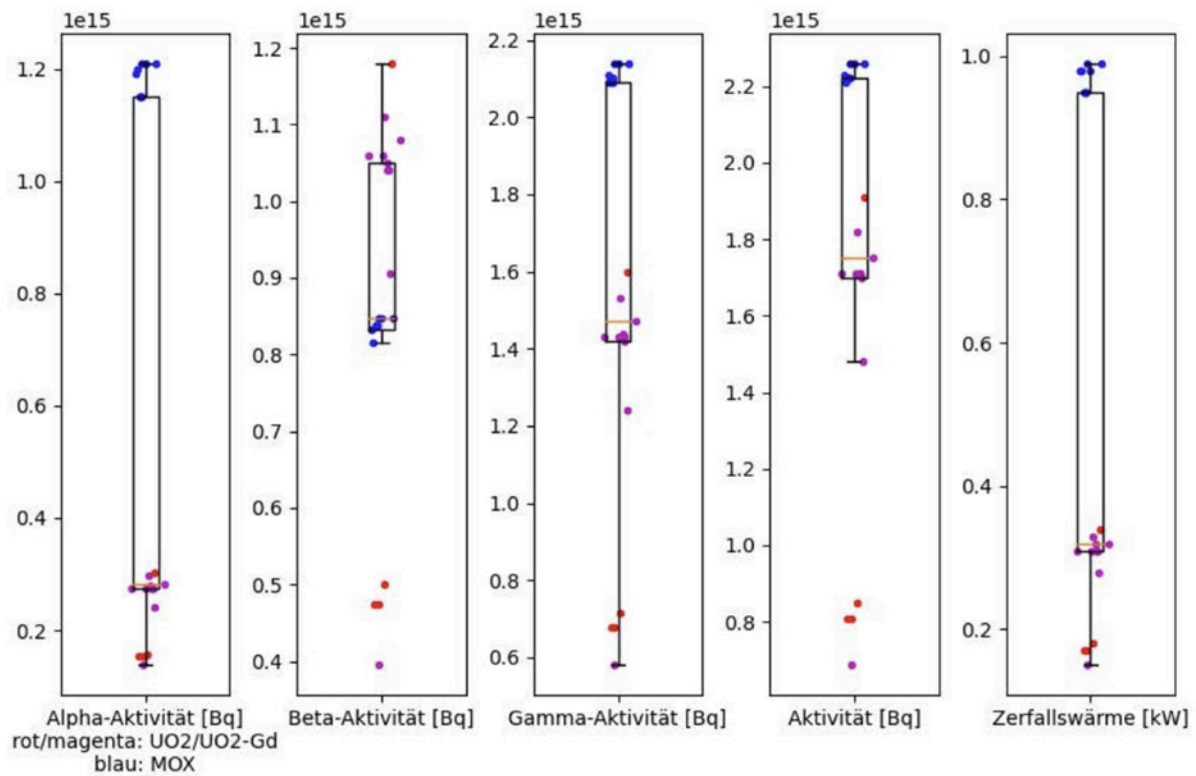
## 9 Anhang



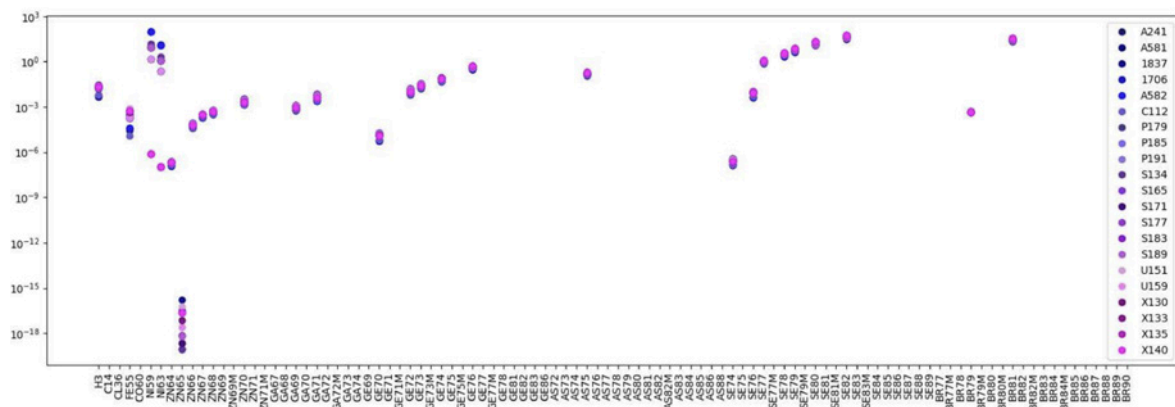
ANLAGE 1 | Parameter der UOx und MOX Brennelemente.



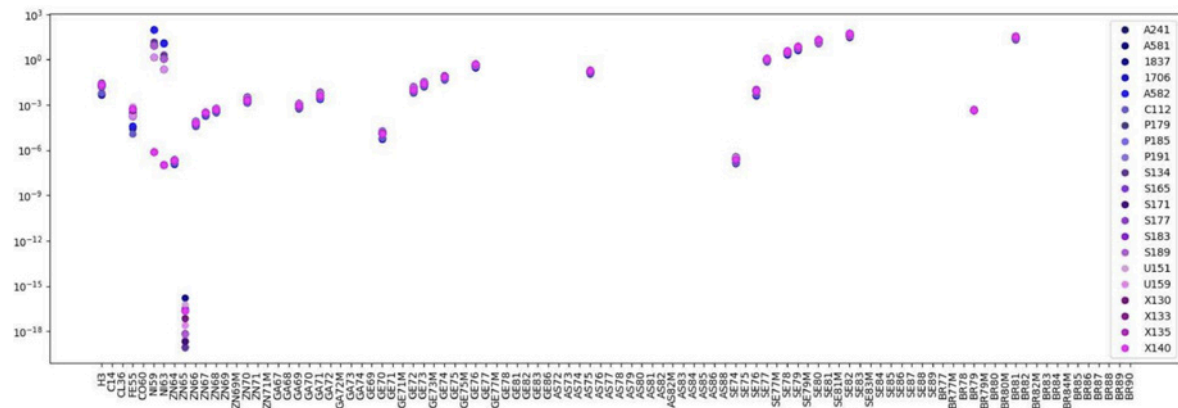
ANLAGE 2 | Brennelementdaten des Containers TN24-02-SZL.



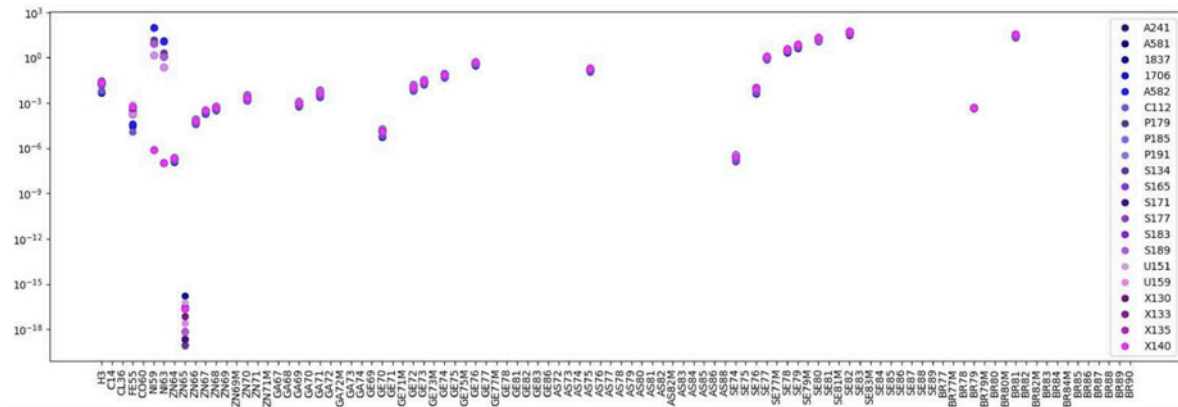
ANLAGE 3 Ergebnisse der erneut gerechneten 21 BE in TN24-02-SZL aus der Vorstudie.



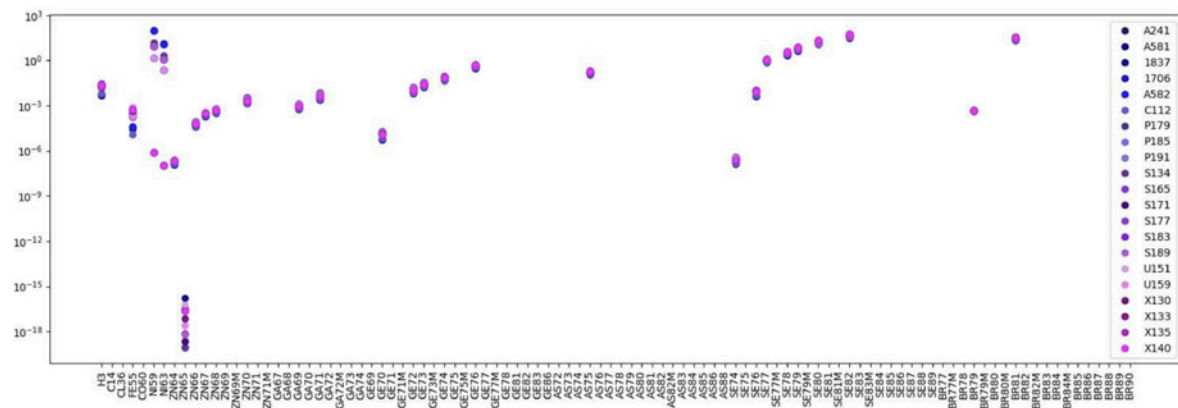
ANLAGE 4.1 Ursprüngliche Datensätze der abgebrannten BE aus CASMO/SIMULATE Rechnungen des Betreibers.



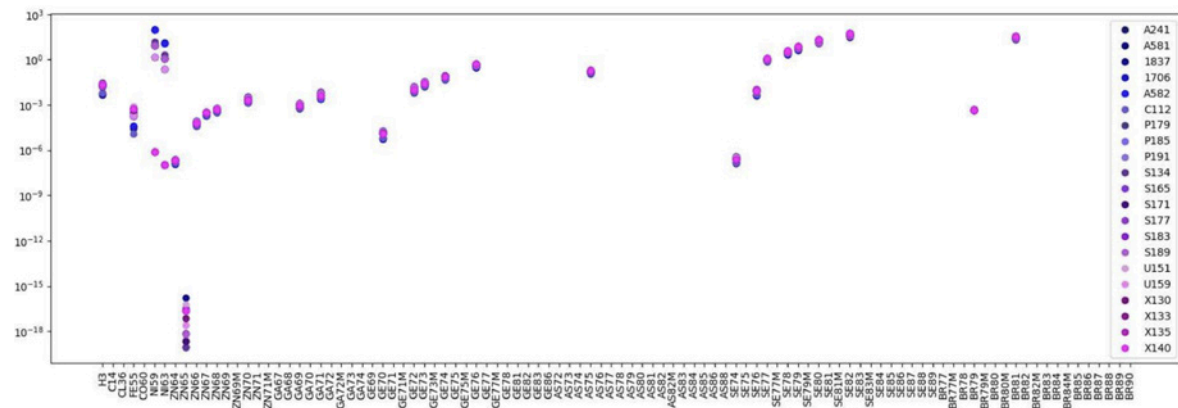
ANLAGE 4.2 Ursprüngliche Datensätze der abgebrannten BE aus CASMO/SIMULATE Rechnungen des Betreibers.



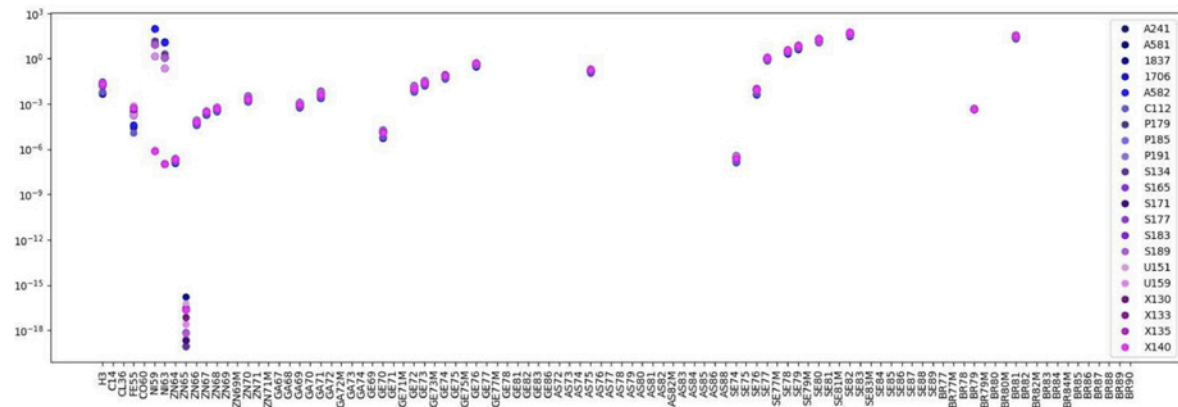
ANLAGE 4.3 Ursprüngliche Datensätze der abgebrannten BE aus CASMO/SIMULATE Rechnungen des Betreibers.



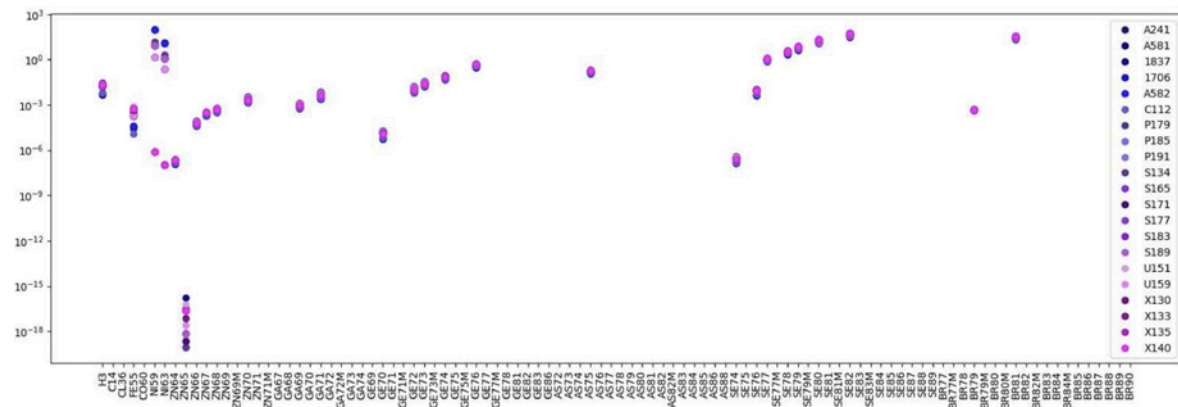
ANLAGE 4.4 Ursprüngliche Datensätze der abgebrannten BE aus CASMO/SIMULATE Rechnungen des Betreibers.



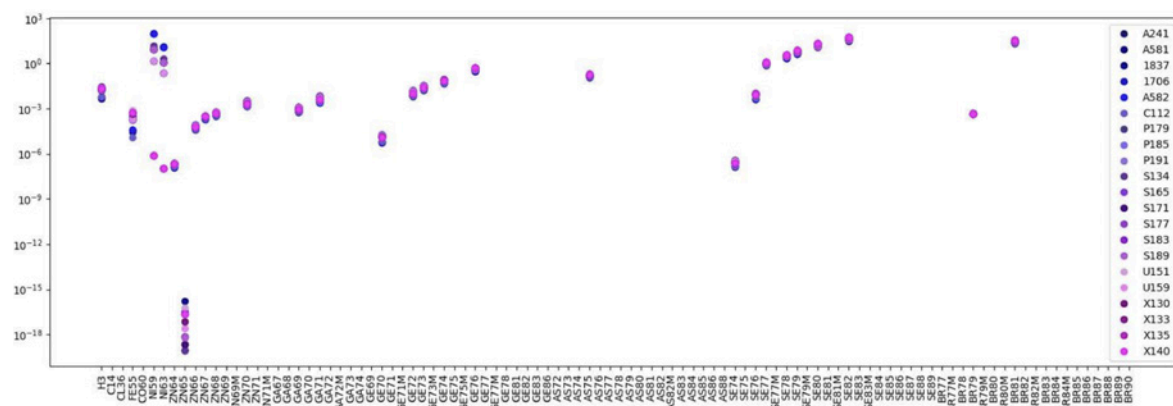
ANLAGE 4.5 Ursprüngliche Datensätze der abgebrannten BE aus CASMO/SIMULATE Rechnungen des Betreibers.



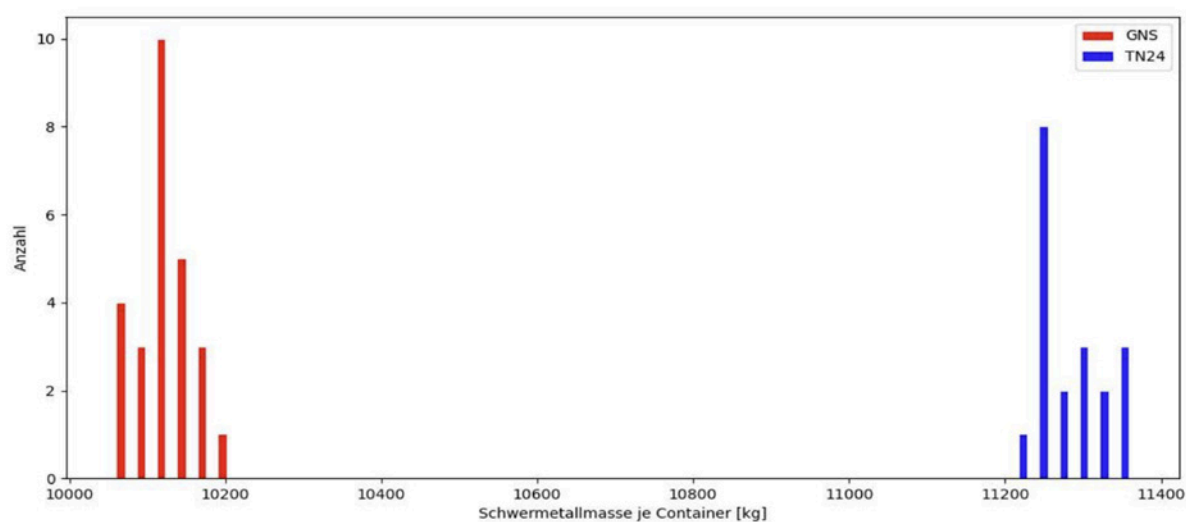
ANLAGE 4.6 Ursprüngliche Datensätze der abgebrannten BE aus CASMO/SIMULATE Rechnungen des Betreibers.



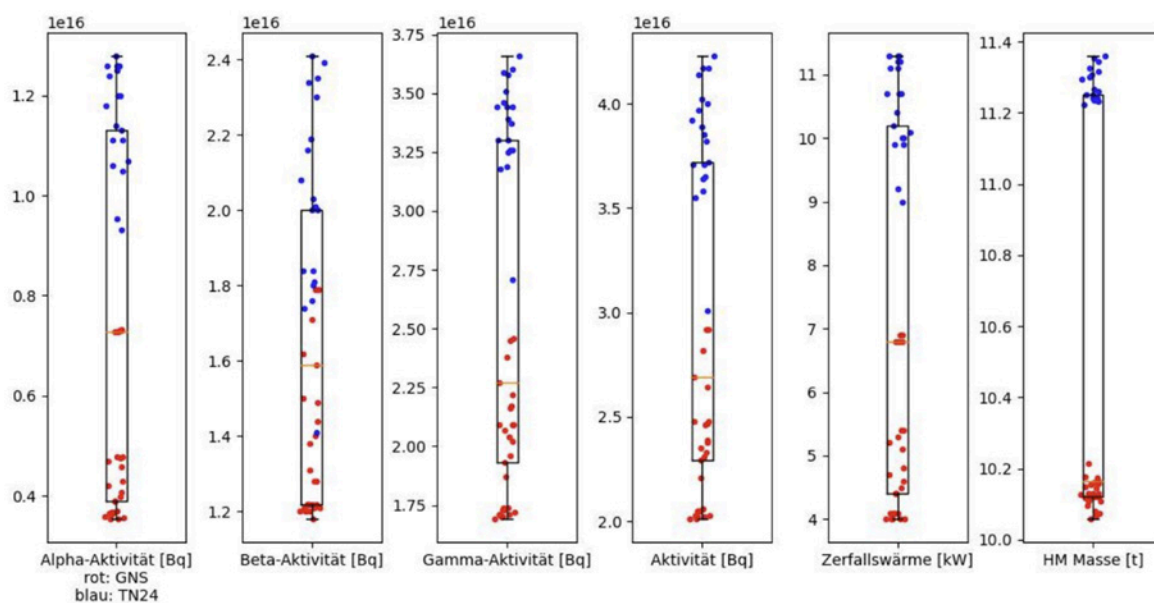
ANLAGE 4.7 Ursprüngliche Datensätze der abgebrannten BE aus CASMO/SIMULATE Rechnungen des Betreibers.



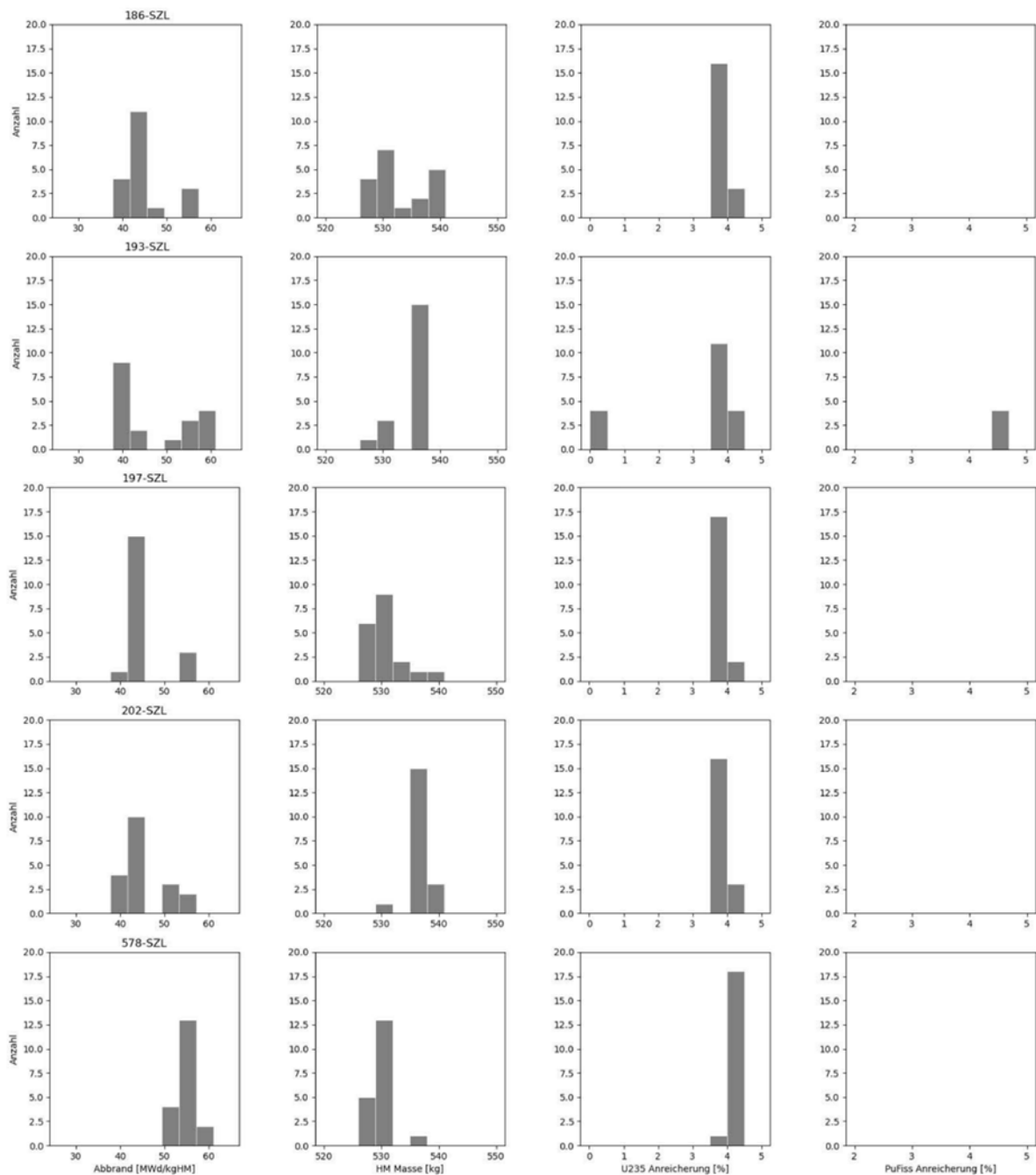
ANLAGE 4.8 Ursprüngliche Datensätze der abgebrannten BE aus CASMO/SIMULATE Rechnungen des Betreibers.



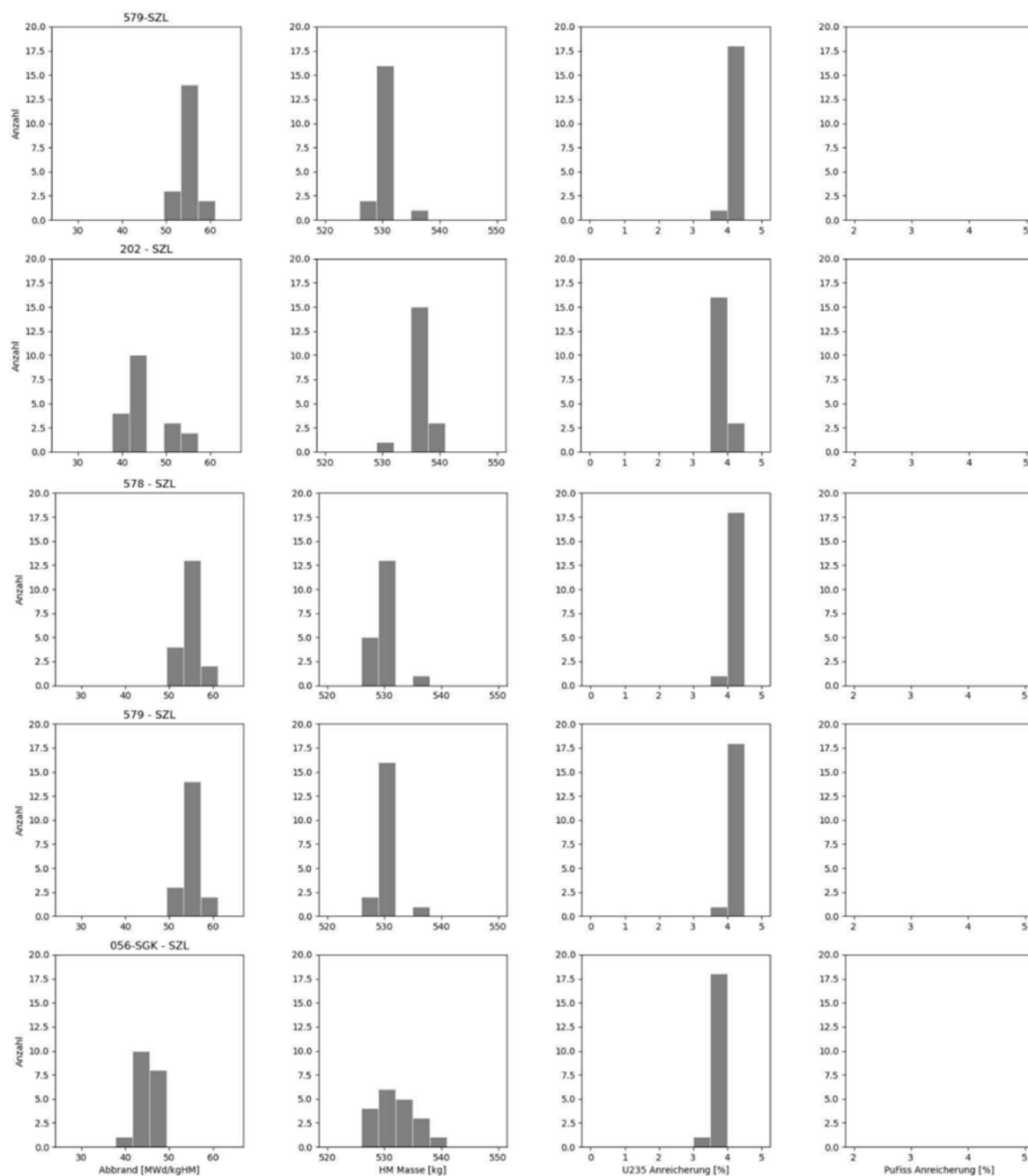
ANLAGE 5 Masseverteilung der in Behältern im Zwischenlager geladenen Brennelemente.



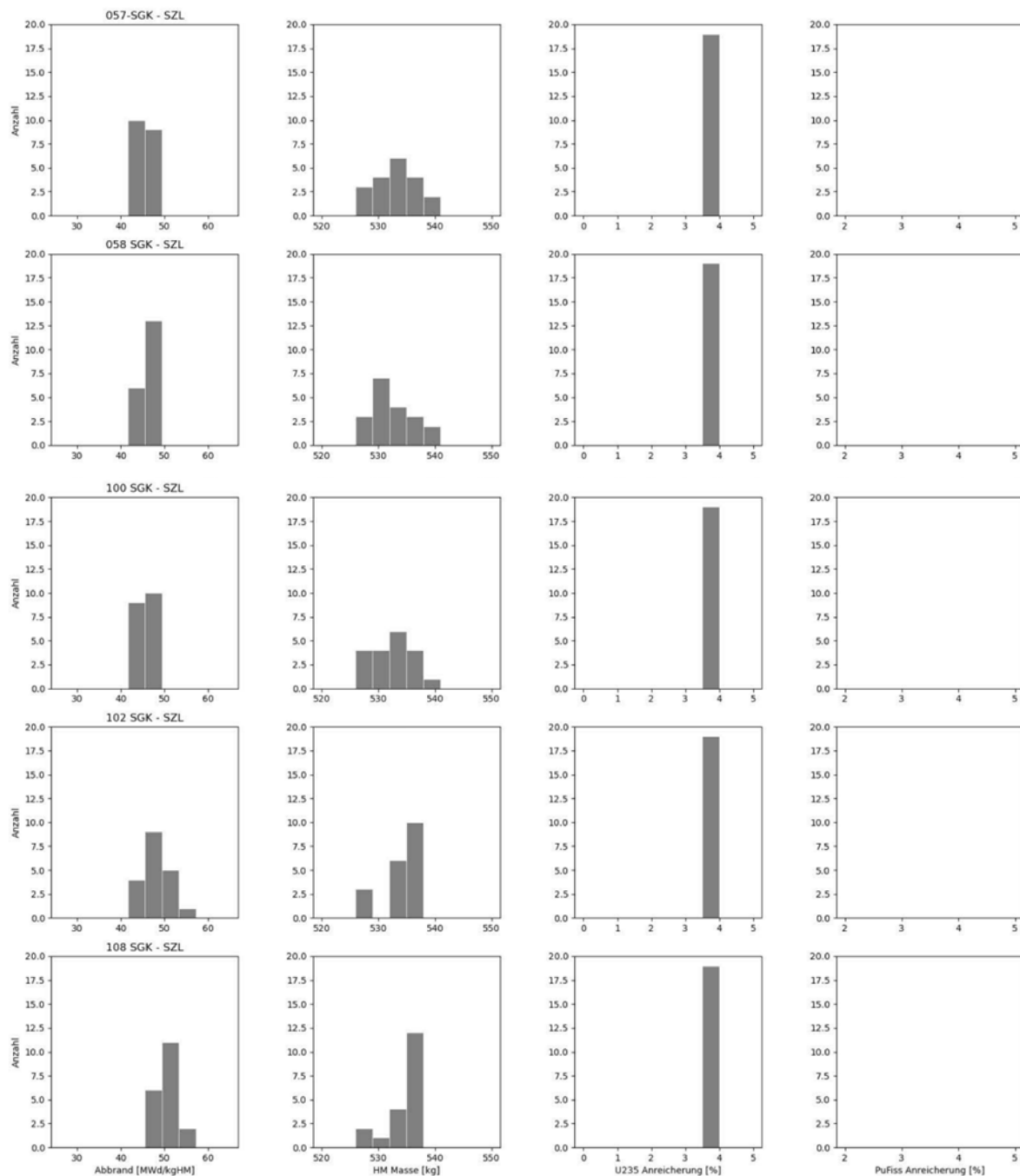
ANLAGE 6 Ergebnisse der Abklingrechnungen für die im Zwischenlager bereits in Behälter verladene Brennelemente.



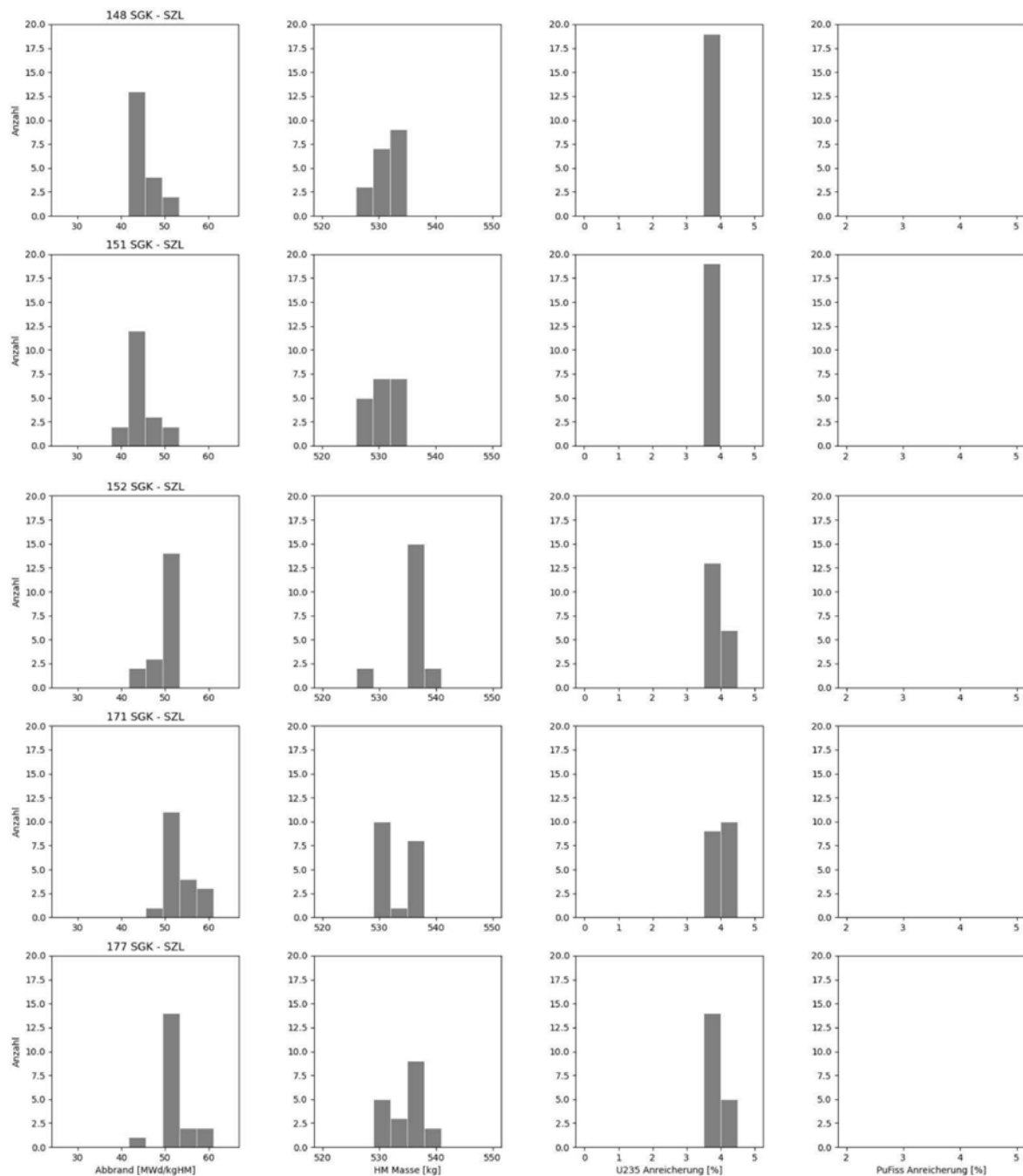
ANLAGE 7.1 Liste der Brennelemente, die sich in Behältern beladen im Zwischenlager befinden.



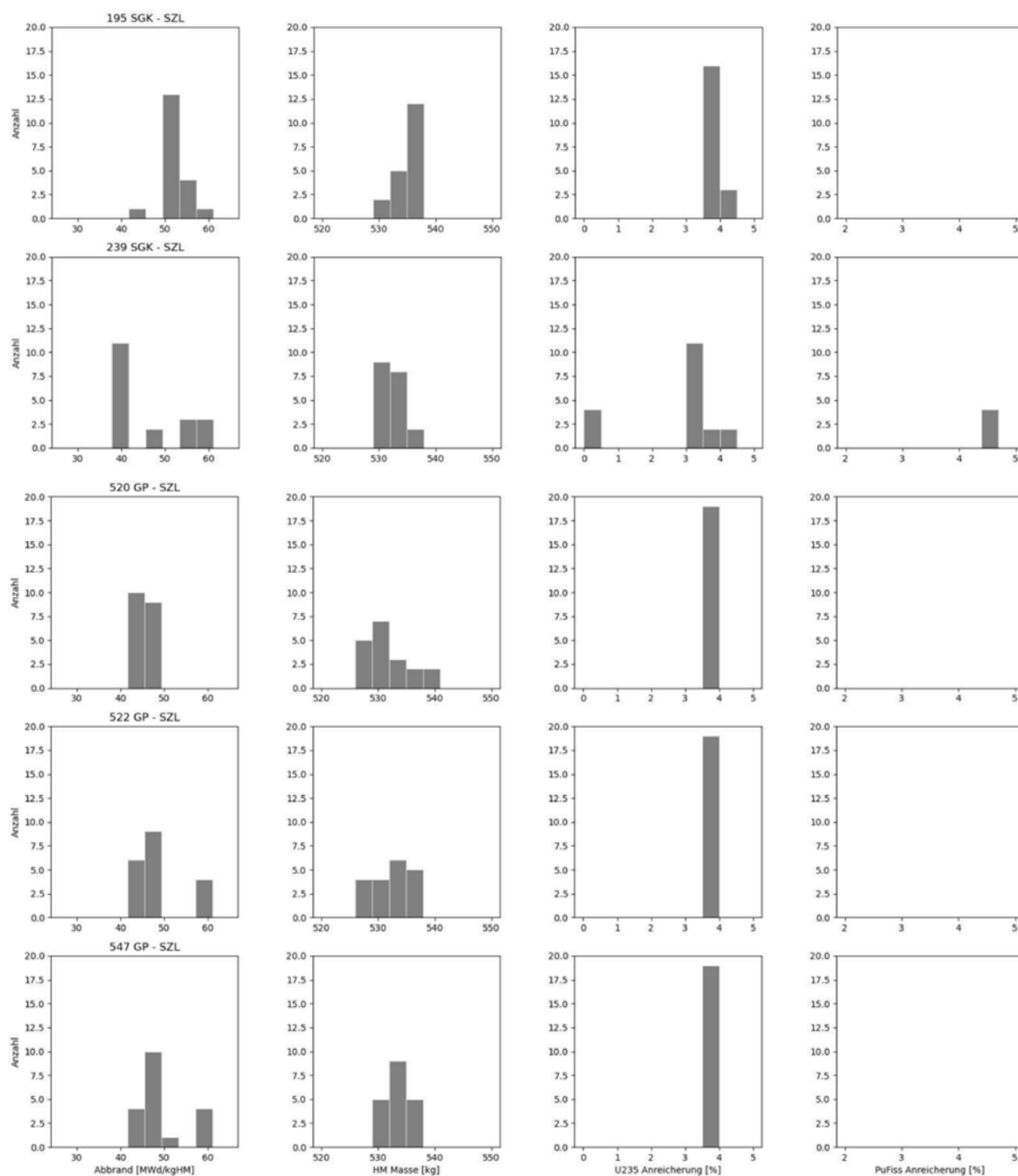
ANLAGE 7.2 Liste der Brennelemente, die sich in Behältern beladen im Zwischenlager befinden.



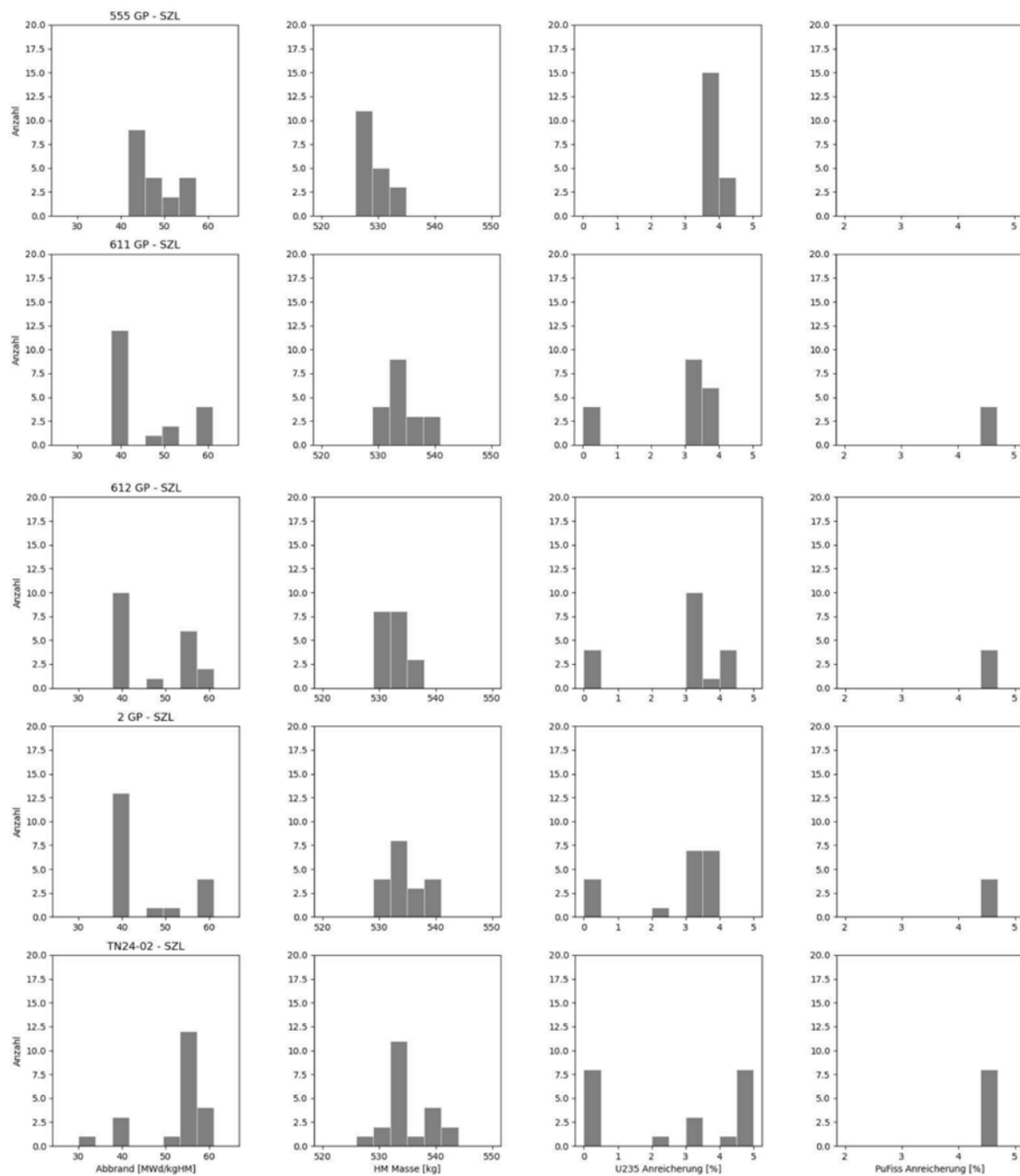
ANLAGE 7.3 Liste der Brennelemente, die sich in Behältern beladen im Zwischenlager befinden.



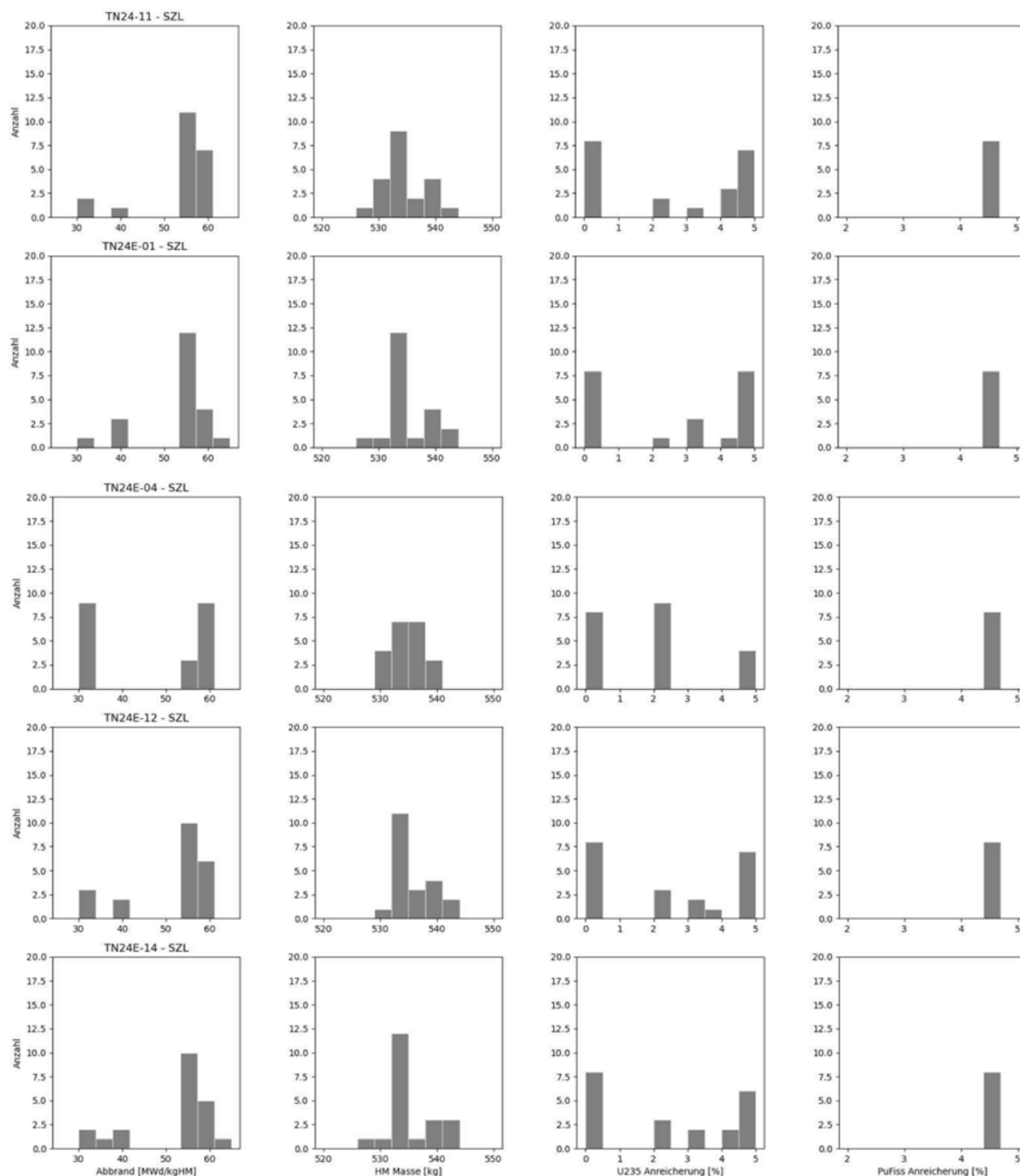
ANLAGE 7.4 Liste der Brennelemente, die sich in Behältern beladen im Zwischenlager befinden.



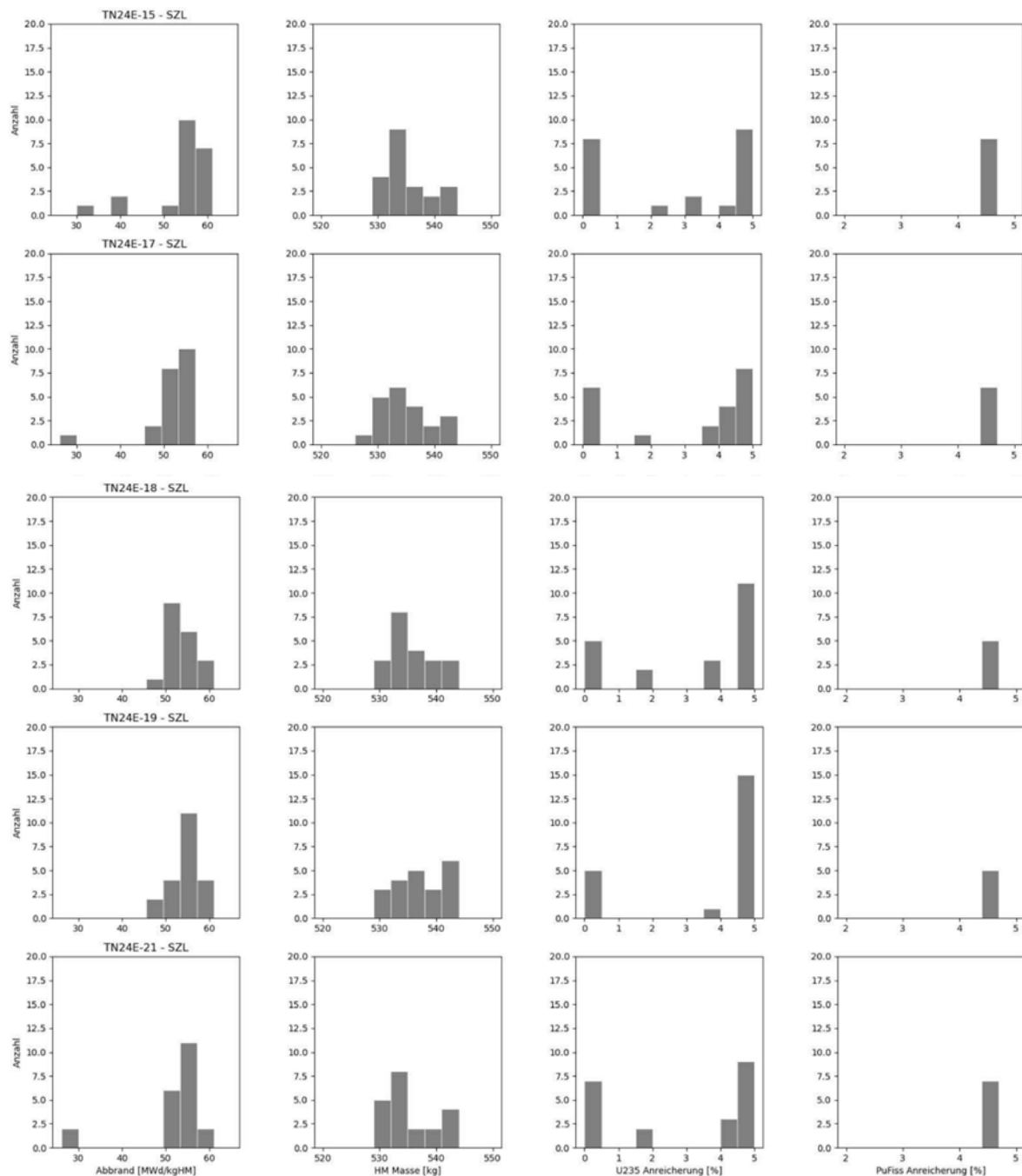
ANLAGE 7.5 Liste der Brennelemente, die sich in Behältern beladen im Zwischenlager befinden.



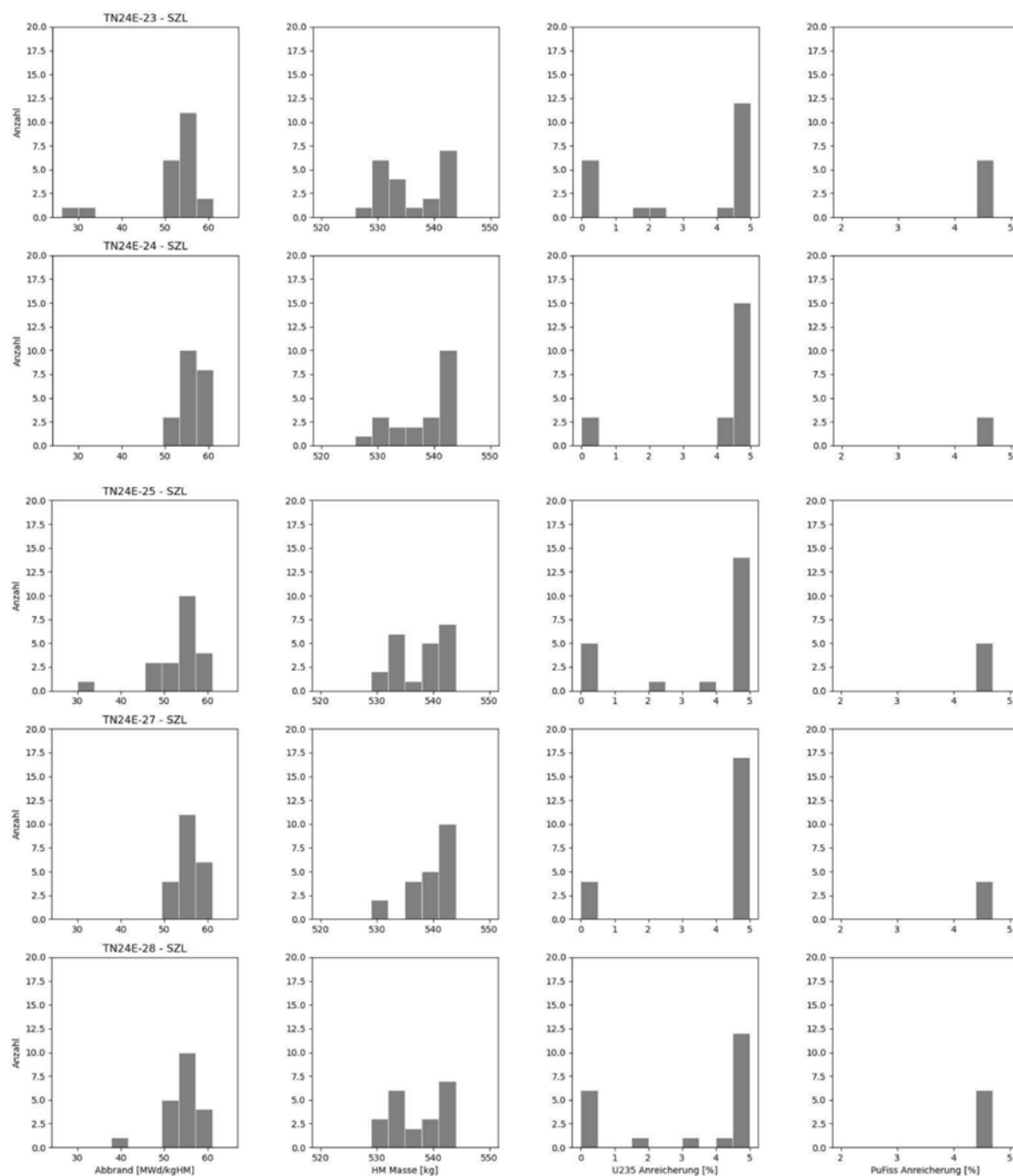
ANLAGE 7.6 Liste der Brennelemente, die sich in Behältern beladen im Zwischenlager befinden.



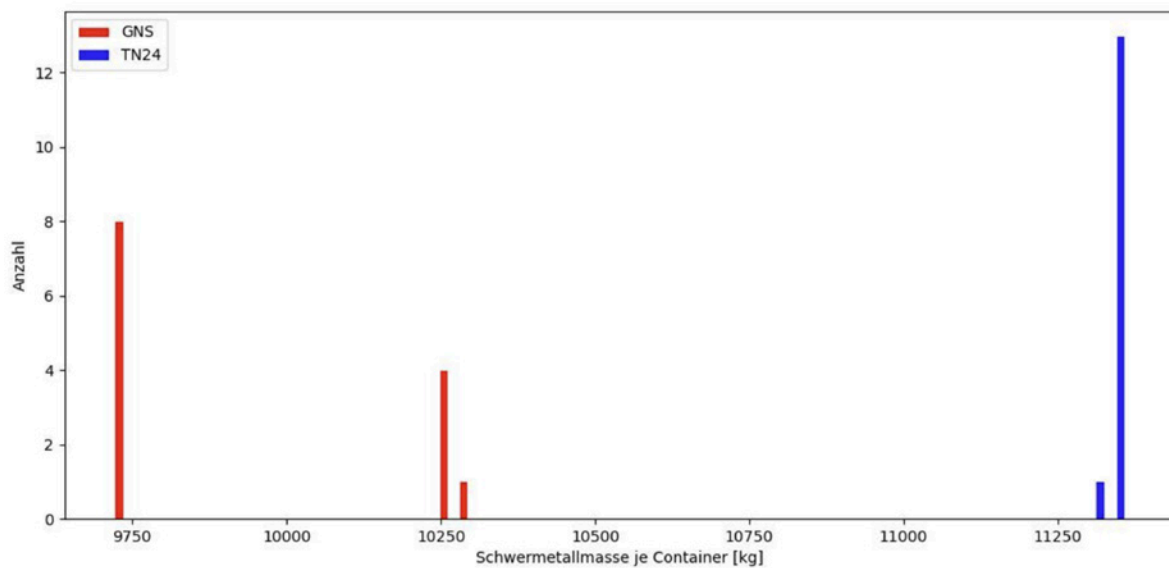
ANLAGE 7.7 Liste der Brennelemente, die sich in Behältern beladen im Zwischenlager befinden.



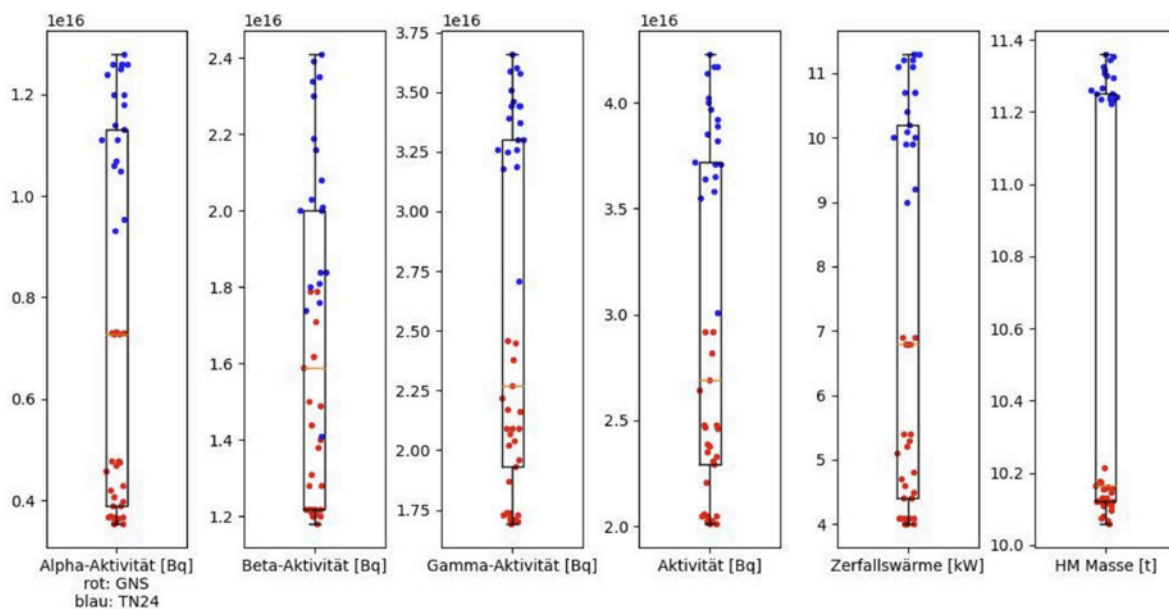
ANLAGE 7.8 Liste der Brennelemente, die sich in Behältern beladen im Zwischenlager befinden.



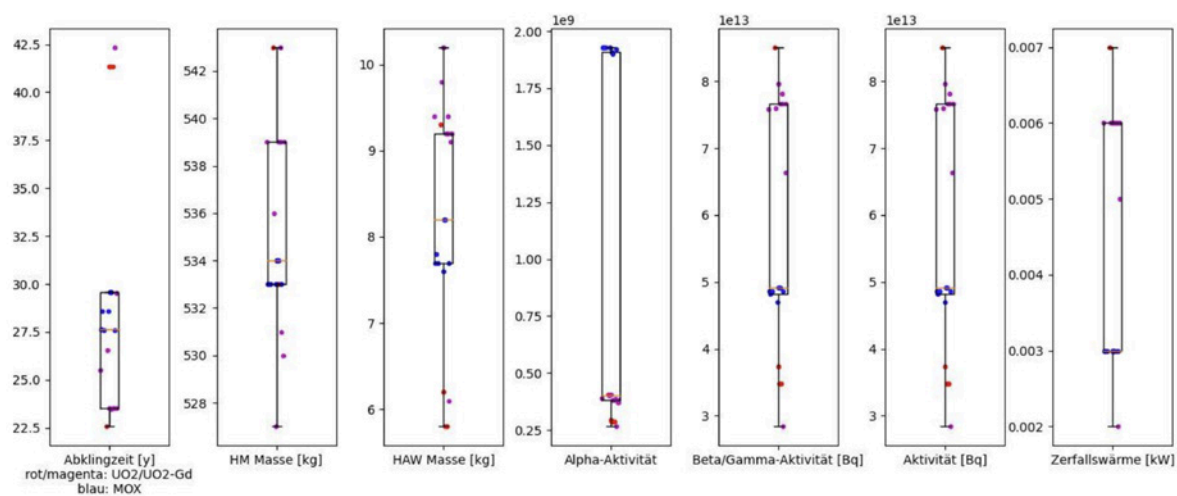
ANLAGE 7.9 Liste der Brennelemente, die sich in Behältern beladen im Zwischenlager befinden.



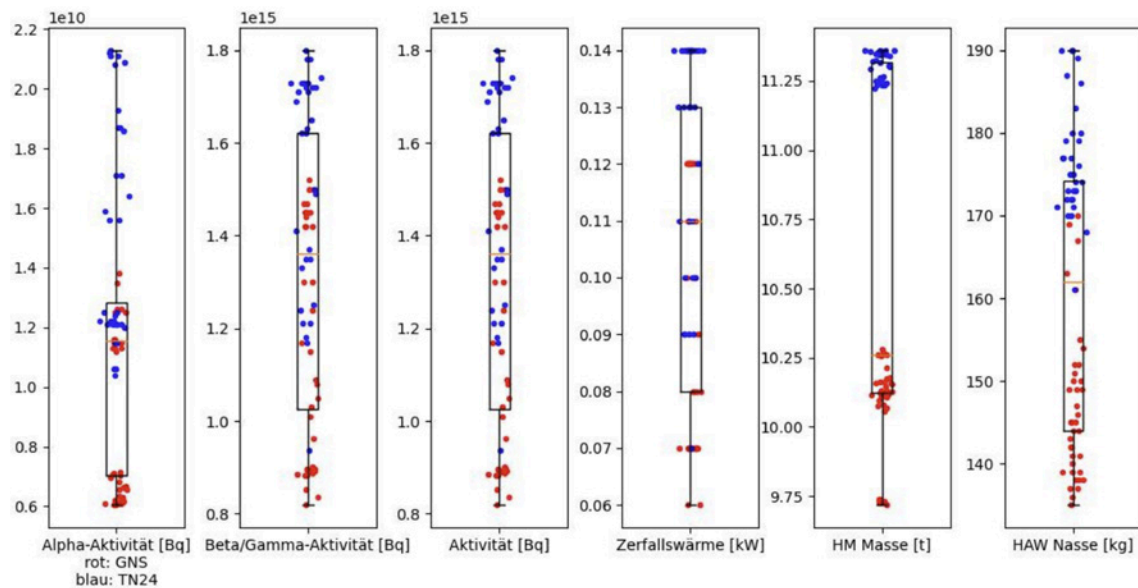
ANLAGE 8 Masserverteilung der vorgeschlagenen Behälterbeladungen mit Brennelementen aus dem Brennelementepool.



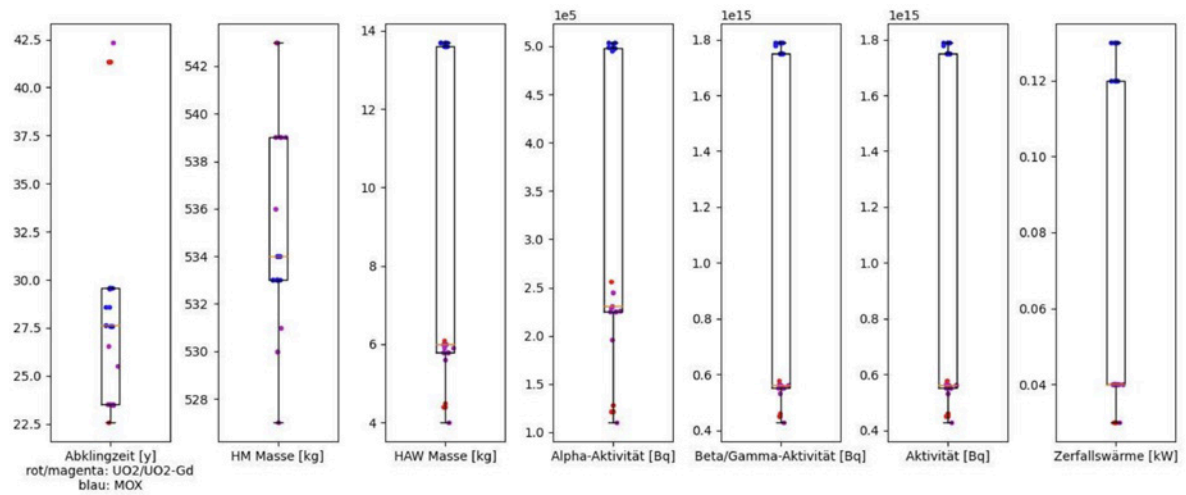
ANLAGE 9 Ergebnisse der Zerfallsberechnung für die BE in den vorhandenen 45 Containern im Zwischenlager.



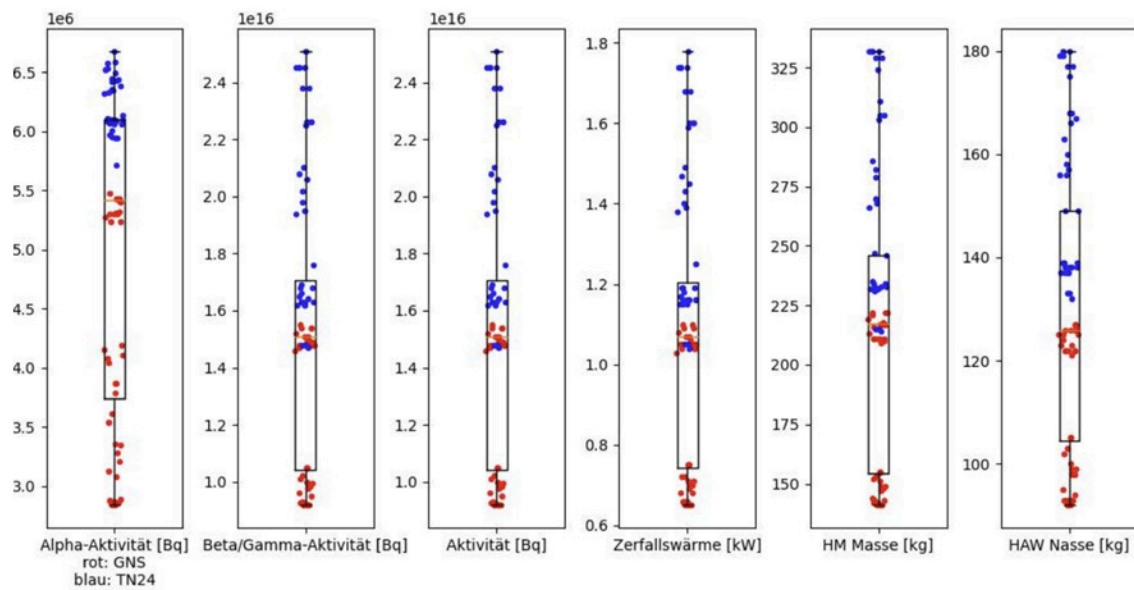
ANLAGE 10 Berechnung der Anzahl der Glaskokillen für das Recyclen der 21 Brennelemente.



ANLAGE 11 HAW aus der Wiederaufbereitung aller 1426 Brennelemente.



ANLAGE 12 Berechnung der Anzahl der benötigten Glasskokillen.



ANLAGE 13 HAW aus der Wiederaufbereitung von bis zum 01.01.2100 abgeklungenem START-Treiberbrennstoff.

### 3 Technische Machbarkeit und Sicherheitsanalyse

|                                                                                                            |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1 Einleitung</b>                                                                                        | <b>104</b> |
| <b>2 Überprüfung des Sicherheitskonzepts der START-Anlage</b>                                              | <b>105</b> |
| 2.1. Übergeordnete Darstellung des geplanten Sicherheitskonzepts der START-Anlage                          | 105        |
| GRUNDLEGENDE PRINZIPIEN                                                                                    | 105        |
| EREIGNISKLASSIFIKATION                                                                                     | 106        |
| SICHERHEITSFUNKTIONEN UND ÜBERGEORDNETE SICHERHEITSANFORDERUNGEN                                           | 107        |
| SICHERHEITSKLASSIFIZIERUNG VON KOMPONENTEN UND SYSTEMEN                                                    | 107        |
| ANWENDUNGSBEREICH                                                                                          | 107        |
| 2.2. Darstellung der deutschen Sicherheitsphilosophie und des deutschen Sicherheitskonzepts                | 108        |
| ALLGEMEINES                                                                                                | 108        |
| GESTAFFELTES SICHERHEITSKONZEPT                                                                            | 109        |
| KONZEPT DES GESTAFFELTEN EINSCHLUSSES DER RADIOAKTIVEN INVENTARE                                           |            |
| (BARRIERENKONZEPT)                                                                                         | 109        |
| SCHUTZZIELKONZEPT                                                                                          | 110        |
| RADIOLOGISCHE SICHERHEITSZIELE                                                                             | 111        |
| TECHNISCHE ANFORDERUNGEN                                                                                   | 112        |
| ZU BERÜCKSICHTIGENDE BETRIEBSZUSTÄNDE UND EREIGNISSE                                                       | 114        |
| ANFORDERUNGEN AN DIE NACHWEISFÜHRUNG                                                                       | 115        |
| 2.3. Abgleich der grundlegenden Vorgehensweise im Statusbericht mit dem deutschen Regelwerk                | 116        |
| <b>3 Exemplarische Bewertung der Sicherheitskonzepte einzelner Einrichtungen sowie der Ereignisanalyse</b> | <b>118</b> |
| 3.1. Wärmeabfuhr                                                                                           | 118        |
| DARSTELLUNGEN IM STATUSBERICHT                                                                             | 118        |
| ÜBEREINSTIMMUNG MIT DEM DEUTSCHEN REGELWERK                                                                | 122        |
| 3.2. Reaktivitätskontrolle / Unterkritikalität                                                             | 124        |
| DARSTELLUNGEN IM STATUSBERICHT                                                                             | 124        |
| ÜBEREINSTIMMUNG MIT DEM DEUTSCHEN REGELWERK                                                                | 126        |
| 3.3. Ereignisanalyse                                                                                       | 128        |
| DARSTELLUNGEN IM STATUSBERICHT                                                                             | 128        |
| ÜBEREINSTIMMUNG MIT DEM DEUTSCHEN REGELWERK                                                                | 130        |
| <b>4 Standort</b>                                                                                          | <b>132</b> |
| <b>5 Fazit und erste Einschätzung zur Machbarkeit</b>                                                      | <b>132</b> |

# 1 Einleitung

---

Dieses Kapitel analysiert die grundsätzliche Machbarkeit von START anhand des Statusberichts, der auch eine Folgenabschätzung in den Blick nimmt. Der Bericht umfasst eine Analyse des aktuellen Stands und der künftigen Vorgehensweise im Projekt, einschließlich der Auslegung und des Layouts der Anlage, der Systemspezifikationen und der Sicherheitsgrundsätze. Die wichtigsten Abschnitte befassen sich mit der Leitung des Projekts, dem Lebenszyklus der START-Anlage, Sicherheits- und Genehmigungserwägungen, Kosten- und Zeitplanschätzungen sowie detaillierten Beschreibungen der wichtigsten Komponenten: Beschleuniger, Spallationsziel, Unterkritische Einrichtung, Brennstoffbezogene Infrastruktur, Stromerzeugung, Verglasungsanlage, Instrumentierung und Kontrollsysteme, Hilfssysteme sowie Standortplanung, Gebäude und Infrastruktur. Zusätzlich wird der vorgesehene Digitale Zwilling zur Simulation des Gesamtsystems beschrieben.

Für diese Prüfung wird in einem ersten Schritt ein Abgleich der im Statusbericht aufgezeigten grundlegenden und bei der Planung der Anlage START zu berücksichtigenden Sicherheitsprinzipien mit den Anforderungen aus den infrage kommenden Regeln aus dem deutschen Regelwerk durchgeführt. Im Anschluss erfolgt für einzelne Systeme ein exemplarischer Abgleich dahingehend, inwieweit für diese die grundlegend aufgestellten Sicherheitsprinzipien berücksichtigt und umgesetzt werden. Dies erfolgt anhand der Systeme für die Reaktorabschaltung und der Nachwärmeabfuhr. Auf diese Weise soll geprüft werden, ob die Machbarkeit für die verschiedenen Einrichtungen sowie für die Gesamtanlage grundsätzlich gegeben ist oder ob grundlegende Defizite – auch in der Darstellung – in Bezug auf die deutsche Sicherheitsphilosophie, wie sie sich aus dem Regelwerk ableitet, vorhanden sind.

Die Überprüfung des Sicherheitskonzepts der Anlage erfolgt auf Basis der grundlegenden Sicherheitsanforderungen für vergleichbare technische Anlagen in Deutschland. Diese Bewertung basiert, soweit anwendbar, auf dem untergesetzlichen deutschen Regelwerk für kerntechnische Einrichtungen, das sich aus den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke<sup>63</sup> sowie aus weiteren mit diesen im Zusammenhang stehenden Regelwerken ableitet. Sofern erforderlich bzw. hilfreich, ziehen wir die etablierten Methodiken aus in Deutschland durchgeführten Sicherheitsanalysen und Sicherheitsüberprüfungen in die Bewertung mit ein. Im Hinblick auf die Einrichtungen, die die Herstellung der Brennelemente betreffen, ziehen wir die Sicherheitsanforderungen für Kernbrennstoffversorgungsanlagen<sup>64</sup> heran. Die Vollständigkeit der behandelten Themen spiegeln wir zusätzlich an den IAEA-Anforderungen an einen Sicherheitsbericht<sup>65</sup>.

## 2 Überprüfung des Sicherheitskonzepts der START-Anlage

---

### 2.1.

#### Übergeordnete Darstellung des geplanten Sicherheitskonzepts der START-Anlage

---

##### GRUNDLEGENDE PRINZIPIEN

Die START-Sicherheitsgrundsätze beruhen auf internationalen Sicherheitsstandards, die von internationalen Nuklearorganisationen wie der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO), die Empfehlungen und technische Leitlinien herausgibt, anerkannt sind. Die Auslegung und der Betrieb von START müssten auch den Empfehlungen der World Association of Nuclear Operators (WANO), der Nuclear Energy Agency (NEA) oder weiterer entsprechender Organisationen entsprechen. Darüber hinaus besteht das Erfordernis, bei der endgültigen Auslegung der am Standort eines ehemaligen deutschen Kernkraftwerks geplanten Anlage die deutschen Sicherheitsgrundsätze wie auch ggf. die örtlichen Vorschriften einzuhalten.

Auch die nachfolgend dargestellten grundlegenden Sicherheitsprinzipien sollen bei der Planung der Anlage START beachtet werden:

##### Bevorzugung passiver Sicherheitssysteme gegenüber aktiven Systemen

Die Gewährleistung der erforderlichen Sicherheitsfunktionen soll so weit wie möglich auf passiven Systemen beruhen, die weder eine externe Energiequelle noch ein kurzfristiges menschliches Eingreifen erfordern.

##### Redundanz der Systeme zur Gewährleistung der Sicherheitsfunktionen

Kein einzelnes Versagen darf zu unnormalen Situationen führen.

##### Gestaffeltes Sicherheitskonzept

Das gestaffelte Sicherheitskonzept wird als eine zu verfolgende Strategie angeführt, die mehrere, voneinander unabhängige und redundante Sicherheitsmaßnahmen zum Schutz vor Ausfällen und Unfällen vorsieht. Sollte bei einem Ereignisablauf eine Ebene versagen, soll die Beherrschung oder Folgenminimierung auf der nächstfolgenden Ebene stattfinden. Das Konzept soll so angewandt werden, wie es von der IAEO definiert wurde, und in fünf aufeinanderfolgende und voneinander unabhängige Ebenen unterteilt sein:

- Verhinderung von anormalem Betrieb und Versagen
- Beherrschung des anormalen Betriebs und des Versagens
- Beherrschung von Unfällen innerhalb der Auslegungsbasis
- Beherrschung schwerer Bedingungen, einschließlich der Verhinderung des Fortschreitens eines Unfalls und der Abmilderung der Folgen eines schweren Unfalls
- Begrenzung der radiologischen Folgen erheblicher externer Freisetzungen radioaktiver Stoffe

Bezüglich der Anwendung des gestaffelten Sicherheitskonzepts werden in dem Statusbericht Quellen der Nuclear Energy Agency (NEA)<sup>66</sup> der International Atomic Energy Agency (IAEA)<sup>67</sup> und der Western European Nuclear Regulators Association (WENRA)<sup>68</sup> angeführt.

### **Deterministische und probabilistische Sicherheitsbewertung**

Der Statusbericht führt des Weiteren aus, dass die Sicherheit von START vorzugsweise mit einem deterministischen Ansatz nachgewiesen werden muss. Zur Ergänzung und Verfeinerung des primären deterministischen Ansatzes kann eine probabilistische Bewertung mit einem entsprechenden Nachweis verwendet werden. Bei beiden Ansätzen seien die anfänglichen Ursachen zu ermitteln, wobei interne und externe Ereignisse zu berücksichtigen seien; Fehler mit gemeinsamer Ursache seien zu ermitteln und zu analysieren.

### **ALARA-Grundsätze**

Ergänzend werden in dem Statusbericht die ALARA-Grundsätze (As Low As Reasonably Achievable - so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar) als anzuwendende Grundsätze im Strahlenschutz beschrieben. Diese sollen sicherstellen, dass die Exposition von Arbeitskräften, der Öffentlichkeit und der Umwelt unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und sozialer Faktoren so weit wie möglich minimiert wird.

### **Tätigkeiten im Zusammenhang mit als sicherheitsrelevant eingestuften Systemen**

Sicherheitsrelevant eingestufte System sind gemäß Statusbericht solche Systeme, die an einer Sicherheitsfunktion beteiligt sind. Tätigkeiten im Zusammenhang mit einem solchen System müssten auf Basis eines Qualitätssicherungsmanagementsystems vorgenommen werden, in welchem Verfahren hierfür festgelegt seien. Diese Aktivitäten umfassen die Organisation (Definition von Rollen und Verantwortlichkeiten), die Schulung des Personals, das diese Aktivitäten durchführt, sowie die Analyse von Nichtkonformitäten und sicherheitsrelevanten Vorfällen oder Ereignissen.

### **EREIGNISKLASSIFIKATION**

Entsprechend dem Statusbericht kann jede Betriebssituation klassifiziert werden unter:

- Normaler Betrieb
- Erwartbare Betriebsereignisse (Anticipated operational occurrences, AOOs)
- Auslegungsstörfälle (Design-basis accidents, DBAs)
- Auslegungsüberschreitende Unfälle (Beyond-design-basis accidents, BDBAs)

Diese Situationen und Ereignisse würden durch ihre Eintrittswahrscheinlichkeit charakterisiert. Für jede der drei Teilanlagen wird ein hypothetisches einhüllendes Störfallereignis definiert - der sogenannte Auslegungsstörfall -, der die Grundlage für das schwerste Störfallszenario bildet, dem die Auslegung der Anlage entsprechen muss.

Darüber hinaus sind dem Statusbericht folgend auch sehr hypothetische Situationen zu definieren, um zu prüfen, ob diese nicht zu einer dramatischen Zunahme möglicher Folgen führen können. Diese Situationen – die so genannten auslegungsüberschreitenden Ereignisse – sollen ferner die Grundlage für Notfallpläne für die örtlichen Behörden bilden, um die Folgen von hypothetischen Unfällen mildern zu können. Die Betriebsbedingungen bei entsprechenden Ereignissen sollen für den gesamten Lebenszyklus von START – von der Auslegung bis zur Stilllegung, einschließlich Herstellung, Inbetriebnahme, Betrieb und Wartung – ermittelt werden.

## SICHERHEITSFUNKTIONEN UND ÜBERGEORDNETE SICHERHEITSANFORDERUNGEN

Die Anlage soll für alle normalen Betriebssituationen die folgende Standardliste von Sicherheitsfunktionen gewährleisten:

- *Kritikalitätskontrolle:* Die Reaktivität muss kontrolliert und unter zuvor definierten Sicherheitsmargen gehalten werden.
- *Einschlussbarrieren:* Ihre Dichtheit muss oberhalb von vordefinierten Werten gehalten werden.
- *Wärmeabfuhr:* Es muss gewährleistet sein, dass die beiden vorhergehenden Sicherheitsfunktionen aufrechterhalten werden.

Die Anzahl der Einschlussbarrieren, die das radioaktive Inventar von der Umgebung isolieren, muss sowohl an die Betriebssituation als auch an die möglichen Folgen für die Umwelt angepasst werden. Im Allgemeinen sind mindestens drei Einschlussbarrieren aufrechtzuerhalten (d. h. auszulegen und zu überwachen). Diese Anzahl kann verringert werden, wenn das Risiko dennoch nachweislich akzeptabel ist.

Zum Zeitpunkt der Abfassung des Statusberichts waren die Barrieren für das Design von START noch nicht abschließend definiert, da ihre endgültige Festlegung ein Kompromiss zwischen der Erfüllung der Sicherheitsfunktion sowie der Durchführbarkeit und den Kosten sei. Es könnten auch zusätzliche Barrieren gewählt werden, wie die Brennstoffpelletmatrix oder das Primärkühlmittel (flüssig oder in erstarrtem Zustand).

Die restriktivsten Anforderungen an die Auslegung der Anlage und der Bauwerksstrukturen ergäben sich aus Unfallbedingungen wie Überflutung, Flugzeugabsturz, Blitzschlag, Explosion und Erdbeben. Diese Ereignisse würden hinsichtlich der bautechnischen Aspekte in der Konzeptentwurfsphase bewertet.

## SICHERHEITSKLASSIFIZIERUNG VON KOMPONENTEN UND SYSTEMEN

Alle Komponenten und Systeme, die an den zuvor abgeleiteten Sicherheitsfunktionen beteiligt sind, sollen gemäß Statusbericht in abgestufte Sicherheitskategorien (oder Sicherheitsklassen) eingestuft werden. Ihre sicherheitstechnische Bedeutung (auf der Grundlage einer Risikoanalyse, d. h. Wahrscheinlichkeit vs. Folgen) soll die Grundlage für eine solche Klassifizierung bilden. Sie soll an die gängigen Auslegungsnormen für kerntechnische Anlagen (insbesondere die Auslegungsnormen für mechanische, elektrische und leittechnische Systeme) angepasst werden.

## ANWENDUNGSBEREICH

Eine Besonderheit der START-Anlage besteht darin, dass an einem Standort drei sehr unterschiedliche Teilanlagen untergebracht sind: ein unterkritischer Kernreaktor, ein Hochenergie-Protonenbeschleuniger und eine Aufbereitungsanlage für Kernbrennstoff. Daher sollen die zuvor skizzierten Sicherheitsziele für den gesamten Standort gelten. Zu berücksichtigen sind hierbei

- die unterschiedlichen Eigenschaften der drei verschiedenen Teilanlagen,
- die Möglichkeit, dass jede der drei Teilanlagen mit den anderen interagieren kann, insbesondere hinsichtlich der Auswirkungen von außergewöhnlichen Situationen, die in einer der drei Teilanlagen auftreten können, auf die beiden anderen Teilanlagen sowie
- die Systeme, die die drei Teilanlagen miteinander verbinden, wie z. B. die Kontrollsysteme und die Transfersysteme zwischen den Anlagen.

## 2.2.

## **Darstellung der deutschen Sicherheitsphilosophie und des deutschen Sicherheitskonzepts**

### **ALLGEMEINES**

Die deutsche Sicherheitsphilosophie für kerntechnische Einrichtungen fußt auf diversen internationalen und deutschen Regelungen. Zusammengefasst wurde sie in den 2022 letztmalig veröffentlichten „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“, kurz SiAnf. Diese SiAnf gelten bzw. galten für Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität (Kernkraftwerke). Sie beinhalten die Sicherheitskriterien und Leitlinien für Kernkraftwerke im Sinne von § 49 Absatz 1 Satz 3 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV, Fassung 2001) und schreiben diese fort.

Für andere kerntechnische Anlagen als Atomkraftwerke nach § 2 Absatz 3a Nummer 1 des Atomgesetzes finden

- das radiologische Sicherheitsziel (vgl. [Kapitel 3\\_2.2.5](#)), wonach der Ausschluss von frühen und großen Freisetzungen vorgesehen ist und das als Anknüpfungspunkt für die zeitgerechte Umsetzung von vernünftigerweise durchführbaren Sicherheitsverbesserungen heranzuziehen ist, und
- das gestaffelte Sicherheitskonzept im Rahmen eines abgestuften Ansatzes entsprechend Anwendung.

Mit dieser Zielsetzung kann abgeleitet werden, dass die grundlegenden Prinzipien der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke direkt oder sinngemäß auch auf andere kerntechnische Anlagen übertragen werden können. Diese grundlegenden Prinzipien bestehen aus

- dem gestaffelten Sicherheitskonzept mit den verschiedenen Sicherheitsebenen sowie dem gestaffelten Barrierenkonzept,
- dem Schutzzielkonzept,
- den grundlegenden technischen und organisatorischen Anforderungen sowie
- Anforderungen an die erforderliche Zuverlässigkeit der benötigten Einrichtungen und an deren Energieversorgung.

Ergänzt werden diese Prinzipien mit Vorgaben zu den zu berücksichtigten Betriebszuständen und Ereignissen, die wiederum den Sicherheitsebenen zugeordnet sind und sich somit vom Normalbetrieb über Störungen und Störfälle bis hin zu Notstandsfällen, Ereignissen mit Mehrfachausfällen von Sicherheitseinrichtungen und Unfällen mit schweren Brennelementschäden erstrecken. Die Wirksamkeit des Sicherheitskonzepts ist für die entsprechenden Zustände und Ereignisse nachzuweisen.

Nachfolgend stellen wir Auszüge aus den SiAnf zu den einzelnen übergeordneten Bestandteilen des Sicherheitskonzepts dar. Darüber hinaus beinhalten die SiAnf spezifische Anforderungen zu einzelnen Einrichtungen eines Kernkraftwerks, die an dieser Stelle nicht wiedergegeben werden. Diese werden bei Erfordernis in der exemplarischen Beurteilung einzelner Anlagenteile aufgegriffen.

### GESTAFFELTES SICHERHEITSKONZEPT

Der Einschluss der im Kernkraftwerk befindlichen radioaktiven Stoffe sowie die Abschirmung der von diesen Stoffen ausgehenden Strahlung ist sicherzustellen. Zur Erreichung dieses Ziels ist ein Sicherheitskonzept umzusetzen, bei dem Maßnahmen und Einrichtungen gestaffelten Sicherheitsebenen zugeordnet sind.

Die Sicherheitsebenen 1 bis 4a sind durch die folgenden Anlagenzustände charakterisiert:

- *Sicherheitsebene 1:* Normalbetrieb (Bestimmungsgemäßer Betrieb, ungestört)
- *Sicherheitsebene 2:* anomaler Betrieb (Bestimmungsgemäßer Betrieb, Störung)
- *Sicherheitsebene 3:* Störfälle
- *Sicherheitsebene 4a:* sehr seltene Ereignisse

Mit den auf diesen Sicherheitsebenen zu installierenden Maßnahmen und Einrichtungen zur Qualitätsgewährleistung, Vermeidung von Ereignissen, Beherrschung von Ereignissen sowie der Auslegung gegen Einwirkungen von innen und außen sowie aus Notstandsfällen muss ein umfassender und zuverlässiger Schutz vor den im Kernkraftwerk befindlichen radioaktiven Stoffen erreicht werden.

Darüber hinaus sind in angemessenem Umfang für Anlagenzustände, die wegen ihrer geringen Eintrittshäufigkeit den o. g. Sicherheitsebenen nicht zugeordnet werden, vorsorglich weitere Maßnahmen und Einrichtungen zur Feststellung und Begrenzung der Folgen solcher Zustände vorzusehen. Deshalb sind im gestaffelten Sicherheitskonzept ergänzend auf den Sicherheitsebenen 4b und 4c Maßnahmen und Einrichtungen des anlageninternen Notfallschutzes vorzuhalten und zu planen. Diese Sicherheitsebenen sind durch die folgenden Anlagenzustände charakterisiert:

- *Sicherheitsebene 4b:* Ereignisse mit Mehrfachversagen von Sicherheitseinrichtungen
- *Sicherheitsebene 4c:* Unfälle mit schweren Brennelementschäden.

Auf jeder Sicherheitsebene sind Einrichtungen und Maßnahmen vorzusehen, die gewährleisten, dass die Zustände und Ereignisse auf der jeweiligen Sicherheitsebene beherrscht werden und somit möglichst die nächstfolgende Sicherheitsebene nicht erreicht wird.

### KONZEPT DES GESTAFFELTEN EINSCHLUSSES DER RADIOAKTIVEN INVENTARE (BARRIERENKONZEPT)

Der Einschluss der im Kernkraftwerk befindlichen radioaktiven Stoffe ist durch gestaffelte Barrieren sowie durch Rückhaltefunktionen sicherzustellen. Die Barrieren sind derart auszulegen, dass sie, soweit technisch möglich, so voneinander unabhängig sind, dass bei Störfällen oder Einwirkungen von innen oder außen eine Barriere nicht als Folge des Ausfalls einer anderen Barriere versagt.

Die Barrieren und Rückhaltefunktionen sind insgesamt so auszulegen und während der gesamten Betriebsdauer in einem solchen Zustand zu halten, dass bei allen Ereignissen oder Anlagenzuständen auf den verschiedenen Sicherheitsebenen im Zusammenwirken mit den Maßnahmen und Einrichtungen der jeweiligen Sicherheitsebenen und den dabei auftretenden mechanischen, thermischen, chemischen und durch Strahlung hervorgerufenen Einwirkungen die jeweiligen sicherheitstechnischen Nachweisziele und Nachweiskriterien sowie die radiologischen Sicherheitsziele eingehalten werden. Die Barrieren und Rückhaltefunktionen müssen auch bei allen Ereignissen, die aus Einwirkungen von innen und außen oder Notstandsfällen resultieren, in ihrer Gesamtheit so zuverlässig wirksam sein, dass die radiologischen Sicherheitsziele eingehalten werden.

Die SiAnf beschreiben dann die Mindestanforderungen an die Barrieren mit Bezug auf die jeweiligen Sicherheitsebenen.

### **SCHUTZZIELKONZEPT**

Mit den in den SiAnf zu den Sicherheitsebenen geforderten Maßnahmen und Einrichtungen sind für die auf den jeweiligen Sicherheitsebenen geltenden Anforderungen die folgenden Schutzziele zu erfüllen:

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

Auf den Sicherheitsebenen 1 bis 4a sind folgende Anforderungen einzuhalten:

- Zur Kontrolle der Reaktivität:
  - Reaktivitätsänderungen sind auf zulässige Werte zu beschränken,
  - der Reaktorkern muss abgeschaltet und langfristig unterkritisch gehalten werden können,
  - bei der Handhabung sowie Lagerung unbestrahlter und bestrahlter Brennelemente ist die Unterkritikalität sicherzustellen.
- Zur Kühlung der Brennelemente:
  - Kühlmittel und Wärmesenken sind stets in ausreichendem Umfang vorzusehen,
  - der Wärmetransport vom Brennstoff bis zur Wärmesenke ist sicherzustellen,
  - die Wärmeabfuhr aus dem Brennelementlagerbecken ist sicherzustellen.
- Zum Einschluss der radioaktiven Stoffe:
  - die sich auf den verschiedenen Sicherheitsebenen ergebenden mechanischen, thermischen, chemischen und durch Strahlung hervorgerufenen Einwirkungen auf die Barrieren oder Rückhaltefunktionen sind so zu begrenzen, dass deren Wirksamkeit zur Einhaltung der radiologischen Sicherheitsziele erhalten bleibt,
  - die Barrierenfunktionen des Reaktorkühlkreislaufts und des Sicherheitsbehälters müssen erforderlichenfalls ausreichend schnell hergestellt werden können.

Auf der Sicherheitsebene 4b ist durch Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes die langfristige Wiederherstellung der Schutzziele zu erreichen.

Es muss ferner ein Schutzkonzept gegen Einwirkungen von innen und außen vorhanden sein, welches gewährleistet, dass alle Einrichtungen, die erforderlich sind,

- den Kernreaktor sicher abzuschalten und in abgeschaltetem Zustand zu halten,
- die Nachwärme abzuführen oder
- eine Freisetzung radioaktiver Stoffe zu verhindern,

so ausgelegt sind und sich dauerhaft in einem solchen Zustand befinden, dass sie ihre sicherheitstechnischen Aufgaben auch bei Einwirkungen von innen und außen sowie bei Notstandsfällen erfüllen.

Des Weiteren sind die zueinander redundanten Teilsysteme von Sicherheitseinrichtungen räumlich getrennt aufzustellen oder so zu schützen, dass bei Einwirkungen von innen ein redundanzübergreifender Ausfall verhindert wird.

Die Anforderungen in Detail regelt der Anhang 3 (Anforderungen an den Schutz gegen Einwirkungen von innen und außen sowie aus Notstandsfällen) der SiAnf.

## RADIOLOGISCHE SICHERHEITSZIELE

Die SiAnf untergliedern auch die radiologischen Sicherheitsziele nach den Sicherheitsebenen.

Auf den Sicherheitsebenen 1 und 2

- ist die Strahlenexposition des Personals bei allen Tätigkeiten unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls auch unterhalb der Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung so gering wie möglich zu halten,
- hat jede Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser kontrolliert auf den dafür vorgesehenen Ableitungspfaden zu erfolgen; die Ableitungen sind zu überwachen und nach Art und Aktivität zu dokumentieren und zu spezifizieren, und es ist jede Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt durch Direktstrahlung aus der Anlage sowie durch die Ableitung radioaktiver Stoffe unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls auch unterhalb der Grenzwerte des Strahlenschutzgesetzes und der Strahlenschutzverordnung so gering wie möglich zu halten.

Auf der Sicherheitsebene 3

- sind bei der Planung von Tätigkeiten zur Beherrschung von Ereignissen, zur Minderung ihrer Auswirkungen oder zur Beseitigung ihrer Folgen für die Strahlenexposition des Personals höchstens die einschlägigen Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung zu Grunde zu legen,
- sind für die Auslegung der Anlage zum Schutz der Bevölkerung vor freisetzungsbedingten Strahlenexpositionen höchstens die einschlägigen Störfallplanungswerte der Strahlenschutzverordnung zu Grunde zu legen,
- hat eine etwaige Freisetzung auf analysierten Freisetzungspfaden zu erfolgen; die Freisetzung ist zu überwachen und nach Art und Aktivität zu dokumentieren und zu spezifizieren, und es
- sind die radiologischen Auswirkungen innerhalb und außerhalb der Anlage unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls so gering wie möglich zu halten.

Hieraus leitet sich u. a. die Anforderung ab, bei der Planung von entsprechenden Anlagen und Einrichtungen die Störfallexposition so zu begrenzen, dass die durch Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung verursachte effektive Dosis von 50 Millisievert bzw. die in §104 StrlSchV genannten Organ-Äquivalentdosen nicht überschritten werden<sup>69</sup>.

Auf der Sicherheitsebene 4

- sind bei der Planung von Tätigkeiten zur Beherrschung von Ereignissen der Sicherheitsebene 4a sowie bei der Planung von Tätigkeiten im Rahmen von Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes für die voraussichtliche Strahlenexposition des Personals die einschlägigen Vorgaben der Strahlenschutzverordnung zu Grunde zu legen,
- ist die Überwachung von Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus der Anlage nach Art und Aktivität sicherzustellen und es
- sind radiologische Auswirkungen innerhalb und außerhalb der Anlage unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls so gering wie möglich zu halten.

Unter Einbeziehung der Maßnahmen und Einrichtungen des anlageninternen Notfallschutzes der Sicherheitsebenen 4b und 4c sind auszuschließen

- Freisetzungen radioaktiver Stoffe in die Umgebung der Anlage aufgrund eines frühzeitigen Versagens oder einer Umgehung des Sicherheitsbehälters, die Maßnahmen des anlagenexternen Notfallschutzes erfordern, für deren Umsetzung nicht ausreichend Zeit zur Verfügung steht (frühe Freisetzung) oder
- Freisetzungen radioaktiver Stoffe in die Umgebung der Anlage, die räumlich umfangreiche und zeitlich langandauernde Maßnahmen des anlagenexternen Notfallschutzes erfordern (große Freisetzung).

In diesem Zusammenhang kann das Eintreten eines Ereignisses oder Ereignisablaufs oder Zustands als ausgeschlossen angesehen werden, wenn das Eintreten physikalisch unmöglich ist oder wenn mit einem hohen Maß an Aussagesicherheit das Eintreten als extrem unwahrscheinlich angesehen werden kann.

Für den extrem unwahrscheinlichen Fall, dass eine Freisetzung dennoch eintritt, sind die radiologischen Auswirkungen soweit zu begrenzen, dass Maßnahmen des anlagenexternen Notfallschutzes nur in räumlich und zeitlich begrenztem Umfang erforderlich werden.

Alle sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen eines Kernkraftwerks müssen so ausgelegt, in einem solchen Zustand gehalten und so gegen Einwirkungen von innen und außen sowie Notstandsfälle geschützt werden, dass sie ihre sicherheitstechnischen Aufgaben zur Einhaltung der Anforderungen hinsichtlich des radiologischen Sicherheitsziels erfüllen.

Alle Einrichtungen eines Kernkraftwerks, die radioaktive Stoffe enthalten oder enthalten können, müssen so beschaffen, angeordnet und abgeschirmt sein, dass bezüglich der Strahlenexposition von Personen bei allen auf den Sicherheitsebenen 1 und 2 erforderlichen Tätigkeiten sowie bei der Planung von Tätigkeiten zur Beherrschung von Ereignissen der Sicherheitsebenen 3 und 4a, bei Einwirkungen von innen und außen, bei Notstandsfällen sowie im Rahmen von Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes die einschlägigen Anforderungen hinsichtlich des radiologischen Sicherheitsziels erfüllt werden.

### TECHNISCHE ANFORDERUNGEN

Zu den technischen Anforderungen beinhalten die SiAnf Ausführungen, wonach bei Auslegung, Fertigung, Errichtung und Prüfung sowie Betrieb und Instandhaltung der sicherheitstechnisch wichtigen Anlagenteile Grundsätze und Verfahren anzuwenden sind, die den besonderen sicherheitstechnischen Erfordernissen der Kerntechnik entsprechen. Bei Anwendung von anerkannten Regeln der Technik sind diese im Einzelfall daraufhin zu überprüfen, ob sie in Bezug auf den Anwendungsfall dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen.

Auf Maßnahmen und Einrichtungen der Sicherheitsebenen 1 bis 4a sowie die Maßnahmen und Einrichtungen, die für Einwirkungen von innen und außen sowie bei Notstandsfällen erforderlich sind, sind bezüglich aller Betriebsphasen sicherheitsfördernde Auslegungs-, Fertigungs- und Betriebsgrundsätze anzuwenden, wie insbesondere:

- begründete Sicherheitszuschläge bei der Auslegung von Komponenten, in Abhängigkeit von deren sicherheitstechnischer Bedeutung; hierbei können in Bezug auf den Anwendungsfall anerkannte Regeln und Standards angewendet werden;
- Bevorzugung von inhärent sicher wirkenden Mechanismen bei der Auslegung;
- Verwendung qualifizierter Werkstoffe, Fertigungs- und Prüfverfahren sowie betriebsbewährter oder ausreichend geprüfter Einrichtungen;

- instandhaltungs- und prüffreundliche Gestaltung von Einrichtungen unter besonderer Berücksichtigung der Strahlenexposition des Personals;
- ergonomische Gestaltung der Arbeitsplätze;
- Sicherstellung und Erhalt der Qualitätsmerkmale bei Fertigung, Errichtung und Betrieb;
- Durchführung von wiederkehrenden Prüfungen in dem sicherheitstechnisch notwendigen Umfang;
- zuverlässige Überwachung der in den jeweiligen Betriebsphasen relevanten Betriebszustände;
- Aufstellung und Anwendung eines Überwachungskonzepts mit Überwachungseinrichtungen zur Erkennung und Beherrschung betriebs- und alterungsbedingter Schäden;
- Aufzeichnung, Auswertung und sicherheitsbezogene Verwertung von Betriebserfahrungen.

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Zuverlässigkeit der Einrichtungen der Sicherheits-ebene 3 (Sicherheitseinrichtungen) sind zusätzlich folgende Auslegungsgrundsätze anzuwenden:

- Redundanz;
- Diversität;
- Entmaschung von redundanten Teilsystemen, soweit dieser sicherheitstechnische Nachteile nicht entgegenstehen;
- räumliche Trennung redundanter Teilsysteme;
- sicherheitsgerichtetes Systemverhalten bei Fehlfunktion von Teilsystemen oder Anlagen-teilen;
- Bevorzugung passiver gegenüber aktiven Sicherheitseinrichtungen;
- die Hilfs- und Versorgungssysteme der Sicherheitseinrichtungen sind so zuverlässig auszu-legen und gegen Einwirkungen zu schützen, dass sie die erforderliche hohe Verfügbarkeit der zu versorgenden Einrichtungen absichern;
- Automatisierung (in der Störfallanalyse sind von Hand auszulösende Schutzaktionen grund-sätzlich nicht vor Ablauf von 30 Minuten zu kreditieren).

Qualität und Zuverlässigkeit aller Einrichtungen des Kernkraftwerks müssen ihrer sicherheits-technischen Bedeutung entsprechen. Alle sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen sind hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung zu klassifizieren. Die in den spezifizierten Klassen geltenden Kriterien für Qualität und Zuverlässigkeit sind zu definieren und müssen insbesondere Angaben über die einzuhaltenden Vorgaben im Hinblick auf Auslegung, Ferti-gung, Umgebungs- und Wirksamkeitsbedingungen, Notstromversorgung und die dauerhafte Aufrechterhaltung der Qualität enthalten.

Die Vorgaben zur Gewährleistung der erforderlichen Redundanz der Sicherheitssysteme werden in den SiAnf genauer spezifiziert:

Einrichtungen zur Beherrschung von Ereignissen der Sicherheitsebene 3 sind so redundant und entmascht auszuführen, dass die zur Ereignisbeherrschung erforderlichen Sicherheitsfunktionen auch dann ausreichend wirksam sind, wenn im Anforderungsfall

- ein ungünstigst wirkender Einzelfehler in einer Sicherheitseinrichtung infolge eines zufälligen Ausfalls auftritt und
- gleichzeitig eine in Kombination mit dem Einzelfehler ungünstigst wirkende Unverfügbarkeit in einer Sicherheitseinrichtung infolge von Instandhaltungsmaßnahmen vorliegt.

Einzelfehler werden grundsätzlich sowohl bei aktiven als auch bei passiven Einrichtungen unterstellt, Ausnahmen sind zu begründen.

Bezüglich der Prüfung und Wartung geben die SiAnf vor, dass alle sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen so beschaffen und angeordnet sein müssen, dass sie entsprechend ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung und Aufgabe vor ihrer Inbetriebnahme und danach in regelmäßigen Zeitabständen in hinreichendem Umfang geprüft und gewartet werden können, um den spezifikationsgerechten Zustand feststellen und sich anbahnende Abweichungen von prüfbaren Qualitätsmerkmalen erkennen zu können.

Die Funktion von sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen ist unter Bedingungen, die möglichst dem Anforderungsfall entsprechen, im erforderlichen Umfang zu prüfen.

### **ZU BERÜCKSICHTIGENDE BETRIEBSZUSTÄNDE UND EREIGNISSE**

Die SiAnf beinhalten Vorgaben, wie verschiedene Betriebszustände sowie Störungen und Störfälle bei der Konzeption und beim Betrieb einer Anlage zu betrachten sind. Demnach sind bei der Auslegung der auf den Sicherheitsebenen 1 bis 3 zu verwirklichenden Maßnahmen und Einrichtungen jeweils folgende Betriebszustände und Ereignisse zu Grunde zu legen:

- In der Sicherheitsebene 1 zu erwartende Betriebszustände, einschließlich von Prüfzuständen,
- in der Sicherheitsebene 2 Ereignisse, deren Eintreten während der Betriebsdauer der Anlage zu erwarten ist, sowie
- in der Sicherheitsebene 3 ein abdeckendes Spektrum an Ereignissen, deren Eintreten während der Betriebsdauer der Anlage auf Grund der Zuverlässigkeit und Wirksamkeit der vorhandenen Maßnahmen und Einrichtungen nicht zu erwarten, jedoch dennoch zu unterstellen ist.

Die Auslegung der jeweiligen Maßnahmen und Einrichtungen muss derart erfolgen, dass für die zu berücksichtigenden Betriebszustände und Ereignisse unter Berücksichtigung festgelegter Randbedingungen nachgewiesen wird, dass die jeweilig geltenden sicherheitstechnischen Nachweisziele und Nachweiskriterien erfüllt werden.

Die Vollständigkeit und der abdeckende Charakter der zu betrachtenden Ereignisse sind anlagenspezifisch zu gewährleisten. Für definierte Ereignisse können optional Nachweise dahingehend geführt werden, dass durch spezielle Vorsorgemaßnahmen der Eintritt dieser Ereignisse als verhindert bewertet werden kann. Qualität und Zuverlässigkeit der zu treffenden Vorsorgemaßnahmen hat sich an den potenziellen Auswirkungen zu orientieren. Bei Ereignissen, deren Eintreten bei Vorhandensein spezieller Vorsorgemaßnahmen verhindert ist, ist die Nachweisführung auf die Einhaltung der Anforderungen an die Wirksamkeit und Zuverlässigkeit der hierzu realisierten Vorsorgemaßnahmen zu beziehen.

Einzelheiten zu diesen Ausführungen beinhaltet der Anhang 2 (Zu berücksichtigende Ereignisse inkl. der sicherheitstechnischen Nachweisziele und Nachweiskriterien der Sicherheitsebenen 2 bis 4a) zu den SiAnf. Darüber hinaus werden Anforderungen im Hinblick auf Einwirkungen von innen und außen sowie aus Notstandsfällen und auf Ereignisse mit Mehrfachversagen von Sicherheitseinrichtungen aufgestellt.

### **ANFORDERUNGEN AN DIE NACHWEISFÜHRUNG**

Zur Nachweisführung der Erfüllung der technischen Sicherheitsanforderungen sind deterministische Methoden sowie die probabilistische Sicherheitsanalyse heranzuziehen:

Die deterministischen Methoden umfassen

- die rechnerische Analyse von Ereignissen oder Zuständen,
- die Messung oder das Experiment,
- die ingenieurmäßige Bewertung.

Als Grundlage für Nachweisführungen müssen vorliegen:

- eine aktuelle Zusammenstellung der sicherheitstechnisch wichtigen Informationen über den bestehenden Zustand der betroffenen Maßnahmen und Einrichtungen sowie
- eine Dokumentation, dass der bestehende Zustand der betroffenen sicherheitstechnisch wichtigen Maßnahmen und Einrichtungen die aktuell geltenden Anforderungen erfüllt.

Bei der rechnerischen Analyse von Ereignisabläufen oder Zuständen müssen

- für den jeweiligen Anwendungsbereich validierte Berechnungsverfahren verwendet sowie
- mit der Berechnung verbundene Unsicherheiten quantifiziert oder durch geeignete Verfahren abgedeckt werden.

In Ergänzung der deterministischen Nachweisführungen muss durch probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) die Ausgewogenheit der sicherheitstechnischen Auslegung überprüft werden.

## 2.3.

**Abgleich der grundlegenden Vorgehensweise im Statusbericht mit dem deutschen Regelwerk**

Das in dem Statusbericht vorgestellte Sicherheitskonzept weist große Überschneidungen mit den Vorgaben aus den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (SiAnf) auf. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass die im Bericht herangezogenen internationalen Regelwerke<sup>70</sup> vergleichbare sicherheitstechnische Ansätze verfolgen wie die deutschen SiAnf.

So werden in dem Statusbericht ein gestaffeltes Sicherheitskonzept mit verschiedenen Sicherheitsebenen, eine an den Schutzziele orientierte Ableitung von Sicherheitsfunktionen und ein Redundanzkonzept vorgestellt. Ergänzend sollen Betriebssituationen und Ereignisse betrachtet und hinsichtlich ihrer Eintrittshäufigkeit und der Schwere ihrer Auswirkungen klassifiziert werden. Aufbauend hierauf soll unter anderem eine Sicherheitsklassifizierung von Komponenten und Systemen vorgenommen werden. Es werden ferner die Redundanz von Systemen sowie die Bevorzugung passiver Sicherheitssysteme gegenüber aktiven Systemen angeführt. Zur Nachweisführung sollen deterministische und probabilistische Sicherheitsbewertungen verwendet werden, wobei – wie auch in den SiAnf gefordert – die probabilistischen Analysen lediglich ergänzenden Charakter zu den primär vorzunehmenden deterministischen Analysen haben sollen. Dies sind alles Konzepte und Vorgehensweisen, die jeweils bei der Errichtung, dem Betrieb und dem späteren Rückbau der START-Anlage berücksichtigt werden sollen. Bei entsprechender Berücksichtigung dieser Ansätze ist eine wesentliche Voraussetzung gegeben, um auch das deutsche untergesetzliche Regelwerk zu erfüllen.

- Die Vorgaben und die dahinterstehenden Sicherheitskonzepte der SiAnf sind in einigen Punkten umfassender als in dem Statusbericht. Diese Unterschiede können aber zur Erfüllung der entsprechenden Anforderungen des deutschen Verfahrens im weiteren Vorgehen des Projekts entsprechend ausdifferenziert werden. Ein solcher Bedarf ergibt sich insbesondere in folgenden Punkten:
- Die Definition der Sicherheitsebenen stimmt nicht eins zu eins überein, jedoch können die im Statusbericht definierten Ebenen grundsätzlich auf jene der SiAnf überführt werden. Vergleichbares gilt für die Einordnung der Betriebszustände und Ereignisse.
- Das in den SiAnf abgeleitete Redundanzkonzept geht über die Ausführungen in dem Statusbericht hinaus. So ist es zur Erfüllung der Anforderungen erforderlich, dass bei Systemen zur Beherrschung von Störfällen (Sicherheitsebene<sup>3</sup>) ein Einzelfehler daraufhin zu überprüfen ist, ob er sich maximal ungünstig auf die zur Störfallbeherrschung erforderlichen Sicherheitssysteme auswirkt. Ferner ist zusätzlich grundsätzlich noch ein parallel verlaufender Instandhaltungsfall mit maximal ungünstiger Auswirkung zu berücksichtigen, sofern nicht der Instandhaltungsfall ausreichend zeitlich begrenzt ist.
- Die SiAnf legen ein Spektrum von Ereignissen in den verschiedenen Sicherheitsebenen und die dafür zu führenden Nachweise fest. Dabei existieren unterschiedliche Nachweisziele für die verschiedenen Sicherheitsebenen. Das Ereignisspektrum wurde für Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktor entwickelt. Entsprechende Ereignislisten sind im weiteren Prozess für die Teileinrichtungen der START-Anlage zu entwickeln und die Nachweise für die Einhaltung der jeweils betroffenen Schutzziele für die unterschiedlichen Ereignisse zu führen. Ein Nachweis für jeweils ein einhüllendes Stöfallereignis je Teilanlage, wie er entsprechend dem Statusbericht vorgesehen ist, entspricht diesem Ansatz vom Grundsatz her nicht.

- Integraler Bestandteil des in den SiAnf konkretisierten und in den deutschen Kernkraftwerken realisierten Sicherheitskonzeptes ist das Schutzkonzept gegen Einwirkungen von innen und außen einschließlich der sogenannten Notstandsfälle. Entsprechend zu berücksichtigende Einwirkungen sind in den SiAnf aufgeführt. Auch für die Teile der START-Anlage, die radioaktive Stoffe beinhalten, sind diese Einwirkungen zugrunde zu legen. Das Thema wird im Statusbericht angesprochen, jedoch sind die konkreten Anforderungen entsprechend den Vorgaben des deutschen Regelwerks zu spezifizieren. Entsprechend dem Vorgehen bei deutschen Kernkraftwerken werden die Vorgaben auch bei der START-Anlage realisierbar sein. Für den gewählten Standort eines ehemaligen Kernkraftwerks liegen entsprechende Analysen für Einwirkungen von außen vor (wie Bemessungserdbeben, Bemessungshochwasser, meteorologische Einwirkungen usw.), die als Basis für die Auslegung der START-Anlage herangezogen werden könnten.
- Die SiAnf enthalten keine expliziten Anforderungen an die Zahl der vorzusehenden Barrieren zur Rückhaltung radioaktiver Stoffe. Vielmehr sind diese entsprechend dem gestaffelten Sicherheitskonzept auf den verschiedenen Sicherheitsebenen vorzusehen. Diesem Ansatz folgt der Statusbericht insofern, als dass dort eine Mindestanzahl von Barrieren, die in der Regel vorzusehen ist, jedoch keine feste Vorgabe angesetzt wird. Eine Abweichung gegenüber den Anforderungen des deutschen Regelwerks resultiert daraus, dass die Reduzierung der Anzahl von Barrieren als Ergebnis einer Risikobeurteilung als möglich angesehen wird. Dies ist den Vorgaben der SiAnf folgend nicht vorgesehen.

Bei den vorgenannten Abgleichen ist zu berücksichtigen, dass die Sicherheitsanforderungen ursprünglich für den Betrieb von Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren verfasst wurden. Die Besonderheit der START-Anlage besteht darin, dass diese mehrere unterschiedliche Einrichtungen – einen Teilchenbeschleuniger, ein unterkritisches, bleigekühltes, schnelles System und eine Recyclinganlage – miteinander kombiniert. Am ehesten sind die abgeleiteten Vorgaben auf das unterkritische System der START-Anlage übertragbar. Einzelne grundlegende Anforderungen können aber auch sinngemäß auf andere Einrichtungen der geplanten Anlage angewendet werden. Dementsprechend starten wir unsere nachfolgende exemplarische Betrachtung einzelner Einrichtungen mit Einrichtungen der Reaktoranlage. Sofern dies erfolgreich ist, wäre in einem zweiten Schritt zu prüfen, in welchem Umfang eine Anwendung des Regelwerks auf andere Einrichtungen der Anlage möglich ist.

### 3 Exemplarische Bewertung der Sicherheitskonzepte einzelner Einrichtungen sowie der Ereignisanalyse

In diesem Abschnitt führen wir eine erste Betrachtung der Themen sowie der methodischen Vorgehensweise durch. Wir bewerten auf dieser Basis die grundsätzliche Machbarkeit. Sofern wir Abweichungen von Regelwerksvorgaben identifizieren, benennen wir diese.

#### 3.1.

#### Wärmeabfuhr

##### DARSTELLUNGEN IM STATUSBERICHT

##### Primärkühlsystem (PCS)

Den Darstellungen in dem Statusbericht Kapitel 8.6 folgend erfolgt die Wärmeabfuhr aus dem Reaktorbehälter durch ein Primärkühlsystem (Primary Cooling System, PCS), an welches ein mehrsträngiges Sekundärkühlsystem (Secondary Cooling System, SCS), ein mehrsträngiges Nachwärmeabfuhrsystem (Decay Heat Removal, DHR) und ein ebenfalls mehrsträngiges Not-Nachkühlsystem (Emergency Decay Heat Removal, E-DHR) angeschlossen sind.

Das Primärkühlsystem basiert gemäß dem Statusbericht Kapitel 8.5.2 auf einem in den Reaktorbehälter (Reactor Vessel, RV) integrierten Pool aus geschmolzenem Blei. Es soll so konzipiert werden, dass es unter Betriebsbedingungen in Verbindung mit dem Sekundärkühlsystem die Kern- und Targetkühlung übernimmt. Zu diesem Zweck wird die im Kern und im Target erzeugte Wärmeenergie durch die von Primärpumpen (PP) bewirkte Zwangszirkulation des Bleis im Reaktorbehälter auf die Dampferzeuger (Steam Generator, SG) übertragen.

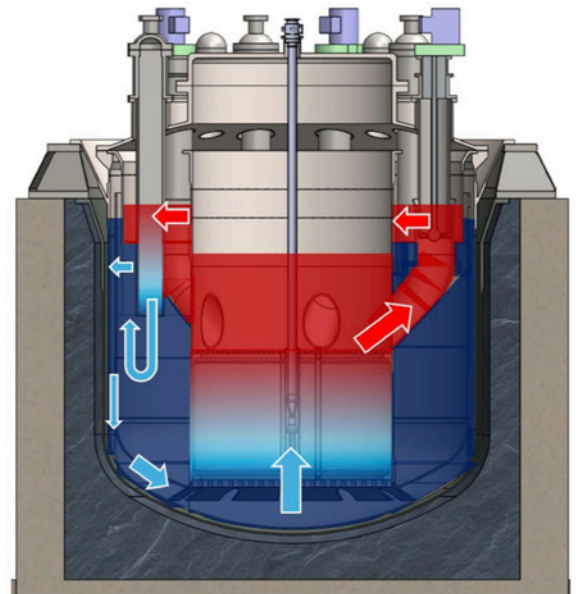


ABBILDUNG 54

Primärkreis, Fluss des Bleis während Normalbetrieb.

Die Dampferzeuger sollen die Schnittstelle zwischen dem Primärkühlsystem und den weiteren, mit Wasser beaufschlagten Kühlsystemen bilden. Im Normalbetrieb soll in den Dampferzeugern sekundärseitig überhitzter Dampf bei 18 MPa Druck erzeugt werden.

Im regulären Nachbetrieb sowie bei Notabschaltungen sollen die Dampferzeuger sekundärseitig mit dem Nachwärmeabfuhrsystem verbunden sein, um die Nachwärmeleistung durch Kondensation von Dampf abzuleiten. Dementsprechend soll das Primärkühlsystem so ausgelegt werden, dass es in Verbindung mit dem Nachwärmeabfuhrsystem auch die Funktion der Nachwärmeabfuhr unter Nachbetriebs- und Störfallbedingungen übernehmen kann. In dieser Betriebsart soll das Primärkühlsystem im Naturumlauf arbeiten.

Um Redundanz und Diversität der Kernkühlung unter Störfallbedingungen zu gewährleisten, ist darüber hinaus vorgesehen, die Nachzerfallswärme aus dem Primärkühlsystem alternativ über Tauchkühler an das Not-Nachkühlsystem übertragen zu können.

In dem Statusbericht wird auch auf die Möglichkeit von Leckagen des Reaktorbehälters (RV) eingegangen. Das Auftreten solcher Leckagen soll dadurch minimiert werden, dass auf Durchdringungen des Reaktorbehälters unterhalb des freien Niveaus des Kühlbeckens verzichtet wird. Des Weiteren ist entsprechend den Angaben in dem Statusbericht ein Sicherheitsbehälter (SV) vorgesehen, der aus einem Stahlmantel besteht, der die Reaktorgrube abdeckt und den Reaktorbehälter umschließt. Der SV soll so ausgelegt sein, dass er im Falle eines Reaktorbehälter-Bruchs das verlorene Blei zurückhält und ein Bleivolumen gewährleistet, mit welchem der Naturumlauf des Bleis innerhalb des Primärkühlsystems aufrechterhalten werden kann.

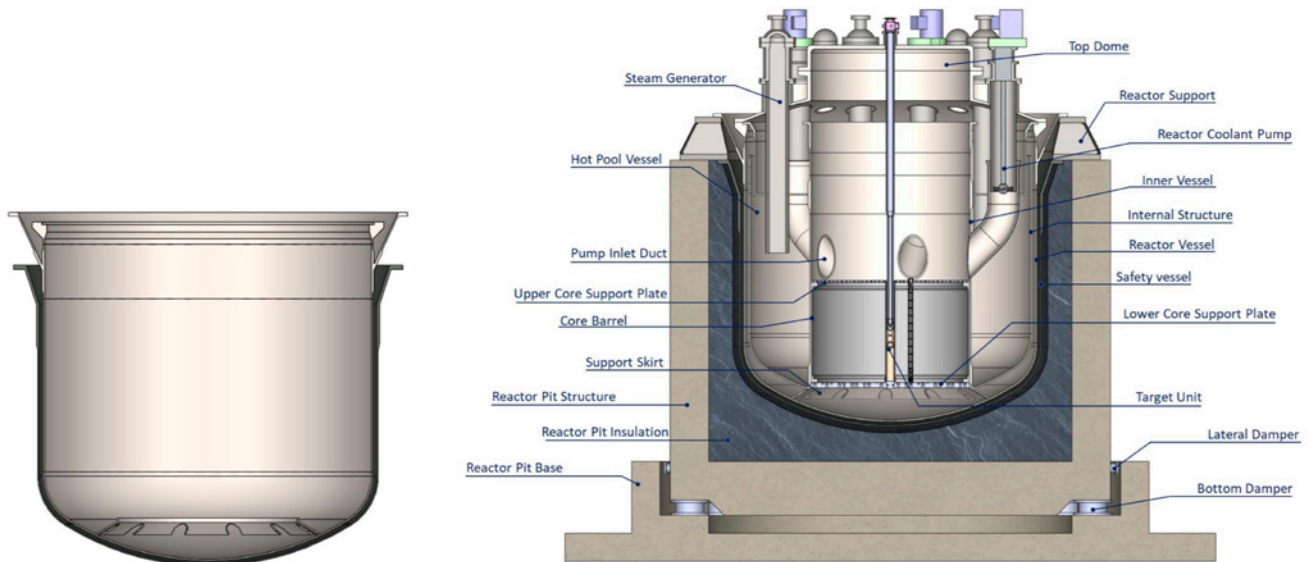


ABBILDUNG 55 Komponenten des Reaktorbehälters (RV) und RV mit Sicherheitsbehälter (SV).

In dem Statusbericht werden die nachfolgenden Anforderungen an das Primärkühlsystem (PCS) unter den verschiedenen Betriebsbedingungen angeführt.

Unter normalen Betriebsbedingungen sowie zur Unterstützung der normalen An- und Abfahrvorgänge der Anlage soll das Primärkühlsystem für die Erfüllung der folgenden grundlegenden Funktionen ausgelegt sein:

- Kern- und Target-Kühlung – Während des normalen Betriebs der Anlage mit eingeschalteten Primärpumpen soll das Primärkühlsystem die thermische Leistung des Kerns und des Targets über die Dampferzeuger an das Sekundärkühlsystem übertragen, wobei sekundärseitig Dampf erzeugt wird, der vom Turbinengenerator zur Erzeugung elektrischer Energie verwendet wird.
- Abfuhr der Nachzerfallswärme – Während der Abkühlung der Anlage, der Abschaltung der Anlage, des Brennelementwechsels und in der frühen Phase des Anfahrens führt das Primärkühlsystem die Nachzerfallswärme durch Naturumlauf in Verbindung mit dem Nachwärmeabfuhrsystem ab.
- Prozessüberwachung – Die Komponenten des Primärkühlsystems müssen mit den erforderlichen Messeinrichtungen ausgestattet sein, um die Prozessparameter für die Überwachung und Steuerung durch die Betriebsmannschaft bereitzustellen und die Signale zu liefern, die das Anlagensteuersystem benötigt, um die normalen Betriebsbedingungen während des Anlagenbetriebs aufrechtzuerhalten.

Zur Feststellung von Ereignissen, die eine unbeabsichtigte Freisetzung von Radioaktivität verursachen könnten, und Einleitung von Maßnahmen zu ihrer Beherrschung oder Beendigung sowie zur Minderung möglicher Ereignisfolgen soll das Primärkühlsystem so ausgelegt sein, dass es die folgenden Sicherheitsfunktionen erfüllt:

- *Passive Nachzerfallswärmeabfuhr.* In allen Betriebszuständen, die nicht dem normalen Anlagenbetrieb entsprechen, muss das Primärkühlsystem die Nachzerfallswärme des Kerns durch Naturumlauf abführen. Die Wärmeabfuhr muss dann über das Nachwärmeabfuhrsystem oder das Not-Nachkühlsystem möglich sein, ohne dass die Temperaturgrenzen von Brennstoff, Reaktorbehälter und internen Strukturen überschritten werden.
- *Integrität des Reaktorkühlmittel-Einschlusses* – In jedem Betriebszustand, mit Ausnahme von postulierten auslösenden Ereignissen, die sich auf die Integrität des Reaktorkühlmittel-Einschlusses auswirken, muss das Primärkühlsystem als Einschluss des Reaktorkühlmittels dienen. Das Primärkühlsystem muss so konstruiert sein, dass jegliche Leckage in Richtung des nicht-radioaktiven Sekundärkühlsystems und des Sicherheitsbehälters verhindert wird. Das Primärkühlsystem muss ferner eine Entlastungsmöglichkeit bieten, um unter allen Betriebsbedingungen einen Überdruck an der Umschließung des Reaktorkühlmittels zu vermeiden.
- *Umschließung radioaktiver Stoffe* – In jedem Betriebszustand, mit Ausnahme von postulierten auslösenden Ereignissen, die sich auf die Integrität des Reaktorkühlmittel-Einschlusses auswirken, muss das Primärkühlsystem die Freisetzung radioaktiver Stoffe in das Containment-System und die angrenzenden Systeme begrenzen.
- *Kühlbarkeit des Kerns* – In jedem Betriebszustand muss das Primärkühlsystem sicherstellen, dass die Geometrie des Kerns in einer Konfiguration gehalten wird, die die Durchführung der Nachwärmeabfuhr ermöglicht.
- *Prozessüberwachung* – Das Primärkühlsystem muss mit den erforderlichen Messeinrichtungen ausgestattet sein, um die Auslösung der Sicherheitssysteme, die im Anforderungsfall für das Erreichen eines sicheren Abschaltzustands erforderlich sind, zu gewährleisten.

### Sekundärkühlsystem (SCS)

Das betriebliche Sekundärkühlsystem wird in dem Statusbericht in dem Kapitel 9 „Balance of the Plant“ von den Dampferzeugern an über die Turbine bis hin zu dem Kondensator und dem Speisewassersystem beschrieben (vgl. Ausschnitte 1 und 2 in der nachfolgenden [ABBILDUNG 56](#))<sup>71</sup>.

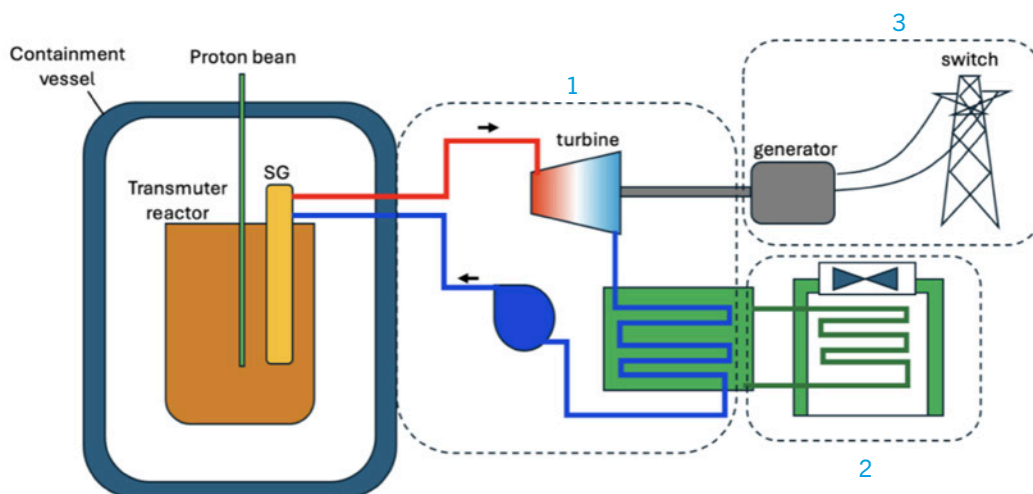


ABBILDUNG 56

Schematic of START Balance of Plant. (1) pressurized water-steam Secondary Cooling System, (2) the condenser cooling system, and (3) the electrical power generation system.

**Nachkühlsystem (DHR)**

Das Nachkühlsystem (DHR) soll ein wassergekühltes System außerhalb des Reaktorbehälters sein. Jeder Dampferzeuger (SG) soll mit einem Nachkühlstrang ausgestattet sein. Da die Dampferzeuger im Normalbetrieb mit dem Sekundärkühlsystem (SCS) verbunden sind, sollen spezielle Ventile die Umschaltung vom Sekundärkühlsystem auf das Nachwärmeabfuhrsystem ermöglichen.

Das Nachwärmeabfuhrsystem soll so ausgelegt sein, dass es die im Kern erzeugte Nachzerfallswärme im Naturumlauf abführen kann. Dies soll für alle Betriebszustände mit erforderlicher Nachwärmeabfuhr gelten, d. h. während der Abkühlung der Anlage, der Abschaltung der Anlage, des Brennelementwechsels, der frühen Phase der Inbetriebnahme sowie unter allen Bedingungen, die nicht dem Normalbetrieb der Anlage entsprechen. Der Aufbau des Systems befindet sich noch in der Entwicklung.

**Not-Nachkühlsystem (E-DHR)**

Das Not-Nachkühlsystem (E-DHR) ist als ein zweites System zur Abfuhr der Nachzerfallswärme vorgesehen, um Redundanz und Diversität der Sicherheitssysteme zu gewährleisten. Es ist als Wasserkühlsystem außerhalb des Reaktorbehälters geplant, das wie das Nachwärmeabfuhrsystem die Nachzerfallswärme des Kerns durch Naturumlauf abführen soll. Jeder Strang des Not-Nachkühlsystems soll zur Wärmeabfuhr mit einem Eintauchkühler verbunden sein. Die Eintauchkühler sollen damit die Schnittstellen zwischen dem Primärkühlsystem und dem Not-Nachkühlsystem bilden. Die Anzahl der vorgesehenen Kühler soll der Anzahl der Stränge des Nachwärmeabfuhrsystems folgen.

Geplant sind die Eintauchkühler als doppelwandige Rohrwärmetauscher in Bajonett-Bauweise, die sich im Normalbetrieb im Stand-by-Zustand befinden sollen. Der Wärmeübertrag an die Sekundärseite soll in einem doppelwandigen Rohr über eine trennende Gasschicht erfolgen. Der hieraus resultierende große Wärmewiderstand zwischen dem primären Blei und dem im Rohr fließenden Wasser soll den Temperatursprung des Eintauchkühlers bei Inbetriebnahme abmildern. Der damit verbundene geringere Wärmewirkungsgrad des doppelwandigen Rohrs soll dennoch der abzuführenden Wärmeleistung angemessen sein. Die genaue Auslegung der Eintauchkühler soll erfolgen, wenn die Dimensionierung des Primärkühlsystems für den Naturumlauf feststeht. Dementsprechend wird der Aufbau des Systems derzeit noch geprüft.

**Gesamtsystem**

Ein Funktionsplan der beschriebenen und noch im Entwicklungsstadium befindlichen Systeme zur Wärmeabfuhr ist in dem Statusbericht noch nicht enthalten. In der Beschreibung des sogenannten Digitalen Zwillings findet sich der folgende Übersichtsplan:

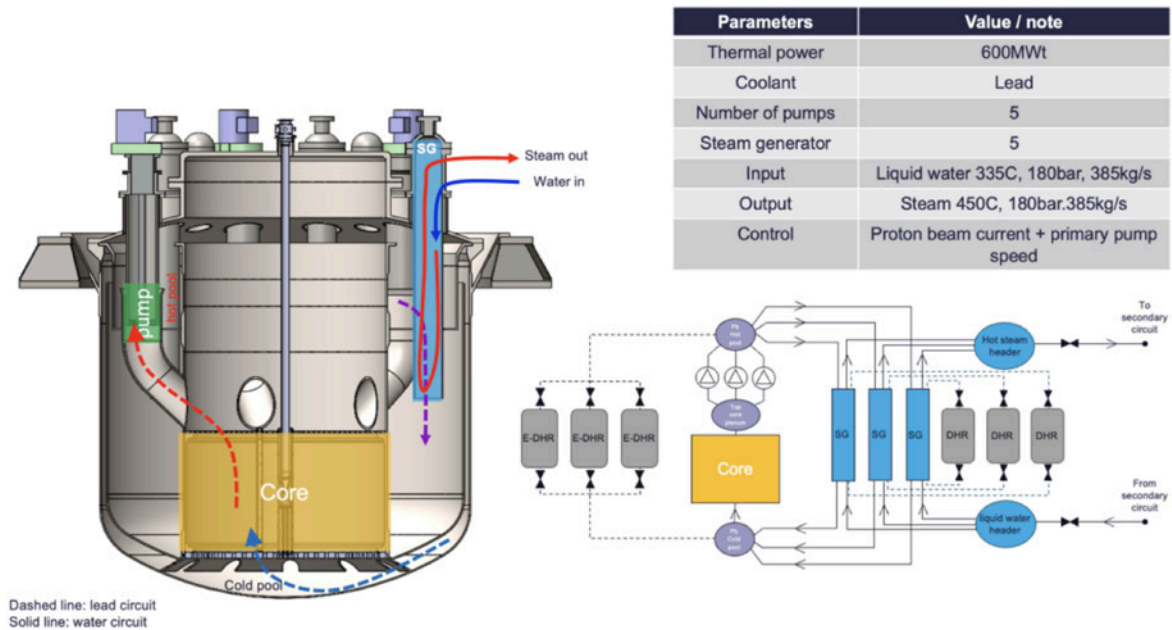


ABBILDUNG 57 Darstellung des Transmutex-Reaktors mit seinen Sicherheitselementen SG, DHR und E-DHR.

### ÜBEREINSTIMMUNG MIT DEM DEUTSCHEN REGELWERK

Die Detailauslegung der Kühlsysteme ist derzeit noch in Arbeit. Dementsprechend kann die Übereinstimmung mit dem Regelwerk lediglich übergeordnet und noch nicht vollständig bewertet werden. Auf dieser übergeordneten Ebene haben wir im [Kapitel 3\\_2.3](#) festgestellt, dass die grundlegenden Prinzipien der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (SiAnf) hinsichtlich eines gestaffelten Sicherheitskonzepts mit den verschiedenen Sicherheitsebenen und eines Schutzzielkonzepts für die START-Anlage vorhanden und dargestellt sind. Die für die Kühlsysteme betrachteten Schutzziele erstrecken sich auf die „Kühlung der Brennelemente“ und den „Einschluss der radioaktiven Stoffe“. Das Schutzziel „Kontrolle der Reaktivität“ steht in Bezug auf die Nachwärmeabfuhr hier nicht im Fokus und ist Gegenstand der Betrachtungen in dem nachfolgenden [Kapitel 3\\_3.2](#) (3.2. Reaktivitätskontrolle / Unterkritikalität).

Die Behandlung des Schutzziels „Einschluss der radioaktiven Stoffe“ ist für die sekundärseitigen Wärmeabfuhrsysteme nur dann von Relevanz, wenn diese infolge von Störfällen mit Radioaktivität beaufschlagt werden. Entsprechende Ereignisse werden von dem Statusbericht aufgegriffen (vergleiche [Kapitel 3\\_3.3](#) Ereignis, z. B. Bruch eines Dampferzeugerrohrs), jedoch noch nicht ausführlich behandelt. Insofern ist dieses Schutzziel bei der zukünftigen Analyse entsprechender Ereignisse zu berücksichtigen.

Die Darstellung der verschiedenen Sicherheitsebenen (in den SiAnf Sicherheitsebenen 1 bis 4) erfolgt in Bezug auf das Kühlsystem noch nicht. Eine Unterscheidung zwischen dem ungestörten Leistungsbetrieb und dem Nichtleistungsbetrieb wird gegeben. Bei der konkreten Ausgestaltung der Anlage ist hier noch eine Differenzierung erforderlich, um die Anforderungen des deutschen Regelwerks erfüllen zu können. Eine solche Differenzierung ist aber auf Basis

der bislang dargestellten Vorgehensweise möglich.

In Übereinstimmung mit den in den SiAnf dargelegten übergeordneten Prinzipien werden die grundlegenden technischen Anforderungen aufgegriffen. Die Anforderungen an die erforderliche Zuverlässigkeit der benötigten Einrichtungen sind in dem Bericht noch nicht durchgehend beschrieben. Aus den Beschreibungen folgt, dass die Kühlsysteme redundant und diversitär aufgebaut sind. Da aber noch keine Wirksamkeitsbedingungen für die Kühlsysteme abgeleitet werden, ist auch die Ableitung eines Redundanzgrades noch nicht möglich. Dies kann in der weiteren konkreten Planung erfolgen. Das vorgesehene Design bietet die Möglichkeit, bei einer entsprechenden Zahl von Strängen des Nachkühlsystems und des Not-Nachkühlsystems mit einer entsprechenden Wärmeabfuhr-Kapazität, die Redundanzanforderungen des deutschen Regelwerks zu erfüllen.

Die Darstellung der Zuverlässigkeit ist noch für einen weiteren Punkt, konkret für die Beurteilung der Integrität des Primärkühlsystems, von grundsätzlicher Bedeutung. Diesbezüglich wird beschrieben, dass zusätzlich zu dem Reaktorbehälter ein Sicherheitsbehälter vorgesehen ist, der aus einem Stahlmantel besteht, der die Reaktorgrube abdeckt und den Reaktorbehälter umschließt. Der Sicherheitsbehälter soll so ausgelegt sein, dass er im Falle eines Bruchs des Reaktorbehälters verlorenes Blei zurückhält und ein Bleivolumen im Reaktorbehälter gewährleistet, mit welchem der Naturumlauf des Bleis innerhalb des Primärkühlsystems aufrechterhalten werden kann.

Für das weitere Vorgehen ist es von Bedeutung zu klären, ob dieser doppelte Einschluss eine Zuverlässigkeit gewährleistet, mit der Leckagen aus dem Primärkühlkreis entsprechend den Anforderungen der SiAnf mit der erforderlichen Sicherheit ausgeschlossen werden können, oder ob Ereignisse mit einem größeren, die Kühlung beeinträchtigenden Verlust von primärem Kühlmittel zu betrachten sind. Dieser Punkt ist umso wichtiger, weil das primäre Kühlsystem in einem Behälter eine einzige Komponente darstellt, deren Verlust zum vollständigen Ausfall der gesamten Wärmeabfuhr führen würde.

Wenn ein Ausschluss von Leckagen aus dem Sicherheitsbehälter aufgrund der getroffenen Vorsorge verfolgt werden soll, ist bei der Ableitung der Sicherheitsfunktionen die Einbeziehung entsprechender Ereignisse mit einer Beeinträchtigung des Reaktorkühlmittel-Einschlusses, sodass die für eine Wärmeabfuhr erforderliche Menge an Primärkühlmittel nicht zur Verfügung steht, nicht erforderlich. In diesem Fall ist dann aber auch ein entsprechender Nachweis erforderlich. Die SiAnf führen hierzu aus, dass das Eintreten eines Ereignisses oder Ereignisablaufs oder Zustands als ausgeschlossen angesehen werden kann, wenn das Eintreten physikalisch unmöglich ist oder wenn mit einem hohen Maß an Aussagesicherheit das Eintreten als extrem unwahrscheinlich angesehen werden kann. Die Reaktorsicherheitskommission (RSK) hat in ihrer Stellungnahme zum Verständnis der Sicherheitsphilosophie<sup>72</sup> zu diesem Aspekt exemplarisch ausgeführt, dass die Erfüllung der genannten Bedingung z. B. für die Überlagerung von zwei unabhängigen, jeweils für sich unwahrscheinlichen Ereignissen angenommen werden kann.

Für deutsche Anlagen wurden in der Vergangenheit Doppelrohrkonstruktionen als hinreichend für einen Ausschluss angesehen, wenn für beide Rohre ein Bruch entsprechend unwahrscheinlich ist. Voraussetzung hierfür ist eine Wartbarkeit und Prüfbarkeit beider Rohrleitungen, sodass die Integrität kontinuierlich überwacht oder regelmäßig bestätigt werden kann. Dieser Ansatz ist prinzipiell auf die im Statusbericht dargestellte Doppelkonstruktion aus Reaktorbehälter und Sicherheitsbehälter übertragbar. Auch hierfür ist von entscheidender Bedeutung, dass die Integrität beider Behälter überwacht und hinsichtlich des Erhalts der notwendigen Eigenschaften (Ausschluss von unzulässigen Alterungseffekten) regelmäßig überprüft werden kann.

Entsprechende Konzepte sind für die vorgestellte Konstruktion möglich und müssten in der Detailplanung ergänzt werden.

Bezüglich des Schutzziels „Kühlung der Brennelemente“ beinhalten die SiAnf die Anforderung, dass der Wärmetransport vom Brennstoff bis zur Wärmesenke sicherzustellen ist. Die Erfüllung dieser Anforderung ist derzeit für das Nachkühlsystem (DHR) und das Not-Nachkühlsystem (E-DHR) aus dem Statusbericht nicht ersichtlich, da die weitere Ableitung der in diese Systeme eingetragenen Wärme noch nicht dargestellt wurde. Hierfür sind verschiedene grundlegende Konzepte, wie z. B. Luftkühlung, Wasserkühlung, Verdampfen einer Wasservorlage möglich, die unterschiedliche sicherheitstechnische Anforderungen mit sich bringen. Dies kann beispielsweise die Abhängigkeit von Außentemperaturen oder die Dimensionierung einer Wasservorlage sein.

Die SiAnf beinhalten diverse technische Anforderungen, deren Umsetzung auf der Basis der Darstellungen in dem Statusbericht noch nicht vollends beurteilt werden kann. Zu den Punkten Redundanz, Diversität und Bevorzugung passiver gegenüber aktiven Sicherheitseinrichtungen beinhaltet der Bericht einige übergeordnete Angaben. Dass das Nachkühlsystem und das Not-Nachkühlsystem diversitäre Eigenschaften zueinander aufweisen, kann anhand der Darstellungen bestätigt werden. Zu der Redundanz ist festzustellen, dass jeweils mehrere parallele Stränge der beiden Nachkühlsysteme vorgesehen sind. Wie zuvor dargelegt, kann der Redundanzgrad jedoch ohne Kenntnis der Wirksamkeitsbedingungen nicht beurteilt werden.

Da die Nachwärmeabfuhr im Naturumlauf erfolgen soll, ist eine Bevorzugung passiver gegenüber aktiven Sicherheitseinrichtungen erkennbar. Der Statusbericht deutet jedoch an, dass auch bei den zugehörigen Systemen aktive Eingriffe für deren Inbetriebnahme erforderlich sind. So muss beispielsweise in den Dampferzeugern zwischen dem betrieblichen Sekundärkühlsystem und dem Nachwärmeabfuhrsystem umgeschaltet werden. Ebenfalls ist es erforderlich, im Bedarfsfall die Eintauchkühler des Not-Nachwärmeabfuhrsystems zu aktivieren. Wie genau dies erfolgen soll, ist in dem Statusbericht noch nicht dargelegt und ist im Zuge der weiteren Planung zu ergänzen.

Aus den vorgenannten Ausführungen resultiert auch eine sicherheitstechnische Anforderung an das betriebliche Sekundärkühlsystem, da dieses im Bedarfsfall mit dem Übergang auf das Nachwärmeabfuhrsystem aktiv außer Betrieb genommen werden muss.

Weitere technische Anforderungen, insbesondere das Einzelfehlerkriterium sowie der Schutz gegen Einwirkungen von innen und außen, sind nach unserer Einschätzung auf Basis des vorgelegten Konzepts grundsätzlich erfüllbar. Die tatsächliche Erfüllung kann jedoch erst auf Basis weiterer konkreter Planungen beurteilt und ggf. bestätigt werden.

### 3.2.

## Reaktivitätskontrolle / Unterkritikalität

### DARSTELLUNGEN IM STATUSBERICHT

Der Reaktorkern der Neutronenquelle ist als unterkritische Anordnung von Brennelementen mit einem effektiven Multiplikationsfaktor  $k_{\text{eff}} = 0,98$  konzipiert, in der eine stabile Kettenreaktion (Kritikalität) erst durch die zusätzlichen Neutronen, die durch die Absorption der Protonen aus dem Teilchenbeschleuniger im Target freigesetzt werden, ermöglicht wird. Während eines Anlagenstillstands kann der Multiplikationsfaktor durch das Einbringen von

Absorberstäben in den Kern weiter auf  $k_{\text{eff}} = 0,95$  abgesenkt werden (Abschnitt 4.4.1.4). Diese Absorberstäbe sind laut Abschnitt 8.2.1.5 nicht als Steuerelemente zur Abschaltung des Reaktors oder für die Leistungsregelung vorgesehen.

Im Abschnitt 8.6 wird dargestellt, dass die unterkritische Brennelementanordnung im Reaktorkern in Verbindung mit dem externen Spallationsziel ein zentrales Sicherheitsmerkmal der Neutronenquelle sei, da so die Risiken eines ungeplanten Reaktivitätsanstiegs oder Fluktuationen der Reaktivität inhärent abgemildert würden.

Gemäß den Darstellungen in den Abschnitten 2.1.1 und 2.1.2 soll der Protonenstrahl aus dem Beschleuniger auf das Target treffen, welches zentral im Reaktorkern angeordnet ist. Als Material für das Target, welches den Protonenstrahl absorbieren und infolgedessen Neutronen emittieren soll, ist das Primärkühlmittel, also flüssiges Blei, vorgesehen. Ein hochwärmebeständiges Fenster soll das Vakuum des Strahlrohres für den Protonenstrahl von dem Blei trennen und so auch den Einschluss der radioaktiven Stoffe gewährleisten.

Im Abschnitt 4.1 wird die schnelle Abschaltbarkeit des Transmutationsreaktors innerhalb weniger Millisekunden nach der Abschaltung des Beschleunigers als Sicherheitsmerkmal der Neutronenquelle betont.

Im Abschnitt 4.3 wird beschrieben, dass beim Auftreten von Dampfblasen im Reaktorkern eine Reaktivitätsabnahme auftritt, der Reaktorkern somit einen negativen Voidkoeffizienten aufweisen soll, was ebenfalls ein Sicherheitsmerkmal der Neutronenquelle darstelle.

Gemäß den Darstellungen im Abschnitt 6.5.2.1 dient der Umlenkmagnet, der den Protonenstrahl aus den beiden redundanten Ionenquellen in den Einlass zur ersten Beschleunigerstufe umlenkt, auch als passive fail-safe-Abschaltelinrichtung, da seine Energieversorgung auch über das (Reaktor-)Schutzsystem abgeschaltet werden kann. Mit der Abschaltung dieses Magneten wird der Protonenstrahl nicht mehr in die erste Beschleunigerstufe umgelenkt, sondern trifft in gerader Linie auf einen Kollimator (Beam-Stopper). Der Protonenstrahl zum Target ist damit unterbrochen und der Reaktorkern wird unterkritisch.

Des Weiteren soll gemäß den Abschnitten 6.5.11 und 6.7 hinter jeder der insgesamt drei Beschleunigerstufen eine Möglichkeit vorgesehen werden, den Protonenstrahl in einen „beam-dump“ umzulenken und so sicher abzufangen. Diese Umlenkungen sind jedoch noch nicht konkret entworfen, es soll aber ausreichend Platz für diese Einrichtungen vorgesehen sein. Auch auf diesem Wege kann der Protonenstrahl zum Target unterbrochen und der Reaktorkern somit unterkritisch gemacht werden.

Gemäß den Angaben im Abschnitt 8.7.1.2 wurde in einem ersten Schritt zur thermohydraulischen Analyse der Neutronenquelle ein Modell für eine unterkritische Brennelement-Anordnung mit einer thermischen Leistung von 300 MW erstellt, um die Ergebnisse der Analysen mit Ergebnissen für die kritische Konfiguration des ALFRED-Reaktors mit ebenfalls 300 MW thermischer Reaktorleistung vergleichen zu können (basierend auf Daten für die Reaktivitätsrückwirkungen nach Gandini<sup>73</sup> und weiteren Literaturstellen). Mit diesem Modell wurden die im Abschnitt 8.7.2 beschriebenen Analysen von Transienten mit Ausfall des Schnellabschaltsystems – also der Abschaltung des Protonenstrahls – durchgeführt. Laut den Darstellungen im Abschnitt 8.7.2.3 zum Ausfall der Hauptwärmesenke ohne Reaktorschnellabschaltung ist in diesem Fall etwa 10 bis 20 Minuten nach Ereigniseintritt mit einem Hüllrohrversagen zu rechnen, sodass der Beschleuniger innerhalb einer Karenzzeit von 10 Minuten vom Betriebspersonal abgeschaltet werden muss, was gemäß den Angaben im Statusbericht möglich sein sollte. Diese Karenzzeit verkürzt sich in der Analyse des kombinierten Ausfalls der Hauptwärmesenke mit dem Ausfall der Hauptkühlmittelpumpen auf wenige Minuten, was entsprechend den Darstellungen im Abschnitt 8.7.2.4 die Möglichkeit

eines rechtzeitigen Eingriffs des Betriebspersonals infrage stelle. Des Weiteren wird in diesem Abschnitt die Möglichkeit einer diversitären und passiven, auf eine externe Batterie gestützten Abschalteneinrichtung angedeutet, welche auf dem chemischen Potential dieser Batterie anstatt des üblichen mechanischen oder schwerkraftgetriebenen Potentials beruhe.

Im Abschnitt 8.5.1 des Statusberichts wird beschrieben, dass um den eigentlichen Kern und innerhalb des Reaktorbehälters ein Lagerbereich u. a. für genutzte Brennelemente (SNF-Zone) vorgesehen ist. Leere Positionen in diesem Lagerbereich sollen mit Dummy-Brennelementen besetzt werden, die als Neutronenreflektoren während des Normalbetriebs dienen. Zwischen dem Lagerbereich und dem aktiven Kern ist ein Bereich vorgesehen, in dem sich ausschließlich Brennelemente mit metallischem Thorium befinden, um den Lagerbereich gegen Neutronen aus dem aktiven Kern abzuschirmen. Weiterführende Angaben zur Reaktivitätskontrolle oder zur Sicherstellung der Unterkritikalität in diesem Lagerbereich sind in dem Statusbericht nicht enthalten.

Die weitere Lagerung des Brennstoffs, sowohl aus dem Betrieb der Neutronenquelle als auch von angelieferten abgebrannten Brennelementen aus konventionellen Kernkraftwerken und von in der START-Anlage neu gefertigten Brennelementen, wird im Abschnitt 10.5 des Statusberichts betrachtet. Aussagen zur Reaktivitätskontrolle oder zur Sicherstellung der Unterkritikalität bei der Lagerung und Handhabung der Brennelemente sind hier nicht enthalten.

Der Prozess der Brennstoffaufarbeitung aus abgebrannten Brennelementen aus konventionellen Kernkraftwerken, aus genutzten Brennelementen aus der Neutronenquelle oder aus Brennelementen, in denen langlebige Radioisotope transmutiert wurden, sowie der Fertigung neuer Brennelemente in der START-Anlage wird im Abschnitt 11 des Statusberichts beschrieben. Auch in diesem Abschnitt sind keine Aussagen zur Reaktivitätskontrolle oder zur Sicherstellung der Unterkritikalität während der Brennstoffaufarbeitung und der Fertigung von Brennelementen enthalten.

### **ÜBEREINSTIMMUNG MIT DEM DEUTSCHEN REGELWERK**

Anforderung an die Auslegung des Reaktorkerns werden in den SiAnf, Nr. 3.2 (1) bis (4) formuliert. Demnach ist die Kontrolle der Reaktivität im Reaktorkern auf den Sicherheitsebenen 1 bis 4a sowie bei Einwirkungen von innen und von außen sowie bei Notstandsfällen in allen Betriebsphasen sicherzustellen. Der Reaktorkern und die relevanten Einrichtungen zur Überwachung, Regelung und Begrenzung der Reaktorleistung und zur Abschaltung des Reaktors sind so auszulegen, herzustellen und in einem solchen Zustand zu halten, dass im Zusammenwirken mit dem Kühlsystem für den Reaktorkern die jeweiligen Auslegungsgrenzen der Sicherheitsebenen 1 bis 4a eingehalten werden. Der Reaktorkern ist so auszulegen, dass aufgrund inhärenter reaktorphysikalischer Rückkopplungseigenschaften die in Betracht zu ziehenden schnellen Reaktivitätsanstiege so weit abgefangen werden, dass im Zusammenwirken mit den übrigen inhärenten Eigenschaften der Anlage sowie den Begrenzungs- oder Abschalteneinrichtungen die jeweils auf den Sicherheitsebenen geltenden sicherheitstechnischen Nachweisziele und Nachweiskriterien eingehalten werden. Des Weiteren ist der Reaktorkern so auszulegen, dass aufgrund inhärenter reaktorphysikalischer Rückkopplungseigenschaften die zu berücksichtigenden Transienten der Sicherheitsebene 4a mit unterstelltem Ausfall der schnell wirkenden Abschalteneinrichtung so weit abgefangen werden, dass im Zusammenwirken mit den ansonsten bestimmungsgemäß wirksamen Maßnahmen und Einrichtungen der Anlage die für diese Ereignisse geltenden sicherheitstechnischen Nachweisziele und Nachweiskriterien eingehalten werden.

Die SiAnf, Nr. 3.2 (5) fordern, dass ein Reaktor mit mindestens einer Einrichtung zur schnellen Abschaltung (Schnellabschaltsystem) sowie mit mindestens einer weiteren, davon unabhän-

gigen und diversitären Abschaltseinrichtung zur Herbeiführung und dauerhaften Aufrechterhaltung der Unterkritikalität auszustatten ist. Diesen Abschaltseinrichtungen vorgelagerte Regelungs- und Begrenzungseinrichtungen können ganz oder teilweise identisch mit den Abschaltseinrichtungen sein, sofern die Wirksamkeit der Abschaltseinrichtungen jederzeit im geforderten Maße erhalten bleibt.

Gemäß Nr. 3.2 (6) der SiAnf muss das Schnellabschaltssystem alleine in der Lage sein, den Reaktor aus jedem Zustand der Sicherheitsebenen 1 bis 3 heraus, auch bei unterstellter Unwirksamkeit des reaktivitätswirksamsten Teilsystems, ebenso wie bei Einwirkungen von innen und außen sowie bei Notstandsfällen so schnell unterkritisch zu machen und hinreichend lange zu halten, dass die jeweils geltenden sicherheitstechnischen Nachweisziele und Nachweiskriterien eingehalten werden. Bei Ereignissen der Sicherheitsebene 3 kann im Hinblick auf die einzuhaltende Unterkritikalität die zu unterstellende Unwirksamkeit des reaktivitätswirksamsten Steuerelements als Einzelfehler behandelt werden.

Gemäß Nr. 3.1 (3) h) der SiAnf sind in der Störfallanalyse von Hand auszulösende Schutzaktionen grundsätzlich nicht vor Ablauf von 30 Minuten zu kreditieren.

Laut der Nr. 3.2 (7) der SiAnf muss der Reaktor auf den Sicherheitsebenen 1 bis 4a, bei Einwirkungen von innen und außen sowie bei Notstandsfällen bei den für die Reaktivitätsbilanz ungünstigsten Bedingungen, die unter den in Betracht zu ziehenden Zuständen und Ereignissen möglich sind, langfristig unterkritisch gemacht und dauerhaft unterkritisch gehalten werden können.

Gemäß den Nr. 3.10 (1) und 3.10 (2) der SiAnf muss die Kontrolle der Reaktivität bei der Lagerung und Handhabung von Brennelementen auf den Sicherheitsebenen 1 bis 4a, bei Einwirkungen von innen und von außen sowie bei Notstandsfällen in allen Betriebsphasen sichergestellt sein. Des Weiteren sind Einrichtungen und Maßnahmen zur Handhabung und Lagerung der Brennelemente derart vorzusehen, dass ein Kritikalitätsereignis in den Lager- einrichtungen auch unter Störfallbedingungen, bei Einwirkungen von innen und von außen sowie bei Notstandsfällen nicht zu unterstellen ist. Diese Anforderungen an die Lagerung und Handhabung von Brennelementen lassen sich sinngemäß auch auf Einrichtungen zur Brennstoffaufarbeitung und zur Brennelementfertigung (bei denen es sich ja in einem weiteren Sinne auch um eine Handhabung handelt) übertragen. Weitergehende Anforderungen an die Kritikalitätssicherheit für diese Einrichtungen finden sich in den Sicherheitsanforderungen für Kernbrennstoffversorgungsanlagen<sup>74</sup>, die für eine Detailbewertung heranzuziehen sind.

Die Umsetzung der Anforderungen an die Auslegung des Reaktorkerns in den Nr. 3.2 (1) bis (4) der SiAnf kann auf Grundlage der aktuell vorliegenden Informationen nicht bewertet werden, da auch die vorläufigen Ereignisanalysen im Abschnitt 8.7.2 des Statusberichts nur für einen fiktiven Reaktorkern in unterkritischer Anordnung, aber mit nur 50 % der thermischen Leistung des eigentlich in der Neutronenquelle vorgesehenen Reaktorkerns durchgeführt wurden. Nachweise hierzu sind aber grundsätzlich mit entsprechend validierten und verifizierten Simulationsprogrammen und Eingabedaten führbar und wären in einem konkreten Genehmigungsverfahren vorzulegen, wobei die Anforderungen für alle Sicherheitsebenen zu berücksichtigen sind.

Aufgrund der vorgesehenen unterkritischen Anordnung der Brennelemente im Reaktorkern erreicht die Neutronenquelle immer einen unterkritischen Zustand, sobald der Protonenstrahl auf das Target unterbrochen wird. Das vorgesehene Schnellabschaltssystem mit der Abschaltung des Umlenkmagneten für den Protonenstrahl vor dessen Eintritt in die erste Beschleunigerstufe ist daher auf einer konzeptionellen Ebene geeignet, die genannten Anforderungen an ein Schnellabschaltssystem zu erfüllen. Eine abschließende Bewertung seiner Wirksamkeit und insbesondere seiner Zuverlässigkeit auch bei Einwirkungen von innen oder

außen sowie bei Notstandsfällen ist auf dem gegenwärtigen Informationsstand des Statusberichts noch nicht möglich. Es sei allerdings schon jetzt darauf hingewiesen, dass das beschriebene System vor dem Hintergrund des aktuellen deutschen Regelwerks und in Analogie zum Schnellabschaltsystem eines Druckwasserreaktors nicht als passives System angesehen werden kann, da für seine Auslösung eine aktive Abschaltung der Stromversorgung des genannten Umlenkmagneten erforderlich ist.

Die Anforderung der Nr. 3.2 (5) der SiAnf nach einer zum originären Schnellabschaltsystem diversitären Abschalteinrichtung wird mit dem im Statusbericht beschriebenen Konzept noch nicht erfüllt. Wie die vorläufigen Ereignisanalysen im Abschnitt 8.7.2 des Statusberichts für Transienten mit Versagen der Reaktorschnellabschaltung zeigen, ist eine solche diversitäre Abschalteinrichtung, die im Abschnitt 8.7.2.4 des Statusberichts ja auch angedeutet wird, nicht nur zur formalen Erfüllung dieser Anforderung des Regelwerks, sondern auch zur Sicherstellung des Erhalts einer kühlbaren Geometrie des Reaktorkerns bei derartigen Ereignissen aus sicherheitstechnischer Sicht erforderlich. Erste Gedanken hierzu scheinen beim Anlagenentwickler vorzuliegen, die bei der weiteren Anlagenkonzeptionierung und -auslegung weiterzuentwickeln sind.

Bezüglich der dargestellten Option von Handmaßnahmen beim Ereignis „Ausfall der Hauptwärmesenke ohne Schnellabschaltung“ ist festzustellen, dass gemäß dem deutschen Regelwerk (Nr. 3.1 (3) h) der SiAnf) Handmaßnahmen grundsätzlich nicht vor Ablauf von 30 Minuten kreditiert werden können. Es ist vom Anlagenentwickler zu zeigen, dass die für dieses Ereignis zutreffenden Anforderungen der Sicherheitsebene 4a auch bei Einhaltung dieser Randbedingung eingehalten werden.

Ebenfalls noch darzustellen ist die gemäß den Nr. 3.10 (1) und 3.10 (2) der SiAnf sowie den Sicherheitsanforderungen für Kernbrennstoffversorgungsanlagen aufzuzeigende Kontrolle der Reaktivität bei der Lagerung und Handhabung von Brennelementen sowie bei der Brennstoffaufarbeitung und der Brennelementfertigung auf den Sicherheitsebenen 1 bis 4a, bei Einwirkungen von innen und von außen sowie bei Notstandsfällen und in allen Betriebsphasen. Derartige Nachweise sind grundsätzlich führbar und wurden in der Vergangenheit – wenn auch nicht für alle im Konzept der START-Anlage vorgesehenen Teilprozesse und nicht durchgängig in Deutschland – erfolgreich geführt und behördlich anerkannt.

### 3.3. Ereignisanalyse

#### DARSTELLUNGEN IM STATUSBERICHT

Wie in [Kapitel 3\\_2.1.2](#) angeführt, klassifiziert der Statusbericht die Betriebssituationen übergeordnet folgendermaßen:

- Normaler Betrieb
- Erwartbare Betriebsereignisse (Anticipated operational occurrences, AOOs)
- Auslegungsstörfälle (Design-basis accidents, DBAs)
- Auslegungsüberschreitende Unfälle (Beyond-design-basis accidents, BDBAs)

Darüber hinaus werden folgende Klassifikationen und Beschreibungen der Betriebssituationen außerhalb des Normalbetriebs eingeführt:

- *Störungen (Upset Conditions)*: Störungsbedingungen für den Transmutationsreaktor sind Bedingungen, die während der Lebensdauer des Reaktors zu erwarten sind und für deren Beherrschung das System ausgelegt ist. Dabei handelt es sich um Vorfälle von moderater Häufigkeit. Zu den Störungen gehören auch anormale Vorfälle, die nicht zu einer erzwungenen Abschaltung führen, sowie solche, die zu erzwungenen Abschaltungen führen, bei denen die Abhilfemaßnahmen aber keine Behebung mechanischer Schäden umfassen.
- *Unerwartete Zustände<sup>75</sup>, Störfälle (Emergency Conditions)*: Für den Transmutationsreaktor sind dies Abweichungen von den normalen Bedingungen, die eine Abschaltung zur Inspektion oder Reparatur der Systemkomponenten oder zur Korrektur des Betriebszustandes erfordern. Diese Ereignisse unterscheiden sich von Störungen durch den Schweregrad und die Anforderungen an die Maßnahmen. Diese Vorfälle haben eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit. Beispiele hierfür sind ein geringer Kühlmittelverlust, ein kleiner Dampfleitungsbruch oder ein vollständiger Durchflussverlust.
- *Fehlerhafte Zustände, Schadenszustände (Faulted Conditions)*: Dies sind Ereignisse mit geringer Wahrscheinlichkeit, deren Folgen die Integrität und Betriebsfähigkeit des Transmutationsreaktors beeinträchtigen und sich auch auf die Bevölkerung auswirken können. Beispiele hierfür sind große Kühlmittelverluste und große Dampfleitungsbrüche.

Neben dieser allgemeinen Klassifizierung von Zuständen werden in dem Statusbericht mehrere postulierte auslösende Ereignisse (Transienten) identifiziert und in zwei Hauptklassen eingeteilt. Die Unterscheidung in sogenannte geschützte oder ungeschützte Transienten erfolgt danach, ob der Protonenstrahl des Beschleunigers nach Eintreten des postulierten auslösenden Ereignisses abgeschaltet wird oder nicht. Die auslösenden Ereignisse selbst wurden gemäß dem Statusbericht auf der Grundlage von Richtlinien der U.S. nuklear Regulatory Commission (NRC) identifiziert.

- Geschützte Transienten sind Szenarien, bei denen der Beschleunigerstrahl abgeschaltet wird, sobald die Reaktorabschaltung ausgelöst wird. In dem unterkritischen Kern sind die Absorberstäbe nicht dafür ausgelegt, den Reaktor abzuschalten. Die identifizierten geschützten Transienten sind u. a.:
  - Störungen am Beschleunigerstrahl sowie Schäden an Bauteilen in Bezug auf den Beschleunigerstrahl, z. B. am Strahlfenster
  - Ausfall von Primärkühlmittelpumpen (Leistungsverlust des Primärsystems, Bruch einer Pumpenwelle oder Versagen des Pumpenrotors)
  - Transienten mit Reaktor-Unterkühlung sowie Störungen in der Wärmeabfuhr
  - Verlust der externen Last, z. B. durch Turbinenabschaltung
  - Ausfall der Wechselstromversorgung bis hin zu Station Black-Out (SBO)
  - Rohrbruch im Speisewassersystem innerhalb und/oder außerhalb des Containments
  - Bruch eines Dampfzeugerrohrs
  - Bersten von Brennstoffhüllrohren
- Ungeschützte Transienten sind Szenarien, bei denen die Abschaltung des Beschleunigerstrahls aufgrund fehlerhafter Signale beeinträchtigt wird. Diese sollen durch die Implementierung eines passiven Sicherheitssystems zur Abschaltung des Protonenstrahls deterministisch ausgeschlossen werden. Von den identifizierten und im Statusbericht genannten ungeschützten transienten Szenarien werden in dem Bericht die nachfolgend genannten einzeln dargestellt:

- *Unprotected Loss of Flow Transient (ULOF)*: abrupter Verlust des Kühlmittelflusses ohne Sicherheitssysteme oder Abhilfemaßnahmen
- *Unprotected Loss of Heat Sink Transient (ULOHS)*: plötzlicher Verlust der Wärmeabfuhrkapazität im Primärkreislauf
- Kombination der beiden vorgenannten Transienten
- *Unprotected Beam Over-Power Transient (UBOP)*: vorübergehende Leistungsexkursion des Protonenstrahls
- Darüber hinaus beinhaltet der Statusbericht vorläufige Analysen für einen Reaktor mit 50 % der geplanten thermischen Reaktorleistung zu folgenden Vorgängen:
  - *Unprotected Transient Over-Power (UTOP)*: Lineare Erhöhung der Reaktivität
  - *Unprotected Over-Cooling (UOC)*: Unterkühlungstransiente

Des Weiteren werden einzelne auslösende Ereignisse betrachtet und in einer kurzen Beschreibung Maßnahmen und Einrichtungen zu der Beherrschung oder Abmilderung geschildert, ohne dass unter diesem Punkt ausführliche Analysen dargestellt werden. Diese sind:

- Ausfall der Stromversorgung,
- Ausfall der Wasserversorgung für die Kondensatorkühlung,
- Ausfall des Hauptkondensators,
- Fehler an der Turbine oder dem Generator,
- Brandszenarien, Brände in der Turbinenhalle oder den Hilfsgebäuden,
- Interne Überflutungen.

### ÜBEREINSTIMMUNG MIT DEM DEUTSCHEN REGELWERK

Wie im [Kapitel 3\\_2.2.7](#) dargestellt, ergeben sich die nach dem deutschen Regelwerk zu berücksichtigenden Ereignisse insbesondere aus den Anhängen 2 und 3 zu den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“. Die dortigen Ereignislisten wurden für deutsche Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktor oder mit Siedewasserreaktor abgeleitet. Sie sind nicht durchgehend Eins zu Eins auf die hier zu betrachtende START-Anlage übertragbar. Manche Ereignisse aus den Ereignislisten der SiAnf fallen weg, weil entsprechende Einrichtungen bei START nicht vorhanden sind (z. B. Ereignisse am Druckhalter). Weitere Ereignisse können nur sinngemäß übertragen werden, da z. B. der Primärkreis der Anlage bleigekühlt und drucklos sowie der Reaktor selbst unterkritisch ist.

Vor diesem Hintergrund ist festzustellen, dass entsprechend dem Statusbericht die wesentlichen Ereignisse behandelt werden sollen. Ereignisse mit Störungen an den Steuerelementen werden beispielsweise sinngemäß erfasst, indem Störungen an dem Beschleunigerstrahl betrachtet werden. Des Weiteren werden auch Ereignisse mit Ausfall der Abschaltung des Reaktors (ATWS) in den Blick genommen.

Die Ereignisanalysen selbst sind noch nicht oder nur in Ansätzen dargestellt. Das Spektrum der angeführten Ereignisse ist jedoch geeignet, hierauf weiterführende Analysen aufzubauen, wobei einzelne Ereignisse im Spektrum noch fehlen. Diese sind:

- Ereignisse beim Umgang mit Brennelementen und
- Ereignisse im Bereich der Kühlung der gelagerten Brennelemente.

Neben den Ereignislisten im Anhang 2 beinhalten die SiAnf im Anhang 3 „Anforderungen an den Schutz gegen Einwirkungen von innen und außen sowie aus Notstandsfällen“. Hieraus resultieren weitere Ereignisse, die zu betrachten sind und die bislang im Bericht nur sehr grob oder gar nicht erwähnt werden.

Für die entsprechenden Einwirkungen ist jeweils eine Bewertung der Relevanz für die START-Anlage erforderlich. Es ist aufzuzeigen, mit welchen Vorkehrungen die Einwirkungen beherrscht werden. Relevante resultierende Ereignisse sind im Einzelnen zu betrachten. Dazu gehören nach unserer Einschätzung insbesondere anlageninterne Brände, Erdbeben und Hochwasser sowie zivilisatorisch bedingte Einwirkungen wie Flugzeugabsturz und anlagenexterne Explosion. Hierbei sollte es möglich sein, bei den Einwirkungen von außen z. T. auf bestehende Analysen für den Standort des ehemaligen Kernkraftwerks zurückgreifen zu können (z. B. bei der Bestimmung des Bemessungserdbebens, des Bemessungshochwassers oder der extremen meteorologischen Ereignisse). Die bereits bestehenden Analysen müssten jedoch zuvor auf Aktualität und Übertragbarkeit überprüft werden.

Bei den im Statusbericht dokumentierten Ereignisanalysen handelt es sich um Ergebnisse von Berechnungen, die auf Basis eines Modells mit der halben der für später vorgesehenen Leistung vorgenommen wurden. Sie sind insofern für die vorgesehene Anlage noch nicht vollständig übertragbar und deshalb als Basis für eine erste Orientierung anzusehen. Für eine vollständige und prüfbare Ereignisanalyse wären sämtliche verwendete Eingangsparameter zu dokumentieren. Neben der Beschreibung eines fiktiven Kerns im Statusbericht würde dies verschiedene Parameter umfassen, wie zum Beispiel:

- die physikalisch bedingten Reaktionen der Anlage auf bestimmte Zustandsänderungen,
- die Reaktionen und Schalthandlungen von Systemen sowie
- die Wirksamkeit von Systemeingriffen.

Eine dementsprechende Dokumentation wäre in weiteren Detailunterlagen noch zu ergänzen.

Somit ist in Bezug auf die Ereignisanalysen festzustellen, dass im Statusbericht ein sinnvoller und zielführender Ansatz skizziert wird, mit dem prinzipiell die Anforderungen des deutschen Regelwerks erfüllt werden können. Wie im Bericht auch festgestellt, sind die Analysen derzeit noch unvollständig. Bei der weiteren Konkretisierung des Vorhabens sind dementsprechend noch die Verbreitung der bestehenden Analysen sowie die Ergänzung von Analysen zu weiteren Ereignissen und Einwirkungen erforderlich. Aus dem Statusbericht kann abgeleitet werden, dass die hierfür erforderlichen Arbeiten machbar und durchführbar sind.

Bezüglich der Definition von Betriebszuständen ergibt sich noch eine Empfehlung. Die Einstufung von Betriebszuständen ist innerhalb des Statusberichts nicht durchgehend eindeutig. Im Abschnitt 4.6.1 des Statusberichts wird hierzu eine Klassifikation abgeleitet, die sich an den Vorgaben der IAEA und der WENRA orientiert (vgl. [Kapitel 3\\_2.1.2](#)), die jedoch im weiteren Bericht nicht mehr aufgegriffen wird. Im Abschnitt 8.2.1 werden hingegen Betriebszustände abgeleitet, die neben dem Normalbetrieb (normal operating conditions) mit den Zuständen „upset conditions“, „emergency conditions“ und „faulted conditions“ bezeichnet werden. Wir empfehlen eine einheitliche Vorgehensweise bei der Klassifizierung der Ereignisse, für die sich eine möglichst gute Übereinstimmung mit den Anforderungen der SiAnf herstellen lässt.

## 4 Standort

---

Da auf bestehende Infrastrukturen am Standort eines ehemaligen Kernkraftwerks zurückgegriffen werden soll, ist es vor einer Konkretisierung sinnvoll zu überprüfen, ob und in welchem Umfang die Benutzung bestehender Infrastrukturen zielführend ist. Eine solche Sinnfälligkeit kann beispielsweise bei bereits zur Verfügung stehenden Infrastruktureinrichtungen, wie dem Netzanschluss, der Kühlwasserversorgung, der Anlagensicherung und den Notstromgeneratoren, gegeben sein.

Inwieweit bestehende Gebäude genutzt werden können, ist unter verschiedenen Aspekten zu prüfen. Einen Aspekt stellen die Maße der geplanten Einrichtungen dar, sofern diese in bestehende Gebäude eingebaut werden sollen. So ist beispielsweise laut Statusbericht für die Einrichtungen der START-Anlage eine Höhe von insgesamt 65 Metern vorgesehen. Eine solche Anlage würde nicht in den bestehenden Sicherheitsbehälter des gewählten Kernkraftwerks passen, da dessen Höhe geringer ist. Weitere Prüfpunkte ergeben sich hinsichtlich des Strahlenschutzes, der Erfüllbarkeit der Anforderungen an die Gebäude durch die bestehenden Bauten sowie der Verträglichkeit des Vorhabens mit den Vorgaben für den Abbau der bestehenden Kernkraftwerke.

Insofern wäre zunächst allgemein zu überprüfen, welche bestehenden Infrastruktureinrichtungen mit welchem Aufwand weiter genutzt werden können. Für diese könnte in einem zweiten Schritt eine Überprüfung bestehender Analysen angedacht werden.

## 5 Fazit und erste Einschätzung zur Machbarkeit

---

Auf der Basis des Statusberichts, der die grundsätzliche Machbarkeit, das Design und die Sicherheitsaspekte von START darstellt, wurde der Bau einer Anlage auf dem Gelände eines ehemaligen deutschen Kernkraftwerks insbesondere im Hinblick auf die Einhaltung der deutschen Sicherheitsanforderungen und -prinzipien bewertet. Diese Einrichtung soll primär dazu dienen, hochradioaktive Abfälle durch Transmutation umweltfreundlich und kosteneffizient zu entsorgen.

Im Ergebnis stellt der Statusbericht ein Sicherheitskonzept vor, das große Übereinstimmungen mit den deutschen Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (SiAnf) aufweist. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass die verwendeten internationalen Regelwerke vergleichbare sicherheitstechnische Ansätze wie das deutsche Regelwerk verfolgen. Der Bericht beschreibt ein gestaffeltes Sicherheitskonzept, das verschiedene Sicherheitsebenen, eine Ableitung von Sicherheitsfunktionen zur Erreichung von Sicherheits- und Schutzzielen sowie ein Redundanzkonzept umfasst. Es sollen ferner passive Sicherheitssysteme bevorzugt werden. Zum Nachweis sind führend deterministische und ergänzend auch probabilistische Sicherheitsbewertungen vorgesehen.

Es gibt jedoch auch einige Unterschiede zwischen Konzept und Anforderungen. Diese Darstellungen müssen weiter ausdifferenziert werden, um den deutschen Anforderungen vollständig zu entsprechen. Dazu gehören die Definition der Sicherheitsebenen, das Redundanzkonzept, die Klassifizierung von Ereignissen und Sicherheitsnachweisen sowie der Schutz gegen Einwirkungen von innen und außen. Dennoch ist aus dem Bericht ableitbar, dass die Anforderungen der SiAnf grundsätzlich auf die START-Anlage anwendbar sind und diese auch grundsätzlich erfüllt werden können.

Diese prinzipielle Aussage, wonach das Projekt durchführbar ist, es aber noch einiger detaillierter Ergänzungen mit durchaus Arbeitsaufwand bedarf, zeigt sich auch in den von uns exemplarisch bewerteten Aussagen des Statusberichts zu zwei Schutzzielen.

Zu den Kühlsystemen ist festzustellen, dass sich die Detailauslegung noch in Arbeit befindet, weshalb eine vollständige Bewertung der Erfüllung der SiAnf derzeit nur übergeordnet möglich ist. Die Zuverlässigkeit des Primärkühlsystems und die Integrität des den Reaktorbehälter umgebenden Sicherheitsbehälters sind zentrale Punkte, die weiterhin detailliert geprüft werden müssen. Die Anforderungen der SiAnf, insbesondere hinsichtlich passiver Sicherheitseinrichtungen bei der Wärmeabfuhr, sind grundsätzlich erfüllbar, bedürfen jedoch weiterer konkreter Planungen.

Zur Auslegung des Reaktorkerns und seiner Abschalteinrichtungen formulieren die SiAnf spezifische Anforderungen, um die Kontrolle der Reaktivität über alle Sicherheitsebenen und Betriebsphasen hinweg zu gewährleisten. Der Reaktorkern muss inhärente Rückkopplungseigenschaften aufweisen, die schnelle Reaktivitätsanstiege abfangen und die Einhaltung der sicherheitstechnischen Nachweisziele sicherstellen. Ein Schnellabschaltsystem ist erforderlich, das den Reaktor unter allen Bedingungen schnell und dauerhaft unterkritisch halten kann. Dies ist für START durch die unterkritische Anordnung des Kerns und die Abschaltung des Beschleunigers gegeben. Die aktuelle Auslegung der START-Anlage erfüllt die vorgenannten Anforderungen konzeptionell, jedoch sind auch hier weitere Detailanalysen und Nachweise zur endgültigen Bewertung der Wirksamkeit und Zuverlässigkeit der Sicherheitssysteme notwendig. Die Anforderungen an eine diversitäre Abschalteinrichtung sind noch nicht erfüllt und die Kontrolle der Reaktivität bei der Lagerung und Handhabung von Brennelementen muss noch detailliert nachgewiesen werden. Eine passive Funktionsweise der Abschaltsysteme kann nicht durchgehend festgestellt werden, da auch bei dem unterkritischen Reaktor für die Funktion der Abschaltung eine aktive Abschaltung des Beschleunigerstrahls erforderlich ist. Die bislang vorgelegten Analysen reichen nicht aus, um unter den Randbedingungen des deutschen Regelwerks die Zulässigkeit des Konzeptes zu zeigen.

Der Statusbericht behandelt ferner wesentliche Ereignisse einer nuklearen Einrichtung mit Reaktor. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die hierfür relevanten Ereignislisten aus dem Anhang 2 der SiAnf nicht direkt übertragbar sind, da die START-Anlage spezifische Unterschiede aufweist. Dies ist z. B. ein bleigekühlter, druckloser Reaktor mit unterkritischer Kernanordnung. Der Bericht erfasst vor diesem Hintergrund sinngemäß die relevanten Ereignisse aus dem Anhang 2 der SiAnf, einschließlich Störungen am Beschleunigerstrahl und Ausfällen der Reaktorabschaltung. Zusätzliche Ereignisse und Einwirkungen von innen und außen (Anhang 3 der SiAnf), wie anlageninterne Brände oder Erdbeben, sind noch zu analysieren. Hierbei kann in Erwägung gezogen werden, bestehende Analysen zum gewählten KKW-Standort sowie zu bestehenden und ggf. weitergenutzten Infrastrukturen zu prüfen und gegebenenfalls zu verwenden. Die bislang im Bericht enthaltenen Ereignisanalysen sind bisher nur ansatzweise dargestellt und bedürfen weiterer Ausarbeitung und Ergänzung, um die Anforderungen des deutschen Regelwerks vollständig zu erfüllen. Solche Tätigkeiten sehen wir auf Basis der vorgelegten Inhalte als leistbar an.

Damit ergibt sich folgendes Fazit: Der Statusbericht zeigt, dass das Sicherheitskonzept der START-Anlage grundsätzlich mit den deutschen Sicherheitsanforderungen in Übereinstimmung gebracht werden kann, jedoch sind weitere Ausarbeitungen und Detaillierungen notwendig. Wie die exemplarischen Betrachtungen der Kühlsysteme, der Reaktorkernauslegung und der Ereignisanalysen gezeigt haben, bedarf es weiterer konkreter Planungen und Analysen. Es haben sich keine Aspekte gezeigt, die eine Durchführung des Projektes unmöglich erscheinen lassen. Es erfordert aber noch nicht unerheblichen Arbeitsaufwand zur vollständigen Erfüllung der regulatorischen Anforderungen.

## 4 Genehmigungsrechtliche Rahmenbedingungen

|                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1 Einleitung und Fragestellung</b>                                               | <b>135</b> |
| <b>2 Analyse der genehmigungsrechtlichen Rahmenbedingungen</b>                      | <b>135</b> |
| 2.1. Aussagen des Grundgesetzes zur Nutzung der Technologie                         | 135        |
| 2.2. Genehmigung des Vorhabens als kerntechnische Anlage nach § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG | 137        |
| ANLAGENGENEHMIGUNGSREGIME VON ATG UND STRLSCHG                                      | 137        |
| GENEHMIGUNGSRECHTLICHE EINORDNUNG DER EINZELNEN BESTANDTEILE DES VORHABENS          | 137        |
| AUSSCHLUSSTATBESTÄNDE DES ATG                                                       | 143        |
| UMFANG DER KERntechnischen ANLAGE                                                   | 145        |
| GENEHMIGUNGSVORAUSSETZUNGEN DES § 7 ABS. 2 ATG                                      | 148        |
| NOTWENDIGKEIT DER NEUENTWICKLUNG VON NACHWEISEN FÜR DAS ERSTGENEHMIGUNGSVERFAHREN   | 149        |
| BEACHTUNG ANDERER VORSCHRIFTEN NACH § 14 ATVFV                                      | 153        |
| RECHTSFOLGE: DURCH VERSAGUNGSMERKMEN BESCHRÄNKTER ANSPRUCH                          |            |
| AUF ERTEILUNG EINER GENEHMIGUNG                                                     | 153        |
| 2.3. Notwendigkeit weiterer atom- oder strahlenschutzrechtlicher Genehmigungen?     | 154        |
| BIS ZUM ABSCHLUSS DER REZYKLIERUNG KEINE WEITEREN ATOMRECHTLICHEN                   |            |
| GENEHMIGUNGSERFORDERNISSE                                                           | 154        |
| IM GRUNDSATZ KEINE EIGENSTÄNDIGEN STRAHLENSCHUTZRECHTLICHEN                         |            |
| GENEHMIGUNGEN ERFORDERLICH                                                          | 155        |
| 2.4. Sonstige fachrechtliche Genehmigungserfordernisse                              | 156        |
| IMMISSIONSSCHUTZRECHTLICHE GENEHMIGUNGSERFORDERNISSE                                | 156        |
| SONSTIGE GENEHMIGUNGSERFORDERNISSE                                                  | 157        |
| 2.5. Relevanz der Entsorgungsarchitektur für radioaktive Abfälle in Deutschland     | 157        |
| PFLICHT ZUR DIREKTEN ENDLAGERUNG ABGEBRANNTER BRENNNELEMENTE NACH § 9A ABS. 1 ATG   | 157        |
| MAßGABEN DES NATIONAL ENTSORGUNGSPROGRAMMS (NEP)                                    | 160        |
| 2.6. Ergänzende Vorgaben des Völker- und Unionsrechts                               | 161        |
| <b>3 Voraussetzungen der Nachnutzung von Einrichtungen früherer KKW</b>             | <b>162</b> |
| 3.1. Bedeutung der Übernahme für die Genehmigungsfähigkeit des START-Moduls         | 162        |
| 3.2. Möglichkeit der Übergabe von Einrichtungen und Anlagenteilen durch Betreiber   | 163        |
| RECHTSRAHMEN BEI STILLLEGUNG UND ABBAU VON KKW                                      | 163        |
| MÖGLICHER GESTALTUNGSSPIELRAUM FÜR DIE ÜBERGABE VON EINRICHTUNGEN UND ANLAGENTEILEN | 164        |
| 3.3. Ergebnis                                                                       | 166        |
| <b>4 Finanzierung des Vorhabens durch den KENFO</b>                                 | <b>167</b> |
| 4.1. Indirekte Finanzierung durch Erstattung von Entsorgungskosten                  | 167        |
| KOSTEN DER UMWANDLUNG IN START ALS ENTSORGUNGSKOSTEN I.S.D. ENTSORGFONDSG           | 167        |
| UMWANDLUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE ALS ENTSORGUNGSKOSTENREDUZIERENDE MASSNAHME         | 169        |
| ERGEBNIS                                                                            | 170        |
| 4.2. Direkte Finanzierung durch KENFO                                               | 170        |
| BINDUNG DES KENFO AN ANLAGEGRUNDSÄTZE UND -KLASSEN                                  | 170        |
| BEWERTUNG DER VORGABEN ZUR ANLAGE DES FONDS-VERMÖGENS                               | 171        |
| ERGEBNIS                                                                            | 171        |
| <b>5 Ergebnisse</b>                                                                 | <b>171</b> |
| 5.1. Änderung gesetzlicher Ausschlusstatbestände                                    | 171        |
| 5.2. Weiterer rechtlicher Anpassungsbedarf                                          | 172        |

## 1 Einleitung und Fragestellung

Das folgende Kapitel befasst sich mit rechtlichen Fragen der Umsetzbarkeit der beschleunigergetriebenen Neutronenquelle einschließlich Recyclinganlage (im Folgenden zusammen: START oder „das Vorhaben“). Zunächst erfolgt eine Analyse des geltenden atom- und strahlenschutzrechtlichen Genehmigungsrahmens. Hierbei wird auch die bestehende Entsorgungsarchitektur für hochradioaktive Abfälle betrachtet, soweit sie für Genehmigung und Betrieb des Vorhabens relevant ist.<sup>76</sup> Sodann erfolgt eine Darstellung der öffentlich-rechtlichen Voraussetzungen für die angestrebte Nachnutzung von Einrichtungen eines Kernkraftwerks (KKW). Schließlich wird untersucht, ob und inwieweit eine Finanzierung durch den Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung (KENFO) in Betracht kommt.

## 2 Analyse der genehmigungsrechtlichen Rahmenbedingungen

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für das Vorhaben ergeben sich aus dem nationalen Recht – dort insbesondere dem Atom- und Strahlenschutzrecht – sowie völkerrechtlichen und europäischen Vorgaben.

Das Atom- und Strahlenschutzrecht enthält in den maßgeblichen Gesetzen des Atomgesetzes (AtG) und des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG) verschiedene Genehmigungstatbestände. Teils knüpfen diese an die Errichtung und den Betrieb einer Anlage an, teils dagegen an die Aufnahme einer Tätigkeit in Bezug auf radioaktive Stoffe. Einige insbesondere der anlagenbezogenen Genehmigungstatbestände schließen Tätigkeiten mit ein, die für sich genommen einer eigenständigen Genehmigung bedürften. Daher ist von besonderer Bedeutung, welchen Genehmigungstatbeständen das Vorhaben unterfällt. Zuvor werden jedoch die Aussagen, die das Grundgesetz in der Auslegung des Bundesverfassungsgerichts (BVerfG) zur zivilen Nutzung der Kerntechnik trifft, dargestellt. Schließlich wird das internationale Regelungsgeflecht daraufhin untersucht, inwieweit es für die Genehmigungsfähigkeit des Vorhabens relevante Aussagen enthält.

### 2.1.

#### Aussagen des Grundgesetzes zur Nutzung der Technologie

Das Grundgesetz enthält als Verfassung keine unmittelbaren Vorgaben zur Genehmigungspflichtigkeit und -fähigkeit von Anlagen, seien sie kerntechnischen oder sonstigen Charakters. Dies bleibt dem Fachrecht in Form von parlamentarischen Gesetzen, Verordnungen oder technischen Regelwerken vorbehalten. Dennoch lassen sich dem Grundgesetz und insbesondere seiner Interpretation durch das BVerfG grundlegende Aussagen zur zivilen Nutzung der Kerntechnik entnehmen. Das Fachrecht und dessen Anwendung durch Genehmigungsbehörden und Gerichte müssen sich innerhalb der vom Grundgesetz gezogenen Grenzen bewegen.

Das Grundgesetz selbst erwähnt die Kerntechnik lediglich bei der Regelung der Kompetenzen. Art. 73 Abs. 1 Nr. 14 GG weist dem Bund insoweit die ausschließliche Gesetzgebung zu. Das BVerfG hat früh entschieden, dass das **Grundgesetz** die **zivile Nutzung** der Kernenergie deshalb grundsätzlich **billigt**.<sup>77</sup> Zu beachten ist allerdings, dass die Frage, ob und unter welchen Umständen der Gesetzgeber die Nutzung der Kernenergie ermöglicht, grundsätzlich eine politische ist.<sup>78</sup> In welchem Umfang kerntechnische Anlagen in Deutschland errichtet und betrieben werden können, unterliegt damit dem gesetzgeberischen Gestaltungswillen und ist nicht verfassungsrechtlich vorentschieden.

Entscheidet sich der Gesetzgeber für die Zulässigkeit der zivilen Nutzung der Kernenergie, so verpflichten ihn die Grundrechte der Bevölkerung, insbesondere Art. 2 Abs. 2 Satz 1 GG sowie die Staatszielbestimmung des Art. 20a GG nach der Rechtsprechung des BVerfG, ein hohes Maß an Sicherheit zu gewährleisten. Nach Ansicht des BVerfG übernehme der Staat durch die Zulassung kerntechnischer Anlagen eine Mitverantwortung für die von ihnen ausgehenden Gefährdungen. Deshalb seien an ihre Genehmigung keine weniger strengen Anforderungen zu stellen als an staatliche Eingriffsgesetze.<sup>79</sup>

Der Gesetzgeber genügt seinen Schutzpflichten, wenn er von Anlagenbetreibern ein Schutzniveau fordert, mit dem der Eintritt von Schäden auf Grundlage des Stands von Wissenschaft und Technik praktisch ausgeschlossen werden kann. Es ist dagegen keine *absolute* Sicherheit erforderlich: „*Ungewissheiten jenseits dieser Schwelle praktischer Vernunft haben ihre Ursache in den Grenzen des menschlichen Erkenntnisvermögens; sie sind unentrinnbar und insofern als sozial-adäquate Lasten von allen Bürgern zu tragen.*“<sup>80</sup>

Es kann festgehalten werden, dass das Grundgesetz die zivile Nutzung der Kernenergie weder verbietet noch fordert. Entscheidet sich der Gesetzgeber dafür, die Nutzung der Kernenergie zu ermöglichen, so hat er die Pflicht, ein hohes Schutzniveau der Anlagen zu gewährleisten, ohne dass die Anforderungen jegliches Risiko mit absoluter Gewissheit ausschließen müssten.

Die bisherige Rechtsprechung ist insbesondere in Auseinandersetzung mit Kernkraftwerken entstanden. Sie behält aber auch für die Nutzung anderer Technologien, die auf Kernspaltung beruhen, ihre Aussagekraft, sofern diese hinsichtlich der von ihnen ausgehenden Risiken vergleichbar sind. Das Grundgesetz steht damit der Nutzung der Transmutationstechnologie nicht entgegen. Dem Gesetzgeber kommt bei deren Regulierung jedoch ein **erheblicher Gestaltungsspielraum** zu. Für die einfachrechtliche Zulassung der Technologie durch den Gesetzgeber kann dabei entscheidend sprechen, dass die Technologie zwar im Umgang mit radioaktiven Abfällen selbst risikobehaftet, ihr Ziel aber auf die Entsorgung dieser Abfälle gerichtet ist. Dadurch strebt sie die **Bewältigung der auch nach Beendigung der Nutzung der Kernenergie zur Elektrizitätserzeugung weiterbestehenden Risiken** an. Die Technologie kann zur Reduzierung sowohl der Menge der angefallenen Abfälle als auch der Langlebigkeit der verbleibenden Radioaktivität beitragen. Insofern dient die Technologie dem **Ziel des Art. 20a GG**, die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen, sowie dem grundrechtlich verankerten **Schutz der Bevölkerung**. Sie könnte daher durch den Gesetzgeber aufgrund des Gestaltungsspielraums, der ihm bei der Umsetzung seiner Schutzpflichten zukommt, gefördert werden. Aufgrund der Langlebigkeit der bereits angefallenen Abfälle ist dabei auch von Belang, dass Art. 20a GG den Schutz der Lebensgrundlagen insbesondere mit Blick auf die künftigen Generationen fordert und die aus Art. 2 Abs. 2 Satz 1 GG folgenden Schutzpflichten auch zugunsten künftiger – auch ungeborener – Generationen bestehen.<sup>81</sup>

## 2.2.

## Genehmigung des Vorhabens als kerntechnische Anlage nach § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG

Für den Umgang mit radioaktiven Stoffen sind in erster Linie das AtG sowie das StrlSchG einschließlich der zu ihnen erlassenen Verordnungen und technischen Regelwerke maßgeblich.

### ANLAGENGENEHMIGUNGSREGIME VON ATG UND STRLSCHG

Das **AtG** bildet das **Stammgesetz** für die Regulierung der zivilen Nutzung von Kernenergie. Es enthält insbesondere **Genehmigungstatbestände** für verschiedene Arten der Nutzung, die im Regelfall an das Vorliegen gesetzlich näher definierter Kernbrennstoffe geknüpft sind (dazu unter [4\\_2.2.2.](#)). Die unterschiedlichen Genehmigungstatbestände beziehen sich teils lediglich auf den Umgang mit Kernbrennstoffen, wie etwa die Vorschrift zur Lagerung von Kernbrennstoffen in § 6 AtG, teils auf den Umgang mit ihnen in sogenannten kerntechnischen Anlagen, wie der zentrale Genehmigungstatbestand des § 7 AtG.

Das **Strahlenschutzrecht** bildet insbesondere seit der Einführung des StrlSchG ein eigenständiges Rechtsgebiet, dessen Anwendungsbereich über die Konkretisierung atomrechtlicher Regelungen hinausgeht.<sup>82</sup> Im Zusammenhang mit der Nutzung der Kernenergie ist es insbesondere insoweit relevant, als die Regelungen des StrlSchG und der dazu erlassenen Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) atomrechtliche (Genehmigungs-)Anforderungen konkretisieren. Das StrlSchG enthält daneben auch eine Reihe anlagen- und handlungsbezogener Genehmigungstatbestände. Sie sind allerdings grundsätzlich **gegenüber** den Genehmigungstatbeständen des **AtG nachrangig**. Denn gemäß § 5 Abs. 2 Satz 3 StrlSchG gelten kerntechnische Anlagen nicht als Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung i.S.d. StrlSchG. Bei den kerntechnischen Anlagen wiederum handelt es sich gemäß § 5 Abs. 18 StrlSchG insbesondere um solche Anlagen, die einer (Anlagen-)Genehmigung nach § 7 Abs. 1 AtG bedürfen (§ 2 Abs. 3a Nr. 1 AtG).<sup>83</sup> Daher sind für die Genehmigung des Vorhabens, in dem vorrangig mit Kernbrennstoffen umgegangen wird (dazu [4\\_2.2.2.](#)), in erster Linie die Genehmigungstatbestände des AtG einschlägig.

### GENEHMIGUNGSRECHTLICHE EINORDNUNG DER EINZELNEN BESTANDTEILE DES VORHABENS

Der zentrale Genehmigungstatbestand für Anlagen ist § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG. Das Vorhaben ist nach § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG genehmigungsbedürftig, sofern es sich mindestens einem der dort genannten **Anlagentypen** zurechnen lässt. Diese werden jeweils durch eine Handlung beschrieben, die zugleich den **Anlagenzweck** charakterisiert (Erzeugung, Bearbeitung, Verarbeitung und Spaltung von Kernbrennstoffen, Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe).

Auf Grundlage von § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG können ortsfeste Anlagen zur Erzeugung, Bearbeitung, Verarbeitung oder Spaltung von Kernbrennstoffen ebenso wie ortsfeste Anlagen zur Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe eine Errichtungs- und Betriebsgenehmigung erhalten. Spezialregelungen für die Genehmigung von Transmutationsanlagen bestehen daneben nicht. Es zeigt sich jedoch, dass die in § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG verwendeten Begrifflichkeiten auch das Vorhaben erfassen können. Seine einzelnen Bestandteile unterfallen in unterschiedlichem Umfang den in der Norm abgebildeten Zwecken. Da es sich um ein **komplexes Vorhaben** handelt, das aus verschiedenen **Baugruppen** besteht, werden die einzelnen Bestandteile des Gesamtvorhabens zunächst getrennt daraufhin untersucht, inwiefern sie den in § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG genannten Handlungen dienen.

**Umgang mit Kernbrennstoff: Anwendungsbereich des AtG eröffnet** - Sämtliche von § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG erfassten Anlagentypen dienen dem Umgang mit Kernbrennstoffen. Die **Verwendung von Kernbrennstoffen** ist damit die **zentrale Voraussetzung** für die Anwendung der atomrechtlichen Genehmigungstatbestände.

Der Begriff des Kernbrennstoffs wird in § 2 Abs. 1 Satz 2 AtG sowie § 3 Abs. 1 Satz 2 StrlSchG gleichlautend gesetzlich definiert. Die dortige Aufzählung an Stoffen, die als Kernbrennstoffe gelten, orientiert sich stark an der Zusammensetzung von Brennelementen, die für herkömmliche Kernreaktoren genutzt wurden.<sup>84</sup> Nach § 2 Abs. 1 Satz 2 AtG gehören zu den Kernbrennstoffen Plutonium-239, Plutonium-241 sowie mit den Isotopen U-235 oder U-233 angereichertes Uran.<sup>85</sup> Zudem ist jeder Stoff, der jedenfalls eine der genannten Isotopenarten enthält, Kernbrennstoff. Dasselbe gilt für Stoffe, die eine kritische Reaktion ermöglichen können und in einer Verordnung ausdrücklich benannt werden. Eine solche Verordnung existiert derzeit allerdings nicht.

Bei dem für das Vorhaben als Ausgangsmaterial verwendeten abgebrannten Uran- und MOX-Brennelementen handelt es sich ohne Weiteres um Kernbrennstoffe, auch wenn sie nicht mehr zur Verwendung in herkömmlichen Kernkraftwerken geeignet sind. Denn auch abgebrannte Brennelemente stellen Kernbrennstoffe i.S.d. AtG dar.<sup>86</sup> Aber auch die im Anschluss an die Partitionierung herzustellenden Brennelemente, die transmutiert werden sollen, sind Kernbrennstoffe. Sollte zunächst Brennstoff auf Uranbasis verwendet werden, wäre der Kernbrennstoffbegriff schon deshalb erfüllt, weil für die Brennelementefertigung das bei der Partitionierung abgetrennte (angereicherte) Uran verwendet werden würde. Auch bei der Verwendung thoriumbasierten Brennstoffs wird der Kernbrennstoffbegriff des AtG erfüllt, da das Vorhaben auch der Transmutation von Plutonium dienen soll. Hinzu kommt, dass auch thoriumbasierte Brennelemente das Isotop Uran-233 in für den Anreicherungs-begriff hinreichender Menge enthalten werden. Das Vorhaben fällt damit in den Anwendungsbereich des (§ 7) AtG.

#### **Spaltung von Kernbrennstoffen i.S.d. § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG innerhalb des Transmutationsreaktors**

- Einen wesentlichen Bestandteil des Vorhabens stellt der Transmutationsreaktor als Teil der Neutronenquelle dar. Die Tatbestandsvariante der Spaltung von Kernbrennstoffen erfasst nicht nur herkömmliche Kernreaktoren, wie sie etwa in Kernkraftwerken verwendet werden, sondern sämtliche Anlagen, in denen Atomkerne aus Kernbrennstoffen gespalten werden: „Unter Reaktoren versteht man Anlagen, in welchen Kernbrennstoffe gespalten werden.“<sup>87</sup>

Der Reaktor dient der **Spaltung von Kernbrennstoffen**. Die Atome der in den Brennelementen vorliegenden Transurane werden durch Neutronenbeschuss, der initial aus dem Auftreffen des Protonenstrahls auf das Spallations-Target entsteht, gespalten. Das gilt auch insoweit, als auch andere Transurane als Plutonium gespalten werden sollen, da sie durch die Mischung mit angereichertem Uran sowie Plutonium-239/241 gemäß § 2 Abs. 1 Satz 2 Nr. 3 AtG ebenfalls in den Kernbrennstoffbegriff mit einbezogen sind.

Bei der Transmutation laufen neben den Spaltungsprozessen auch **Neutroneneinfangsprozesse** ab, welche sich insbesondere für die Transmutation von Spaltprodukten zunutze gemacht werden sollen. Soweit dadurch allerdings auch Nuklide entstehen würden, die ihrerseits dem Kernbrennstoffbegriff unterfallen, käme in Betracht, dass der Reaktor nicht nur der Spaltung, sondern auch der Erzeugung von Kernbrennstoffen dienen könnte. Dies wurde jedenfalls bei den Reaktoren vom Typ „Schneller Brüter“ angenommen, bei denen Plutoniumisotope „erbrütet“ wurden.<sup>88</sup>

Auf START lässt sich dies allerdings nicht übertragen. Der Unterschied zu den „Schnellen Brütern“ besteht darin, dass deren Zweck gerade darin lag, Plutonium zu erzeugen, um es weiter zu verwenden. Der hiesige Reaktor dient dagegen der Beseitigung von Transuranen, nicht deren Gewinnung. Er stellt daher – für sich genommen – keine Anlage zur Erzeugung von Kernbrennstoffen, d.h. keine auf die Erzeugung von Kernbrennstoffen ausgerichtete Anlage dar. Davon abgesehen geht auch die herkömmliche Kernspaltung in Leichtwasserreaktoren typischerweise mit Neutroneneinfangsprozessen einher, ohne dass dies ihren Charakter als Anlage zur Spaltung von Kernbrennstoffen berühren oder dazu führen würde, sie auch als Anlagen zur Erzeugung von Kernbrennstoffen anzusehen.<sup>89</sup>

**Einordnung des Teilchenbeschleunigers** - Der Reaktor soll durch einen Teilchenbeschleuniger angetrieben werden. Teilchenbeschleuniger stehen für sich genommen in keinem Zusammenhang mit Kernbrennstoffen, sodass bei einer eigenständigen Betrachtung des Teilchenbeschleunigers die Genehmigungstatbestände des AtG nicht einschlägig wären. Vielmehr bestimmt sich die Genehmigung von eigenständigen Teilchenbeschleunigern nach den Vorschriften des StrlSchG. Bei dem für den Antrieb des Reaktors verwendeten Teilchenbeschleuniger handelt es sich allerdings um einen unselbstständigen Bestandteil des Vorhabens.

#### Errichtung eines Teilchenbeschleunigers nach § 10 Abs. 1 Nr. 4 und 5 StrlSchG

Nach § 10 Abs. 1 StrlSchG ist die Errichtung bestimmter Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung genehmigungspflichtig. Dazu gehören nach § 10 Abs. 1 Nr. 4 und 5 StrlSchG auch **Ionenbeschleuniger** mit einer Endenergie von entweder mehr als 10 MeV bei einer erreichbaren mittleren Strahlleistung von mehr als 50 W oder aber einer Endenergie von mehr als 150 MeV unabhängig der Strahlleistung. Der für das Vorhaben vorgesehene Teilchenbeschleuniger würde für sich genommen unter beide Varianten fallen. Der Beschleuniger soll Protonen beschleunigen. Dabei handelt es sich um positiv geladene Ionen, weshalb der Beschleuniger einen Unterfall des von § 10 Abs. 1 Nr. 4 und 5 StrlSchG erfassten Ionenbeschleunigers darstellt. Da die beschleunigten Protonen eine Energie von ca. 1 GeV aufweisen sollen und eine Strahlleistung von 10 MW angestrebt wird, werden auch die Leistungsschwellen der § 10 Abs. 1 Nr. 4 und 5 StrlSchG überschritten.

Für den Teilchenbeschleuniger wäre im Grundsatz daher eine Errichtungsgenehmigung nach § 10 Abs. 1 Nr. 4 und 5 StrlSchG erforderlich.

#### Betrieb eines Teilchenbeschleunigers nach § 12 Abs. 1 Nr. 1 StrlSchG

§ 10 StrlSchG regelt ausschließlich die Errichtung von Teilchenbeschleunigern, nicht jedoch deren Betrieb. Für den Betrieb bedarf es grundsätzlich einer eigenständigen Genehmigung.<sup>90</sup> Die Betriebsgenehmigung richtet sich nach § 12 Abs. 1 Nr. 1 StrlSchG. Sie ist nur bei solchen Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung nicht erforderlich, die entweder nach § 17 Abs. 1 Satz 1 StrlSchG lediglich anzeigepflichtig oder gemäß § 7 i.V.m. Anlage 3 Teil C StrlSchV verfahrensfrei gestellt sind. Beide Ausnahmen betreffen insbesondere leistungsschwache Anlagen und sind für den für das Vorhaben vorgesehenen Teilchenbeschleuniger daher soweit absehbar nicht einschlägig.

#### Teilchenbeschleuniger als unselbstständiger Teil einer kerntechnischen Anlage

Zu beachten ist jedoch, dass der für das Vorhaben verwendete Teilchenbeschleuniger dem Antrieb des Reaktors dient und keinen davon losgelösten eigenständigen Anlagenzweck aufweist. Dies hat Auswirkungen auf die erforderlichen Genehmigungen (dazu unten [4\\_2.3.2](#)).

**Partitionierung als Tätigkeit i.S.d. § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG** - Die Einrichtungen zur Partitionierung, die Teil der Recyclinganlage sind, dienen der Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe i.S.d. § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG. Weitere Varianten dieses Tatbestandes werden von ihnen ebenfalls erfüllt.

#### Begriff der Aufarbeitung im AtG

Die Einrichtungen zur **Partitionierung** unterfallen zunächst dem Begriff der **Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe** des § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG.

Unter einer Aufarbeitungsanlage ist eine Anlage zu verstehen, die der Trennung der in abgebrannten Brennelementen vorliegenden Stoffe in wiederverwertbare und als radioaktive Abfälle zu entsorgende Anteile dienen.<sup>91</sup> Diese Voraussetzungen werden von Partitionierungseinrichtungen erfüllt. Denn auch sie dienen der Aufspaltung der abgebrannten Brennelemente aus Leistungsreaktoren in verschiedene Ströme, wobei einige Anteile in einem Reaktor erneut gespalten werden, andere hingegen entsorgt werden sollen.

Anders als die bisher zur Wiederaufarbeitung eingesetzten Verfahren soll das Vorhaben kein hydro-, sondern ein **pyrochemisches Verfahren** verwenden. Dies ändert die rechtliche Bewertung jedoch nicht. § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG enthält keine Anhaltspunkte dafür, dass der Wiederaufarbeitungsbegriff auf herkömmlich verwendete technische Verfahren beschränkt ist. Vielmehr knüpft die **Vorschrift** an die Tätigkeit der Wiederaufarbeitung **unabhängig von** ihrer **technischen Umsetzung** an. Die ursprüngliche Gesetzentwurfsbegründung des AtG beschreibt zwar lediglich den bisher großindustriell allein verwendeten hydrochemischen Prozess. Dies ist aber nicht so zu verstehen, dass andere Wiederaufarbeitungsprozesse vom Anlagenbegriff des AtG ausgenommen werden sollten. Als übergeordnete Definition einer Wiederaufarbeitungsanlage verwendet die Begründung nämlich eine Formulierung, welche auch pyrochemische Wiederaufbehandlungsverfahren erfasst: „*Chemische Fabriken, in denen die in einem Reaktor der Bestrahlung ausgesetzten Kernbrennstoffe aufgearbeitet werden*“.<sup>92</sup>

#### Erfüllung weiterer Tatbestandsvarianten des § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG

Der Prozess der Partitionierung erfüllt des Weiteren die Tatbestandsvarianten der Bearbeitung, Verarbeitung und Erzeugung von Kernbrennstoffen. Die in § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG genannten **Tätigkeiten** stehen nicht trennscharf nebeneinander, sondern **überschneiden sich** teilweise. Dies dient dem Ziel, möglichst alle regelungsbedürftigen Kernanlagen zu erfassen. Nach der Rechtsprechung des Bundesverwaltungsgerichts (BVerwG) werden die Tatbestandsvarianten der Bearbeitung, Verarbeitung und Erzeugung von Kernbrennstoffen bei Anlagen, die der Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe dienen, daher stets ebenfalls erfüllt: „*Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe ist immer auch Bearbeitung und Verarbeitung von Kernbrennstoffen sowie Erzeugung neuer Kernbrennstoffe.*“<sup>93</sup> Das betrifft insbesondere auch den der eigentlichen Aufarbeitung vorausgehenden Verfahrensschritt der Konditionierung der abgebrannten Brennelemente durch Zerlegung. Dieser stellt eine Bearbeitung von Kernbrennstoffen dar.<sup>94</sup>

Weitergehende Rechtsfolgen sind mit dieser Mehrfachqualifikation allerdings nicht verbunden. Das AtG enthält derzeit keine Sonderbestimmungen über Anlagen zur Bearbeitung, Verarbeitung und Erzeugung von Kernbrennstoffen, die von denen für Aufarbeitungsanlagen abweichen oder über diese hinausgehen.

**Fertigung von Brennstoff als Tätigkeit i.S.d. § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG** - Die Fertigung von Brennelementen im Anschluss an die Partitionierung unterfällt ebenso wie die Partitionierung mehreren Tatbestandsvarianten des § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG.

#### Erzeugung von Kernbrennstoffen

Unter Anlagen zur **Erzeugung von Kernbrennstoffen** i.S.d. AtG verstand die Gesetzentwurfsbegründung vorwiegend (Uran-)Anreicherungsanlagen.<sup>95</sup> Dass derartige *vorbereitende* Einrichtungen Anlagen zur Erzeugung von Kernbrennstoffen darstellen, folgt aus dem technischen Kernbrennstoffbegriff des AtG. Weil schon das angereicherte Uran selbst Kernbrennstoff darstellt – und nicht erst ein Brennstab oder das fertige Brennelement –, dient der Anreicherungsprozess bereits der Erzeugung eines Kernbrennstoffs.

„Brennelementefabriken“ dagegen, in denen schon bestehende Kernbrennstoffe lediglich mechanisch, chemisch oder metallurgisch behandelt wurden, ohne dass sie zu neuen Stoffen zusammengesetzt wurden, unterlagen anders als jetzt ursprünglich nicht dem Genehmigungsregime des § 7 AtG. Vielmehr sah der Gesetzgeber in diesen Tätigkeiten lediglich eine Be- und Verarbeitung von Kernbrennstoffen, die seinerzeit allein nach dem Auffangtatbestand des § 9 AtG genehmigungsbedürftig war.<sup>96</sup>

Die bloße „Montage“ von Brennelementen ohne Herstellung eines Kernbrennstoffs i.S.d. AtG fällt daher nicht unter den Begriff der Erzeugung von Kernbrennstoffen. Er ist nur dann erfüllt, sofern in der Brennelementefertigung Ausgangsstoffe derart miteinander verbunden werden, dass sie einen einheitlichen Stoff darstellen, der jedenfalls eine der für den Kernbrennstoffbegriff prägenden Nuklidarten enthält. Das ist vorliegend jedenfalls insofern der Fall, als die für die Brennelemente herzustellenden Pellets (teils) aus mehreren Stoffen bestehen sollen, zu denen auch angereichertes Uran sowie Plutonium gehören werden.

#### Be- und Verarbeitung von Kernbrennstoffen

Davon abgesehen fallen Einrichtungen zur **Fertigung von Brennelementen** jedenfalls unter die Begriffe der **Be- und Verarbeitung von Kernbrennstoffen**, sofern mindestens ein verwendeter Ausgangsstoff ein Kernbrennstoff i.S.d. AtG ist.

Diese Begriffe haben bislang in Rechtsprechung und Literatur keine vertiefte Behandlung erfahren. Eine genaue Abgrenzung ist nach Ansicht des BVerwG aber auch weder möglich noch notwendig. Klarheit herrscht insoweit, als darunter jedenfalls die Fertigung von Brennelementen aus Kernbrennstoff zu verstehen ist.<sup>97</sup> Damit dienen die Einrichtungen zur Brennelementefertigung jedenfalls der Be- und Verarbeitung von Kernbrennstoffen.

#### Brennelementefertigung als Wiederaufarbeitung?

Das BVerwG hat in einer früheren Entscheidung angedeutet, dass die Fertigung von Brennelementen je nach Konfiguration der Anlage auch dem Begriff der Aufarbeitung von bestrahlten Kernbrennstoffen unterfallen kann, sofern die Brennelemente aus aufgearbeiteten Brennstoffen hergestellt werden. Danach sei die „*Erzeugung von neuen Brennelementen aus den durch Zerkleinerung der abgebrannten Elemente sowie deren Auflösung und Trennung gewonnenen Stoffen Plutonium und Uran [...] nur eine weiter fortgeschrittene Stufe der Aufarbeitung als die Vorstufe der bloßen Gewinnung der beiden Stoffe.*“<sup>98</sup> Übertrüge man diese Maßstäbe auf das Vorhaben, so fiel auch die Brennelementefertigung als Teil der Recyclinganlage unter den Begriff der Aufarbeitung.

**Verglasung als Bearbeitung und Aufarbeitung von Kernbrennstoff i.S.d. § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG** - Nach den dargestellten Maßstäben handelt es sich bei der Verglasung der verbleibenden Spaltprodukte um eine Bearbeitung von Kernbrennstoff. Sie dürfte als abschließender Verfahrensschritt zudem noch dem Begriff der Wiederaufarbeitung unterfallen.

#### Bearbeitung von Kernbrennstoff

Lediglich Spaltprodukte, die entweder kurzlebig sind oder auch nach Ende der mehrmaligen Rezyklierung noch verbleiben, sollen verglast werden. Zwar unterfallen Spaltprodukte nach ihrer Abtrennung von den Uran- oder Plutoniumnukliden nicht dem Kernbrennstoffbegriff des AtG. Allerdings stellt nach der Auffassung des BVerwG die **Verglasung** „*der nicht wiederverwertbaren hochradioaktiven Bestandteile der bestrahlten Kernbrennstoffe*“ zur Endlagerung eine Bearbeitung i.S.d. § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG dar.<sup>99</sup>

Dabei scheint es dem BVerwG nicht auf die exakte chemische Zusammensetzung der zu verglasenden Stoffe anzukommen, weshalb die Verglasung von Spaltprodukten auch dann eine Verarbeitung und Bearbeitung von Kernbrennstoffen darstellen dürfte, wenn die eigentlichen Kernbrennstoffe Uran und Plutonium – wie hier bei der Partitionierung – chemisch hinreichend rein abgetrennt werden. Das entspricht dem übergeordneten Ansatz des BVerwG, § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG so auszulegen, dass eine Tätigkeit nicht „zwischen die Begriffe“ fällt.<sup>100</sup>

#### Aufarbeitung von Kernbrennstoff

Selbst wenn man dementsgegen davon ausginge, dass die Verglasung chemisch hinreichend rein vorliegender Spaltprodukte keine Be- oder Verarbeitung von Kernbrennstoffen darstellte, würde dies nicht dazu führen, dass sie aus dem Anwendungsbereich des § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG fiele. Denn die Verglasung der aus der Partitionierung stammenden Abfälle dürfte als abschließender Verfahrensschritt der Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe zu bewerten sein und damit dieser von § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG erfassten Variante unterfallen. So bildet die Verglasung der nicht (mehr) in den Reaktor einsetzbaren Spaltprodukte den notwendigen Endpunkt der Aufarbeitung von Brennelementen in der Partitionierungsanlage. Ohne eine Verglasung der verbleibenden Spaltprodukte können die nach der Aufarbeitung verbleibenden Spaltprodukte nicht im Wege der Endlagerung entsorgt werden. Daher steht die **Verglasung** in einem engen **funktionalen Zusammenhang mit der Aufarbeitung**, weshalb sie rechtlich als Teilschritt der Aufarbeitung anzusehen sein dürfte.

Dieses Verständnis von Verglasung entspricht auch der behördlichen Bewertung der ehemaligen Verglasungseinrichtung Karlsruhe als Teil der dortigen Wiederaufarbeitungsanlage und damit dem maßgeblichen Präzedenzfall für Verglasungseinrichtungen in Deutschland. So wurde die dortige Errichtung der Verglasungseinrichtung rechtlich als Änderung einer Anlage zur Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe bewertet.<sup>101</sup> Dort heißt es auf S. 91 zudem: „Bei der VEK handelt es sich um einen ursprünglich geplanten Teil der WAK, der zwar spät gebaut, der aber [...] **zwingend als Betriebsteil der Wiederaufarbeitung anzusehen ist**, da die Verglasung des hochradioaktiven Flüssigabfallkonzentrats (HAWC) nur im Verbund mit der WAK möglich ist.“ Diese Wertung ist auf die vorliegend in Rede stehende Verglasungseinrichtung übertragbar.

**Zwischenergebnis** - Das Vorhaben lässt sich auf Basis des Genehmigungsregimes des § 7 AtG bewerten. Der für den Reaktor verwendete Brennstoff unterfällt dem Kernbrennstoffbegriff des AtG, da er angereichertes Uran enthalten wird. Das ist auch nach der Umstellung auf thoriumbasierte Brennstoffe der Fall. Hinzu kommt, dass auch die ebenfalls dem Kernbrennstoffbegriff unterfallenden Plutoniumnuklide 239 und 241 gespalten werden sollen. Damit ist die übergreifende Voraussetzung für die Eröffnung des Anwendungsbereichs von § 7 AtG erfüllt.

Die **Bestandteile des Vorhabens erfüllen sämtliche der in § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG genannten Tatbestandsvarianten**. So dient der Transmutationsreaktor der Spaltung von Kernbrennstoffen, die Partitionierungseinrichtungen – einschließlich der Verglasungseinrichtungen – dienen der Aufarbeitung, Verarbeitung und Bearbeitung von Kernbrennstoffen und die Einrichtungen zur Fertigung von Brennelementen deren Verarbeitung, Bearbeitung und Aufarbeitung.

Daher bedürfen Errichtung und Betrieb des Vorhabens der Genehmigung nach § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG. Errichtung und Betrieb des Teilchenbeschleunigers wären hingegen bei einer selbstständigen Errichtung nach § 10 Abs. 1 Nr. 4 und 5 sowie § 12 Abs. 1 Nr. 1 StrlSchG genehmigungspflichtig.

### AUSSCHLUSSTATBESTÄNDE DES ATG

Das AtG enthält jedoch eine Reihe von Ausschlussstatbeständen, die der Umsetzung von Teilen des Vorhabens derzeit entgegenstehen.

**Ausschluss einer Genehmigung nach § 7 Abs. 1 Satz 2 Alt. 1 AtG: Anlage „zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität“?** - § 7 Abs. 1 Satz 2 AtG enthält einen Versagungstatbestand für Neugenehmigungen bestimmter kerntechnischer Anlagen. Danach dürfen sowohl für die Errichtung und den Betrieb von Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität als auch für Anlagen zur Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe keine Genehmigungen erteilt werden.

Die Vorschrift schließt in ihrer ersten Alternative nicht die Genehmigung von Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen *per se* aus, sondern lediglich von Anlagen, die der **gewerblichen Erzeugung von Elektrizität** dienen. Er wäre daher von vornherein nicht einschlägig, wenn die bei der Umwandlung hochradioaktiver Abfälle entstehende thermische Energie nicht in Elektrizität umgewandelt werden würde.

Die **thermische Energie** könnte daher Dritten als Fernwärme zur Verfügung gestellt werden, ohne dass dieser Ausschlussstatbestand eingriffe. Sofern daneben ein Teil der Energie zur elektrischen Eigenversorgung der Anlage verwendet werden würde, würde dies den Ausschlussstatbestands ebenfalls nicht verwirklichen. Denn dann würde die Anlage zwar Elektrizität erzeugen, diese jedoch nicht vermarktet, sodass es an einer *gewerblichen* Erzeugung von Elektrizität mangeln würde.

Sollte **elektrische Energie** jedoch Dritten, insbesondere EVU, entgeltlich zur Verfügung gestellt werden sollen, wäre zur Gewährleistung der rechtssicheren Umsetzung des Vorhabens hingegen eine **Änderung des § 7 Abs. 1 Satz 2 AtG notwendig**. Anders als bei Kernkraftwerken, deren einziger Zweck in der Erzeugung von Elektrizität besteht, dient das Vorhaben zwar der Transmutation langlebiger hochradioaktiver Abfälle. Die dabei ohnehin und zwangsläufig anfallende Wärmeenergie, die technisch bewältigt werden muss, würde sich bei einer Einspeisung von Elektrizität lediglich zunutze gemacht, ohne dass dies den eigentlichen Zweck der Anlage darstellen würde. Daher kann die von § 7 Abs. 1 Satz 2 Alt. 1 AtG vorausgesetzte Ausrichtung der Anlage auf die gewerbliche Energieerzeugung („Anlagen [...] zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität“) bezweifelt werden. Da gesetzlich nicht näher definiert ist, unter welchen Voraussetzungen ein Reaktor der gewerblichen Erzeugung von Elektrizität dient, und ober- oder höchstgerichtliche Rechtsprechung zu dieser Frage nicht vorliegt, erscheint diese Auslegung für die Errichtung des Vorhabens jedoch nicht belastbar genug.

**Genehmigungsausschluss nach § 7 Abs. 1 Satz 2 Alt. 2 AtG für Anlagen zur Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe** - Der Genehmigung der Partitionierungseinrichtungen steht gegenwärtig § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG entgegen.

Die Vorschrift enthält neben dem dargestellten Ausschlussstatbestand für neue Kernreaktoren zur gewerblichen Elektrizitätserzeugung einen weiteren **Genehmigungsausschluss**. Nach Alternative 2 der Regelung werden unter der derzeit geltenden Rechtslage auch keine Neugenehmigungen für **Anlagen zur Aufarbeitung** bestrahlter Kernbrennstoffe erteilt. Dazu zählen jedenfalls die Partitionierungseinrichtungen einschließlich derjenigen zur Verglasung der verbleibenden Reststoffe.

Ambivalent sind die Anlagen zur Fertigung der Brennelemente im Anschluss an die Partitionierung zu bewerten. Grundsätzlich bestehen für die Neugenehmigung von Anlagen zur **Erzeugung, Bearbeitung und Verarbeitung von Kernbrennstoffen keine gesetzlichen Ausschlussstatbestände**. Der Ausschluss der Neugenehmigung von Anlagen der Kernspaltung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität und von Aufarbeitungsanlagen in § 7 Abs. 1 Satz 2 AtG wurde bewusst auf diese beiden Anlagenarten beschränkt und kann nicht erweiternd ausgelegt werden.<sup>102</sup>

Da nach der bisherigen Rechtsprechung des BVerwG die Fertigung von Brennelementen im unmittelbaren Anschluss an die Wiederaufarbeitung ebenfalls einen Bestandteil der Wiederaufarbeitung darstellen kann<sup>103</sup>, ist möglich, dass die Fertigungseinrichtungen auf Grundlage des Anlagendesigns des Vorhabens ebenfalls dem Wiederaufarbeitungsbegriff und damit dem Ausschlussstatbestand des § 7 Abs. 1 Satz 2 Var. 2 AtG unterworfen werden. Da die Vorschrift aber vor Umsetzung des Vorhabens ohnehin so geändert werden müsste, dass sie die Wiederaufarbeitung zum Zweck der Transmutationsanlagen nicht erfasst, wirkt sich diese Einordnung nicht maßgeblich auf die dem Vorhaben entgegenstehenden Ausschlussstatbestände aus.

**Verbot der Abgabe an Aufarbeitungsanlagen (§ 9a Abs. 1 Satz 2 AtG)** - Dem Vorhaben steht zudem das Verbot des § 9a Abs. 1 Satz 2 AtG entgegen. Danach ist die Ablieferung bestrahlter Brennelemente an Wiederaufarbeitungsanlagen verboten. Besitzer hochradioaktiver Abfälle wären daher unter der derzeitigen Rechtslage nicht berechtigt, diese der Betreibergesellschaft des Vorhabens zu überlassen (dazu unten [4\\_2.5.1](#)).

**Zwischenergebnis** - Bestandteile des Vorhabens unterfallen daher mehreren Verbotstatbeständen des AtG. So ist eine Genehmigung für eine Anlage, die gewerblich Elektrizität an Dritte liefert, derzeit nach § 7 Abs. 1 Satz 2 Alt. 1 AtG ausgeschlossen.

Der Genehmigung der Partitionierungseinrichtungen steht daneben nach derzeitiger Rechtslage § 7 Abs. 1 Satz 2 Alt. 2 AtG entgegen, der Neugenehmigungen für Anlagen zur Aufarbeitung von bestrahlten Kernbrennstoffen ausschließt. Auch ist es den Besitzern hochradioaktiver Abfälle nach § 9a Abs. 1 Satz 2 AtG nicht gestattet, diese an derartige Anlagen abzuliefern.

## UMFANG DER KERntechnischen ANLAGE

Das Genehmigungserfordernis des § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG erstreckt sich auf die **Anlage im rechtlichen Sinne**. Der Begriff wurde in der Rechtsprechung des BVerwG näher ausgestaltet. Der Umfang der Anlage kann für die rechtliche Bewertung des Vorhabens auch deshalb relevant sein, weil der Genehmigungstatbestand nach dem Zweck der Anlage bestimmt wird, wie an der Formulierung „Anlage zur Erzeugung [...]“ (Hervorhebungen diesseits) ersichtlich ist.

**Der Anlagenbegriff des § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG** - Sämtliche Genehmigungserfordernisse des § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG beziehen sich auf ortsfeste Anlagen. Die von der Vorschrift erfassten Anlagen stellen „kerntechnische Anlagen“ i.S.d. § 2 Abs. 3a Nr. 1 Buchst. a AtG dar.

Als Anlage i.S.d. AtG gilt nach der Rechtsprechung des BVerwG zunächst der sogenannte „**Anlagenkern**“, der einer der in der Vorschrift aufgeführten Varianten ortsfester kerntechnischer Anlagen entspricht, bei einem Kernkraftwerk etwa der Reaktor. Zu der Anlage zählen aber auch alle mit dem Anlagenkern in einem **räumlichen und betrieblichen Zusammenhang** stehenden Einrichtungen, die den gefahrlosen Betrieb der Anlage i.S.d. auf Erzeugung, Bearbeitung, Verarbeitung, Spaltung oder (Wieder)Aufarbeitung von Kernbrennstoffen gerichteten Arbeitsprozesses ermöglichen.<sup>104</sup> Maßgebend dafür, dass ein Anlagenbestandteil zum Teil einer kerntechnischen Anlage zählt, ist, ob er in einem **Zusammenhang mit dem nuklearspezifischen Gefahrenschutz** steht.<sup>105</sup>

Daher zählen alle Anlagenteile zur Anlage, von denen selbst ein unmittelbares nukleares Gefahrenpotential ausgeht. Darüber hinaus aber auch **Nebeneinrichtungen**, von denen deshalb eine nuklearspezifische Gefahr ausgehen kann, weil sie – wie etwa Außenzaunanlagen oder Wachgebäude – mittelbar in einem sicherheitstechnischen Zusammenhang zum Anlagenkern stehen. Nur Einrichtungen, die zwar in einem räumlichen und betrieblichen Zusammenhang zum Anlagenkern stehen, aber weder einen unmittelbaren noch einen mittelbaren Einfluss auf die Bewältigung nuklearspezifischer Gefahren haben, unterfallen nicht dem Anlagenbegriff des § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG.<sup>106</sup>

**Bedeutung der Vorhabenbestandteile für den Anlagenzweck** - Kerntechnische Anlagen sind typischerweise komplex. In ihnen laufen verschiedene Betriebsprozesse und Verfahrensschritte ab, die dem prägenden Verfahrensschritt der Anlage vor- oder nachgelagert sein können. Sofern solche Einrichtungen für sich genommen bereits einem der in § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG aufgeführten Zwecke der Erzeugung, Bearbeitung, Verarbeitung, Spaltung oder Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen dienen, stellt sich die Frage, ob sie als selbstständige Anlage zu betrachten sind und daher einer eigenständigen, von der Hauptanlage losgelösten Genehmigung bedürfen. Das wird vom BVerwG im Grundsatz verneint.<sup>107</sup>

Werden verschiedene Einrichtungen räumlich und betrieblich derart miteinander verbunden, dass sie einem **einheitlichen Zweck** dienen, so stellen sie grundsätzlich eine **einheitlich zu genehmigende Anlage** dar, selbst wenn die einzelnen Teile auch getrennt voneinander errichtet und betrieben werden könnten.<sup>108</sup> Dem steht nicht entgegen, dass § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG verschiedene Varianten kerntechnischer Anlagen unterscheidet. Die Varianten sind nicht so zu interpretieren, dass sie überschneidungsfrei nebeneinanderstünden und eine Einrichtung schon dann einer eigenständigen Genehmigung bedürfte, wenn sie für sich genommen unter eine der Varianten fällt. Das Gesetz nimmt vielmehr Überschneidungen zwischen den einzelnen Varianten auch innerhalb einer einheitlichen Anlage in Kauf.<sup>109</sup> Dementsprechend ist das BVerwG in der zitierten Entscheidung davon ausgegangen, dass sämtliche Einrichtungen einer Wiederaufarbeitungsanlage dem Anlagenzweck der „Aufbereitung von Kernbrennstoffen“ dienen, auch wenn sie für sich genommen anderen Varianten des § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG unterfielen.

**Einordnung des Vorhabens** - Obwohl die Maßstäbe zum Anlagenbegriff und -zweck anhand der etablierten kerntechnischen Anlagen entwickelt worden sind, können sie im Grundsatz auch auf neuartige und komplexere Anlagen wie das Vorhaben übertragen werden. Zum einen sieht § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG keinen abgeschlossenen Kanon kerntechnischer Anlagen vor. Zum anderen hat sich das BVerwG ausdrücklich mit Anlagen befasst, deren Bestandteile bereits für sich genommen einzelne der in § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG genannten Tatbestandsvarianten erfüllen würden. Das Vorhaben vereint mehrere dieser herkömmlich eigenständig errichteten Anlagentypen, nämlich neben dem beschleunigergetriebenen Reaktor (Neutronenquelle) zusätzlich die Einrichtungen der Recyclinganlage, bestehend aus der Partitionierung, der Fertigung von Brennelementen sowie der Verglasung von Reststoffen.

#### Räumlich-funktionaler Zusammenhang der Einrichtungen von START

Die **Neutronenquelle** aus Teilchenbeschleuniger und Transmutationsreaktor weist einen engen räumlich-funktionalen Zusammenhang auf. Beide sind aufeinander bezogen, da der Reaktor ohne den Teilchenbeschleuniger nicht unterkritisch ausgelegt werden könnte. Aus demselben Grund ist der Teilchenbeschleuniger für das nuklearspezifische Gefahrenpotenzial der Anlage bedeutsam.

Die Einrichtungen der **Recyclinganlage** (Partitionierung, Fertigung von Brennelementen und Verglasung) dienen für sich genommen in unterschiedlichem Umfang der Bearbeitung, Verarbeitung und Erzeugung von Kernbrennstoffen bzw. der Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe. Als solche würden sie jedenfalls bei einer räumlich und funktional getrennten Errichtung je eigenständige kerntechnische Anlagen i.S.v. § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG bilden. Vorliegend stehen sie aber in einem **funktional-räumlichen Zusammenhang** mit der Neutronenquelle. Sie sollen bewusst am selben Standort errichtet werden, um Transporte hochradioaktiver Abfälle auszuschließen und die im Standort-Zwischenlager ehemaliger Kernkraftwerke vorhandenen hochradioaktiven Abfälle umwandeln zu können. Das Konzept von START ist auf das Zusammenspiel der Komponenten ausgelegt und angewiesen. Eine Verwendung der partitionierten Abfallströme und gefertigten Brennelemente für Anlagen an anderen Standorten wird zudem nicht bezweckt.

Zu der kerntechnischen Anlage gehören zudem sonstige, nicht notwendigerweise kerntechnische Einrichtungen, die einen Bezug zur nuklearen Sicherheit der Anlage aufweisen. Dazu zählen etwa Schutzeinrichtungen wie Anlagenzäune oder Wachgebäude.

#### Relevanz des Anlagenzwecks für Annahme einer Gesamtanlage

Das BVerwG vertritt die Ansicht, dass Einrichtungen, die für sich genommen einem der in § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG aufgeführten Begriffe unterfallen, dann Teil einer Gesamtanlage sind, wenn sie neben einem räumlich-funktionalen Zusammenhang einen einheitlichen Betriebszweck aufweisen, der selbst einer der in der Vorschrift genannten Varianten entspricht.<sup>110</sup> Die Entscheidung bezog sich auf eine Wiederaufarbeitungsanlage im herkömmlichen Sinne, sodass dort angenommen wurde, sämtliche Einrichtungen dienten der Aufbereitung von Kernbrennstoffen. Das Vorhaben unterscheidet sich davon insofern, als bei den bisher existierenden kerntechnischen Anlagen die Prozesse der Aufarbeitung, Fertigung von Brennelementen und Kernspaltung typischerweise nicht in einer Gesamtanlage vereint werden. Dennoch liegt es nahe, dass sie einem einheitlichen Zweck dienen. Denn letztlich sind alle Einrichtungen der Anlage auf die Transmutation hochradioaktiver Abfälle ausgerichtet. Da diese im rechtlichen Sinne eine Spaltung von Kernbrennstoffen darstellt, ist anzunehmen, dass START eine **Gesamtanlage** zur Kernspaltung im Sinne von § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG darstellt und als solche einer atomrechtlichen Genehmigung bedarf.

Denkbar bleiben jedoch auch zwei abweichende rechtliche Bewertungen. Die Recyclinganlage könnte zum einen als rechtlich selbständig zu beurteilende Anlage zur Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe betrachtet werden. Dann bestünde das Vorhaben aus insgesamt zwei Anlagen: der beschleunigergetriebenen Neutronenquelle sowie der Recyclinganlage. Zum anderen kommt es in Betracht, zwar eine einheitliche Gesamtanlage anzunehmen, aber

davon auszugehen, dass diese nicht nur einem der in § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG beschriebene Zwecke dient, sondern mehreren Zwecken, insbesondere der Spaltung und der Aufbereitung von Kernbrennstoffen. Diese Betrachtungsweise wiche von der dargestellten Entscheidung, laut der es für das Vorliegen einer Gesamtanlage auf einen einheitlichen Anlagenzweck ankommt, ab.

Die besseren Argumente sprechen für das Vorliegen einer einheitlichen Gesamtanlage zur Spaltung von Kernbrennstoffen. Aufgrund der Neuartigkeit des Vorhabens bleibt insoweit jedoch Gestaltungsspielraum, der im weiteren Prozess mit der Genehmigungsbehörde auszuloten ist.

**Folgen der Bestimmung des Anlagenumfangs für die Ausschlusstatbestände des AtG** - START ist nach § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG genehmigungsbedürftig ist. Auch die Genehmigungsvoraussetzungen des § 7 Abs. 2 AtG sind von sämtlichen Anlagentypen zu wahren. In Betracht kommen jedoch Auswirkungen auf die Anwendbarkeit der Genehmigungsausschluss- und Verbotstatbestände des AtG.

Der Genehmigungsausschluss für die Neugenehmigung von Wiederaufarbeitungsanlagen gemäß § 7 Abs. 1 Satz 1 Alt. 2 AtG bezieht sich nach Wortlaut und Gesetzessystematik lediglich auf *selbständige* Wiederaufarbeitungsanlagen. Die Regelung verhält sich nicht zu der Frage, wie Anlagen zu beurteilen sind, deren unselbständige Teile den Aufarbeitungsbegriff erfüllen würden. Dies lässt hinsichtlich der Recyclinganlage, die den Aufarbeitungsbegriff erfüllt, nach vorzugswürdiger Ansicht aber keine eigenständige Anlage darstellen, Raum für eine Argumentation, wonach sie dem Neugenehmigungsverbot nicht unterliegt, da sie gerade keine eigenständige Aufarbeitungsanlage darstellt.

Sinn und Zweck des Ausschlusstatbestandes sprechen allerdings dafür, ihn auch auf Teileinrichtungen einer Gesamtanlage anzuwenden, welche bei einer funktional eigenständigen Errichtung als Wiederaufarbeitungsanlage dem Verbot des § 7 Abs. 1 Satz 2 Alt. 2 AtG unterfallen würden. Der Gesetzgeber wollte Tätigkeiten zur Wiederaufarbeitung vollständig beenden und hat dies nicht nur durch den Ausschluss der Neuerrichtung entsprechender Anlagen, sondern auch durch ein paralleles Verbot, bestrahlte Kernbrennstoffe an diese abzugeben (§ 9a Abs. 1 Satz 2 AtG), verdeutlicht.<sup>111</sup>

Zwar stand zum damaligen Zeitpunkt nur die selbständige Wiederaufarbeitung von Brennelementen für neue Leistungsreaktoren im Vordergrund. Angesichts des gesetzgeberischen Ziels ist es dennoch naheliegend, § 7 Abs. 1 Satz 2 Alt. 2 AtG abweichend vom sonstigen Anlagenbegriff des AtG so auszulegen, dass sich der **Ausschluss** von Errichtungsgenehmigungen auch auf solche Einrichtungen bezieht, die zwar Bestandteil einer **Gesamtanlage** sind, für sich genommen aber eine **Wiederaufarbeitungsanlage** darstellen würden.

Dafür spricht auch, dass die frühere Anlage zum AtG ausdrücklich klarstellte, dass eine Gesamt-„Kernanlage“ (mittlerweile: kerntechnische Anlage) auch aus mehreren Einzelanlagen bestehen kann: *„eine Kernanlage kann auch bestehen aus zwei oder mehr Kernanlagen eines einzigen Inhabers, die sich auf demselben Gelände befinden, zusammen mit anderen Anlagen auf diesem Gelände, in denen sich radioaktive Materialien befinden.“*<sup>112</sup>

Die jetzige Begriffsbestimmung der kerntechnischen Anlage in § 2 Abs. 3a Nr. 1 AtG enthält zwar keine vergleichbare Formulierung. Eine bewusste Abkehr des Gesetzgebers von dem in der bisherigen Fassung zum Ausdruck gekommenen Verständnis ist aber nicht ersichtlich.

Danach kann nicht mit hinreichender Sicherheit davon ausgegangen werden, dass der Genehmigungsausschluss des § 7 Abs. 1 Satz 2 Alt. 2 AtG dann nicht eingreift, wenn ein Anlagenteil, der für sich genommen der Aufarbeitung von Kernbrennstoffen dient, Teil einer Gesamtanlage mit einem davon abweichenden Zweck ist.

Diese Überlegungen sind auf den Ausschluss der Ablieferung bestrahlter Kernbrennstoffe an Wiederaufarbeitungsanlagen nach § 9a Abs. 1 Satz 1 AtG übertragbar.

**Zwischenergebnis** - Auf Basis der vom BVerwG entwickelten Maßstäbe lässt sich der Umfang des Vorhabens so bestimmen, dass sämtliche nuklearspezifischen Bauteile von START eine Gesamtanlage zur Spaltung von Kernbrennstoffen bilden. Diese Anlage bedarf einer Genehmigung nach § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG. Aufgrund der Neuartigkeit des Anlagenkonzepts erscheint aber auch eine abweichende rechtliche Bewertung, die von zwei je eigenständigen Anlagen ausgeht, denkbar. Der einschlägige Genehmigungstatbestand des § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG würde sich durch die unterschiedlichen Bewertungen des Anlagenumfangs ebenso wenig ändern, wie die für die Genehmigungserteilung zu erfüllenden Genehmigungsvoraussetzungen, insbesondere des § 7 Abs. 2 AtG. Angesichts des gesetzgeberischen Willens, die Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente in Deutschland zu beenden, besteht das – durch eine Gesetzesänderung zu begegnenden – Risiko, dass das Vorhaben derzeit dem Ausschlussstatbestand des § 7 Abs. 1 Satz 2 Alt. 2 AtG unabhängig davon unterfällt, ob die Recyclinganlage lediglich als Teil einer Gesamtanlage zur Spaltung von Kernbrennstoffen oder als selbständige Anlage zu deren Aufarbeitung betrachtet würde.

### GENEHMIGUNGSVORAUSSETZUNGEN DES § 7 ABS. 2 ATG

Die Erteilung einer atomrechtlichen Genehmigung nach § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG setzt voraus, dass die in § 7 Abs. 2 AtG abschließend aufgezählten Anforderungen eingehalten werden. Sie lassen sich grundsätzlich unterteilen in **anlagenbezogene Anforderungen**, die die Sicherheit der Anlage im technischen Sinne betreffen, und **personenbezogene Anforderungen** an den Genehmigungsinhaber sowie Leitung und Personal der Anlage.<sup>113</sup> Die einzelnen Anforderungen werden in ihrer Bedeutung für das Vorhaben im Folgenden kurz erläutert.

**Schadensvorsorge nach § 7 Abs. 2 Nr. 3 AtG** - Besondere Bedeutung kommt der anlagenbezogenen Anforderung des § 7 Abs. 2 Nr. 3 AtG zu. Sie betrifft die technische Sicherheit der zur Genehmigung gestellten Anlage. Die Vorschrift verlangt den Nachweis, dass „*die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage getroffen ist*“ – die sogenannte Schadensvorsorge. Damit stellt sie die zentrale Anforderung des Genehmigungsverfahrens dar. Die gesamte Anlagenkonzeption muss sich an ihr orientieren.

#### Maßstab der Schadensvorsorge

Der Begriff der Vorsorge gegen Schäden bezieht sich auf die Vorsorge gegen die schädliche Wirkung ionisierender Strahlen und bildet damit den Gesetzeszweck des § 1 Nr. 2 AtG ab.<sup>114</sup> Danach ist gefordert, dass sämtliche Risiken nach dem **Maßstab praktischer Vernunft** ausgeschlossen werden.<sup>115</sup>

Ob das erforderliche Maß an Schadensvorsorge im Einzelfall gewahrt wird, beurteilt sich ausweislich der Vorschrift nach dem **Stand von Wissenschaft und Technik**. Dabei handelt es sich um den höchsten im Zusammenhang mit technischen Erkenntnissen im deutschen Recht verwendeten Maßstab. Er umfasst die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse und ist überdies nicht auf das technisch Machbare beschränkt.<sup>116</sup>

Jenseits des Maßstabs praktischer Vernunft liegt der Bereich des Restrisikos. Ein **Restrisiko**, das trotz Wahrung der nach der praktischen Vernunft notwendigen Vorsorgemaßnahmen verbleibt, ist von der Gesellschaft hinzunehmen.<sup>117</sup>

#### Konkretisierung durch kerntechnisches Regelwerk als Normalfall

Das notwendige Maß der Schadensvorsorge wird insbesondere durch untergesetzliche Regelungen wie Bekanntmachungen des Bundesumweltministeriums sowie Richtlinien und Empfehlungen von Fachkommissionen wie der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK), dem Kerntechnischen Ausschuss (KTA) und der Strahlenschutzkommission (SSK) bestimmt, dem sogenannten **kerntechnischen Regelwerk**. Es bildet eine – wenn auch nicht abschließende – Sammlung des Stands von Wissenschaft und Technik, an der sich Genehmigungsbehörden orientieren.<sup>118</sup>

Für die Genehmigungspraxis kerntechnischer Anlagen besonders bedeutsame Bestandteile des kerntechnischen Regelwerks sind die vom BMU bekanntgemachten **Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke** (RS-Handbuch 3-0.1) sowie die sogenannten **Störfall-Leitlinien** (RS-Handbuch 3-33.1). Beide betreffen ihrem unmittelbaren Anwendungsbereich nach lediglich (bestimmte Arten) von Kernkraftwerken zur gewerblichen Elektrizitätserzeugung. Sie haben jedoch über diesen Anwendungsbereich hinaus Bedeutung für die Genehmigungspraxis erlangt, indem sie Aspekte der Anlagenauslegung regeln, die **auch für andere Anlagenarten relevant** sein können.

Die Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke sind weitgehend allgemein gehalten und geben keine technischen Details der Auslegung vor. Gleiches gilt für die korrespondierenden **Sicherheitsanforderungen für Kernbrennstoffversorgungsanlagen** (RS-Handbuch 3-11), die in ihrem unmittelbaren Anwendungsbereich etwa für die Herstellung von MOX- oder Uran-Brennelementen für Forschungsreaktoren gelten.

Die Störfall-Leitlinien beziehen sich auf Druckwasserreaktoren. Für diese legen sie zu beherrschende Szenarien fest, die als Auslegungsstörfälle der Anlagenplanung zugrunde zu legen sind. Sie enthalten des Weiteren Vorgaben über die für die Beherrschung zu erbringenden Nachweise.

Die Äußerungen der **Fachkommissionen** RSK, KTA und SSK beziehen sich verglichen mit den Leitlinien des BMU meist auf konkretere technische Fragestellungen. So enthalten etwa die KTA-Regeln technische Anforderungen für einzelne Komponenten oder Funktionen.<sup>119</sup> Die Äußerungen der genannten Kommissionen stellen in der Genehmigungspraxis eine wesentliche Erleichterung für die Nachweisführung dar. Sie etablieren Standards, an denen sich sowohl Antragsteller bei der Anlagenplanung als auch Genehmigungsbehörden orientieren können. Das gilt insbesondere für solche Äußerungen, die technische Regeln zu verbreiteten Anlagenkomponenten aufstellen, wie etwa die KTA 3101 zur Auslegung der Reaktorkerne von Druck- und Siedewasserreaktoren.

Neben dem kerntechnischen Regelwerk spielt insbesondere das StrlSchG mit der dazu ergangenen StrlSchV eine maßgebliche Rolle.<sup>120</sup> Die Einhaltung der **strahlenschutzrechtlichen Grenzwerte** des StrlSchG und der dazu ergangenen StrlSchV ist trotz des Vorrangs des atomrechtlichen Genehmigungsverfahrens ein maßgeblicher Teil der nach § 7 Abs. 2 Nr. 3 AtG nachzuweisenden Schadensvorsorge.<sup>121</sup>

## NOTWENDIGKEIT DER NEUENTWICKLUNG VON NACHWEISEN FÜR DAS ERSTGENEHMIGUNGSVERFAHREN

Für Neutronenquellen und Recyclinganlagen zur Umwandlung hochradioaktiver Abfälle besteht bislang kein spezifisches Regelwerk. Eine **wesentliche Aufgabe** bei der Auslegung des Vorhabens wird daher darin bestehen, die **erforderlichen Nachweise** der Schadensvorsorge **für den Einzelfall zu erbringen**. Dort, wo Parallelen zu herkömmlichen kerntechnischen Anlagen bestehen, ist es möglich, das bisherige Regelwerk der Auslegung von START zugrunde zu legen (s. **Kapitel 3.1.**). Das gleiche gilt, sofern in ausländischen Genehmigungsverfahren mit Komponenten der Anlage bereits Erfahrungen gemacht worden sind, auf die im Rahmen des Genehmigungsverfahrens zurückgegriffen werden kann.<sup>122</sup> Insbesondere im Hinblick auf das sicherheitstechnische Zusammenwirken des Gesamtsystems sowie die Partitionierungseinrichtungen dürfte aber die Entwicklung neuer Möglichkeiten der Nachweisführung notwendig werden.

**Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter nach § 7 Abs. 2 Nr. 5 AtG** - Als weitere anlagenbezogene Anforderung ist gemäß § 7 Abs. 2 Nr. 5 AtG der Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (kurz: SEWD) zu gewährleisten.

Danach ist der Schutz gegen zielgerichtete menschliche Einwirkungen auf den Funktionsablauf der Anlage sicherzustellen, die etwa im Zusammenhang mit terroristischen oder sonstigen kriminellen Aktivitäten stehen können. Nicht zielgerichtete äußere Einflüsse, wie Druckwellen durch Explosionen im Rahmen von Unfällen oder „zufälligen“ Flugzeugabstürzen sind dagegen im Rahmen der Schadensvorsorge nach § 7 Abs. 2 Nr. 2 AtG relevant.<sup>123</sup>

Ebenso wie die Regelung zur Schadensvorsorge ist § 7 Abs. 2 Nr. 5 AtG eine konkretisierungsbedürftige Vorschrift. Die Maßstäbe zur Konkretisierung der Anlagensicherung wurden durch den Gesetzgeber im Jahre 2021 im neuen fünften Abschnitt des AtG (§§ 41 ff. AtG) kodifiziert. Das AtG fordert insoweit ein **integriertes Sicherungs- und Schutzkonzept** (§ 41 AtG). Es besteht aus den aufeinander abgestimmten Schutzmaßnahmen des Inhabers der (Anlagen-)Genehmigung und des Staates.

Um die Sicherungsanforderungen festlegen zu können, bilden die Genehmigungsbehörden auf Grundlage von Erkenntnissen der Sicherheitsbehörden nach § 44 Abs. 1 Satz 1 AtG sogenannte **Lastannahmen**. Dabei handelt es sich um generisch festgelegte Tatszenarien, gegen die eine Anlage gewappnet sein muss.<sup>124</sup>

Die aus den Lastannahmen folgenden notwendigen Schutzmaßnahmen werden in einem zweiten Schritt in den sogenannten **SEWD-Richtlinien** konkretisiert. Sie beschreiben in Bezug auf konkrete Anlagentypen, welche Schutzmaßnahmen erforderlich sind, um dem Maßstab des § 7 Abs. 2 Nr. 5 AtG zu genügen und sind Teil des kerntechnischen Regelwerks. Aufgrund dessen haben sie, wie die sonstigen Bestandteile des Regelwerks keinen verbindlichen Charakter, werden der Genehmigungspraxis jedoch in weitem Umfang zugrunde gelegt. Darauf aufbauend, legen die Genehmigungsbehörden die zu beachtenden Schutzmaßnahmen fest (§ 44 Abs. 2 Satz 2 AtG). Sie umfassen bauliche, technische, personelle und organisatorische Maßnahmen (§ 43 Abs. 1 Satz 2 AtG). Dazu können beispielsweise personelle Anforderungen an den Werkschutz oder die Auslegung von Bauteilen gegen Beschuss gehören. Als Richtwert für eine effektive Folgedosis, die bei Eintritt eines SEWD-Szenarios nicht überschritten werden darf, gelten 100 mSv innerhalb von sieben Tagen (§ 44 Abs. 2 Satz 3 AtG).

Ähnlich wie im Rahmen der Schadensvorsorge beziehen sich die vorhandenen SEWD-Richtlinien auf bestimmte Anlagentypen oder übergreifende Aspekte der Anlagenausrichtung. So existieren etwa die SEWD-Richtlinie Zwischenlager (RS-Handbuch 3-76), die informationstechnisch ausgerichtete SEWD-Richtlinie IT (RS-Handbuch 3-99.1) oder die in der Praxis bisher bedeutsamste Richtlinie für den Schutz von Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (RS-Handbuch 3-57.3).

Die genannten Richtlinien sind als Verschlussachen eingestuft und daher nicht öffentlich zugänglich. Analog zum Nachweis der Schadensvorsorge ist jedoch davon auszugehen, dass die Frage, inwiefern die einzelnen Vorgaben der Richtlinien auf das konkret zur Genehmigung gestellte Vorhaben angesichts seines Gefährdungspotentials im Einzelfall zu übertragen sind, im Rahmen des Genehmigungsverfahrens relevant werden wird.

**Subjektive Anforderungen nach § 7 Abs. 2 Nr. 1 und 2 AtG** - § 7 Abs. 2 Nr. 1 und 2 AtG stellen Anforderungen an die für die Anlage verantwortlichen Personen und das dort eingesetzte Personal.

Es dürfen zunächst nach § 7 Abs. 2 Nr. 1 Halbsatz 1 AtG keine Bedenken gegen die **Zuverlässigkeit des Antragstellers und der für Errichtung, Leitung und Beaufsichtigung des Betriebs der Anlage verantwortlichen Personen** bestehen. Für die Überprüfung ist die Atomrechtliche Zuverlässigkeitsüberprüfungs-Verordnung (AtZüV) maßgeblich.

§ 7 Abs. 2 Nr. 1 Halbsatz 2 AtG verlangt, dass die verantwortlichen Personen über ihre persönliche Zuverlässigkeit hinaus auch über die **Fachkunde** verfügen, die für Errichtung, Leitung und den Betrieb, einschließlich der Überwachung einer kerntechnischen Anlage

notwendig ist. Für die übrigen in der Anlage tätigen Personen werden nach § 7 Abs. 2 Nr. 2 AtG Kenntnisse über den sicheren Betrieb der Anlage, die möglichen Gefahren und die anzuwendenden Schutzmaßnahmen verlangt und damit etwas geringere Anforderungen als an das Leitungspersonal gestellt.

Welche Kenntnisse im Einzelnen erforderlich sind, ist in verschiedenen **Richtlinien** des Bundesumweltministeriums niedergelegt. Zu nennen sind insbesondere die Richtlinie für den Fachkundenachweis von Kernkraftwerkspersonal (RS-Handbuch 3-2), die Richtlinie für den Fachkundenachweis von Forschungsreaktorpersonal (RS-Handbuch 3-3), die Richtlinie für die Fachkunde von verantwortlichen Personen in Anlagen zur Herstellung von Brennelementen für Kernkraftwerke (RS-Handbuch 3-71) und die Richtlinie über die Gewährleistung der notwendigen Kenntnisse der beim Betrieb von Kernkraftwerken sonst tätigen Personen (RS-Handbuch 3-27). Im Zusammenhang mit den strahlenschutzrechtlichen Anforderungen sind darüber hinaus die Fachkunde-Richtlinie Technik nach Strahlenschutzverordnung (RS-Handbuch 3-40) sowie die Richtlinie für die Fachkunde von Strahlenschutzbeauftragten in Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen (RS-Handbuch 3-61) von Bedeutung.

Die Richtlinien unterscheiden regelmäßig zwischen drei Arten von Anforderungen an die Fachkunde bzw. berufliche Kenntnisse. Dazu zählen erstens einschlägige (wissenschaftliche) Ausbildungen, zweitens einschlägige praktische Erfahrungen in dem betroffenen Fachgebiet und drittens einer für bestimmte Tätigkeiten erforderlichen Fachkundeprüfung. Diese Anforderungen sind für das eingesetzte Personal nachzuweisen.

Die Richtlinien orientieren sich – wie auch die vorgestellten Leitlinien zu den anlagenbezogenen Anforderungen – an den bisherigen klassischen Erscheinungsformen kerntechnischer Anlagen wie Kernkraftwerken oder Brennelementefabriken. Ihre Anforderungen, insbesondere zur erforderlichen Fachkunde, dürften allerdings auf das Personal von START weitgehend **übertragbar** sein. Soweit das Vorhaben mehrere Teileinrichtungen vereint, für die – wie etwa für die Einrichtungen zur Brennelementefertigung – eine eigenständige Richtlinie besteht, könnten die Richtlinien kumulativ angewendet werden.

**Deckungsvorsorge nach § 7 Abs. 2 Nr. 4 AtG** - Antragsteller müssen im Genehmigungsverfahren nach § 7 AtG den Nachweis erbringen, die erforderliche Vorsorge für die Erfüllung gesetzlicher Schadensersatzverpflichtungen getroffen zu haben. Dabei handelt es sich um die sogenannte Deckungsvorsorge.

Der Nachweis bezieht sich auf diejenigen Haftungstatbestände, denen Betreiber von „Kernanlagen“, insbesondere nach Art. 3 des „Pariser Übereinkommens über die Haftung gegenüber Dritten auf dem Gebiet der Kernenergie“ (PÜ) sowie gemäß §§ 25 ff. AtG unterliegen, ist aber nicht auf diese beschränkt (§ 13 Abs. 5 Satz 1 AtG).<sup>125</sup> Das Pariser Übereinkommen legt insbesondere eine **verschuldensunabhängige Gefährdungshaftung** für die Betreiber von „Kernanlagen“ fest.

#### **Das Vorhaben ist nicht von der Gefährdungshaftung für Kernanlagen ausgenommen**

Der Begriff der Kernanlage ist ebenso wie die sonstigen Begriffsbestimmungen des PÜ nicht zwingend deckungsgleich mit den im AtG verwendeten Begrifflichkeiten. Für die Haftungsvorschriften sind jedoch diejenigen des PÜ zugrunde zu legen (§ 2 Abs. 4 Satz 1 AtG). Das ist insoweit bedeutsam, als zu den Kernanlagen i.S.v. Art. 1 Abs. a Unterabs. ii PÜ zwar u.a. Reaktoren zählen, unterkritische Reaktoren jedoch nach dem Willen der Vertragsstaaten davon ausgeschlossen sein sollen.<sup>126</sup> Daraus kann allerdings nicht gefolgert werden, dass für das Vorhaben insgesamt keine atomrechtliche Haftung in Betracht käme und ein Nachweis über die Deckungsvorsorge deshalb ausschiede. Denn unter den Begriff der Kernanlage in diesem Sinne fallen auch andere Einrichtungen, die von dem hiesigen Vorhaben miterfasst werden, wie etwa Fabriken zur Brennstoffherzeugung, -bearbeitung und Anlagen zur Wiederaufarbeitung.

### Höhe der Deckungssumme

Die Höhe der für den Haftungsfall nachzuweisenden Deckungsvorsorge wird von der Genehmigungsbehörde nach Art und Höhe gemäß § 13 Abs. 1 AtG i.V.m. den Vorschriften der Atomrechtlichen Deckungsvorsorge-Verordnung (AtDeckV) festgesetzt. Sie muss „in einem angemessenen Verhältnis zur Gefährlichkeit der Anlage stehen“ und beträgt gemäß § 13 Abs. 2 Nr. 1, Abs. 3 AtG mindestens 70 Millionen und höchstens 2,5 Milliarden Euro. Die AtDeckV sieht für den Regelfall spezifischere Deckungssummen vor, die sich innerhalb dieses Rahmens bewegen (§ 7 Abs. 1 AtDeckV). Dabei unterscheidet die Verordnung zwischen verschiedenen Anlagentypen.

Für **Reaktoren** bestimmt sich die Regeldeckungssumme grundsätzlich nach der genehmigten thermischen Dauerleistung (§ 9 Abs. 1 Satz 3 AtDeckV). Bis zu einer Leistung von 25 MW beträgt sie 70 Millionen Euro und erhöht sich mit jedem Megawatt Leistung um 2,5 Millionen Euro bis zum Höchstbetrag (§ 9 Abs. 1 Satz 2 AtDeckV).

Entsprechend der von den Vertragsparteien selbst vertretenen Auslegung des PÜ, wonach unterkritische Reaktoren keine Kernanlagen i.S.d. Abkommens darstellen, so würde sich die Regeldeckungssumme für das vorliegende **Vorhaben** hingegen nach § 11 AtDeckV bestimmen. Die regelmäßige Höchstsumme läge dann bei 500 Millionen Euro, wobei sich der konkrete Betrag nach der im Einzelfall vorliegenden Masse an Kernbrennstoffen und der Gesamtaktivität der Anlage richten würde (§ 11 Abs. 1 Sätze 1 und 2 AtDeckV). Nach Abs. 2 der Vorschrift könnte sich der Regelhöchstbetrag für das hiesige Vorhaben womöglich auf 700 Millionen Euro erhöhen, soweit die zeitweise Lagerung bestrahlter Brennelemente Teil des Anlagenkonzepts ist.

Zu berücksichtigen ist des Weiteren, dass nach § 18 Abs. 1 AtDeckV bei verschiedenen Umgangshandlungen mit Teilmengen radioaktiver Stoffe ggf. mehrere Deckungssummen festgesetzt werden. Überdies kann die Genehmigungsbehörde nach Maßgabe des § 16 AtDeckV von der Regeldeckungssumme abweichen. Die exakte Höhe der festzusetzenden Deckungssumme hängt daher sowohl von den nukleartechnischen Einzelheiten der Anlage als auch von deren Bewertung durch die Genehmigungsbehörde ab.

### Nachweis der Deckungsvorsorge

Die Deckungsvorsorge kann entweder durch eine **Haftpflichtversicherung** oder eine sonstige finanzielle Sicherheit erbracht werden (§ 1 Satz 1 AtDeckV). Die Modalitäten ergeben sich aus den §§ 2 ff. AtDeckV, wobei insbesondere zu beachten ist, dass eine Haftpflichtversicherung oder eine sonstige finanzielle Absicherung durch einen Dritten jeweils in Deutschland erbracht werden müssen.

In der bisherigen Praxis gewährten sich die Kernkraftwerkbetreiber auf Grundlage einer **Solidarvereinbarung** wechselseitig Deckungszusagen als eine Form der „sonstigen finanziellen Sicherheit“. <sup>127</sup> Abstrakt bestünde daher die Möglichkeit, der bestehenden Solidarvereinbarung beizutreten. Nach jetzigem Stand läuft diese aus, bevor START fertig gestellt werden wird. Ungeachtet einer etwaigen Verlängerung erstreckt sich der Betriebszeitraum von START auch auf Zeiträume nach Abschluss des Stilllegungsprozesses der Kernkraftwerke. Deshalb ist nicht davon auszugehen, dass diese Solidarvereinbarung während des gesamten Betriebszeitraums weiterbestehen wird.

**Kein Entgegenstehen überwiegender öffentlicher Interessen nach § 7 Abs. 2 Nr. 6 AtG** - Eine atomrechtliche Genehmigung nach § 7 AtG setzt schließlich voraus, dass dem Vorhaben keine überwiegenden öffentlichen Interessen entgegenstehen. Dabei handelt es sich um Interessen, die nicht bereits Gegenstand der anderen atomrechtlichen Genehmigungsvoraussetzungen sind. <sup>128</sup> Als insbesondere zu berücksichtigende Interessen nennt die Vorschrift Umweltauswirkungen und den Anlagenstandort. Diese werden im Rahmen des atomrechtlichen Genehmigungsverfahrens allerdings zum einen bereits über eine Umweltverträglichkeitsprüfung und zum anderen über die Vorschriften des Raumplanungsrechts berücksichtigt. Aus diesem Grund ist die eigenständige Bedeutung der Vorschrift in der Genehmigungspraxis begrenzt. <sup>129</sup>

**BEACHTUNG ANDERER VORSCHRIFTEN NACH § 14 ATVFV**

Die Genehmigungsbehörde prüft nicht nur die Genehmigungsvoraussetzungen des § 7 Abs. 2 AtG. Nach § 14 AtVFV hat sie auch zu prüfen, ob das Vorhaben die **Anforderungen anderer öffentlich-rechtlicher Vorschriften** wahrt. Dabei beteiligt sie nach § 7 Abs. 4 AtG die für die einzelnen Rechtsgebiete zuständigen Behörden. Zu den zu beachtenden Anforderungen zählen etwa solche des Raumordnungs-, Bau- oder Wasserrechts, soweit sie sich auf die Anlagenteile beziehen, die dem kerntechnischen Anlagenbegriff unterfallen. Das können etwa bauordnungsrechtliche Anforderungen sein, die geplante Wachgebäude betreffen. Eine Ausnahme von diesem Grundsatz sieht § 8 Abs. 1 AtG i.V.m. § 2 Abs. 2 BImSchG vor. Danach sind die immissionsschutzrechtlichen Anforderungen an genehmigungsbedürftige Anlagen auf kerntechnische Anlagen insoweit nicht anwendbar, als gerade die nuklearspezifischen Auswirkungen der Anlagen betroffen sind.

Die weiteren Vorschriften des öffentlichen Rechts enthalten keine Ausschlusstatbestände für atomrechtliche Anlagen wie etwa § 7 Abs. 1 Satz 2 AtG. Die materiellen Anforderungen hängen überdies stark von der Auslegung der Anlage im Detail und ihrem beabsichtigten Standort ab.

**RECHTSFOLGE: DURCH VERSAGUNGSERMESSEN BESCHRÄNKTER ANSPRUCH AUF ERTEILUNG EINER GENEHMIGUNG**

Werden alle dargestellten Anforderungen an das Vorhaben erfüllt, ist die Erteilung einer atomrechtlichen Errichtungs- und Betriebsgenehmigung möglich. Es handelt sich normstrukturell bei § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG daher um ein **präventives Verbot mit Erlaubnisvorbehalt**<sup>130</sup>.

**Rechtsfigur des Versagungsermessens** - Aufgrund der besonderen Formulierung des § 7 Abs. 2 AtG – „[d]ie Genehmigung darf nur erteilt werden, wenn [...]“ anstelle von „Die Genehmigung ist zu erteilen, wenn [...]“ – besteht aber rechtlich kein unbedingter, gebundener Anspruch des Antragstellers auf die Genehmigung. Der Genehmigungsbehörde wird durch diese Formulierung vielmehr ein sogenanntes Versagungsermessen eingeräumt.<sup>131</sup> Daher kann die Erteilung einer Genehmigung selbst dann versagt werden, wenn alle rechtlichen Anforderungen an das Vorhaben erfüllt werden. Nach der Vorstellung des Gesetzgebers dient die Figur des Versagungsermessens innerhalb des Atomrechts dazu, den Behörden zu ermöglichen, Umstände zu berücksichtigen, die bei Erlass des AtG im Jahre 1959 noch nicht vorhersehbar waren und deshalb in den Genehmigungsvoraussetzungen nicht abgebildet wurden.<sup>132</sup>

Teils wird mit beachtlichen Argumenten davon ausgegangen, dass die Figur des Versagungsermessens aufgrund der umfangreichen und langjährigen Erfahrungen im praktischen Umgang mit kerntechnischen Anlagen überholt sei.<sup>133</sup> Allerdings hat das BVerfG (in dem schon älteren Kalkar-Beschluss) die Regelung angesichts der von der Nutzung der Kernenergie ausgehenden Gefahren verfassungsrechtlich gebilligt.<sup>134</sup> Anhaltspunkte dafür, dass es von dieser Position abrücken könnte, bestehen auch auf Grundlage seiner neueren Rechtsprechung nicht. Die Figur des Versagungsermessens ist daher bei den rechtlichen Überlegungen zur Genehmigung des Vorhabens zu berücksichtigen. Ihr sind jedoch aus verfassungsrechtlichen Erwägungen **enge Grenzen** gesetzt. Eine Versagung kann nur auf sachliche Gründe gestützt werden, die von den Zwecken des AtG gedeckt sind und im Einklang mit der gesetzgeberischen Intention stehen, besondere und unvorhergesehene Konstellationen abzudecken.<sup>135</sup>

**Keine ermessensfehlerfreie Ausübung des Versagungsermessens** - Bei Vorliegen der in § 7 Abs. 2 AtG genannten Tatbestandsvoraussetzungen könnte die Erteilung der Genehmigung nur dann rechtmäßig versagt werden, wenn mit der Technologie unvorhergesehene Umstände verbunden wären, die sich nachteilig auf die Gesetzeszwecke des AtG auswirken könnten. Dem stehen jedoch durchgreifende Argumente entgegen.

Denn das Vorhaben dient der Beseitigung hochradioaktiver Abfälle aus Kernkraftwerken und soll daher gerade einen entscheidenden Beitrag zur geordneten Beendigung der bisherigen Nutzung der Kernenergie zur Elektrizitätserzeugung (§ 1 Nr. 1 AtG) liefern. Zudem dürfte die Genehmigungsbehörde im Falle, dass der Schadensvorsorgenachweis nach § 7 Abs. 2 Nr. 3 AtG erbracht wird, nicht argumentieren, dass die Versagung der Genehmigung zum Schutz vor einer bisher in dieser konkreten Form unerprobten Technologie notwendig sei. Im Gegenteil würde die Anlage auch insoweit dem Schutzzweck des AtG dienen, die Gefahren der Kernenergie einzuhegen, indem die besonders langlebigen hochradioaktiven Abfallbestandteile zerstört würden.

Daher könnte eine Genehmigungsbehörde auf Basis der derzeit verfügbaren Informationen ihr **Versagungsersuchen nicht** rechtmäßigerweise **zulasten des Vorhabens** ausüben.

### 2.3.

### **Notwendigkeit weiterer atom- oder strahlenschutzrechtlicher Genehmigungen?**

§ 7 Abs. 1 Satz 1 AtG ist wie dargestellt der für das Vorhaben **zentrale Genehmigungstatbestand**. Weitere eigenständige Genehmigungserfordernisse des Atom- oder Strahlenschutzrechts bestehen jedenfalls während der Errichtungs- und Betriebsphase nicht. Das betrifft insbesondere die Lagerung von bereits im Reaktor bestrahlten Brennelementen bis zum Abschluss der Rezyklierung.

#### **BIS ZUM ABSCHLUSS DER REZYKLIERUNG KEINE WEITEREN ATOMRECHTLICHEN GENEHMIGUNGSERFORDERNISSE**

Das AtG kennt neben § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG weitere Genehmigungserfordernisse, die sich auf unterschiedliche Tätigkeiten beim Umgang mit Kernbrennstoffen beziehen. Sie sind bei der Errichtung des Vorhabens und dessen Betrieb aber nicht einschlägig, solange die Rezyklierung eines Stoffes noch nicht abgeschlossen ist.

**Betriebsbedingte Aufbewahrung von Kernbrennstoffen** - § 6 Abs. 1 AtG enthält ein Genehmigungserfordernis, das die (nicht staatliche) Aufbewahrung von Kernbrennstoffen betrifft. Die Vorschrift sieht keine anlagen-, sondern eine rein tätigkeitsbezogene Genehmigungserteilung vor. Sie betrifft im Wesentlichen die Zwischenlagerung von Kernbrennstoffen im Anschluss an ihre Verwendung in einer kerntechnischen Anlage und damit insbesondere die trockene Zwischenlagerung. Die Vorschrift regelt die Aufbewahrung von Kernbrennstoffen unabhängig davon, ob diese bereits bestrahlt wurden oder radioaktive Abfälle darstellen.<sup>136</sup>

**Abzugrenzen** ist das **Genehmigungserfordernis** nach § 6 Abs. 1 AtG von einer „Aufbewahrung von Kernbrennstoffen innerhalb einer nach § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG genehmigten Anlage, in der diese weiterhin verwendet werden sollen. **Tätigkeiten**, die in einem **direkten Zusammenhang zum aktiven Betrieb** einer solchen Anlage stehen, werden grundsätzlich von der Genehmigung nach § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG miterfasst.<sup>137</sup> Daher benötigt das Vorhaben jedenfalls in der Betriebsphase keine eigenständige Genehmigung nach § 6 Abs. 1 Satz 1 AtG. Eine solche kommt erst für die (Zwischen-)Lagerung von nicht mehr der Rezyklierung unterliegenden radioaktiven Abfällen in Betracht. Bei Beantragung der Anlagengenehmigung nach § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG ist jedoch die anlageninterne Aufbewahrung mit einzuschließen.

**Sonstige Genehmigungserfordernisse des AtG** - Das AtG sieht weitere Genehmigungserfordernisse sowohl für die Beförderung von Kernbrennstoffen (§ 4 Abs. 1 AtG) als auch für den Umgang mit ihnen außerhalb kerntechnischer Anlagen (§ 9 Abs. 1 AtG) und die Ein- oder Ausfuhr von Kernbrennstoffen (§ 3 Abs. 1 AtG) vor. Sie sind für das hiesige Vorhaben grundsätzlich nicht einschlägig.

Das Vorhaben soll am Standort eines bisherigen Kernkraftwerks errichtet werden, um Transporte der abgebrannten Brennelemente über öffentliche Verkehrsträger zu vermeiden. Daher bedarf es grundsätzlich keiner Beförderungsgenehmigung, um seinen Betrieb zu gewährleisten. § 4 Abs. 1 Satz 1 AtG verlangt eigenständige Beförderungsgenehmigungen ausschließlich für Beförderungen von Kernbrennstoffen, die außerhalb des Betriebsgeländes einer kerntechnischen Anlage stattfinden. Anlageninterne Beförderungsvorgänge sind von der Vorschrift daher nicht erfasst. Eine Genehmigung nach § 4 Abs. 1 Satz 1 AtG würde daher nur dann erforderlich, wenn Kernbrennstoffe außerhalb des Anlagenbetriebs an Dritte weitergegeben würden. Das wäre etwa bei der Weitergabe des im Rahmen der Partitionierung abgetrennten Urans an eine Anlage zur Erzeugung oder Be- bzw. Verarbeitung von Kernbrennstoffen der Fall. Diese Möglichkeit bestünde grundsätzlich: Zwar geht der Gesetzgeber davon aus, dass Uran, welches aus der Aufarbeitung von Brennelementen stammt, im Anschluss an die Zwischenlagerung ohne weitere Verwendung einem Endlager zugeführt wird, wie es in der Mitteilungspflicht des § 9a Abs. 1d AtG zum Ausdruck kommt.<sup>138</sup> Eine Verpflichtung dazu besteht jedoch nicht.<sup>139</sup> Für eine Beförderung wären die Voraussetzungen des § 4 Abs. 2 AtG nachzuweisen.

Eine Ein- oder Ausfuhr von Kernbrennstoffen durch Transmutex ist nicht vorgesehen. Das im Rahmen der Rezyklierung abgetrennte Uran könnte jedoch grundsätzlich insbesondere in EU-Mitgliedsstaaten exportiert werden, wofür eine Genehmigung nach § 3 Abs. 1 Satz 1 AtG erforderlich wäre. Die Einhaltung der Genehmigungsvoraussetzungen des dortigen Abs. 3 wäre nachzuweisen. § 3 Abs. 6 AtG, der die Ausfuhr bestrahlter Brennelemente aus Forschungsreaktoren nur unter hohen Anforderungen zulässt, wäre dagegen unabhängig von der Frage nicht einschlägig, ob START selbst als Forschungsreaktor anzusehen ist. Denn das zu exportierende Uran würde aus den früheren kommerziellen Kernkraftwerken stammen. Transport und Ausfuhr des Urans könnten daneben weiteren spezialgesetzlichen Genehmigungsanforderungen unterliegen (etwa nach der Dual-Use-VO (EU) 2021/821). Die Genehmigungserfordernisse der Atomrechtlichen Abfallverbringungsverordnung (AtAV) wären nach § 1 Abs. 2 Nr. 3 AtAV hingegen nicht anwendbar, da das abgetrennte Uran aus einer Aufbereitung stammen würde.

§ 9 Abs. 1 Satz 1 AtG stellt einen Auffangtatbestand dar, der die Bearbeitung, Verarbeitung und sonstige Verwendung von Kernbrennstoffen außerhalb genehmigungspflichtiger Anlagen erfasst. Da das Vorhaben eine nach § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG zu genehmigende Anlage darstellt, ist eine separate Genehmigung nach dieser Vorschrift nicht notwendig.

## IM GRUNDSATZ KEINE EIGENSTÄNDIGEN STRAHLENSCHUTZRECHTLICHEN GENEHMIGUNGEN ERFORDERLICH

Die atomrechtlichen Genehmigungserfordernisse sind grundsätzlich gegenüber denjenigen des Strahlenschutzrechts vorrangig.<sup>140</sup> Denn gemäß § 5 Abs. 2 Satz 3 StrlSchG stellen kerntechnische Anlagen keine Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung dar. Dies hat zur Folge, dass keine strahlenschutzrechtliche Errichtungs- oder Umgangsgenehmigung erforderlich ist, soweit ein Anlagenteil vom kerntechnischen Anlagenbegriff erfasst ist und eine Tätigkeit den Umgang mit Kernbrennstoffen betrifft.

**Keine eigenständige Genehmigung nach StrlSchG für Teilchenbeschleuniger** - Besonders relevant ist dies für den Teilchenbeschleuniger. Er bedürfte bei einer eigenständigen und funktional von START unabhängigen Errichtung einer Genehmigung nach § 10 Abs. 1 Nr. 4 und 5 StrlSchG sowie einer Betriebsgenehmigung gemäß § 12 Abs. 1 Nr. 1 StrlSchG. Da der für START verwendete Teilchenbeschleuniger zu einer kerntechnischen Anlage gehört, fällt er aber nicht unter den Genehmigungstatbestand des § 10 Abs. 1 StrlSchG.

Gleiches gilt für die strahlenschutzrechtliche Betriebsgenehmigung nach § 12 Abs. 1 Nr. 1 StrlSchG. Diese setzt ebenfalls das Vorhandensein einer Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung voraus und ist bei einer Zuordnung des Teilchenbeschleunigers zu einer kerntechnischen Anlage daher ebenfalls nicht als eigenständige Genehmigung einzuholen.

Die **Genehmigungsvoraussetzungen**, die § 11 Abs. 1 StrlSchG für Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlen aufstellt, sind von der atomrechtlichen Genehmigungsbehörde aber gleichwohl **zu prüfen** und ihre Einhaltung nachzuweisen.

**Erstreckung der atomrechtlichen Genehmigung auf den Umgang mit sonstigen radioaktiven Stoffen** - Eine strahlenschutzrechtliche Genehmigung kommt aber insoweit in Betracht, als im Rahmen des Vorhabens mit sonstigen radioaktiven Stoffen, d.h. chemisch hinreichend rein vorliegenden Radionukliden, die keine Kernbrennstoffe sind, umgegangen werden soll. Für den Umgang mit derartigen Stoffen ist grundsätzlich eine eigenständige Genehmigung nach § 12 Abs. 1 Nr. 3 StrlSchG einzuholen. Nach § 10a Abs. 2 AtG können atomrechtliche Genehmigungen allerdings auf derartige strahlenschutzrechtliche Umgangsgenehmigungen erstreckt werden. § 12 Abs. 4 Nr. 1 StrlSchG stellt klar, dass es in diesem Fall keiner strahlenschutzrechtlichen Genehmigung bedarf. Da beim Betrieb kerntechnischer Anlagen regelmäßig auch mit sonstigen radioaktiven Stoffen umgegangen werden muss, kommt dies in der Praxis häufig vor.<sup>141</sup> Für das Vorhaben erscheint es sinnvoll, eine solche Erstreckung der atomrechtlichen Genehmigung zu beantragen, um Doppelzuständigkeiten und -prüfungen der Genehmigungsbehörden zu vermeiden.

#### 2.4.

### Sonstige fachrechtliche Genehmigungserfordernisse

Atomrechtliche Anlagengenehmigungen haben grundsätzlich keine formelle Konzentrationswirkung.<sup>142</sup> Das bedeutet, dass Genehmigungen, die nach anderen Fachgesetzen erforderlich sind, nicht von der atomrechtlichen Genehmigung erfasst werden, sondern nach Maßgabe des jeweils einschlägigen Gesetzes gesondert eingeholt werden müssen.

#### IMMISSIONSSCHUTZRECHTLICHE GENEHMIGUNGSERFORDERNISSE

Daher könnte möglicherweise eine zusätzliche immissionsschutzrechtliche Genehmigung erforderlich sein. § 8 Abs. 2 Satz 1 AtG betrifft Anlagen, die neben ihren nuklearspezifischen Auswirkungen auch andere schädliche Umweltauswirkungen hervorrufen können und daher trotz des in § 8 Abs. 1 AtG angeordneten Teil-Ausschlusses der immissionsschutzrechtlichen Regelungen einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung nach § 4 Abs. 1 Satz 1 BImSchG bedürfen. Das kann insbesondere im Zusammenhang mit den chemotoxischen Wirkungen der in Anreicherungsanlagen oder Brennelementefabriken verwendeten Nuklide der Fall sein.<sup>143</sup>

Bei diesen Anlagen kann die atomrechtliche Genehmigung die erforderliche Immissionsschutzgenehmigung nach **§ 8 Abs. 2 Satz 1 AtG** einschließen, sodass ihr insoweit abweichend von dem soeben dargestellten Grundsatz eine **beschränkte Konzentrationswirkung** zukommt.

Anlagen bedürfen nur dann einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung, wenn sie in Anhang 1 der 4. BImSchV erwähnt werden. Zwar werden in Ziff. 4.1 der Verordnung Anlagen zur Erzeugung, Spaltung und Aufarbeitung von Kernbrennstoffen von der immissionsschutzrechtlichen Genehmigungspflicht ausgenommen. Allerdings kann etwa ein Genehmigungserfordernis nach Ziff. 9.3 der 4. BImSchV i.V.m. Anhang 2 in Betracht kommen, wenn bestimmte chemotoxische Nuklide in einer Menge gelagert werden sollen, die die in Anhang 2 genannten Mengenschwellen überschreitet. Ob eine immissionsschutzrechtliche Genehmigungspflicht besteht, kann allerdings erst auf Grundlage der genauen Anlagenkonfiguration beurteilt werden.<sup>144</sup>

Die zum jetzigen Zeitpunkt vorliegenden Informationen über das Vorhaben sind für eine abschließende Bewertung, ob eine immissionsschutzrechtliche Genehmigungspflicht besteht, die gemäß § 8 Abs. 2 AtG von der atomrechtlichen Anlagengenehmigung abgedeckt werden könnte, nicht ausreichend. Auch wenn eine immissionsschutzrechtliche Genehmigungspflicht bestünde, stünde dies der Umsetzung des Vorhabens nicht entgegen, da eine solche Genehmigung bei Wahrung der in § 6 Abs. 1 BImSchG genannten Voraussetzungen zu erteilen ist.

### SONSTIGE GENEHMIGUNGSERFORDERNISSE

Auch andere Fachgesetze beinhalten Genehmigungserfordernisse, die für das Vorhaben von Bedeutung sein können. In Betracht kommen etwa solche des Baurechts. So bedürfen Bauwerke, die nicht der nuklearspezifischen Anlagensicherheit dienen und deshalb nicht dem Anlagenbegriff des § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG unterfallen, einer eigenständigen Baugenehmigung. Dazu können reine Verwaltungs- oder Sozialgebäude zählen. Welche Genehmigungserfordernisse konkret entstehen, bestimmt sich ebenfalls auf Grundlage der noch nicht feststehenden Spezifika der geplanten Anlage. Unüberwindbare Genehmigungshindernisse sind auf Grundlage des bisherigen Standes nicht erkennbar.

## 2.5.

### Relevanz der Entsorgungsarchitektur für radioaktive Abfälle in Deutschland

Die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland richtet sich im Wesentlichen nach den §§ 9a AtG ff. und einigen spezialgesetzlichen Regelungen, wie dem Entsorgungsübergangsgesetz (EntsorgÜG) und dem EntsorgFondsG. Auf Verordnungsebene existiert die Atomrechtliche Entsorgungsverordnung (AtEV). Die Vorschriften enthalten im Grundsatz keine Genehmigungsanforderungen an kerntechnische Anlagen. Für die Realisierung des Vorhabens können sie aber dennoch Bedeutung erlangen, soweit sie Anforderungen an den Betrieb einer Anlage oder Pflichten Dritter enthalten, die ggf. der Inbetriebnahme des Vorhabens entgegenstehen können.

Die für diese Aspekte relevanten Vorschriften der Entsorgungsarchitektur werden daher im Folgenden dargestellt und eingeordnet. Die Entsorgung der beim Betrieb des Vorhabens im Anschluss an die Rezyklierung anfallenden Abfälle und die dafür maßgeblichen Vorschriften sind hingegen nicht Gegenstand der Darstellung.

### PFLICHT ZUR DIREKTEN ENDLAGERUNG ABGEBRANNTER BRENNELEMENTE NACH § 9A ABS. 1 ATG

§ 9a Abs. 1 AtG regelt Pflichten der Inhaber atom- oder strahlenschutzrechtlicher Genehmigungen zur **Entsorgung** der in ihrem Betrieb anfallenden radioaktiven Reststoffe. Als **radioaktive Reststoffe** gelten alle beim Betrieb einer kerntechnischen Anlage anfallenden radioaktiven Stoffe.<sup>145</sup>

Obwohl es sich bei § 9a Abs. 1 AtG weder um eine Genehmigungsvoraussetzung noch um einen Genehmigungsausschluss für kerntechnische Anlagen handelt, kommt der Regelung für das Vorhaben eine gesteigerte Bedeutung zu. Sie enthält in Satz 1 Halbsatz 1 eine Pflicht der Betreiber kerntechnischer Anlagen, radioaktive Reststoffe entweder schadlos zu verwerten oder im Rahmen der direkten Endlagerung zu beseitigen: die sogenannte **Sorgepflicht**.

Der Begriff der schadlosen Verwertung steht im Zusammenhang mit dem (früher) angestrebten Brennstoffkreislauf als Idealbild der Kernwirtschaft. Eine gesetzliche oder von der Rechtsprechung allgemein verwendete Definition der schadlosen Verwertung existiert nicht. Eine schadlose Verwertung liegt nach einer in der Literatur entwickelten Definition aber dann vor, wenn radioaktive Reststoffe erneut dem Wirtschaftskreislauf zugeführt werden (können) und

dabei die Zwecke des AtG sowie alle sonstigen rechtlichen Anforderungen an den Umgang mit radioaktiven Stoffen eingehalten werden.<sup>146</sup> Herkömmlich bestand die schadlose Verwertung radioaktiver Reststoffe insbesondere in deren Abgabe an Wiederaufarbeitungsanlagen.<sup>147</sup> Demgemäß handelt es sich bei der **Partitionierung und anschließenden Umwandlung** bestrahlter Brennelemente um eine **Form der schadlosen Verwertung**.

Der **direkten Endlagerung** als zweiter Alternative zur Erfüllung der Sorgspflicht ist eine **Zwischenlagerung** nach § 9a Abs. 1b Satz 1 AtG vorgeschaltet, für die die Kernkraftwerksbetreiber sogenannte standortnahe Zwischenlager zu errichten hatten (§ 9a Abs. 2 Satz 3 AtG). § 9a Abs. 1 Satz 1 Halbsatz 1 AtG sieht grundsätzlich ein Wahlrecht zwischen den Alternativen der direkten Endlagerung und der schadlosen Verwertung vor. Demnach verfolgt das AtG einen **subjektiven Abfallbegriff**, wonach radioaktive Reststoffe erst dann als radioaktive Abfälle anzusehen sind, wenn sich ihr Inhaber zu deren Beseitigung im Wege der Zwischen- und Endlagerung entschlossen hat.<sup>148</sup>

**Übergang der Sorgpflicht der Kraftwerksbetreiber auf BGZ** - § 9a Abs. 1 Satz 1 Halbsatz 2 AtG ermöglichte den Betreibern von Kernkraftwerken im Rahmen des 2017 verabschiedeten Gesetzes zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung, die Sorgpflicht an ein staatliches Unternehmen übergehen zu lassen. Voraussetzung der Abgabe war die Bereitstellung von Mitteln für den neueingerichteten KENFO (§ 2 Abs. 1 Satz 1, Abs. 2 EntsorgÜG). Davon haben die Betreiber der deutschen Kernkraftwerke Gebrauch gemacht und ihre abgebrannten Brennelemente an die bundeseigene Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH (BGZ) übertragen.

Die BGZ ist seitdem Betreiberin der standortnahen Zwischenlager und besitzt damit die radioaktiven Abfälle, die aus dem Betrieb der deutschen kommerziellen Kernkraftwerke stammen. Sollen diese Abfälle in START verarbeitet werden, ist die **maßgebliche Ansprechpartnerin** daher die **BGZ**.

**Ausschluss der Ablieferung an Wiederaufarbeitungsanlagen nach § 9a Abs. 1 Satz 2 AtG steht rechtssicherem Betrieb entgegen** - Die Möglichkeit, zwischen den Alternativen der direkten Endlagerung und der schadlosen Verwertung zu wählen, welche § 9a Abs. 1 Satz 1 Halbsatz 1 AtG einräumt, wird durch Satz 2 der Vorschrift erheblich beschränkt. So ist die Abgabe von bestrahlten Brennelementen, die aus gewerblichen Kernkraftwerken stammen, an Wiederaufarbeitungsanlagen zur schadlosen Verwertung seit dem 1. Juli 2005 nicht mehr zulässig. Damit ist die bislang faktisch allein zur Verfügung stehende Möglichkeit der schadlosen Verwertung hochradioaktiver Reststoffe versperrt.

Das Verbot der Wiederaufarbeitung nach § 9a Abs. 1 Satz 2 AtG steht dem Betrieb des Vorhabens derzeit entgegen. START ist auf die Versorgung mit abgebrannten Brennelementen aus Kernkraftwerken angewiesen. Verbietet die Vorschrift der Abgabe der Brennelemente an die Anlage aber, ist es der BGZ untersagt, derartige Abfälle dem Vorhaben zur Verfügung zu stellen. Aus diesem Grund ist eine **Änderung des § 9a Abs. 2 Satz 2 AtG** eine Voraussetzung für die Umsetzung des Vorhabens.

**Bedeutung des Verwertungsnachweises für Plutonium nach § 9a Abs. 1c AtG** - Für die Wirklichung des Vorhabens ist zudem § 9a Abs. 1c AtG von Bedeutung. Die Vorschrift sieht vor, dass für eine schadlose Verwertung von Kernbrennstoffen, die trotz § 9a Abs. 1 Satz 2 AtG zulässig ist – gemeint ist eine vor dem 1. Juli 2005 vorgenommene Aufarbeitung – die Verwertung des im Rahmen der Aufarbeitung abgetrennten Plutoniums nachzuweisen ist.

Die Vorschrift ist für das hiesige Vorhaben insoweit relevant, als im Rahmen der Rezyklierung auch die innerhalb des Reaktors abgebrannten Brennelemente partitioniert werden sollen. Insofern unterliegt auch der Betrieb des Vorhabens der Nachweispflicht für die Verwertung des abgetrennten Plutoniums. Sie würde der Partitionierung von in früheren Transmutationszyklen abgebrannten Brennelementen entgegenstehen, wenn START nicht zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität verwendet werden sollte. Denn der geforderte **Verwertungsnachweis für Plutonium** kann nach § 9a Abs. 1c Satz 2 und 3 AtG nur erbracht werden, wenn dargelegt wird, dass das gewonnene Plutonium in **Reaktoren zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität** eingesetzt werden soll.

Im Rahmen einer Änderung von § 9a Abs. 1 Satz 2 AtG sollte Abs. 1c der Vorschrift daher ebenfalls geändert werden, um das Vorhaben unabhängig von einer etwaigen Elektrizitätserzeugung zu ermöglichen.

**Zur möglichen Revisibilität des atomrechtlichen Abfallbegriffs** - Ein weiterer zu bewältigender Aspekt besteht darin, dass die bestrahlten Brennelemente aus den Kernkraftwerken rechtlich derzeit als Abfälle zu betrachten sind. Der Übergang der Sorgepflicht in § 2 Abs. 1 Satz 1 EntsorgÜG setzt seinem Wortlaut nach voraus, dass es sich bei den zu übertragenden Reststoffen um radioaktive Abfälle handelte. Die Möglichkeit der schadlosen Entsorgung wird in diesem Zusammenhang nicht erwähnt. Spätestens seit dem Übergang der Sorgepflicht unterfallen die abgebrannten Brennelemente damit dem Begriff der radioaktiven Abfälle und nicht mehr dem Oberbegriff der (auch schadlos verwertbaren) radioaktiven Reststoffe. Auch für den vorherigen Zeitraum, in dem die Brennelemente sich noch im Besitz der EVU befanden, dürfte dies anzunehmen sein, da ihnen die einzige zu diesem Zeitpunkt bestehende Möglichkeit der schadlosen Verwertung durch Wiederaufarbeitung seit dem 1. Juli 2005 nach § 9a Abs. 1 Satz 2 AtG versperrt gewesen ist. Sie dürften die bestrahlten Brennelemente spätestens seitdem als Abfälle betrachtet haben, was unter dem subjektiven Abfallbegriff für eine entsprechende rechtliche Einordnung ausreicht.

§ 9a Abs. 1 Satz 1 AtG sieht ein Alternativitätsverhältnis zwischen der schadlosen Verwertung von Reststoffen und ihrer Entsorgung als Abfälle vor. Dürften Brennelemente, die einmal als Abfall qualifiziert sind, nicht mehr schadlos verwertet werden, stünde dies einem Betrieb des Vorhabens entgegen, weil es sich bei der Partitionierung und anschließenden Umwandlung um eine Form der schadlosen Verwertung handelt. Nur wenn die Einordnung als radioaktive Abfälle im rechtlichen Sinne revisibel ist, ist eine Verwendung im Rahmen von START daher rechtlich zulässig.

Dass es sich bei dem Abfallbegriff um einen subjektiven, d.h. nach den Vorstellungen des Besitzers zu bestimmenden Begriff handelt, spricht dafür, dass die Einstufung eines radioaktiven Reststoffs als Abfall revisibel ist. Für eine **Revisibilität des Abfallbegriffs** wird in systematischer Hinsicht zudem angeführt, dass radioaktive Abfälle bei Unterschreitung radiologischer Grenzwerte nach dem StrlSchG freigegeben werden können und dann nicht mehr der atom- und strahlenschutzrechtlichen Überwachung unterliegen.<sup>149</sup>

Von der Revisibilität ist offenkundig auch der Gesetzgeber bei der Regelung des sog. Atomausstiegs ausgegangen: „Satz 3 verpflichtet zudem den Nachweisverpflichteten, erhebliche Veränderungen der der Entsorgungsvorsorge zugrunde liegenden Voraussetzungen der zuständigen Behörde unverzüglich mitzuteilen. Hiervon wird auch der Fall erfasst, dass der Entsorgungspflichtige einen Wechsel zwischen den nach § 9a Abs. 1 zulässigen Entsorgungspfaden vornimmt“ (BT-Drs. 14/6890, S. 22).

Allerdings ist das derzeitige gesetzliche System des § 9a AtG einschließlich des EntsorgÜG, des EntsorgFondsG und des NEP ersichtlich auf die Zwischen- und abschließende Endlagerung einmal als Abfälle eingestuft abgebrannter Brennelemente ausgerichtet, was sich insbesondere aus § 9a Abs. 1b Satz 1 AtG ergibt. Dies könnte gegen eine Revisibilität des Abfallbegriffs angeführt werden. Das Argument, der Abfallbegriff sei aufgrund der Möglichkeit zur Freigabe revisibel, erscheint zudem nicht (mehr) zwingend, da die Freigabe (auf Basis der aktuellen Rechtslage) die übergeordnete Eigenschaft als radioaktiver Stoff entfallen lässt und nicht spezifisch diejenige als Abfall.

Aus diesem Grund ist auch eine gesetzliche Klarstellung, wonach bereits existierende radioaktive Abfälle dennoch schadlos verwertet werden können, für einen rechtssicheren Betrieb des Vorhabens sinnvoll.

### MAßGABEN DES NATIONALEN ENTSORGUNGSPROGRAMMS (NEP)

§ 2c Abs. 1 AtG sieht die Aufstellung eines NEP über die nationale Strategie über die sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und (sonstiger) radioaktiver Abfälle vor. Die Vorschrift geht auf die Euratom-Richtlinie 2011/70/Euratom zurück.

Im August 2015 hat das BMU erstmals das NEP vorgelegt.<sup>150</sup> Es legt die Strategie für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland fest. Es geht von einer tiefengeologischen Endlagerung der Abfälle in zwei getrennten Endlagern für schwach- und mittelradioaktive Abfälle einerseits im Schacht Konrad sowie für hochradioaktive Abfälle, welche sich vorrangig aus abgebrannten Brennelementen und Abfällen aus der Wiederaufarbeitung zusammensetzen, andererseits aus.

Den strategischen Vorgaben des NEP kommt keine Normqualität zu. Sie sind daher nicht verbindlich, soweit sie sich nicht mit dem Inhalt zwingender Rechtsvorschriften decken.<sup>151</sup> Gleichwohl ist festzustellen, dass das NEP die Transmutation bzw. Umwandlung bestrahlter Brennelemente nicht als Möglichkeit in Erwägung zieht, die sichere Entsorgung der bereits angefallenen hochradioaktiven Abfälle durch eine Reduzierung ihres Volumens und ihrer Langlebigkeit zu erleichtern. Für eine **Verankerung der Technologie in der nationalen Entsorgungsstrategie** wäre daher eine Änderung des NEP erforderlich. Eine solche ist grundsätzlich möglich: eine Überprüfung und Anpassung der Vorgaben ist nach § 2c Abs. 3 AtG mindestens in Abständen von zehn Jahren vorzunehmen. Damit könnte sich das Jahr 2025, in dem erstmals eine turnusmäßige Überprüfung des NEP ansteht, für eine Aufnahme der Transmutationstechnologie anbieten.

Die Berücksichtigung von Verfahren zur Reduktion von Volumen und Langlebigkeit hochradioaktiver Abfälle im NEP ist rechtlich auch nicht ausgeschlossen. So sieht § 2d Nr. 1 AtG vor, dass das NEP eine Beschränkung der anfallenden Abfallmenge auf das „vernünftigerweise“ realisierbare Maß anstrebt und insbesondere auch die Weiter- und Wiederverwertung von Material in den Blick nimmt. Diese Vorgabe an das NEP, die auf Art. 4 Abs. 3 Buchst. a RL-2011/70/Euratom zurückgeht, ermöglicht daher schon derzeit die Berücksichtigung von Ansätzen zur Minimierung des Abfallaufkommens. Einen solchen Ansatz stellt die Transmutationstechnologie dar.

## 2.6.

**Ergänzende Vorgaben des Völker- und Unionsrechts**

Ergänzend zu den nationalen Rechtsvorschriften existieren auch völkerrechtliche Abkommen sowie europäischen Rechtsakte, insbesondere von Euratom, in Bezug auf kerntechnische Anlagen. Ihre Bedeutung ist neben derjenigen der nationalstaatlichen Regelungen jedoch beschränkt.

Kernanliegen der internationalen Verträge zum Atomrecht sind die Nichtverbreitung von Kernwaffen sowie die Gewährleistung der nuklearspezifischen Sicherheit und Haftung im Schadensfall. Einen bedeutenden internationalen Vertrag stellt der Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen (NVV) vom 1. Juli 1968 dar.

Hinsichtlich der nuklearspezifischen Sicherheit existieren insbesondere das Übereinkommen über nukleare Sicherheit vom 7. Januar 1997 sowie das Gemeinsame Übereinkommen vom 5. September 1997 über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle. Gemein ist den genannten sowie den weiteren von Deutschland unterzeichneten Abkommen, dass sie (weitgehend) keine unmittelbar von einem Antragssteller zu beachtenden Anforderungen oder von einem Genehmigungsinhaber einzuhaltenden Pflichten beinhalten. Sie finden ihre **Umsetzung bereits in den Vorschriften des nationalen Rechts**, insbesondere des AtG.<sup>152</sup>

Da sie auch nicht die Einführung neuer ziviler Technologien auf dem Gebiet der Kerntechnik ausschließen, kommt den **völkerrechtlichen Abkommen** daher **keine entscheidende Rolle** für die Genehmigung und den Betrieb des Vorhabens zu (zu der Ausnahme des PÜ über die Haftung siehe oben [4\\_2.2.6](#)).

Auf Ebene des Europarechts spielt insbesondere der 1957 als Teil der Römischen Verträge unterzeichnete **Euratom-Vertrag** eine Rolle, der auch nach Schaffung der Europäischen Union weiterhin in Kraft ist. Der Vertrag richtet sich jedoch ebenso wie die sonstigen völkerrechtlichen Abkommen in erster Linie an die Mitgliedstaaten und enthält insbesondere auch **keine Verpflichtung zum Ausschluss bestimmter Technologien**. Im Gegenteil sieht er in seinem Kapitel 1 die **Förderung der Kernforschung** durch die Kommission vor. Vergleichbares gilt für die auf seiner Grundlage wurden erlassenen Richtlinien, die die kerntechnische oder strahlenschutzrechtliche Sicherheit betreffen. Neben den nationalen Bestimmungen können ihnen für die Erteilung einer Errichtungs- oder Betriebsgenehmigung keine konkreten Anforderungen entnommen werden.

### 3 Voraussetzungen der Nachnutzung von Einrichtungen früherer KKW

---

Die Errichtung des Vorhabens an einem Kraftwerksstandort ermöglicht, neben dem Gelände gegebenenfalls Einrichtungen des bisherigen KKW durch Transmutex weiter zu nutzen. Insbesondere könnte eine etwaige Möglichkeit, das vorhandene Reaktorgebäude für die Aufstellung der Neutronenquelle zu nutzen, zu einer ressourcenschonenden Verwirklichung des Vorhabens beitragen. Daneben kommen für eine Übernahme Sicherungsanlagen wie Zäune und sonstige Wachanlagen sowie (Verwaltungs-)Gebäude ohne nuklearspezifische Relevanz in Betracht. Denkbar ist jedoch auch die Übernahme verfahrenstechnischer Einrichtungen der Stromerzeugung, sofern der Genehmigungsrechtsrahmen künftig die Neugenehmigung von Transmutationsanlagen auch dann erlaubt, wenn sie die bei der Umwandlung radioaktiver Abfälle entstehende Wärme in Elektrizität umwandeln und entgeltlich in Stromnetze einspeisen.

Im Folgenden werden die rechtlichen Voraussetzungen einer solchen Übernahme von Einrichtungen untersucht. Dabei ist zwischen den rechtlichen Anforderungen, denen START dabei unterliegen würde, und denen des bisherigen Betreibers des KKW zu unterscheiden.

#### 3.1.

#### **Bedeutung der Übernahme für die Genehmigungsfähigkeit des START-Moduls**

---

Innerhalb des rechtlichen Rahmens, dem die Genehmigung des Vorhabens unterliegt, bestehen keine Hindernisse, die der Übernahme von Einrichtungen eines KKW *per se* entgegenstünden.

Die zu übernehmenden Anlagenteile wären in den Antragsunterlagen zu beschreiben und die Einhaltung der Anforderungen des § 7 Abs. 2 AtG nachzuweisen, sofern sie eine Relevanz für das nuklearspezifische Gefahrenpotenzial der Anlage aufweisen. Das wäre insbesondere bei der Übernahme des Reaktorgebäudes, von Verfahrenseinrichtungen sowie von Sicherungsanlagen der Fall. Dabei könnte nicht ohne Weiteres davon ausgegangen, dass die Anforderungen der Schadensvorsorge nach § 7 Abs. 2 Nr. 3 AtG bei der Übernahme von Anlagenteilen gewahrt wird. Es müsste dargelegt werden, dass die übernommenen Anlagenteile trotz ihres Alters zum Zeitpunkt der Genehmigungserteilung weiterhin dem Stand von Wissenschaft und Technik genügen und dies insbesondere auch für ihre Verwendung im Rahmen von START gewährleistet ist. In diesem Rahmen könnte unterstützend ggf. auf die Genehmigungsunterlagen des betreffenden Kernkraftwerks zurückgegriffen werden, sofern dargelegt werden kann, dass die dortigen Grundlagen auch heute noch dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen und das Alter der übernommenen Einrichtungen keine negativen Auswirkungen auf die Gewährleistung des Sicherheitsniveaus hat. Sofern dies gelingt, kommt es für die Genehmigung von START nicht darauf an, dass die Anlagenteile bereits in der Vergangenheit verwendet worden sind.

Gebäude und Einrichtungen ohne Bezug zum nuklearspezifischen Gefahrenpotenzial, wie etwa Verwaltungsgebäude, unterfallen hingegen bereits nicht dem atomrechtlichen Anlagenbegriff und könnten daher ohne atomrechtliche Besonderheiten übernommen werden.

## 3.2.

**Möglichkeit der Übergabe von Einrichtungen und Anlagenteilen durch Betreiber**

Die rechtlichen Anforderungen, denen der Betreiber eines Kernkraftwerks bei Stilllegung und Abbau ihrer KKW unterliegt, sind für die Übernahme einzelner Einrichtungen für das Vorhaben relevant.

**RECHTSRAHMEN BEI STILLLEGUNG UND ABBAU VON KKW**

Der Rechtsrahmen für Stilllegung und Abbau von KKW ergibt sich im Wesentlichen aus § 7 Abs. 3 AtG. Die Möglichkeit, zum Anlagenbestand zählende Einrichtungen zu übertragen, wird insbesondere von der Pflicht zum unverzüglichen Abbau der Anlagen sowie dem Inhalt der Stilllegungs- und Abbaugenehmigung (**SAG**) bestimmt.

**Verpflichtung, KKW unverzüglich stillzulegen und abzubauen** - Der Betreiber unterliegt nach § 7 Abs. 3 Satz 4 AtG der Pflicht, das KKW unverzüglich stillzulegen und abzubauen. Diese Pflicht trat mit dem Erlöschen der Berechtigung zum Leistungsbetrieb ein.

Die Pflicht, KKW nach Ende des Leistungsbetriebs unverzüglich stillzulegen und abzubauen, könnte einer Übernahme von Anlagenteilen für die Zwecke des Vorhabens gegebenenfalls entgegenstehen. § 7 Abs. 3 Satz 4 AtG enthält sowohl eine inhaltliche als auch eine zeitliche Anordnung: erstens *müssen* KKW abgebaut werden, zweitens hat dies *unverzüglich* nach dem Ende des Leistungsbetriebs zu geschehen. Die Pflicht zur Stilllegung der Anlage, die dem Abbau vorausgeht, kann im Rahmen der vorliegenden Betrachtung ausgeklammert werden. Sie ist für die Übernahme von Einrichtungen für die Zwecke des Vorhabens nicht bedeutsam.

Die Pflicht zum Abbau betrifft KKW nicht umfassend, sondern bezieht sich spezifisch auf Anlagen zur Kernspaltung nach § 7 Abs. 1 Satz 1, 1a AtG. Der Anlagenbegriff der Abbaupflicht entspricht daher demjenigen des § 7 Abs. 1 AtG. Daraus folgt, dass von der Pflicht zum Abbau nur solche Einrichtungen umfasst werden, die zum atomrechtlichen Anlagenbegriff zählen.<sup>153</sup>

Unter dem von den Betreibern durchzuführenden **Abbau** versteht man „die Beseitigung von Strukturen (Gebäude, Systeme, Komponenten), die Regelungsgegenstand der Genehmigung zur Errichtung und zum Betrieb der Anlage nach § 7 Absatz 1 AtG waren oder entsprechend zu bewerten sind. Die Beseitigung umfasst hierbei die Demontage, den Umgang mit den anfallenden Reststoffen sowie die Übergabe der anfallenden Reststoffe an eine anlageninterne oder -externe Einrichtung.“<sup>154</sup> Abbau meint damit in erster Linie die Demontage der kerntechnischen Anlagenteile; eine Pflicht, sämtliche Einrichtungen und Komponenten eines KKW zu entfernen und eine „grüne Wiese“ herzustellen, besteht nicht.<sup>155</sup> Der Begriff des Abbaus schließt nach der wiedergegebenen Definition die Übergabe von Reststoffen an Dritte ein.

Der Abbau der kerntechnischen Anlage muss **unverzüglich** erfolgen. In der Rechtssprache bedeutet das Adjektiv „unverzüglich“ regelmäßig eine Handlung *ohne schuldhaftes Zögern*. In den Gesetzesmaterialien finden sich zwar keine Hinweise darauf, dass dies auch im Rahmen des AtG so gemeint gewesen ist.<sup>156</sup>

Angesichts der Verbreitung dieser Definition dürfte jedoch zu unterstellen sein, dass der Gesetzgeber ein abweichendes Begriffsverständnis deutlich gemacht hätte. Allerdings bedeutet unverzüglich auch nach der herkömmlichen Definition nicht, dass ohne jegliche Verzögerung gehandelt werden muss. Vielmehr müssen nur vermeidbare, d.h. schuldhaftige Verzögerungen unterlassen werden. Sind Teile eines Abbaus aus rechtlichen oder tatsächlichen Gründen zu einem gegebenen Zeitpunkt noch nicht möglich, so stellt deren Unterlassung keinen Verstoß gegen die Pflicht zum unverzüglichen Abbau dar.<sup>157</sup>

**Rolle der SAG** - Stilllegung und Abbau der KKW werden nach Maßgabe der den Betreibern erteilten SAG durchgeführt. Denn nach § 7 Abs. 3 Satz 1 AtG bedürfen diese einer eigenständigen atomrechtlichen Genehmigung.

Der **Inhalt der SAG** ist stark von den **Besonderheiten des jeweiligen KKW** und dem von den Betreibern am jeweiligen Standort verfolgten Stilllegungs- und Abbaukonzept abhängig. So kann ein entsprechendes Projekt auf mehrere Phasen verteilt werden, die jeweils eigenständig genehmigt werden. Auch enthalten die SAG regelmäßig eine Reihe von standortspezifischen Auflagen und sonstigen Nebenbestimmungen.<sup>158</sup>

Insbesondere ist es möglich, über die SAG zu regeln, welche Anlagenteile aus der atomrechtlichen Überwachung entlassen werden können, wodurch sich der Umfang der verbleibenden Anlage verringert. Dazu der Stilllegungsleitfaden des BMUV (RS-Handbuch 3-73):

*„Mit den separaten Genehmigungen nach § 7 Absatz 3 AtG können die Bedingungen festgelegt werden, nach denen Anlagenteile oder Nebeneinrichtungen, die für die Erreichung der in § 1 AtG bezeichneten Zwecke im Rahmen des Stilllegungsvorhabens nicht mehr benötigt werden und gegebenenfalls anderweitig verwendet werden sollen, aus der atom- und strahlenschutzrechtlichen Überwachung entlassen werden und gegebenenfalls somit der Anlagenumfang wie auch die Grenzen des Kontroll- und Überwachungsbereiches nach StrISchV neu festgelegt werden.“<sup>159</sup>*

Die Verfahren nach § 7 Abs. 3 Satz 1 AtG sind an den einzelnen Kraftwerksstandorten unterschiedlich weit fortgeschritten. Diese regeln die Abbauphasen betreffend der Handhabung radioaktiver Reststoffe und Abfälle sowie die atomrechtliche Freimessung und Freigabe der Gebäudestrukturen, sowie den Abbau der Reaktordruckbehälter und des biologischen Schilts.

## MÖGLICHER GESTALTUNGSSPIELRAUM FÜR DIE ÜBERGABE VON EINRICHTUNGEN UND ANLAGENTEILEN

Auf Grundlage dieses Rechtsrahmens ergeben sich für eine Übergabe von Einrichtungen des bisherigen KKW unterschiedliche Ansatzpunkte.

**Übergabe von nicht dem Anlagenbegriff unterfallenden Einrichtungen** - Zunächst stehen der Übernahme von Einrichtungen, die nicht dem atomrechtlichen Anlagenbegriff zuzurechnen sind, nach geltendem Recht keine rechtlichen Hindernisse entgegen. Maßgebend dafür, dass eine Einrichtung als Teil einer kerntechnischen Anlage gilt, ist, ob sie in einem Zusammenhang mit dem nuklearspezifischen Gefahrenschutz steht (dazu oben ).

Bei Einrichtungen, bei denen dies nicht der Fall ist, kann eine Übernahme durch die Betreibergesellschaft des Vorhabens von vornherein nicht gegen die Pflicht zum unverzüglichen Abbau der Anlage verstoßen. Die Möglichkeit zur Übernahme derartiger Einrichtungen wird auch nicht durch die 1. SAG eingeschränkt.

**Übergabe von Anlagenteilen** - Bei Einrichtungen, die dem Anlagenbegriff unterfallen, richtet sich die Möglichkeit zur Übergabe nach den Bestimmungen der betreffenden SAG sowie nach § 7 Abs. 3 Satz 3 AtG.

### Grundsätzliche Zulässigkeit und Varianten der Übergabe

Die Weiternutzung von Anlagenteilen ist nach den Vorgaben des Stilllegungsleitfadens, die ihre Umsetzung in den jeweiligen SAG finden, grundsätzlich mit dem Begriff des Abbaus vereinbar. Für eine Weiternutzung kommen mehrere rechtliche Instrumente in Betracht:

So können Anlagenteile, bei denen aufgrund ihrer Betriebshistorie eine Kontaminierung oder Aktivierung ausgeschlossen werden kann und die sich nie in einem strahlenschutzrechtlichen Kontrollbereich befanden, aus der atomrechtlichen Überwachung herausgegeben werden

(Herausgabe).<sup>160</sup> Dafür können beispielsweise Zaunanlagen in Betracht kommen. Andere, insbesondere radioaktive Bestandteile können zudem im Anschluss an eine Dekontamination nach den Vorgaben der StrlSchV freigegeben werden (**Freigabe**) mit der Folge, dass sie nicht mehr der atom- und strahlenschutzrechtlichen Überwachung unterliegen.<sup>161</sup>

Für die Nachnutzung von Anlagenteilen gerade in der kerntechnischen Industrie besteht eine weitere Option, die ggf. ohne eine vorherige Freigabe auskommt. So sieht der Stilllegungsleitfaden die Möglichkeit vor, Anlagenteile zur Minimierung der anfallenden Abfälle schadlos zu verwerten, d. h. einer anderen kerntechnischen Nutzung zuzuführen. Dabei handelt es sich um eine **schadlose Verwertung** im Sinne des § 9a Abs. 1 AtG.<sup>162</sup>

Anders als die Aufarbeitung bestrahlter Brennelemente, die ebenfalls eine Form der schadlosen Verwertung darstellt, wird die schadlose Verwertung von leicht- und mittelradioaktiven Reststoffen nicht durch § 9a Abs. 1 Satz 2 AtG untersagt und ist weiterhin möglich.

#### Verankerung der Übergabe in der 2. SAG

Einige SAG lassen die Herausgabe oder die Weiternutzung von abgebauten Anlagenteilen durch sonstige kerntechnische Anlagen ausdrücklich zu.<sup>163</sup> Auch der Stilllegungsleitfaden geht von der grundsätzlichen Zulässigkeit der Übernahme von Anlagenteilen aus. Die Bedingungen ihrer Entlassung aus der aufsichtlichen Überwachung des bisherigen KKW könnten in einer SAG festgelegt werden.<sup>164</sup>

Für eine rechtssichere Abstimmung des Abbauvorhabens mit der Errichtung des hiesigen Vorhabens sollte darauf hingewirkt werden, den Umfang der geplanten Nachnutzung und den dafür zu entwickelnden Übergabeprozess zum Bestandteil der SAG zu machen. Ohne eine solche genehmigungsrechtliche Verankerung bestünde das Risiko eines atomaufsichtlichen Einschreitens. Auch würde sich die Weiternutzung von Anlagenteilen auf die einzuhaltenden strahlenschutzrechtlichen Freigabewerte auswirken. So unterscheidet § 36 Abs. 1 Nr. 5 und 6 StrlSchV im Falle der spezifischen Freigabe danach, ob die Freigabe von Gebäuden zur Weiterverwendung oder zum Abriss erfolgt.

#### Keine Verletzung der Pflicht zum unverzüglichen Abbau bei Übergabe

Durch die Übergabe von Anlagenteilen würde der bisherige Betreiber nicht gegen die Pflicht zum unverzüglichen Abbau aus § 7 Abs. 3 Satz 4 AtG verstoßen. Die Begründung zu § 7 Abs. 3 Satz 4 AtG erwähnt als Anwendungsfall der Abbaupflicht (dort „Rückbau“ genannt) zwar ausschließlich den Abriss: „*Unverzüglich ist beispielsweise ein Rückbau von Doppelblockanlagen auch dann, wenn Anlagenteile des zuerst rückzubauenden Blocks zunächst nicht abgerissen werden, um noch für die Behandlung von Abfällen beim Rückbau des zweiten Blocks genutzt zu werden.*“<sup>165</sup>

Dies bedeutet allerdings **nicht**, dass der **Abbauverpflichtung nur durch eine vollständige Demontage** bzw. einen Abriss der Anlage Rechnung getragen werden kann. Es sprechen beachtliche Gründe dafür, den Rechtsbegriff des Abbaus weiter zu verstehen. So ist das Ziel des Abbaus einer kerntechnischen Anlage i.S.d. § 7 Abs. 3 AtG ihre Entlassung aus der atom- und strahlenschutzrechtlichen Überwachung. Ist dieser Zeitpunkt erreicht, so gilt der Abbau als abgeschlossen. Dieses Verständnis des Abbau-Begriffs findet sich auch an anderer Stelle im **Stilllegungsleitfaden** wieder:

*„Ausgehend von der Zweckbestimmung des AtG sollte, auch in Übereinstimmung mit internationalen Empfehlungen [...] letztendliches Ziel aller Stilllegungsmaßnahmen die Entlassung kerntechnischer Anlagen aus der atom- und strahlenschutzrechtlichen Überwachung sein. Die Stilllegungsmaßnahmen können auch durch die Überführung der noch nicht freigegebenen Restanlage in eine andere nach Atom- oder Strahlenschutzrecht genehmigte Nutzung beendet werden.“*<sup>166</sup>

Ein Abbau im Sinne des AtG ist daher dann abgeschlossen, wenn eine Anlage insgesamt aus der atomrechtlichen Überwachung entlassen wurde oder **weiterhin bestehende Anlagenteile** jedenfalls **einer anderen** atomrechtlich genehmigten **Anlage zugeordnet** worden sind. Dem steht auch die zitierte Passage aus der Gesetzentwurfsbegründung nicht entgegen, da sie lediglich exemplarischen Charakter hat und gerade nicht die Möglichkeit der Freigabe oder Weiternutzung behandelt. Es gibt zudem keinen durchgreifenden Grund anzunehmen, der Rechtsbegriff des Abbaus setze voraus, dass Anlagenteile, die durch eine andere Anlage weitergenutzt werden, nicht an Ort und Stelle verbleiben dürften. Denn aus rechtlicher Sicht macht es keinen Unterschied, an welchem Ort sich die Anlagenteile, die in einer anderen Anlage weitergenutzt werden, befinden.

Die Übernahme von Anlagenteilen durch die Betreibergesellschaft des Vorhabens dürfte daher als Teil des Abbaus i.S.d. § 7 Abs. 3 Satz 1 AtG zu bewerten sein. Ein Verstoß des Betreibers gegen seine Pflicht aus § 7 Abs. 3 Satz 4 AtG ginge damit – bei unverzüglichem Handeln – nicht einher. Damit verstößt es nicht gegen die Pflicht zum unverzüglichen Abbau, Anlagenteile eines KKW auch an Ort und Stelle für ein START-Modul zu übernehmen. Durch eine gesetzliche Klarstellung, wonach die Pflicht zum unverzüglichen Abbau einer Anlage gemäß § 7 Abs. 3 Satz 4 AtG auch durch eine Übernahme von Anlagenteilen durch Dritte am selben Standort erfüllt wird, könnte die Rechtssicherheit für eine Übergabe jedoch weiter erhöht werden.

### 3.3.

#### Ergebnis

Eine Übernahme von Einrichtungen, die nicht dem Anlagenbestand des bestehenden KKW zuzuordnen sind, ist rechtlich möglich. Grundsätzlich gilt dies auch für Anlagenteile, soweit dabei die Anforderungen an die Heraus- bzw. Freigabe beachtet werden. Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens für START müsste der Nachweis erbracht werden, dass die übernommenen Anlagenteile weiterhin und im Zusammenspiel mit den restlichen Bestandteilen des Vorhabens den Anforderungen insbesondere der Schadensvorsorge Rechnung tragen.

## 4 Finanzierung des Vorhabens durch den KENFO

Angesichts der Verantwortung des Bundes für die Entsorgung stellt sich die Frage, unter welchen Voraussetzungen das Vorhaben durch Mittel des KENFO finanziert werden könnte. Dabei ist zwischen einer *indirekten* Finanzierung durch Zahlungen des KENFO an die Betreibergesellschaft des Vorhabens für die Umwandlung hochradioaktiver Abfälle und einer *direkten* Finanzierung durch eine Beteiligung an der Betreibergesellschaft selbst zu unterscheiden. Die Frage einer möglichen Finanzierung ist im Grundsatz unabhängig von den Genehmigungsvoraussetzungen und sonstigen rechtlichen Realisierungsbedingungen des Vorhabens zu beurteilen. Gleichwohl wirken diese sich insbesondere auf die Möglichkeit einer indirekten Finanzierung aus.

Die Finanzierung der sicheren Entsorgung der radioaktiven Abfälle aus der gewerblichen Nutzung der Kernenergie wird nach § 1 Abs. 2 und § 3 Abs. 1 EntsorgFondsG durch den in der Rechtsform einer Stiftung des öffentlichen Rechts errichteten und vom Bund getragenen KENFO wahrgenommen. Dies dient dazu, die Finanzierung der Kosten für die sichere Entsorgung der radioaktiven Abfälle aus dem Kraftwerksbetrieb auch nach Beendigung der gewerblichen Elektrizitätserzeugung mit Kernkraftwerken dauerhaft sicherzustellen. Darin liegt gemäß § 1 Abs. 1 EntsorgFondsG der Zweck des KENFO. Das Stiftungsvermögen des KENFO wurde gemäß § 7 EntsorgFondsG von den Kernkraftwerksbetreibern aufgebracht und beträgt knapp 24 Mrd. Euro.

### 4.1.

#### Indirekte Finanzierung durch Erstattung von Entsorgungskosten

Im Gegenzug für die Erbringung ihres Anteils am KENFO-Stiftungsvermögen können die Betreiber der Kernkraftwerke radioaktive Abfälle an den Bund abgeben und sich dadurch ihrer atomrechtlichen Entsorgungsverpflichtung nach § 9a Abs. 1 AtG entledigen (§ 2 Abs. 1 Satz 1, Abs. 2 EntsorgÜG). Die Abgabe der Abfälle und Übertragung der Sorgepflicht erfolgt nicht an den Bund selbst, sondern an eine von diesem als Alleingesellschafter errichtete privatrechtliche Gesellschaft, die BGZ. Der BGZ wurden gemäß § 3 Abs. 1 Satz 1 EntsorgÜG auch die bestehenden standortnahen Zwischenlager der Kraftwerksbetreiber übertragen. Damit liegt die Pflicht zur sicheren Entsorgung der radioaktiven Abfälle aus dem Kraftwerksbetrieb bei der BGZ.

Sollte sich die BGZ dazu entschließen, die im Brennelemente-Zwischenlager eines deutschen Kernkraftwerks gelagerten hochradioaktiven Abfälle mittels eines START transmutieren zu lassen, so würde sich die Frage stellen, ob Mittel des KENFO genutzt werden könnten, um die ihr dafür entstehenden Kosten zu erstatten.

#### KOSTEN DER UMWANDLUNG IN START ALS ENTSORGUNGSKOSTEN I.S.D. ENTSORGFONDSG

Auf Basis der derzeitigen Rechtslage ist es der BGZ nicht gestattet, die von ihr verwalteten hochradioaktiven Abfälle an den Betreiber von START abzugeben. Dem steht das Verbot der Abgabe radioaktiver Abfälle an Wiederaufarbeitungsanlagen nach § 9a Abs. 1 Satz 2 AtG entgegen (dazu oben [4\\_2.5.1](#)). Daher ist die Umwandlung der angefallenen radioaktiven Abfälle derzeit ausgeschlossen und entsprechende Kosten können der BGZ nicht entstehen.

Sollte § 9a Abs. 1 Satz 2 AtG aber so geändert werden, dass er einer Abgabe der hochradioaktiven Abfälle zur Umwandlung in START nicht mehr entgegensteht, wäre eine Finanzierung insbesondere nach den Vorschriften des EntsorgFondsG aber grundsätzlich denkbar, weshalb im Folgenden ihre rechtlichen Voraussetzungen geklärt werden.

**Begriff der Entsorgungskosten** - Aufgabe des KENFO ist es gemäß § 3 Abs. 1 EntsorgFondsG insbesondere, dem Bund die Kosten, die diesem seit dem Übergang der Verpflichtung nach § 9a Abs. 1 AtG für die sichere Entsorgung der radioaktiven Abfälle aus Kernkraftwerken entstehen, zu ersetzen. Gemäß § 10 Abs. 1 EntsorgFondsG dürfen die Mittel des Fonds nur zur Erfüllung seines Zwecks sowie nach Maßgabe des § 3 Abs. 1 EntsorgFondsG verwendet werden. Damit dürfen aus dem Fondsvermögen lediglich Entsorgungskosten finanziert werden. Eine Erstattung von Kosten, die der BGZ für die Umwandlung radioaktiver Abfälle mittels START entstünden, käme rechtlich daher dann in Betracht, wenn die Kosten der Umwandlung als Entsorgungskosten i.S.d. EntsorgFondsG zu bewerten wären.

Nach § 2 Abs. 2 Satz 1 EntsorgFondsG sind Entsorgungskosten die Kosten der Zwischenlagerung und der Endlagerung radioaktiver Abfälle sowie der damit zusammenhängenden Maßnahmen, die nach den Bestimmungen des EntsorgÜG, des StandAG, des AtG und der aufgrund Letzterem erlassenen Rechtsverordnungen vom Fonds zu erstatten sind.

**Umwandlung hochradioaktiver Abfälle als mit der Endlagerung zusammenhängende Maßnahme** - Bei der Umwandlung hochradioaktiver Abfälle handelt es sich weder um eine Zwischen- noch um eine Endlagerung. Die dabei anfallenden Kosten könnten daher nur dann Entsorgungskosten i.S.v. § 2 Abs. 2 Satz 1 EntsorgFondsG, wenn die Umwandlung als eine mit der (End-)Lagerung zusammenhängende Maßnahme zu betrachten wäre. Dafür spricht, dass die Umwandlung in START insofern der Endlagerung dient, als sie die Voraussetzungen für eine zeitlich erheblich kürzere und überdies nuklearspezifisch weniger gefährliche Endlagerung von Abfällen mit geringerem Volumen schafft.

Allerdings handelt es sich bei der Umwandlung radioaktiver Abfälle um eine schadlose Verwertung i.S.d. § 9a Abs. 1 Satz 1 AtG. Die Entsorgungsalternative der schadlosen Verwertung wird dort der direkten Endlagerung, d. h. der Einlagerung der Abfälle ohne vorherige Aufarbeitung, entgegengestellt. Dies könnte dafür sprechen, Kosten, die im Zusammenhang mit Maßnahmen der schadlosen Verwertung entstehen, nicht als Kosten zu bewerten, die mit der Endlagerung zusammenhängen. Nach § 2 Abs. 2 Satz 1 EntsorgFondsG gelten jedoch nicht nur Kosten der *direkten* Endlagerung und damit zusammenhängender Maßnahmen als Entsorgungskosten, sondern Kosten der Endlagerung allgemein. Dies wird auch daran ersichtlich, dass der Übergang der Sorgepflicht für radioaktive Abfälle nicht nur die direkt endzulagernden Abfälle, sondern auch Abfälle betrifft, welche aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente stammen, wie sich aus § 2 Abs. 3 Sätze 1, 2 Nr. 2 EntsorgÜG ergibt. Folglich können sich die nach § 4 Abs. 1 EntsorgÜG durch den KENFO zu erstattenden Entsorgungskosten auch auf solche Abfälle beziehen, die indirekt, d. h. nach einer vorherigen schadlosen Verwertung von Teilen der Abfälle, endgelagert werden müssen.

Im Ergebnis spricht einiges dafür, dass auch die Kosten der Umwandlung zu den Entsorgungskosten zählen können. Gleichwohl ist dies aufgrund der derzeitigen Unterscheidung des § 9a AtG zwischen schadloser Verwertung einerseits und direkter Endlagerung andererseits nicht eindeutig.

**Gesetzliche Anordnung der Erstattungspflicht?** - Auch wenn man davon ausgeht, dass Kosten der Umwandlung grundsätzlich als mit der (End-)Lagerung zusammenhängende Kosten bewertet werden können, sind sie nach § 2 Abs. 2 Satz 1 EntsorgFondsG nur als Erstattungskosten zu bewerten, wenn eine gesetzliche Pflicht zur Erstattung durch den KENFO bestehen würde.

Eine solche könnte in § 4 Abs. 1 EntsorgÜG zu sehen sein. Die Vorschrift ordnet an, dass die für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle nach dem EntsorgÜG entstehenden Kosten durch den KENFO zu erstatten sind.

Zu den nach den Maßgaben des EntsorgÜG zu erstattenden Kosten gehören solche, die in Wahrnehmung der Aufgabe des § 2 Abs. 2 EntsorgÜG entstehen. Nach dieser Vorschrift geht die atomrechtliche Sorgepflicht des § 9a Abs. 1 AtG mit der Ablieferung der radioaktiven Abfälle durch die Kraftwerksbetreiber auf die BGZ über. Damit sind Kosten, die bei der Erfüllung der Sorgepflicht des § 9a Abs. 1 AtG entstehen, erstattungsfähig. Dies betrifft grundsätzlich sowohl Kosten der direkten Endlagerung als auch solche der schadlosen Verwertung, die in § 9a Abs. 1 Satz 1 AtG weiterhin ausdrücklich als Entsorgungsalternative vorgesehen ist. Sollte es durch eine Änderung des Verbots der Abgabe abgebrannter Brennelemente an Wiederaufarbeitungsanlagen der BGZ erlaubt werden, radioaktive Abfälle an eine Umwandlungsanlage abzugeben, so würden diese Kosten grundsätzlich in Erfüllung ihrer Sorgepflicht nach § 9a Abs. 1 Satz 1 AtG entstehen und wären damit nach § 4 Abs. 1 EntsorgÜG erstattungsfähig.

Zu beachten ist jedoch, dass diese Bewertung wiederum von der Annahme abhängt, dass der Abfallbegriff des AtG revisibel ist (dazu bereits oben). Zudem wurde die Möglichkeit der Umwandlung bei Erlass des EntsorgÜG nicht in den Blick genommen, da sie nach § 9a Abs. 1 Satz 2 AtG derzeit ausgeschlossen ist. Dies wird auch daran deutlich, dass § 2 Abs. 2 EntsorgÜG „insbesondere“ die Pflicht zur Endlagerung der von den Kraftwerksbetreibern übernommenen Abfälle als Aufgabe der BGZ betont.

**Gesetzliche Klarstellung ratsam** – Es lässt sich folglich argumentieren, dass eine im Anschluss an eine Änderung des § 9a Abs. 1 Satz 2 AtG erfolgende Umwandlung der radioaktiven Abfälle zu den durch den KENFO zu erstattenden Entsorgungskosten gehören würde.

Gleichwohl verbleibt insofern ein Risiko bei der Bewertung, als die Umwandlung dafür zum einen als „mit der Endlagerung zusammenhängende“ Maßnahme zu beurteilen und zum anderen als von der gesetzlichen Erstattungsanordnung des § 4 Abs. 1 EntsorgÜG erfasst angesehen werden müsste. Diesem Risiko ließe sich durch eine **gesetzliche Klarstellung**, wonach auch Kosten der Umwandlung als Entsorgungskosten anzusehen sind, Rechnung tragen.

## UMWANDLUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE ALS ENTSORGUNGSKOSTENREDUZIERENDE MASSNAHME

Eine Erstattung von Kosten der Umwandlung durch den KENFO kommt auch auf Grundlage des § 5 Satz 1 EntsorgÜG in Betracht. Dieser ermächtigt das BMUV, den KENFO durch Bescheid dazu zu verpflichten, auch bestimmte andere Maßnahmen zu finanzieren. Erfasst werden von dieser Möglichkeit solche Maßnahmen, die die Kosten für die sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle nicht nur unerheblich reduzieren.

Die Vorschrift wurde nachträglich in das EntsorgÜG eingefügt und sollte eine Rechtsgrundlage insbesondere für die Erstattung **kostenreduzierender Maßnahmen** schaffen, für die bisher keine ausdrückliche Erstattungspflicht des KENFO bestand.<sup>167</sup> Die Umwandlung hochradioaktiver Abfälle dürfte als kostenreduzierende Maßnahme in diesem Sinne zu betrachten sein, führt sie doch ebenso zu einer erheblichen Reduzierung der notwendigen Auslegungsdauer für ein zu errichtendes Endlager für hochradioaktive Abfälle, wie zu einer möglichen geringeren Dimensionierung dieses Endlagers.

Zu berücksichtigen ist allerdings, dass eine nicht unerhebliche Kostenersparnis von Maßnahmen, die auf Grundlage des § 5 EntsorgÜG zu erstatten sind, nach dem Willen des Gesetzgebers rechnerisch darzulegen ist.<sup>168</sup> Eine derartige Kalkulation dürfte in der Praxis mit einigen Schwierigkeiten verbunden sein. Hinzu kommt, dass § 5 EntsorgÜG anders als die sonstigen Vorschriften zur Kostenerstattung durch den KENFO lediglich eine an das BMUV gerichtete **Ermessensvorschrift** bildet und die Erstattung von Maßnahmen selbst im Falle eines erheblichen Einsparpotentials daher nicht zwingend ist.

**ERGEBNIS**

Insgesamt ist eine indirekte Finanzierung des Vorhabens mittels **Kostenerstattungen des KENFO für Umwandlungsmaßnahmen** daher – im Anschluss an eine Anpassung des § 9a Abs. 1 Satz 2 AtG – bereits auf Grundlage der jetzigen Rechtslage **möglich**. Unter Rechtssicherheitsgesichtspunkten wäre eine **Gesetzesänderung**, die eine Pflicht des KENFO zur Erstattung derartiger Maßnahmen vorschreibt, **vorteilhaft**. Änderungsbestrebungen hätten jedoch voraussichtlich nur dann Aussicht auf Erfolg, wenn sich nachweisen ließe, dass das Fondsvermögen des KENFO sowohl für die Erstattung von Umwandlungsmaßnahmen als auch für die Kosten der Zwischen- und Endlagerung ausreicht.

## 4.2.

**Direkte Finanzierung durch KENFO**

Von der Frage der Erstattung der Kosten einer Umwandlung hochradioaktiver Abfälle durch den KENFO ist die Frage einer **direkten Beteiligung des Fonds** an der Finanzierung des Vorhabens zu unterscheiden. Eine solche wäre etwa über eine Beteiligung an einer Betreibergesellschaft oder die Gewährung von Darlehen denkbar.

**BINDUNG DES KENFO AN ANLAGEGRUNDSÄTZE UND -KLASSEN**

Der KENFO ist in der Anlage seiner Mittel nicht ungebunden. § 9 Abs. 2 bis 4 EntsorgFondsG enthält vielmehr gesetzliche Anforderungen an die Anlagestrategie des Fonds, welche durch **Anlagerichtlinien** (AnlageRL) des Bundesministeriums der Finanzen (BMF) vom 27. Juni 2017 konkretisiert werden. Sie bewirken die Bindung des KENFO an eine konservative Anlagestrategie, die sich insbesondere an den Vorgaben für das Sicherungsvermögen von (bestimmten) Versicherungsunternehmen und für Fonds der betrieblichen Altersversorgung orientiert.

Der KENFO darf gemäß § 9 Abs. 3 EntsorgFondsG und § 2 AnlageRL i.V.m. § 215 Abs. 2 Satz 1 Versicherungsaufsichtsgesetz (VAG) nur in bestimmte Anlageklassen investieren. Dazu gehören insbesondere Darlehensforderungen gegen Dritte sowie Aktien von und Beteiligungen an anderen Unternehmen (§ 215 Abs. 2 Satz 1 Nr. 1, 3 und 4 VAG). Nach § 4 Abs. 1 AnlageRL i.V.m. § 17 Pensionsfonds-Aufsichtsverordnung (PFAV) bestehen Anforderungen an die Sicherung derartiger Anlagen.

Die Anlagegrundsätze orientieren sich an dem Zweck des KENFO, die Finanzierung der sicheren Entsorgung radioaktiver Abfälle zu gewährleisten. So muss der KENFO nach § 2 AnlageRL i.V.m. § 124 Abs. 1 Satz 2 VAG etwa in hinreichend überschau- und kontrollierbare Instrumente investieren, die Sicherheit, Liquidität und Rentabilität seines Portfolios gewährleisten, und darf nicht auf einem geregelten Finanzmarkt handelbare Anlagen nur „auf einem vorsichtigen Niveau“ halten (§ 124 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1, 2 und 6 VAG). Ferner bestehen nach § 4 Abs. 1 AnlageRL i.V.m. §§ 18 ff. PFAV weitere Anforderungen an die Anlagestrategie, insbesondere an die Mischung und Streuung der Anlagen. So darf ein Einzel-Investment grundsätzlich nicht mehr als 5 Prozent des Fondsvermögens betragen (§ 19 Abs. 1 Satz 1 PFAV).

Schließlich ist der KENFO in seiner Anlagestrategie gemäß § 4 Abs. 3 AnlageRL i.V.m. Nr. 2 Buchst. c BT-Drs. 18/10671 daran gebunden, dass die Mittel des Fonds „nicht in Projekten oder Anlagen Verwendung finden, die dem übergeordneten Willen des Gesetzgebers zuwiderlaufen, die Nutzung der Atomenergie zu beenden“.

### BEWERTUNG DER VORGABEN ZUR ANLAGE DES FONDS-VERMÖGENS

Die Bindungen des KENFO an bestimmte Anlageklassen und -grundsätze beziehen sich in erster Linie auf die Gewährleistung der Sicherheit, Liquidität und Rentabilität des Fonds. Die Anlagetätigkeit des KENFO ist darauf ausgerichtet, das für die Entsorgung radioaktiver Abfälle notwendige Vermögen zu erhalten und zu mehren. Die Ausrichtung des Fonds ist damit wirtschaftlich begründet. Der Fonds dient hingegen nicht der Förderung bestimmter Anlageklassen oder politisch begründeter Fernziele.

Aus den dargestellten Vorgaben an die Anlagestrategie folgt, dass eine direkte Finanzierung des Vorhabens durch den KENFO im Grundsatz in Betracht kommt. Sie könnte beispielsweise durch die Vergabe eines Darlehens, eine gesellschaftsrechtliche Direktbeteiligung an einer Betreibergesellschaft oder den Erwerb von Aktien erfolgen. Da die **Anlagestrategie** des Fonds allerdings **nicht darauf ausgerichtet** ist, **Vorhaben zur sicheren Entsorgung** oder Verwertung der radioaktiven Abfälle **zu fördern**, käme dem Vorhaben dabei kein Vorrang zu. Eine Investition in das Vorhaben wäre vielmehr nach denselben Anlagekriterien zu bewerten wie eine Investition in sonstige Anlagen.

§ 4 Abs. 3 AnlageRL, wonach Investitionen des KENFO nicht dem Willen zuwiderlaufen dürfen, die Nutzung der Atomenergie zu beenden, dürfte einer Finanzierung des Vorhabens durch den Fonds nicht entgegenstehen. Das Vorhaben, das durch eine Betreibergesellschaft verwirklicht werden würde, dient der Umwandlung hochradioaktiver Abfälle und damit gerade der Bewältigung der Folgen der bisherigen kommerziellen Nutzung der Kernenergie. Damit läuft es dem Willen der Beendigung nicht zuwider, sondern unterstützt die auf die Beendigung gerichteten Bemühungen. Sollte eine direkte Beteiligung des KENFO an dem Vorhaben angestrebt werden, sollte dies jedoch dennoch ausdrücklich in den AnlageRL klargestellt werden.

### ERGEBNIS

Eine direkte Finanzierung des Vorhabens durch den KENFO ist grundsätzlich denkbar. Sie dürfte jedoch kein vorrangiges Investitionsziel des Fonds sein, weil dessen Anlagestrategie nicht auf die Förderung der Erforschung und Erprobung von Technologien zur kerntechnischen Entsorgung ausgerichtet ist.

## 5 Ergebnisse

---

Das Gesamtvorhaben kann auf Grundlage des derzeit geltenden Rechts nicht rechtssicher realisiert werden. Hierfür sind **Gesetzesänderungen erforderlich**.

### 5.1.

#### Änderung gesetzlicher Ausschlussstatbestände

Betroffen sind zunächst die gesetzlichen Genehmigungsausschlussstatbestände. **§ 7 Abs. 1 Satz 2 AtG** enthält zwei zu unterscheidende Ausschlussstatbestände. Davon wäre zunächst derjenige der **Alt. 2**, der die Neugenehmigung von **Aufarbeitungsanlagen** für bestrahlte Brennelemente ausschließt, so zu ändern, dass er auf die Recyclinganlage als Voraussetzung für die Umwandlung abgebrannter Brennelemente keine Anwendung findet.

Falls eine gewerbliche Nutzung von Elektrizität ermöglicht werden soll, sollte zudem § 7 Abs. 1 Satz 2 **Alt. 1 AtG**, welcher die Neugenehmigung von Kernreaktoren zur **gewerblichen Erzeugung von Elektrizität** unterbindet, so geändert werden, dass er auf die Einspeisung von Elektrizität durch Transmutationsanlagen ausdrücklich keine Anwendung findet.

Gleichermaßen müsste das **Abgabeverbot für bestrahlte Brennelemente** an Aufarbeitungsanlagen des **§ 9a Abs. 1 Satz 2 AtG** dergestalt geändert werden, dass es die Abgabe an Transmutationsanlagen einschließlich Partitionierungseinrichtungen nicht erfasst.

## 5.2.

### Weiterer rechtlicher Anpassungsbedarf

Daneben besteht weiterer rechtlicher Anpassungsbedarf. So sind die Regelungen des § 9a AtG über die **Sorgepflicht** stark auf die Technologie der Kernkraftwerke und die anschließende unbearbeitete Zwischen- und Endlagerung der Brennelemente ausgerichtet. Sie sollten an die **Besonderheiten der Transmutationstechnologie**, die mit einer Rezyklierung abgebrannter Brennelemente einhergeht, **angepasst** werden.

Im Rahmen des § 9a Abs. 1 Satz 1 AtG sollte klargestellt werden, dass der **Abfallbegriff des AtG** **revisibel** ist, um zu verdeutlichen, dass die Transmutation bereits angefallener Abfälle als Unterfall der schadlosen Verwertung möglich ist.

Der **Nachweis der Verwertung** des im Rahmen der Partitionierung und Transmutation anfallenden **Plutoniums** muss zudem auch durch die Rezyklierung in einem Transmutationsreaktor erbracht werden können. Dafür ist eine **Änderung** des § 9a Abs. 1c Satz 2 und 3 AtG erforderlich, der derzeit eine Nachweiserbringung nur durch den Einsatz in einem Kernkraftwerk vorsieht.

Auch erscheint eine **Verankerung der Transmutationstechnologie** innerhalb des **NEP** als Ergänzung und vorbereitender Verfahrensschritt der Entsorgung radioaktiver Abfälle in tiefegeologischen Endlagern sinnvoll.

Für die Übernahme von Anlagenteilen eines deutschen AKW wäre eine gesetzliche **Klarstellung** dergestalt anzustreben, dass die Pflicht zum unverzüglichen Abbau einer Anlage gemäß **§ 7 Abs. 3 Satz 4 AtG** auch durch eine Übernahme von Anlagenteilen durch Dritte am selben Standort erfüllt wird. Die Übernahme sollte zudem in der noch zu erlassenden **2. SAG** geregelt werden.

Hinsichtlich einer **Kostenerstattung von Umwandlungsmaßnahmen** durch den KENFO wäre eine **gesetzliche Klarstellung** sinnvoll, wonach auch aufgrund der Umwandlung entstehende Kosten Entsorgungskosten i.S.d. EntsorgFondsG sind.

## 5 Betriebswirtschaftliche Analyse

|                                                     |            |
|-----------------------------------------------------|------------|
| <b>1 Einleitung</b>                                 | <b>174</b> |
| <b>2 Einnahmen und Kosten</b>                       | <b>174</b> |
| 2.1. Einnahmequellen                                | 174        |
| ROHSTOFFE AUS KERntechnischen Abfällen              | 174        |
| BESTRAHLUNG VON RADIOISOTOPEN                       | 175        |
| ENERGIE                                             | 175        |
| TRANSMUTATION HOCHRADIOAKTIVEN RESTMÜLLS            | 175        |
| HERSTELLUNG VON BRENNSTOFFEN                        | 176        |
| 2.2. Kosten                                         | 176        |
| CAPEX                                               | 176        |
| OPEX                                                | 178        |
| <b>3 Methodik</b>                                   | <b>179</b> |
| 3.1. Untersuchungsaufbau                            | 179        |
| 3.2. Annahmen und Szenarien                         | 179        |
| ZINSSATZ DES KREDITS                                | 179        |
| VERTRIEBSGEMEINKOSTEN                               | 179        |
| INFLATION                                           | 180        |
| MARKTLIQUIDITÄT                                     | 180        |
| ELEKTRISCHER EIGENBEDARF                            | 180        |
| POSITIVES SZENARIO                                  | 180        |
| NEGATIVES SZENARIO                                  | 181        |
| <b>4 Ergebnis</b>                                   | <b>184</b> |
| 4.1. Positives Szenario                             | 185        |
| 4.2. Negatives Szenario                             | 187        |
| <b>5 Diskussion</b>                                 | <b>189</b> |
| 5.1. Business-Case und Vergütung der Transmutation  | 189        |
| ZUGRUNDELEGUNG EINGESPARTER ZWISCHENLAGERUNGSKOSTEN | 189        |
| ZUGRUNDELEGUNG DER KENFO-RÜCKSTELLUNGEN             | 189        |
| ZUGRUNDELEGUNG EINGESPARTER ENDLAGERUNGSKOSTEN      | 190        |
| ZUGRUNDELEGUNG DES NPV                              | 190        |
| 5.2. Limitationen und Ausblick                      | 190        |
| <b>6 Fazit</b>                                      | <b>192</b> |
| <b>7 Anhang</b>                                     | <b>193</b> |
| 7.1. Umsätze und Anlagenkapazitäten                 | 193        |
| 7.2. Cost of Goods Sold (COGS)                      | 194        |
| 7.3. Capex                                          | 196        |
| 7.4. Opex                                           | 200        |
| 7.5. Profit and Loss Statement (positiv)            | 202        |
| 7.6. Profit and Loss Statement (negativ)            | 204        |
| 7.7. Free Cash Flow Rechnung (positiv)              | 207        |
| 7.8. Free Cash Flow Rechnung (negativ)              | 208        |

# 1 Einleitung

Dieses Kapitel untersucht die Kosten und Erlöse von START und berechnet den Nettobarwert (NPV) basierend auf den prognostizierten zukünftigen Free Cash Flows. Der NPV dient als Maß für die Rentabilität der Investition und entspricht dem heutigen Wert aller zukünftigen Free Cash Flows, diskontiert auf den gegenwärtigen Zeitpunkt. Ein positiver NPV deutet darauf hin, dass die Investition rentabel ist, da der heutige Wert der erwarteten zukünftigen Cash Flows die anfänglichen Investitionskosten übersteigt. Die für diese Analyse erforderlichen Annahmen basieren auf historischen Daten und eigens getätigten Annahmen, unter der Berücksichtigung von Einflussfaktoren wie Inflationsrate und Preistrends. Die Analyse unterteilt sich in zwei Szenarien:

- Das positive Szenario spiegelt positive Preis- und Absatzentwicklungen auf den Energiemärkten wider. Hierbei führen die Rohstoff- und Energieverkäufe zu einem NPV von 7,6 Mrd. €.
- Das negative Szenario bildet deutliche negative Entwicklungen im Absatz von Rohstoffen und Energie an den Märkten ab, was dennoch zu einem NPV von 912,5 Mio. € führt.

In beiden Szenarien werden bereits durch den Verkauf von Rohstoffen und Energie positive NPVs erzielt. Die Anlage kann aus wirtschaftlicher Sicht rentabel betrieben werden. Staatliche Gebührenzahlungen für die Transmutation von langlebigen hochradioaktiven Abfällen sind aus rein ökonomischen Gesichtspunkten nicht ausschlaggebend für den erfolgreichen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage.

## 2 Einnahmen und Kosten

### 2.1.

#### Einnahmequellen

Bei der Gesamtbewertung des Recycling- und Transmutationsprozesses in der Anlage ergeben sich verschiedene Einnahmequellen. Diese lassen sich grob in Verkauf von wiedergewonnenen Radioisotopen, Metallen und Gasen, die Energieproduktion in Form von Wärme oder Strom sowie von Dienstleistungen wie die Bestrahlung von Radioisotopen und der Transmutation kerntechnischer Abfälle unterteilen.

#### **ROHSTOFFE AUS KERntechnischen Abfällen**

In der Recyclinganlage werden Spaltprodukte und Radioisotope wie Cäsium und Strontium aus den alten Brennelementen abgetrennt. Die Radionuklide Cäsium-137 und Strontium-90 können insbesondere im medizinischen Bereich zur Strahlentherapie bei der Krebsbehandlung eingesetzt werden. Für die Produktion und Vertrieb werden die Richtlinien des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS) befolgt und es erfolgt ein Eintrag ins nationale Strahlenregister. Potenzielle Abnehmer der Radionuklide sind radiopharmazeutische Unternehmen.

Darüber hinaus kann Uran abgetrennt und für die Produktion neuer Brennelemente verkauft werden. Anstatt das Uran lediglich in Endlagern zu deponieren, können so weitere Einnahmen generiert und wertvolle Rohstoffe erneut nutzbar gemacht werden. Der Verkauf erfolgt unabhängig davon, ob Thorium oder Uran der Transmutationsanlage verwendet wird.

Weitere Erlösmöglichkeiten ergeben sich in der Automobil- und Luftfahrtindustrie, die das nicht-radioaktive Edelmetall Rhodium sowie das radioaktive Edelgas Krypton-85 nutzen können. Beide können aus **Spaltprodukten** in der Transmutationsanlage isoliert werden. Im Prozess der Transmutation besteht außerdem die Möglichkeit, das Edelgas Xenon-130 und das Edelmetall Ruthenium zurückzugewinnen, die nach den üblichen Kontrollen auf Reststrahlung an die Industrie verkauft werden können.

### BESTRAHLUNG VON RADIOISOTOPEN

Zusätzliche Einnahmen können auch durch die Bestrahlung und den Verkauf von Radioisotopen externer radiopharmazeutischer Unternehmen erzielt werden. Mithilfe des Beschleunigers bzw. des Reaktors können Radioisotope wie Lutetium-177, Molybdän-99/Technetium-99m, Terbium-149, Actinium-224, Plutonium-238 und Gadolinium-148 produziert werden (s. [ANHANG 7.1.](#)). Diese Isotope finden häufig in der Medizin Anwendung sowie in der Luft- und Raumfahrt.

### ENERGIE

Sobald der eigentliche Transmutationsprozess im Reaktor in Betrieb ist, wird eine große Menge an Prozesswärme frei, die abgeführt und genutzt werden muss und nicht einfach entweichen kann. Diese Energie kann sowohl in Form von Strom als auch als Fernwärme zu den jeweils geltenden Preisen an lokale Versorgungsunternehmen verkauft werden, wodurch eine weitere Einnahmequelle entsteht. Im Falle einer Stromeinspeisung würde die Transmutationsanlage zur Grundlastversorgung beitragen. Sollte der Strom nicht am Spot- oder Terminmarkt verkauft werden, besteht weiterhin die Möglichkeit, über Power Purchase Agreements (PPA) Elektrolyseur-Anlagen zur Wasserstoffproduktion zu beliefern. Insbesondere bei der Dekarbonisierung energieintensiver Industrien wie beispielsweise der chemischen Industrie oder der Stahlindustrie ist eine ausreichende Wasserstoffversorgung unverzichtbar. Allein in Bayern sollen bis zu 50 Elektrolyse-Anlagen entstehen<sup>169</sup>. In der nationalen Wasserstoffstrategie prognostiziert die Bundesregierung für 2030 einen Bedarf zwischen 95 und 130 TWh, davon knapp weniger als die Hälfte aus deutscher Produktion<sup>170</sup>.

### TRANSMUTATION HOCHRADIOAKTIVEN RESTMÜLLS

Eine weitere Einnahmequelle stellt die Behandlung oder Entsorgung radioaktiver Abfälle durch die Transmutation dar. Der Betreiber kann eine Vergütung für diese Dienstleistung erwarten, ähnlich zur traditionellen Müllverbrennung. Für diese Dienstleistung gibt es bislang keinen Markt, über den sich ein Preis ermitteln ließe. Da der Anlagenzweck wesentlich die Transmutation ist, müsste die Vergütung zumindest sowohl die direkten als auch die umgelegten indirekten Kosten des Prozesses decken, um die Wirtschaftlichkeit der Anlage sicherzustellen, falls dies nicht ohnehin bereits aus dem Verkauf von Rohstoffen und Energie gewährleistet sein sollte. Eine dafür eventuell erforderliche Vergütung könnte durch die zuvor beschriebenen Einnahmen aus dem Verkauf der zurückgewonnenen Rohstoffe und Radioisotope reduziert werden. Darüber hinaus könnten die finanziellen Einsparungen des Staates durch die sonst notwendigen Endlager den Umfang der staatlichen Unterstützung beeinflussen (der volkswirtschaftliche Nutzen wird hier nicht berücksichtigt). Da der Eigentümer der hochradioaktiven Abfälle bzw. der finanziell Verantwortliche für dessen Entsorgung in Deutschland der Staat ist, obliegt es also der öffentlichen Hand, mit dem Betreiber einen Preis für seine Dienstleistung der Transmutation auszuhandeln. Daher werden in Abschnitt 5.4 mögliche Vorschläge zur Ermittlung der Gebühren erläutert. Staatliche Gebühreneinzahlungen an den Anlagenbetreiber spielen für die folgende NPV-Kalkulation keine Rolle und sind stattdessen als zusätzliche Einkommensquelle neben der operativen Tätigkeit der Anlage zu sehen.

## HERSTELLUNG VON BRENNSTOFFEN

Während des Transmutationsvorgangs mit Thorium entsteht Uran-233, das entweder weiter gespalten werden kann, sich aber auch als Brennstoff für traditionelle AKW verkaufen ließe (und dank spezieller Maßnahmen nicht waffenfähig ist).

Sowohl mithilfe des Protonenstrahls (über  $H_2O$ ) als auch des Reaktors (über Lithium-6) könnte zudem Tritium erzeugt werden, ein wesentliches Element für die Initialzündung in einem Fusionsreaktor. Diese potenziellen Einnahmen wurden hier jedoch nicht weiterverfolgt.

### 2.2.

## Kosten

Im Folgenden werden die Annahmen von Transmutex und dem Betreiber des ehemaligen Kernkraftwerks zum Bau und Betrieb der Anlage aufgeschlüsselt. Beträge werden im Verlauf des Abschnitts zu Zwecken der Lesbarkeit gerundet. Eine genaue Aufstellung sämtlicher Kosten ist den Anhänge 7.3. und 7.4. entnehmbar.

### CAPEX

Ein Bau der Recycling- und Transmutationsanlage umfasst erhebliche Kapitalausgaben (Capex) für den Bau von Reaktor, Beschleuniger, spezialisierten Einrichtungen zur Brennelementherstellung, Partitionierung und Verglasung sowie für infrastrukturelle Anbindungen an Straßen- und Schienenverkehr und die Strom- und Wasserversorgung. Durch die Nachnutzung bereits bestehender Anlagen, Gebäude und Infrastruktur auf dem Gelände des Kraftwerks kommt es nach den vorliegenden Kostenschätzungen von Transmutex jedoch zu Einsparpotentialen, die den ursprünglichen Investitionsbedarf erheblichen senken können.

**Reaktor** - Im Falle eines Neubaus der Anlage außerhalb bereits bestehender Atomkraftwerksanlagen entfällt mit knapp 1,3 Mrd. € über die Hälfte der nötigen Capex auf den Reaktor. Davon stellen das Reaktorgebäude (271 Mio. €), primäre Systemkomponenten wie Pumpen, Wärmetauscher, Druckbehälter (192 Mio. €), Hilfssysteme (313 Mio. €) sowie Ausrüstungen und Rohrleitungsmaterialien (186 Mio. €) die größten Kostenpunkte dar. Durch die Integration der Anlage in das Kraftwerksgelände sollen, wo möglich, Kosteneinsparungen von 50 % oder 100 % erreicht werden. Speziell für das Reaktorgebäude kann eine Einsparung von 50 % nicht mit Sicherheit angenommen werden, weshalb das negative Szenario (s. Abschnitt 5.2.2.2) Kosteneinsparungen für das Reaktorgebäude nicht berücksichtigt. Kosten für Stromnetzverteilung, Pumpenhaus, Klimatisierung, (Notfall-)Kontrollräume und Brandwache entfallen jedoch komplett, da die bestehenden Einrichtungen weiter genutzt werden können. Insgesamt sollen sich finanzielle Einsparungen in einem positiven Szenario (s. Abschnitt 5.2.2.1) im Bereich des Reaktors auf ca. 615 Mio. € belaufen, wodurch sich erwartete Capex des Reaktors in Höhe von 661 Mio. € ergeben würden (s. ANHANG 7.3., TABELLE 27). Im Falle von 0 % Kosteneinsparung durch die Weiternutzung des Reaktorgebäudes liegen die Einsparungen insgesamt bei 479 Mio. €, womit sich die Capex des Reaktors auf 797 Mio. € belaufen.

**Beschleuniger** - Das Investitionsaufkommen für den Beschleuniger beläuft sich auf insgesamt ca. 242 Mio. €, davon u. a. 142 Mio. € für Zyklotrone und weitere 80 Mio. € für den Bau des Beschleunigers und der fälligen Hilfssysteme inkl. Heizung, Lüftung und Klimatisierung. Da ein derartiger Beschleuniger im Atomkraftwerk nicht existiert und somit einen (fast) vollständigen Neubau voraussetzt, können hier lediglich 25 Mio. € durch bereits vorhandene Gebäude eingespart werden (s. ANHANG 7.3., TABELLE 26).

### Einrichtungen zur Partitionierung der Abfälle, Brennelementherstellung, und Vitrifizierung -

Die „overnight costs“ (Baukosten, wenn die Einrichtungen hypothetisch „über Nacht“ ohne Finanzierungsverzögerungen und Zinskosten erbaut werden würde) der drei benötigten Anlagen belaufen sich zu fast gleichen Anteilen auf insgesamt 655 Mio. € vor Kosteneinsparung. Inbegriffen sind hier die Kapitalkosten der Anlagen zur Brennelementherstellung (213 Mio. €) sowie u. a. Labor-, Lager-, Verarbeitungs- und Notfallzentren (442 Mio. €), wobei das Einsparpotenzial vor allem durch Weiternutzung der Gebäude bei 166 Mio. € liegt (s. [ANHANG 7.3.](#), [TABELLEN 28-30](#)).

**Genehmigungen und allgemeine Infrastruktur** - Kosten zur Bereitstellung der nötigen Infrastruktur, also Transportwege über Schiene und Straße sowie Wasser und Stromversorgung belaufen sich für den Fall des AKW-Grundstücks auf insgesamt knapp 138 Mio. €. Herangezogen wurden hierfür eigene Analysen benötigter Straßen- und Schienenlängen sowie Einschätzungen aktueller Anschlusskosten zur Wasser- und Stromversorgung<sup>171</sup> (s. [ANHANG 7.3.](#), [TABELLE 31](#)). Durch die erst kürzlich erfolgte Abschaltung im April 2023 ist davon auszugehen, dass derartige Infrastruktur vor Ort weitergenutzt werden kann, wodurch diese Kosten vollständig eingespart werden können.

Die Gebühren für eine Baugenehmigung betragen in Bayern je nach Bauvorhaben zwischen 0,1 % und 0,4 % der Baukosten. Unter Berücksichtigung der Capex der zuvor aufgeführten Anlagenteile (Reaktor, Beschleuniger, Einrichtungen zur Brennelementherstellung, Partitionierung und Vitrifizierung) und einem prozentualen Bemessungswert von 0,25 % dieser Baukosten fallen knapp 1,7 Mio. € (bzw. 1,88 Mio. € ohne Einsparungen bei Reaktorgebäuden) für die Baugenehmigung an (s. [ANHANG 7.3.](#), [TABELLE 31](#)). Enthalten ist dabei bereits eine Kostenreduktion von 50 %, da schon zu einem früheren Zeitpunkt eine Baugenehmigung für den Bau des nun abgeschalteten Atomkraftwerks erteilt wurde.

Für die nötige Atom- und Strahlenschutzgenehmigung gemäß §2 AtSKostV fallen weitere Kosten an. Diese Kosten setzen sich aus Gebühren für Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen (§2 Abs. 1 S. 1 lit. a AtSKostV), Anlagen zur Erzeugung oder Bearbeitung oder Verarbeitung von Kernbrennstoffen (§2 Abs. 1 S. 1 lit. b AtSKostV) sowie Anlagen zur Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe (§2 Abs. 1 S. 1 lit. c AtSKostV) zusammen. Die fälligen Gebühren sind dabei an die jeweilig anfallenden Errichtungskosten der Anlagen gekoppelt und betragen zwischen 0,2 % und 1,7 % dieser Kosten. Unklar bleibt hier vorerst die Bemessungsgrundlage im Falle einer Kombination mehrerer nuklearer Anlagenteile, da sich die Errichtungskosten gem. §3 AtSKostV Abs. 1 auf die genehmigungspflichtigen Anlagenteile beziehen. Um trotzdem eine Einschätzung der erwartbaren Kosten vorzunehmen, werden die Anlagenteile der Recycling- und Transmutationslage der im Gesetz aufgeführten Anlage zur Spaltung von Kernbrennstoffen (hier: Reaktor & Beschleuniger), der Anlage zur Erzeugung oder Bearbeitung oder Verarbeitung von Kernbrennstoffen (hier: Anlagen zur Brennelementherstellung und Vitrifizierung) und der Anlage zur Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe (hier: Anlage zur Partitionierung) zugeordnet und die Prozentsätze mit den jeweiligen Capex (s. [ANHANG 7.3.](#), [TABELLEN 26-30](#)) multipliziert. Es ergeben sich daraus Kosten von ca. 1,77 Mio. € für Beschleuniger und Reaktor (886,8 Mio. € x 0,2 %), ca. 1,41 Mio. € für die Anlage zur Brennelementherstellung und Vitrifizierung (353,2 Mio. € x 0,4 %) und ca. 1,36 Mio. € für die Anlage zur Partitionierung der Abfälle (135,6 Mio. € x 1 %). Insgesamt betragen diese Kosten somit zunächst knapp 4,53 Mio. €, sollten Einsparungen für Reaktorgebäude realisiert werden können. Im Falle des Ausbleibens dieser Einsparungen ist von entsprechend höheren Gebühren auszugehen, die in diesem Falle auf knapp 4,80 Mio. € ansteigen würden.

Hinzu kommen Kosten notwendiger Gutachten, die nach grober Einschätzung mit 4 Mio. € angesetzt werden. Somit belaufen sich die Kosten für die Atom- und Strahlenschutzgenehmigung insgesamt auf 8,53 Mio. € bzw. 8,80 Mio. € bei Ausbleiben der Kosteneinsparung im Reaktor (s. [ANHANG 7.3.](#), [TABELLE 31](#)).

**Projektmanagement und Konstruktionsplanung** - Schließlich umfassen die Capex auch anfallende Projektmanagementkosten und Konstruktionsplanungen von Transmutex im Umfang von 150 Mio. €, für die keine Einsparungen vorgesehen sind (s. [ANHANG 7.3.](#), [TABELLE 32](#)).

Durch die dargelegten Kosteneinsparungen durch einen Anlagenbau auf dem Gelände können die insgesamt fälligen Capex für den Bau der Recycling- und Transmutationsanlage um ca. 810 – 946 Mio. € (auf insgesamt 1,66 – 1,53 Mrd. €) gekürzt werden (s. [ANHANG 7.3.](#), [TABELLE 33](#)). Dies entspricht einer Reduktion zwischen 32,75 % und 38,2 %.

## OPEX

Die Betriebsausgaben (Opex) für das Projekt umfassen eine Vielzahl laufender Kosten, die für den Betrieb und die Wartung der Anlagen notwendig sind. Zu den Kosten gehören die Löhne des Personals inkl. Fremdpersonal, das die Anlage betreibt (64 Mio. €). Weitere Posten sind die Wartungskosten für die regelmäßige Instandhaltung und Reparatur der Anlagen (28 Mio. €) sowie Materialkosten u. a. für die Brennstoffbearbeitung, Abfallmanagement und Thoriumversorgung (20 Mio. €). Kleinere Ausgaben, wie Softwarelizenzen in Höhe von 3 Mio. €, sind ebenfalls Bestandteil der Opex. Die operativen Gesamtausgaben belaufen sich auf 114,4 Mio. € im ersten Jahr des Betriebs (s. [ANHANG 7.4.](#), [TABELLEN 34-38](#)).

Kostenverläufe, Gewinnberechnungen und Umsatzergebnisse werden in [ABSCHNITT 5.2](#) und [5.3](#) näher erläutert und sind weiter im Anhang einsehbar.

## 3 Methodik

### 3.1.

#### Untersuchungsaufbau

Die Nettobarwertmethode wird angewendet, um die wirtschaftliche Rentabilität der Anlage zu bewerten. Durch die Diskontierung projizierter Free Cash Flows (FCF) wird die gesamtwirtschaftliche Rentabilität des Projekts ermittelt. Der FCF für jedes Jahr wird berechnet, indem von den Earnings Before Interest and Taxes (EBIT) der bereinigte Steueraufwand abgezogen wird. Daraufhin werden die Abschreibungen addiert und die anfallenden Capex abgezogen. Somit ergibt sich der Cashflow, der dem Unternehmen zur Verfügung steht. Die erforderlichen Daten zu Einnahmen und Betriebskosten stammen von Transmutex und werden um zusätzliche Annahmen zu Preisen, Kosten und Finanzierungsbedingungen ergänzt. Des Weiteren werden Angaben zu Personalbedarf und -kosten des Betreibers einer Konvoi-Anlage berücksichtigt. Auf Basis dieser Daten wird für eine angenommene 50-jährige Laufzeit des Projekts ein jährlicher FCF berechnet, der die Grundlage für die Nettobarwert (Kapitalwert oder auch NPV) -Analyse unter Berücksichtigung der Kapitalkosten bildet. Zur Berechnung und Darstellung der Ergebnisse wird Microsoft Excel verwendet. Grafische Darstellungen der Ergebnisse sind diesem Bericht in Abschnitt 5.4. sowie im Anhang beigelegt.

### 3.2. Annahmen und Szenarien

Wie jedes Modell basiert auch dieses auf mehreren wesentlichen Prämissen, die einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse haben und daher im Detail erläutert werden. Die Annahmen lassen sich in zwei Kategorien unterteilen: solche, die über beide Szenarien hinweg konstant bleiben, und solche, die sich je nach zukünftiger Entwicklung der äußeren Umstände verändern können. Eine Übersicht der Annahmen je nach Szenario stellt [TABELLE 20](#) dar.

Während Annahmen zu Kapitalkosten, Abzinsungssätzen, Preisentwicklungen, Absatzmengen und Verkaufsrestriktionen an das jeweilige Szenario angepasst und in den jeweiligen Abschnitten 5.2.2.1 und 5.2.2.2 näher erläutert werden, werden die folgenden Annahmen bezüglich des Zinssatzes, der Vertriebsgemeinkosten, der Inflation, der Marktliquidität und des elektrischen Eigenbedarfs der Anlage für beide Szenarien gleichermaßen angenommen:

#### ZINSSATZ DES KREDITS

Laut Schätzungen von Transmutex werden für das Projekt Investitionskosten von knapp 1.536 Mio. € fällig. Da es sich hier um ein Projekt handelt, das nur zustande kommt, wenn und weil der Staat als Eigentümer der hochradioaktiven Abfälle seiner Verantwortung zu deren Entschärfung gerecht wird, wird ein relativ niedriger Zinssatz von 2,5 % angenommen. Dieser Prozentsatz bezieht sich lediglich auf einen Kredit zur Finanzierung des Baus der Anlage und ist vom gewichteten durchschnittlichen Kapitalkostensatz (WACC) zur Berechnung des NPVs zu unterscheiden.

#### VERTRIEBSGEMEINKOSTEN

Die begrenzte Kundenbasis des Anlagenbetreibers und die spezialisierten Produkte, insbesondere Metalle und Isotope mit eingeschränkten Anwendungen, lassen annehmen, dass die Vertriebsgemeinkosten (SG&A) als relativ gering einzustufen sind. Zur Schätzung der SG&A wird ein Verhältnis von SG&A zu Einnahmen von 5 % angenommen<sup>172</sup>.

## INFLATION

Die angenommene Inflationsrate beläuft sich auf 2,7 %. Dies entspricht der durchschnittlichen Inflationsrate seit 1960 in Deutschland<sup>173</sup>. Diese nominale Preissteigerung wird grundsätzlich sowohl für Erlöse als auch für die COGS verwendet. In einzelnen Fällen werden andere, von der Inflation abweichende Wachstumsraten angenommen, zum Beispiel bei Wachstumsraten für bestimmte Erlöse, wie die CAGRs für Uran, Rhodium und Ruthenium, oder die COGS im negativen Szenario (s. Absatz zu Wachstumsraten).

## MARKTLIQUIDITÄT

Das Modell geht in der Berechnung der Finanzkennzahlen davon aus, dass, bis auf Strontium-90, sämtliche Mengen der Radioisotope, Metalle und Gase, die während des Prozesses erzeugt werden, auch tatsächlich am Markt einen Abnehmer finden. Da der Markt für Strontium-90 zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Anlage voraussichtlich noch nicht ausreichend groß ist, wird nur ein Bruchteil des theoretisch möglichen Erlöses (knapp 1,5 Mrd. €) im positiven und negativen Szenario herangezogen (s. [ANHANG 1, TABELLE 23](#))<sup>174</sup>.

Preisentwicklungen können je nach Szenario zwar variieren, die abgesetzte jährliche bzw. monatliche Menge jedoch bleibt konstant. Die im Prozess erzeugte Energie kann in beiden Szenarien, wenn auch in unterschiedlichen Formen, ebenfalls vollumfänglich vertrieben werden.

Es ist darauf hinzuweisen, dass der Verkauf von Terbium, Plutonium, Gadolinium, Cäsium und Krypton aufgrund sehr intransparenter und stark geschützter Marktpreisinformationen in der Berechnung der wirtschaftlichen Parameter nicht berücksichtigt werden kann. Die vorliegende Szenarioanalyse stellt erlösseitig somit einen eher konservativen Ansatz dar. Zu Zwecken der Vollständigkeit und Übersicht werden die Produkte im Verlauf der Studie trotzdem, u.a. in Abbildungen und Umsatzübersichten, aufgeführt.

## ELEKTRISCHER EIGENBEDARF

Die Anlage produziert aus 600 MW thermischer Leistung eine elektrische Leistung von 252 MW, wovon 32 MW zur elektrischen Eigenversorgung der eigenen Anlage genutzt werden (insbesondere für den Beschleuniger und die Recyclinganlage), sodass sich ein elektrischer Eigenverbrauchsanteil von 12,7 % und eine Nettoleistung von 220 MWe ergibt. Der Eigenbedarf führt entsprechend zu einer Reduzierung der tatsächlich für den Verkauf verfügbaren Energiemenge.

## POSITIVES SZENARIO

Im ersten Szenario wird von günstigen Marktbedingungen ausgegangen, die sich im Wesentlichen in vorteilhaften Preisentwicklungen, einem niedrigeren Kapitalkostensatz und einer stabilen Energievermarktung widerspiegeln.

**Regulatorische Hürden** - Im positiven Szenario wird davon ausgegangen, dass es keine gesetzlichen Einschränkungen für den Verkauf der bei dem Betrieb der Anlage anfallenden Produkte gibt: alle Isotope, Metalle, Gase und Energiemengen können auf dem Großhandelsmarkt verkauft werden.

**Energieabsatz und Marktpreis** - Das positive Szenario stellt einen Fall dar, in dem die Anlage die Energie vollständig in Form von Strom in das öffentliche Netz einspeist und daraus resultierend den größten Anteil seiner Gesamterlöse bezieht. Alternative Verkaufswege, wie der Verkauf an Elektrolyseurbetreiber oder die Bereitstellung von Fernwärme für umliegende Abnehmer, werden in diesem Szenario nicht in Betracht gezogen.

Durch die Grundlastfähigkeit, also der Fähigkeit zur konstanten und nahezu dauerhaften Stromerzeugung, wird die Anlage ähnlich wie Kohle- oder zuvor Atomkraftwerke zur Grundlastabdeckung in Deutschland beitragen. Die Bruttoleistung der Anlage beträgt dabei 252 MWe, wobei ein Eigenverbrauch von 32 MWe anfällt. Die Nettoleistung beträgt somit 220 MWe. Unter der Annahme einer Anlagenverfügbarkeit von 85 % ergibt sich daraus eine tatsächlich verfügbare Strommenge von 1.638.120 MWh<sub>el</sub>. Da es sich um eine Grundlastversorgung handelt, wird angenommen, dass diese Energiemenge konstant am Markt abgesetzt werden kann. Der Börsenstrompreis wird auf Basis öffentlich zugänglicher Daten ermittelt. Der durchschnittliche Day-Ahead-Marktpreis der letzten zehn Jahre beträgt 0,08 € pro kWh. In Phasen mit besonders hohen Strompreisen können jedoch Werte von bis zu 0,15 € pro kWh beobachtet werden<sup>175</sup>. Im vorliegenden Szenario wird der Strompreis mit 0,10 € pro kWh zwischen diesen beiden Werten angesetzt, da das Szenario eine geringfügig positive Preisentwicklung simuliert, die jedoch den ermittelten Richtwert in Hochphasen von 0,15 € pro kWh nicht überschreitet.

**Kapitalkosten und Abzinsungssatz** - Trotz der innovativen Beschaffenheit der Anlage zeigt das Projekt Parallelen zu klassischen Kernkraftwerken, beispielsweise bei der Betrachtung benötigter Infrastruktur und Rohstoffe. Gängige Abzinsungssätzen für Kernkraftwerke liegen typischerweise zwischen 5 % und 10 %<sup>176</sup>. Die Anlage wird jedoch voraussichtlich von einem Energieversorgungsunternehmen betrieben, deren Finanzierung in der Regel nicht durch Wagniskapital erfolgt, sondern durch Infrastrukturentwickler, wie beispielsweise Fonds von Pensionskassen. Diese zeichnen sich durch geringe, aber kontinuierliche und sichere Renditeerwartungen aus. In Deutschland ist für Energieversorger in den letzten 12 Monaten üblicherweise ein gewichteter durchschnittlicher Kapitalkostensatz (WACC) in Höhe von etwa 5 %<sup>177</sup> zu verzeichnen, während dieser in der Schweiz im Jahr 2025 3,98 % betragen wird<sup>178</sup>. Daraus ableitend wird für die Abzinsung im positiven Szenario ein WACC von 4 % und im negativen Szenario ein WACC von 5 % angenommen.

**Wachstumsraten** - Das Szenario stützt sich auf historische Preisdaten zu Uran, Rhodium und Ruthenium und extrapoliert diese in die Zukunft. Basierend auf den Preisdaten der letzten 36 Jahre (1988-2024) wurde eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate (CAGR) von 4,88 % für den Uranpreis berechnet<sup>179</sup>. Für Rhodium und Ruthenium wurden die Preise der letzten 30 Jahre (1994-2024) herangezogen. Hierbei ergaben sich CAGR-Werte von 6,1 % bzw. 7,4 %<sup>180</sup>.

Die CAGR sonstiger Umsätze (abgesehen von Uran, Rhodium und Ruthenium) werden in diesem Szenario der Inflationsrate gleichgesetzt und belaufen sich somit auf 2,7 %. Begründet ist dies damit, dass die öffentliche Informationslage zu preislichen Entwicklungen der Radioisotope erheblich eingeschränkt ist. Da es sich in vielen Fällen um radioaktive Materialien handelt, unterliegt die Preiskommunikation strengen regulatorischen Beschränkungen. Infolge der mangelnden Preistransparenz kann daher keine ausreichend fundierte Änderungsrate ermittelt werden. Die CAGR der Costs of Goods Sold (COGS) beläuft sich ebenfalls auf 2,7 %.

**Capex** - Für das positive Szenario werden durch mögliche Nachnutzung von Infrastruktur Kosteneinsparungen von 50 % beim Reaktorgebäude vorausgesetzt. Somit liegen die Capex insgesamt bei etwa 1,53 Mrd.€.

## NEGATIVES SZENARIO

Im negativen Szenario werden ungünstigere Marktbedingungen simuliert, bei denen schwächere Preisentwicklungen, reduzierte Absatzmengen und eine Energievermarktung abseits der Spot- und Terminmärkte für Strom berücksichtigt werden. Darüber hinaus wird ein höherer Kapitalkostensatz angenommen, um mögliche wirtschaftliche Risiken und Negativtrends abzubilden.

**Regulatorische Hürden** - Sollte eine Grundlastversorgung beispielsweise aus regulatorischen, energiewirtschaftlichen oder politischen Gründen nicht möglich sein (s. Abschnitt 5.4.2), simuliert das negative Szenario ein Verbot des Stromverkaufs auf den öffentlichen Märkten, wodurch dieser lediglich durch das Abschließen bilateraler Stromlieferverträge möglich wird. Ein Verkauf der Energie in Form von Fernwärme sowie der Verkauf von Metallen, Isotopen und Gasen kann weiterhin uneingeschränkt davon auf den jeweiligen Märkten erfolgen.

**Energieabsatz und Marktpreis** - Die generierte Prozesswärme kann folglich sowohl als Fernwärme als auch, nach Verstromung, über PPAs an Elektrolyseurbetreiber zur Wasserstoffproduktion verkauft werden. Dabei beträgt die maximal mögliche Wärmeleistung der Anlage  $600 \text{ MW}_{\text{th}}$ . Die theoretisch produzierbare Energie, die durch einen ganzjährigen Volllastbetrieb unter Berücksichtigung von 85 % Verfügbarkeit erzeugt werden könnte, beläuft sich somit auf  $4.467.600 \text{ MWh}_{\text{th}}$ . Dies übersteigt den lokalen Fernwärmebedarf um ein Vielfaches. Nach Anfrage an die örtlich ansässigen Stadtwerke, die als Abnehmer der Fernwärme infrage kommen, ergibt sich nach vorläufiger Einschätzung ein zukünftiger regionaler Gesamtbedarf von  $210.000 \text{ MWh}_{\text{th}}$  pro Jahr zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme.

Das Szenario geht von einer anteiligen Deckung des Gesamtbedarfs der Region aus, der die bereits existierenden Fernwärmeerzeuger in der Region (u. a. ein Biomasseheizkraftwerk) ergänzt. Die prognostizierte Absatzmenge der Transmutationsanlage ergibt sich anteilig aus der Gesamtbedarfsprognose der Stadtwerke sowie Daten zur aktuellen Wärmebereitstellung und Ausbauplänen für neue thermische Energieerzeugungsanlagen<sup>181</sup>. Sie beläuft sich auf etwa  $105.000 \text{ MWh}_{\text{th}}$ . Diese Prognose berücksichtigt zudem bereits größere potenzielle industrielle Abnehmer in der Region. Der Preis für eine abgenommene kWh beträgt laut der vorläufigen Einschätzung der Stadtwerke bei 0,04 €. Diese Einschätzung umfasst bereits Faktoren wie Temperaturniveau, Wärmeauskopplung, notwendiger Trassenbau und Förderungsmöglichkeiten.

Die restliche Energiekapazität, die aufgrund des limitierten Bedarfs nicht mehr dazu verwendet wird, Fernwärme zu erzeugen, wird für die Stromproduktion verwendet. Der Strom kann (abzüglich des Eigenbedarfs) über PPAs z. B. an Elektrolyseure verkauft werden, da das Szenario den Anlagenbeitrag zur Grundversorgung durch Netzeinspeisung ausschließt. Diese Strommenge beläuft sich auf  $1.599.620 \text{ MWh}$ . Unter Berücksichtigung eines durchschnittlichen Wirkungsgrades der Elektrolyseanlagen von 70 %, den das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie<sup>182</sup> in der nationalen Wasserstoffstrategie annimmt, ließen sich daraus ca. 1,12 TWh Wasserstoff erzeugen. Gemessen am prognostizierten Gesamtwasserstoffbedarf für 2030 in Deutschland entspricht dies 0,9-1,2 %<sup>183</sup>.

Der prognostizierte Durchschnittspreis von PPAs aus Solaranlagen sowie Off- und Onshore Windanlagen für 2027, die häufig Elektrolyseure beliefern, liegt bei 0,06 € pro kWh<sup>184</sup>. Die Stromgestehungskosten bei neu zu bauenden Kernkraftwerken liegen bereits ohne die Berücksichtigung von Folgekosten aus Endlagerung teilweise deutlich oberhalb von PV- und Windanlagen<sup>185</sup>, was auf einen PPA-Preis oberhalb der 0,06 € pro kWh hindeutet. Laut einer Schätzung von McKinsey & Company<sup>186</sup> (2023) wird der Produktionspreis für ein Kilogramm Wasserstoff im Jahr 2030 zwischen 6,50 € und 8,50 € liegen. Kosten des dafür benötigten Stroms dürfen diesen Preis dementsprechend nicht übersteigen. Unter der Annahme, dass für die Produktion eines Kilogramms Wasserstoffs 55 kWh Strom benötigt werden<sup>187</sup>, würden die Stromkosten (z. B. bei einem im PPA vereinbarten Strompreis von 0,08 € je kWh) insgesamt 4,40 € pro Kilogramm Wasserstoff betragen und somit die Rentabilität des Wasserstoffherstellers sicherstellen. Zudem liegt der Stromkostenanteil an den gesamten Produktionskosten unter dieser Preisannahme innerhalb eines realistischen Korridors von ca. 50-70 %<sup>188</sup>. Somit wird der Richtwert von 0,08 € pro kWh für das negative Szenario übernommen und liegt damit leicht unter dem angenommenen Preis des positiven Szenarios (0,10 € pro kWh).

**Kapitalkosten und Abzinsungssatz** - Im negativen Szenario erfolgt eine Anpassung des im positiven Szenario verwendeten WACC. Der WACC wird im Vergleich zum positiven Szenario von 4 % auf 5 % erhöht. Dies entspricht in etwa dem durchschnittlichen Kapitalkostensatz von Energieversorgungsunternehmen in Deutschland in den vergangenen 12 Monaten<sup>189</sup>. Die Erhöhung reflektiert eine konservativere Einschätzung der Finanzierungskosten, die üblicherweise mit höheren Risiken oder weniger stabilen Einnahmequellen in einem negativen Marktumfeld einhergeht.

**Wachstumsraten** - Im negativen Szenario wird eine Stagnation der Einnahmen aus dem Verkauf von Uran, Rhodium und Ruthenium angenommen, weshalb die jährlichen Wachstumsraten auf 0 % zurückfallen. Diese Annahme basiert auf der historischen Preisentwicklung dieser Metalle, die durch sehr lange Phasen der Preisstabilität und nur vereinzelte kurze Perioden mit Preiswachstum gekennzeichnet ist. Auch in diesem Szenario werden aus Gründen der Preisintransparenz keine weiteren produktspezifischen Annahmen der Preisentwicklung übriger Gase und Radioisotope getroffen, sodass es weiterhin bei der Ansetzung eines CAGRs sonstiger Umsätze von 2,7 % (Inflationsniveau) bleibt. Ein Anstieg der Wachstumsrate der COGS von 2,7 % auf 3 % wird u. a. aus Gründen des Fachkräftemangels und der damit einhergehenden steigenden Personalkosten im negativen Szenario erwartet.

**Capex** - Für das negative Szenario werden keine Kosteneinsparungen für die Nachnutzung vom Reaktorgebäude berücksichtigt. Somit liegen die Capex insgesamt bei etwa 1,66 Mrd. €.

Einen Überblick über vorausgehend erläuterten Annahmen des Modells je nach Szenario liefert **TABELLE 20**.

| Variable / Szenario                              | Positiv                                                                        | Negativ                                                |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| CAGR Uran [%]                                    | 4,9                                                                            | 0                                                      |
| CAGR Rhodium [%]                                 | 6,1                                                                            | 0                                                      |
| CAGR Ruthenium [%]                               | 7,4                                                                            | 0                                                      |
| CAGR sonstige Umsätze [%]                        | 2,7                                                                            |                                                        |
| CAGR COGS [%]                                    | 2,7                                                                            | 3,0                                                    |
| Fernwärmemenge [MWh <sub>th</sub> /a]            | n.a.                                                                           | 105.000                                                |
| Fernwärmepreis [€/kWh <sub>th</sub> ]            | n.a.                                                                           | 0,04                                                   |
| Strommenge Großhandel [MWh <sub>el</sub> /a]     | 1.638.120190                                                                   | n.a.                                                   |
| Strompreis Großhandel [€/kWh <sub>el</sub> ]     | 0,10                                                                           | n.a.                                                   |
| Strommenge Elektrolyseure [MWh <sub>el</sub> /a] | n.a.                                                                           | 1.599.620191                                           |
| Strompreis Elektrolyseure [€/kWh <sub>el</sub> ] | n.a.                                                                           | 0,08                                                   |
| Eigenbedarf [MW <sub>el</sub> ]                  | 32                                                                             |                                                        |
| Nettoleistung [MW <sub>el</sub> ]                | 220                                                                            |                                                        |
| Abzinsungssatz [%]                               | 4                                                                              | 5                                                      |
| Kosteneinsparungen Reaktorgebäude [%]            | 50                                                                             | 0                                                      |
| Verhältnis SG&A zu Einnahmen [%]                 | 5                                                                              |                                                        |
| Zins (Kredit) [%]                                | 2,5                                                                            |                                                        |
| Inflation [%]                                    | 2,7                                                                            |                                                        |
| Verkaufseinschränkungen                          | Kein Fernwärmeverkauf, kein bilateraler Stromverkauf an Elektrolyseurbetreiber | Kein Stromverkauf an der Börse zur Grundlastversorgung |

TABELLE 20

Annahmen nach Szenarien.  
Quelle: Eigene Darstellung.

## 4 Ergebnis

In der Studie wurde unter Berücksichtigung der zuvor dargelegten Parameter die ökonomische Durchführbarkeit in einem positiven und einem negativen Szenario überprüft. Neben dem NPV finden sich weitere Darstellungen zentraler Kennzahlen der Analyse über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren. Die Ergebnisse umfassen erlösseitig die Einnahmen aus dem Verkauf von Radioisotopen, Metallen, Gasen sowie – abhängig vom Szenario – aus Strom oder Fernwärme. Zusätzliche Investitionen oder Einnahmen für die Transmutation hochradioaktiver Abfälle sind in den Ergebnissen nicht enthalten.

Identifizierte Haupteinflussfaktoren, die den Unterschied zwischen dem positiven und dem negativen Szenario erklären, sind insbesondere der höhere zu erlösende Strompreis des positiven Szenarios sowie positive Preisentwicklungen für Ruthenium, Uran, Rhodium und Strontium im Vergleich zum negativen Szenario. Besonders hervorzuheben ist, dass die Umsätze aus den verkauften Radioisotopen, Metallen und Gasen einen ähnlichen Einfluss auf die Gesamtwirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebs haben wie der Verkauf der produzierten Energie, da sich Umsätze aus Rohstoffverkäufen je nach Szenario zwischen 43 % und 70 % des Gesamtumsatzes bewegen. Entsprechend liegt der Anteil der verkauften Energie an den Umsätzen zwischen 30 % und 57 %.

Des Weiteren ergibt die Analyse, dass in beiden Szenarien keine Zahlungen des Staats, dem Eigentümer der hochradioaktiven Abfälle, an den Anlagenbetreiber für die Reduzierung des Atommülls erforderlich sind, um einen positiven NPV zu erreichen. **ABBILDUNG 58** stellt die jährlichen Jahresüberschüsse über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren für beide Szenarien dar.

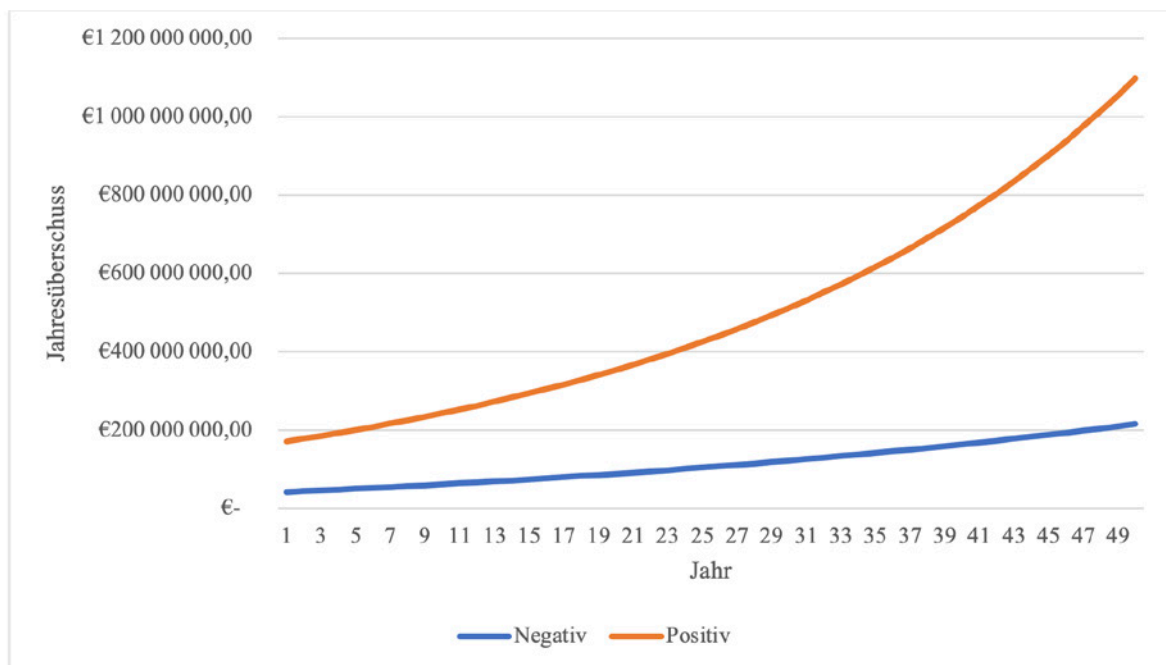


ABBILDUNG 58

Jahresüberschuss pro Jahr  
 Jahresüberschuss pro Jahr für beide Szenarien. Der unterschiedliche Verlauf lässt sich auf die verschiedenen Annahmen zurückführen (s. unten).  
 Quelle: Eigene Darstellung.

## 4.1.

**Positives Szenario**

Der NPV des Projekts beläuft sich auf 7.635,9 Mio. €. Der Jahresüberschuss ist ab Beginn der Inbetriebnahme positiv und entwickelt sich von 171,7 Mio. € (Jahr 1) auf 1.098,3 Mio. € (Jahr 50). Auch das EBIT ist ab dem ersten Jahr positiv und wächst insgesamt von 267,2 Mio. € auf 1.465,7 Mio. €. Der FCF ist im ersten Jahr noch negativ (was auf die anfänglichen Capex-Ausgaben zurückzuführen ist), verläuft daraufhin jedoch durchgehend im positiven Bereich.

Der erwirtschaftete jährliche Umsatz wächst signifikant von 433,8 Mio. € auf 2.019,3 Mio. € und verteilt sich im Vergleich zwischen dem ersten und letzten Jahr unterschiedlich auf die verschiedenen Einnahmequellen. Während im ersten Jahr 38 % des Umsatzes durch den Verkauf von Strom erzielt werden, sinkt dieser Anteil bis zum Jahr 50 auf 30 %. Der Anteil des Umsatzes, der auf den Verkauf von Cäsium und Strontium zurückzuführen ist, sinkt dabei von 46 % auf 37 %. Gleichzeitig gewinnen andere Ressourcen wie Uran (von 3 % auf 7 %), Rhodium (von 2 % auf 9 %) und Ruthenium (von 1 % auf 10 %) zunehmend an Bedeutung. Die anteiligen Einnahmen von Xenon und Krypton sinken jedoch zusammen von 9 % auf 7 %. Diese Umverteilung in der Umsatzstruktur ist auf die im positiven Szenario angenommenen historischen CAGRs von Uran, Rhodium und Ruthenium zurückzuführen. Restliche Einnahmen (also aus dem Verkauf der übrigen Radioisotope) belaufen sich sowohl zu Beginn als auch zum Ende der Betrachtung auf unter 1 % des jeweiligen Gesamtumsatzes.

Die COGS steigen aufgrund der angenommenen CAGR auf Niveau der Inflationsrate (2,7 %) über den Zeitraum von 114,4 Mio. € im ersten Jahr auf 422,1 Mio. € im Jahr 50 und liegen damit deutlich unterhalb der Umsatzwachstumsrate. Die größten Kosten innerhalb der COGS entfallen auf Personalkosten (56 %), gefolgt von Wartungskosten (24 %), Materialkosten (17 %) und sonstigen Ausgaben, wie IT (3 %). Die Nettogewinnmarge entwickelt sich im Laufe des Betrachtungszeitraums stark positiv: Sie liegt im ersten Jahr bei 39,58 % und erreicht bis zum Jahr 50 54,39 %. Eine ähnliche positive Entwicklung zeigt sich bei der EBITDA-Marge, die von 68,63 % im ersten Jahr auf 74,10 % im Jahr 50 ansteigt.

**TABELLE 21** führt den NPV der Unternehmung sowie die Kernergebnisse des positiven Szenarios bzgl. Umsatz, EBIT, Jahresüberschuss und FCF in Zeitabschnitten von jeweils 10 Jahren auf.

| Kennzahl / Jahr           | 1        | 10    | 20    | 30      | 40      | 50      |
|---------------------------|----------|-------|-------|---------|---------|---------|
| NPV [Mio. €]              | 7.629,1  |       |       |         |         |         |
| Gesamtumsatz [Mio. €]     | 433,8    | 563,3 | 759,1 | 1.034,6 | 1.431,4 | 2.019,3 |
| EBIT [Mio. €]             | 267,0    | 359,0 | 500,7 | 704,4   | 1.005,7 | 1.465,5 |
| Jahresüberschuss [Mio. €] | 171,5    | 243,4 | 353,8 | 511,9   | 744,6   | 1.098,1 |
| FCF [Mio. €]              | -1.304,8 | 300,0 | 406,2 | 559,0   | 785,0   | 1.129,9 |

**TABELLE 21**

Ergebnis (positives Szenario).  
Quelle: Eigene Darstellung.

ABBILDUNG 59 stellt für das erste und letzte Jahr die prozentualen Beiträge der einzelnen Einnahmequellen zum Gesamtumsatz dar. Lutetium-177, Molybdän-99/Technetium-99m, Terbium-149, Actinium-225, Plutonium-238 und Gadolinium-148 fallen dabei in die Kategorie *Radioisotope durch Bestrahlung*, während Cäsium-137 und Strontium-90 unter *Radioisotope durch Recycling* fallen. ABBILDUNG 60 zeigt in Abständen von 10 Jahren die jeweiligen Umsätze, COGS und Jahresüberschüsse des positiven Szenarios auf.

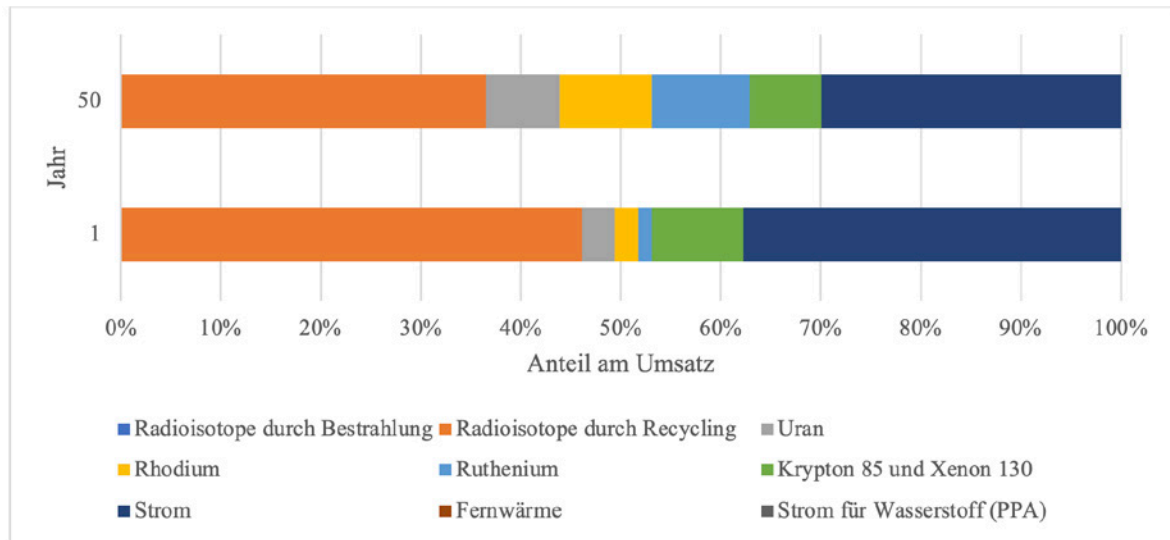


ABBILDUNG 59

Umsatzaufteilung im ersten und letzten Betrachtungsjahr (positiv)  
Zusammensetzung der Umsatzerlöse im ersten und letzten Betrachtungsjahr für das positive Szenario.  
Quelle: Eigene Darstellung.



ABBILDUNG 60

Umsatzerlöse, COGS, Jahresüberschuss (positiv)  
Umsatzerlöse, COGS sowie Jahresüberschüsse für die Jahre 1, 10, 20, 30, 40, 50 im positiven Szenario.

## Negatives Szenario

Im negativen Szenario beträgt der NPV des Projekts 912,5 Mio. €. Der Jahresüberschuss ist in allen Jahren positiv und bewegt sich von 37,7 Mio. € im Jahr 1 auf 213,4 Mio. € im Jahr 50. Das EBIT beträgt 91,9 Mio. € im ersten Jahr und wächst bis auf 285,9 Mio. € im letzten Jahr.

Der FCF ist nur im ersten Jahr aufgrund der anfänglichen Investitionen negativ, wächst ab dem zweiten Jahr jedoch stetig an (Jahr 2: 103,9 Mio. €, Jahr 50: 247,7 Mio. €). Die Umsätze des Projekts steigen von 252,2 Mio. € im ersten Jahr auf 848,5 Mio. € im Jahr 50 und fallen damit im Vergleich zum positiven Szenario deutlich geringer aus. Die Struktur des Umsatzes verschiebt sich über die Zeit: Während im ersten Jahr 51 % des Umsatzes durch den Verkauf von Strom an Elektrolyseurbetreiber generiert werden, steigt dieser Anteil bis zum Jahr 50 auf 56 %. Im ersten Jahr stellen Strontium und Cäsium 20 %, im letzten Jahr 22 % des Umsatzes dar. Die anteiligen Einnahmen aus Xenon und Krypton entwickeln sich hingegen leicht positiv, von 16 % im ersten Jahr auf 17 % im letzten Jahr. Die Einnahmen aus den Rohstoffen Uran, Rhodium und Ruthenium, die zu Beginn des Zeitraums zusammen knapp 12 % des Umsatzes ausmachen, sinken bis zum Ende des Betrachtungszeitraums auf 4 %, da in diesem Szenario CAGRs von 0 % angenommen werden, die unvorteilhaften Preisentwicklungen der Metalle simulieren. Einnahmen aus dem Verkauf von Fernwärme entwickeln sich von anfänglichen 4,2 Mio. € zu 15,5 Mio. € zum Ende des Betrachtungszeitraums, liegen jedoch im Verhältnis zum Gesamtumsatz in beiden Fällen bei ca. 2 %. Restliche Einnahmen (also aus dem Verkauf der übrigen Radioisotope) belaufen sich wie im positiven Szenario auch sowohl zu Anfang als auch zum Ende der Betrachtung auf unter 1 % des jeweiligen Gesamtumsatzes.

Die COGS steigen im Verlauf der 50 Jahre von 114,4 Mio. € auf 486,9 Mio. €, was im Vergleich zum positiven Szenario mit einer stärkeren Wachstumsrate der COGS, im negativen Szenario mit 3,0 % statt der Inflationsrate von 2,7 % begründet ist. Die Anteile der COGS entfallen wie zuvor zu 56 % auf Personalkosten, gefolgt von Wartungskosten (24 %), Materialkosten (17 %) und IT (3 %). Die Nettogewinnmarge bleibt während des gesamten Zeitraums positiv, verbessert sich zudem von 14,95 % im ersten Jahr auf 25,15 % im Jahr 50. Anders verhält sich die EBITDA-Marge, die im Jahr 1 bei 49,63 % liegt, jedoch bis zum Jahr 50 auf 37,62 % zurückgeht.

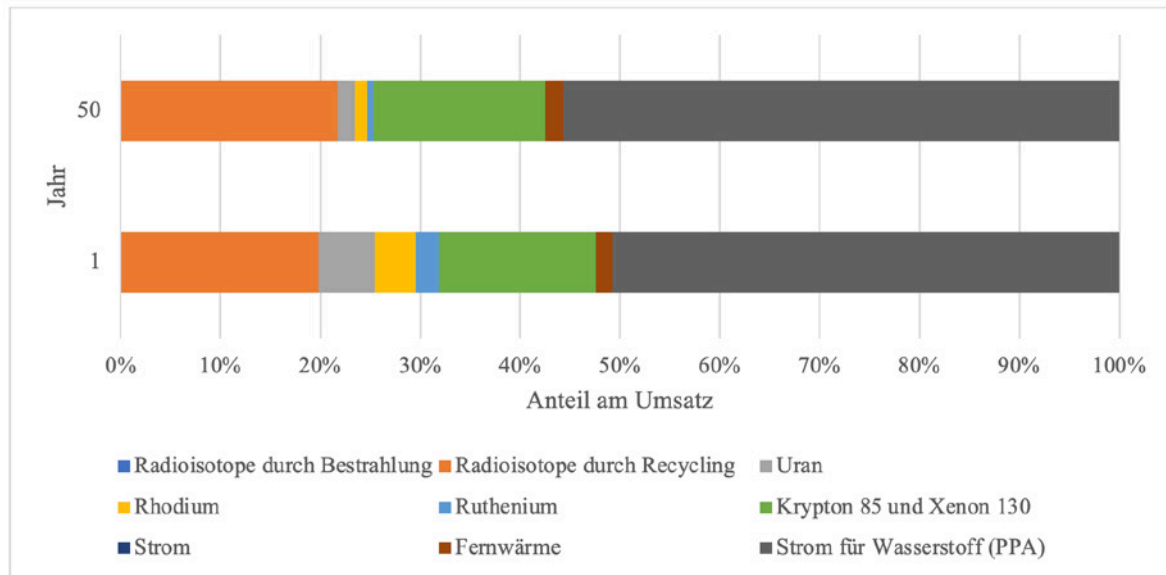
**TABELLE 21** führt den NPV der Unternehmung sowie die Kernergebnisse des negativen Szenarios bzgl. Umsatz, EBIT, Jahresüberschuss und FCF in Zeitabschnitten von jeweils 10 Jahren auf.

| Kennzahl / Jahr           | 1        | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    |
|---------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| NPV [Mio. €]              | 912,5    |       |       |       |       |       |
| Gesamtumsatz [Mio. €]     | 252,2    | 312,3 | 398,3 | 510,6 | 657,2 | 848,5 |
| EBIT [Mio. €]             | 91,9     | 114,1 | 144,5 | 182,2 | 228,7 | 285,9 |
| Jahresüberschuss [Mio. €] | 37,7     | 57,6  | 84,8  | 118,8 | 161,1 | 213,4 |
| FCF [Mio. €]              | -1.561,8 | 118,8 | 141,7 | 169,9 | 204,8 | 247,7 |

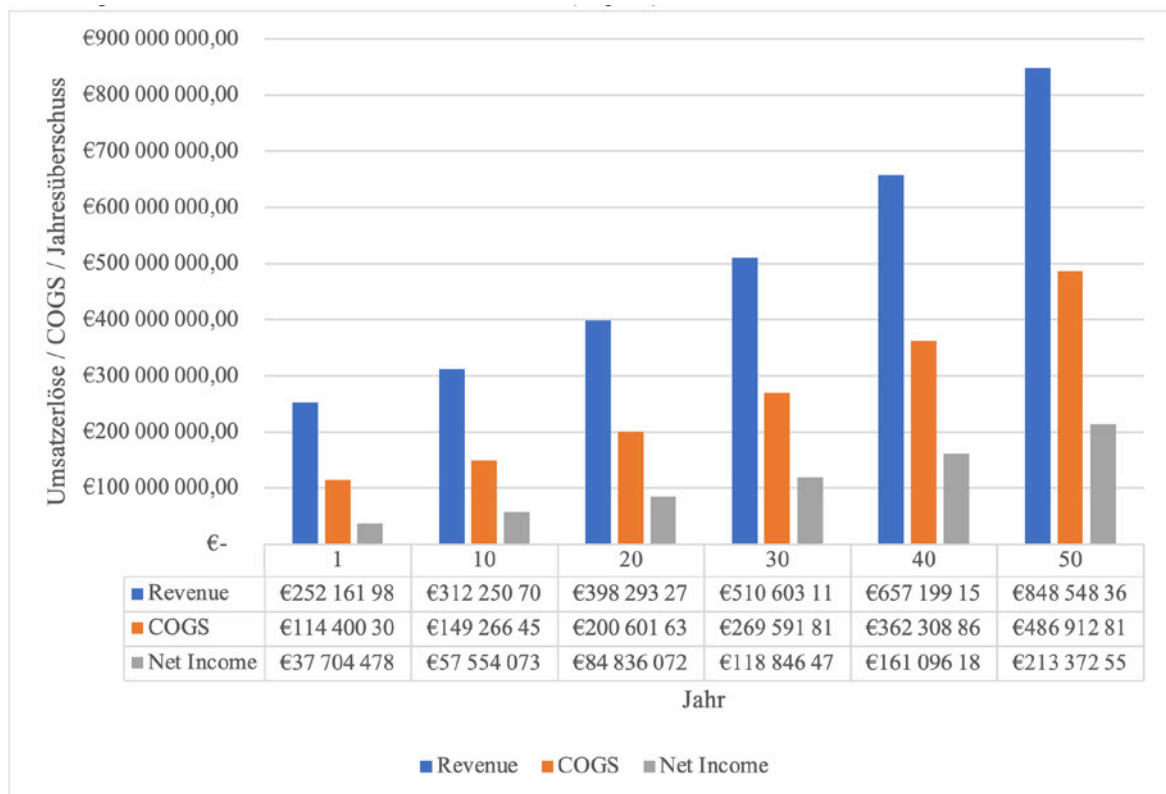
TABELLE 21

Ergebnis (negatives Szenario).  
Quelle: Eigene Darstellung.

Auch für dieses Szenario sind in **ABBILDUNG 61** die umsatzbezogenen Anteilsverteilungen dargestellt, wobei sich die Produkte in die in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Kategorien einordnen lassen. **ABBILDUNG 62** zeigt in Abständen von 10 Jahren die jeweiligen Umsätze, COGS und Jahresüberschüsse des negativen Szenarios auf.


**ABBILDUNG 61**

Umsatzaufteilung im ersten und letzten Betrachtungsjahr (negativ)  
Zusammensetzung der Umsatzerlöse im ersten und letzten Betrachtungsjahr im negativen Szenario.  
Quelle: Eigene Darstellung.


**ABBILDUNG 62**

Umsatzerlöse, COGS, Jahresüberschuss (negativ)  
Umsatzerlöse, COGS sowie Jahresüberschüsse für die Jahre 1, 10, 20, 30, 40, 50 im negativen Szenario.

## 5 Diskussion

### 5.1.

#### Business-Case und Vergütung der Transmutation

Die vorausgegangenen Ergebnisse der wirtschaftlichen Analyse der Recycling- und Transmutationsanlage ergeben, dass ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage aus dem Vertrieb der produzierten Isotope und Energiemengen unter den Annahmen beider Szenarien möglich ist, da sie jeweils einen positiven NPV aufweisen. Den Umfang ggf. zu entrichtender Entsorgungsgebühren gilt es nach Möglichkeit zu quantifizieren. Es bleibt jedoch darauf hinzuweisen, dass eine derartige Bepreisung nicht auf Basis marktüblicher Vergleichswerte durchgeführt werden kann, da ein solcher Markt bisher noch nicht existiert. Somit ist die Gebührenhöhe zwischen der öffentlichen Hand und dem Betreiber der Anlage bilateral zu verhandeln und festzulegen. Im Folgenden werden verschiedene Entscheidungsgrundlagen erläutert, die grundsätzlich als Basis für eine solche Quantifizierung herangezogen werden könnten sowie deren Eignung für den vorliegenden Fall der Transmutationsanlage diskutiert.

#### ZUGRUNDELEGUNG EINGESPARTER ZWISCHENLAGERUNGSKOSTEN

Zur Ermittlung der Vergütung für die Transmutation können die eingesparten Kosten der Zwischenlager herangezogen werden. Nach einer Schätzung von Warth & Klein Grant Thornton AG<sup>192</sup> fallen im Zeitraum von 2015 bis 2098, dem gesamten Zeitraum der Zwischenlagerung, in Deutschland insgesamt Ausgaben von rund 5,823 Mrd. € für Zwischenlagerung an. Davon 3,921 Mrd. € zwischen 2035 und 2098<sup>193</sup>. Um den Anteil des Zwischenlagers am KKW aus diesen gesamtdeutschen Kosten zumindest näherungsweise abzuleiten, wird eine lineares Verhältnis zwischen diesen Kosten und dem Volumen des gelagerten Atommülls angenommen. Dieser Anteil stellt anhand belegter Behälterstellplätze etwa 7,2 % des hochradioaktiven Atommülls dar, der Stand April 2024 in ganz Deutschland in Zwischenlagern gelagert wird<sup>194</sup>. Folglich werden unter zuvor genannten Annahmen in der hier vorliegenden Analyse näherungsweise Kosten von ca. 282,3 Mio. € (7,2 % von 3,921 Mrd. €) zwischen 2035 und 2098 in Bayern abgeleitet. Das Zwischenlagervolumen würde durch Inbetriebnahme der Anlage mit der Zeit stark abnehmen, da ein Teil der Abfälle durch Partitionierung in die Kreislaufwirtschaft zurückgegeben werden kann und lediglich ein Rest nach erfolgter Transmutation bis zur Errichtung der Endlager weiterhin zwischengelagert werden muss. Dieser Wert dürfte nach Einschätzungen von Transmutex auf etwa 15 % des ursprünglichen Zwischenlagervolumens zurückgehen, wodurch hier stark vereinfacht eine Gesamteinsparung in Bayern von 240 Mio. € ( $85 \% \times 282,3 \text{ Mio. €}$ ) bzw. über einen fünfzigjährigen Betrachtungszeitraum hinweg 4,8 Mio. € jährlich geschätzt werden kann. Diese Einsparungen kann der Staat hingegen an den Betreiber als Entgelt zahlen.

#### ZUGRUNDELEGUNG DER KENFO-RÜCKSTELLUNGEN

Ein weiterer Ansatz orientiert sich an den Rückstellungen des KENFO (Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung), woraus dem Bund jährliche Kosten für Zwischen- und Endlagerung erstattet werden. Hier könnte ein Anteil der Rückstellungen für End- und Zwischenlager als jährliche Gebühr für die Transmutationsanlage aufgewendet werden, da der Partitionierungs- und Transmutationsprozess die Kosten für das Zwischen- und Endlager (z. B. durch Minimierung des zu lagernden Atommüllvolumens) erheblich senken kann. Aufgrund mangelnder öffentlicher Informationen bzgl. vorgesehener Investitionsplanung und anteilsmäßiger Verteilung zwischen zu kompensierenden End- und Zwischenlagerkosten kann die Bestimmung eines konkreten Ausschüttungsbetrages in Anlehnung an den KENFO an dieser Stelle nicht abschließend hergeleitet werden. Grundsätzlich erscheint eine Finanzierung der Gebühren unter Orientierung am verwalteten Fondsvermögen des KENFO jedoch eine denkbare Option, die in Verhandlungen zwischen Staat und Anlagenbetreiber weiter zu konkretisieren und quantifizieren wäre.

### ZUGRUNDELEGUNG EINGESPARTER ENDLAGERUNGSKOSTEN

Die Berechnung einer staatlichen Gebühr rein auf Basis von Kosteneinsparungen bei benötigten Endlagern ist aufgrund fehlender verlässlicher Kostenschätzungen für Endlager (s. [Kapitel 2](#)) nicht fundiert möglich, da weder ein Standort bestimmt noch eine realistische Gesamtkostenrechnung dazu erstellt wurde.

### ZUGRUNDELEGUNG DES NPV

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die Höhe der fälligen Gebühren am NPV des Projekts zu orientieren. Um einen wirtschaftlich lohnenden Betrieb der Anlage im Betrachtungszeitraum gewährleisten zu können, ist ein positiver NPV nötig. Jährliche staatliche Zahlungen könnten also so dimensioniert werden, dass der NPV überhaupt erst positiv wird oder aber einen NPV auf dem Level vergleichbarer Projekte erzielt. Beide Möglichkeiten erscheinen für den vorliegenden Fall der Anlage aufgrund des ohnehin bereits positiven NPVs in beiden Szenarien sowie des Mangels vergleichbarer Transmutationsanlagen in Deutschland (und damit auch üblicher NPVs solcher Projekte als Vergleichsbasis) nicht zur Gebührenfestlegung geeignet.

Die Ergebnisse der Studie legen nahe, dass eine isolierte betriebswirtschaftliche Betrachtungsweise diesem Projekt in seiner Gesamtheit nicht gerecht werden kann. Hinzuzuziehen ist neben ökonomischen Einsparungen insbesondere der enorme gesellschaftliche und auch sicherheitstechnische Mehrwert für Staat und Gesellschaft, der durch das Recycling und Entschärfen des Atom Mülls entsteht. Dies gewinnt besonders im Lichte der Debatte um geeignete Endlagerstätten in Deutschland an Gewicht, der zufolge die Suche nach einem endgültigen Standort sich möglicherweise bis in die 2070er-Jahre hinauszögern könnte. Gleichzeitig kann dieser gesellschaftliche Mehrwert nicht allein durch die hier durchgeführte ökonomische Analyse des Anlagenbetriebs in Form von Gebührenzahlungen berücksichtigt bzw. angemessen „umgerechnet“ werden.

## 5.2. Limitationen und Ausblick

Diese Studie bietet eine wirtschaftliche Bewertung der geplanten Recycling- und Transmutationsanlage auf Basis einer NPV-Berechnung, die sowohl umfassende Kosteninformationen von Transmutex als auch Einnahmequellen umfasst, die zur Finanzierung des Projekts beitragen sollen. Die aufgeführten Kosten- und Einnahmepositionen stellen keinen abschließenden Katalog dar und können bei Bedarf ergänzt werden.

Es sollte auch beachtet werden, dass aufgrund der langen Vorlaufzeit dieser Studie im Verhältnis zum tatsächlichen Projektbeginn die endgültigen Preise für die Einnahmen aus dem Verkauf von Radioisotopen, Metallen und Gasen sowie aus dem Verkauf von Strom und Wärme erheblich abweichen können. Preisprognosen und Nachfragemengen für Fernwärme basieren auf Branchendurchschnittswerten und Unternehmensumfragen und können sich in den kommenden Jahren ändern oder von den bisher angenommenen Werten abweichen. Einnahmen durch den Terbium-, Plutonium-, Gadolinium, Cäsium- und Kryptonverkauf könnten darüber hinaus durch mangelnde und regulatorisch beschränkte Preistransparenz im Bereich radioaktiver Materialien nicht bestimmt werden und fließen somit nicht in die Berechnung des NPV ein, der jedoch ohnehin unter den Annahmen beider Szenarien positiv ausfällt. Daher sollte die Bewertung der Einnahmen als fundierte Herleitung und nicht als abschließend gültige Summe angesehen werden.

Im Weiteren ist zu beachten, dass diese Studie bestimmte rechtliche Annahmen zum Verkauf von Produkten ebenso wie zum Bau und Betrieb der Anlage trifft, die aktuell nicht zwingend gegeben sind (s. **Kapitel 4**): Es wird davon ausgegangen, dass alle produzierten Produkte (Energie, Radioisotope, Materialien aus dem Abfall), unter Berücksichtigung der bereits in Abschnitt 5.2.2 genannten Einschränkung für den Verkauf von Strontium-90, je nach Szenario frei und vollständig auf dem Markt verkauft werden können und die gesamte Energiekapazität der Anlage ausgenutzt wird.

Um ein breites Spektrum möglicher zukünftiger Entwicklungen zu berücksichtigen, wie z. B. Veränderungen der Personalkosten, Umsatzschwankungen oder Zinsentwicklung, werden zwei verschiedene Szenarien integriert, deren Annahmen in den Abschnitten 5.2.2.1 und 5.2.2.2 beschrieben sind. Es wird dringend empfohlen, diese Entwicklungen zu einem geeigneten Zeitpunkt erneut zu bewerten und mit den Annahmen in den Szenarien zu vergleichen, um eine detailliertere Bewertung der Gültigkeit der berechneten Ergebnisse vorzunehmen.

Zuletzt muss darauf hingewiesen werden, dass die verschiedenen Absatzmärkte, vor allem die der Radioisotope, Metalle und Gase, nur oberflächlich in dieser Studie behandelt werden konnten. Insbesondere wurden keine ausgiebigen Marktanalysen durchgeführt, weshalb nur grobe Einschätzungen bzgl. der Preisentwicklungen verschiedener Produkte getätigt werden konnten und die Berechnungen stets davon ausgehen, dass (mit Ausnahme von Strontium) sämtliche produzierte Mengen der zu verkaufenden Produkte auch am Markt einen Abnehmer finden. Ausdrücklich ist jedoch darauf hinzuweisen, dass vor allem die hier einschlägigen Märkte stark von geopolitischen Entwicklungen geprägt sind (z. B. aktuell durch den Krieg in der Ukraine und im Nahen Osten), was eine Einschätzung der Preisentwicklung und Marktnachfrage über 50 Jahre hinweg erheblich erschwert.

Eine erneute Evaluierung der betriebswirtschaftlichen Lage des Projektvorhabens sollte dementsprechend in einigen Jahren vorgenommen werden, um bspw. notwendige Korrekturen nötiger staatlicher Gebühren für die Dienstleistungen des Betreibers im Hinblick auf die Atom-müllentschärfung frühzeitig zu identifizieren.

## 6 Fazit

---

In der vorliegenden Untersuchung wurde das Projekt zum Bau einer beschleunigergetriebenen Anlage zur Transmutation und Recycling von radioaktiven Abfällen betriebswirtschaftlich in zwei verschiedenen Szenarien analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass in beiden Szenarien rein aus den Verkäufen der gewonnenen Rohstoffe und Energie ein positiver Nettobarwert erzielt werden kann, wobei dieser im positiven Szenario erheblich höher ausfällt, was insbesondere durch den angenommenen Abnahmepreis für Strom am öffentlichen Markt sowie positive Preisentwicklungen der verkauften Rohstoffe begründet ist. Der Verkauf von Energie macht dabei im positiven Szenario am Ende des Betrachtungszeitraums 30 % der Gesamtumsätze aus, während der Rest aus dem Verkauf von Radioisotopen, Metallen und Gasen stammt. Im negativen Szenario weicht dieser Anteil der Umsätze aus dem Energieverkauf ab (57 % der Gesamtumsätze).

Um die wirtschaftliche Tragfähigkeit der Recyclinganlage realistisch und zukunftsbeständig zu sichern, bedarf es rein aus betriebswirtschaftlicher Sicht unter den Annahmen beider Szenarien keiner finanziellen Vergütung für die Entsorgung des Atom Mülls durch den Staat, also dem Eigentümer der radioaktiven Abfälle, an den Betreiber der Anlage. Der wirtschaftliche Betrieb kann in beiden modellierten Fällen durch Energie- und Rohstoffverkauf gewährleistet werden.

Die Gebührenzahlungen des Staates entfallen dennoch nicht zwangsweise, sondern sind ggf. weiterhin als Entgelt für die Entsorgung der staatlich verwahrten radioaktiven Abfälle an den Betreiber der Entsorgungsanlage zu entrichten. Diese Gebühren sind dabei nicht allein durch den immensen gesellschaftlichen Mehrwert zu rechtfertigen sein. Darüber hinaus sinken durch die Fähigkeit der Recyclinganlage, den Bedarf an Endlagern zumindest teilweise zu mindern, die zu erwartenden Kosten für die Endlagerung. Die bereits lang andauernde Suche nach Atom müllendlager in Deutschland, die sich voraussichtlich noch bis nach 2070 erstrecken wird, kann so etwas entschärft werden. Durch die Verarbeitung von Atom müll in der Anlage können somit erhebliche finanzielle Einsparungen für den Staat realisiert werden, die bei einer Entscheidung über das Ausmaß der zu zahlenden staatlichen Gebühren zu berücksichtigen sind. Eine Quantifizierung der Gebührenhöhe ist auf Basis von Kosteneinsparungen im Bereich der Zwischenlager näherungsweise möglich, während bei der Zugrundelegung von Kosten-einsparungen bei Endlagern fundierte Kostenberechnungen fehlen. Eine Orientierung am Fondsvermögen des KENFO erscheint bei der Ermittlung der Gebührenhöhe ebenfalls denkbar. Schlussendlich sind die Gebühren insbesondere aufgrund fehlender Vergleichsmärkte und mangelnder Informations-transparenz in Verhandlungen zwischen der öffentlichen Hand und dem Anlagenbetreiber zu konkretisieren und auszuhandeln.

## 7 Anhang

### 7.1. Umsätze und Anlagenkapazitäten

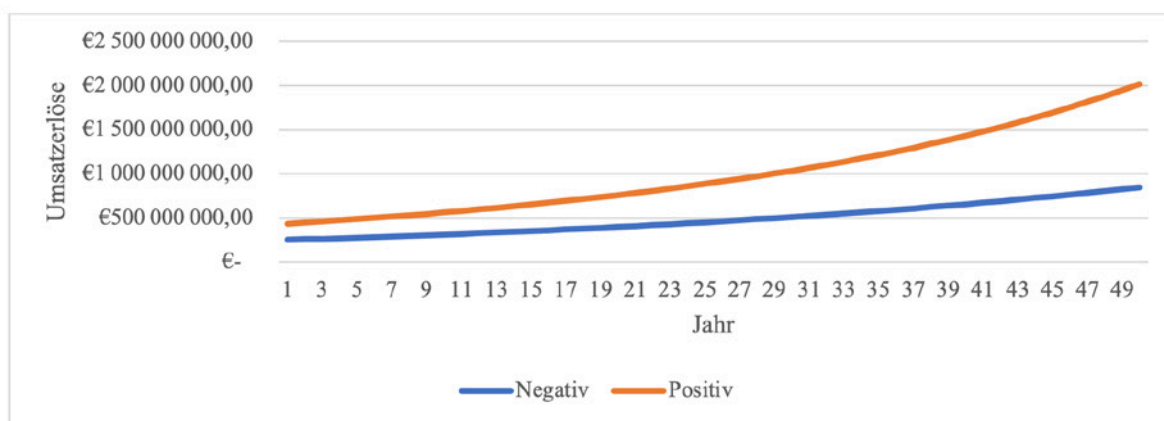


ABBILDUNG 63 Gesamtumsatz pro Jahr  
Darstellung der jährlich erwirtschafteten Umsätze der Anlage im Betrachtungszeitraum für beide Szenarien.  
Quelle: Eigene Darstellung.

| Isotop                       | Menge pro Jahr [GBq/a] | Preis [€/GBq]        | Gesamtumsatz [€] |
|------------------------------|------------------------|----------------------|------------------|
| Lutetium 177                 | 15,6                   | 375 <sup>195</sup>   | 5.850,00         |
| Molybden 99 / Technetium 99m | 62,4                   | 21,62 <sup>196</sup> | 1.349,19         |
| Terbium 149                  | 2,76                   | n.a.                 | n.a.             |
| Actinium 225                 | 11,28                  | 675 <sup>197</sup>   | 7.614,00         |
| Plutonium 238                | 0,06                   | n.a.                 | n.a.             |
| Gadolinium 148               | 0,018                  | n.a.                 | n.a.             |
| <b>Total</b>                 |                        |                      | <b>14.813,19</b> |

TABELLE 22 Mengen & Umsätze Jahr 1 – Radioisotope durch Bestrahlung.  
Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis externer Preisinformationen.

| Isotop       | Menge pro Jahr [GBq/a] | Preis [€/GBq]             | Gesamtumsatz [€]                           |
|--------------|------------------------|---------------------------|--------------------------------------------|
| Caesium 137  | 15,6                   | n.a.                      | n.a.                                       |
| Strontium 90 | 15,6                   | 95.175.000 <sup>198</sup> | 200.000.000<br>(50.000.000) <sup>199</sup> |
| <b>Total</b> |                        |                           | <b>200.000.000<br/>(50.000.000)</b>        |

TABELLE 23 Mengen & Umsätze Jahr 1 – Radioisotope durch Recycling.  
Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis externer Preisinformationen.

| Metall       | Menge pro Jahr [kg/a] | Preis [€/kg]            | Gesamtumsatz [€]     |
|--------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|
| Uran         | 87.600                | 162,0752 <sup>200</sup> | 14.197.787,52        |
| Rhodium      | 68,4                  | 150.300 <sup>201</sup>  | 10.280.520,00        |
| Ruthenium    | 452,4                 | 13.100 <sup>202</sup>   | 5.926.440,00         |
| Krypton 85   | 480, 1                | n.a.                    | n.a.                 |
| Xenon 130    | 3868, 3               | 10,68 <sup>203</sup>    | 39.572.828,52        |
| <b>Total</b> |                       |                         | <b>69.977.576,04</b> |

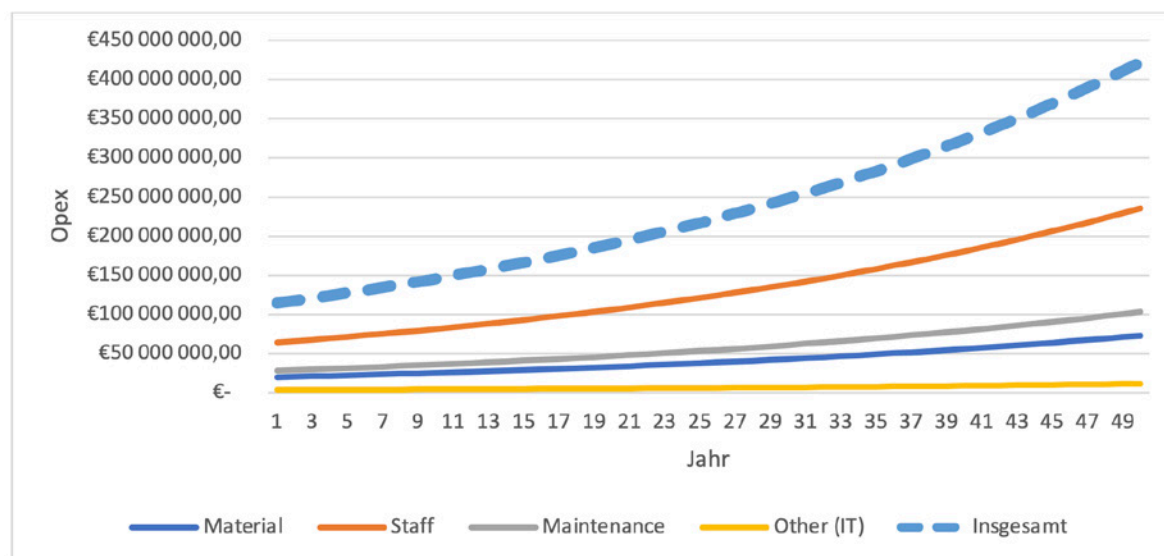
**TABELLE 24** Mengen & Umsätze Jahr 1 – Metalle und Gase durch Recycling.  
Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis externer Preisinformationen.

| Energieform         | Gesamtkapazität der Anlage pro Jahr |
|---------------------|-------------------------------------|
| Elektrische Energie | 1.638.120 MWh <sub>el</sub>         |
| Thermische Energie  | 4.467.600 MWh <sub>th</sub>         |

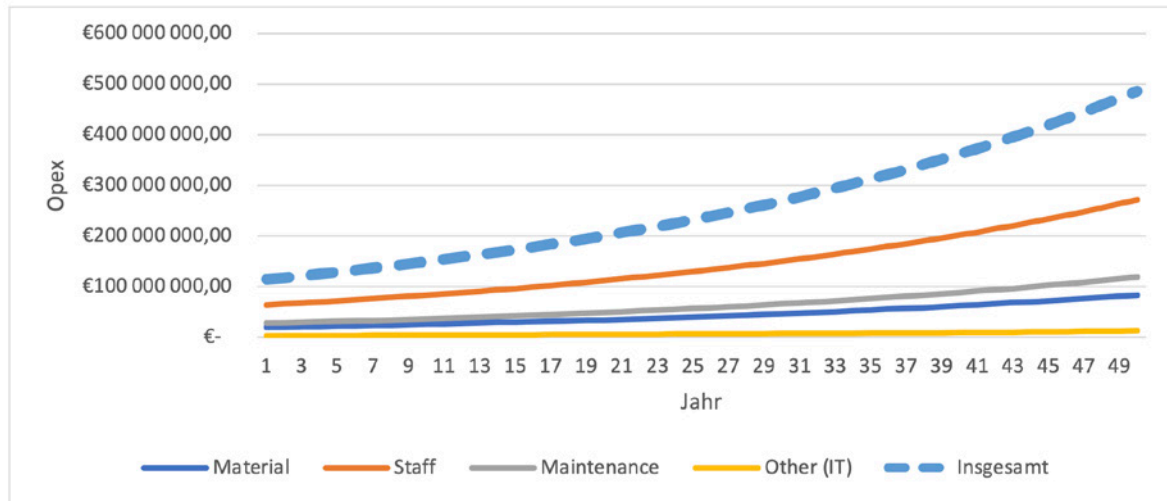
**TABELLE 25** Energiekapazitäten der Anlage.  
Quelle: Transmutex.

## 7.2.

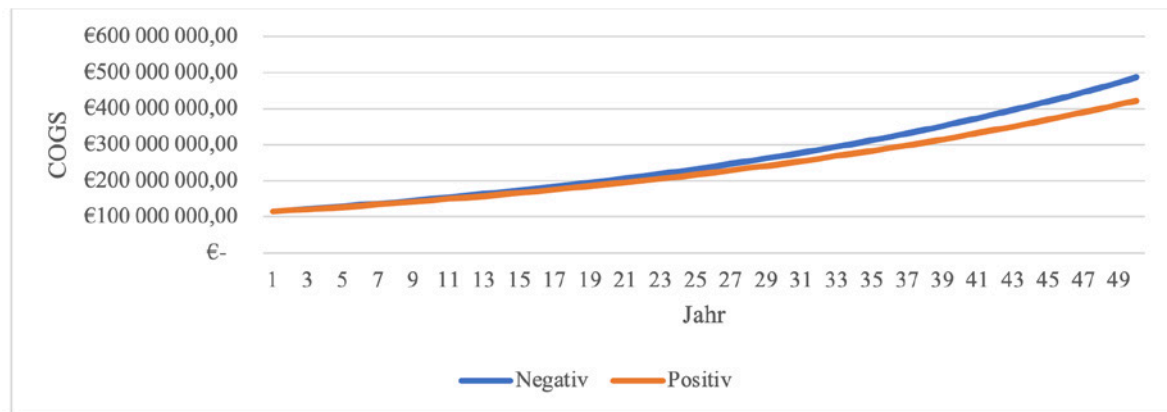
### Cost of Goods Sold (COGS)



**ABBILDUNG 64** Cost of Goods Sold pro Jahr (positiv)  
Darstellung der jährlich anfallenden COGS des Anlagenbetriebs im Betrachtungszeitraum im positiven Szenario.  
Quelle: Eigene Darstellung.



**ABBILDUNG 65** Cost of Goods Sold pro Jahr (negativ)  
Darstellung der jährlich anfallenden COGS des Anlagenbetriebs  
im Betrachtungszeitraum im negativen Szenario.  
*Quelle: Eigene Darstellung.*



**ABBILDUNG 66** Cost of Goods Sold pro Jahr (gesamt)  
Vergleich der jährlich anfallenden COGS des Anlagenbetriebs  
im Betrachtungszeitraum zwischen beiden Szenarien.  
*Quelle: Eigene Darstellung.*

## 7.3.

**Capex**

| Kostenpunkt                                       | Kosten [k€]    | Kostenreduktion [%] | FOAK in Bayern [k€] |
|---------------------------------------------------|----------------|---------------------|---------------------|
| ECR Source and RFQ pre-accelerator                | 5.430          | -                   | 5.430               |
| Low energy beam line                              | 1.550          | -                   | 1.550               |
| Injector cyclotron                                | 18.850         | -                   | 18.850              |
| Medium energy beam line                           | 1.470          | -                   | 1.470               |
| Booster cyclotron                                 | 36.730         | -                   | 36.730              |
| High energy beam line                             | 2.130          | -                   | 2.130               |
| Ring cyclotron                                    | 85.930         | -                   | 85.930              |
| Target transfer beam line                         | 5.930          | -                   | 5.930               |
| Accelerator control system                        | 800            | -                   | 800                 |
| Cabling and piping                                | 1.200          | -                   | 1.200               |
| Fast Interlock system (optimized for high uptime) | 500            | -                   | 500                 |
| Machine protection system                         | 500            | -                   | 500                 |
| Person interlock and access system                | 500            | -                   | 500                 |
| Radiation protection monitoring system            | 500            | -                   | 500                 |
| Auxiliary supplies and HVAC                       | 30.400         | -                   | 30.400              |
| Accelerator building                              | 50.000         | 50 %                | 25.000              |
| <b>Total</b>                                      | <b>242.420</b> | <b>25.000</b>       | <b>217.420</b>      |

TABELLE 26 Capex – Accelerator [Beschleuniger].  
Quelle: Transmutex.

| Kostenpunkt                                         | Kosten [k€] | Kostenreduktion [%] | FOAK in Bayern [k€] |
|-----------------------------------------------------|-------------|---------------------|---------------------|
| Target CAPEX                                        | 10.000      | -                   | 10.000              |
| Reactor building                                    | 271.484     | 0 % (50 %)          | 271.484 (135.742)   |
| Primary coolant supply (lead)                       | 13.406      | -                   | 13.406              |
| Total primary system components                     | 192.390     |                     |                     |
| Primary pumps                                       | 131.279     | 50 %                | 65.640              |
| Primary heat exchangers                             | 18.978      | 50 %                | 9.489               |
| Reactor inner vessels                               | 6.093       | 50 %                | 3.047               |
| Reactor outer vessels with cover                    | 14.625      | 50 %                | 7.313               |
| Vessel support                                      | 16.192      | 50 %                | 8.096               |
| I&C associated to primary system                    | 5.223       | 50 %                | 2.612               |
| Emergency cooling systems                           | 1.505       | -                   | 1.505               |
| Electrical equipment and power network distribution | 17.428      | 50 %                | 8.714               |
| Auxiliary systems                                   | 312.740     | 50 %                | 156.370             |
| Heating, ventilation, air conditioning (HVAC) stack | 10.803      | 100 %               | -                   |
| Fire water tank                                     | 2.673       | 100 %               | -                   |

TABELLE 27.1 Capex – Reactor (with target & effluent treatment without fuel) [Reaktor].  
Quelle: Transmutex.

| Kostenpunkt                                           | Kosten [k€]      | Kostenreduktion [%]      | FOAK in Bayern [k€]      |
|-------------------------------------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|
| Fuel building                                         | 1.254            | 50 %                     | 627                      |
| Waste storage facility                                | 2.505            | 100 %                    | -                        |
| Control room/emergency control room                   | 18.756           | 10 %                     | 16.880                   |
| Balance of plant                                      | 219.142          |                          |                          |
| Auxiliary boiler                                      | 4.672            | 50 %                     | 2.336                    |
| Condensate tank                                       | 959              | 50 %                     | 479                      |
| Electric building                                     | 18.686           | 100 %                    | 0                        |
| Transformers                                          | 3.644            | 50 %                     | 1.822                    |
| Fuel oil tank                                         | 2.446            | -                        | 2.446                    |
| Forced draught cooling towers                         | 2.790            | 100 %                    | 0                        |
| Turbine building civil work                           | 185.946          | 50 %                     | 92.973                   |
| Mechanical main equipment                             |                  |                          |                          |
| Electrical equipment                                  |                  |                          |                          |
| Local instrumentation                                 |                  |                          |                          |
| Piping materials                                      |                  |                          |                          |
| Refueling and transport casks                         | 10.000           | -                        | 10.000                   |
| Emergency diesels                                     | 1.302            | 100 %                    | -                        |
| Simulator and training center                         | 5.000            | -                        | 5.000                    |
| Environment monitoring (seismic, meteo, radiological) | 2.000            | 100 %                    | -                        |
| Service building & operation support centre           | 17.610           | 100 %                    | -                        |
| Fire brigade                                          | 10.420           | 100 %                    | -                        |
| Pump house                                            | 10.420           | 100 %                    | -                        |
| Buildings class II, security infrastructure           | 47.114           |                          |                          |
| SwitchYard                                            | 1.209            | 50 %                     | 605                      |
| Warehouse                                             | 4.389            | 100 %                    | -                        |
| Cold Machine Shop                                     | 7.803            | 50 %                     | 3.901                    |
| Lay Down Area                                         | 3.862            | 100 %                    | -                        |
| Cooling Tower Auxiliary Building                      | 3.901            | 100 %                    | -                        |
| Water Treatment Plant Building                        | 3.901            | 100 %                    | -                        |
| Service Water Tank                                    | 1.001            | 100 %                    | -                        |
| Administration Building                               | 8.778            | 100 %                    | -                        |
| Internal Car Park                                     | 1.144            | 100 %                    | -                        |
| Grease & Gases Storage                                | 975              | 100 %                    | -                        |
| N2 & Ar Warehouse, m2                                 | 312              | -                        | 312                      |
| Laboratory                                            | 2.601            | -                        | 2.601                    |
| Demineralised Water Tank                              | 1.001            | 100 %                    | -                        |
| Sewage Treatment Plant                                | 3.901            | 100 %                    | -                        |
| Effluent Collection Pond                              | 975              | -                        | 975                      |
| External Car Park                                     | 176              | -                        | 176                      |
| Access Control Building                               | 163              | 100 %                    | -                        |
| Roads                                                 | 1.022            | 100 %                    | -                        |
| Engineering costs                                     | 98.400           |                          |                          |
| Project management                                    | 48.000           | -                        | 48.000                   |
| Engineering & procurement                             | 36.000           | -                        | 36.000                   |
| Licensing                                             | 14.400           | -                        | 14.400                   |
| <b>Total</b>                                          | <b>1.276.354</b> | <b>479.146 (614.888)</b> | <b>797.208 (661.466)</b> |

TABELLE 27.2 Capex – Reactor (with target & effluent treatment without fuel) [Reaktor].  
Quelle: Transmutex.

| Kostenpunkt                            | Kosten [k€]    | Kostenreduktion [%] | FOAK in Bayern [k€] |
|----------------------------------------|----------------|---------------------|---------------------|
| Facility capital costs for Pu,Th/Th b  | 98.959         |                     |                     |
| Operations                             | 36.432         | -                   | 36.432              |
| Contact Maintenance                    | 486            | -                   | 486                 |
| Remote Maintenance                     | 29.145         | -                   | 29.145              |
| Operations Support                     | 2.429          | -                   | 2.429               |
| Facility Support                       | 2.477          | -                   | 2.477               |
| Quality Control                        | 4.688          | -                   | 4.688               |
| Change Rooms                           | 3.818          | 50 %                | 1.909               |
| Warehouse                              | 1.136          | 50 %                | 568                 |
| Land Acquisition and Site Preparation  | 4.369          | 100 %               | -                   |
| Office Building                        | 7.427          | 100 %               | -                   |
| Licensing and Environmental            | 6.553          | -                   | 6.553               |
| Facility capital costs for Th(RB)      | 55.094         |                     |                     |
| Operations                             | 31.741         | -                   | 31.741              |
| Contact Maintenance                    | 2.116          | -                   | 2.116               |
| Operations Support                     | 2.116          | -                   | 2.116               |
| Facility Support                       | 1.693          | -                   | 1.693               |
| Quality Control                        | 1.697          | -                   | 1.697               |
| Change Rooms                           | 1.752          | 50 %                | 876                 |
| Warehouse                              | 1.747          | 50 %                | 874                 |
| Land Acquisition and Site Preparation  | 4.369          | 100 %               | -                   |
| Office Building                        | 6.553          | 100 %               | -                   |
| Licensing and Environmental            | 1.311          | -                   | 1.311               |
| Equipment capital costs for Pu,Th/Th b | 51.493         |                     |                     |
| Operations                             | 21.426         | -                   | 21.426              |
| Remote Maintenance                     | 19.444         | -                   | 19.444              |
| Operations Support                     | 2.049          | -                   | 2.049               |
| Facility Support                       | 7.291          | -                   | 7.291               |
| Quality Control                        | 1.129          | -                   | 1.129               |
| Warehouse                              | 155            | 100 %               | -                   |
| Equipment capital costs for Th(RB)     | 7.496          |                     |                     |
| Operations                             | 2.407          |                     | 2.407               |
| Contact Maintenance                    | 2.407          |                     | 2.407               |
| Operations Support                     | 903            |                     | 903                 |
| Facility Support                       | 1.203          |                     | 1.203               |
| Quality Control                        | 564            |                     | 564                 |
| Warehouse                              | 12             | 100 %               | -                   |
| <b>Total</b>                           | <b>213.042</b> | <b>27.110</b>       | <b>185.932</b>      |

TABELLE 28 Capex – Fuel fabrication facility (overnight cost with associated engineering)  
[Brennelementherstellung].  
Quelle: Transmutex.

| Kostenpunkt                        | Kosten [k€]    | Kostenreduktion [%] | FOAK in Bayern [k€] |
|------------------------------------|----------------|---------------------|---------------------|
| Processing facility                | 28.937         | 50 %                | 14.469              |
| Laboratory and operations building | 6.130          | 50 %                | 3.065               |
| Maintenance and mockup building    | 12.879         | 50 %                | 6.439               |
| Utility building                   | 17.825         | 50 %                | 8.912               |
| Warehouse and staging building     | 5.645          | 50 %                | 2.823               |
| Generator building                 | 3.642          | 50 %                | 1.821               |
| Emergency Operations center        | 8.889          | 50 %                | 4.444               |
| Fire station                       | 4.511          | 100 %               | -                   |
| Site work                          | 38.828         | 100 %               | -                   |
| Site Physical Protection system    | 34.365         | -                   | 34.365              |
| Design engineering                 | 59.219         | -                   | 59.219              |
| <b>Total</b>                       | <b>220.870</b> | <b>85.313</b>       | <b>135.557</b>      |

TABELLE 29 Capex – Fuel reprocessing facility (overnight cost with associated engineering) [Partitionierung].  
Quelle: Transmutex.

| Kostenpunkt                        | Kosten [k€]    | Kostenreduktion [%] | FOAK in Bayern [k€] |
|------------------------------------|----------------|---------------------|---------------------|
| Process equipment                  | 28.937         | -                   | 28.937              |
| Laboratory and operations building | 6.130          | 50 %                | 3.065               |
| Maintenance and mockup building    | 12.879         | 50 %                | 6.439               |
| Utility building                   | 17.825         | 50 %                | 8.912               |
| Warehouse and staging building     | 5.645          | 50 %                | 2.823               |
| Generator building                 | 3.642          | 50 %                | 1.821               |
| Emergency Operations center        | 8.889          | 100 %               | -                   |
| Fire station                       | 4.511          | 100 %               | -                   |
| Site work                          | 38.828         | -                   | 38.828              |
| Site Physical Protection system    | 34.365         | 50 %                | 17.182              |
| Design engineering                 | 59.219         | -                   | 59.219              |
| <b>Total</b>                       | <b>220.870</b> | <b>53.643</b>       | <b>167.227</b>      |

TABELLE 30 Capex – Vittrification facility (overnight cost with associated engineering) [Vitrifizierung].  
Quelle: Transmutex.

| Kostenpunkt        | Kosten [k€]              | Kostenreduktion [%]      | FOAK in Bayern [k€]    |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| Permit to build    | 3.758 (3.419)            | 50 %                     | 1.879 (1.710)          |
| Nuclear permit     | 8.797 (8.526)            | -                        | 8.797 (8.526)          |
| Train access       | 117.660                  | 100 %                    | -                      |
| Roads              | 13.816                   | 100 %                    | -                      |
| Water              | 2.760                    | 100 %                    | -                      |
| Electricity access | 4.140                    | 100 %                    | -                      |
| Other              |                          | 100 %                    |                        |
| <b>Total</b>       | <b>150.932 (150.321)</b> | <b>140.095 (140.086)</b> | <b>10.677 (10.235)</b> |

TABELLE 31 Capex – General infrastructure.  
Quelle: Eigene Kosteneinschätzungen.

| Kostenpunkt                         | Kosten [k€]    | Kostenreduktion [%] | FOAK in Bayern [k€] |
|-------------------------------------|----------------|---------------------|---------------------|
| Construction plans (design)         | 100.000        | -                   | 100.000             |
| Project management (over ten years) | 50.000         | -                   | 50.000              |
| <b>Total</b>                        | <b>150.000</b> | <b>0</b>            | <b>150.000</b>      |

TABELLE 32 Capex – Transmutex.  
Quelle: Transmutex.

| Kostenpunkt  | Kosten [k€]           | Kostenreduktion [k€] | FOAK in Bayern [k€]   |
|--------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Gesamtkosten | 2.474.488 (2.473.877) | 810.467 (946.040)    | 1.664.021 (1.527.838) |

TABELLE 33 Capex – Total.  
Quelle: Transmutex.

#### 7.4. Opex

| Kostenpunkt               | Kosten [k€]   | Kostenreduktion [%] | FOAK in Bayern [k€] |
|---------------------------|---------------|---------------------|---------------------|
| Accelerator               | 2.424         | -                   | 2.424               |
| Target                    | 770           | -                   | 770                 |
| Reactor                   | 13.064        | -                   | 13.064              |
| Reprocessing facility     | 3.274         | -                   | 3.274               |
| Fuel fabrication facility | 5.123         | -                   | 5.123               |
| Vitrification facility    | 3.274         | -                   | 3.274               |
| <b>Total</b>              | <b>27.929</b> | <b>0</b>            | <b>27.929</b>       |

TABELLE 34 Opex – Maintenance.  
Quelle: Transmutex.

| Kostenpunkt              | Kosten [k€]   | Kostenreduktion [%] | FOAK in Bayern [k€] |
|--------------------------|---------------|---------------------|---------------------|
| Fuel reprocessing staff  | 15.471        | -                   | 15.471              |
| Fuel fabrication staff   | 4.468         | -                   | 4.468               |
| Vitrification staff      | 4.468         | -                   | 4.468               |
| Transmuter staff         | 23.000        | -                   | 23.000              |
| Fremdpersonal (Revision) | 16.400        | -                   | 16.400              |
| <b>Total</b>             | <b>63.807</b> | <b>0</b>            | <b>63.807</b>       |

TABELLE 35 Opex – Staff.  
Quelle: Transmutex & Betreiber.

| Kostenpunkt                | Kosten [k€]   | Kostenreduktion [%] | FOAK in Bayern [k€] |
|----------------------------|---------------|---------------------|---------------------|
| Waste Management           | 6.602         | -                   | 6.602               |
| Fuel reprocessing material | 3.104         | -                   | 3.104               |
| Fuel fabrication material  | 5.123         | -                   | 5.123               |
| Vitrification material     | 3.104         | -                   | 3.104               |
| Thorium supply cost        | 1.733         | -                   | 1.733               |
| <b>Total</b>               | <b>19.665</b> | <b>0</b>            | <b>19.665</b>       |

TABELLE 36 Opex – Material.  
Quelle: Transmutex.

| Kostenpunkt                 | Kosten [k€]  | Kostenreduktion [%] | FOAK in Bayern [k€] |
|-----------------------------|--------------|---------------------|---------------------|
| Transmutex software license | 3.000        | -                   | 3.000               |
| <b>Total</b>                | <b>3.000</b> | <b>0</b>            | <b>3.000</b>        |

TABELLE 37 Opex – Other.  
Quelle: Transmutex.

| Kostenpunkt         | Kosten [k€]    | Kostenreduktion [k€] | FOAK in Bayern [k€] |
|---------------------|----------------|----------------------|---------------------|
| <b>Gesamtkosten</b> | <b>114.400</b> | <b>0</b>             | <b>114.400</b>      |

TABELLE 38 Opex – Total.  
Quelle: Transmutex.

## 7.5.

## Profit and Loss Statement (positiv)

| Profit and Loss Statement                     |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|-----------------------------------------------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| In €                                          | Year: | 1                | 2                | 3                | 4                | 5                | 6                | 7                | 8                | 9                | 10               |
| Revenue                                       |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Radioisotopes                                 |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| with accelerator                              |       | 14.813,19 €      | 15.213,14 €      | 15.623,90 €      | 16.045,74 €      | 16.478,98 €      | 16.923,91 €      | 17.380,86 €      | 17.850,14 €      | 18.332,89 €      | 18.827,06 €      |
| with reprocessing facility                    |       | 200.000.000,00 € | 205.400.000,00 € | 210.945.800,00 € | 216.641.336,60 € | 222.490.652,69 € | 228.497.900,31 € | 234.667.343,62 € | 241.003.361,90 € | 247.518.452,67 € | 254.193.234,89 € |
| Metals and Gases (from reprocessing facility) |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Uranium                                       |       | 14.197.787,52 €  | 14.893.479,11 €  | 15.623.259,58 €  | 16.388.799,30 €  | 17.191.850,47 €  | 18.034.251,14 €  | 18.917.929,45 €  | 19.844.907,99 €  | 20.817.308,48 €  | 21.837.356,60 €  |
| Rhodium                                       |       | 10.280.520,00 €  | 10.907.631,72 €  | 11.572.997,25 €  | 12.278.950,09 €  | 13.027.966,04 €  | 13.822.671,97 €  | 14.665.854,96 €  | 15.568.472,11 €  | 16.509.660,91 €  | 17.516.750,23 €  |
| Ruthenium                                     |       | 5.526.440,00 €   | 6.364.996,36 €   | 6.836.066,31 €   | 7.341.870,77 €   | 7.885.169,21 €   | 8.468.671,73 €   | 9.095.303,44 €   | 9.768.409,59 €   | 10.491.271,90 €  | 11.267.626,02 €  |
| Xenon and Krypton                             |       | 39.572.828,52 €  | 40.641.294,89 €  | 41.738.609,85 €  | 42.865.552,32 €  | 44.022.922,23 €  | 45.211.541,13 €  | 46.432.252,74 €  | 47.685.923,57 €  | 48.973.443,50 €  | 50.295.726,48 €  |
| Electricity                                   |       | 163.812.000,00 € | 168.234.924,00 € | 172.777.266,95 € | 177.442.253,16 € | 182.233.193,99 € | 187.153.490,23 € | 192.206.634,46 € | 197.396.213,60 € | 202.725.911,36 € | 208.199.510,97 € |
| District heat                                 |       | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              |
| Electricity for hydrogen                      |       | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              |
| Revenue                                       |       | 433.804.389,23 € | 446.457.539,42 € | 459.509.563,84 € | 472.974.807,98 € | 486.868.233,61 € | 501.205.430,43 € | 516.002.749,53 € | 531.277.138,90 € | 547.046.380,93 € | 563.329.032,25 € |
| COGS                                          |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Material                                      |       | 19.664.793,12 €  | 20.195.650,10 €  | 20.740.932,66 €  | 21.300.937,84 €  | 21.876.063,16 €  | 22.466.716,86 €  | 23.073.318,22 €  | 23.696.297,81 €  | 24.336.097,85 €  | 24.993.172,49 €  |
| Staff                                         |       | 63.806.860,08 €  | 65.529.645,30 €  | 67.298.945,72 €  | 69.116.017,26 €  | 70.982.149,72 €  | 72.898.667,77 €  | 74.866.931,80 €  | 76.888.338,95 €  | 78.964.324,11 €  | 81.096.360,86 €  |
| Maintenance                                   |       | 27.528.744,42 €  | 28.682.820,52 €  | 29.457.256,68 €  | 30.252.602,61 €  | 31.069.422,88 €  | 31.908.297,29 €  | 32.769.821,32 €  | 33.654.696,50 €  | 34.563.280,87 €  | 35.496.489,46 €  |
| Other (IT)                                    |       | 3.000.000,00 €   | 3.081.000,00 €   | 3.164.187,00 €   | 3.249.620,65 €   | 3.337.359,79 €   | 3.427.468,50 €   | 3.520.010,15 €   | 3.615.050,43 €   | 3.712.656,79 €   | 3.812.898,52 €   |
| COGS                                          |       | 114.400.397,62 € | 117.489.115,93 € | 120.661.322,06 € | 123.919.177,75 € | 127.264.955,55 € | 130.701.150,43 € | 134.230.081,49 € | 137.854.293,69 € | 141.576.359,62 € | 145.398.921,33 € |
| Gross Profit                                  |       | 319.404.081,61 € | 328.968.423,50 € | 338.848.241,79 € | 349.055.630,23 € | 359.603.278,06 € | 370.504.300,00 € | 381.772.668,04 € | 393.422.845,21 € | 405.470.021,31 € | 417.930.110,92 € |
| SG&A                                          |       | 21.690.219,46 €  | 22.322.876,97 €  | 22.975.478,19 €  | 23.648.740,40 €  | 24.343.411,68 €  | 25.060.272,52 €  | 25.800.137,48 €  | 26.563.856,94 €  | 27.352.319,05 €  | 28.166.451,61 €  |
| EBITDA                                        |       | 297.713.862,15 € | 306.645.546,53 € | 315.872.763,60 € | 325.406.889,83 € | 335.259.826,38 € | 345.444.027,48 € | 355.972.530,56 € | 366.858.988,26 € | 378.117.702,26 € | 389.763.659,31 € |
| D&A                                           |       | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  |
| EBIT                                          |       | 267.157.108,90 € | 276.088.793,28 € | 285.316.010,35 € | 294.850.136,59 € | 304.703.073,14 € | 314.887.274,23 € | 325.415.777,32 € | 336.302.235,02 € | 347.560.949,01 € | 359.206.906,06 € |
| Interest expense                              |       | 38.195.941,56 €  | 37.804.125,41 €  | 37.402.513,87 €  | 36.990.862,03 €  | 36.568.918,90 €  | 36.136.427,19 €  | 35.693.123,19 €  | 35.238.736,59 €  | 34.772.990,32 €  | 34.295.600,39 €  |
| EBT                                           |       | 228.961.167,35 € | 238.284.667,87 € | 247.913.496,48 € | 257.859.274,56 € | 268.134.154,24 € | 278.750.847,04 € | 289.722.654,13 € | 301.063.498,43 € | 312.787.958,70 € | 324.911.305,67 € |
| Tax                                           |       | 57.240.291,84 €  | 59.571.166,97 €  | 61.978.374,12 €  | 64.464.818,64 €  | 67.033.538,56 €  | 69.687.711,76 €  | 72.430.663,30 €  | 75.265.874,61 €  | 78.196.989,67 €  | 81.227.826,42 €  |
| Net Income                                    |       | 171.720.875,51 € | 178.713.500,90 € | 185.935.122,36 € | 193.394.455,92 € | 201.100.615,68 € | 209.063.135,28 € | 217.291.990,80 € | 225.797.623,82 € | 234.590.969,02 € | 243.683.479,25 € |

| Profit and Loss Statement                     |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|-----------------------------------------------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| In €                                          | Year: | 11               | 12               | 13               | 14               | 15               | 16               | 17               | 18               | 19               | 20               |
| Revenue                                       |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Radioisotopes                                 |       | 19.335,39 €      | 19.857,45 €      | 20.393,60 €      | 20.944,23 €      | 21.509,72 €      | 22.090,48 €      | 22.686,92 €      | 23.299,47 €      | 23.928,56 €      | 24.574,63 €      |
| with accelerator                              |       | 261.056.452,23 € | 268.104.976,44 € | 275.343.810,81 € | 282.778.093,70 € | 290.413.102,23 € | 298.254.255,99 € | 306.307.120,90 € | 314.577.413,16 € | 323.071.003,32 € | 331.793.920,41 € |
| with reprocessing facility                    |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Metals and Gases (from reprocessing facility) |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Uranium                                       |       | 22.907.387,07 €  | 24.029.849,04 €  | 25.207.311,64 €  | 26.442.469,91 €  | 27.738.150,94 €  | 29.097.320,34 €  | 30.523.089,03 €  | 32.018.720,39 €  | 33.587.637,69 €  | 35.233.431,94 €  |
| Rhodium                                       |       | 18.585.271,99 €  | 19.718.973,58 €  | 20.921.830,97 €  | 22.198.062,66 €  | 23.552.144,49 €  | 24.988.825,30 €  | 26.513.143,64 €  | 28.130.445,40 €  | 29.846.402,57 €  | 31.667.033,13 €  |
| Ruthenium                                     |       | 12.101.430,35 €  | 12.996.936,20 €  | 13.958.709,47 €  | 14.991.653,98 €  | 16.101.036,37 €  | 17.292.513,06 €  | 18.572.159,03 €  | 19.946.498,80 €  | 21.422.539,71 €  | 23.007.807,64 €  |
| Xenon and Krypton                             |       | 51.653.711,09 €  | 53.648.361,29 €  | 54.480.667,05 €  | 55.951.645,06 €  | 57.482.339,47 €  | 59.013.822,64 €  | 60.607.195,85 €  | 62.243.590,14 €  | 63.924.167,07 €  | 65.650.119,58 €  |
| Electricity                                   |       | 213.820.897,77 € | 219.594.062,00 € | 225.523.101,68 € | 231.612.225,42 € | 237.865.755,51 € | 244.288.130,91 € | 250.883.910,44 € | 257.657.776,03 € | 264.614.535,98 € | 271.759.128,45 € |
| District heat                                 |       | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              |
| Electricity for hydrogen                      |       | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              |
| Revenue                                       |       | 580.144.485,90 € | 597.513.016,01 € | 615.455.825,22 € | 633.995.094,96 € | 653.154.038,72 € | 672.956.958,71 € | 693.429.305,82 € | 714.597.743,39 € | 736.490.214,90 € | 759.136.015,79 € |
| COGS                                          |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Material                                      |       | 25.667.986,15 €  | 26.361.023,83 €  | 27.072.771,48 €  | 27.803.736,31 €  | 28.554.437,19 €  | 29.325.406,99 €  | 30.117.182,98 €  | 30.930.357,19 €  | 31.765.476,83 €  | 32.623.144,71 €  |
| Staff                                         |       | 83.285.962,60 €  | 85.534.683,59 €  | 87.844.120,05 €  | 90.215.911,29 €  | 92.651.740,89 €  | 95.153.337,90 €  | 97.722.478,02 €  | 100.360.984,93 € | 103.070.731,52 € | 105.853.641,27 € |
| Maintenance                                   |       | 36.454.894,67 €  | 37.439.176,83 €  | 38.450.034,60 €  | 39.488.185,54 €  | 40.554.366,55 €  | 41.649.334,44 €  | 42.773.866,47 €  | 43.928.760,87 €  | 45.114.837,41 €  | 46.332.938,02 €  |
| Other (IT)                                    |       | 3.915.846,78 €   | 4.021.574,65 €   | 4.130.157,16 €   | 4.241.671,41 €   | 4.356.196,53 €   | 4.473.813,84 €   | 4.594.606,81 €   | 4.718.661,20 €   | 4.846.065,05 €   | 4.976.908,81 €   |
| COGS                                          |       | 149.324.692,21 € | 153.356.458,90 € | 157.497.083,29 € | 161.749.504,54 € | 166.116.741,16 € | 170.601.893,17 € | 175.298.144,29 € | 179.938.764,18 € | 184.797.110,81 € | 189.786.632,81 € |
| Gross Profit                                  |       | 430.819.793,69 € | 444.156.557,11 € | 457.958.741,93 € | 472.245.590,42 € | 487.037.297,57 € | 502.355.065,54 € | 518.221.161,53 € | 534.658.979,21 € | 551.693.104,09 € | 569.349.382,98 € |
| SG&A                                          |       | 29.007.224,29 €  | 29.875.650,80 €  | 30.772.791,26 €  | 31.699.754,75 €  | 32.657.701,94 €  | 33.647.847,94 €  | 34.671.465,29 €  | 35.729.887,17 €  | 36.824.510,75 €  | 37.956.800,79 €  |
| EBITDA                                        |       | 401.812.569,39 € | 414.280.906,31 € | 427.185.950,67 € | 440.545.835,67 € | 454.379.595,63 € | 468.707.217,61 € | 483.549.696,24 € | 498.929.092,04 € | 514.868.593,34 € | 531.392.582,19 € |
| D&A                                           |       | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  |
| EBIT                                          |       | 371.255.816,15 € | 383.724.153,06 € | 396.629.197,43 € | 409.989.082,43 € | 423.822.842,38 € | 438.150.464,36 € | 452.992.943,00 € | 468.372.338,80 € | 484.311.840,10 € | 500.835.828,95 € |
| Interest expense                              |       | 33.806.275,72 €  | 33.304.717,93 €  | 32.796.621,20 €  | 32.263.672,05 €  | 31.723.549,17 €  | 31.169.923,21 €  | 30.602.456,61 €  | 30.020.803,35 €  | 29.424.608,75 €  | 28.813.509,28 €  |
| EBT                                           |       | 337.449.540,43 € | 350.419.435,13 € | 363.838.576,23 € | 377.725.410,38 € | 392.099.293,22 € | 406.980.541,15 € | 422.390.486,39 € | 438.351.535,45 € | 454.887.231,35 € | 472.022.319,66 € |
| Tax                                           |       | 84.362.385,11 €  | 87.604.858,78 €  | 90.959.644,06 €  | 94.431.352,59 €  | 98.024.823,30 €  | 101.745.135,29 € | 105.597.621,60 € | 109.587.883,86 € | 113.721.807,84 € | 118.005.579,92 € |
| Net Income                                    |       | 253.087.155,32 € | 262.814.576,35 € | 272.878.932,17 € | 283.294.057,78 € | 294.074.469,91 € | 305.235.405,86 € | 316.792.864,79 € | 328.763.651,59 € | 341.165.423,51 € | 354.016.739,75 € |

| Profit and Loss Statement                     |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                    |                    |
|-----------------------------------------------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| In €                                          | Year: | 21               | 22               | 23               | 24               | 25               | 26               | 27               | 28               | 29                 | 30                 |
| Revenue                                       |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                    |                    |
| Radioisotopes                                 |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                    |                    |
| with accelerator                              |       | 25.238,14 €      | 25.919,57 €      | 26.619,40 €      | 27.338,13 €      | 28.076,25 €      | 28.834,31 €      | 29.612,84 €      | 30.412,39 €      | 31.233,52 €        | 32.076,83 €        |
| with reprocessing facility                    |       | 340.752.356,26 € | 349.952.669,88 € | 359.401.391,97 € | 369.105.229,55 € | 379.071.070,75 € | 389.305.989,66 € | 399.817.251,38 € | 410.612.317,17 € | 421.698.849,73 €   | 433.084.718,67 €   |
| Metals and Gases (from reprocessing facility) |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                    |                    |
| Uranium                                       |       | 36.959.870,11 €  | 38.770.903,74 €  | 40.670.878,02 €  | 42.663.541,25 €  | 44.754.054,77 €  | 46.947.003,45 €  | 49.247.406,82 €  | 51.660.529,55 €  | 54.191.895,49 €    | 56.847.298,37 €    |
| Rhodium                                       |       | 33.598.722,15 €  | 35.648.244,20 €  | 37.822.787,10 €  | 40.129.977,11 €  | 42.577.965,72 €  | 45.175.157,96 €  | 47.930.842,60 €  | 50.854.624,00 €  | 53.966.756,06 €    | 57.248.118,16 €    |
| Ruthenium                                     |       | 24.710.385,41 €  | 26.538.953,93 €  | 28.502.836,52 €  | 30.612.046,42 €  | 32.877.337,86 €  | 35.310.269,86 €  | 37.923.220,16 €  | 40.729.538,46 €  | 43.743.524,30 €    | 46.980.545,10 €    |
| Xenon and Krypton                             |       | 67.422.672,81 €  | 69.243.084,98 €  | 71.112.648,27 €  | 73.032.689,77 €  | 75.004.572,40 €  | 77.029.695,85 €  | 79.109.497,64 €  | 81.245.454,08 €  | 83.439.081,34 €    | 85.691.936,53 €    |
| Electricity                                   |       | 279.096.624,92 € | 286.632.233,79 € | 294.371.304,10 € | 302.319.329,31 € | 310.481.951,21 € | 318.864.963,89 € | 327.474.317,91 € | 336.316.124,50 € | 345.396.659,86 €   | 354.722.369,67 €   |
| District heat                                 |       | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €                | - €                |
| Electricity for hydrogen                      |       | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €                | - €                |
| Revenue                                       |       | 782.565.869,80 € | 806.812.010,09 € | 831.908.265,39 € | 857.890.151,55 € | 884.794.968,95 € | 912.661.905,99 € | 941.532.149,16 € | 971.449.000,13 € | 1.002.458.000,30 € | 1.034.607.063,36 € |
| COGS                                          |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                    |                    |
| Material                                      |       | 33.503.969,61 €  | 34.408.576,79 €  | 35.337.608,37 €  | 36.291.723,79 €  | 37.271.600,34 €  | 38.277.933,55 €  | 39.311.437,75 €  | 40.372.846,57 €  | 41.462.913,43 €    | 42.582.412,09 €    |
| Staff                                         |       | 108.711.689,59 € | 111.646.905,20 € | 114.661.371,65 € | 117.757.228,88 € | 120.936.673,85 € | 124.201.964,05 € | 127.555.417,08 € | 130.999.413,34 € | 134.536.397,50 €   | 138.168.880,23 €   |
| Maintenance                                   |       | 47.583.927,25 €  | 48.868.693,39 €  | 50.188.148,11 €  | 51.543.228,11 €  | 52.934.895,26 €  | 54.364.137,44 €  | 55.831.969,15 €  | 57.339.432,31 €  | 58.887.596,99 €    | 60.477.562,11 €    |
| Other (IT)                                    |       | 5.111.285,34 €   | 5.249.290,05 €   | 5.391.020,88 €   | 5.536.574,44 €   | 5.686.066,06 €   | 5.839.589,84 €   | 5.997.258,77 €   | 6.159.184,76 €   | 6.325.482,75 €     | 6.496.270,78 €     |
| COGS                                          |       | 194.910.871,89 € | 200.173.465,43 € | 205.578.149,00 € | 211.128.759,02 € | 216.829.235,52 € | 222.683.624,87 € | 228.696.082,75 € | 234.870.876,98 € | 241.212.390,66 €   | 247.725.125,21 €   |
| Gross Profit                                  |       | 587.654.997,91 € | 606.638.544,66 € | 626.330.116,39 € | 646.761.392,52 € | 667.965.733,43 € | 689.978.281,12 € | 712.836.066,41 € | 736.578.123,15 € | 761.245.609,65 €   | 786.881.938,16 €   |
| SG&A                                          |       | 39.128.293,49 €  | 40.340.600,50 €  | 41.595.413,27 €  | 42.894.507,58 €  | 44.239.748,45 €  | 45.633.095,30 €  | 47.076.607,46 €  | 48.572.450,01 €  | 50.122.900,02 €    | 51.730.353,17 €    |
| EBITDA                                        |       | 548.526.704,42 € | 566.297.944,16 € | 584.734.703,12 € | 603.866.884,95 € | 623.725.984,99 € | 644.345.185,82 € | 665.759.458,95 € | 688.005.673,14 € | 711.122.709,63 €   | 735.151.584,99 €   |
| D&A                                           |       | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    |
| EBIT                                          |       | 517.969.951,17 € | 535.741.190,91 € | 554.177.949,87 € | 573.310.131,70 € | 593.169.231,74 € | 613.788.432,57 € | 635.202.705,71 € | 657.448.919,90 € | 680.565.956,39 €   | 704.594.831,74 €   |
| Interest expense                              |       | 28.187.132,33 €  | 27.545.095,96 €  | 26.887.008,68 €  | 26.212.469,21 €  | 25.521.066,26 €  | 24.812.578,23 €  | 24.085.973,01 €  | 23.341.407,65 €  | 22.578.228,16 €    | 21.795.969,18 €    |
| EBT                                           |       | 489.782.818,84 € | 508.196.094,95 € | 527.290.941,20 € | 547.097.662,49 € | 567.648.165,48 € | 588.976.054,34 € | 611.116.732,70 € | 634.107.512,24 € | 657.987.728,22 €   | 682.798.862,56 €   |
| Tax                                           |       | 122.445.704,71 € | 127.049.023,74 € | 131.822.735,30 € | 136.774.415,62 € | 141.912.041,37 € | 147.244.013,58 € | 152.779.183,18 € | 158.526.878,06 € | 164.496.932,06 €   | 170.699.715,64 €   |
| Net Income                                    |       | 367.337.114,13 € | 381.147.071,21 € | 395.468.205,90 € | 410.323.246,87 € | 425.736.124,11 € | 441.732.040,75 € | 458.337.549,53 € | 475.580.634,18 € | 493.490.796,17 €   | 512.099.146,92 €   |

| Profit and Loss Statement                            |       |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|------------------------------------------------------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| In €                                                 | Year: | 31                 | 32                 | 33                 | 34                 | 35                 | 36                 | 37                 | 38                 | 39                 | 40                 |
| <b>Revenue</b>                                       |       |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Radioisotopes                                        |       | 32.942,90 €        | 33.832,36 €        | 34.745,03 €        | 35.683,97 €        | 36.647,44 €        | 37.636,92 €        | 38.653,12 €        | 39.696,75 €        | 40.768,56 €        | 41.869,31 €        |
| with accelerator                                     |       |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| with reprocessing facility                           |       | 444.778.006,08 €   | 456.787.012,24 €   | 469.120.261,57 €   | 481.786.508,63 €   | 494.794.744,37 €   | 508.154.202,46 €   | 521.874.365,30 €   | 535.964.973,81 €   | 550.436.028,10 €   | 565.297.800,86 €   |
| <b>Metals and Gases (from reprocessing facility)</b> |       |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Uranium                                              |       | 59.632.815,99 €    | 62.554.823,98 €    | 65.620.010,30 €    | 68.835.390,86 €    | 72.208.325,01 €    | 75.746.532,94 €    | 79.458.113,05 €    | 83.351.560,99 €    | 87.435.787,06 €    | 91.720.140,62 €    |
| Rhodium                                              |       | 60.740.253,39 €    | 64.445.408,05 €    | 68.376.578,79 €    | 72.547.550,10 €    | 76.972.990,65 €    | 81.668.300,64 €    | 86.650.066,98 €    | 91.935.721,07 €    | 97.543.800,05 €    | 103.493.971,85 €   |
| Ruthenium                                            |       | 50.457.105,44 €    | 54.190.931,24 €    | 58.201.060,15 €    | 62.507.938,60 €    | 67.133.526,06 €    | 72.101.406,99 €    | 77.436.911,11 €    | 83.167.242,53 €    | 89.321.618,47 €    | 95.931.418,24 €    |
| Xenon and Krypton                                    |       | 88.005.618,82 €    | 90.381.770,53 €    | 92.822.078,33 €    | 95.328.274,45 €    | 97.902.137,86 €    | 100.545.495,58 €   | 103.260.223,96 €   | 106.048.250,01 €   | 108.911.552,76 €   | 111.852.164,68 €   |
| Electricity                                          |       | 364.299.873,66 €   | 374.135.970,24 €   | 384.237.641,44 €   | 394.612.057,76 €   | 405.266.983,32 €   | 416.208.781,07 €   | 427.446.418,16 €   | 438.987.471,45 €   | 450.840.133,18 €   | 463.012.816,77 €   |
| District heat                                        |       | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                |
| Electricity for hydrogen                             |       | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                |
| Revenue                                              |       | 1.067.946.616,27 € | 1.102.529.749,44 € | 1.138.412.376,47 € | 1.175.653.044,37 € | 1.214.314.914,70 € | 1.254.462.356,60 € | 1.296.164.752,30 € | 1.339.494.916,20 € | 1.384.529.688,18 € | 1.431.350.182,35 € |
| <b>COGS</b>                                          |       |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Material                                             |       | 43.732.137,22 €    | 44.912.904,92 €    | 46.125.553,35 €    | 47.370.943,29 €    | 48.649.958,76 €    | 49.963.507,65 €    | 51.312.522,36 €    | 52.697.960,46 €    | 54.120.805,39 €    | 55.582.067,14 €    |
| Staff                                                |       | 141.899.440,00 €   | 145.730.724,88 €   | 149.665.454,45 €   | 153.706.421,72 €   | 157.856.495,11 €   | 162.118.620,47 €   | 166.495.823,23 €   | 170.991.210,45 €   | 175.607.973,14 €   | 180.349.388,41 €   |
| Maintenance                                          |       | 62.110.456,28 €    | 63.787.438,60 €    | 65.509.699,44 €    | 67.278.461,33 €    | 69.094.979,79 €    | 70.960.544,24 €    | 72.876.478,93 €    | 74.844.143,86 €    | 76.864.935,75 €    | 78.940.289,01 €    |
| Other (IT)                                           |       | 6.671.670,09 €     | 6.851.805,18 €     | 7.036.803,92 €     | 7.226.797,63 €     | 7.421.921,17 €     | 7.622.313,04 €     | 7.828.115,49 €     | 8.039.474,61 €     | 8.256.540,42 €     | 8.479.467,01 €     |
| COGS                                                 |       | 254.413.703,59 €   | 261.282.873,58 €   | 268.337.511,17 €   | 275.562.623,97 €   | 283.023.354,82 €   | 290.664.985,40 €   | 298.512.940,01 €   | 306.572.789,39 €   | 314.850.254,70 €   | 323.351.211,58 €   |
| Gross Profit                                         |       | 813.532.912,69 €   | 841.246.875,85 €   | 870.074.865,30 €   | 900.070.789,39 €   | 931.291.559,88 €   | 963.797.371,20 €   | 997.651.812,29 €   | 1.032.922.126,81 € | 1.069.679.433,48 € | 1.107.998.970,77 € |
| SG&A                                                 |       | 53.397.330,81 €    | 55.126.487,47 €    | 56.920.618,82 €    | 58.782.670,22 €    | 60.715.745,74 €    | 62.723.117,83 €    | 64.808.237,61 €    | 66.974.745,81 €    | 69.226.484,41 €    | 71.567.509,12 €    |
| EBITDA                                               |       | 760.135.581,87 €   | 786.120.388,38 €   | 813.154.246,47 €   | 841.288.119,18 €   | 870.575.814,15 €   | 901.074.253,37 €   | 932.843.574,68 €   | 965.947.381,00 €   | 1.000.452.949,07 € | 1.036.431.461,65 € |
| D&A                                                  |       | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    |
| EBIT                                                 |       | 729.578.828,63 €   | 755.563.635,14 €   | 782.597.493,23 €   | 810.731.356,93 €   | 840.019.060,90 €   | 870.517.500,12 €   | 902.286.821,43 €   | 935.390.627,76 €   | 969.896.195,83 €   | 1.005.874.708,41 € |
| Interest expense                                     |       | 20.994.153,73 €    | 20.172.292,89 €    | 19.329.885,53 €    | 18.466.417,99 €    | 17.581.363,76 €    | 16.674.183,17 €    | 15.744.323,07 €    | 14.791.216,46 €    | 13.814.282,19 €    | 12.812.924,56 €    |
| EBT                                                  |       | 708.584.674,90 €   | 735.391.342,24 €   | 763.267.607,70 €   | 792.264.938,94 €   | 822.437.697,14 €   | 853.843.316,95 €   | 886.542.498,37 €   | 920.599.411,30 €   | 956.081.913,64 €   | 993.061.783,85 €   |
| Tax                                                  |       | 177.146.168,72 €   | 183.847.835,56 €   | 190.816.901,52 €   | 198.066.234,74 €   | 205.609.424,29 €   | 213.460.829,24 €   | 221.635.624,59 €   | 230.149.852,82 €   | 239.020.478,41 €   | 248.265.445,96 €   |
| Net Income                                           |       | 531.438.506,17 €   | 551.543.506,68 €   | 572.450.706,22 €   | 594.198.704,21 €   | 616.828.272,86 €   | 640.382.487,71 €   | 664.906.873,78 €   | 690.449.558,47 €   | 717.061.435,23 €   | 744.796.337,89 €   |

| Profit and Loss Statement                     |       |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|-----------------------------------------------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| In €                                          | Year: | 41                 | 42                 | 43                 | 44                 | 45                 | 46                 | 47                 | 48                 | 49                 | 50                 |
| Revenue                                       |       |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Radioisotopes                                 |       |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| with accelerator                              |       | 42.999,78 €        | 44.160,78 €        | 45.353,12 €        | 46.577,65 €        | 47.835,25 €        | 49.126,80 €        | 50.453,23 €        | 51.815,46 €        | 53.214,48 €        | 54.651,27 €        |
| with reprocessing facility                    |       | 580.560.841,48 €   | 596.235.984,20 €   | 612.334.355,78 €   | 628.867.383,38 €   | 645.846.802,74 €   | 663.284.666,41 €   | 681.193.352,40 €   | 699.585.572,92 €   | 718.474.383,39 €   | 737.873.191,74 €   |
| Metals and Gases (from reprocessing facility) |       |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Uranium                                       |       | 96.214.427,51 €    | 100.928.934,46 €   | 105.874.452,25 €   | 111.062.300,41 €   | 116.504.353,13 €   | 122.213.066,43 €   | 128.201.506,69 €   | 134.483.380,52 €   | 141.073.066,16 €   | 147.985.646,41 €   |
| Rhodium                                       |       | 109.807.104,14 €   | 116.505.337,49 €   | 123.612.163,08 €   | 131.152.505,02 €   | 139.152.807,83 €   | 147.641.129,11 €   | 156.647.237,58 €   | 166.202.719,50 €   | 176.341.085,39 €   | 187.097.891,60 €   |
| Ruthenium                                     |       | 103.030.343,19 €   | 110.654.588,59 €   | 118.843.028,14 €   | 127.637.412,23 €   | 137.082.580,73 €   | 147.226.691,70 €   | 158.121.466,89 €   | 169.822.455,44 €   | 182.389.317,14 €   | 195.886.126,61 €   |
| Xenon and Krypton                             |       | 114.872.173,13 €   | 117.973.721,80 €   | 121.159.012,29 €   | 124.430.305,62 €   | 127.789.923,88 €   | 131.240.251,82 €   | 134.783.738,62 €   | 138.422.899,56 €   | 142.160.317,85 €   | 145.998.646,43 €   |
| Electricity                                   |       | 475.514.162,83 €   | 488.353.045,22 €   | 501.538.577,44 €   | 515.080.119,03 €   | 528.987.282,25 €   | 543.269.938,87 €   | 557.938.227,22 €   | 573.002.559,35 €   | 588.473.628,46 €   | 604.362.416,42 €   |
| District heat                                 | - €   | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                |
| Electricity for hydrogen                      | - €   | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                |
| Revenue                                       |       | 1.480.042.052,07 € | 1.530.695.772,55 € | 1.583.406.942,10 € | 1.638.276.603,36 € | 1.695.411.585,80 € | 1.754.924.871,15 € | 1.816.935.983,03 € | 1.881.571.402,75 € | 1.948.965.012,87 € | 2.019.258.570,48 € |
| COGS                                          |       |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Material                                      |       | 57.082.782,95 €    | 58.624.018,09 €    | 60.206.866,58 €    | 61.832.451,98 €    | 63.501.928,18 €    | 65.216.480,24 €    | 66.977.325,21 €    | 68.785.712,99 €    | 70.642.927,24 €    | 72.550.286,27 €    |
| Staff                                         |       | 185.218.821,90 €   | 190.219.730,09 €   | 195.355.662,80 €   | 200.630.265,70 €   | 206.047.282,87 €   | 211.610.559,51 €   | 217.324.044,61 €   | 223.191.793,82 €   | 229.217.972,25 €   | 235.406.857,50 €   |
| Maintenance                                   |       | 81.071.676,82 €    | 83.260.612,09 €    | 85.508.648,62 €    | 87.817.382,13 €    | 90.188.451,45 €    | 92.623.539,64 €    | 95.124.375,21 €    | 97.692.733,34 €    | 100.330.437,14 €   | 103.039.358,94 €   |
| Other (IT)                                    |       | 8.708.412,62 €     | 8.943.539,76 €     | 9.185.015,34 €     | 9.433.010,75 €     | 9.687.702,04 €     | 9.949.270,00 €     | 10.217.900,29 €    | 10.493.783,59 €    | 10.777.115,75 €    | 11.068.097,88 €    |
| COGS                                          |       | 332.081.694,29 €   | 341.047.900,03 €   | 350.256.193,34 €   | 359.713.110,56 €   | 369.425.364,54 €   | 379.399.049,38 €   | 389.643.645,32 €   | 400.164.023,74 €   | 410.968.452,38 €   | 422.064.600,60 €   |
| Gross Profit                                  |       | 1.147.960.357,78 € | 1.189.647.872,51 € | 1.233.150.748,77 € | 1.278.563.492,80 € | 1.325.986.221,26 € | 1.375.525.021,76 € | 1.427.292.337,71 € | 1.481.407.379,01 € | 1.537.996.560,49 € | 1.597.193.969,88 € |
| SG&A                                          |       | 74.002.102,69 €    | 76.534.788,63 €    | 79.170.347,11 €    | 81.913.630,17 €    | 84.770.579,29 €    | 87.746.243,56 €    | 90.846.799,15 €    | 94.078.570,14 €    | 97.448.250,64 €    | 100.962.928,52 €   |
| EBITDA                                        |       | 1.073.958.255,17 € | 1.113.113.083,89 € | 1.153.980.401,66 € | 1.196.649.862,63 € | 1.241.215.641,97 € | 1.287.778.778,21 € | 1.336.445.538,56 € | 1.387.328.808,88 € | 1.440.548.309,84 € | 1.496.231.041,36 € |
| D&A                                           |       | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    |
| EBIT                                          |       | 1.043.401.501,93 € | 1.082.556.330,64 € | 1.123.423.648,42 € | 1.166.092.909,39 € | 1.210.658.888,72 € | 1.257.222.024,96 € | 1.305.888.785,32 € | 1.356.772.055,63 € | 1.409.991.556,60 € | 1.465.674.288,12 € |
| Interest expense                              |       | 11.786.532,99 €    | 10.734.481,64 €    | 9.656.129,00 €     | 8.550.817,54 €     | 7.417.873,29 €     | 6.256.605,45 €     | 5.066.305,90 €     | 3.846.248,86 €     | 2.595.690,40 €     | 1.313.867,98 €     |
| EBT                                           |       | 1.031.614.968,93 € | 1.071.821.849,00 € | 1.113.767.519,42 € | 1.157.542.091,85 € | 1.203.241.015,43 € | 1.250.965.419,52 € | 1.300.822.479,42 € | 1.352.925.806,77 € | 1.407.395.866,19 € | 1.464.360.420,13 € |
| Tax                                           |       | 257.903.742,23 €   | 267.955.462,25 €   | 278.441.879,86 €   | 289.355.522,96 €   | 300.810.253,86 €   | 312.741.354,88 €   | 325.203.619,85 €   | 338.231.451,69 €   | 351.848.966,50 €   | 366.090.103,03 €   |
| Net Income                                    |       | 773.711.226,70 €   | 803.866.386,75 €   | 835.325.639,57 €   | 868.186.568,89 €   | 902.430.761,57 €   | 938.224.064,64 €   | 975.618.859,56 €   | 1.014.694.355,07 € | 1.055.546.899,69 € | 1.098.270.315,10 € |

## 7.6. Profit and Loss Statement (negativ)

| Profit and Loss Statement                     |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                 |
|-----------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| In €                                          | Year:            | 1                | 2                | 3                | 4                | 5                | 6                | 7                | 8                | 9                | 10              |
| Revenue                                       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                 |
| Radioisotopes                                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                 |
| with accelerator                              | 14.813,19 €      | 15.213,14 €      | 15.623,90 €      | 16.045,74 €      | 16.478,98 €      | 16.923,91 €      | 17.380,86 €      | 17.850,14 €      | 18.332,09 €      | 18.827,06 €      |                 |
| with reprocessing facility                    | 50.000.000,00 €  | 51.350.000,00 €  | 52.736.450,00 €  | 54.160.334,15 €  | 55.622.683,17 €  | 57.124.475,08 €  | 58.666.835,90 €  | 60.250.840,47 €  | 61.877.613,17 €  | 63.548.308,72 €  |                 |
| Metals and Gases (from reprocessing facility) |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                 |
| Uranium                                       | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 € |
| Rhodium                                       | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 € |
| Ruthenium                                     | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €  |
| Xenon and Krypton                             | 39.572.828,52 €  | 40.641.294,89 €  | 41.738.609,85 €  | 42.865.552,32 €  | 44.022.922,23 €  | 45.211.541,13 €  | 46.432.252,74 €  | 47.685.923,57 €  | 48.973.443,50 €  | 50.295.726,48 €  |                 |
| Electricity                                   | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €             |
| District heat                                 | 4.200.000,00 €   | 4.313.400,00 €   | 4.429.861,80 €   | 4.549.468,07 €   | 4.672.303,71 €   | 4.798.455,91 €   | 4.928.014,22 €   | 5.061.070,69 €   | 5.197.719,51 €   | 5.338.057,93 €   |                 |
| Electricity for hydrogen                      | 127.969.600,00 € | 131.424.779,20 € | 134.973.240,24 € | 138.617.525,94 € | 142.360.199,14 € | 146.203.924,52 € | 150.151.430,48 € | 154.205.519,10 € | 158.369.068,12 € | 162.645.032,96 € |                 |
| Revenue                                       | 252.161.989,23 € | 258.149.434,75 € | 264.298.541,31 € | 270.613.673,74 € | 277.099.314,75 € | 283.760.068,07 € | 290.600.661,72 € | 297.625.951,40 € | 304.840.923,91 € | 312.250.700,67 € |                 |
| COGS                                          |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                 |
| Material                                      | 19.664.703,12 €  | 20.254.644,21 €  | 20.862.283,54 €  | 21.488.152,05 €  | 22.132.796,61 €  | 22.796.780,50 €  | 23.480.683,92 €  | 24.185.104,44 €  | 24.910.657,57 €  | 25.657.977,30 €  |                 |
| Staff                                         | 63.806.860,08 €  | 65.721.065,88 €  | 67.692.697,86 €  | 69.723.478,79 €  | 71.815.183,16 €  | 73.969.638,65 €  | 76.188.727,81 €  | 78.474.389,64 €  | 80.828.621,33 €  | 83.253.479,97 €  |                 |
| Maintenance                                   | 27.928.744,42 €  | 28.766.606,76 €  | 29.629.604,96 €  | 30.518.493,11 €  | 31.434.047,90 €  | 32.377.069,34 €  | 33.348.381,42 €  | 34.348.832,86 €  | 35.379.297,85 €  | 36.440.676,78 €  |                 |
| Other (IT)                                    | 3.000.000,00 €   | 3.090.000,00 €   | 3.182.700,00 €   | 3.278.181,00 €   | 3.376.526,43 €   | 3.477.822,22 €   | 3.582.156,89 €   | 3.689.621,60 €   | 3.800.310,24 €   | 3.914.319,55 €   |                 |
| COGS                                          | 114.400.307,62 € | 117.832.316,85 € | 121.367.286,35 € | 125.008.304,94 € | 128.758.554,89 € | 132.621.318,72 € | 136.599.950,84 € | 140.697.548,54 € | 144.918.586,99 € | 149.266.453,60 € |                 |
| Gross Profit                                  | 137.761.681,61 € | 140.317.117,91 € | 142.931.254,96 € | 145.605.368,80 € | 148.340.760,86 € | 151.138.757,35 € | 154.000.711,88 € | 156.928.402,87 € | 159.922.336,91 € | 162.984.247,07 € |                 |
| SG&A                                          | 12.608.099,46 €  | 12.907.471,74 €  | 13.214.927,07 €  | 13.530.683,69 €  | 13.859.965,74 €  | 14.198.003,40 €  | 14.530.033,09 €  | 14.881.297,57 €  | 15.242.046,20 €  | 15.612.535,03 €  |                 |
| EBITDA                                        | 125.153.582,15 € | 127.409.646,17 € | 129.716.327,89 € | 132.074.685,11 € | 134.480.795,12 € | 136.950.753,95 € | 139.470.678,80 € | 142.046.705,30 € | 144.679.990,72 € | 147.371.712,03 € |                 |
| D&A                                           | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  |                 |
| EBIT                                          | 91.873.162,58 €  | 94.129.226,60 €  | 96.435.908,32 €  | 98.794.265,53 €  | 101.200.375,55 € | 103.670.334,38 € | 106.190.260,31 € | 108.766.285,73 € | 111.399.571,15 € | 114.091.292,47 € |                 |

| Profit and Loss Statement                     |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |    |
|-----------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----|
| In €                                          | Year:            | 11               | 12               | 13               | 14               | 15               | 16               | 17               | 18               | 19               | 20 |
| Revenue                                       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |    |
| Radioisotopes                                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |    |
| with accelerator                              | 19.335,39 €      | 19.857,45 €      | 20.393,60 €      | 20.944,23 €      | 21.509,72 €      | 22.090,48 €      | 22.686,92 €      | 23.299,47 €      | 23.928,56 €      | 24.574,63 €      |    |
| with reprocessing facility                    | 65.264.113,06 €  | 67.026.244,11 €  | 68.835.952,70 €  | 70.694.523,42 €  | 72.603.275,56 €  | 74.563.564,00 €  | 76.576.780,22 €  | 78.644.353,29 €  | 80.767.750,83 €  | 82.948.480,10 €  |    |
| Metals and Gases (from reprocessing facility) |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |    |
| Uranium                                       | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  |    |
| Rhodium                                       | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  |    |
| Ruthenium                                     | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   |    |
| Xenon and Krypton                             | 51.653.711,09 €  | 53.048.361,29 €  | 54.480.667,05 €  | 55.951.645,06 €  | 57.462.339,47 €  | 59.013.822,64 €  | 60.607.195,85 €  | 62.243.590,14 €  | 63.924.167,07 €  | 65.650.119,58 €  |    |
| Electricity                                   | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              |    |
| District heat                                 | 5.482.185,50 €   | 5.630.204,51 €   | 5.782.220,03 €   | 5.938.339,97 €   | 6.098.675,15 €   | 6.263.339,38 €   | 6.432.449,54 €   | 6.606.125,68 €   | 6.784.491,07 €   | 6.967.672,33 €   |    |
| Electricity for hydrogen                      | 167.036.448,85 € | 171.546.432,97 € | 176.178.186,66 € | 180.934.997,70 € | 185.820.242,63 € | 190.837.389,19 € | 195.989.996,69 € | 201.281.728,66 € | 206.716.335,33 € | 212.297.676,39 € |    |
| Revenue                                       | 319.860.541,41 € | 327.675.847,84 € | 335.702.167,55 € | 343.945.197,89 € | 352.410.790,05 € | 361.104.953,20 € | 370.033.856,75 € | 379.203.844,76 € | 388.621.420,38 € | 398.293.270,55 € |    |
| COGS                                          |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |    |
| Material                                      | 26.427.716,62 €  | 27.220.548,11 €  | 28.037.164,56 €  | 28.878.279,50 €  | 29.744.627,88 €  | 30.636.966,72 €  | 31.556.075,72 €  | 32.502.757,99 €  | 33.477.840,73 €  | 34.482.175,95 €  |    |
| Staff                                         | 85.751.084,37 €  | 88.323.616,90 €  | 90.973.325,41 €  | 93.702.525,17 €  | 96.513.600,93 €  | 99.409.008,96 €  | 102.391.279,23 € | 105.463.017,60 € | 108.626.908,13 € | 111.885.715,37 € |    |
| Maintenance                                   | 37.533.897,08 €  | 38.659.914,00 €  | 39.815.711,42 €  | 41.014.302,76 €  | 42.244.731,84 €  | 43.512.073,80 €  | 44.817.436,01 €  | 46.161.959,09 €  | 47.546.817,86 €  | 48.973.222,40 €  |    |
| Other (IT)                                    | 4.031.749,14 €   | 4.152.701,61 €   | 4.277.282,66 €   | 4.405.601,14 €   | 4.537.769,17 €   | 4.673.902,25 €   | 4.814.119,32 €   | 4.958.542,90 €   | 5.107.299,18 €   | 5.260.518,16 €   |    |
| COGS                                          | 153.744.447,21 € | 158.356.780,63 € | 163.107.484,05 € | 168.008.708,57 € | 173.040.729,83 € | 178.231.951,72 € | 183.578.919,27 € | 189.086.277,58 € | 194.758.865,91 € | 200.601.631,88 € |    |
| Gross Profit                                  | 166.116.094,19 € | 169.319.067,21 € | 172.594.683,50 € | 175.944.489,32 € | 179.370.060,22 € | 182.873.001,48 € | 186.454.948,48 € | 190.117.567,17 € | 193.862.554,47 € | 197.691.638,66 € |    |
| SG&A                                          | 15.993.027,87 €  | 16.383.792,39 €  | 16.785.198,38 €  | 17.197.259,89 €  | 17.629.539,50 €  | 18.065.247,66 €  | 18.501.692,94 €  | 18.950.192,24 €  | 19.431.071,02 €  | 19.914.663,53 €  |    |
| EBITDA                                        | 150.123.067,12 € | 152.935.274,82 € | 155.809.575,12 € | 158.747.229,43 € | 161.740.520,72 € | 164.817.753,82 € | 167.953.255,54 € | 171.157.374,94 € | 174.431.483,45 € | 177.776.975,14 € |    |
| D&A                                           | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  |    |
| EBIT                                          | 116.842.647,56 € | 119.654.855,25 € | 122.529.155,56 € | 125.466.809,86 € | 128.469.101,16 € | 131.537.334,25 € | 134.672.835,98 € | 137.876.955,37 € | 141.151.063,89 € | 144.496.555,57 € |    |
| Interest expense                              | 36.819.587,18 €  | 36.273.323,20 €  | 35.713.402,62 €  | 35.139.484,02 €  | 34.551.217,46 €  | 33.948.244,24 €  | 33.330.196,69 €  | 32.696.697,84 €  | 32.047.361,73 €  | 31.381.792,12 €  |    |
| EBT                                           | 80.023.060,38 €  | 83.381.532,06 €  | 86.815.752,94 €  | 90.327.325,84 €  | 93.917.883,69 €  | 97.589.090,01 €  | 101.342.639,29 € | 105.180.257,43 € | 109.103.702,15 € | 113.114.763,45 € |    |
| Tax                                           | 20.095.765,10 €  | 20.845.383,01 €  | 21.703.538,24 €  | 22.581.831,46 €  | 23.479.470,92 €  | 24.397.272,50 €  | 25.335.659,82 €  | 26.295.064,36 €  | 27.275.925,54 €  | 28.278.690,86 €  |    |
| Net Income                                    | 60.017.295,29 €  | 62.536.149,04 €  | 65.112.814,71 €  | 67.745.494,38 €  | 70.438.412,77 €  | 73.191.817,51 €  | 76.006.979,47 €  | 78.885.193,07 €  | 81.827.776,62 €  | 84.836.072,59 €  |    |

| Profit and Loss Statement                     |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |    |
|-----------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----|
| In €                                          | Year:            | 21               | 22               | 23               | 24               | 25               | 26               | 27               | 28               | 29               | 30 |
| Revenue                                       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |    |
| Radioisotopes                                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |    |
| with accelerator                              | 25.238,14 €      | 25.919,57 €      | 26.619,40 €      | 27.338,13 €      | 28.076,25 €      | 28.834,31 €      | 29.612,84 €      | 30.412,39 €      | 31.233,52 €      | 32.076,83 €      |    |
| with reprocessing facility                    | 85.188.089,07 €  | 87.488.167,47 €  | 89.850.347,99 €  | 92.276.307,39 €  | 94.767.767,69 €  | 97.326.497,41 €  | 99.954.312,84 €  | 102.653.079,29 € | 105.424.712,43 € | 108.271.179,67 € |    |
| Metals and Gases (from reprocessing facility) |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |    |
| Uranium                                       | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  |    |
| Rhodium                                       | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  |    |
| Ruthenium                                     | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   |    |
| Xenon and Krypton                             | 67.422.672,81 €  | 69.243.084,98 €  | 71.112.648,27 €  | 73.032.689,77 €  | 75.004.572,49 €  | 77.029.695,85 €  | 79.109.497,64 €  | 81.245.454,08 €  | 83.439.081,34 €  | 85.691.936,53 €  |    |
| Electricity                                   | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              |    |
| District heat                                 | 7.155.799,48 €   | 7.349.006,07 €   | 7.547.429,23 €   | 7.751.209,82 €   | 7.960.492,49 €   | 8.175.425,78 €   | 8.396.162,28 €   | 8.622.856,66 €   | 8.855.675,84 €   | 9.094.779,09 €   |    |
| Electricity for hydrogen                      | 218.029.713,65 € | 223.916.515,92 € | 229.962.261,85 € | 236.171.242,92 € | 242.547.866,48 € | 249.096.658,87 € | 255.822.268,66 € | 262.729.469,91 € | 269.823.165,60 € | 277.108.391,07 € |    |
| Revenue                                       | 408.226.260,67 € | 418.427.441,52 € | 428.904.054,26 € | 439.663.535,54 € | 450.713.522,82 € | 462.061.859,75 € | 473.716.601,78 € | 485.686.021,85 € | 497.978.616,26 € | 510.603.110,71 € |    |
| COGS                                          |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |    |
| Material                                      | 35.516.641,23 €  | 36.582.140,47 €  | 37.679.604,68 €  | 38.809.992,82 €  | 39.974.292,61 €  | 41.173.521,38 €  | 42.408.727,03 €  | 43.680.988,84 €  | 44.991.418,50 €  | 46.341.161,06 €  |    |
| Staff                                         | 115.242.286,84 € | 118.699.555,44 € | 122.260.542,10 € | 125.928.358,37 € | 129.706.209,12 € | 133.597.395,39 € | 137.605.317,25 € | 141.733.476,77 € | 145.985.461,07 € | 150.365.045,51 € |    |
| Maintenance                                   | 50.442.419,07 €  | 51.955.691,64 €  | 53.514.362,39 €  | 55.119.793,27 €  | 56.773.387,06 €  | 58.476.588,67 €  | 60.230.886,34 €  | 62.037.812,93 €  | 63.898.947,31 €  | 65.815.915,73 €  |    |
| Other (IT)                                    | 5.418.333,70 €   | 5.580.883,72 €   | 5.748.310,23 €   | 5.920.759,53 €   | 6.098.382,32 €   | 6.281.333,79 €   | 6.469.773,80 €   | 6.663.967,02 €   | 6.863.783,03 €   | 7.069.696,52 €   |    |
| COGS                                          | 206.619.680,84 € | 212.818.271,27 € | 219.202.819,40 € | 225.778.903,99 € | 232.552.271,11 € | 239.528.839,24 € | 246.714.704,42 € | 254.116.145,55 € | 261.739.629,92 € | 269.591.810,81 € |    |
| Gross Profit                                  | 201.606.579,83 € | 205.609.170,26 € | 209.701.234,86 € | 213.884.631,56 € | 218.161.251,71 € | 222.533.020,51 € | 227.001.897,37 € | 231.569.876,30 € | 236.238.986,34 € | 241.011.291,90 € |    |
| SG&A                                          | 20.411.313,03 €  | 20.921.372,08 €  | 21.445.202,71 €  | 21.983.176,78 €  | 22.535.676,14 €  | 23.103.092,99 €  | 23.685.830,09 €  | 24.284.301,09 €  | 24.898.930,81 €  | 25.530.155,54 €  |    |
| EBITDA                                        | 181.195.266,79 € | 184.687.798,18 € | 188.256.032,14 € | 191.901.454,78 € | 195.625.575,57 € | 199.429.927,53 € | 203.316.067,28 € | 207.285.575,21 € | 211.340.055,53 € | 215.481.136,36 € |    |
| D&A                                           | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  |    |
| EBIT                                          | 147.914.847,23 € | 151.407.378,62 € | 154.975.612,58 € | 158.621.035,22 € | 162.345.156,01 € | 166.149.507,96 € | 170.035.647,71 € | 174.005.155,64 € | 178.059.635,96 € | 182.200.716,80 € |    |
| Interest expense                              | 30.699.583,26 €  | 30.000.319,18 €  | 29.283.573,50 €  | 28.548.909,18 €  | 27.795.878,25 €  | 27.024.021,55 €  | 26.232.868,42 €  | 25.421.936,48 €  | 24.590.731,23 €  | 23.738.745,85 €  |    |
| EBT                                           | 117.215.263,97 € | 121.407.059,43 € | 125.692.039,08 € | 130.072.126,04 € | 134.549.277,76 € | 139.125.486,42 € | 143.802.779,29 € | 148.583.219,17 € | 153.468.904,74 € | 158.461.970,95 € |    |
| Tax                                           | 29.303.815,99 €  | 30.351.764,86 €  | 31.423.099,77 €  | 32.518.031,51 €  | 33.637.319,44 €  | 34.781.371,60 €  | 35.950.694,82 €  | 37.145.904,79 €  | 38.367.226,18 €  | 39.615.492,74 €  |    |
| Net Income                                    | 87.911.447,98 €  | 91.055.294,58 €  | 94.268.939,31 €  | 97.554.094,53 €  | 100.911.958,32 € | 104.344.114,81 € | 107.852.084,47 € | 111.437.414,38 € | 115.101.678,55 € | 118.846.478,21 € |    |

| Profit and Loss Statement                     |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|-----------------------------------------------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| in €                                          | Year: | 31               | 32               | 33               | 34               | 35               | 36               | 37               | 38               | 39               | 40               |
| Revenue                                       |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Radiolotopes                                  |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| with accelerator                              |       | 32.942,90 €      | 33.832,36 €      | 34.745,83 €      | 35.683,97 €      | 36.647,44 €      | 37.636,92 €      | 38.653,12 €      | 39.696,75 €      | 40.768,56 €      | 41.869,31 €      |
| with reprocessing facility                    |       | 111.194.501,52 € | 114.196.793,96 € | 117.280.965,39 € | 120.446.627,16 € | 123.688.686,89 € | 127.038.550,82 € | 130.488.591,48 € | 133.991.243,45 € | 137.609.007,03 € | 141.324.450,22 € |
| Metals and Gases (from reprocessing facility) |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Uranium                                       |       | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  |
| Rhodium                                       |       | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  |
| Ruthenium                                     |       | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   |
| Xenon and Krypton                             |       | 88.005.618,82 €  | 90.381.770,53 €  | 92.822.078,33 €  | 95.328.274,45 €  | 97.902.137,86 €  | 100.545.495,58 € | 103.260.223,96 € | 106.048.250,01 € | 108.911.552,76 € | 111.852.164,68 € |
| Electricity                                   |       | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              |
| District heat                                 |       | 9.340.338,13 €   | 9.592.527,26 €   | 9.851.525,49 €   | 10.117.516,68 €  | 10.390.689,63 €  | 10.671.238,25 €  | 10.959.361,68 €  | 11.255.264,45 €  | 11.558.156,59 €  | 11.871.253,82 €  |
| Electricity for hydrogen                      |       | 284.590.317,63 € | 292.274.256,21 € | 300.165.661,12 € | 308.270.133,98 € | 316.593.427,59 € | 325.141.450,14 € | 333.920.269,29 € | 342.936.116,56 € | 352.195.391,71 € | 361.704.667,29 € |
| Revenue                                       |       | 523.568.466,52 € | 536.883.886,93 € | 550.558.823,70 € | 564.602.983,75 € | 579.026.336,13 € | 593.839.119,02 € | 609.051.847,05 € | 624.675.318,74 € | 640.720.624,16 € | 657.199.152,83 € |
| COGS                                          |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Material                                      |       | 47.731.395,89 €  | 49.163.337,76 €  | 50.638.237,90 €  | 52.157.385,03 €  | 53.722.106,59 €  | 55.333.769,78 €  | 56.993.782,88 €  | 58.703.596,36 €  | 60.464.704,25 €  | 62.278.645,38 €  |
| Staff                                         |       | 154.875.996,87 € | 159.522.276,78 € | 164.307.945,08 € | 169.237.183,43 € | 174.314.298,94 € | 179.543.727,91 € | 184.930.039,74 € | 190.477.940,93 € | 196.192.279,16 € | 202.078.047,54 € |
| Maintenance                                   |       | 67.790.393,20 €  | 69.824.105,00 €  | 71.918.828,15 €  | 74.076.393,00 €  | 76.298.684,78 €  | 78.587.645,33 €  | 80.945.274,69 €  | 83.373.632,93 €  | 85.874.841,92 €  | 88.451.087,17 €  |
| Other (IT)                                    |       | 7.281.787,41 €   | 7.500.241,04 €   | 7.725.248,27 €   | 7.957.005,72 €   | 8.195.715,89 €   | 8.441.587,36 €   | 8.694.834,98 €   | 8.955.680,03 €   | 9.224.350,43 €   | 9.501.080,95 €   |
| COGS                                          |       | 277.678.573,38 € | 286.009.960,58 € | 294.590.259,40 € | 303.427.967,18 € | 312.506.806,19 € | 321.906.730,38 € | 331.563.932,29 € | 341.510.950,26 € | 351.756.175,77 € | 362.308.861,04 € |
| Gross Profit                                  |       | 245.889.893,15 € | 250.873.926,35 € | 255.968.564,30 € | 261.175.016,57 € | 266.495.529,94 € | 271.932.388,64 € | 277.487.914,76 € | 283.164.368,48 € | 288.964.448,40 € | 294.890.291,79 € |
| SG&A                                          |       | 26.178.423,33 €  | 26.844.194,35 €  | 27.527.941,18 €  | 28.230.149,19 €  | 28.951.316,81 €  | 29.691.955,95 €  | 30.452.592,35 €  | 31.233.765,94 €  | 32.036.031,21 €  | 32.859.957,64 €  |
| EBITDA                                        |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| D&A                                           |       | 219.710.469,82 € | 224.029.732,01 € | 228.440.623,11 € | 232.944.867,39 € | 237.544.213,13 € | 242.240.432,69 € | 247.035.322,41 € | 251.930.702,54 € | 256.928.417,19 € | 262.030.334,15 € |
| EBIT                                          |       | 186.430.050,25 € | 190.749.312,44 € | 195.160.203,55 € | 199.664.447,82 € | 204.263.793,57 € | 208.960.013,13 € | 213.754.902,85 € | 218.650.282,98 € | 223.647.997,62 € | 228.749.914,59 € |
| Interest expense                              |       | 22.865.460,84 €  | 21.970.343,78 €  | 21.052.848,63 €  | 20.112.416,18 €  | 19.148.472,83 €  | 18.160.431,89 €  | 17.147.688,21 €  | 16.109.626,76 €  | 15.045.613,77 €  | 13.955.000,45 €  |
| EBT                                           |       | 163.564.589,41 € | 168.778.968,74 € | 174.107.354,92 € | 179.552.031,64 € | 185.115.320,64 € | 190.799.582,03 € | 196.607.214,63 € | 202.540.656,22 € | 208.602.383,86 € | 214.794.914,14 € |
| Tax                                           |       | 40.891.147,35 €  | 42.194.742,19 €  | 43.526.838,73 €  | 44.888.007,91 €  | 46.278.830,16 €  | 47.699.895,51 €  | 49.151.803,66 €  | 50.635.164,06 €  | 52.150.595,96 €  | 53.698.728,53 €  |
| Net Income                                    |       | 122.673.442,06 € | 126.584.226,56 € | 130.580.516,19 € | 134.664.023,73 € | 138.836.490,48 € | 143.099.686,53 € | 147.455.410,98 € | 151.905.492,17 € | 156.451.787,89 € | 161.096.185,60 € |

| Profit and Loss Statement                            |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|------------------------------------------------------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| in €                                                 | Year: | 41               | 42               | 43               | 44               | 45               | 46               | 47               | 48               | 49               | 50               |
| <b>Revenue</b>                                       |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Radiolotopes                                         |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| with accelerator                                     |       | 42.999,78 €      | 44.160,78 €      | 45.333,12 €      | 46.577,65 €      | 47.835,25 €      | 49.126,80 €      | 50.453,23 €      | 51.815,46 €      | 53.214,48 €      | 54.651,27 €      |
| with reprocessing facility                           |       | 145.140.210,37 € | 149.058.996,05 € | 153.083.588,94 € | 157.216.845,85 € | 161.461.700,68 € | 165.821.166,60 € | 170.298.338,10 € | 174.896.393,23 € | 179.618.595,85 € | 184.468.297,93 € |
| <b>Metals and Gases (from reprocessing facility)</b> |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Uranium                                              |       | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  | 14.197.787,52 €  |
| Rhodium                                              |       | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  | 10.280.520,00 €  |
| Ruthenium                                            |       | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   | 5.926.440,00 €   |
| Xenon and Krypton                                    |       | 114.872.173,13 € | 117.973.721,80 € | 121.159.012,29 € | 124.430.305,62 € | 127.789.923,88 € | 131.240.251,82 € | 134.783.738,62 € | 138.422.899,56 € | 142.160.317,85 € | 145.998.646,43 € |
| Electricity                                          |       | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              |
| District heat                                        |       | 12.191.777,67 €  | 12.520.955,67 €  | 12.859.021,47 €  | 13.206.215,05 €  | 13.562.782,86 €  | 13.928.977,99 €  | 14.305.060,40 €  | 14.691.297,03 €  | 15.087.962,05 €  | 15.495.337,03 €  |
| Electricity for hydrogen                             |       | 371.470.693,30 € | 381.500.402,02 € | 391.800.912,88 € | 402.379.537,52 € | 413.243.785,04 € | 424.401.367,23 € | 435.860.204,15 € | 447.628.429,66 € | 459.714.397,26 € | 472.126.685,99 € |
| Revenue                                              |       | 674.122.601,78 € | 691.502.983,84 € | 709.352.636,22 € | 727.684.229,22 € | 746.510.775,22 € | 765.845.637,97 € | 785.702.542,01 € | 806.095.562,47 € | 827.039.235,01 € | 848.548.366,17 € |
| <b>COGS</b>                                          |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Material                                             |       | 64.147.004,74 €  | 66.071.414,88 €  | 68.053.557,33 €  | 70.095.164,05 €  | 72.198.018,97 €  | 74.363.959,54 €  | 76.594.878,33 €  | 78.892.724,68 €  | 81.259.506,42 €  | 83.697.291,61 €  |
| Staff                                                |       | 208.140.388,96 € | 214.384.600,63 € | 220.816.138,65 € | 227.440.622,81 € | 234.263.841,50 € | 241.291.756,74 € | 248.530.509,44 € | 255.966.424,73 € | 263.606.017,47 € | 271.575.997,99 € |
| Maintenance                                          |       | 91.104.619,79 €  | 93.837.758,38 €  | 96.652.891,13 €  | 99.552.477,87 €  | 102.539.052,20 € | 105.615.223,77 € | 108.783.680,48 € | 112.047.190,90 € | 115.408.606,63 € | 118.870.864,82 € |
| Other (IT)                                           |       | 9.786.113,38 €   | 10.079.696,78 €  | 10.382.087,68 €  | 10.693.550,31 €  | 11.014.366,82 €  | 11.344.787,52 €  | 11.685.131,15 €  | 12.035.685,09 €  | 12.396.755,64 €  | 12.768.638,31 €  |
| COGS                                                 |       | 373.178.126,87 € | 384.373.470,68 € | 395.904.674,80 € | 407.781.815,04 € | 420.015.269,49 € | 432.615.727,58 € | 445.594.199,41 € | 458.962.025,39 € | 472.730.886,15 € | 486.912.812,73 € |
| Gross Profit                                         |       | 300.944.474,91 € | 307.129.513,16 € | 313.447.961,43 € | 319.902.414,18 € | 326.495.505,73 € | 333.229.910,39 € | 340.108.342,61 € | 347.133.537,08 € | 354.308.348,86 € | 361.635.553,44 € |
| SG&A                                                 |       | 33.706.130,09 €  | 34.575.149,19 €  | 35.467.631,81 €  | 36.384.211,46 €  | 37.325.538,76 €  | 38.292.281,90 €  | 39.285.127,10 €  | 40.304.779,12 €  | 41.351.961,75 €  | 42.427.418,31 €  |
| EBITDA                                               |       | 267.238.344,82 € | 272.554.363,97 € | 277.980.329,61 € | 283.518.202,72 € | 289.169.966,97 € | 294.937.628,50 € | 300.823.215,51 € | 306.828.777,95 € | 312.956.387,11 € | 319.208.135,15 € |
| D&A                                                  |       | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  |
| EBIT                                                 |       | 233.957.925,25 € | 239.273.944,41 € | 244.699.910,03 € | 250.237.783,15 € | 255.889.547,40 € | 261.657.208,93 € | 267.542.795,94 € | 273.548.358,39 € | 279.675.967,54 € | 285.927.715,56 € |
| Interest expense                                     |       | 12.837.121,80 €  | 11.691.296,19 €  | 10.516.824,50 €  | 9.312.991,89 €   | 8.079.963,03 €   | 6.814.285,56 €   | 5.517.889,44 €   | 4.189.931,01 €   | 2.827.056,43 €   | 1.430.979,18 €   |
| EBT                                                  |       | 221.120.803,45 € | 227.582.648,22 € | 234.183.085,52 € | 240.924.791,25 € | 247.810.484,37 € | 254.842.922,98 € | 262.024.906,51 € | 269.359.275,38 € | 276.848.911,11 € | 284.496.736,38 € |
| Tax                                                  |       | 55.280.200,86 €  | 56.895.662,06 €  | 58.545.771,28 €  | 60.231.197,81 €  | 61.952.621,09 €  | 63.710.730,75 €  | 65.506.226,63 €  | 67.339.818,84 €  | 69.212.227,78 €  | 71.124.184,10 €  |
| Net Income                                           |       | 165.840.602,59 € | 170.686.986,17 € | 175.637.313,24 € | 180.693.593,44 € | 185.857.863,28 € | 191.132.192,24 € | 196.518.679,88 € | 202.019.456,53 € | 207.636.683,34 € | 213.372.552,29 € |

## 7.7.

## Free Cash Flow Rechnung (positiv)

| Free Cash Flow calculation         |       |                    |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|------------------------------------|-------|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| in €                               | Year: | 1                  | 2                | 3                | 4                | 5                | 6                | 7                | 8                | 9                | 10               |
| EBIT                               |       | 267.157.108,90 €   | 276.088.793,28 € | 285.316.010,35 € | 294.850.136,59 € | 304.703.073,14 € | 314.887.274,23 € | 325.415.777,32 € | 336.302.235,02 € | 347.560.949,01 € | 359.206.906,06 € |
| - Adjusted Tax Expenses (t * EBIT) | -     | 66.789.277,23 €    | 69.022.190,32 €  | 71.329.002,59 €  | 73.712.534,15 €  | 76.175.768,28 €  | 78.721.819,56 €  | 81.353.944,33 €  | 84.075.558,75 €  | 86.890.237,25 €  | 89.801.726,52 €  |
| +Depreciation                      |       | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  |
| -CapEx                             | -     | 1.527.837.662,27 € | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              |
| Free cash flow to the firm         | -     | 1.296.913.077,35 € | 237.623.348,21 € | 244.543.761,01 € | 251.694.355,69 € | 259.084.058,10 € | 266.722.209,92 € | 274.618.586,23 € | 282.783.429,51 € | 291.227.465,01 € | 299.961.932,79 € |

| Free Cash Flow calculation         |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|------------------------------------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| in €                               | Year: | 11               | 12               | 13               | 14               | 15               | 16               | 17               | 18               | 19               | 20               |
| EBIT                               |       | 371.255.816,15 € | 383.724.153,06 € | 396.625.197,43 € | 409.989.082,43 € | 423.022.842,38 € | 438.150.464,36 € | 452.992.943,00 € | 468.372.338,00 € | 484.311.840,10 € | 500.835.828,95 € |
| - Adjusted Tax Expenses (t * EBIT) | -     | 92.813.954,04 €  | 95.931.038,27 €  | 99.157.299,36 €  | 102.497.270,61 € | 105.955.710,60 € | 109.537.616,09 € | 113.248.235,75 € | 117.093.084,70 € | 121.077.960,02 € | 125.208.957,24 € |
| +Depreciation                      |       | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  |
| -CapEx                             | -     | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              |
| Free cash flow to the firm         |       | 308.989.615,36 € | 318.349.868,04 € | 328.028.651,31 € | 338.048.568,06 € | 348.423.885,03 € | 359.169.601,52 € | 370.301.460,49 € | 381.836.007,34 € | 393.790.623,32 € | 406.183.624,95 € |

| Free Cash Flow calculation         |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|------------------------------------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| in €                               | Year: | 21               | 22               | 23               | 24               | 25               | 26               | 27               | 28               | 29               | 30               |
| EBIT                               |       | 517.969.951,17 € | 535.741.190,91 € | 554.177.949,87 € | 573.310.131,70 € | 593.169.231,74 € | 613.788.432,57 € | 635.202.705,71 € | 657.448.919,90 € | 680.565.956,39 € | 704.594.831,74 € |
| - Adjusted Tax Expenses (t * EBIT) | -     | 129.492.487,79 € | 133.935.297,73 € | 138.544.487,47 € | 143.327.532,93 € | 148.292.307,94 € | 153.447.108,14 € | 158.800.676,43 € | 164.362.229,97 € | 170.141.489,10 € | 176.148.707,94 € |
| +Depreciation                      |       | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  |
| -CapEx                             | -     | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              |
| Free cash flow to the firm         |       | 419.034.216,63 € | 432.362.646,43 € | 446.190.215,65 € | 460.539.352,02 € | 475.423.677,05 € | 490.898.077,67 € | 506.958.782,53 € | 523.643.443,17 € | 540.881.220,53 € | 559.002.877,05 € |

| Free Cash Flow calculation         |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                    |
|------------------------------------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|
| in €                               | Year: | 31               | 32               | 33               | 34               | 35               | 36               | 37               | 38               | 39               | 40                 |
| EBIT                               |       | 729.578.828,63 € | 755.563.635,14 € | 782.597.493,23 € | 810.731.356,93 € | 840.019.060,90 € | 870.517.500,12 € | 902.286.821,43 € | 935.390.627,76 € | 969.896.195,83 € | 1.005.874.708,41 € |
| - Adjusted Tax Expenses (t * EBIT) | -     | 182.394.707,16 € | 188.890.908,78 € | 195.649.373,31 € | 202.682.839,23 € | 210.004.765,23 € | 217.629.375,03 € | 225.571.705,36 € | 233.847.656,94 € | 242.474.048,96 € | 251.468.677,10 €   |
| +Depreciation                      |       | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €  | 30.556.753,25 €    |
| -CapEx                             | -     | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €                |
| Free cash flow to the firm         |       | 577.748.874,72 € | 597.229.479,60 € | 617.504.873,17 € | 638.605.270,94 € | 660.571.048,92 € | 683.444.878,34 € | 707.271.869,32 € | 732.099.724,06 € | 757.978.900,12 € | 784.962.784,55 €   |

| Free Cash Flow calculation         |       |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|------------------------------------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| in €                               | Year: | 41                 | 42                 | 43                 | 44                 | 45                 | 46                 | 47                 | 48                 | 49                 | 50                 |
| EBIT                               |       | 1.043.401.501,93 € | 1.082.556.330,64 € | 1.123.423.649,42 € | 1.166.092.909,39 € | 1.210.658.888,72 € | 1.257.222.024,96 € | 1.305.888.785,32 € | 1.356.772.055,63 € | 1.409.991.556,60 € | 1.465.674.288,12 € |
| - Adjusted Tax Expenses (t * EBIT) | -     | 260.850.375,48 €   | 270.639.062,66 €   | 280.855.912,10 €   | 291.523.227,35 €   | 302.654.722,18 €   | 314.305.506,24 €   | 326.472.196,33 €   | 339.193.013,91 €   | 352.497.889,15 €   | 366.418.572,03 €   |
| +Depreciation                      |       | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    | 30.556.753,25 €    |
| -CapEx                             | -     | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                | - €                |
| Free cash flow to the firm         |       | 813.107.879,69 €   | 842.474.001,23 €   | 873.124.489,56 €   | 905.126.435,29 €   | 938.550.919,79 €   | 973.473.271,97 €   | 1.009.973.342,23 € | 1.048.125.794,97 € | 1.088.050.429,69 € | 1.129.812.469,33 € |

## 7.8.

## Free Cash Flow Rechnung (negativ)

| Free Cash Flow calculation         |       |                    |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|------------------------------------|-------|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| In €                               | Year: | 1                  | 2                | 3                | 4                | 5                | 6                | 7                | 8                | 9                | 10               |
| EBIT                               |       | 91.873.162,58 €    | 94.129.226,60 €  | 96.435.908,33 €  | 98.794.265,55 €  | 101.205.375,35 € | 103.670.334,38 € | 106.190.259,03 € | 108.766.285,73 € | 111.399.571,15 € | 114.091.292,47 € |
| - Adjusted Tax Expenses (t * EBIT) | -     | 22.968.290,65 €    | 23.532.306,65 €  | 24.108.977,08 €  | 24.698.566,39 €  | 25.301.343,84 €  | 25.917.583,60 €  | 26.547.564,76 €  | 27.191.571,43 €  | 27.849.892,79 €  | 28.522.823,12 €  |
| + Depreciation                     |       | 33.280.419,57 €    | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  |
| - CapEx                            | -     | 1.664.020.978,27 € | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              |
| Free cash flow to the firm         | -     | 1.581.835.886,77 € | 103.877.339,52 € | 105.607.350,81 € | 107.376.118,72 € | 109.184.451,00 € | 111.033.170,35 € | 112.923.113,84 € | 114.855.133,86 € | 116.830.087,93 € | 118.848.888,92 € |

| Free Cash Flow calculation         |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|------------------------------------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| In €                               | Year: | 11               | 12               | 13               | 14               | 15               | 16               | 17               | 18               | 19               | 20               |
| EBIT                               |       | 116.842.647,56 € | 119.654.855,25 € | 122.529.155,56 € | 125.466.809,86 € | 128.469.101,16 € | 131.537.334,25 € | 134.672.835,98 € | 137.876.955,37 € | 141.151.063,89 € | 144.496.555,57 € |
| - Adjusted Tax Expenses (t * EBIT) | -     | 29.210.661,89 €  | 29.913.713,81 €  | 30.632.288,89 €  | 31.366.702,47 €  | 32.117.275,29 €  | 32.884.333,56 €  | 33.668.208,99 €  | 34.469.238,84 €  | 35.287.765,57 €  | 36.124.139,89 €  |
| + Depreciation                     |       | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  |
| - CapEx                            | -     | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              |
| Free cash flow to the firm         |       | 120.912.405,23 € | 123.021.561,01 € | 125.177.286,23 € | 127.380.526,96 € | 129.632.245,43 € | 131.933.420,25 € | 134.285.046,55 € | 136.688.136,89 € | 139.143.717,48 € | 141.652.836,24 € |

| Free Cash Flow calculation         |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|------------------------------------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| m€                                 | Year: | 21               | 22               | 23               | 24               | 25               | 26               | 27               | 28               | 29               | 30               |
| EBIT                               |       | 147.914.847,23 € | 151.407.378,62 € | 154.975.612,58 € | 158.621.035,22 € | 162.345.156,01 € | 166.149.507,96 € | 170.035.647,71 € | 174.005.155,64 € | 178.059.635,96 € | 182.200.716,80 € |
| - Adjusted Tax Expenses (t * EBIT) | -     | 36.978.711,81 €  | 37.851.844,65 €  | 38.743.903,14 €  | 39.655.258,80 €  | 40.586.289,00 €  | 41.537.376,99 €  | 42.508.911,93 €  | 43.501.288,91 €  | 44.514.908,99 €  | 45.550.179,20 €  |
| +Depreciation                      |       | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  |
| -CapEx                             | -     | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              |
| Free cash flow to the firm         |       | 144.216.554,99 € | 146.835.953,53 € | 149.512.129,90 € | 152.246.195,98 € | 155.028.286,57 € | 157.892.550,54 € | 160.807.155,35 € | 163.784.286,30 € | 166.825.146,54 € | 169.930.957,16 € |

| Free Cash Flow calculation         |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|------------------------------------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| in €                               | Year: | 31               | 32               | 33               | 34               | 35               | 36               | 37               | 38               | 39               | 40               |
| EBIT                               |       | 186.430.050,25 € | 190.749.312,44 € | 195.160.203,55 € | 199.664.447,82 € | 204.263.793,57 € | 208.960.013,13 € | 213.754.902,85 € | 218.650.282,98 € | 223.647.997,62 € | 228.749.914,59 € |
| - Adjusted Tax Expenses (t * EBIT) | -     | 46.607.512,56 €  | 47.687.328,11 €  | 48.790.050,89 €  | 49.916.111,96 €  | 51.065.948,39 €  | 52.240.003,28 €  | 53.438.725,71 €  | 54.662.570,74 €  | 55.911.999,41 €  | 57.187.478,65 €  |
| +Depreciation                      |       | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  |
| -CapEx                             | -     | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              | - €              |
| Free cash flow to the firm         |       | 173.102.957,25 € | 176.342.403,90 € | 179.650.572,23 € | 183.028.755,43 € | 186.478.264,74 € | 190.000.429,41 € | 193.596.596,70 € | 197.268.131,80 € | 201.016.417,78 € | 204.842.855,51 € |

| Free Cash Flow calculation         |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|------------------------------------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| In €                               | Year: | 41               | 42               | 43               | 44               | 45               | 46               | 47               | 48               | 49               | 50               |
| EBIT                               |       | 233.957.925,25 € | 239.273.944,41 € | 244.699.910,05 € | 250.237.783,15 € | 255.889.547,40 € | 261.657.208,93 € | 267.542.795,94 € | 273.548.358,39 € | 279.675.967,54 € | 285.927.715,56 € |
| - Adjusted Tax Expenses (t * EBIT) | -     | 58.489.481,31 €  | 59.818.486,10 €  | 61.174.977,51 €  | 62.559.445,79 €  | 63.972.386,85 €  | 65.414.302,23 €  | 66.885.698,99 €  | 68.387.089,60 €  | 69.918.991,89 €  | 71.481.928,89 €  |
| +Depreciation                      |       | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  | 33.280.419,57 €  |
| -CapEx                             | -     | €                | €                | €                | €                | €                | €                | €                | €                | €                | €                |
| Free cash flow to the firm         |       | 208.748.863,50 € | 212.735.877,87 € | 216.805.352,10 € | 220.958.756,93 € | 225.197.580,12 € | 229.523.326,26 € | 233.937.516,52 € | 238.441.688,36 € | 243.037.395,22 € | 247.726.206,24 € |

# Endnoten

- 1 W. Hummel, PSI: Chemie ausgewählter dosisrelevanter Radionuklide, Nagra Fachbericht 17-05, Nagra, März 2017, Seite 4.
- 2 R. Jubin, "Used Fuel Reprocessing," in Nuclear Fuel Cycle Course, CRESF, Jul. 2011. Accessed: May 30, 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.slideshare.net/slideshow/08-used-fuel-reprocessing/53973290>.
- 3 A. N. LABORATORY, "FAST REACTOR FUELS," Fast Reactor Technology Training, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2019, [Online]. Verfügbar: <https://www.nrc.gov/docs/ML1914/ML19149A371.pdf>.
- 4 G. L. Fredrickson et al., "History and status of spent fuel treatment at the INL Fuel Conditioning Facility", Progress in Nuclear Energy, Bd. 143, S. 104037, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.104037>.
- 5 Y.-H. Kim und Y.-Z. Cho, "Analyzing Design Considerations for Disassembly of Spent Nuclear Fuel during Head End Process of Pyroprocessing," Science and Technology of Nuclear Installations, Bd. 2020, S. 8868444, 2020, doi: 10.1155/2020/8868444.
- 6 Y.-H. Kim, Y.-Z. Cho, J.-W. Lee, J.-H. Lee, S.-C. Jeon, und D.-H. Ahn, "Engineering Design of a Voloxidizer with a Double Reactor for the Hull Separation of Spent Nuclear Fuel Rods," Science and Technology of Nuclear Installations, vol. 2017, p. 9854830, 2017, doi: 10.1155/2017/9854830.
- 7 J. J. Park et al., "Evaluation of the Effects of Advanced Voloxidation Process on Pyroprocessing", Sep. 2008. Zugriffen: Oct. 18, 2023. Online. Verfügbar unter: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/40/070/40070075.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/070/40070075.pdf).
- 8 H. Lee et al., "Current status of pyroprocessing development at KAERI," Science and Technology of Nuclear Installations, Vol. 2013, 2013, doi: 10.1155/2013/343492.
- 9 N. Hege, J. Jackson, und J. Shafer, "Review-Fundamental Uranium Electrochemistry and Spectroscopy in Molten Salt Systems: Uranium Electrochemistry and Spectroscopy in Molten Salts", J Electrochem Soc, Vol. 170, Jan. 2023, doi: 10.1149/1945-7111/aca9a9.
- 10 T.-S. Yoo, S. D. Herrmann, S.-J. Yoon, and K. C. Marsden, "Analysis and Modeling of Oxide Reduction Processes for Uranium Oxides," Journal of Nuclear Materials, vol. 545, p. 152625, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152625>.
- 11 J.-M. Hur, C.-S. Seo, S.-S. Hong, D.-S. Kang, and S.-W. Park, "ELECTROCHEMICAL REDUCTION OF URANIUM OXIDES IN Li2O-LiCl MOLTEN-SALT," in Seventh Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Jeju, Korea: Kernenergie-Agentur (NEA), 2002. Online. Verfügbar: <https://www.oecd-nea.org/pt/docs/iem/jeju02/session2/SessionII-07.pdf>
- 12 C. S. SEO, S. Bin PARK, B. H. PARK, K. J. JUNG, S. W. PARK, and S. H. KIM, "Electrochemical Study on the Reduction Mechanism of Uranium Oxide in a LiCl-Li2O Molten Salt," J Nucl Sci Technol, vol. 43, no. 5, pp. 587-595, Mai 2006, doi: 10.1080/18811248.2006.9711137.
- 13 T. Usami, T. Kato, M. Kurata, T. Inoue, H. E. Sims, and J. A. Jenkins, "Lithium reduction of a MOX pellet," J Nucl Sci Technol, vol. 39, no. sup3, pp. 858-861, Nov. 2002, doi: 10.1080/00223131.2002.10875604.
- 14 International Atomic Energy Agency, "Status and Trends in Pyroprocessing of Spent Nuclear Fuels". Accessed: Oct. 31, 2023. Online. Verfügbar unter: [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:52093276](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:52093276)
- 15 I. S. Kim, D. Y. Chung, M. S. Park, J. M. Hur, and J. K. Moon, "Evaporation of CsCl, BaCl2, and SrCl2 from the LiCl-Li2O molten salt of the electrolytic reduction process," J Radioanal Nucl Chem, vol. 303, no. 1, pp. 223-227, 2015, doi: 10.1007/s10967-014-3330-8.
- 16 T.-S. Yoo, D. Vaden, G. L. Fredrickson, and B. R. Westphal, "Analysis of undissolved anode materials of Mark-IV electro refiner," Journal of Nuclear Materials, vol. 510, pp. 551-555, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.08.022>.
- 17 J. Jan-fong und L. Shelly X., "Actinide ion sensor for pyroprocess monitoring", US8741119B1, Jun. 03, 2014 Accessed: Mar. 01, 2023. Online. Verfügbar: [https://www.researchgate.net/publication/302742146\\_Actinide\\_ion\\_sensor\\_for\\_pyroprocess\\_monitoring](https://www.researchgate.net/publication/302742146_Actinide_ion_sensor_for_pyroprocess_monitoring).
- 18 E. Mendes et al., „Actinides separation chemistry in molten salts and its applications at the CEA," in DRCP Scientific Seminar, Bagnols Sur Cèze, France, Jun. 2016. Accessed: Jun. 05, 2024. Online. Verfügbar: <https://cea.hal.science/cea-02439443/document>.
- 19 B. Westphal, D. Vaden, T. Hua, J. Willit, und D. Laug, "Recent developments at the cathode processor for spent fuel treatment," in American Nuclear Society Fifth Topical Meeting, DOE Spent Nuclear/Fuels and Fissile Materials Management, Charleston, South Carolina, USA, Sep. 2002. Zugänglich: Oct. 11, 2023. Online. Verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/255272306\\_Recent\\_developments\\_at\\_the\\_cathode\\_processor\\_for\\_spent\\_fuel\\_treatment](https://www.researchgate.net/publication/255272306_Recent_developments_at_the_cathode_processor_for_spent_fuel_treatment).
- 20 S. H. Lee, G. Il Park, and S. Bin Park, "Development of High-Temperature Transport System for LiCl-KCl Molten Salt in Pyroprocessing," Nucl Technol, vol. 191, no. 2, pp. 167-173, Aug. 2015, doi: 10.13182/NT14-87.
- 21 D. Vaden, S. X. Li, B. R. Westphal, K. B. Davies, T. A. Johnson, und D. M. Pace, "Engineering-Scale Liquid Cadmium Cathode Experiments International Pyroprocessing Research Conference ENGINEERING-SCALE LIQUID CADMIUM CATHODE EXPERIMENTS," 2006.
- 22 G. L. Fredrickson und T.-S. Yoo, "Liquid cadmium cathode performance model based on the equilibrium behaviors of U and Pu in molten LiCl-KCl/Cd system at 500°C," Journal of Nuclear Materials, vol. 528, p. 151883, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.151883>.
- 23 J. D. Bae et al., „Numerische und experimentelle Ansätze für die Entwicklung von Verfahren zur Rückgewinnung von Restaktiniden". Oct. 01, 2009. Zugänglich gemacht: Oct. 03, 2023. Online. Verfügbar unter: [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:41027150](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:41027150).
- 24 Y.-Z. Cho, B.-G. Ahn, H.-C. Eun, J.-S. Jung, und H.-S. Lee, "Melt Crystallization Process Treatment of LiCl Salt Waste Generated from Electrolytic Reduction Process of Spent Oxide Fuel," Energy Procedia, vol. 7, pp. 525-528, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.072>.
- 25 A. N. Williams, M. Pack, and S. Phongikaroon, "Separation of strontium and cesium from ternary and quaternary lithium chloride-potassium chloride salts via melt crystallization," Nuclear Engineering and Technology, vol. 47, no. 7, pp. 867-874, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.net.2015.08.006>.
- 26 W. Wildi, D. Appel, M. Buser et al.: Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle, Abschlussbericht Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA) für das Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bern, 31. Januar 2000, Seite 13.

- 27 Gruenwald, W., Koschorke, H., Roth, G., "Development of HLLW melter to large scale industrial application", Low, Intermediate and High-Level Waste Management - Decontamination and Decommissioning (Proc. A N S Int. Top. Mtg Niagara Falls, New York, 1986), Vol. 1, American Nuclear Society, Hinsdale, IL (1986) 1002.
- 28 W. Baehr: "Industrial vitrification processes for high-level liquid waste solutions", IAEA Bulletin, Wien, Ausgabe 4, 1989, Seite 44.
- 29 "Design and Operation of High Level Waste Vitrification and Storage Facilities", Technical reports series No. 339, IAEA, Wien 1992, Seite 42.
- 30 NAGRA Technischer Bericht NTB 22-05: „Modellhaftes Inventar radioaktiver Materialien MIRAM-RBG, Wettingen, 2023, Schweiz, Anhang B-3 Übersicht Abfallsorten.
- 31 "Design and Operation of High Level Waste Vitrification and Storage Facilities", Technical reports series No. 339, IAEA, Wien 1992, Seite 42.
- 32 Produktdatenblatt „GNS Super compactor FAKIR, GNS, Deutschland,“ [Online].  
Verfügbar: [https://www.gns.de/media/zhfbdr0i/fakir\\_produkinfo\\_2023\\_10\\_en\\_v01.pdf](https://www.gns.de/media/zhfbdr0i/fakir_produkinfo_2023_10_en_v01.pdf).
- 33 P. Brenneche (Herausgeber): Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerbedingungen, Stand Dezember 2014), Salzgitter, Februar 2015, Seite 47, Gussbehälter Typ II.
- 34 Produktdatenblatt „MOSAIK II-Behälter, GNS,“ [Online]. Verfügbar: [https://www.gns.de/media/3fklpusj/mosaik\\_produkinfo\\_2023\\_10\\_en\\_v01.pdf](https://www.gns.de/media/3fklpusj/mosaik_produkinfo_2023_10_en_v01.pdf).
- 35 KORIGEN Beschreibung online verfügbar unter: <https://www.ites.kit.edu/266.php>
- 36 SCALE Beschreibung verfügbar unter: <https://www.ornl.gov/scale/overview>
- 37 TMX-INote-24-0036\_tmx-bateman\_documentation  
<https://fispact.ukaea.uk/wp-content/uploads/2016/07/EAF2010.pdf>
- 38 Kumulative Spaltausbeute bei der Spaltung von Uran-235, IAEA safeguard data, online: <https://www-nds.iaea.org/sgnucdat/c3.htm>.
- 40 23 Jahre Aus für WAA Wackersdorf, in: contrAtom - Informationsnetzwerk gegen Atomenergie, 6. Juni 2012.
- 41 IAEA-TECDOC-1100: Survey of wet and dry spent fuel storage, Wien, 1999, Seite 88, Tabelle XVII.
- 42 F. Baumgaertner, „The Purex process for the reprocessing of nuclear fuels with high Pu content and high burn-up,“ Kernforschungszentrum Karlsruhe, Inst. fuer Heisse Chemie; Heidelberg Univ. (F.R. Germany). Lehrstuhl fuer Radiochemie), Karlsruhe, Germany, 1976.
- 43 Matthias Englert, Stephan Kurth, Simone Mohr, Saleem Chaudry, „Verfolgung und Aufbereitung des Standes von Wissenschaft und Technik bei alternativen Entsorgungsoptionen für hochradioaktive Abfälle (altEr),“ BASE – FORSCHUNGSBERICHTE ZUR SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG, Berlin, 2022.
- 44 Tracy Rudisill, David K. Peeler, Bryce T. Edwards, „Demonstration of the Feasibility of Recovering Americium and Curium Isotopes from a Lanthanide Borosilicate Glass,“ in Materials Research Society symposia proceedings, Material Research Society 713, 2011.
- 45 T.S. Rudisill, J.M. Pareizs, W.G. Ramsey, "Americium/Curium Extraction from Lanthanide Borosilicate Glass," Westinghouse Savannah River, Aiken, South Carolina, USA, 1996.
- 46 Nukleare Daten für die Sicherheitsüberwachung: <https://www-nds.iaea.org/sgnucdat/>.
- 47 Evaluation of the Effects of Advanced Voloxidation Process on Pyroprocessing, KAERI TR-3622, Korea Atomic Energy Research Institute, 2008.
- 48 W. Oldenkop, Druckwasserreaktoren für Kernkraftwerke, Seite 197, München: Verlag Karl Thiemeig, 1979.
- 49 J. Amend, H.-G. Dillmann, J. Furrer, R. Kaempfer, „1000 h-Langzeituntersuchungen zur Iod-Korrosion an ausgewählten Edelstahlproben unter simulierten Auflöserbedingungen“, KfK 3975, Karlsruhe, 1985.
- 50 Nick Gribble, Rick Short, "The Vitrification Test Rig," *National Nuclear Laboratory Scientific Journal*, Bd. 2, Nr. 2, S. 3-11, 2014.
- 51 S. Bahl, M. Klipfel und F. Strohmmer, „Verfahren und Vorrichtung zur Trennung von Cäsium und Technetium aus radioaktiven Stoffgemischen“. EP-Patent EP00003750172, DE102018102510, 27. Juni 2019.
- 52 S. B. F. Strohmmer, „KTE Interner Bericht zur Abtrennung von Rheniumpertechnat,“ nicht publiziert - intern KTE, Eggenstein-Leopoldshafen, 2019.
- 53 A. F. Holleman, E. Wiberg, N. Wiberg: Lehrbuch der Anorganischen Chemie. 102. Auflage. Walter de Gruyter, Berlin 2007, ISBN 978-3-11-017770-1, S. 1702.
- 54 Park, J. J., Lee, J. W., & Park, G. I. (2010). Development of Advanced Voloxidation Process for Treatment of Spent Fuel.  
[https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/42/078/42078167.pdf?r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/078/42078167.pdf?r=1)
- 55 Pohl Heinz: in Bericht der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) Nr.15: Studie über Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse, August 1972, Berlin, Seite 43.
- 56 H. Eberhard, J. Endres, S. Schneider, GRS: Untersuchung zur Rückführung radioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung, Abschlussbericht zu AP 6, September 2020, Seite 9.
- 57 H. Eberhard, J. Endres, S. Schneider, GRS: Untersuchung zur Rückführung radioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung, Abschlussbericht zu AP 6, September 2020, Seite 11, Tabelle 2.2.
- 58 H. Eberhard, J. Endres, S. Schneider, GRS: Untersuchung zur Rückführung radioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung, Abschlussbericht zu AP 6, September 2020, Seite 10, Bilder 2.4 und 2.5.
- 59 J. Fleisch, M. Weishaupt, WAK; G. Roth, S. Weisenburger, INE: HAWC-Entsorgung der WAK- eine mit der VEK zu lösende Aufgabe, Nachrichten - Forschungszentrum Karlsruhe, 38, 3/2006, Seite 176, Tabelle 1.
- 60 NAGRA Technischer Bericht 22-05: Modellhaftes Inventar radioaktiver Materialien MIRAM-RBG, Beilage C-41 Sellafield Glass Molds.
- 61 H. Eberhard, J. Endres, S. Schneider, GRS: Untersuchung zur Rückführung radioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung, Abschlussbericht zu AP 6, September 2020, Seite 6 und Bilder 2.1.

# Endnoten

- 62 Gesellschaft für Nuklear Service GmbH: Produktdatenblatt CASTOR HAW28M, Essen, Deutschland 2023.  
Verfügbar unter: <https://www.gns.de/en/casks-containers-equipment/spent-fuel-hlw/vitrified-waste/>.
- 63 Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (SiAnf) in der Fassung der Bekanntmachung vom 03.03.2015 (BAnz AT 30.03.2015 B2), die zuletzt mit Bekanntmachung des BMUV vom 25.02.2022 (BAnz AT 15.03.2022 B3) geändert worden ist.
- 64 Sicherheitsanforderungen für Kernbrennstoffversorgungsanlagen vom April 1997 und Juni 2004, BMU RS III 3.
- 65 Format and Content of the Safety Analysis Report for Nuclear Power Plants  
IAEA Safety Standard Series No. SSG-61; Stand 2021.
- 66 Nuclear Energy Agency (IEA). Nuclear Energy Today, Second Edition. OECD, Paris 2012.
- 67 International Atomic Energy Agency (IAEA) Commissioning Guidelines for Nuclear Power Plants. Nuclear Energy Series No. NP-T-2.10. Vienna, 2016 (aktuell 2018). International Atomic Energy Agency (IAEA). Assessment of Defence in Depth for Nuclear Power Plants. Safety Reports Series No. 46 (Rev. 1). Vienna, 2005 (aktuell 2024).
- 68 Western European Nuclear Reactor Harmonisation Regulators Association (WENRA). Report Safety of new NPP designs.  
Study by Reactor Harmonization Working Group RHWG. March 2013.
- 69 Bundesministerium der Justiz Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036; 2021 I S. 5261), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 17. April 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 132) geändert worden ist.  
Gesetze im Internet: [https://www.gesetze-im-internet.de/strlsschv\\_2018/index.html](https://www.gesetze-im-internet.de/strlsschv_2018/index.html).
- 70 Nuclear Energy Agency (IEA), Nuclear Energy Today, Second Edition, OECD, Paris 2012;  
International Atomic Energy Agency (IAEA), Commissioning Guidelines for Nuclear Power Plants, Nuclear Energy Series No. NP-T-2.10, Vienna, 2016 (aktuell 2018) sowie International Atomic Energy Agency (IAEA), Assessment of Defence in Depth for Nuclear Power Plants, Safety Reports Series No. 46 (Rev. 1), Vienna, 2005 (aktuell 2024).
- 71 Für dieses rein betriebliche System nehmen wir hier aus sicherheitstechnischer Sicht keine weitere Bewertung vor, sodass sich eine ausführliche Beschreibung der Einrichtungen hierfür an dieser Stelle erübrigt.
- 72 Reaktorsicherheitskommission (RSK) RSK-Verständnis der Sicherheitsphilosophie. RSK-Stellungnahme 460.  
Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission am 29.08.2013. Veröffentlicht im Bundesanzeiger, Amtlicher Teil, am 05.12.2013, B4  
<https://www.rskonline.de/sites/default/files/reports/epanlagersk460hp05122013.pdf>.
- 73 A. Gandini: The Physics of Subcritical Multiplying Systems. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 39, 6, pp. 673-686
- 74 Sicherheitsanforderungen für Kernbrennstoffversorgungsanlagen vom April 1997 und Juni 2004, BMU RS III 3
- 75 Der Begriff „emergency conditions“ wird am ehesten mit Notfallsituation, Notfallbedingungen übersetzt. In Bezug auf die gegebene Definition dieser Ereignisse ist aus unserer Sicht der hier verwendete Begriff „Unerwartete Zustände“ treffender.
- 76 Die Vorgaben zur Entsorgung der nach der Beendigung des Betriebs der Anlage verbleibenden radioaktiven Reststoffe werden vom vorliegenden Gutachten dagegen nicht behandelt.
- 77 BVerfG, Beschl. v. 20. Dezember 1979, Az. 1 BvR 385/77, BVerfGE 53, 30 (55 f.).
- 78 BVerfG, Urt. v. 6. Dezember 2016, Az. 1 BvR 2821/11 u.a., BVerfGE 143, 246 (355 Rz. 307); Beschl. v. 20. Dezember 1979, Az. 1 BvR 385/77, BVerfGE 53, 30 (55 f.).
- 79 BVerfG, Beschl. v. 20. Dezember 1979, Az. 1 BvR 385/77, BVerfGE 53, 30 (580); vgl. auch BVerfG, Urt. v. 6. Dezember 2016, Az. 1 BvR 2821/11 u.a., BVerfGE 143, 246 (325 Rz. 319), wonach es sich bei der Kerntechnik um eine „Hochrisikotechnologie“ handele.
- 80 BVerfG, Beschl. v. 8. August 1978, Az. 2 BvL 8/77, BVerfGE 49, 89 (143).
- 81 Siehe zu diesem Aspekt im Zusammenhang mit Klimaschutzmaßnahmen BVerfG, Beschl. v. 24. März 2021, Az. 1 BvR 2656/18 u.a., BVerwGE 157, 30 (111 f. Rz. 146).
- 82 Sellner, in: Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner, AtG/PÜ, 2021, § 2 AtG Rz. 7.
- 83 BT-Drs. 18/11241, S. 230; Akbarian, in: Akbarian/Raetzke, StrlSchG, 2022, § 5 Rz. 22.
- 84 Sellner, in: Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner, AtG/PÜ, 2021, § 7 AtG Rz. 17.
- 85 Uran gilt nach § 2 Abs. 1 Satz 2 Halbsatz 2 AtG als angereichert, wenn es „die Isotope 235 oder 233 oder diese beiden Isotope in einer solchen Menge enthält, dass die Summe der Mengen dieser beiden Isotope größer ist als die Menge des Isotops 238 multipliziert mit dem in der Natur auftretenden Verhältnis des Isotops 235 zum Isotop 238“.
- 86 BT-Drs. III/759, S. 59; BVerwG, Urt. v. 4. Juli 1988, Az. 7 C 88.87, BVerwGE 80, 21 (25);  
Beschl. v. 5. August 1993, Az. 7 B 112/93, juris Rz. 6;  
John/Raetzke, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 2 AtG Rz. 7.
- 87 BT-Drs. III/759, S. 23 zur Erläuterung des Anwendungsbereichs von § 7 Abs. 1 Satz 1 AtG; s. auch Posser, in: Ehlers/Fehling/Pünder, Besonderes Verwaltungsrecht, 4. Aufl. 2020, § 52 Rz. 20.
- 88 BT-Drs. III/759, S. 23; BVerfG, Beschl. v. 8. August 1978, Az. 2 BvL 8/77, BVerfGE 49, 89 (128);  
Rosin, in: Büdenbender/Heintschel von Heinegg/Rosin, Energierecht I, 1999, Rz. 683.

# Endnoten

- 89 BVerfG, Beschl. v. 8. August 1978, Az. 2 BvL 8/77, BVerfGE 49, 89 (128).
- 90 *Raetzke/Vahlbruch*, in: Akbarian/Raetzke, StriSchG, 2022, § 10 Rz. 1, 7.
- 91 BVerwG, Urt. v. 4. Juli 1988, Az. 7 C 88.87, BVerwGE 80, 21 (23);  
Leidinger, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 9.
- 92 BT-Drs. III/759, S. 23.
- 93 BVerwG, Urt. v. 4. Juli 1988, Az. 7 C 88.87, BVerwGE 80, 21 (25).
- 94 BVerwG, Beschl. v. 5. August 1993, Az. 7 B 112/93, juris Rz. 4 f.
- 95 BT-Drs. III/759, S. 22.
- 96 BT-Drs. III/759, S. 25; BT, Stenographischer Bericht zur 147. Sitzung der 7. Wahlperiode, S. 10212 (A);  
BVerwG, Urt. v. 9. August 1994, Az. 7 C 44.93, BVerwGE 96, 258 (259);  
VGH Kassel, Urt. v. 1. November 1989, Az. 8 A 2902/88, juris Rz. 144;  
*Gierke/Paul*, in: Theobald/Kühling, Energierecht, § 9 AtG Rz. 5.
- 97 BT-Drs. III/759, S. 25; BT, Stenographischer Bericht zur 147. Sitzung der 7. Wahlperiode, S. 10212 (A);  
BVerwG, Urt. v. 9. August 1994, Az. 7 C 44.93, BVerwGE 96, 258 (259);  
VGH Kassel, Urt. v. 1. November 1989, Az. 8 A 2902/88, juris Rz. 144 f.;  
*Gierke/Paul*, in: Theobald/Kühling, Energierecht, § 9 AtG Rz. 5;  
*Rosin*, in: Büdenbender/Heintschel von Heinegg/Rosin, Energierecht I, 1999, Rz. 684.
- 98 BVerwG, Urt. v. 4. Juli 1988, Az. 7 C 88.87, BVerwGE 80, 21 (25).
- 99 BVerwG, Beschl. v. 5. August 1993, Az. 7 B 112/93, juris Rz. 5, 7.
- 100 BVerwG, Urt. v. 4. Juli 1988, Az. 7 C 88.87, BVerwGE 80, 21 (25).
- 101 Umweltministerium BW, 2. Teilbetriebsgenehmigung zur nuklearen Inbetriebnahme und zum Betrieb der Verglasungseinrichtung Karlsruhe (VEK) auf dem Gelände der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) vom 24. Februar 2009, S. 25, abrufbar unter [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/3\\_Umwelt/Kernenergie/Genehmigungsverfahren/WAK/2\\_Teilbetriebsgenehmigung\\_VEK\\_Februar\\_2009.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/3_Umwelt/Kernenergie/Genehmigungsverfahren/WAK/2_Teilbetriebsgenehmigung_VEK_Februar_2009.pdf)
- 102 *Leidinger*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 20;  
*Kühne*, DVBl 2003, 1361 (1362);  
*Passer*, in: Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner, AtG/PÜ, 2021, § 7 AtG Rz. 15.
- 103 BVerwG, Urt. v. 4. Juli 1988, Az. 7 C 88.87, BVerwGE 80, 21 (25),
- 104 BVerwG, Urt. v. 10. April 2008, Az. 7 C 39.07, BVerwGE 131, 129 (132 f. Rz. 11);  
Urt. v. 4. Juli 1988, Az. 7 C 88.87, BVerwGE 80, 21 (29);  
Urt. v. 19. Dezember 1985, Az. 7 C 65.82, BVerwGE 72, 300 (329);  
*Rosin*, in: Büdenbender/Heintschel von Heinegg/Rosin, Energierecht I, 1999, Rz. 705 ff.
- 105 BVerwG, Urt. v. 4. Juli 1988, Az. 7 C 88.87, BVerwGE 80, 21 (23);  
Urt. v. 19. Dezember 1985, Az. 7 C 65.82, BVerwGE 72, 300 (329);  
*Leidinger*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 10.
- 106 BVerwG, Urt. v. 4. Juli 1988, Az. 7 C 88.87, BVerwGE 80, 21 (26);  
Urt. v. 19. Dezember 1985, Az. 7 C 65.82, BVerwGE 72, 300 (329).
- 107 BVerwG, Urt. v. 4. Juli 1988, Az. 7 C 88.87, BVerwGE 80, 21 (23 f.);  
*Rosin*, in: Büdenbender/Heintschel von Heinegg/Rosin, Energierecht I, 1999, Rz. 704, 708.
- 108 BVerwG, Urt. v. 4. Juli 1988, Az. 7 C 88.87, BVerwGE 80, 21 (23 f.);  
*Rosin*, in: Büdenbender/Heintschel von Heinegg/Rosin, Energierecht I, 1999, Rz. 711;  
*Passer*, in: Ehlers/Fehling/Pünder, Besonderes Verwaltungsrecht, 4. Aufl. 2020, § 52 Rz. 21.
- 109 BVerwG, Urt. v. 4. Juli 1988, Az. 7 C 88.87, BVerwGE 80, 21 (25).
- 110 BVerwG, Urt. v. 4. Juli 1988, Az. 7 C 88.87, BVerwGE 80, 21 (23 ff.).
- 111 BT-Drs. 14/6890, S. 14, 16.
- 112 Abs. 1 Nr. 2 a.E. „Begriffsbestimmungen nach § 2 Abs. 4“, Anlage 1 zum AtG in der bis zum 31. Dezember 2021 geltenden Fassung.
- 113 *Leidinger*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 141.
- 114 BVerwG, Urt. v. 19. Dezember 1985, Az. 7 C 65.82, BVerwGE 72, 300 (315).
- 115 BVerfG, Beschl. v. 8. August 1978, Az. 2 BvL 8/77, BVerfGE 49, 89 (143);  
Beschl. v. 12. November 2008, Az. 1 BvR 2456/06, juris Rz. 25;  
BVerwG, Urt. v. 22. März 2012, Az. 7 C 1.11, BVerwGE 142, 159 (168);  
Urt. v. 19. Dezember 1985, Az. 7 C 65.82, BVerwGE 72, 300 (316);  
*Leidinger*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 158.

# Endnoten

- 116 BVerfG, Beschl. v. 8. August 1978, Az. 2 BvL 8/77, BVerfGE 49, 89 (136);  
*Leidinger*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 165;  
*Posser*, in: Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner, AtG/PÜ, 2021, § 7 AtG Rz. 46.
- 117 BVerfG, Beschl. v. 12. November 2008, Az. 1 BvR 2456/06, juris Rz. 25;  
*Leidinger*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 159;  
*Posser*, in: Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner, AtG/PÜ, 2021, § 7 AtG Rz. 49.
- 118 *Leidinger*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 176;  
*Rosin*, in: Büdenbender/Heintschel von Heinegg/Rosin, Energierecht I, 1999, Rz. 834.
- 119 *Leidinger*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 178.
- 120 *Leidinger*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 167 f., 175.
- 121 *Raetzke*, in: Akbarian/Raetzke, StrISchG, 2022, § 3 Rz. 16.
- 122 Z.B. die beschleunigergetriebene Neutronenquelle des National Scientific Center am Kharkiv Institute of Physics and Technology; vgl. dazu S. Kukhotskyi O. V. et al.: Licensing of the Neutron Source in Ukraine: Challenges and Solutions, ISSN 2073-6231, Ядерна та радіаційна безпека 4(84), 2019.
- 123 *Vorwerk*, in: Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner, AtG/PÜ, 2021, § 7 AtG Rz. 56 ff., 72 ff.;  
zu terroristischen Aktivitäten BVerwG, Urt. v. 10. April 2008, Az. 7 C 39.07, BVerwGE 131, 129 (133 ff. Rz. 16 f., 141 f. Rz. 26 f.).
- 124 BT-Drs. 19/27659, S. 16.
- 125 *Leidinger*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 199 f.
- 126 NEA, Exposé des Motifs of the Paris Convention, NEA/NLC/DOC(2020)1, S. 7 Fn. 4, abrufbar unter: [https://one.oecd.org/document/NEA/NLC/DOC\(2020\)1/en/pdf](https://one.oecd.org/document/NEA/NLC/DOC(2020)1/en/pdf);  
*Pelzer*, in: Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner, AtG/PÜ, 2021, Art. 1 PÜ Rz. 12.
- 127 *Leidinger*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 202;  
*Posser*, in: Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner, AtG/PÜ, 2021, § 7 AtG Rz. 55.
- 128 *Rosin*, in: Büdenbender/Heintschel von Heinegg/Rosin, Energierecht I, 1999, Rz. 685; *Leidinger*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 228.
- 129 *Posser*, in: Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner, AtG/PÜ, 2021, § 7 AtG Rz. 87.
- 130 BT-Drs. III/759, S. 19; BVerfG, Beschl. v. 8. August 1978, Az. 2 BvL 8/77, BVerwGE 49, 89 (145); *Posser*, in: Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner, AtG/PÜ, 2021, § 7 AtG Rz. 36.
- 131 *Leidinger*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 230; *Posser*, in: Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner, AtG/PÜ, 2021, § 7 AtG Rz. 37.
- 132 BT-Drs. III/759, S. 59.
- 133 *Leidinger*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 231.
- 134 BVerfG, Beschl. v. 8. August 1978, Az. 2 BvL 8/77, BVerwGE 49, 89 (146 f.).
- 135 BVerfG, Beschl. v. 8. August 1978, Az. 2 BvL 8/77, BVerwGE 49, 89 (146 f.);  
*Rosin*, in: Büdenbender/Heintschel von Heinegg/Rosin, Energierecht I, 1999, Rz. 961.
- 136 *Leidinger*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 6 AtG Rz. 6 f.;  
*Rosin*, in: Büdenbender/Heintschel von Heinegg/Rosin, Energierecht I, 1999, Rz. 1216 ff.
- 137 BVerwG, Urt. v. 10. April 2008, Az. 7 C 39.07, BVerwGE 131, 129 (132 f. Rz. 11);  
*Rosin*, in: Büdenbender/Heintschel von Heinegg/Rosin, Energierecht I, 1999, Rz. 1244;  
*Posser*, in: Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner, AtG/PÜ, 2021, § 6 AtG Rz. 4.
- 138 BT-Drs. 14/6890, S. 23 f.; *John*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 9a AtG Rz. 25.
- 139 *Hennenhöfer*, in: Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner, AtG/PÜ, 2021, § 9a AtG Rz. 27.
- 140 *Raetzke*, in: Akbarian/Raetzke, StrISchG, 2022, § 3 Rz. 15, § 5 Rz. 2.
- 141 *Brandmair*, in: Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner, AtG/PÜ, 2021, § 10a AtG Rz. 3.
- 142 BVerwG, Urt. v. 11. Mai 1989, Az. 4 C 1/88, BVerwGE 82, 61 (67 f.);  
*Leidinger*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 6 AtG Rz. 13, § 7 AtG Rz. 315;  
*Posser*, in: Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner, AtG/PÜ, 2021, § 7 AtG Rz. 40.
- 143 *Leidinger*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 8 AtG Rz. 4;  
*Posser*, in: Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner, AtG/PÜ, 2021, § 8 AtG Rz. 2.
- 144 *Leidinger*, in: Frenz, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 8 AtG Rz. 3;  
*Posser*, in: Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner, AtG/PÜ, 2021, § 8 AtG Rz. 3.
- 145 *Rosin*, in: Büdenbender/Heintschel von Heinegg/Rosin, Energierecht I, 1999, Rz. 969.
- 146 *Hennenhöfer*, in: Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner, AtG/PÜ, 2021, § 9a AtG Rz. 13;  
*Rosin*, in: Büdenbender/Heintschel von Heinegg/Rosin, Energierecht I, 1999, Rz. 970.

# Endnoten

- 147 OVG Münster, Urt. v. 30. Oktober 1996, Az. 21 D 2/98.AK, juris Rz. 75, 134; OVG Lüneburg, Beschl. v. 17. Oktober 1977, Az. VII B 22/77, juris Rz. 124; *Hennenhöfer*, in: *Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner*, AtG/PÜ, 2021, § 9a AtG Rz. 4.
- 148 *Hennenhöfer*, in: *Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner*, AtG/PÜ, 2021, § 9a AtG Rz. 14; *Rosin*, in: *Büdenbender/Heintschel von Heinegg/Rosin*, Energierecht I, 1999, Rz. 972.
- 149 *Rosin*, in: *Büdenbender/Heintschel von Heinegg/Rosin*, Energierecht I, 1999, Rz. 972; *Rengeling*, DVBl 1997, 268 (270).
- 150 BMU, Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm), August 2015, abrufbar unter [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Nukleare\\_Sicherheit/nationales\\_entsorgungsprogramm\\_aug\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nukleare_Sicherheit/nationales_entsorgungsprogramm_aug_bf.pdf).
- 151 *Mann*, in: *Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner*, AtG/PÜ, 2021, § 2c AtG Rz. 4.
- 152 *Hennenhöfer*, in: *Hennenhöfer/Mann/Pelzer/Sellner*, AtG/PÜ, 2021, Einführung Rz. 165.
- 153 *Leidinger*, in: *Frenz*, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 246.
- 154 RS-Handbuch 3-73, S. 27; ähnlich *Leidinger*, in: *Frenz*, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 259.
- 155 Auch der VGH München, Urt. v. 20. Dezember 2018, Az. 22 A 17.40004, juris Rz. 83, nennt die „grüne Wiese“ nur als „weitestgehenden Fall“ des Abbaus.
- 156 *Leidinger*, in: *Frenz*, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 252.
- 157 Ähnlich *Leidinger*, in: *Frenz*, Atomrecht, 2. Aufl. 2024, § 7 AtG Rz. 252.
- 158 BT-Drs. 20/4558, S. 11.
- 159 RS-Handbuch 3-73, S. 16.
- 160 RS-Handbuch 3-73, S. 20, 23.
- 161 RS-Handbuch 3-73, S. 20 ff.
- 162 RS-Handbuch 3-73, S. 14, 20.
- 163 Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 1. SAG für das KKW Neckarwestheim Block 1 v. 3. Februar 2017, S. 9; 1. SAG für das KKW Philippsburg Block 1 v. 7. April 2017, S. 11, 147.
- 164 RS-Handbuch 3-73, S. 16.
- 165 BT-Drs. 18/10469, S. 38; ähnlich RS-Handbuch 3-73, S. 27: „Demontage“.
- 166 RS-Handbuch 3-73, S. 4.
- 167 BT-Drs. 19/30487, S. 7.
- 168 BT-Drs. 19/30487, S. 7.
- 169 Bayerische Staatsregierung. (2023). Bayerisches Förderprogramm für Elektrolyseure: Richtlinien veröffentlicht. Zugriff 30.09.2024 unter <https://www.bayern.de/bayerisches-förderprogramm-fr-elektrolyseure-richtlinien-veröffentlicht/>
- 170 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2023). Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie: NWS 2023. Zugriff 30.09.2024 unter [https://www.bmwf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmwf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1), S. 9.
- 171 Department of Infrastructure, Regional Development and Cities. (2017). Road Construction Cost and Infrastructure Procurement Benchmarking: 2017 update. Zugriff 22.10.2024 unter <https://www.bitre.gov.au/sites/default/files/rr148.pdf>. Elektro-Wandelt. (n.d.). Was kostet eine Elektroinstallation im Neubau? Zugriff 22.10.2024 unter <https://www.elektro-wandelt.de/ratgeber/kosten-elektroinstallation-neubau/>. Kühne, A.S. (2024). So teuer ist der Ausbau des Bahnnetzes. Frankfurter Allgemeine Zeitung. Zugriff 22.10.2024 unter <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/so-teuer-ist-der-ausbau-des-bahnnetzes-19541726.html>. Landsdorfer, K. (2023). Was kostet es, eine Wasserleitung zu verlegen? Listando. Zugriff 22.10.2024 unter <https://www.listando.de/p/was-kostet-es-eine-wasserleitung-zu-verlegen/>.
- 172 Damodaran, A. (2024). Margins by Sector (US). Zugriff 23.09.2024 unter [https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New\\_Home\\_Page/datafile/margin.html](https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/margin.html).
- 173 World Bank Group. (n.d.). Inflation, consumer prices (annual %). Zugriff 24.09.2024 unter <https://data.worldbank.org/indicator/FP.CPI.TOTL.ZG>.
- 174 Market Research Intellect. (2024). Global Strontium-90 Market. Zugriff 13.11.2024 unter <https://www.linkedin.com/pulse/global-strontium-90-market-size-overview-growth-sgsbf/>.
- 175 Energy-Charts. (2024). Jährliche Börsenstrompreise in Deutschland. Zugriff 26.09.2024 unter [https://energy-charts.info/charts/price\\_average/chart.html?l=de&c=DE&year=2024&interval=year](https://energy-charts.info/charts/price_average/chart.html?l=de&c=DE&year=2024&interval=year).
- 176 The Economic Modeling Working Group. (2007). Cost estimating guidelines for generation IV nuclear energy systems (Revision 4.2). Zugriff 26.09.2024 unter [https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/emwg\\_guidelines.pdf](https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/emwg_guidelines.pdf). S. 80.
- 177 PwC. (n.d.). WACC over the last 12 months. Zugriff 11.10.2024 unter <https://evaluationdata.pwc.de/en/utilities/>.
- 178 Bundesamt für Energie. (n.d.). WACC – Kalkulatorischer Zinssatz gemäß Art. 13 Abs. 3 Bst. b der Stromversorgungsverordnung (StromVV). Zugriff 11.10.2024 unter <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/stromversorgung/stromversorgungsgesetz-stromvg/wacc.html>.

# Endnoten

- 179 Cameco. (n.d.). Uranium Price. Zugriff 26.09.2024 unter <https://www.cameco.com/invest/markets/uranium-price>.
- 180 Johnson Matthey Plc. (2024). PGM prices and trading. Zugriff 26.09.2024 unter <https://matthey.com/products-and-markets/pgms-and-circularity/pgm-management>.
- 181 Stadtwerke Landshut. (2023). NetzWerk: Das Kundenmagazin der Stadtwerke Landshut, (41). Zugriff 30.09.2024 unter <https://www.stadtwerke-landshut.de/wp-content/uploads/NetzWerk-Ausgabe-41.pdf>. Stadt Landshut. (2024). Spatenstich für neue Energiezentrale. Zugriff 30.09.2024 unter <https://landshut.de/news/bauenentwicklung/spatenstich-fuer-neue-energiezentrale>.
- 182 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2020). Die Nationale Wasserstoffstrategie. Zugriff 14.10.2024 unter [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=11](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=11). S. 5.
- 183 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2023). Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie: NWS 2023. Zugriff 30.09.2024 unter [https://www.bmfi.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmfi.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1). S. 6.
- 184 Energy Brainpool. (2024). PPA-Preismonitor. Zugriff 01.10.2024 unter [https://www.energybrainpool.com/sites/default/files/2023-05/ppa\\_preismonitor\\_basic-energy\\_brainpool.pdf](https://www.energybrainpool.com/sites/default/files/2023-05/ppa_preismonitor_basic-energy_brainpool.pdf). S. 1.
- 185 Kost, C., Müller, P., Sepúlveda Schweiger, J., Fluri, V., Thomsen, J. (2024). Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Zugriff 12.10.2024 unter [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2024\\_ISE\\_Studie\\_Stromgestehungskosten\\_Erneuerbare\\_Energien.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2024_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf). S. 3.
- 186 McKinsey & Company. (2023). Energiewende-Index von McKinsey: Wie Deutschland zur Wasserstoffrepublik werden kann. Zugriff 12.10.2024 unter <https://www.mckinsey.de/news/presse/2023-09-05-energiewende-index-september-2023>.
- 187 Fraunhofer Academy. (2022). Windenergie und Wasserstoff immer zusammen denken!. Zugriff 01.10.2024 unter <https://blog.academy.fraunhofer.de/blogbeitraege/wasserstoff-aus-windenergie-nachhaltige-energieversorgung/>.
- 188 Pascal, T. (2023). Green Hydrogen current and projected production costs. Zugriff 22.10.2024 unter <https://www.structuresinsider.com/post/green-hydrogen-current-and-projected-production-costs#viewer-6p5gt>.
- Levene, J.I., Mann, M.K., Margolis, R., Milbrandt, A. (2005). An Analysis of Hydrogen Production from Renewable Electricity Sources. Zugriff 22.10.2024 unter <https://www.nrel.gov/docs/fy05osti/37612.pdf>. S. 5.
- 189 PwC. (n.d.). WACC over the last 12 months. Zugriff 11.10.2024 unter <https://evaluationdata.pwc.de/en/utilities/>.
- 190 Entspricht der verbleibenden Energiemenge nach Abzug des elektr. Eigenbedarfs.
- 191 Entspricht der verbleibenden Energiemenge nach Bedienung der Fernwärmenachfrage und Abzug des elektr. Eigenbedarfs.
- 192 Warth & Klein Grant Thornton AG. (2015). Gutachtliche Stellungnahme zur Bewertung der Rückstellungen im Kernenergiebereich. Zugriff 05.11.2024 unter [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/stresstestkernenergie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/stresstestkernenergie.pdf?__blob=publicationFile&v=1). S. 7.
- 193 Warth & Klein Grant Thornton AG. (2015). Gutachtliche Stellungnahme zur Bewertung der Rückstellungen im Kernenergiebereich. Zugriff 05.11.2024 unter [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/stresstestkernenergie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/stresstestkernenergie.pdf?__blob=publicationFile&v=1). Anlage 1.
- 194 Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung. (2024). Hochradioaktive Abfälle in Deutschland. Zwischenlagerung und Entstehung. Zugriff 05.11.2024 unter [https://www.base.bund.de/karte-zwischenlagerung/index.html#](https://www.base.bund.de/karte-zwischenlagerung/index.html#/).
- 195 Aktuelle Marktpreisinformationen durch Eckert & Ziegler Radiopharma GmbH auf E-Mail-Anfrage, Stand: 17.09.2024.
- 196 Aktuelle Marktpreisinformationen durch isoSolutions Inc. auf E-Mail-Anfrage, Stand: 16.10.2024.
- 197 Aktuelle Marktpreisinformationen durch Eckert & Ziegler Radiopharma GmbH auf E-Mail-Anfrage, Stand: 17.09.2024.
- 198 Aktuelle Marktpreisinformationen durch Eckert & Ziegler Nuclitec GmbH auf E-Mail-Anfrage, Stand: 17.10.2024.
- 199 Da der Markt für Strontium 90 zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Anlage voraussichtlich noch nicht ausreichend groß ist, wird nur ein Bruchteil des theoretisch möglichen Erlöses (knapp 1,5 Mrd. €) im positiven (negativen) Szenario herangezogen.
- 200 Business Insider. (n.d.). [Uranium price index]. Zugriff 16.08.2024 unter <https://markets.businessinsider.com/commodities/uranium-price>
- 201 Umicore. (n.d.-a). [Rhodium price index]. Zugriff 10.09.2024 unter <https://pmm.umicore.com/en/prices/rhodium/>
- 202 Umicore. (n.d.-b). [Ruthenium price index]. Zugriff 20.08.2024 unter <https://pmm.umicore.com/en/prices/ruthenium/>
- 203 Aktuelle Marktpreisinformationen durch Buylsotope auf E-Mail-Anfrage, Stand: 02.11.2024.

