International Journal for Nuclear Power

atw

Sonderausgabe

November 2026



Transmutation ohne Wiederaufarbeitung: Das sächsische Leuchtturmprojekt NuCycle als Weg aus dem Endlager-Dilemma

nucmag.com

Technische Universität Dresden



Neue Perspektiven für hochradioaktive Stoffe

Aus Verantwortung wird Zukunft. Aus Entsorgung wird Ressource.

An der TU Dresden wird an Lösungen gearbeitet, die hochradioaktive Stoffe nicht nur verwahren, sondern künftig nutzbar machen könnten – sicher, wissenschaftlich fundiert und mit Blick auf Energie, Klima und industrielle Wertschöpfung.

Weniger Endlagerbedarf

Mit Einspar-potenzialen von bis zu 50 Mrd. €.

Neue klimaneutrale Energieperspektiven

Das energetische Potenzial entspricht einem Vielfachen des heutigen Stromverbrauchs in Deutschland.

Technologie aus Sachsen

Mit internationalen Chancen für industrielle Anwendungen und Export.

Nutzung statt Aufgabe

Hochradioaktive Stoffe weiternutzen, ohne klassische Wiederaufarbeitung.

Kompetenz vor Ort

Dresden vereint Forschung, Infrastruktur und kerntechnisches Know-how.

TU Dresden – Forschung mit Relevanz für Energie, Umwelt und industrielle Zukunft.

Mehr erfahren:
tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifvu/wket

Transmutation ohne Wiederaufarbeitung: Das sächsische Leuchtturmprojekt NuCycle als Weg aus dem Endlager-Dilemma

› Carsten Lange, Elisa Naumann, Marco Viebach, Elfriede Derrer-Merk, Bruno Merk

1 Einleitung: Das Endlager-Dilemma und die sächsische Initiative

Der Umgang mit hochradioaktiven Abfällen zählt weltweit zu den zentralen gesellschaftlichen, politischen und technologischen Herausforderungen der Gegenwart [1]. In Deutschland liegt dieser Abfall, nach dem Ausstieg aus der kommerziellen Kernenergienutzung, als wärmeentwickelnder Reststoff in Form abgebrannter Brennelemente (**Spent Nuclear Fuel**, SNF) im Umfang von etwa 10.500 Tonnen Schwermetall sowie als Glaskokillen mit den Reststoffen aus der Wiederaufarbeitung von rund 7.000 Tonnen Brennstoff zurzeit in befristet genehmigten Zwischenlagern [1,2,3]. Die derzeitige Entsorgungsstrategie nach dem Standortauswahlgesetz (StandAG) [4] sieht die direkte, tiefengeologische Endlagerung als Referenzszenario vor, mit dem Ziel einer über eine Million Jahre sicheren Isolierung der Reststoffe von der Biosphäre. Flankierend verpflichtet die Richtlinie 2011/70/EURATOM die Mitgliedstaaten, ihre nationalen Entsorgungsprogramme regelmäßig an den wissenschaftlichen und technischen Fortschritt anzupassen (Art. 11 Abs. 2) [5]; im Zuge dessen empfahl auch die Endlagerkommission, Entwicklungen zu alternativen Entsorgungsoptionen regelmäßig zu prüfen und mit der tiefengeologischen Endlagerung zu vergleichen (Kap. 3.3.2) [6].

Die praktische Umsetzung der „Endlagersuche" hat sich jedoch als „teure Jahrhundertaufgabe" erwiesen, die auf komplexe verfahrenstechnische und gesellschaftliche Hürden stößt [7]. Das „Endlager-Dilemma" resultiert aus der juristischen Forderung nach einem Standort mit der „bestmöglichen Sicherheit" [3,4]; Prognosen sehen inzwischen, selbst bei idealem Verlauf, frühestens im Jahr 2074 einen Abschluss des Auswahlverfahrens [8]. Damit wird die Herausforderung ‚Endlager' ungelöst an nachfolgende Generationen weitergereicht [3]. Begleitet wird diese zeitliche Dimension durch den absehbaren gesellschaftlichen Widerstand (NIMBY-Phänomen), volkswirtschaftliche Kosten in Höhe von mindestens 50 Mrd. € ohne Aussicht auf einen Return-on-Investment sowie einen schleichenden Verlust an kerntechnischem Know-how in Deutschland [2,7]. Ziel moderner, technologieoffener Ansätze ist es daher, wissenschaftlich fundierte Strategien zu entwickeln, um das Endlager nach StandAG zu vermeiden [7]. Dieses Herangehen steht für einen Paradigmenwechsel in eine moderne Kreislaufwirtschaft, weg von der Deponierung von Reststoffen, hin zu deren Wiederverwendung als Wertstoff.

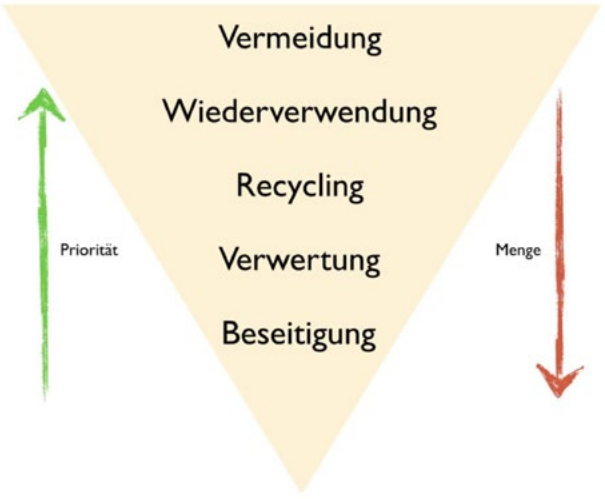


Abbildung 1
Schematische Darstellung der Abfallhierarchie [9].

Aus der Perspektive einer modernen Kreislaufwirtschaft sowie der UN-Nachhaltigkeitsziele (UN SDG 7: *Bezahlbare und saubere Energie* und SDG 12: *Nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster*) steht die

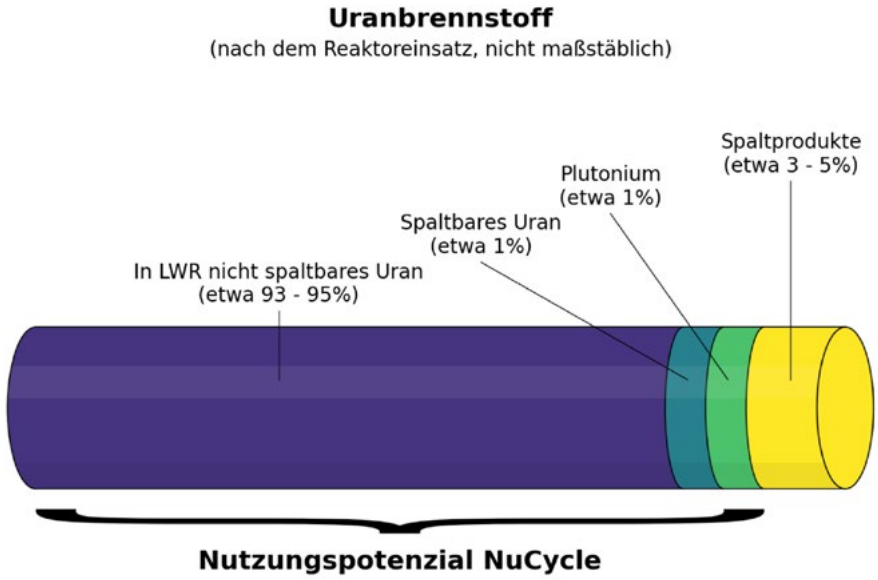


Abbildung 2
Zusammensetzung von SNF nach dem Einsatz in einem Leichtwasserreaktor (adaptiert von [12]).

direkte Endlagerung nach StandAG – übertragen auf die Logik der Abfallhierarchie – im Widerspruch zum Verwertungsvorrang (siehe **Abbildung 1**) wie er in Deutschland im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) verankert ist. Abgebrannter Kernbrennstoff besteht zu etwa 95 % aus ungenutztem Uran-238 sowie zu ca. 1 % aus Plutonium und höheren Transuranen (siehe **Abbildung 2**) [1,10] und ist somit ein Wertstoff, sobald ein System zur Nutzung von U-238 zur Verfügung steht, wie bereits im geschlossenen Brennstoffkreislauf demonstriert [11]. Bei vollständiger energetischer Umsetzung entspricht das Endlagerinventar einem theoretischen sekundären Energiepotenzial, das den gesamten deutschen Strombedarf bei heutigem Verbrauch für rund 300 Jahre decken könnte [7]. Eine unwiederbringliche Endlagerung bedeutet daher einen Verlust an wertvollen Ressourcen und widerspricht damit der Logik einer nachhaltigen Ressourcennutzung.

Vor diesem Hintergrund hat der Freistaat Sachsen proaktiv die Initiative ergriffen und an der Technischen Universität Dresden eine Machbarkeitsstudie für einen Experimentalrecyclingreaktor *(NuCycle – Closing the **Nu**clear Fuel **Cycle**)* zur Auswahl eines Technologietransferprojektes zur Transmutation und der nachfolgenden Vorbereitung eines sächsischen Demonstrationsvorhabens beauftragt. Die Auswahl der TU Dresden fiel dabei schließlich auf iMAGINE und damit auf das Konzept der Transmutation ohne Wiederaufarbeitung [7], das im verfolgten Ansatz im Rahmen des derzeitigen Atomgesetzes durchführbar ist. Das übergeordnete Ziel des geplanten Demonstrationsvorhabens ist es, eine technologische Lösung zur Vermeidung des Endlagerstandards nach StandAG zu demonstrieren. Grundlage ist eine bessere Sortierung der Reststoffe einerseits zugunsten eines Lagers für wärmeentwickelnde Spaltprodukte (500 bis 1.000 Jahre) und andererseits der Nutzung des Endlagers für lediglich schwach- und mittelradioaktive Abfälle für langlebige Spaltprodukte.

NuCycle konzipiert ein initiales, **schrittweises** Entwicklungsprogramm in Form eines Leuchtturmprojektes, das als erster strukturgebender Schritt eines umfassenden, auf 20 bis 25 Jahre angelegten technologischen Gesamtprogramms fungiert. Im Zentrum stehen die konzeptionelle Auslegung, Genehmigung, Errichtung und erste Inbetriebnahme eines experimentellen Recycling-Reaktors (DEMO) auf Basis eines schnellen chloridbasierten Flüssigsalzreaktors (Molten Salt Fast Reactor, MSFR) [13] im Rahmen eines Technologietransferprojektes. Ziel ist, zeitnah eine Alternative zur Endlagerung gemäß StandAG zu testen und die Nachnutzung der Brennstoffe aus dem deutschen

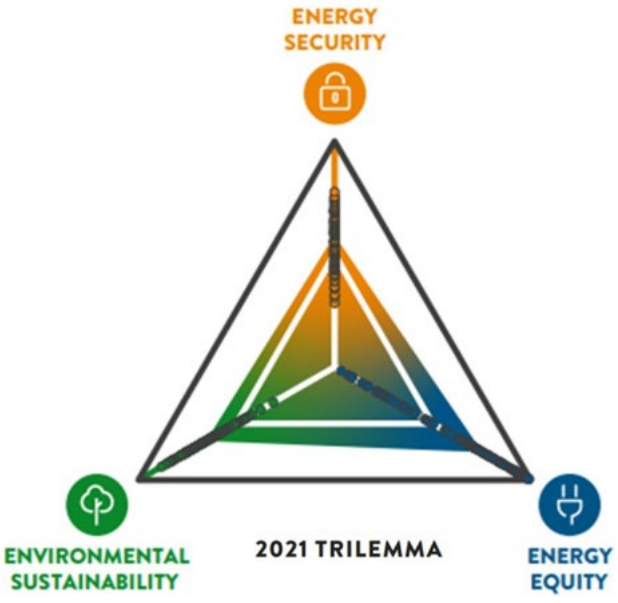


Abbildung 3
Das Energiedreieck – Energy Trilemma beschrieben durch den World Energy Council [14].

Leichtwasserreaktorbetrieb zu ermöglichen. Diese verbessert die Chancen auf Einhaltung der eu-rechtlich vorgegebenen Klimaneutralität bis 2050 unter Berücksichtigung des Energiedreiecks (Energy Trilemma, **Abbildung 3**). Für die Studie wurde als methodische Randbedingung die Prämisse eines hochambitionierten Entwicklungszeitraums von orientierungsweise 5 Jahren für die Umsetzung des Technologietransferprojektes zugrunde gelegt. Die Machbarkeitsstudie skizziert das Entwicklungsprogramm konsequent entlang dieser zeitlichen Vorgabe in Form eines übergeordneten Grobkonzeptes, das als strukturgebender Anfangspunkt dient.

2 Drei Pfade des Brennstoffkreislaufs im Vergleich

Die Optionen des nuklearen Brennstoffkreislaufs lassen sich in drei übergeordnete Pfade kategorisieren (siehe **Abbildung 4**), die sich hinsichtlich ihrer Ressourceneffizienz, des resultierenden Abfallaufkommens sowie ihrer Proliferationsresistenz grundlegend unterscheiden:

- **Pfad 1:** Der offene Brennstoffkreislauf (direkte Endlagerung / Status quo in Deutschland nach 2005, davor auch Wiederaufbereitung mit MOX-Nutzung in LWR)
- **Pfad 2:** Geschlossener Brennstoffkreislauf mit klassischer Partitionierung und Transmutation (P&T) (mit externer Wiederaufarbeitung und Multi-Recycling)
- **Pfad 3:** Flüssigsalzbasierte In-situ-Transmutation (das iMAGINE-Konzept)

Pfad 1 (Offener Kreislauf/StandAG): Die direkte Endlagerung belässt enormes energetisches Potenzial des im SNF enthaltenen Urans (ca. 95 %) sowie der gebildeten langlebigen Transurane ungenutzt [12]. Die langanhaltende Wärmeentwicklung des SNF erzwingt eine weiträumige Einlagerung im Wirtsgestein und dadurch einen erhöhten Flächenbedarf des geologischen Tiefenlagers [15]. Ein weiteres Defizit ist das auf zukünftige Generationen verlagerte Proliferationsrisiko: Da die natürliche Schutzbarriere der abgebrannten Brennelemente („Spent Fuel Standard“) durch den radioaktiven Zerfall nach etwa 200 Jahren substanziell abnimmt, könnte ein Endlager langfristig faktisch zu einer „Plutonium-Mine“ werden [If the spent fuel is buried in a geological formation, it might be regarded as a potential “plutonium mine”, meaning that at some later point in time the buried plutonium could be mined and extracted.] [16]. Aufgrund der signifikanten, hochkonzentrierten Ressourcen im Endlager stellt sich zusätzlich die Frage: „Wird das kostspielig gesuchte und gebaute Endlager nicht schon nach ‚kurzer Zeit‘ bei der Suche nach konzentrierten Ressourcen wieder aufgebrochen werden?“

Pfad 2 (geschlossener Kreislauf mit klassischem P&T): Durch chemische Abtrennung (Partitionierung) und Verbrennung (Transmutation) langlebiger Transurane lässt sich das Volumen und die Wärmeleistung verringern und die Radioaktivität und insbesondere die Radiotoxizität verglichen mit Pfad 1 auf kürzere Zeiträume reduzieren, damit verringert sich der Flächenbedarf eines geologischen Tiefenlagers deutlich [15,17,18]. Allerdings ist weiterhin ein tiefengeologisches Endlager gemäß StandAG erforderlich – u. a. verursacht durch Transuranverluste bei der

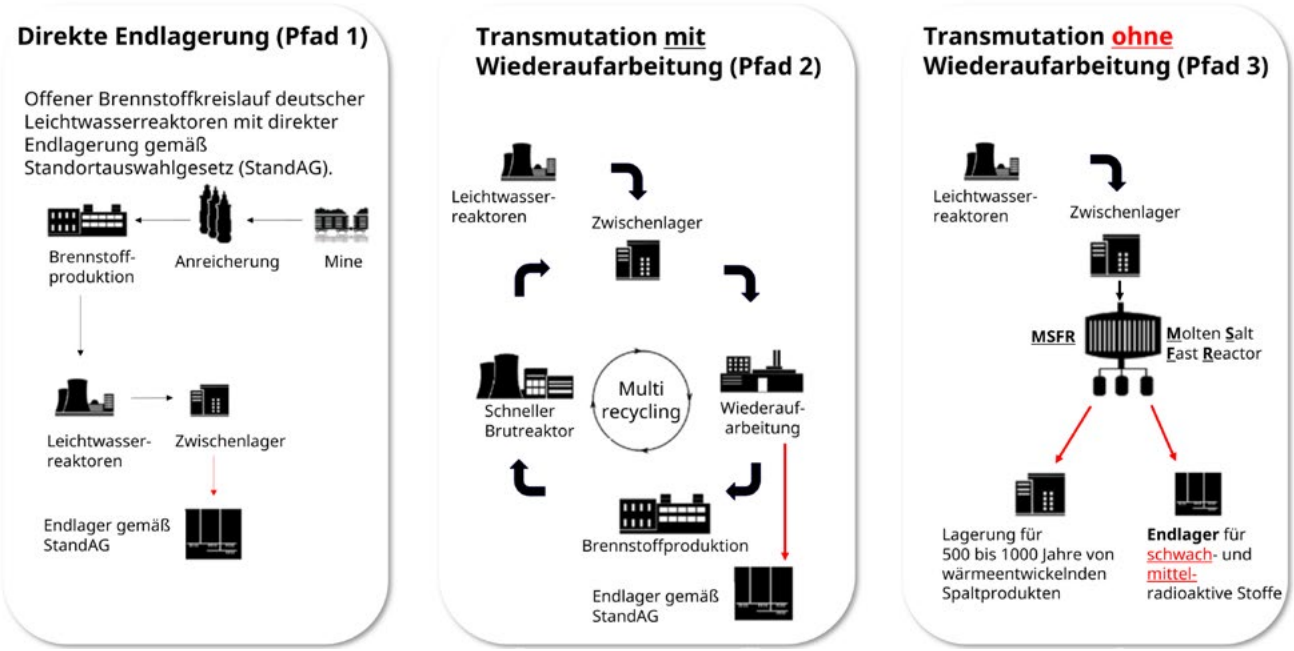


Abbildung 4
Schematische Darstellung der drei Pfade des nuklearen Brennstoffkreislaufs: Offener Kreislauf (Pfad 1), geschlossener Kreislauf mit klassischem P&T (Pfad 2) und In-situ Transmutation im Flüssigsalzreaktor (Pfad 3) [10].

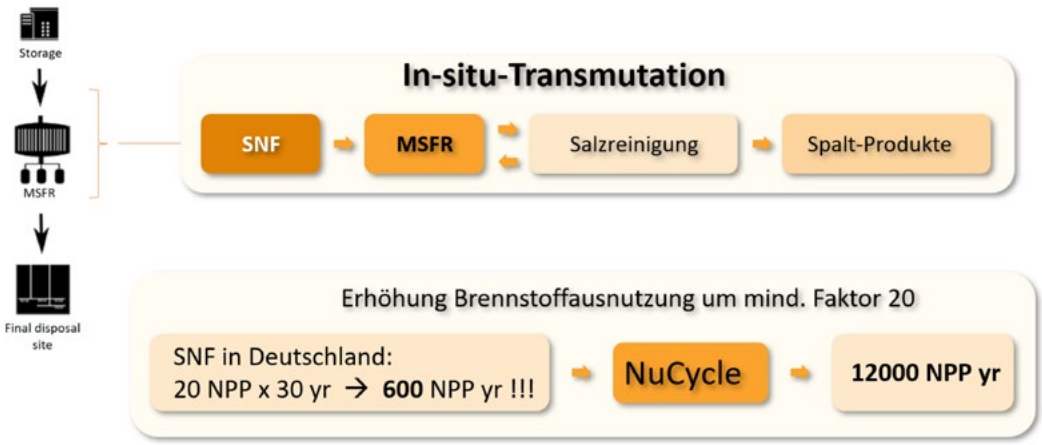


Abbildung 5
Das vorliegende Konzept der In-situ-Transmutation basiert auf der Nutzung, abgebrannter Brennelemente (SNF) als Brennstoff in einem schnellen Salzschmelzenreaktor (MSFR) und einer damit deutlich erhöhten Brennstoffnutzung. (adaptiert von [10]). Deutschland verfügt über ein SNF-Inventar, das einer Gesamtbetriebszeit von etwa 600 Reaktorjahren (NPP yr) entspricht (zur Verdeutlichung wurde stark vereinfacht: 20 Leichtwasserreaktoren mit je 30 Jahren Betriebszeit). Unter der Annahme, dass die In-situ-Transmutation technologisch realisiert werden kann, wäre auf Basis dieser Anlage mit dem deutschen SNF-Inventar eine Gesamtbetriebszeit von 12.000 Reaktorjahren möglich.

Mehrfachrezyklierung, signifikante Sekundärabfallströme sowie die Einlagerung langlebiger Spaltprodukte [1,2]. Zusätzlich erzeugt das Verfahren ein nicht zu vernachlässigendes Proliferationsrisiko durch die Separation reiner Aktiniden [19]. Hinzu kommen, trotz der in EUROPART & EUROTRANS [20, 21] und den Nachfolgeprojekten erbrachten Nachweise, die geringe Technologiereife (TRL 3–4) [22,23], der Bedarf eines Commitments über mindestens 100 Jahre [15], eine hohe Systemkomplexität verbunden mit hohen Kosten sowie die bislang nicht erfolgreiche Transmutation langlebiger Spaltprodukte [24]. Szenarioanalysen für Deutschland erwarten den ununterbrochenen Betrieb von 15 bis 25 kleinen Reaktoren über 147 bis 535 Jahre [25] oder den Betrieb von 3 großen Reaktoren für 45 Jahre mit anschließender Nachverbrennung für 10 bis 35 Jahre [26]. Versagt ein Entsorgungspfad trotz hoher technologischer Komplexität, hoher erwarteter Kosten und Ressourcenbindung in der Zielsetzung, die Endlagerung gemäß StandAG zu vermeiden, ist ein grundlegender Wechsel des Entsorgungsansatzes erforderlich [7].

Pfad 3 (Flüssigsalzbasierte In-situ-Transmutation/ iMAGINE): Als innovative Alternative zu klassischen P&T-Verfahren rücken flüssigbrennstoffbasierte Systeme, insbesondere schnelle Flüssigsalzreaktoren (MSFR), in den Fokus der internationalen Forschung [1,12,27]. Das iMAGINE-Konzept stellt einen Paradigmenwechsel dar: Brennstoff und Kühlmittel sind eins und liegen in flüssigem Zustand vor, SNF kann nach einer initialen chemischen Anpassung – der Konversion in eine chloridische Form – unmittelbar als Brennstoff genutzt werden. Damit kombiniert das Konzept den geschlossenen Brennstoffkreislauf und die Transmutation [10,27]. Die Flexibilität der Salzmatrix eröffnet prinzipiell auch die Möglichkeit, das in bestehenden Glaskokillen enthaltene Inventar aus der bisherigen Wiederaufarbeitung einzuspeisen und chemisch besser zu sortieren [28].

Die Kernidee des iMAGINE-Konzeptes – gleichzeitig die zwingende physikalische und verfahrenstechnische Anforderung – ist die Kombination aus selbsterhaltender Brutreaktion und vollständigem Einschluss aller Transurane: Sobald Aktinide in den MSFR-Kern eingebracht wurden, verbleiben diese zwingend im Kern gelöst (In-situ-Transmutation), bis sie vollständig gespalten sind [1,7]. Der Einsatz von Chloridsalzen (statt Fluoriden) ist hierbei erforderlich, um die für die selbsterhaltende Brutreaktion notwendige hohe Aktinidenbeladung im Kern sicherzustellen [7,12]. Um parasitäre Neutronenabsorptionen sowie die Bildung des mobilen, langlebigen Aktivierungsprodukts ^{36}Cl zu minimieren, wird ^{37}Cl-angereichertes Trägersalz verwendet [1,7]. Da der Brennstoff flüssig vorliegt, entfällt zudem die komplexe und radiologisch belastende Fabrikation von festem Brennstoff und Targets mit minoren Aktiniden, wie sie in Pfad 2 erforderlich ist [15,17].

Innovativer Brennstoffzyklus: Anstelle einer externen, großindustriellen Wiederaufarbeitung implementiert Pfad 3 das Verfahren des „Reverse Reprocessing“ [7,12]. In diesem Prozess werden nicht – wie beim klassischen PUREX-Verfahren – Spaltmaterialien, wie Plutonium, isoliert; stattdessen entfernt das Salzreinigungssystem primär nur jene Spaltprodukte, deren Akkumulation drei für den Reaktorbetrieb kritische Zustände herbeiführt: (1) Beeinträchtigung der Neutronenökonomie, was das Brüten neuen Brennstoffes erschwert, (2) Überschreitung chemischer Löslichkeitslimits in der Salzmatrix, was zu Ausfällungen und Instabilitäten führen könnte, (3) eine Überschreitung des zulässigen Quellterms in Störfallstudien [10,12]. Die Prozessführung erfolgt gestaffelt:

Flüchtige und gasförmige Spaltprodukte werden kontinuierlich in das Abgasbehandlungssystem abgeführt; lösliche Spaltprodukte werden erst dann aus einem Teilstrom extrahiert, wenn die Kritikalität des Reaktors gefährdet ist und die Konzentration eine effektive Abtrennung erlaubt [12,27]. Die verbleibende Salzschmelze, die das gesamte Inventar an Transuranen enthält, wird unmittelbar in den Reaktor zurückgeführt. Durch die Integration der Salzreinigung in den Reaktor wird der geschlossene nukleare Brennstoffkreislauf innerhalb einer einzigen Anlage umgesetzt (siehe **Abbildung 5**); sicherheitskritische Transporte von separierten Spaltstoffen werden vermieden [1,27]. Die hohe Aktivität und die chemische Komplexität der Schmelze sorgen für eine inhärente physikalische Barriere gegen Missbrauch von Spaltmaterialien, wodurch die Proliferationsresistenz systemimmanent maximiert wird [7,29].

Differenziertes Abfallkonzept: Im Mittelpunkt steht nicht mehr die Optimierung der Endlagerbedingungen, sondern die Vermeidung des tiefengeologischen Endlagers nach StandAG. Die verbleibenden wärmeentwickelnden Reststoffe (Spaltprodukte mit Halbwertszeiten bis ca. 30 Jahren) erfordern lediglich ein Abklinglager für einen Zeitraum von 300 bis 500 Jahren; die bedarfsgerecht abgetrennten, kaum wärmeentwickelnden langlebigen Spaltprodukte (z. B. ^{129}I, ^{79}Se) könnten perspektivisch in einem Endlager für schwach- und mittelaktive Reststoffe, wie Schacht Konrad, eingelagert werden [7,19].

Dualer Nutzen: Im Gegensatz zum klassischen P&T (Pfad 2), das primär eine kostenintensive Abfallbehandlungsmaßnahme darstellt, erschließt iMAGINE bereits vorhandene Ressourcen zur energetischen Nutzung, verbunden mit der Bereitstellung erheblicher Mengen an Prozesswärme oder Strom. Da der Reaktor im Zieldesign direkt mit SNF betrieben werden kann, entfallen im Flottenbetrieb – abgesehen vom Erstkern – die erheblichen finanziellen und ökologischen Vorlaufkosten für Uranbergbau und Anreicherung [7,19]. Das deutsche SNF-Inventar könnte damit für rund 300 Jahre den heutigen Strombedarf decken (Stromäquivalent von ca. 7,5 Bio. €) und als CO_2-freie Energieressource als Ersatz für den fossilen Kohlenstoffpool im Rahmen der EU-Klimaroadmap erschlossen werden [7].

Transparente Adressierung der Technologielücken (TRL-Analyse): Um den MSFR von einem theoretischen Konzept in eine genehmigungsfähige Technologie zu überführen, müssen folgende technologische und wissenschaftliche Herausforderungen bewältigt werden:

(1) die fehlende Betriebserfahrung mit schnellen, chloridbasierten Systemen und das Fehlen validierter, gekoppelter Multi-Physik-Simulationswerkzeuge [1,23];
(2) die Validierung der Nukleardaten für das spezifische Neutronenspektrum, insbesondere der Wirkungsquerschnitte von ^{35}Cl und ^{37}Cl [30,31];
(3) die Skalierung der Brennstofffertigung und der Isotopentrennung von Chlor;
(4) die Bereitstellung thermophysikalischer Stoffdaten und robuster In-situ-Sensorik;
(5) die Beherrschung der Materialkorrosion in Chloridsalzschmelzen [32] und die Kontrolle des Redox-Potenzials und der Salzkomposition;
(6) die Verfahrenstechnik der dynamischen Salzreinigung („Demand Driven Clean-up“) und der Abgasreinigung [12].

Diese sechs Hürden definieren den Handlungsrahmen für die im Folgenden dargelegte Entwicklungsstrategie zur Demonstration der Technologie.

3 Von NuCycle zu DEMO: Entwicklungsphasen und Umsetzung in Sachsen

Der (5+x)-Jahres-Horizont: von Einzeleffekt-experimenten zur Erstkritikalität von DEMO

Das primäre Ziel der ersten Projektphase ist die konzeptionelle Auslegung, Genehmigung, Errichtung und erste Inbetriebnahme eines experimentellen Recycling-Reaktors (DEMO) auf der Technologiegrundlage der *Transmutation ohne Wiederaufarbeitung* [7]. Das Leuchtturmprojekt markiert dabei ausschließlich die initiale Phase, bis zu einem Nullleistungsexperiment, eines ganzheitlichen, auf 20 bis 25 Jahre angelegten Entwicklungs- und Betriebsprogramms des DEMO-Reaktors [33,34]. Mit diesem ersten Schritt weist DEMO die prinzipielle Machbarkeit dieses Reaktorkonzepts zur stofflichen Verwertung nuklearer Reststoffe nach. Die Machbarkeitsstudie liefert damit den konzeptionellen Rahmen für die erste Umsetzungsphase des DEMO-Projekts.

Der Planungshorizont für das Technologietransferprojekt wird bewusst als **(5+x) Jahre** definiert: Die Zielgröße von fünf Jahren repräsentiert den auf Basis historischer Entwicklungsprojekte [35] aus rein wissenschaftlich-technischer Sicht minimal erforderlichen Entwicklungszeitraum unter der Prämisse einer hochgradig parallelisierten Projektabwicklung. Die Variable x repräsentiert die noch unbekannte Zeitdauer für unvorhersehbare Hürden sowie für die komplexen Aspekte des Genehmigungs- und Errichtungsprozesses, aber auch die Abhängigkeit von der Entwicklungsstrategie – wie viel IP soll selbst entwickelt werden, was soll zugekauft werden und von welchen Partnern? Diese Variable ist durch effiziente Prozesse stetig zu minimieren. Eine verlässliche Quantifizierung von x sowie die Ausarbeitung eines detaillierten Entwicklungsplans liegen außerhalb der Zielsetzung der Studie und obliegen den nachfolgenden Projektphasen.

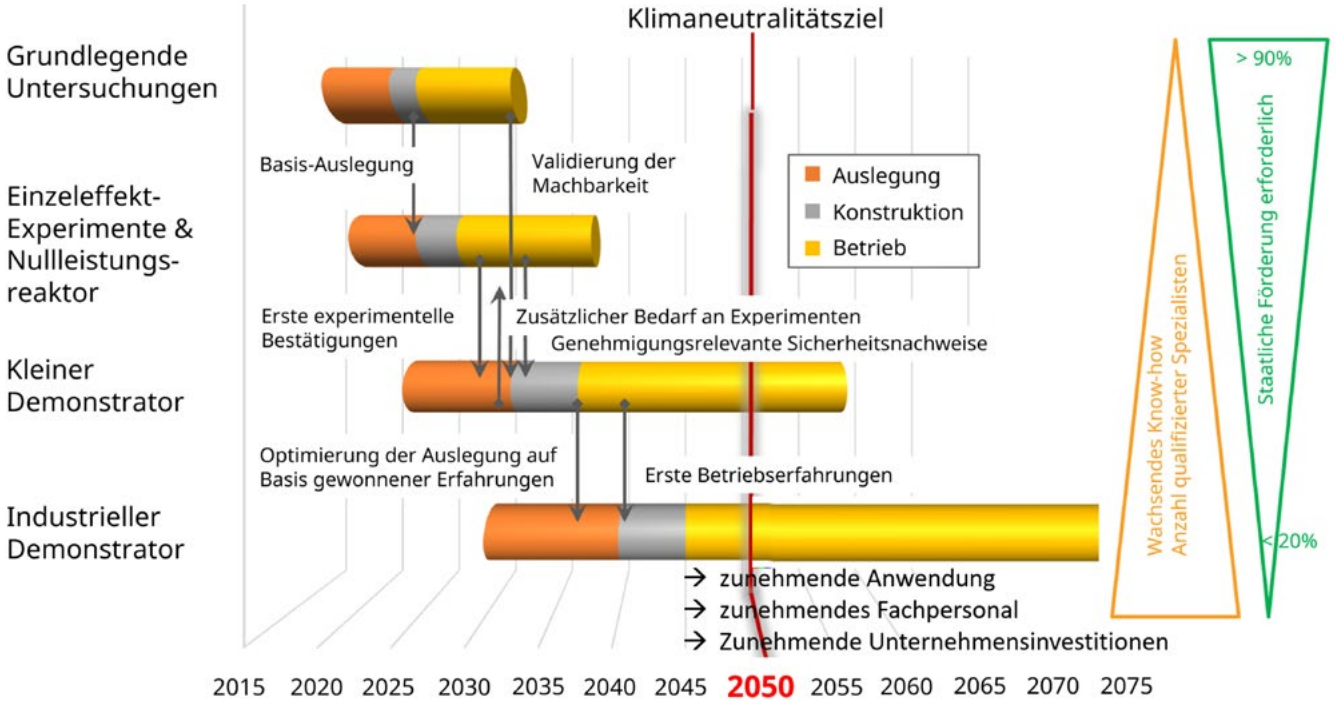


Abbildung 6
Phasen bei der Entwicklung neuer Reaktortechnologien in Anlehnung an [10].

Die Entwicklung orientiert sich an international etablierten Entwicklungs-Roadmaps [9,35] und Diskussionen mit Experten, die den Weg von der konzeptionellen Idee bis zur industriellen Reife in vier essenzielle, zeitlich überlappende Phasen unterteilen (siehe **Abbildung 6**): Grundlegende Untersuchungen, Einzeleffektexperimente & Nullleistungsreaktor, kleiner Demonstrator (experimenteller Reaktor) und industrieller Demonstrator. Die geplanten Arbeiten umfassen wesentliche Schritte der Entwicklungsphasen zwei und drei und gipfeln in der Inbetriebnahme des experimentellen Recyclingreaktors DEMO mit der ersten Kritikalität und dem darauffolgenden Nullleistungsbetrieb. Für diese erste Umsetzungsphase wird ein öffentlicher Investitionsbedarf von rund 1,95 Mrd. € über den (5+x)-Jahres-Horizont veranschlagt.

Zur systematischen Minimierung technologischer sowie regulatorischer Risiken adressiert das Leuchtturmprojekt zwei komplementäre kerntechnische Anlagen [12]:

- **Schneller Nullleistungsreaktor (ZPR):** Es wird eine kritische Anordnung realisiert, die bei Raumtemperatur und nahezu ohne nukleare Wärmefreisetzung betrieben wird [36]. Diese Anlage ermöglicht die hochpräzise Bestimmung nuklearer Basisdaten und sicherheitsrelevanter Parameter (kritische Masse, Neutronenflussverteilung in Raum und Energie, Reaktivitätskoeffizienten, kinetische Parameter im schnellen Neutronenspektrum). Die hierbei gewonnenen Daten sind erforderlich, um die reaktorphysikalischen Simulationscodes für das Design und das Genehmigungsverfahren von DEMO zu validieren [30] und um das Design selbst zu optimieren.
- **Experimenteller Recycling-Reaktor (DEMO):** Parallel zum ZPR erfolgt die Errichtung des eigentlichen flüssigsalzbasierten Technologiedemonstrators. DEMO durchläuft einen gestuften Lebenszyklus, der eine Gesamtbetriebszeit von mindestens 20 Jahren vorsieht und sich in vier sukzessive Phasen gliedert [10,33,34]:

a. **Phase 1 (Konzeption, Genehmigung, Errichtung und Nullleistungsbetrieb, Jahre 1–(5+x)):** Konzeptionelle Auslegung, Bau, Genehmigung und Erreichen der ersten Kritikalität im Rahmen eines Nullleistungsexperiments mit flüssigem Salz, gefolgt von erforderlichen Nullleistungsexperimenten zur Vorbereitung von Phase 2.
b. **Phase 2 (Jahre (6+x)–(8+x)):** Niedrigleistungsbetrieb bei 1 MW_{th} zur initialen Validierung der Anlagendynamik, der Thermohydraulik, der Reaktorkontrolle und der notwendigen Sicherheitsnachweise für die folgenden Schritte.
c. **Phase 3 (Jahre (9+x)–(11+x)):** Mittelleistungsbetrieb bei 10 MW_{th} zur Erprobung der thermischen Rückkopplungseffekte, zum Test und zur Skalierung der Wärmeabfuhr und der Leistungskontrolle.
d. **Phase 4 (Jahre (12+x)–(25+x)):** Volllastbetrieb bei 50 MW_{th} zur Demonstration des Leistungsbetriebs, zur Erlangung von Langzeitbetriebserfahrung mit dem neuartigen Brennstoff und zur Erzielung eines relevanten Abbrandes für Entwicklung und Test der aktiven In-situ-Salzreinigung.

Administrativ wird dieser parallele und phasenbasierte Entwicklungspfad durch einen gestuften Genehmigungsansatz (Graded Approach) nach IAEA-Leitlinien flankiert [13]: Die spezifischen Sicherheitsanforderungen werden proportional zum realen Gefährdungspotenzial der jeweiligen Betriebsphase skaliert. Ziel muss es sein, die Aufsichtsbehörden kontinuierlich in den iterativen und rechtskonformen Bewertungsprozess einzubinden.

Systemparameter	Spezifikation
Maximale thermische Leistung ($P_{th,max}$)	50 MW
Geplante Gesamtlaufzeit	20 Jahre
Gestaffeltes Betriebsprofil	3 Jahre bei 1 MW; 3 Jahre bei 10 MW; 14 Jahre ei 50 MW
Maximale Uran-Anreicherung	19,9 % ^{235}U
Trägersalz-System (eutektisch)	NaCl-UCl_3-UCl_4
Molare Zusammensetzung des Brennstoffsalzes	42,5 % – 17,0 % – 40,5 %
Isotopenreinheit des Chlors (^{37}Cl)	99 %

Tabelle 1
Wesentliche Auslegungsparameter des DEMO-Referenzreaktors.

Grundlage des Entwicklungsprogrammes sind die ersten in **Tabelle 1** aufgeführten Auslegungsparameter des DEMO-Referenzreaktors [33,34].

Die Begrenzung der Uran-Anreicherung auf maximal 19,9 % ^{235}U stellt sicher, dass der frische Kernbrennstoff als HALEU klassifiziert wird und somit die Anlage gemäß den Vorgaben der IAEA zur physischen Sicherung [37] in die Sicherungskategorie II fällt. In Verbindung mit dem inhärenten physikalischen Selbstschutz des im DEMO-Reaktor bestrahlten Kernbrennstoffs verbleibt das Gesamtsystem über den gesamten Lebenszyklus hinweg in dieser Kategorie; die erforderlichen baulichen, physikalischen und organisatorischen Schutzmaßnahmen sollen damit auf ein praktisch umsetzbares und ökonomisch vertretbares Maß beschränkt bleiben.

Prägnante Synthese der fünf integrierten Entwicklungsschwerpunkte (ESP)

Die Überführung der Entwicklungsstrategie in eine funktionale, hoch effiziente Projektstruktur erfordert eine grundlegende Abkehr von rein sequenziellen Entwicklungsansätzen. Dies resultiert aus der physikalischen und technologischen Natur flüssigsalzbasierter Reaktoren, die sich durch eine inhärente, nichtlineare und raum-zeitlich gekoppelte Dynamik zwischen Reaktorphysik, Wärmeabfuhr und chemischen Prozessen auszeichnen. Da weder Betriebserfahrungen mit chlorsalzbasierten Reaktorsystemen noch mit schnellen Salzschmelzenreaktoren vorliegen, ist ein paralleler Start aller Entwicklungsschwerpunkte unmittelbar zu Projektbeginn unabdingbar für eine effiziente Demonstration. Zur strukturellen Abbildung der gekoppelten Forschungsfelder wird die Implementierung einer vernetzten Matrixorganisation vorgeschlagen. Dadurch wird ein synchronisierter

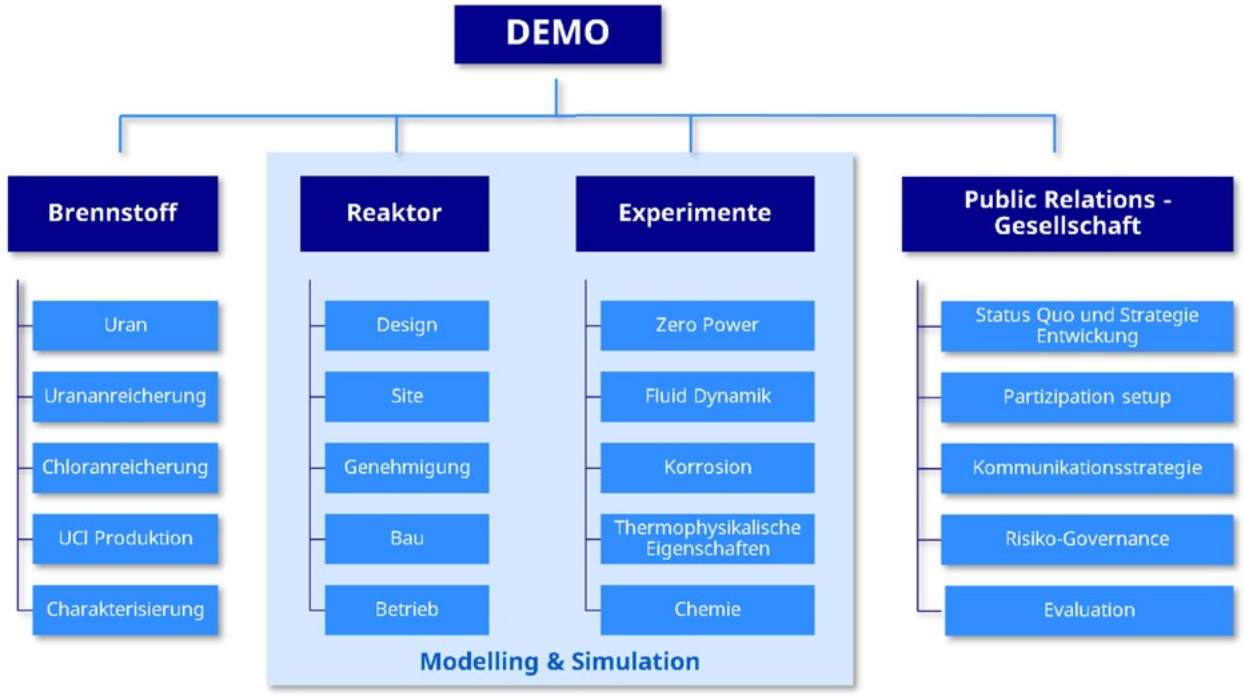


Abbildung 7
Organigramm der Entwicklungsschwerpunkte (ESP) für das Vorhaben.

Entwicklungspfad aller beteiligten Akteure ermöglicht, der in einem zukünftigen Projektplan abgebildet werden muss: Während die Technologie schrittweise zur Anwendungsreife geführt wird, werden die relevanten institutionellen Strukturen entwickelt – von der Wissenschaft über die ausführenden Organe, den regulatorischen Rahmen und die Gutachterinstitutionen bis hin zur Zivilgesellschaft – parallel mit dem technologischen Fortschritt [7,38]. Die notwendige gesellschaftliche Akzeptanz und regulatorische Belastbarkeit müssen durch eine frühzeitige und kontinuierliche Einbindung von Wissenschaft, Genehmigungsbehörden und Öffentlichkeit gewährleistet werden [39].

1. **ESP 1 (Brennstoff):** Prozesstechnische Synthese und Bereitstellung des Kernbrennstoffs (42,5 % NaCl – 17,0 % UCl_3 – 40,5 % UCl_4 molar) bilden das technologische Fundament für den Betrieb des DEMO-Reaktors. Aus Abschätzungsrechnungen resultiert ein Gesamtbrennstoffbedarf von ca. 20 t, bestehend aus ~ 18 t UCl_x (ca. 12 t angereichertes Uran 19,9 % ^{235}U und ca. 6 t ^{37}Cl) sowie zusätzlich 2–2,5 t NaCl. Die technologische Umsetzung gliedert sich in fünf Kernherausforderungen, die größtenteils parallel adressiert werden können: die Uranbeschaffung und Anreicherung auf 19,9 % ^{235}U (HALEU), die Chloranreicherung (Isotopentrennung auf ~99 % ^{37}Cl), die Brennstoffsalzsynthese sowie die Charakterisierung und Qualitätskontrolle. Alternativ kann diese Leistung auch zugekauft werden, um das Projekt zu beschleunigen – Minimierung der Variable x. Auf dem internationalen Markt belaufen sich die Kosten für ein schlüsselfertiges Brennstoffpaket auf ca. 540 bis 630 Mio. €; ein modularer Beschaffungsweg über westeuropäische Konsortien wird, basierend auf Diskussionen mit qualifizierten Partnern, auf etwa 400 Mio. € veranschlagt. Hier muss abgewogen werden: Während ein internationaler Komplettkauf kurzfristig zeitliche und planerische Vorteile böte, kann die Etablierung einer eigenen nationalen oder europäischen Wertschöpfungskette langfristig von zentraler Bedeutung sein, um die Souveränität in der Brennstoffversorgung zu garantieren.
2. **ESP 2 (Reaktorsysteme):** Dieser Schwerpunkt umfasst die parallele Validierungs-Roadmap aus schnellem Nullleistungsreaktor (ZPR, z. B. unter Nutzung des qualifizierten SNEAK-Platteninventars) und DEMO, wie im vorangegangenen Abschnitt dargelegt. Zur systematischen Minimierung technologischer sowie regulatorischer Risiken im Sinne der „Methode der kleinen Schritte" sind beide Systeme zeitlich und methodisch eng miteinander verzahnt [12], während die Betriebsphasen für DEMO aufeinander aufbauen. Diskussionen zum Standort wurden bereits geführt und ein Standort vorgeschlagen, für den bereits umfangreiche Dokumentationen und bestehende Infrastrukturen genutzt werden können (siehe Standortanalyse).
3. **ESP 3 (Einzeleffektexperimente):** Erschaffung eines grundlegenden Verständnisses der Einzeleffekte in einem Salzschmelzenreaktor. Die Errichtung einer dedizierten Experimentalinfrastruktur, bestehend aus einem hochspezialisierten Salzlabor mit inaktiven und aktiven Sektionen sowie thermohydraulischen Umlaufschleifen, bildet die zwingende Voraussetzung für das physikalische und chemische Grundlagenverständnis des MSFR. Da der direkte Sprung in den Leistungsbetrieb ohne ein tiefgreifendes Grundlagenverständnis mit erheblichen Risiken verbunden wäre, konzentriert sich dieser Schwerpunkt auf isolierte Einzeleffektexperimente (*Separate Effects Validation*): Strömungsmechanik und Thermohydraulik in Umlaufschleifen [40], die Bestimmung thermophysikalischer Stoffwerte, Materialkompatibilität und Degradation sowie Salzchemie und Sensorik. Die aktive in-situ-Kontrolle des Redoxpotenzials und der Salzkomposition zur Korrosionskontrolle sind kritische Herausforderungen [40,41]. Die generierten Messdaten bilden das Fundament, um die stark gekoppelten numerischen Simulationswerkzeuge (Wärmeübertragung, Chemie, Neutronik) kontinuierlich weiterzuentwickeln, zu verifizieren und final zu validieren.
4. **ESP 4 (Gesellschaftliche Integration):** Da die vorgeschlagene Technologie den Umgang mit nuklearen Reststoffen in Deutschland grundlegend verändert, wird von Projektbeginn an eine dedizierte sozialwissenschaftliche Begleitforschung integriert, um die für die Realisierung notwendige „Social Licence to Operate" zu erarbeiten [39,42,43]. Da rein faktenbasierte Informationskampagnen (Knowledge Deficit Model) und klassische Top-down-Entscheidungen nach dem DAD-Prinzip („Decide, Announce, Defend") historisch eine unzureichende Akzeptanz generierten, wird ein partizipativer „Stepwise Decision Making"-Prozess vorgeschlagen [39,43]. Dabei setzt das Projekt auf die Governance-Strategie, Aushandlung mit der Gesellschaft, um umfassende Transparenz hinsichtlich bestehender Unsicherheiten, Ängste und offener Fragen [43,44,45] mit vertrauensbildenden Strategien zu begegnen. Methodisch stützt sich die Kommunikation auf das Narrative Policy Framework (NPF), welches komplexe technische Sachverhalte in wertebasierte, zielgruppengerechte Zukunftsnarrative übersetzt [46,47]. Ein KI-gestütztes Diskurs-Monitoring dient zur parallelen, kontinuierlichen Erfassung der öffentlichen Wahrnehmung, um die Kommunikations- und Partizipationsstrategie iterativ an die gesellschaftliche Dynamik anzupassen [42,43, 44, 45]. Prinzipien nachhalter Politik: Wirksamkeit, Fairness, individueller Nutzen, Gemeinwohlorientierung und Einfachheit bilden die Basis fuer Vertrauensbildende Massnahmen [45]. Regional wird der Diskurs im sächsischen Hochtechnologie-Cluster verankert, um die Umwandlung hochradioaktiver Abfälle in eine klimaneutrale Ressource als positiven Treiber

des ostdeutschen Strukturwandels zu positionieren [43,51,52].

5. **ESP 5 (Digitaler Zwilling):** Der MSFR stellt ein hochgradig gekoppeltes, dynamisches System dar, in dem Neutronenkinetik, Thermofluiddynamik und Prozesschemie untrennbar interagieren [53,54] – das sogenannte „MSR technical trilemma". Um das transiente Gesamtverhalten eines MSFR zuverlässig vorherzusagen, müssen alle relevanten Phänomene in einer gekoppelten Simulationsarchitektur – einem digitalen Zwilling – abgebildet oder bestehende Systeme weiterentwickelt werden [12,55]. Da für neuartige, chloridbasierte Flüssigsalzsysteme etablierte Modelle oft unzureichend sind, erfüllen die Einzeleffektexperimente eine doppelte Funktion: Sie dienen einerseits dem fundamentalen Verständnis zur Verbesserung der Rechenmodelle und andererseits deren partieller Validierung [56]. Darauf aufbauend generieren das Nullleistungsexperiment sowie der spätere DEMO-Betrieb eine essenzielle Benchmark-Datenbasis, um die gekoppelten Simulationswerkzeuge zu verifizieren, zu validieren, aber auch weiterzuentwickeln [30,57]. Diese validierte Vorhersagefähigkeit bildet das Fundament, um den erforderlichen Sicherheitsnachweis (Safety Analysis Report) für die Genehmigung der einzelnen Betriebsschritte von DEMO gegenüber den Aufsichtsbehörden zu erbringen [58,59].

Genehmigungsrechtliche Umsetzbarkeit unter dem geltenden Atomgesetz (AtG)

Die Umsetzung der ersten Projektphase und die Genehmigung des experimentellen Recycling-Reaktors (DEMO) sind nach vorläufiger Einschätzung der Autoren ohne Änderung des bestehenden Atomgesetzes (AtG) realisierbar. Das Vorhaben stützt sich auf die verfassungsrechtlich garantierte Forschungsfreiheit (Art. 5 Abs. 3 GG) und dient dem wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn, um eine evidenzbasierte Entscheidungsgrundlage für die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle zu schaffen. Da im DEMO-Reaktor als Forschungsplattform keine kommerzielle Elektrizitätserzeugung vorgesehen ist, wird er nicht vom gesetzlichen Neubauverbot (§ 7 Abs. 1 Satz 2 AtG) erfasst. Ebenso wenig greift das Wiederaufarbeitungsverbot, da beim in DEMO zu entwickelnden Salzreinigungssystem keine Spaltmaterialien extrahiert werden (vgl. § 3 Nr. 6 AtAV). Das Gesamtvorhaben ist durch eine Kette von Einzelgenehmigungen (nach § 9 und § 7 AtG) umsetzbar, wofür in Sachsen – etwa durch die Genehmigungshistorie der TUD und des VKTA sowie den Ausbildungskernreaktor AKR-2 – bereits praxisnahe Erfahrungen vorliegen.

Standortanalyse: Das Sächsische Nuklearkompetenz-Cluster

Die Realisierbarkeit des Leuchtturmprojekts in Sachsen basiert auf dem Nuklearkompetenz-Cluster, das die gebündelte Expertise der TU Dresden (inklusive des AKR-2), des HZDR, des VKTA, der HSZG, mehrerer außeruniversitärer Institute (Fraunhofer, Leibniz, etc.) sowie einer starken regionalen Industriebasis vereint. Als prädestinierter Standort bietet der Forschungsstandort Rossendorf durch seine atomrechtlich etablierte Infrastruktur und Datenlage planungssichere Voraussetzungen, was administrative Hürden minimieren und Genehmigungsverfahren signifikant verkürzen sollte. Als rechtlicher Träger des Vorhabens wird der VKTA e. V. vorgeschlagen, der seine langjährige Expertise im Strahlenschutz und Abfallmanagement einbringt.

Um den regionalen Strukturwandel proaktiv zu unterstützen, bietet sich zudem die strategische Evaluierung alternativer Transformationsstandorte im Lausitzer Revier (z. B. Schwarze Pumpe oder Boxberg) für die Errichtung von DEMO, aber insbesondere für die spätere industrielle Skalierung an, während Rossendorf als hochspezialisiertes Forschungs- und Analytikzentrum erhalten bliebe.

5 Strategischer Ausblick und Call for Action

Die sächsische Machbarkeitsstudie liefert den ersten strukturgebenden Schritt für die Konzeption eines umfassenden Entwicklungsprogramms für die technologische Umsetzung der „Transmutation ohne Wiederaufarbeitung": Sie systematisiert den Stand von Wissenschaft und Technik, identifiziert die verbleibenden technologischen Lücken, bewertet die genehmigungsrechtliche Umsetzbarkeit unter dem geltenden AtG und skizziert einen risikominimierten Entwicklungspfad. Die anschließende praktische Realisierung in Form des vorgeschlagenen Leuchtturmprojekts sowie des daran anschließenden Entwicklungsprogramms generiert die erforderliche belastbare experimentelle Faktenbasis für evidenzbasierte politische Entscheidungen über den künftigen Umgang mit den hochradioaktiven Reststoffen [7] und wirkt dem drohenden Verlust an nukleartechnischem Know-how in Deutschland aktiv entgegen [2,7].

Notwendigkeit administrativer Unterstützung und öffentlicher Anschubfinanzierung: Eine vom Electric Power Research Institute (EPRI) durchgeführte und von Merk et al. [10] aufgegriffene Analyse historischer US-Programme (siehe **Abbildung 8**) weist darauf hin, dass die Frühphasen einer Reaktorentwicklung (Test Reactors/Experimental Reactors) historisch nie durch die freie Wirtschaft allein getragen wurden [10,35], sondern in wesentlichen Teilen in öffentlicher Hand waren. Insbesondere die nuklearen Kernkomponenten (Nuclear Island) sowie die Brennstoffentwicklung und -versorgung (Fuel Design & Supply) lagen in explorativen Entwicklungsstufen nahezu vollständig in öffentlicher Hand. Die wesentlichen Gründe hierfür sind das in der Frühphase schwer kalkulierbare kommerzielle Risiko, das Fehlen kurzfristiger Renditeaussichten (Return on Investment) sowie staatliche Fürsorgepflichten bezüglich der Nichtverbreitung von

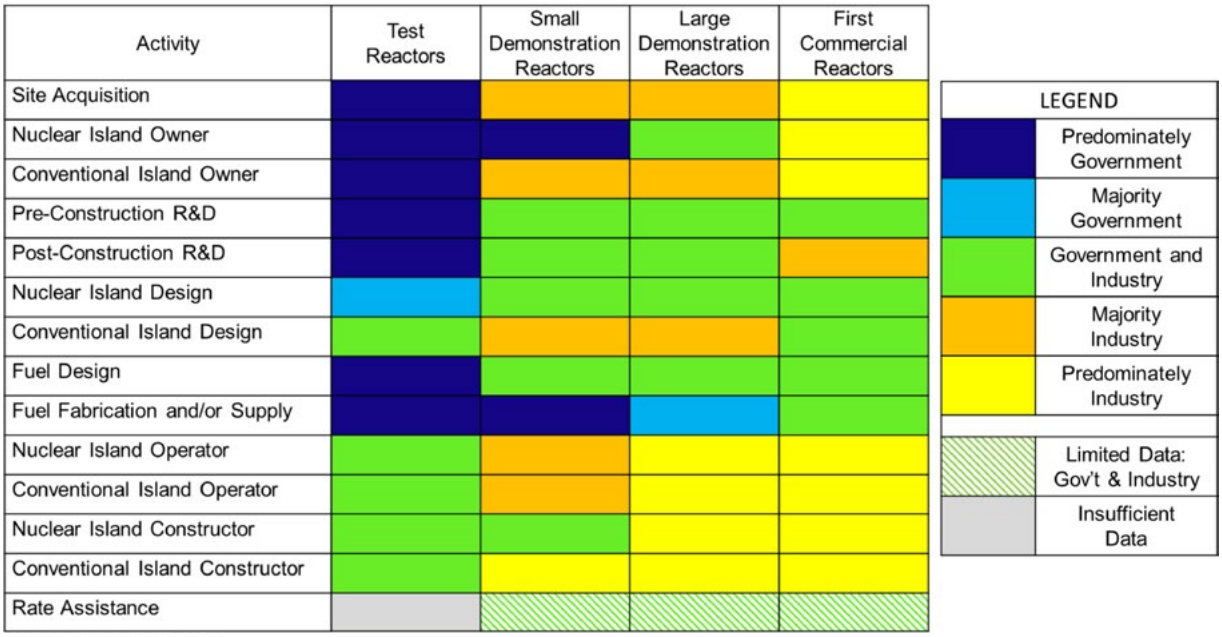


Abbildung 8
Visualisierung der sich wandelnden Rollen von Staat und Industrie bei der Planung, dem Bau und dem Betrieb von Test-, Demonstrations- und ersten kommerziellen Reaktoren [35].

Spaltmaterialien (Proliferation), Einhaltung internationaler Safeguard-Richtlinien in der Brennstoffproduktion und nicht zuletzt in der Entsorgung. Ein neuartiges Vorhaben wie DEMO ist demnach in den initialen Phasen ohne eine staatliche Hauptbeteiligung (sowohl politische als auch finanzielle Unterstützung) faktisch nicht realisierbar und erfordert deshalb ein klares Engagement der öffentlichen Hand.

Industrielle Marktführerschaft und Strukturförderung: In makroökonomischer und ökologischer Hinsicht eröffnet die Validierung des Konzeptes die strategische Perspektive, die nationalen Bestände abgebrannter Brennelemente langfristig in eine wertschöpfende, CO_2-neutrale Ressource zu wandeln. Die Etablierung dieser Technologie geht klar über die Abfallbehandlung hinaus: Sie schafft für Sachsen und Deutschland einerseits die technologische Basis einer skalierbaren, CO_2-neutralen Sekundärenergiewirtschaft – von der Stromerzeugung über Prozesswärme für die Erzeugung von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen bis hin zur Fernwärme –, andererseits erweitert die Technologie den verfügbaren, frei einsetzbaren Ressourcenpool massiv. Von dieser Technologie wird Deutschland durch die Schaffung hochqualifizierter Arbeitsplätze und erhebliche Exportchancen in einem globalen Markt mit einem Investitionspotenzial von über 10 Bio. € profitieren [7]. Deutschland kann sich damit eine führende Marktposition in einer Zukunftstechnologie sichern und eine industrielle Basis in einer Hochtechnologie aufbauen.

Handlungsaufruf: Es ergeben sich drei zentrale Handlungsfelder:

1. **Technologieoffene Überprüfung der Entsorgungsstrategie:** Politik und Behörden müssen den Weg für eine Neubewertung des StandAG ebnen und die aktive Prüfung wissenschaftlich-technischer Alternativen vorantreiben.

2. **Bereitstellung staatlicher Anschubfinanzierung:** Da die risikoreichen Frühphasen einer neuartigen Reaktorentwicklung nicht vom freien Markt getragen werden können, muss die öffentliche Hand strategische Investitionen für die initialen Entwicklungsphasen bereitstellen.

3. **Zügige Einleitung des Vorhabens:** Schaffung der administrativen Voraussetzungen, um die Errichtung des Nullleistungsexperiments und des DEMO-Reaktors unverzüglich einzuleiten und so den dringend benötigten Technologietransfer zu starten.

Das Endlagerproblem nach StandAG, das Ressourcenproblem, der Klimawandel und die Stromversorgung der Zukunft erfordern ein proaktives Herangehen zur Entwicklung neuer Technologien als eine weitere Antwort auf die vielfältigen Herausforderungen.

Die vorliegende Machbarkeitsstudie skizziert einen ersten möglichen Fahrplan, der die wesentlichen Schritte für das Leuchtturmvorhaben und den technologischen Weg darüber hinaus aufzeigt; dieser dient als Startpunkt und strukturelle Basis, um im nachfolgenden Prozess einen detaillierten Entwicklungsplan mit belastbarer Zeitschiene für ein vielversprechendes Technologietransferprojekt auszuarbeiten.

Literaturverzeichnis

[1] Bosbach D, Modolo G, Tromm W. Partitioning and efficient transmutation, Studie mit Fokus auf innovativen Strategien in Russland (PETRUS): fachlicher Abschlussbericht des BMUV-geförderten Verbundvorhabens (Teil I und II). Abschlussbericht. Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ) und Karlsruher Institut für Technologie (KIT); 2022.

[2] Renn O. Partitionierung und Transmutation: Forschung – Entwicklung – Gesellschaftliche Implikationen. Acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; 2014.

[3] Leidinger B. Wege aus dem Endlager-Dilemma: Referenzprogramm zur technologieoffenen Prüfung alternativer Strategien für Deutschland. Berlin; 2026.

[4] Bundesrepublik Deutschland. Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) [Internet]. 2013. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/standag/

[5] Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2011/70/Euratom des Rates vom 19. Juli 2011 über einen Gemeinschaftsrahmen für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle. Amtsblatt der Europäischen Union. 2011;L 199:48–56.

[6] Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Strategische Umweltprüfung zum Nationalen Entsorgungsprogramm: Umweltbericht für die Behörden- und Öffentlichkeitsbeteiligung (Umweltbericht zum Nationalen Entsorgungsprogramm 2025). Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUV); 2025.

[7] Merk B, Jain L, Noori-Kalkhoran O, Derrer-Merk E, Litskevich D. iMAGINE – oder warum wir wissen müssen ob/dass wir kein Endlager brauchen. atw – International Journal for Nuclear Power. 2025;70.

[8] Krohn J, Spieth-Achtnich A, Schütte S, et al. Unterstützung des BASE bei der Prozessanalyse des Standortauswahlverfahrens (PaSta): Vorhaben FKZ 4718F10001. BASE-Forschungsberichte zur Sicherheit der nuklearen Entsorgung. Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE); 2024. Bericht Nr.: 30/24 (BASE-030/24). Verfügbar unter: https://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2024080245247

[9] Schmitt H. Leitfaden für alle Fälle: die Abfallhierarchie [Internet]. Recyclist Magazin. [zitiert am 24.09.2026]. Verfügbar unter: https://www.recyclist-magazin.de/post/leitfaden-abfallhierarchie

[10] Merk B, Litskevich D, Peakman A, Bankhead M. IMAGINE – a disruptive change to nuclear or how can we make more out of the existing spent nuclear fuel and what has to be done to make it possible in the UK? atw – International Journal for Nuclear Power. 2019;64(6):353–359.

[11] Merk B, Stanculescu A, Chellapandi P, Hill R. Progress in reliability of fast reactor operation and new trends to increased inherent safety. Applied Energy. 2015;147:104–116. doi:10.1016/j.apenergy.2015.02.023.

[12] Merk B, Detkina A, Litskevich D, Patel M, et al. A first step towards zero nuclear waste – advanced strategic thinking in light of iMAGINE. Energies. 2022;15(19):7209. doi:10.3390/en15197209.

[13] International Atomic Energy Agency. Use of a graded approach in the application of the safety requirements for research reactors. IAEA Safety Standards Series No. SSG-22 (Rev. 1). Vienna: International Atomic Energy Agency; 2023.

[14] World Energy Council. World Energy Trilemma 2021 [Abbildung im Internet]. 2021. Verfügbar unter: https://www.worldenergy.org/assets/images/common/World_Energy_Trilemma_2021_1.png

[15] International Atomic Energy Agency. Implications of partitioning and transmutation in radioactive waste management. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2004. (Technical Reports Series; No. 435).

[16] Oi N. Plutonium challenges: changing dimensions of global co-operation. IAEA Bulletin. 1998;40(1).

[17] Taiwo T, Wigeland R. Fuel cycle considerations for uranium, plutonium and minor actinide partitioning and transmutation. Ann Nucl Energy. 2021;156:108182. doi:10.1016/j.anucene.2021.108182.

[18] Nishihara K, Oigawa H, Nakayama S, Ono K, Shiotani H. Impact of partitioning and transmutation on high-level waste disposal for the fast breeder reactor fuel cycle. J Nucl Sci Technol. 2010;47(12):1101–1117. doi:10.1080/18811248.2010.9720977.

[19] Merk B, Jain L, Noorikalkhoran O, Derrer-Merk E, Cartland-Glover G, Powell L, et al. Does partitioning & transmutation have a future as a nuclear waste management strategy? In: Wetzel T, Tromm W, Knebel J, editors. Everlasting Energy – In Memoriam Prof. Dr.-Ing. Robert Stieglitz. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing; 2025. p. 197–222.

[20] European Commission. European research program for the partitioning of minor actinides and some long-lived fission products from high active wastes issuing the reprocessing of spent nuclear fuels (EUROPART) [Internet]. CORDIS; [archiviert am 20.06.2024]. Projektnummer: 508854. Verfügbar unter: https://cordis.europa.eu/project/id/508854/de

[21] European Commission. European research programme for the transmutation of high level nuclear waste in an accelerator driven system (EUROTRANS) [Internet]. CORDIS; [archiviert am 20.06.2024]. Projektnummer: 516520. Verfügbar unter: https://cordis.europa.eu/project/id/516520

[22] Ikeda K, Koyama S, Kurata M, Morita Y, Tsujimoto K, Minato K. Technology readiness assessment of partitioning and transmutation in Japan and issues toward closed fuel cycle. Prog Nucl Energy. 2014;74:242–263. doi:10.1016/j.pnucene.2013.12.009.

[23] Pistner C, Englert M, von Hirschhausen C, Böse F, Steigerwald B, Gast L, et al. Analyse und Bewertung des Entwicklungsstands, der Sicherheit und des regulatorischen Rahmens für sogenannte neuartige Reaktorkonzepte. Berlin: Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE); 2024. Bericht Nr.: BASE-018/24. Verfügbar unter: https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2024030542046

[24] Yang WS, Kim Y, Hill RN, Taiwo TA, Khalil HS. Long-lived fission product transmutation studies. Nucl Sci Eng. 2004;146(3):291–318.

[25] Englert M, Pistner C, Vogt Y, Frieß F. Scenario analysis for partitioning and transmutation (P&T) in a phase-out scenario. Vienna: International Nuclear Risk Assessment Group (INRAG); 2026. INRAG Working Paper. Verfügbar unter: https://www.inrag.org/wp-content/uploads/2026/04/inrag_put_publication_V4.pdf

[26] Merk B, Litskevich D. Transmutation of all German transuranium under nuclear phase out conditions – is this feasible from neutronic point of view? PLoS One. 2015;10(12):e0145652. doi:10.1371/journal.pone.0145652.

[27] Merk B, Litskevich D, Bankhead M, Taylor RJ. An innovative way of thinking nuclear waste management – neutron physics of a reactor directly operating on SNF. PLoS One. 2017;12(7):e0180703. doi:10.1371/journal.pone.0180703.

[28] Merk B, Detkina A, Noori-Kalkhoran O, Jain L, Litskevich D, Cartland-Glover G. New waste management options created by iMAGINE through direct operation on spent nuclear fuel feed. Energies. 2023;16(21):7420. doi:10.3390/en16217420.

[29] Schenkel R, Magill J, Glatz JP, Mayer K. Partitioning and transmutation – technical feasibility, proliferation resistance, and safeguardability. In: International Symposium on International Safeguards: Verification and Nuclear Material Security (IAEA-SM-367); 2001.

[30] Detkina A, Litskevich D, Merk B. Zero power experiment for molten salt reactor – code verification and validation request. In: Proceedings of the International Conference on Physics of Reactors (PHYSOR 2022); 2022.

[31] Percher C, McKenzie G. Experimental needs for criticality safety purposes. Paris: OECD Nuclear Energy Agency (NEA); 2023. Nuclear Science Committee Report No.: NEA/NSC/R(2022)6. Verfügbar unter: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_83112/experimental-needs-for-criticality-safety-purposes

[32] Carriere C, Cannes C, Rodrigues D, Delpech S. Salt potential control by titanium chloride to mitigate the corrosion in molten chloride salts. Electrochim Acta. 2025;518:145805.

[33] Merk B, Jain L, Rungta R, Noori-Kalkhoran O. Criticality preservation without using a classical control system in a small-scale demonstrator for a molten salt fast reactor. Energies. 2026;19(20):4763. doi:10.3390/en19204763.

[34] Merk B, Jain L, Rungta R, Noori-Kalkhoran O. An innovative sleeve approach to influence the burnup swing in a low-power molten salt fast reactor without a control system [Preprint]. Preprints.org; 2026. doi:10.20944/preprints202609.2141.v1.

[35] Electric Power Research Institute (EPRI). Program on technology innovation: government and industry roles in the research, development, demonstration, and deployment of commercial nuclear reactors: historical review and analysis. Palo Alto (CA): Electric Power Research Institute; 2017. Report No.: 3002010478.

[36] Engelmann P, Böhme R, Bruhn G, et al. Initial experiments in the Karlsruhe fast critical facility, SNEAK. Karlsruhe: Gesellschaft für Kernforschung mbH; 1966. Bericht Nr.: KFK-472. doi:10.5445/IR/270001420.

[37] International Atomic Energy Agency. Nuclear security recommendations on physical protection of nuclear material and nuclear facilities (INFCIRC/225/Revision 5). Vienna: International Atomic Energy Agency; 2011. (IAEA Nuclear Security Series; No. 13). Verfügbar unter: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1481_web.pdf

[38] International Atomic Energy Agency. Stakeholder engagement in nuclear programmes. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2021. (IAEA Nuclear Energy Series; No. NG-G-5.1). Verfügbar unter: https://www.iaea.org/publications/14775/stakeholder-engagement-in-nuclear-programmes

[39] Renn O. Risk governance: concept and application to technological risk. In: Burgess A, Alemanno A, Zinn JO, editors. Routledge handbook of risk studies. Routledge; 2016.

[40] Mascaron M, Martinet J, Pascal V, Merle E, Bertrand F. An approach to molten salt reactor operation and control and its application to the ARAMIS actinide burner. Ann Nucl Energy. 2025;210:110888. doi:10.1016/j.anucene.2024.110888.

[41] Wang Y, Goh B, Sridharan K, Couet A. In situ corrosion monitoring of the T91 alloy in a molten chloride salt using a miniaturized electrochemical probe for high-throughput applications. Anal Chem. 2022;94(9):4012–4020. doi:10.1021/acs.analchem.1c05196.

[42] Lehtonen M, Kojo M, Kari M, Jartti T, Litmanen T. Trust, mistrust and distrust as blind spots of social licence to operate: illustration via three forerunner countries in nuclear waste management. J Risk Res. 2022;25(5):577–593. doi:10.1080/13669877.2021.1957987.

[43] Derrer-Merk E, Naumann E, Viebach M, Lange C, Merk B. Soziale Lizenz für neue nukleare Entsorgungspfade gemeinsam gestalten – Navigieren im Wertewandel von Verantwortung und Vertrauen. atw – International Journal for Nuclear Power; 2026; 71(3): 12–25.

[44] Beck U. Risikogesellschaft: auf dem Weg in eine andere Moderne. Frankfurt am Main: Suhrkamp; 1986. (Edition Suhrkamp; Bd. 1365).

[45] Betsch C, Tiede K, Janssen J. Fünf Prinzipien für die Gestaltung und Kommunikation nachhaltiger Politik. Klimafakten.de; 2026. doi:10.23668/psycharchives.21599.

[46] Göpel M. Unsere Welt neu denken: eine Einladung. 1. Aufl. Berlin: Ullstein Buchverlage; 2020.

[47] Götter C. Atomare Verantwortung: zwei Dimensionen von Verantwortung in lokalen Debatten über Kernenergie in Deutschland und Großbritannien. In: Böhmer S, Unger T, Herausgeber. Technisches Handeln und Verantwortung. Wiesbaden: Springer VS; 2025. S. 113–132. doi:10.1007/978-3-658-46631-2_7.

[48] Ao W, Wu J. The silent majority? Econ Lett. 2020;193:109350. doi:10.1016/j.econlet.2020.109350.

[49] Bail CA. Can generative AI improve social science? Proc Natl Acad Sci U S A. 2024;121(21):e2314021121. doi:10.1073/pnas.2314021121.

[50] Luhmann N. Vertrauen: ein Mechanismus der Reduktion sozialer Komplexität. 5. Aufl. Konstanz: UVK Verlagsgesellschaft; 2014.

[51] Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren. Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) [Internet]. Helmholtz-Gemeinschaft; 2026. Verfügbar unter: https://www.helmholtz.de/en/about-us/helmholtz-centers/centers-a-z/centre/helmholtz-zentrum-dresden-rossendorf-hzdr/

[52] Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR). Sachsen bündelt Kompetenzen rund um die Kernfusion: EU und Freistaat fördern Aufbau des Netzwerks SAXFUSION mit 2,4 Millionen Euro [Internet]. Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf; 2025. Verfügbar unter: https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=75792&pNid=0&pLang=de

[53] Walker SA, Tano ME, Abou-Jaoude A, Calvin O. Depletion-driven thermochemistry of molten salt reactors: review, method, and analysis. Front Nucl Eng. 2023;2:1214727. doi:10.3389/fnuen.2023.1214727.

[54] Cartland-Glover G, Jain L, Merk B, et al. MSTP workshop on modelling & simulation. Virtual Workshop, Molten Salt Technology Platform (MSTP); 2026.

[55] Scuro NL, Beneš O, Lorenzi S, Krstovic M, Krepel J, Piro MHA. Coupled computational fluid dynamics and computational thermodynamics simulations for fission product retention and release: a molten salt fast reactor application. Prog Nucl Energy. 2024;177:105450. doi:10.1016/j.pnucene.2024.105450.

[56] Kerntechnischer Ausschuss (KTA). Sicherheitstechnische Regel des KTA – KTA 3101.1: Auslegung der Reaktorkerne von Druck- und Siedewasserreaktoren; Teil 1: Grundsätze der thermohydraulischen Auslegung. KTA; 2022.

[57] Kerntechnischer Ausschuss (KTA). Sicherheitstechnische Regel des KTA – KTA 3101.2: Auslegung der Reaktorkerne von Druck- und Siedewasserreaktoren; Teil 2: Neutronenphysikalische Anforderungen an Auslegung und Betrieb des Reaktorkerns und der angrenzenden Systeme. KTA; 2012.

[58] Kerntechnischer Ausschuss (KTA). Sicherheitstechnische Regel des KTA – KTA 3301: Nachwärmeabfuhrsysteme von Leichtwasserreaktoren. KTA; 2015.

[59] International Atomic Energy Agency. Safety of research reactors. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2016. (IAEA Safety Standards Series; No. SSR-3).

Autoren



Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Carsten Lange

Technische Universität Dresden,
Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik, Leiter des Ausbildungskernreaktors AKR-2

carsten.lange@tu-dresden.de

Dr. Carsten Lange ist Diplom-Physiker und wurde an der Fakultät für Maschinenwesen promoviert. Von 2010 bis 2015 leitete er das Lehr- und Forschungsgebiet Reaktordynamik mit dem Schwerpunkt „Anwendung von Methoden der nichtlinearen Dynamik auf reaktorphysikalische Problemstellungen, insbesondere das nichtlineare Stabilitätsverhalten von Siedewasserreaktoren und innovativen Kernreaktoren“. Seit 2015 ist er Leiter und Strahlenschutzbeauftragter (SSB) des Ausbildungskernreaktors AKR-2 der TU Dresden und verantwortet die wissenschaftliche, technische und organisatorische Leitung der Anlage in Lehre, Forschung und Transfer. Seine Mission ist der Aufbau einer experimentellen Plattform am AKR-2 sowie der dafür notwendigen Kompetenzen sowohl für die Verifizierung, Validierung und das Benchmarking im Kontext der Entwicklung reaktorphysikalischer Programmwerkzeuge als auch für die Evaluierung und Messung nuklearer Datensätze. Durch diesen Ausbau wird der Einsatzbereich des AKR-2 über die klassische Reaktorsicherheitsforschung hinaus gezielt erweitert, was zukünftige Anwendungen in der Strahlungsforschung, Detektorentwicklung, Fusionsforschung bis hin zur Wasserstoffforschung ermöglicht.



Elisa Naumann, M. Sc.

Technische Universität Dresden,
Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik,
Wissenschaftliche Mitarbeiterin

elisa.naumann@tu-dresden.de

Elisa Naumann ist seit 2026 wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik der TU Dresden, dort beschäftigt sie sich mit probabilistischen Neutronentransportrechnungen und Untersuchungen zu hochradioaktiven Abfällen. Im Rahmen ihres Masterstudiums „Abfallwirtschaft und Altlasten“ untersuchte sie in ihrer Abschlussarbeit die Behandlung hochradioaktiver Abfälle in einem schnellen Salzschmelzreaktor.



Dr. Marco Viebach

Technische Universität Dresden (TUD)

marco.viebach@tu-dresden.de

Marco Viebach ist Physiker und promovierte 2021 an der Fak. Maschinenwesen, TUD, über Neutronenflussschwankungen in Druckwasserreaktoren. Seit 2023 leitet er an der TUD die Nachwuchsforschungsgruppe NAUTILUS, die sich mit experimentellen Methoden für die Untersuchung innovativer Ansätze zur Behandlung hochradioaktiver Abfälle befasst. Aktuelle Schwerpunkte der Gruppe bilden Neutronenspektrometrie samt Hardware-Entwicklung, Neutronentransmission, Pile-Oszillator und Monte-Carlo-Simulation, die vornehmlich am Ausbildungs- und Forschungsreaktor AKR-2 der TUD angesiedelt sind und derzeit auf weitere Anlagen übertragen werden. Neben den wissenschaftlichen Zielen nutzt Herr Viebach seine Themen, um interessierten Studierenden und auch Abiturienten tiefe Einblicke zu gewähren und berufliche Perspektiven in der Kerntechnik aufzuzeigen.



Dr. Elfriede Derrer-Merk

University of Liverpool, UK, research associate, University of Liverpool, Department of Physics

e.derrer-merk@liverpool.ac.uk

Dr. Elfriede Derrer-Merk (Promotion in Psychologie) arbeitet im Rahmen des von der Royal Academy of Engineering geförderten Programms iMAGINE zu den Themen soziale Verantwortung in der Wissenschaft, Risikowahrnehmung und -kommunikation. Im Zuge eines Secondments an die Technische Universität Dresden untersucht sie neue Pfade der nuklearen Entsorgung aus gesellschaftlicher Perspektive und entwickelt evidenzbasierte Empfehlungen für nachhaltige Politikgestaltung sowie für Public- und Stakeholder-Engagement.

Zuvor leitete sie Studien im Rahmen des Zero Power Project (11/2022–10/2024), die sich mit den sozialen und psychologischen Auswirkungen des Lebens in Thurso (UK) im Kontext der nuklearen Anlage Dounreay sowie mit deren Veränderungen im Zeitverlauf befassten. Methodisch arbeitet sie vorwiegend qualitativ und setzt unter anderem konstruktivistische Grounded-Theory-Methodologie, Ethnographie sowie systematische Literaturanalysen ein.



Prof. Bruno Merk

School of Physical Sciences
University of Liverpool, UK

bruno.merk@liverpool.ac.uk

Prof. Bruno Merk hält derzeit den, von der königlichen Ingenieursgesellschaft geförderten, Chair in Emerging Technologies für die Kerntechnik des 21. Jahrhunderts. Sein Kernforschungsgebiet umfasst die Entwicklung neuer Technologien zum besseren Umgang mit Nuklearmüll, mit dem Ziel ein Endlager für hochradioaktive Materialien zu vermeiden. Von 2015 bis 2020 hielt er die NNL/RAEng Forschungsprofessur für Computermodellierung in der Kerntechnik und war gleichzeitig Fellow für Reaktorphysik am National Nuclear Laboratory. Vor seiner Zeit im Vereinigten Königreich war er im Programm NUSAFE der Helmholtz-Gesellschaft für die Bereiche Waste Management und fortschrittliche Reaktoren zuständig. Er war als wissenschaftlicher Berater an der Entwicklung der acatech Position zu Partitionierung und Transmutation nuklearer Abfälle – Chancen und Risiken in Forschung und Anwendung engagiert.

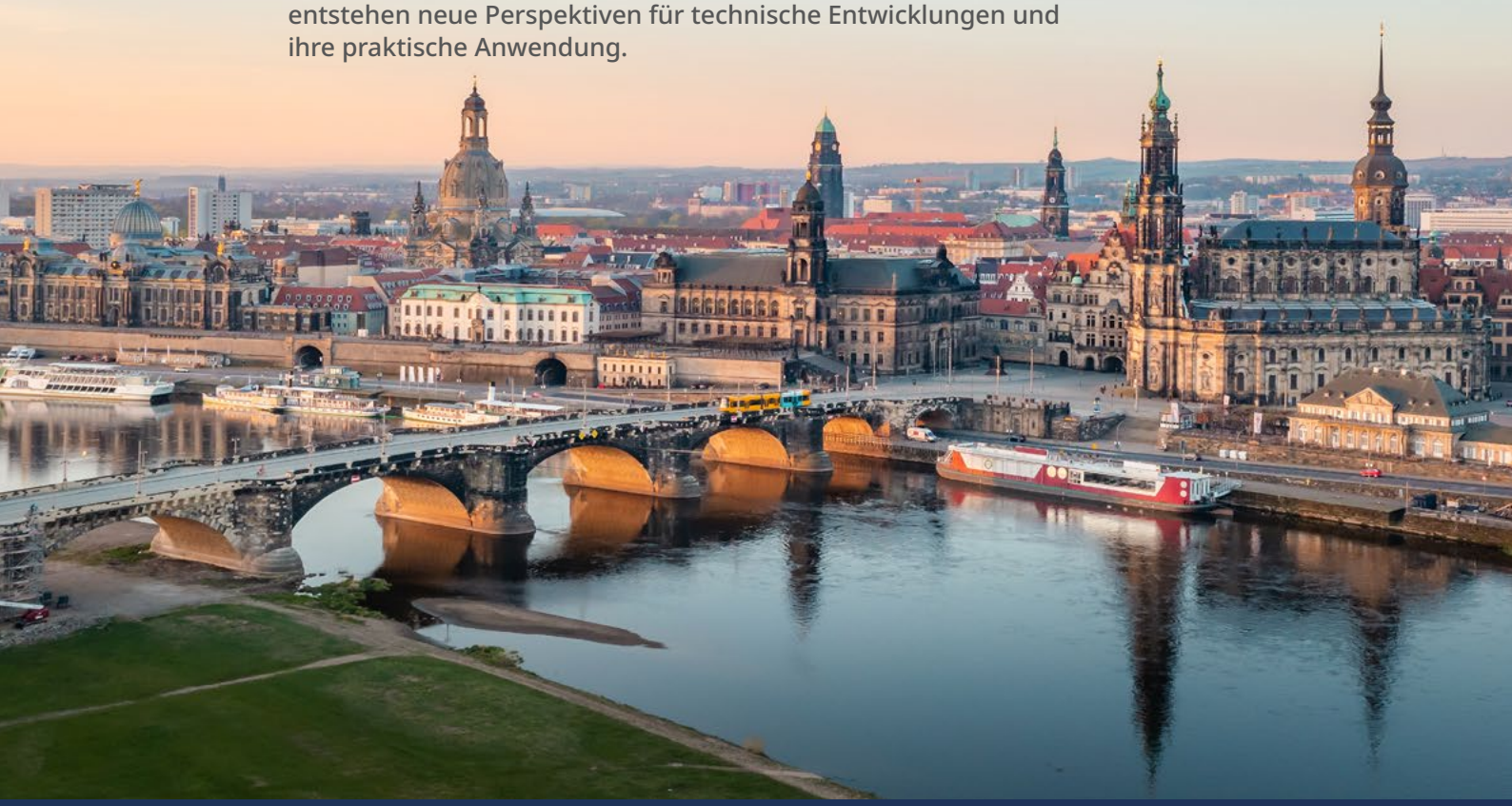
Technische Universität Dresden

Gute Ideen brauchen starke Partner.

WISSENSCHAFT UND INDUSTRIELLE ERFAHRUNG GEHÖREN ZUSAMMEN.

An der Technischen Universität Dresden treffen ingenieurwissenschaftliche Forschung, interdisziplinärer Austausch und internationale Zusammenarbeit aufeinander.

Gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft entstehen neue Perspektiven für technische Entwicklungen und ihre praktische Anwendung.



Entdecken Sie unsere Kooperationsmöglichkeiten:
tu-dresden.de/kooperation

atw

International Journal for Nuclear Power

Impressum

Offizielle Mitgliederzeitschrift
der Kerntechnischen Gesellschaft e. V. (KTG)

Verlag
INFORUM Verlags- und Verwaltungsgesellschaft mbH
Friedrichstraße 171
10117 Berlin

www.nucmag.com

@atw-international-journal-for-nuclear-power



Redakteurin
Nicole Koch
+49 163 7772797
nicole.koch@nucmag.com



Anzeigen und Abonnements
Silvana Fliegel
+49 30 319 88 2 99
silvana.fliegel@inforum-gmbh.de