



Bundesamt für
kerntechnische
Entsorgungssicherheit

Unsere Forschungs- agenda



Konsultationsfassung

IMPRESSUM

Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit

11513 Berlin
Telefon: 030 18767676 – 5000
E-Mail: info@bfe.bund.de
Internet: www.bfe.bund.de

Gestaltung: Quermedia GmbH, Kassel
Druck: Volkhardt Caruna Medien GmbH & Co. KG, Amorbach

Stand: Oktober 2018



Bundesamt für
kerntechnische
Entsorgungssicherheit

Unsere
Forschungsagenda

Konsultationsfassung

Inhalt

Vorwort
Seite 6

1 Einleitung:
**Warum und wie das BfE
forscht**
Seite 8

1.1 Forschung als Aufgabe
des BfE
Seite 10

1.2 Identifikation und Umsetzung
des BfE-Forschungsbedarfs
Seite 11

1.3 Qualitätsmanagement
in der BfE-Forschung
Seite 12

1.4 Aufbau der
Forschungsagenda
Seite 13

**2 Priorisierung von
Forschungsvorhaben**
Seite 14

2.1 Aufstellung des
Forschungsplans
Seite 16

2.2 Ausführung des BfE-
Forschungsplans
Seite 18

3 Reaktorsicherheit
Seite 20

3.1 Forschungsrahmen im
Bereich der Reaktor-
sicherheit und thematische
Auswahl
Seite 22

3.2 Sicherheitsanalyse
Seite 24

3.3 Übergreifende Einwirkungen
Seite 26

3.4 Werkstoffkonzepte,
Komponentenintegrität und
Alterungsmanagement
Seite 28

3.5 Elektro- und Leittechnik
Seite 29

3.6 Sicherheit von
Forschungsreaktoren
Seite 31

3.7 Sicherheit weiterer Anlagen
zur nuklearen Ver-
und Entsorgung
Seite 34

3.8 Stilllegung kerntechnischer
Anlagen
Seite 35

3.9 Internationale Zusammen-
arbeit auf dem Gebiet der
kerntechnischen Sicherheit
Seite 37

4 Zwischenlager und Transporte Seite 38

4.1 Behältersicherheit bei Transporten und Zwischenlagerung
Seite 41

4.2 Sicherung
Seite 44

5 Endlagerstandort mit der bestmöglichen Sicherheit Seite 48

5.1 Umsetzung des Standortauswahlverfahrens
Seite 51

5.2 Anforderungen und Kriterien des StandAG
Seite 51

5.3 Methoden zur Erkundung, Untersuchung und Auswertung
Seite 52

5.4 Prozessverständnis und naturwissenschaftliche Zusammenhänge
Seite 52

5.5 Sicherheitskonzepte und Bewertungsmethoden
Seite 54

5.6 Szenarienentwicklung
Seite 55

5.7 Sicherheitsbetrachtungen
Seite 56

5.8 Nachweisführung für die technische Machbarkeit von Endlagerkomponenten
Seite 57

5.9 Bewertungsmaßstäbe und Vergleichsmöglichkeiten
Seite 57

6 Übergreifende und methodische Fragestellungen Seite 58

6.1 Öffentlichkeitsbeteiligung
Seite 61

6.2 Historisch-Sozialwissenschaftliche Forschung
Seite 62

6.3 Informationsmanagement und Langzeitdokumentation
Seite 63

6.4 Umgang mit Ungewissheiten, Unsicherheiten und fehlendem Wissen
Seite 64

6.5 Sicherheitsmanagement,- Sicherheitskultur, menschliche und organisatorische Faktoren
Seite 65

Zusammenfassung und Ausblick
Seite 68

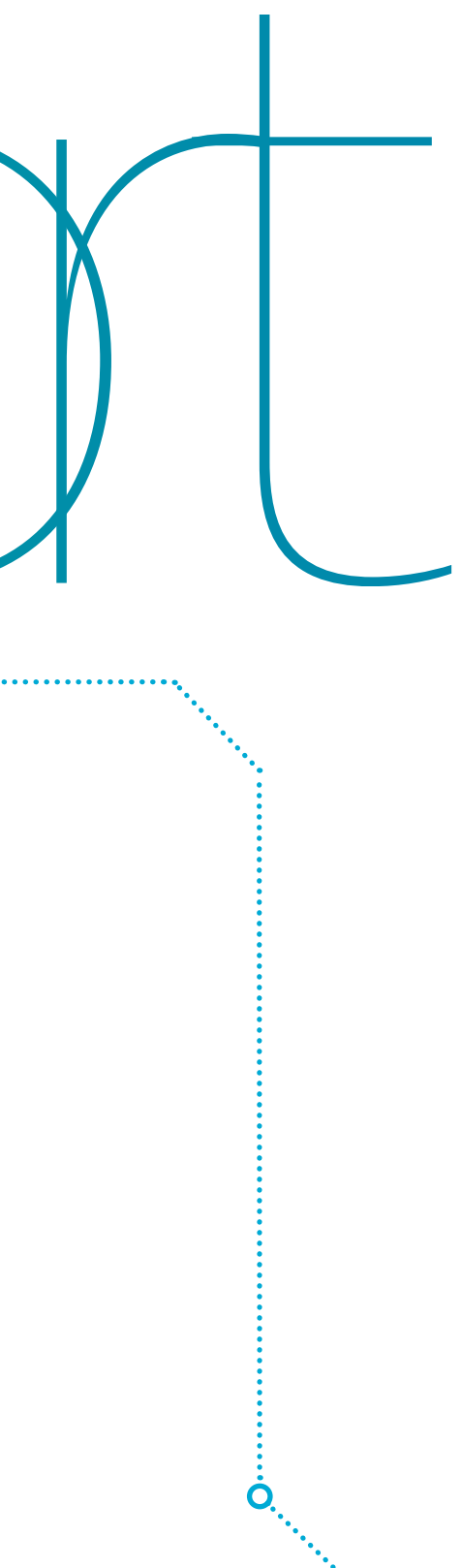
Abkürzungsverzeichnis
Seite 70

Quellen und Literatur
Seite 71



Deutschland befindet sich in einer Phase des Umbruchs bezüglich der Nutzung der Kernenergie und der Entsorgung der daraus resultierenden radioaktiven Abfälle. Von ehemals über 20 Kernkraftwerken befinden sich seit 2018 noch sieben in Betrieb; gemäß Atomgesetz (AtG) wird der letzte Leistungsreaktor 2022 abgeschaltet. Im Mai 2017 trat das Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) in Kraft. Das Standortauswahlverfahren hat im Herbst 2017 offiziell begonnen und die zuständigen Institutionen befinden sich im Aufbau. Mit dem Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE) wurde ein neuer Akteur geschaffen. Zu seinen Kernaufgaben gehören die Aufsichts- und Genehmigungstätigkeit sowie die Öffentlichkeitsbeteiligung im Rahmen des Standortauswahlverfahrens, die Genehmigung von Transport und Aufbewahrung von Kernbrennstoffen oder kernbrennstoffhaltigen Abfällen sowie die Bereitstellung der Fachexpertise für den Bereich der kerntechnischen Sicherheit und nuklearen Ver- und Entsorgung. Zur Erfüllung seiner Aufgaben hat das BfE den gesetzlichen Auftrag, auf diesen Gebieten wissenschaftliche Forschung zu betreiben.

Die vorliegende Forschungsagenda benennt aus Sicht des BfE relevante Themenfelder und Fragestellungen für die Forschung auf diesen Gebieten. Sie blickt dabei auf die nächsten vier Jahre, konkretisiert die in der BfE-Forschungsstrategie benannten Forschungsfelder und Ziele und liefert die Grundlage für die Auswahl und Priorisierung der im jährlichen Forschungsplan zu initiierenden Forschungsvorhaben. Sie spannt gleichzeitig den thematischen Rahmen auf, in dem sich die Forschung des BfE in den kommenden Jahren bewegen wird und bietet damit zusätzlich einen weitreichenden Überblick zu Forschungsthemen in der nuklearen Sicherheit (der Reaktorsicherheit sowie der nuklearen Ver- und Entsorgung). Dieser Überblick umfasst auch Forschungsthemen, die aus Sicht des BfE primär von anderen Akteuren zu berücksichtigen sein werden. Daher wird nicht jedes der genannten Themenfelder innerhalb der kommenden vier Jahre im Rahmen von BfE-Forschungsvorhaben bearbeitet. Aufgrund des kontinuierlich fortschreitenden Standes von Wissenschaft und Technik kann eine solche Forschungsagenda naturgemäß nicht abschließend alle Themenfelder und Fragestellungen umfassen und beschreiben. Deshalb wird sie im zweijährigen Rhythmus aktualisiert und fortgeschrieben.



Das BfE betreibt Forschung zu allen Fragen, die zur Erfüllung seiner komplexen und verantwortungsvollen Aufgaben wissenschaftlich zu bearbeiten sind. Die Aufgaben des BfE sind vielfältig und umfassen unterschiedliche inhaltliche Fragestellungen sowie methodische Herangehensweisen. Die Forschungsfelder des BfE weisen deshalb eine breite Fächerung auf. In einigen Aufgabenbereichen kann das BfE bereits heute auf eine in mehrjähriger Arbeit etablierte Forschungsgeschichte zurückblicken. In anderen Bereichen steht es vor neuen Aufgaben, bei denen sich spezifische wissenschaftliche Fragestellungen teilweise erst in den kommenden Jahren konkretisieren werden. Diese unterschiedlichen Randbedingungen der verschiedenen Forschungsbereiche des BfE spiegeln sich auch in den einzelnen Kapiteln dieser Agenda wider, die sich in Aufbau, Umfang sowie fachlicher Tiefe und dem jeweiligen Detaillierungsgrad entsprechend unterscheiden.

Im Bereich der Reaktorsicherheit besteht eine besondere Herausforderung darin, mit den veränderten Randbedingungen durch den Ausstiegsbeschluss umzugehen. Die Phasen nach der Abschaltung bis zum Abschluss des Rückbaus der Anlagen erfordern die Betrachtung neuer sicherheitstechnischer Fragestellungen. Weltweit – und so auch in einigen Nachbarstaaten Deutschlands – werden weiterhin Kernkraftwerke und andere kerntechnische Anlagen betrieben, und entsprechend werden die europäischen Regelwerke fortgeschrieben sowie die Sicherheitsstandards weiterentwickelt. Es ist daher wichtig, dass Kompetenzen zur Bewertung sicherheitstechnischer Fragestellungen im BfE als zuständige Behörde erhalten und durch Forschungsvorhaben langfristig gesichert werden.

Auch im Bereich der Genehmigung von Transporten radioaktiver Materialien sowie deren Zwischenlagerung werden sich neue Forschungsfragen ergeben. Die voraussichtliche Dauer des Verfahrens bis zur Einlagerung der Abfälle in ein Endlager und die damit verbundenen langen Standzeiten in Zwischenlagern verändern die Eigenschaften der Inventare und Behälter. Dies kann die weitere Lager- und spätere Transportfähigkeit beeinflussen - ein Themenfeld, das weiter zu erforschen ist.

Die Standortauswahl erfordert die vergleichende, sicherheitsgerichtete Betrachtung unterschiedlicher Wirtsgesteine und Endlagerkonzepte für hochradioaktive Abfälle. Ein solches wirtsgesteinvergleichendes Verfahren ist bisher weder national noch international in dieser Form vergleichbar umgesetzt worden und stellt das BfE vor spezifische Herausforderungen: Das BfE muss Erkundungsprogramme und Sicherheitsuntersuchungen und deren fachliche Basis bewerten. Dabei sind alle sicherheitsrelevanten Aspekte für die Bau-, Betriebs- und die Nachverschlussphase eines Endlagers mit einem Bewertungszeitraum von einer Million Jahre zu berücksichtigen. Das BfE ist zudem Träger der Öffentlichkeitsbeteiligung im Standortauswahlverfahren, die es so bisher bei keinem anderen Umweltprojekt gegeben hat. Dem BfE obliegt schließlich mit der Langzeitdokumentation auch die Aufgabe, alle für die End- und Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle bedeutsamen Daten und Dokumente dauerhaft zu speichern und für die Nachwelt nachvollziehbar zu dokumentieren.

Mit seinen umfangreichen genehmigungsrechtlichen, aufsichtlichen und auch fachbehördlichen Aufgaben sowie als Träger der Öffentlichkeitsbeteiligung im Standortauswahlverfahren ist das BfE ein zentraler Akteur im Bereich der nuklearen Entsorgung und kerntechnischen Sicherheit. Es sieht sich deshalb in der Verantwortung, über die eigene, an den konkreten Aufgaben orientierte Forschung hinauszublicken und maßgeblich an der Koordinierung der Forschung für den Bereich der nuklearen Entsorgung mitzuwirken, um die Sicherheit in der nuklearen Entsorgung weiterzuentwickeln und das Standortauswahlverfahren erfolgreich umzusetzen.

1.1

Forschung als Aufgabe des BfE

1.2

Identifikation und Umsetzung des Forschungsbedarfs

1.3

Qualitätsmanagement in der BfE-Forschung

1.4

Aufbau der Forschungsagenda



Das Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE) wurde im Jahr 2014 als selbstständige wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des damaligen Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB; jetzt Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit BMU) errichtet. Sein Aufbau erfolgt seit Abschluss der Evaluierung des Standortauswahlgesetzes durch die Endlagerkommission in 2016. Um als Regulierungsbehörde, die sowohl Aufsichts- und Genehmigungsfunktionen als auch Tätigkeiten als Fachbehörde wahrnimmt, stets den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik (W&T) anwenden zu können, ist das BfE als Ressortforschungseinrichtung wissenschaftlich aktiv. Als Ressortforschung wird derjenige Teil der öffentlich finanzierten Forschung bezeichnet, der staatlichen Akteuren gezielt wissenschaftliche Erkenntnisse als Entscheidungsgrundlage zur Erfüllung ihrer Aufgaben zur Verfügung stellt. Hierzu initiiert und begleitet das BfE Forschungs- und Entwicklungsvorhaben auf den Gebieten der nuklearen Sicherheit und der Öffentlichkeitsbeteiligung. Es greift aktuelle wissenschaftliche und gesellschaftliche Fragen und Entwicklungen in diesen Bereichen auf, erkennt wichtige gegenwarts- und zukunftsbezogene Herausforderungen und erarbeitet Handlungsoptionen für die notwendigen staatlichen Maßnahmen sowie die eigenen Amtsaufgaben. Dabei werden sowohl mittel- bis langfristig angelegte Fragestellungen kontinuierlich bearbeitet und wissenschaftliche Kompetenzen nachhaltig aufgebaut, als auch kurzfristig wissenschaftliche Expertise bereitgestellt. Ziel ist dabei nicht nur die Verfolgung, sondern auch die aktive Weiterentwicklung des Standes von W&T. Das BfE verfolgt zudem das Ziel, über die eigene, an den konkreten Aufgaben orientierte Forschung hinauszublicken und maßgeblich an der Koordinierung der öffentlichen Forschung in den Bereichen nukleare Entsorgung, Zwischenlagerung und Transporte, kerntechnische Sicherheit sowie Standortauswahlverfahren und Öffentlichkeitsbeteiligung mitzuwirken.

1.1 Forschung als Aufgabe des BfE

Mit dem Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz AtG), dem Gesetz zur Neuordnung der Organisationsstruktur im Bereich der Endlagerung und dem Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (StandAG) wurden dem BfE folgende Aufgaben übertragen:

- Prüf- und Überwachungsaufgaben im Rahmen des Auswahlverfahrens zur Suche eines Standortes mit der bestmöglichen Sicherheit für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle,
- Trägerschaft für die zugehörige Öffentlichkeitsbeteiligung,
- Genehmigungsaufgaben im Bereich von Aufbewahrung und Beförderung radioaktiver Stoffe,
- Planfeststellung, Genehmigung, berg- und atomrechtliche Aufsicht über Endlager,
- Beratung der Bundesaufsicht (BMU) in Fragen der kerntechnischen Sicherheit und der nuklearen Entsorgung.

Zur Erfüllung seiner Aufgaben als Fach-, Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde betreibt das BfE auf diesen Gebieten wissenschaftliche Forschung. Seine Forschung ist ergebnisoffen und systematisch, basiert auf anerkannten wissenschaftlichen Methoden zur Gewinnung neuer Erkenntnisse und folgt den allgemein anerkannten Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis. Hierzu zählt auch, dass das BfE Forschungstätigkeiten nach einem transparenten und nachvollziehbar begründeten Verfahren ausrichtet und priorisiert, Forschungsergebnisse verständlich aufbereitet, grundsätzlich publiziert und die Öffentlichkeit zu einer reflektierten und kritischen Begleitung auffordert. Das BfE hat auf mehreren seiner Aufgabenfelder jedoch zugleich den Auftrag, regelmäßig eindeutige und rechts-sichere behördliche Entscheidungen auf Basis des jeweils aktuellen Standes von W&T zu treffen. Die Transparenz und der Qualitätsanspruch an die Forschung werden nicht dem Ziel einer leichteren Entscheidungsfindung untergeordnet.

1.2 Identifikation und Umsetzung des Forschungsbedarfs

Die Forschung des BfE leistet damit einen maßgeblichen Beitrag zur Umsetzung des „partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahrens“ sowie des Ziels, „eine Lösung zu finden, die in einem breiten gesellschaftlichen Konsens getragen wird“ (StandAG). Mit seinen Forschungsaktivitäten gewährleistet das BfE zudem auch zukünftig die Sicherheit in der nuklearen Entsorgung.

Die Identifikation des Forschungsbedarfs ist ein kontinuierlicher Prozess, der sich auch in der regelmäßigen, zweijährigen Fortschreibung und Aktualisierung der Forschungsagenda widerspiegelt. Forschungsbedarfe ergeben sich einerseits bei der Umsetzung der Amtsaufgaben, sei es im Zuge der Entwicklung von Regelwerken und Verordnungen, oder im Rahmen der Genehmigungs- und/oder Aufsichtsaufgaben des BfE. Andererseits leiten sich neue Forschungsfragen und -bedarfe aus den Forschungsaktivitäten des BfE selbst ab. Hinzu kommt die Analyse der Forschungsprogramme, wie sie andere Institutionen und Organisationen definieren. Auch das Forschungsprogramm der nationalen Vorhabenträgerin BGE (Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH) wird potentiell inhaltliche und zeitliche Hinweise auf komplementäre Forschungsbedarfe des BfE geben können. Hinzu kommen die eigenen Forschungsaktivitäten mit der Definition und/oder Identifizierung offener Fragen und deren Einbindung in die nationale und internationale Forschungsgemeinschaft.

Im Hinblick auf das Standortauswahlverfahren leiten sich der Forschungsbedarf wie auch die inhaltliche und zeitliche Ausrichtung der Forschung aus den Aufgaben des StandAG ab. Zusätzlich werden gemäß §§ 26 (Sicherheitsanforderungen), 27 (Vorläufige Sicherheitsuntersuchungen) und § 38 (Langzeitdokumentation) des StandAG Rechtsverordnungen erarbeitet und erlassen. Durch Identifizierung von Lücken und Defiziten zwischen dem zur Erfüllung der gesetzlichen und untergesetzlichen Anforderungen benötigten Wissensstand und dem bestehenden Wissen lässt sich der Bedarf an weiterer und / oder tiefergehender Forschung formulieren. Darüber hinaus bindet das BfE die fachliche und nicht-fachliche Öffentlichkeit bei der Forschungsplanung ein. Das BfE bearbeitet die Forschungsfragen entweder selbst oder beauftragt Dritte. Die Vergabe erfolgt in der Regel durch öffentliche Ausschreibungen oder andere wettbewerbliche Verfahren, eine Projektförderung aufgrund von Ideenwettbewerben zu BfE-Forschungsthemen wird geprüft.

1.3 Qualitätsmanagement in der BfE-Forschung

Die Forschungsvorhaben des BfE werden einerseits aus dem Ressortforschungsplan des BMU und andererseits aus dem eigenen Forschungshaushalt des BfE finanziert. Hinzukommen können perspektivisch Forschungsprojekte mit Drittmittel-Finanzierung, beispielsweise durch eine Förderung der EU (Europäische Union).

Zur Erzielung einer hohen Qualität seiner Arbeiten ist im BfE ein Qualitätsmanagementsystem (QMS) in Anlehnung an die internationale Norm DIN EN ISO 9001 eingeführt worden. Dieses soll auch den Bereich Forschung mit einbeziehen und standardisierte Verfahren für Maßnahmen der Qualitätssicherung und Qualitätsverbesserung festlegen. Dazu gehören beispielsweise ein „Mehraugenprinzip“, ausreichende Ressourcenausstattung und regelmäßige interne Reflektionen im BfE.

Forschungsvorhaben durch Dritte werden während der Durchführung von Fachbegleiterinnen und Fachbegleitern des BfE betreut, die im jeweiligen Themenfeld wissenschaftlich qualifiziert sind. Zentrale Instrumente zur Sicherung der Einhaltung der anerkannten Standards der Forschung sind die Veröffentlichung der Ergebnisse in referierten Fachzeitschriften (bevorzugt als Open Access), die Präsentation der Ergebnisse auf Fachkonferenzen und die Diskussion der Ergebnisse in nationalen und internationalen Fachgremien. Die wissenschaftlichen Ergebnisse der Forschungsvorhaben werden ausgewertet, verständlich und barrierefrei aufbereitet und im Sinne größtmöglicher Transparenz der allgemeinen Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Bei eigenen Forschungsvorhaben wird ein BfE-internes Review-Verfahren umgesetzt und Planungen, Methoden sowie Ergebnisse werden zur Diskussion gestellt. Die Ergebnisse von Forschungsvorhaben, insbesondere bei hoher Relevanz, werden in Kolloquien diskutiert. Damit die Erkenntnisse auch langfristig verfügbar und bei Bedarf überprüfbar bleiben, sollen die eingesetzten Methoden sowie die ermittelten Ergebnisse nach festgelegten Verfahren dokumentiert werden.

1.4 Aufbau der Forschungsagenda

Die Planung der Forschung wird – für die über den Ressortforschungsplan finanzierten und für die BfE-eigenen Forschungsvorhaben – jährlich konkretisiert. In die hausinterne Abstimmung sind neben der Amtsleitung die Abteilungsleitungen als höchste fachliche Leitungsebene des BfE eingebunden.

Der Transfer der Ergebnisse in die Aufgabewahrnehmung und die Überführung in ggf. neue Forschungsprojekte bildet eine Herausforderung zur Gewährleistung einer langfristig effektiven und effizienten Forschung. Nur eine Kombination verschiedener Instrumente kann hier zu einem qualitätsgesicherten und langfristig sinnvollen Vorgehen führen. Unter anderem setzt das BfE daher die folgenden Abläufe und Maßnahmen ein:

- Die Auswertung von Forschungsvorhaben umfasst eine abschließende fachliche Bewertung.
- Durch einen hausweiten fachlichen Austausch wird das „Mehraugenprinzip“ gewährleistet.
- Durch die systematische Beteiligung an nationalen und internationalen Gremien und Arbeitsgruppen wird der Anschluss an die internationalen Entwicklungen in den jeweiligen Gebieten gewährleistet und die Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse vorangetrieben.
- Regelmäßige Evaluationen dienen der kontinuierlichen Verbesserung des wissenschaftlichen Ansatzes.

Die BfE-Forschungsagenda beschreibt die wesentlichen Forschungsfragen des BfE für den Zeitraum bis 2022 und ist damit ein zentrales Instrument der Forschungsplanung und Wegweiser für die Forschungsaktivitäten des BfE. Als ein Element der modernen Ressortforschung dient die Forschungsagenda der Umsetzung der Ziele der BfE-Forschungsstrategie. In Anlehnung an das „Konzept einer modernen Ressortforschung“ der Bundesregierung (BMBF 2007) wird die Forschungsagenda alle zwei Jahre aktualisiert und fortgeschrieben.

Die Forschungsagenda benennt und beschreibt insbesondere die Forschungsthemen und -fragen, die für die Erfüllung der Aufgaben des BfE mit Blick auf einen Zeitraum von vier Jahren relevant sind. Darüber hinaus werden auch Themenfelder betrachtet, die langfristig vorausschauende Vorarbeiten voraussetzen, um auf zukünftige Bedarfe reagieren und rechtzeitig an absehbaren Entwicklungen teilhaben zu können. Diese so genannte Vorlaufforschung betrachtet Zeithorizonte von fünf Jahren und mehr. Die Forschungsagenda spannt jedoch auch gleichzeitig den thematischen Rahmen auf, in dem sich die Forschung des BfE in den kommenden Jahren bewegen wird, und bietet damit zusätzlich einen weitreichenden Überblick zu Forschungsthemen in der nuklearen Entsorgung.

Die Formulierung und Veröffentlichung der Forschungsagenda soll die Transparenz der BfE-Forschung erhöhen und die kontinuierliche Auseinandersetzung innerhalb der Forschungsgemeinschaft, aber auch mit der Öffentlichkeit fördern. Kapitel 2 beschreibt deshalb zunächst, wie das BfE konkrete Forschungsvorhaben auf Basis der Forschungsagenda entwickelt und priorisiert. Die Kapitel drei bis fünf benennen die aufgabenbezogenen Forschungsbedarfe des BfE auf den technisch-naturwissenschaftlichen Gebieten der Reaktorsicherheit (Kapitel 3), der Zwischenlagerung und Transporte (Kapitel 4) sowie der Endlagersicherheit und des Standortauswahlverfahrens (Kapitel 5). In Kapitel 6 werden die Öffentlichkeitsbeteiligung und weitere methodische und sozialwissenschaftliche Themen, die für mehrere der Handlungsfelder des BfE von Relevanz sind, behandelt. Diese bilden Brücken zwischen vorherigen Kapiteln dieser Agenda bzw. den Fachabteilungen des BfE.

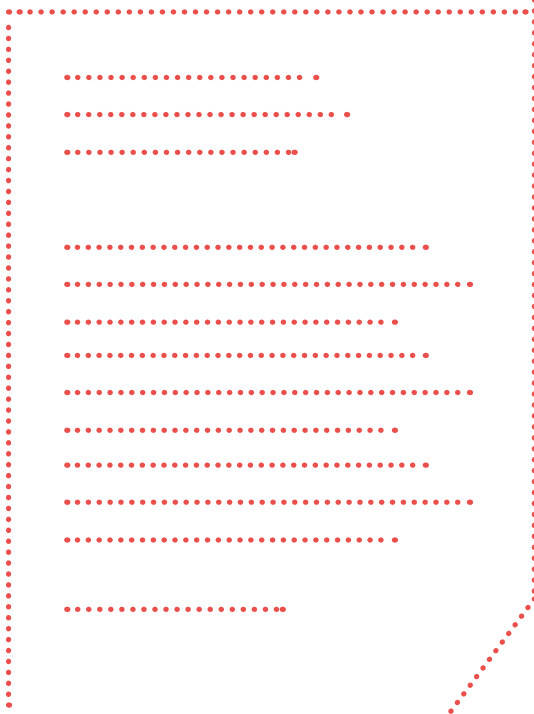
2.1

Aufstellung des BfE-
Forschungsplans

2.2

Ausführung des BfE-
Forschungsplans

Die BfE-Forschungsagenda ist das Bindeglied zwischen den übergeordneten Zielen und Forschungsfeldern der BfE-Forschungsstrategie und dem jährlich zu erstellenden BfE-Forschungsplan. In diesem werden einzelne Forschungsvorhaben konkret definiert. Die Forschungsagenda liefert somit den thematischen Rahmen und, zusammen mit der Forschungsstrategie, die Grundlage für die Auswahl und Priorisierung der zu initiiierenden Forschungsvorhaben. Hiermit kommt sie dem Ziel nach, die Ausrichtung und Priorisierung des Forschungsplans transparent und nachvollziehbar zu begründen.



2.1 Aufstellung des BfE- Forschungsplans

Vor der formalen und inhaltlichen Umsetzung der Forschungsvorhaben findet im Rahmen der Aufstellung des BfE-Forschungsplans eine Auswahl und Priorisierung der Forschungsvorhaben statt. Entsprechend seinen rechtlichen Grundlagen und den übergeordneten Zielen seiner Forschungsstrategie beurteilt und priorisiert das BfE die potentiellen Forschungsvorhaben vor allem nach folgenden Kriterien:

Relevanz für die Amtsaufgaben

Für das BfE, als Ressortforschungseinrichtung des Bundes, ist der angestrebte Nutzen der Forschungsvorhaben für anstehende bzw. laufende Amtsaufgaben des BfE von zentraler Bedeutung. Beispiele dafür sind zum einen neue, notwendige Erkenntnisse für konkrete Entscheidungen und die Erstellung von Richtlinien des BfE und zum anderen die Entwicklung bzw. Verbesserung von Hilfsmitteln, wie Simulationsprogrammen oder Untersuchungs- und Bewertungsmethoden, die vom BfE genutzt werden. Daneben ist die Identifikation neuer, bisher unberücksichtigter Themen, die inhaltliche oder zeitliche Risiken für die Erfüllung der Amtsaufgaben darstellen können, ein weiteres Kriterium für die Beurteilung von Forschungsvorhaben. In diesem Zusammenhang ist die Beurteilung des aktuellen Standes von W&T bzw. des technologischen Reifegrades einzelner Methoden und Techniken bedeutsam. Diese Beurteilung liefert Hinweise auf benötigte Zeithorizonte für einzelne Forschungsfelder und damit die zeitliche Dringlichkeit einzelner Forschungsvorhaben. Für die Priorisierung der Forschungsvorhaben ist neben der inhaltlichen auch die zeitliche Relevanz ein zentrales Kriterium.

Wissenschaftliche Exzellenz und Innovationspotential

Neben dem zentralen Kriterium der Relevanz spielt die wissenschaftliche Exzellenz der Forschungsvorhaben und ihr Innovationspotential eine wichtige Rolle. Hierzu zählt unter anderem, ob Forschungsvorhaben signifikant zur Weiterentwicklung des Standes von W&T beitragen, etablierte wissenschaftliche Konzepte und Modelle kritisch hinterfragen, überprüfen und gegebenenfalls weiterentwickeln sowie neue innovative Lösungsansätze entwickeln können.

Kompetenzerhalt und Kompetenzerweiterung

Es ist Ziel des BfE, nachhaltige Strukturen in der Forschungslandschaft zu unterstützen und ausreichend personelle und strukturelle Kapazitäten zur Lösung zukünftiger Forschungsfragen zu sichern. Weitere Kriterien für die Priorisierung von Forschungsvorhaben sind deshalb zum einen die mit ihnen verbundenen Möglichkeiten zur Ausbildung des fachlichen und wissenschaftlichen Nachwuchses, insbesondere mittels Diplom-/ Master- und Doktorarbeiten. Zum anderen spielt das Potential der Forschungsvorhaben eine Rolle, zu Kompetenzerhalt und -erweiterung innerhalb des BfE beizutragen. Bei sonst gleichwertigen Vorhaben zieht das BfE diejenigen vor, welche die Erstellung von akademischen Abschlussarbeiten ermöglichen und neue oder ergänzende Kompetenzen am BfE aufbauen.

Auswirkungen auf die zukünftige Expertengewinnung

Für die Wahrnehmung und Erfüllung seiner Amtsaufgaben wird das BfE auch auf unabhängige, externe Expertinnen und Experten, z.B. für gutachterliche Tätigkeiten, zurückgreifen müssen. Um Interessenkonflikte zu vermeiden, dürfen Expertinnen und Experten weder in Bereichen von Organisationen tätig sein, welche der Aufsicht oder Genehmigung des BfE unterstehen, noch dürfen sie gutachterlich für diese Organisationen tätig sein. Aus diesem Grund sind Wettbewerb, Unabhängigkeit und insbesondere Diversität in der Forschung zur Sicherung eines breiten Expertenwissens strategische Ziele des BfE. Das BfE beurteilt deswegen Forschungsvorhaben auch nach ihrem Potential, ob mögliche Auftragnehmerinnen und Auftragnehmer und/oder Projektpartnerinnen und Projektpartner zukünftig z. B. als unabhängige Gutachterinnen und Gutachter und Sachverständige für das BfE gewonnen werden können.

Förderung der internationalen Vernetzung des BfE

Die internationale Vernetzung, insbesondere mit anderen Regulierungsbehörden und der internationalen Wissenschaftsgemeinde, ist neben der Einbindung in die nationalen Gremien und Netzwerke ein strategisches Ziel des BfE. Forschungsvorhaben werden deswegen auch dahingehend geprüft und priorisiert, ob und wie sie die internationale Vernetzung fördern. Prioritär sieht das BfE solche Projekte, die aufgrund der Beteiligung von Organisationen aus verschiedenen Ländern Resultate erwarten lassen, die ohne internationale Vernetzung nicht oder nur in begrenzterem Umfang erzielt werden könnten. Beispiele dafür sind Vergleichsrechnungen verschiedener Gruppen (sogenannte Benchmarks) von Forschungseinrichtungen bzw. Aufsichtsbehörden oder die systematische Ermittlung und Analyse von seltenen Schäden und Ereignissen in kerntechnischen Anlagen. Für Forschungsprojekte zum Standortauswahlverfahren ist hier z. B. die Erschließung der internationalen Expertise insbesondere in den Wirtsgesteinen Tongestein und Kristallingestein zentral, die in Deutschland im Vergleich zum Wirtsgestein Salz bisher weniger umfangreich erforscht wurden.

Abgrenzung von den Aufgaben anderer Akteure

Sowohl im Bereich der kerntechnischen Sicherheit, der nuklearen Ver- und Entsorgung, der Beförderung und Aufbewahrung radioaktiver Stoffe als auch dem Standortauswahlverfahren gibt es neben dem BfE weitere Akteure mit jeweils eigenen, definierten Aufgaben und Rollen. In diesem Zusammenhang ist Doppelforschung zu vermeiden. Redundante Forschung zur Überprüfung und / oder Qualitäts- und Erkenntnissicherung ist jedoch stellenweise erforderlich. Bei der Aufstellung (Auswahl und Priorisierung) der BfE-Forschungsvorhaben ist deshalb die Komplementarität zu Forschungsfragen und -aufgaben der anderen Akteure ein Kriterium. In internationalen Vorhaben, in denen auch Betreiber oder Hersteller von kerntechnischen Anlagen bzw. Vorhabenträger für eine Standortauswahl vertreten sind, setzt sich das BfE für den Primat der Sicherheitsaspekte respektive für die Unterstützung der Aufsichtstätigkeit ein.

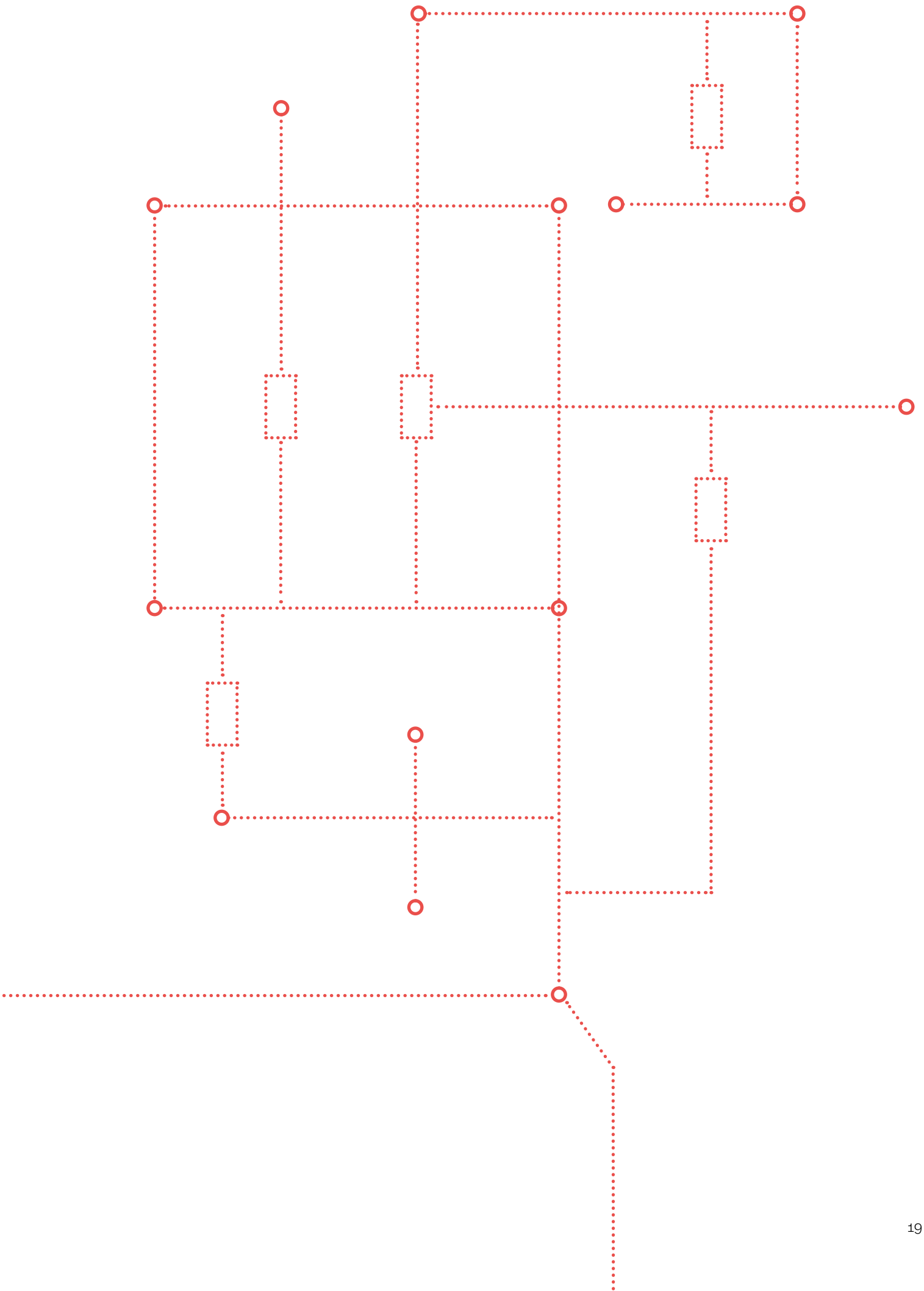
2.2 Ausführung des BfE-Forschungsplans

Je nach Art der Forschungsvorhaben (Auftragsforschung nach Vergabe im Wettbewerb, Projektförderung im Rahmen von Zuwendungen, Drittmittelprojekte, BfE-eigene Forschungsaktivitäten) greifen bei der Aufstellung des BfE-Forschungsplans verschiedene Priorisierungskriterien. Diese Kriterien werden – in jeweils angepasster Form – auch bei Projektierung und Umsetzung der Forschungsvorhaben angewandt.

Die Vergabe von Forschungsvorhaben unterliegt klaren rechtlichen Regelungen und Bedingungen. Innerhalb dieses Rahmens beurteilt das BfE vor allem die zu erwartende Qualität der Arbeiten und Ergebnisse. Diese werden anhand der beschriebenen Vorgehensweise zur Bearbeitung der Forschungsfragen sowie weiteren Leistungsmerkmalen wie Qualifikation der beteiligten Personen, Publikationen, Vorerfahrungen im jeweiligen Forschungsfeld, beurteilt. Die fachlich-wissenschaftlichen Aspekte von Projekten, die im Rahmen von Ideenwettbewerben gefördert werden könnten, werden anhand des vorliegenden sowie des zu erreichenden Standes von W&T beurteilt. In die Bewertung wird mit einbezogen, ob ein Vorhaben bereits bestehende/etablierte Methoden einsetzt oder neue und gegebenenfalls innovative Ansätze verfolgt. In diesem Zusammenhang zählt auch, welche wissenschaftliche Anschlussfähigkeit ein Vorhaben in Bezug auf mögliche relevante Forschung des BfE hat. Diesbezüglich wird auch evaluiert, wie die Forschungsergebnisse in benachbarte Forschungsfelder ausstrahlen werden und ob ein Vorhaben interdisziplinäre Betrachtungen anstrebt bzw. die Ergebnisse interdisziplinär zu verwerten plant. Zugleich ist die ungewollte Überschneidung mit laufenden oder bereits durchgeführten Projekten zu vermeiden.

Ein weiteres Kriterium ist die Beurteilung einer gegebenenfalls erfolgten oder sogar geforderten projektbezogenen Risikobetrachtung, insbesondere, wenn bei vergleichbaren früheren Projekten bereits Schwierigkeiten aufgetreten sind. Die Risikobetrachtung sollte sowohl fachlich-inhaltliche als auch organisatorische Projektrisiken abdecken.

Beispiele für Projektrisiken sind z. B. Schwierigkeiten beim länderübergreifenden Transport von radioaktiven Proben, Untersagung projektnotwendiger Genehmigungen, Probleme beim Zugang zu benötigten Infrastrukturen oder Probleme bei der Personalgewinnung. Die Angebote müssen nachvollziehbar aufzeigen, wie sie derartige Probleme vermeiden bzw. nötigenfalls lösen. Hierzu zählt auch, dass die Bieterinnen und Bieter beispielsweise ein Qualitätsmanagementsystem nachweisen. Bei allen Ausschreibungen stellt das BfE zudem sicher, dass auf Seiten der Anbieterinnen und Anbieter keine Interessenkonflikte vorliegen. Hierzu zählen insbesondere laufende Forschungsvorhaben der Anbieterinnen und Anbieter in vergleichbaren oder benachbarten Themenfeldern für die Vorhabenträgerin bzw. für Organisationen, welche der Aufsicht oder Genehmigung des BfE unterstehen. Daneben können aber auch Interessenkonflikte bestehen, wenn die Anbieterinnen und Anbieter Teile oder Systeme von kerntechnischen Anlagen, End- und Zwischenlagern sowie Sicherheitsnachweisen projektiert, gebaut oder begutachtet haben, die ganz oder teilweise Gegenstand der Forschungsvorhaben sind.



erheit

3.1
Forschungsrahmen im Bereich
der Reaktorsicherheit und
thematische Auswahl

3.2
Sicherheitsanalyse

3.3
Übergreifende Einwirkungen

3.4
Werkstoffkonzepte,
Komponentenintegrität und
Alterungsmanagement

3.5
Elektro- und Leittechnik

3.6
Sicherheit von
Forschungsreaktoren

3.7
Sicherheit weiterer Anlagen zur
nuklearen Ver- und Entsorgung

3.8
Stilllegung kerntechnischer
Anlagen

3.9
Internationale Zusammenarbeit
auf dem Gebiet der
kerntechnischen Sicherheit

3.1 Forschungsrahmen im Bereich der Reaktorsicherheit und thematische Auswahl

Das BfE ist auf dem Gebiet der Reaktorsicherheit Teil des aufsichtlichen Systems. Es ist in die Erarbeitung von bundeseinheitlichen Regeln, bundesaufsichtlichen Stellungnahmen und in die Weiterentwicklung des untergesetzlichen, kern-technischen Regelwerks in vielfältiger Weise eingebunden. Hierzu sind die Verfolgung des Standes von W&T und der Kompetenzerhalt auf dem Gebiet der Reaktorsicherheit wichtige Voraussetzungen für die Arbeitsfähigkeit des BfE. Weiterhin engagiert sich das BfE, bezüglich Aspekten der Reaktorsicherheit, in verschiedenen nationalen und internationalen regelgebenden Gremien sowie in der internationalen Zusammenarbeit. Die Forschung des BfE im Bereich der Reaktorsicherheit wird maßgeblich durch den BMU Ressortforschungsplan abgedeckt. Das BMU veröffentlicht jährlich seinen mittelfristigen Forschungsbedarf und schreibt die Umsetzungsstrategie seiner Ressortforschungsinteressen fort. Der in (BMU18) beschriebene Forschungsrahmen weist einzelne Forschungsfelder aus allen relevanten Bereichen der Umweltpolitik aus. Im Bereich Reaktorsicherheit unterscheidet der Forschungsrahmen die Forschungsfelder:

- „Sicherheit in der Kerntechnik (inklusive Stilllegung kerntechnischer Anlagen)“,
- „Sicherheit der nuklearen Ver- u. Entsorgung“ sowie
- „Strahlenschutz“.

Für die Forschungsfelder „Sicherheit in der Kerntechnik (inklusive Stilllegung kerntechnischer Anlagen)“, und „Sicherheit der nuklearen Ver- u. Entsorgung“ ist das BfE zuständig, wohingegen für das Forschungsfeld „Strahlenschutz“ das Bundesamt für Strahlenschutz federführend zuständig ist.

Die nachfolgenden Abschnitte in Kapitel 3 beschreiben die Forschungsthemen des BfE im Bereich der Reaktorsicherheit. Sie sind integraler Bestandteil des Ressortforschungsbedarfs des BMU auf diesem Gebiet.

Thematische Auswahl auf dem Gebiet der Reaktorsicherheit

Das AtG (§ 7 Absatz 2 Nr. 3) verpflichtet den Genehmigungsinhaber von Kernkraftwerken (KKW), „die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage“ zu treffen. Die Verfolgung des Standes von W&T ist dadurch ebenfalls Aufgabe der entsprechenden Aufsichts- und Genehmigungsbehörden sowie im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit insbesondere auch Aufgabe der im BMU angesiedelten Bundesaufsicht.

Die Bundesaufsicht greift bei wissenschaftlich-technischen Fragestellungen auf dem Gebiet der Reaktorsicherheit auf die Expertise des BfE zurück (Vgl. § 2 II BfKEG), um:

- das entsprechende Regelwerk auf dem aktuellen Stand von W&T zu halten,
- dessen sachgerechte Anwendung prüfen zu können und
- die deutschen Interessen gegenüber dem Ausland wahrnehmen zu können.

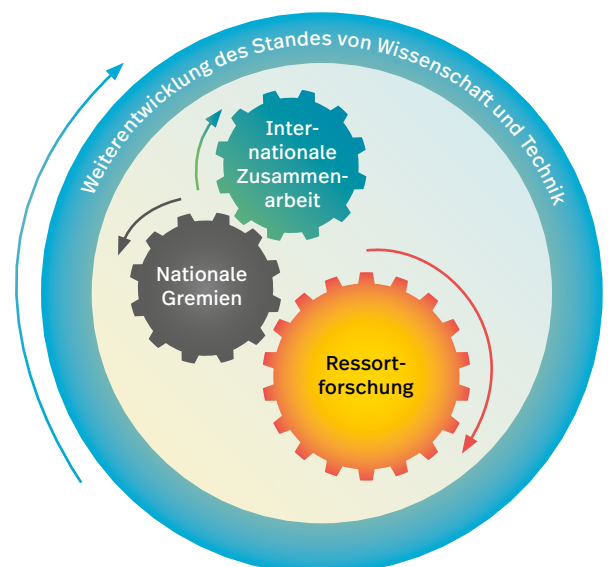


Abbildung 1: Rolle der Ressortforschung zur Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik

Themenfeld	Einzelthemen (stichwortartig)
Reaktorkern, Brennstoffe und Kernmaterialien	Reaktorkern, Brennelementverhalten, Rechenmodelle zur Kernsimulation
Werkstoffe und Alterung	Alterungsprozesse von Werkstoffen, zerstörungsfreie Prüfmethode, Alterungsmanagement, Analyse von Schäden an Komponenten beispielsweise an passiven metallischen Komponenten, Komponentenintegrität unter Störfallbedingungen
Interne übergreifende Einwirkungen	Gemeinsam verursachte Ausfälle, Brandereignisse und Brandschutzkonzepte, anlageninterne Überflutung
Einwirkungen von außen	Auslegung gegenüber naturbedingten und zivilisatorischen externen Einwirkungen wie z. B. Erdbeben, Hochwasser, Flugzeugabstürze und Explosionen
Anlagen- und Systemverhalten, Unfallabläufe, Sicherheitsanalyse	Analyse des Anlagen- und Systemverhaltens vom Normalbetrieb bis hin zu Unfällen mit Kernschaden durch Computermodelle, Unfallablaufrechnungen, Barrierenwirksamkeit, Ermittlung von Quelltermen, Methoden zur quantitativen Ermittlung des Anlagenrisikos in probabilistischen Sicherheitsanalysen, Bewertung der Wirksamkeit des anlageninternen Notfallschutzes
Elektrische Einrichtungen und Leittechnik	Auslegung und Sicherheit der elektrischen Eigenbedarfsanlage, Leittechnik des Sicherheitssystems, softwarebasierte Leittechnik, IT-Sicherheit
Stilllegung	Stilllegungskonzepte, Gewährleistung der Sicherheit in der Nachbetriebs- und Stilllegungsphase, radiologische Charakterisierung von Abfällen, Freigabe, Abfallmengenprognose
Mensch-Technik-Organisation (MTO)	Sicherheitsmanagement und Sicherheitskultur, Einfluss menschlicher Faktoren, Reduktion der Unsicherheit bei probabilistischen Sicherheitsanalysen im Bereich Personalhandlungen, Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen

Tabelle 1: Kurzbeschreibung der Forschungsthemenfelder im Bereich der Kernkraftwerke, Forschungsreaktoren und Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung

Damit wird deutlich, dass die Forschung im Bereich der Reaktorsicherheit grundsätzlich ein sehr breites Spektrum von Themen abdecken muss. Die Themen stehen durch zahlreiche vernetzte Prozesse in einem sehr engen Zusammenhang und werden sowohl in der nationalen Gremienarbeit, der internationalen Zusammenarbeit als auch in internationalen Gremien bearbeitet. Die Abbildung 1 illustriert die zentrale Rolle der Ressortforschung. Die Tabelle 1 gibt einen allgemeinen und zusammenfassenden Überblick über die Themenfelder im Bereich der Reaktorsicherheit. Die Themenfelder beschäftigen sich mit Fragen zu Brennstoffen und Materialien, Alterungsprozessen von Werkstoffen, internen und externen übergreifenden Ereignissen, dem Anlagen- und Systemverhalten sowie mit Unfallabläufen und reichen bis hin zu übergeordneten Themen wie dem Einfluss von menschlichen, technischen und organisatorischen Faktoren (MTO) auf die Sicherheit.

Hinzu kommen Fragestellungen aus den Bereichen anlageninterner Notfallschutz, Stilllegung sowie der nuklearen Ver- und Entsorgung. Aus Sicht des BfE liegen die Schwerpunkte der nächsten Jahre in den Themenfeldern Elektro- und Leittechnik, hier insbesondere die IT-Sicherheit von Kernkraftwerken, Stilllegung, Regelwerksentwicklung für Forschungsreaktoren und im gesamten Bereich MTO.

Das Querschnittsthema MTO wird im Kapitel 6 adressiert. Der in Kapitel 3 beschriebene Forschungsbedarf konzentriert sich auf Sicherheitsfragen bezüglich Kernkraftwerken, Forschungsreaktoren und Einrichtungen zur nuklearen Ver- und Entsorgung in Deutschland, unabhängig davon, ob sie sich im Betrieb oder in Stilllegung befinden. Darüber hinaus behandelt Kapitel 3 Forschungsfragen, die sich aus der internationalen Zusammenarbeit auf dem Gebiet Reaktorsicherheit ergeben.

3.2 Sicherheitsanalyse

Probabilistische Sicherheitsanalyse

Als Ergänzung zur kontinuierlichen, aufsichtlichen Überprüfung der Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland schreibt das AtG in § 19a eine regelmäßige Sicherheitsüberprüfung (SÜ) vor. Ein wichtiger Teil der SÜ ist die probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA), die der Betreiber in eigener Verantwortung durchzuführen und der Aufsichtsbehörde vorzulegen hat. Probabilistische Sicherheitsanalysen beruhen auf der wahrscheinlichkeitsmäßigen Beschreibung von Versagensereignissen in technischen Systemen. In einer PSA für Kernkraftwerke werden, ausgehend von einem Spektrum auslösender Ereignisse, die Häufigkeiten bestimmter unbeherrschter Endzustände anhand von möglichen Ereignisabläufen berechnet. Hierbei wird ein Anlagenmodell verwendet, das die Versagenswahrscheinlichkeiten von Sicherheitsfunktionen ausgehend von den Betriebsweisen der Systeme und ihren Wirksamkeitsbedingungen anhand von Zuverlässigkeitsdaten einzelner Komponenten zu bestimmen gestattet. Zur Erstellung einer PSA ist folglich ein breites Spektrum an Wissen und Methoden notwendig, das Bereiche wie z. B. Anlagenverhalten und -dynamik, Ereignis- und Unfallabläufe, Fehler- und Versagensarten, Simulationen, Auswertung von Betriebserfahrung, Schätzung von Ausfallraten und Häufigkeiten von Ereignissen sowie Personalhandlungen und menschliche Zuverlässigkeit berührt. Ein weiteres Feld stellt die PSA-Auswertung und Anwendung dar, z. B. zur Untersuchung der Ausgewogenheit des Sicherheitskonzepts.

Näheres hierzu ist im „Leitfaden probabilistische Sicherheitsanalyse“ geregelt, der von mehreren technischen Fachbänden mit detaillierten Methodenbeschreibungen und -empfehlungen untersetzt ist. Die Fachbände werden vom „Facharbeitskreis Probabilistische Sicherheitsanalysen für Kernkraftwerke“ (FAK15, ein vom BfE geleitetes Expertengremium) erarbeitet und fortgeschrieben. Daneben existieren eine Reihe weiterer internationaler Standards (IAEA, ASME, etc.) zur PSA. Mit Bekanntmachung der „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ ist es auch über die Sicherheitsüberprüfung gemäß § 19a AtG hinaus notwendig, Änderungen an der Anlage oder ihrer Betriebsweise sowie Ereignisse und Phänomene, die im Betrieb aufgetreten oder bekannt geworden sind, im Rahmen des

Aufsichts- und Genehmigungsverfahrens einer probabilistischen Bewertung zu unterziehen. Hierzu hat der Facharbeitskreis PSA im Jahr 2017 eine methodische Empfehlung verabschiedet, die durch das BfE herausgegeben wurde.

Für die Fortschreibung der Fachbände zur PSA sowie die Bundesaufsicht über Kernkraftwerke ist eine Verfolgung des internationalen Standes von W&T auf dem Gebiet der probabilistischen Sicherheitsanalyse notwendig. Neben der PSA im Kontext der Sicherheitsüberprüfung nach § 19a AtG und der Anwendung der Sicherheitsanforderungen ist die PSA (z. B. in Form einer „Referenz-PSA“ für einen generischen deutschen Anlagentyp) ein wichtiges Untersuchungs- und Forschungsinstrument. Sie wird z. B. im Rahmen von sogenannten Precursor-Analysen bei der Analyse von Ereignissen aus der Betriebserfahrung verwendet.

Zukünftig sind auf diesem Gebiet u. a. die folgenden Forschungsfragen relevant:

- In welchen Bereichen muss die Referenz-PSA für deutsche Druckwasserreaktoren ertüchtigt und dem Stand von W&T angepasst werden?
- Welche probabilistischen Methoden sind für die Stilllegungs- und Nachbetriebsphase relevant?
- Wie kann die probabilistische Sicherheitsanalyse im Bereich der elektrischen Eigenbedarfsanlage erweitert werden?
- Welche Schlüsse lassen sich aus der Auswertung der aktuellen Betriebserfahrung hinsichtlich gemeinsam verursachter Ausfälle ableiten?

Grundlagen der technischen Zuverlässigkeit

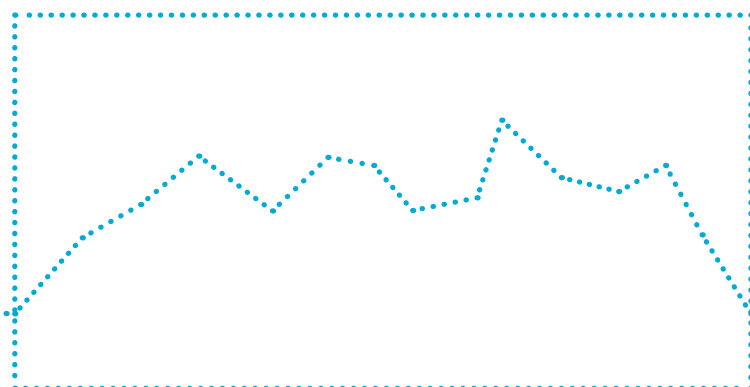
Die Sicherheit unterschiedlichster kerntechnischer Anlagen hängt vom zuverlässigen Funktionieren technischer Einrichtungen ab. Dies sind z. B. Sicherheitssysteme im Kernkraftwerk, die im Anforderungsfall in die verfahrenstechnischen Prozesse eingreifen und deren Parameter innerhalb zulässiger Bereiche regeln. Insofern hat das zuverlässige Funktionieren derartiger Einrichtungen einen direkten Einfluss auf die Sicherheit der Anlage. Im Rahmen der Bewertung der Sicherheit von kerntechnischen Anlagen sind daher regelmäßig Überlegungen zur technischen Zuverlässigkeit anzustellen. Darüber hinaus sind Methoden der Zuverlässigkeitsbewertung Gegenstand und Grundlage vieler sowohl branchenspezifischer als auch generischer technischer Normen und Richtlinien (z. B. DIN IEC-Standards) zur Qualifizierung

von Komponenten in kerntechnischen Anlagen. Ein Verständnis für solche Qualifizierungsgrundsätze auch aus anderen Industriedomänen ist daher notwendig, wenn z. B. der Einsatz nach entsprechenden Regelwerken qualifizierter Komponenten bewertet werden soll. Ebenso ist der aktuelle Stand von W&T für die Weiterentwicklung des kerntechnischen Regelwerks relevant. Zur Bewertung der Zuverlässigkeit technischer Einrichtungen kommt eine Vielzahl von Methoden zum Einsatz. Diese können anhand verschiedener Gesichtspunkte kategorisiert werden, z. B. in deterministische und probabilistische Methoden, oder in qualitative, semiquantitative und quantitative Methoden. Die letztgenannten verfolgen das Ziel, insbesondere Zuverlässigkeitsaussagen zahlenmäßig (in den meisten Fällen auf probabilistischer Basis) zu beschreiben. Dies betrifft sowohl Hardware als auch Software. Hinsichtlich der probabilistischen Methoden besteht ein enger Bezug zur Methodik, die bei der probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA) für Kernkraftwerke zur Anwendung kommt. Weiter sind statistische Methoden zur Gewinnung von Zuverlässigkeitsdaten aus der Betriebserfahrung sowie Methoden zur Unsicherheitsbewertung und -quantifizierung (Sensitivitätsanalyse), besonders bei quantitativen Ansätzen der Zuverlässigkeitsbewertung, Teil dieses Arbeitsfelds. Darüber hinaus finden die genannten Methoden in zahlreichen Forschungsvorhaben, die das BfE vergibt, als „Werkzeug“ vielfältige Anwendung. Zum Zweck der Verfolgung des Standes von W&T und des Kompetenzerhalts, sind aus diesem Grund in der Vergangenheit zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu Methoden der technischen Zuverlässigkeit von BfE-Personal im eigenen Hause durchgeführt worden. Diese Arbeiten sichern die zukünftige Auskunftsfähigkeit und Beratungsfähigkeit des BfE und ermöglichen die kompetente Beteiligung an der technischen

Regelsetzung und Normung.

Als exemplarische Themen und Fragestellungen in diesem Arbeitsfeld lassen sich folgende Fragen anführen:

- Wie lassen sich Modelle und Methoden zur Bewertung und Quantifizierung der Zuverlässigkeit technischer Systeme (Fehlerbaummodelle, Markov- und Semi-Markov-Modelle, Petrinetze, etc.), insbesondere für Belange der Kerntechnik, weiterentwickeln? Welchen Einschränkungen unterliegt ihre Aussagekraft?
- Welche Zuverlässigkeitskenngrößen und Risikoindikatoren sind für welchen Zweck adäquat?
- Wie lassen sich Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalysen auswerten und wie müssen Ergebnisse interpretiert werden? Was sind hierzu geeignete Methoden (z. B. Sensitivitäts- und Importanzanalysen)?
- Wie sind nach nicht-kerntechnischen Regelwerken qualifizierte Komponenten für den Einsatz in kerntechnischen Anlagen zu bewerten?
- Wie sind Unsicherheiten in den Eingangsdaten von Modellen zu bewerten? Welche Methoden der Sensitivitätsanalyse sind für welchen Zweck am geeignetsten? Wie wirken sich Unsicherheitsbeiträge in den Eingangsgrößen auf Ergebnisse aus?
- Wie ist die Zuverlässigkeit von Software zu bewerten, und was sind geeignete Maßnahmen, um die Zuverlässigkeit von Software sicherzustellen?



3.3 Übergreifende Einwirkungen

Zivilisatorische und naturbedingte Einwirkungen von außen

Unter Einwirkungen von außen (EVA) werden die externen Ereignisse aus der Umgebung der kerntechnischen Anlage verstanden, die das Potential für einen redundanzübergreifenden Ausfall von (Sicherheits-) Einrichtungen besitzen. Hierzu zählen u. a. extreme Wettersituationen, Erdbeben, Hochwasser und externe Überflutung, biologische Phänomene, Explosionsdruckwellen sowie Flugzeugabsturz. Hierbei unterscheidet man gemäß ihres Ursprungs zwischen naturbedingten und zivilisatorischen EVA. Um die nukleare Sicherheit zu gewährleisten, müssen Kernkraftwerke aufgrund der Anforderungen verschiedener Regelwerke gegen standortrelevante Einwirkungen von außen ausgelegt sein.

Das BfE berät die Bundesaufsicht über Kernkraftwerke zu Fragen im Bereich EVA. Darüber hinaus ist es an der Weiterentwicklung des nationalen kerntechnischen Regelwerks (z. B. in der KTA) und der internationalen Zusammenarbeit auf diesem Gebiet beteiligt. In der probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA), die im Rahmen der Sicherheitsüberprüfung nach § 19a AtG durch den Betreiber durchzuführen ist, sind Bewertungen zu den Lastfällen Flugzeugabsturz, Explosionsdruckwelle, externe Überflutung und Erdbeben anzustellen. Die hierzu vorliegenden technischen Fachbände werden durch das BfE herausgegeben. Um diese Aufgabe erfüllen zu können, verfolgt das BfE den aktuellen Stand von W&T im Bereich EVA und beauftragt bei Bedarf Studien und Untersuchungsvorhaben durch externe Forschungseinrichtungen. Die Bewertung des Schutzes gegen naturbedingte und zivilisatorische EVA kann mithilfe verschiedener Methoden erfolgen. Grundsätzlich lassen sich diese in deterministische und probabilistische Methoden kategorisieren. Der geeignete Ansatz ist dabei von den Randbedingungen wie z. B. dem Umfang der verfügbaren Informationen über die betrachtete Anlage, der Art der Einwirkung und den verfügbaren Daten abhängig.

Die auf diesem Gebiet durchgeführten Forschungsarbeiten haben das Ziel, den internationalen Stand von W&T hinsichtlich naturbedingter und zivilisatorischer Einwirkungen von außen weiter zu verfolgen und Erkenntnisse darüber zu liefern, ob

auch in Zukunft ein hinreichender Schutz gegen EVA gewährleistet ist. Hieraus sollen Handlungsempfehlungen entwickelt werden, die gewährleisten, dass mögliche Risiken frühzeitig erkannt und Vorsorgemaßnahmen abgeleitet werden können. Ebenso fließen die Untersuchungsergebnisse in die Weiterentwicklung des kerntechnischen Regelwerks und in die internationale Zusammenarbeit ein.

Sicherheitsfragen im Rahmen von zivilisatorischen und naturbedingten Einwirkungen von außen ergeben sich aus dem laufenden Betrieb und der Nachbetriebsphase der deutschen Kernkraftwerke. Abweichungen von vorhandenen Auslegungsmerkmalen müssen auf der Grundlage des aktuellen Regelwerks untersucht und bewertet werden. Dies betrifft u. a. die Kombination mehrerer zu unterstellender Ereignisse, die laut den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ (SiAnf) in Betracht zu ziehen sind.

Die Identifizierung und Bewertung von Unsicherheiten bei der Durchführung einer PSA bilden den derzeitigen Schwerpunkt der Fragestellungen in diesem Themenfeld. Beispielsweise ist die Frage zu klären, wie Unsicherheiten bei der realistischen Bewertung der Standortgefährdung systematisch erfasst werden können. Dazu ist es wichtig, das gesamte standortspezifische Spektrum übergreifender Einwirkungen von außen zu erfassen und zu bewerten. Ggf. müssen auch die Gefährdungsanalysen bei kombinierten naturbedingten Einwirkungen neu bewertet werden. Eine Neubewertung muss auch dann vorgenommen werden, wenn sich die Anlage im Nichtleistungsbetrieb bzw. in der Stilllegungsphase befindet. All dies setzt eine adäquate Modellierung langandauernder Ereignisse (> 24 h) voraus.

Auswertung der internationalen Betriebs- erfahrung auf dem Gebiet des Brandschutzes und der gemeinsam verursachten Ausfälle

Ereignisse mit gemeinsam verursachten Ausfällen (GVA) können die Verfügbarkeit von Sicherheitssystemen in Kernkraftwerken signifikant beeinträchtigen. Gemeinsam verursachte Ausfälle sind Ereignisse, bei denen mehrere gleichartige Komponenten in verschiedenen, parallel vorhandenen Teilsträngen von Sicherheitssystemen im Anforderungsfall auf Grund der gleichen Ursache gleichzeitig oder nacheinander ausfallen können.

Die Auswertung probabilistischer Sicherheitsanalysen (PSA) zeigt, dass die Schadenshäufigkeiten in den PSA-Ergebnissen von GVA-Ereignissen dominiert werden. Dies gilt insbesondere für Sicherheitssysteme mit einem hohen Redundanzgrad. Zwar ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Einzelfehlers im Allgemeinen höher als die für das Auftreten eines GVA, dafür sind die Auswirkungen von GVA aber weitreichender, da mehrere Teilstränge gleichzeitig ausfallen. Deshalb werden Informationen und Daten auf der Basis der Betriebserfahrung zu GVA-Ereignissen in einer Reihe von Ländern (u. a. in Deutschland) systematisch gesammelt, in einem OECD-Projekt nach einheitlichen Kriterien in einer Datenbank dokumentiert und mit Hilfe verschiedener Modelle analysiert. Im Rahmen des internationalen GVA Daten Austauschprojekts arbeiten Expertinnen und Experten zusammen, um gezielt die bewertungsrelevanten Informationen zu GVA in einer Datenbank zu erfassen und auszutauschen. Das Themengebiet GVA leistet einen substantiellen Beitrag zu Verfolgung des nationalen und internationalen Standes von W&T auf dem Gebiet der GVA-Phänomene sowie von probabilistischen Sicherheitsanalysen.

Auch für den Brandschutz in Kernkraftwerken existiert ein OECD-Projekt, in dem die Betriebserfahrung von Brandereignissen systematisch erfasst und ausgewertet wird. Die bisher durchgeführten (periodischen) Sicherheitsüberprüfungen haben die sicherheitstechnische Relevanz des Brandschutzes in Kernkraftwerken belegt. Vor diesem Hintergrund sind Daten zur Ermittlung einer möglichst realistischen Brandeintrittshäufigkeit und auch das Vorhandensein validierter Rechenprogramme mit geeigneten Brandmodellen auf der Basis von Experimentalprogrammen zur detaillierten Beurteilung der Brandschutzkonzepte notwendig. Diese sehr komplexen Fragestellungen erfordern ein international koordiniertes Vorgehen (u. a. Benchmarks), um entsprechend belastbare Informationen zu erhalten.

Nach Auswertung der internationalen Betriebserfahrung auf dem Gebiet des Brandschutzes und der GVA lassen sich dynamische Zuverlässigkeitsmodelle dazu heranziehen, Systeme probabilistisch zu bewerten. Darüber hinaus

lassen sich aber auch Modelle zur Bewertung und Quantifizierung von GVA, von wiederkehrenden Prüfungen, oder zur Beschreibung der Brandausbreitung im Rahmen von probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA) behandeln. Es besteht an dieser Stelle ein enger Zusammenhang zur Weiterentwicklung von GVA-Modellen, die z. B. in der Lage sind, GVA-Wahrscheinlichkeiten für aktive anlagentechnische Komponenten zu bestimmen, sowie der Nutzung von Untersuchungen zur Ermittlung von reaktortypspezifischen Brandeintrittshäufigkeiten für ausgewählte Raumbereiche bzw. Komponenten. Zur Anwendung dieser Methoden sind jedoch noch weitere praktische Hilfestellungen notwendig. Diese sollen z. B. aus den künftigen Ergebnissen der OECD-Projekte abgeleitet werden können.

Bisherige Erfahrungen aus der Mitarbeit in der OECD-Arbeitsgruppe zum Brandschutz sind in die Überarbeitung der KTA-Regeln zum Brandschutz und den methodischen Empfehlungen des Facharbeitskreises „Probabilistische Sicherheitsanalysen für Kernkraftwerke“ (FAK PSA) eingeflossen. Außerdem wurden aufgrund der Ergebnisse der bisherigen Forschungsvorhaben auf diesem Gebiet in der KTA 2101.1 (Grundlagen des Brandschutzes) jetzt auch die deterministische Brandgefahrenanalyse und die probabilistischen Brandanalysen (Brand-PSA) verankert.

Forschungsprojekte in diesem Themenfeld haben die übergeordnete Aufgabe, wie bisher auch, die Auswertung der aktuellen internationalen Betriebserfahrung hinsichtlich GVA und des Brandschutzes zu ermöglichen. Ziel ist die Überprüfung und Verifizierung statistischer Ansätze und Methoden und damit die Verringerung von Aussageunsicherheiten in den Modellen. Dabei ist zu überprüfen, inwiefern sich die Erkenntnisse der internationalen Betriebserfahrung in Bezug auf GVA und des Brandschutzes auf deutsche Anlagen, unter besonderer Berücksichtigung der Nachbetriebs- oder Stilllegungsphase, übertragen lassen. Weiterhin soll die Nutzbarkeit der Datenbanken in Bezug auf die Anwendbarkeit für aufsichtliche Fragestellungen weiter verbessert werden.

3.4 Werkstoffkonzepte, Komponenten- integrität und Alterungs- management

Zur Verfolgung und Fortschreibung des Standes von W&T auf diesem Gebiet beauftragt das BfE – ergänzend zu eigenen Literaturstudien – Studien durch externe Forschungseinrichtungen, darunter zum Beispiel die Entwicklung und Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmethode zur Beurteilung von Schädigungsmechanismen bei druckführenden Komponenten unter definierten Störbedingungen. Zudem nimmt das BfE an nationalen und internationalen Fachkonferenzen teil und ist in nationalen und internationalen Gremien vertreten, darunter dem Ausschuss Druckführende Komponenten und Werkstoffe der Reaktorsicherheitskommission (RSK DKW), dem Unterausschuss Mechanische Komponenten des Kerntechnischen Ausschusses (KTA UA-MK) sowie anderen, auch regelgebenden Gremien auf internationaler Ebene. Die Auswertung der nationalen und internationalen Betriebserfahrung bezüglich der Schädigungsmechanismen an Werkstoffen und Komponenten in KKW belegen die hohe Bedeutung eines wirksamen Alterungsmanagements in Kernkraftwerken. Unabdingbar für das BfE als zuständige Fachbehörde ist somit der langfristige Erhalt der Beratungskompetenz auf diesem Teilgebiet der kerntechnischen Sicherheit. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf mögliche Vorkommnisse im internationalen Bereich. Fragestellungen in diesem Themenfeld sind bspw.:

- Welche Systeme und Komponenten werden in der Nachbetriebs- und Stilllegungsphase noch benötigt und welche Störfälle sind hier zu beachten?
 - Welche Prüfmöglichkeiten gibt es für die Rohrleitungen in Systemen zur Nachwärmeabfuhr?
 - Gibt es neue Erkenntnisse zu bekannten oder bisher als nicht relevant eingestuften Schadensmechanismen?
 - Sind Weiterentwicklungen des kerntechnischen Regelwerks im Ausland (z. B. in den USA) relevant für das deutsche kerntechnische Regelwerk?
 - Wie sind die derzeit an die Materialkennwerte von Brennelementen gestellten Anforderungen vor dem Hintergrund aktueller Forschungsergebnisse und unter Berücksichtigung der aufgetretenen Schäden und Verformungen an Brennelementen zu bewerten?
- Welche Unterschiede gibt es zwischen den nach einer Reparatur zu erbringenden Nachweisen, je nachdem, ob eine Druckprüfung durchgeführt werden kann oder nicht? Wie ist dies vor dem Hintergrund aktueller Erkenntnisse zu bewerten?
 - Welche Weiterentwicklungen gibt es bei Methoden zur Berücksichtigung des Einflusses plastischer Verformungen bei Ermüdungsanalysen?
 - Gibt es über die für den Leistungsbetrieb von KKW geübte Praxis des Alterungsmanagements hinausgehende Herausforderungen bzw. Anforderungen in der Nachbetriebs- oder Stilllegungsphase?
 - Welche Erkenntnisse zum Alterungsmanagement könnten für die Nachbetriebs- und Stilllegungsphase von KKW wichtig sein?
 - Können Fehlermechanismen identifiziert werden, die in der Nachbetriebs- und Stilllegungsphase relevant sind? Welche neuen, während des Leistungsbetriebs nicht beobachtbaren Schädigungsmechanismen können auftreten? Zeigen insbesondere auf Grund der veränderten Betriebs- und Mediumszustände in der Nachbetriebs- und Stilllegungsphase die bekannten Schädigungsmechanismen ein verändertes Zeitverhalten?

3.5 Elektro- und Leittechnik

Leittechnik des Sicherheitssystems von Kernkraftwerken

Das Wirken zahlreicher Einrichtungen des Sicherheitssystems von kerntechnischen Anlagen setzt eine kontinuierliche Überwachung verschiedenster Anlagenparameter und Prozessgrößen, die Verarbeitung der entsprechenden Messwerte und hierauf beruhend z. B. die Auslösung von Schutzaktionen voraus. Die hierzu nötigen leittechnischen Einrichtungen, d. h. Geräte und Systeme zum Messen, Steuern, Regeln, Überwachen, Bedienen und Anzeigen sowie zum Ansteuern von Schutzaktionen, bestimmen daher wesentlich die Sicherheit der Anlage. Entsprechend ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung sind Leittechnikfunktionen daher verschiedenen Kategorien zugeordnet, für die jeweils abgestufte Auslegungsanforderungen bestehen, die in verschiedenen Regelwerken definiert sind.

In unterschiedlichen Industrie- und Technologie-domänen existiert eine Vielzahl von Normen und Standards, die sich mit für die Leittechnik relevanten Aspekten beschäftigen und die einem raschen Wandel unterliegen (insbesondere in Bezug auf Software-Aspekte). Eine kontinuierliche Analyse dieser Regelwerke zur Erfassung des Standes von W&T und ein aktueller Überblick über marktübliche Technologien sind daher erforderlich. Eine Analyse der nationalen und internationalen Betriebserfahrung liefert Hinweise auf Verbesserungspotential und mögliche Schwachstellen bei der Sicherheitsbewertung, Validierung und Qualifizierungen von Systemen, Geräten und der eingesetzten Software. Darüber hinaus können Analysen und Modelle von leittechnischen Systemen und Funktionen, z. B. mithilfe von Modellen der Zuverlässigkeitstheorie, wichtige Informationen für Sicherheitsbewertungen liefern. Diese theoretischen Untersuchungen können durch Datenerhebungen aus der Betriebserfahrung oder Versuche in Testfeldern ergänzt oder untermauert werden.

Mit zunehmendem Alter der Sicherheitsleittechniksysteme und mehreren Jahren Nachbetrieb und Rückbauphase, bekommen der Austausch ausgefallener Komponenten durch Redesign-Komponenten und die Umrüstungen

noch benötigter, sicherheitswichtiger Leittechniksysteme eine zunehmende Bedeutung. Eine zunehmende Zahl entsprechender Anträge der Betreiber ist zu erwarten und von Behördenseite zu bewerten. Im internationalen Umfeld werden gegenwärtig zahlreiche Modernisierungs- und Nachrüstprojekte aufgrund des Alters der verbauten Leittechnikkomponenten verfolgt. Hiervon betroffen sind in besonderem Maße softwarebasierte Einrichtungen. Das BfE beteiligt sich am internationalen Erfahrungsaustausch insbesondere bezüglich softwarebasierter Leittechnik und wirkt an der Erstellung von Standards und Empfehlungen mit.

Die Auswertung des Standes von W&T gibt Hinweise auf wichtige zukünftige Forschungsthemen und Fragestellungen in diesem Arbeitsfeld:

- Welche Fehlerarten sind in softwarebasierten Systemen denkbar, und wie wirken sie sich aus?
- Wie lassen sich Sicherheit und Zuverlässigkeit von softwarebasierten Systemen validieren und verifizieren?
- Wie sind neuere Technologien in der Leittechnik (z. B. programmierbare Logikbausteine wie FPGA) aus sicherheitstechnischer Sicht zu bewerten? Welche Bewertungsmaßstäbe und -methoden sind geeignet?
- Wie lässt sich die Zuverlässigkeit insbesondere von softwarebasierten Leittechniksystemen modellieren, und wie lassen sich die Modelle untermauern? Welche Fragestellungen können mit den Modellen bewertet werden?
- Wie entwickeln sich Anforderungen und Regelwerke in anderen Technologie- und Industrie-domänen?
- Wie lassen sich IT-Sicherheit, Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit bzw. Verfügbarkeit miteinander vereinbaren?

Einrichtungen der elektrischen

Eigenbedarfsversorgung von Kernkraftwerken

Kernkraftwerke (KKW) sind auf eine zuverlässige Versorgung mit elektrischer Energie angewiesen, da sie über zahlreiche elektrisch betriebene, sicherheitstechnisch wichtige Systeme verfügen. Zur Verfolgung und Fortschreibung des Standes von W&T auf dem Gebiet der elektrischen Ein-

richtungen in KKW führt das BfE Forschungsvorhaben durch. Diese umfassen z. B. die Entwicklung und Anwendung von Simulationsverfahren zur Abbildung des Verhaltens der elektrischen Einrichtungen unter definierten Störbedingungen. Zudem nimmt das BfE an nationalen wie internationalen Fachkonferenzen teil und ist in nationalen wie internationalen Gremien vertreten, darunter dem Ausschuss Elektrische Einrichtungen der Reaktorsicherheitskommission (RSK EE), dem Unterausschuss Elektro- und Leittechnik des Kerntechnischen Ausschusses (KTA UA-EL), der Working Group on Electrical Power Systems (WGELEC) der Nuclear Energy Agency (NEA) der Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) und anderen, auch regelgebenden Gremien auf nationaler (KTA, BMU) wie internationaler (International Atomic Energy Agency, IAEA) Ebene. Zahlreiche Ereignisse in KKW mit teils katastrophalen Folgen hatten Ursachen im Bereich der elektrischen Energieversorgung. Dies zeigt die hohe Bedeutung einer zuverlässigen Versorgung der elektrischen Einrichtungen in Kernkraftwerken. Vor diesem Hintergrund ergeben sich aktuell folgende Fragestellungen in diesem Themenfeld:

- Auswirkungen der Energiewende in Deutschland (Ausstieg aus der Kernenergie, Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien, Netzbau) auf die Versorgung von in Betrieb, Nachbetrieb oder Stilllegung befindlichen Kernkraftwerken und anderen auf eine zuverlässige Energieversorgung angewiesenen, kerntechnischen Einrichtungen.
- Auswirkungen der sich ändernden Anforderungen des europäischen Verbundnetzes auf angebundene nationale Netze bzw. die an diese Netze angeschlossenen Kraftwerke.
- Auswertung der sich noch immer erweiternden Erkenntnisse („Lessons Learned“) aus den katastrophalen Ereignissen in Fukushima, bei denen insbesondere das Versagen der elektrischen Energieversorgung der Sicherheitseinrichtungen eine zentrale Rolle gespielt hat.
- Analyse der Auswirkungen von Änderungen im nationalen wie internationalen Regelwerk (KTA, WENRA, IAEA, etc.).
- Vielfältige, konkrete Fragestellungen zu technischen Themen wie z. B. Blitzschutz, Einfluss von Sonnenstürmen, Alterung elektrischer Einrichtungen, Aus- und Bewertung von Ereignissen.

IT-Sicherheit für kerntechnische Anlagen

Gemäß AtG muss der erforderliche Schutz kerntechnischer Anlagen gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD) gewährleistet sein. Unter Beteiligung des BfE wurde dazu auch die „SEWD-Richtlinie IT“ erarbeitet, die spezifische Anforderungen an die IT-Sicherheit der Leittechnik mit sicherheitstechnischer Bedeutung definiert. Danach sind die Betreiber von Kernkraftwerken (KKW) verpflichtet, ein anlagenspezifisches Konzept für die IT-Sicherheit zu entwickeln. Das Konzept soll u. a. die Einstufung der Informations- und Leittechnik nach dem jeweiligen Schutzbedarf gegen zu unterstellende IT-Angriffe vorsehen. Für die Bundesaufsicht über KKW ist es erforderlich, die dazu angewendete Methodik und die Analyseergebnisse bewerten zu können.

Die Bewertung der IT-Sicherheit im Rahmen einer Risikoanalyse kann auf verschiedene Weise erfolgen. So können beispielsweise anlagenspezifische Risikoanalysen durchgeführt werden, die das vorhandene Schutzniveau betrachten, oder Verwundbarkeitsanalysen, die spezifisch begründete Näherungen beinhalten können und ihren Schwerpunkt auf technisch basierte Angriffe oder die Bewertung technischer Maßnahmen zur Behebung identifizierter Verwundbarkeiten legen. Auf internationaler Ebene sind hier bereits methodische Grundlagen entwickelt worden, so von der IAEA mit dem Dokument NSTO47 (Computer Security Techniques for Nuclear Facilities), das die Grundlagen für eine Risikoanalyse zur IT-Sicherheit in kerntechnischen Anlagen aus allgemeineren Dokumenten wie der Norm ISO/IEC 27005 ableitet. Vor diesem Hintergrund ist auf der Basis einer anerkannten Methode eine Risikoanalyse zur IT-Sicherheit in KKW auszuführen. Eine umfassende Risikoanalyse mit Darstellung des vollständigen Angriffsspektrums gemäß der Lastannahmen der IT-Richtlinie und einer detaillierten Auswertung hinsichtlich möglicher bzw. erforderlicher Gegenmaßnahmen existiert derzeit noch nicht. Der aktuelle Stand von W&T zu Anforderungen an eine Risikoanalyse zur IT-Sicherheit von Leit- und Informationstechnik in kerntechnischen Anlagen, muss laufend erfasst und bewertet werden. Damit werden geeignete Grundlagen für die einheitliche, bundesaufsichtliche Bewertung der Methodik und der Ergebnisse von Risikoanalysen zur IT-Sicherheit geschaffen.

3.6 Sicherheit von Forschungsreaktoren

Dazu ist es notwendig, sich mit folgenden Fragestellungen zu beschäftigen:

- Welche Anforderungen sind an eine vollumfängliche Risikoanalyse zur IT-Sicherheit zu stellen?
- Wie sieht ein vollständiges Angriffsspektrum gemäß der Lastannahmen der IT-Richtlinie aus?
- Welche Methoden eignen sich am besten, um in einer Risikoanalyse die Wirkungsweise sämtlicher Angriffs- und Abwehrmechanismen adäquat abzubilden?
- Auf welcher Grundlage ist zu beurteilen, ob die gemäß einer Risikoanalyse für die IT-Sicherheit vorgesehenen Gegenmaßnahmen geeignet und ausreichend sind?
- Welche Daten müssen erhoben werden, um valide Schlussfolgerungen für die IT-Sicherheit ziehen zu können?
- Wie wirken sich Unsicherheiten und Ungewissheiten einzelner Bestandteile einer Risikoanalyse auf die Aussagekraft zur IT-Sicherheit aus?

Forschungsreaktoren (FR) dienen als Neutronenquelle für Wissenschaft, Forschung und vielfältige technische, medizinische und industrielle Anwendungen sowie für Zwecke der Aus- und Weiterbildung. Im Jahr 1957 wurde der Forschungsreaktor München (FRM) als erste kerntechnische Anlage in Deutschland in Betrieb genommen. Verglichen mit einem Kernkraftwerk ist die thermische Leistung eines Forschungsreaktors im Allgemeinen deutlich geringer. Kleiner ist auch die eingesetzte Menge an Kernbrennstoff und folglich die erzeugte Menge an radioaktivem Abfall. Daraus ergibt sich, gegenüber einem Kernkraftwerk, ein entsprechend um Größenordnungen geringeres Risikopotential. Untereinander unterscheiden sich Forschungsreaktoren erheblich. Dies betrifft nicht nur die Bauart und die thermische Leistung. Große Differenzen gibt es ebenfalls bei dem verwendeten Kernbrennstoff und dem radioaktiven Inventar sowie in der Betriebsweise der einzelnen Anlagen und deren Standort.

Obwohl die Forschungsreaktoren ein vergleichsweise geringeres Risikopotential haben, unterliegen sie grundsätzlich den gleichen Anforderungen an das Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren wie die Kernkraftwerke. Üblicherweise wird jedoch das für Kernkraftwerke entwickelte Regelwerk, abhängig vom Risikopotential der jeweiligen Forschungsreaktoranlage, abgestuft angewandt. Forschungsreaktoren sind von der 13. AtG-Novelle zum Ausstieg aus der Kernenergie nicht betroffen und haben somit keine gesetzliche Laufzeitbegrenzung. In den letzten Jahren wurden die regulatorischen Verpflichtungen zur Gewährleistung der Sicherheit sowie zu deren Nachweisführung erhöht, wie z. B. durch die im Jahr 2010 eingeführte gesetzliche Verpflichtung zur Durchführung von periodischen Sicherheitsüberprüfungen (PSÜ).

Auch international erfährt die Sicherheit von Forschungsreaktoren zunehmend größere Bedeutung. In Europa trägt die Richtlinie 2009/71/EURATOM maßgeblich dazu bei. Laut Kapitel 1, Artikel 3-1 a) fallen Forschungsreaktoren explizit in die Kategorie „kerntechnische Anlage“, sodass viele verbindliche Anforderungen aus dieser Richtlinie und der diese Richtlinie ergänzenden Richtlinie 2014/87/EURATOM auch auf Forschungsreaktoren angewendet werden müssen. Eine Folge hiervon sind u. a. die derzeit laufenden Bestrebungen

zur Angleichung der Sicherheit von Forschungsreaktoren, die ähnlich wie bei Kernkraftwerken durch die WENRA (Western European Nuclear Regulators Association) betrieben wird und sich später auch im deutschen nationalen Regelwerk widerspiegeln soll. Ein weiteres Beispiel ist ein nach Kapitel 2a, Artikel 8e der Richtlinie 2014/87/EUROATOM gefordertes „Topical Peer Review“. Das erste themenbezogene Peer Review wurde im Jahr 2017 durchgeführt. Es war dem Thema „Alterungsmanagement“ gewidmet und war für alle Kernkraftwerke sowie für Forschungsreaktoren mit einer thermischen Leistung größer 1 MW obligatorisch. Vor diesem Hintergrund werden auf diesem Gebiet folgende Grundsatzfragen formuliert:

- Wo sind spezifische Informationen zu einzelnen Forschungsreaktoren verfügbar, die einen schnellen und belastbaren Vergleich der notwendigen Parameter erlauben?
- Mit welchen Methoden kann das Risikopotential der Forschungsreaktoren bewertet werden?
- Wie hoch ist das individuelle Risikopotential einzelner Forschungsreaktoren einzuschätzen?
- Nach welchen Kriterien können Forschungsreaktoren klassifiziert werden?
- Inwiefern ist die Klassifizierung von dem zugrunde gelegten Bewertungskriterium unabhängig?
- Welche Sicherheitsmaßstäbe werden bei Forschungsreaktoren abhängig von deren Risikopotential definiert?
- Mit welchen Methoden kann die Erfüllung der Sicherheitsanforderungen bewertet und nachgewiesen werden?
- Welche Störfälle sind für verschiedene Forschungsreaktoren von besonderer Bedeutung und welche Vorsorgemaßnahmen gibt es?

Im Folgenden werden die wesentlichen Forschungsthemen zu den Forschungsreaktoren näher erläutert und der davon abgeleitete spezifische Forschungsbedarf identifiziert.

Strukturierte Wissensbasis

Die Bundesaufsicht verfügt über zahlreiche Unterlagen zu Forschungsreaktoren, die über Jahrzehnte gesammelt wurden. Viele Daten liegen nur als einfacher Text oder als Grafik vor. Die Lesbarkeit der Dokumente ist zum Teil eingeschränkt und eine Volltextsuche ist nicht immer verfügbar. Die Dokumente müssen im Bedarfsfall konvertiert und bearbeitet werden. Zudem sind einige Unterlagen nur in der Papierform vorhanden und auf verschiedene Standorte verteilt, sodass ein zentraler

Zugriff auf diese Dokumente nicht möglich ist. Folglich ist eine Recherche nach notwendigen Informationen insgesamt erschwert und langwierig. Das BfE, als Teil der Bundesaufsicht über Forschungsreaktoren, benötigt jedoch für die sachgerechte Wahrnehmung seiner Aufgaben einen zuverlässigen Zugriff auf alle relevanten Informationen zu den betroffenen Anlagen. Die verfügbaren Informationen zu in Betrieb befindlichen deutschen Forschungsreaktoren werden systematisch erfasst und ausgewertet. Sie werden zurzeit in elektronischer Form, basierend auf HTML-Seiten, anlagenspezifisch zusammengefasst. Um möglichst umfassende Informationen zu den jeweiligen Anlagen zu haben, werden dort in erster Linie bestehende Datensammlungen ausgewertet und durch aktuelle Informationen z. B. aus internationalen Aktivitäten ergänzt. Als Ergebnis wird eine gut strukturierte Wissensbasis zu den in Betrieb befindlichen Forschungsreaktoren erwartet. Sie ist als ein Basisinstrument für die tägliche Arbeit in der Bundesaufsicht gedacht und wird die benötigten Informationen vollständig und schneller zur Verfügung stellen. Dadurch soll die Effizienz bei der Bearbeitung verschiedener bundesaufsichtlicher Fragestellungen zu Forschungsreaktoren verbessert werden. Dies ist entscheidend, um fachlich hochqualitative und zeitgerechte Lösungen für die aufkommenden Fragestellungen zu finden.

Sicherheitsmaßstäbe

Da sich die Forschungsreaktoren erheblich voneinander unterscheiden und zudem unterschiedliche Anlagentypen unter der Aufsicht verschiedener Behörden stehen, ist es kaum möglich, generische Erkenntnisse bzw. Entscheidungen zu formulieren. Die Sicherheitsmaßstäbe werden deshalb im Einzelfall neu entwickelt. In der Praxis werden die (bundes)aufsichtlichen Fragestellungen in den zuständigen Gremien, hier insbesondere im Arbeitskreis Forschungsreaktoren (AK-FR) im Fachausschuss Reaktorsicherheit des Länderausschusses für Atomkernenergie (LAA), diskutiert und einvernehmlich geeignete Lösungswege gesucht. Das BfE ist aktiver Teilnehmer an den AK-FR Sitzungen.

Das individuelle Gefährdungspotential verschiedener Forschungsreaktoren wird qualitativ und quantitativ unter systematischen und detaillierten Bewertungen von zahlreichen physikalisch-technischen und radiologischen Kriterien abgeleitet. Folglich werden die Anlagen entsprechend den analysierten Bewertungskriterien verschiedenen Gefährdungsklassen zugeordnet.

Auf Basis der „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ werden systematische Überlegungen durchgeführt, ob und ggf. wie sich die Sicherheitsmaßstäbe aus dem kerntechnischen Regelwerk für Kernkraftwerke auf Forschungsreaktoren verschiedener Gefährdungsklassen übertragen lassen. Mit steigenden regulatorischen Anforderungen an Forschungsreaktoren nimmt die Anzahl und Komplexität der aufsichtlichen Fragestellungen auf dem Gebiet zu. Eine belastbare Einschätzung des Gefährdungspotentials und die Zuordnung der Forschungsreaktoren in verschiedene Gefährdungsklassen ist eine wichtige Grundlage für die Definition der entsprechenden Sicherheitsmaßstäbe. Dies ist entscheidend, um im bundesaufsichtlichen Verfahren sachgerechte und effiziente Lösungen für die aufkommenden Fragestellungen zu finden.

Sicherheitsanalysen

Ähnlich wie bei Kernkraftwerken stellen deterministische und ergänzend probabilistische Sicherheitsanalysen für Forschungsreaktoren ein wichtiges Instrument dar, um das Sicherheitsniveau der Anlagen zu ermitteln. Zur Durchführung solcher Analysen für Forschungsreaktoren stehen nur wenige Richtlinien und Hilfsmittel mit spezifischen Vorgaben zur Verfügung. Grundsätzlich können analoge Rechenmethoden und Systemcodes wie für Kernkraftwerke verwendet werden. Jedoch unterscheiden sich die Anlagenmodellierung und die Störfallszenarien von Forschungsreaktoren gegenüber KKW erheblich, sodass vor dem Hintergrund der vorhandenen Erfahrungen erheblicher Entwicklungsbedarf bezüglich der Methoden und der anzuwendenden Daten besteht.

Aufgrund von steigenden gesetzlichen Anforderungen an die Sicherheit von Forschungsreaktoren und des sich entwickelnden Standes von W&T wird die Bundesaufsicht immer öfter mit neuen Fragestellungen zu diesem Themenbereich konfrontiert. Daher ist es notwendig, den Kompetenzerhalt auf diesem Gebiet zu gewährleisten. Die gut bewährten Analysemethoden für die sicherheitstechnische Bewertung von Kernkraftwerken werden an die Gegebenheiten der Forschungsreaktoren angepasst. Dabei handelt es sich um die Anpassungen von verschiedenen Rechen-codes und -programmen, die für deterministische und probabilistische Sicherheitsanalysen (DSA und PSA) Verwendung finden.

Die Anpassung bzw. Weiterentwicklung der Rechenmethoden ermöglicht, die genauen anlagenspezifischen Sicherheitsbewertungen für verschiedene Forschungsreaktoren durchzuführen. Dies beinhaltet deterministische Methoden für die Bewertung der Wirksamkeit der Sicherheitssysteme unter Störfallbedingungen, stationäre und dynamische Analysen zum Kernverhalten sowie ergänzende probabilistische Methoden. Diese sind unerlässlich, um den Sicherheitszustand der kerntechnischen Anlagen möglichst genau analysieren zu können und in der Lage zu sein, die verschiedenen bundesaufsichtlichen Fragestellungen, die mit der Anlagen- und Sicherheitstechnik von Forschungsreaktoren zusammenhängen, gemäß dem aktuellen Stand von W&T bearbeiten zu können.

Konkret sind die folgenden Anpassungen erforderlich: Für die deterministischen Sicherheitsanalysen ist die Entwicklung der thermo-hydraulischen Anlagenmodellierung (u. a. Reaktor-becken, Kern und Reaktorkühlkreislauf) samt der nachfolgenden Implementierung der Grundfunktionalität betrieblicher und sicherheitsrelevanter Systeme notwendig. Dazu gehört auch die Analyse des stationären und dynamischen Verhaltens der Reaktorkerne in spezifischen Geometrien. Weiterhin ist eine Auswahl repräsentativer Störfallszenarien und Durchführung der Störfallsimulation inklusive Bewertungen der Störfallverläufe zu treffen.

Für die probabilistischen Sicherheitsanalysen ist die Festlegung der für Forschungsreaktoren relevanten Endzustände relevant, die beim Versagen von Sicherheits- und Notfallmaßnahmen nach einem auslösenden Ereignis eintreten können. Weiterhin sind das abdeckende Spektrum der einzubeziehenden auslösenden Ereignisse und die notwendigen PSA-Daten zu ermitteln.

3.7 Sicherheit weiterer Anlagen zur nuklearen Ver- und Entsorgung

Zur Herstellung von Kernbrennstoffen werden in Deutschland eine Anreicherungsanlage und eine Brennelementefabrik betrieben. Die stetige technische Weiterentwicklung der Produktions- und Überwachungstechnik erfordert gemäß AtG eine stetige Anpassung bzw. Weiterentwicklung der Methoden der Sicherheits- und Störfallanalyse sowie die wiederkehrende Überprüfung, ob eine ausreichende Schadensvorsorge entsprechend dem Stand von W&T getroffen ist. Die Forschungsarbeiten im Bereich der nuklearen Versorgung sollen die Aktualität der Methoden und Kenntnisse auf dem Gebiet der Sicherheitstechnik und Sicherheitsanalyse unter Berücksichtigung des nationalen und internationalen Entwicklungsstandes gewährleisten. Die Ergebnisse der vertieften nationalen Auswertung von Ereignissen unterstützen die Behörden im Rahmen des internationalen Erfahrungsrückflusses, welcher zu einer Stärkung der Sicherheit in den Anlagen beiträgt. Die Auswertung von Betriebserfahrungen ist ein wesentliches Element zur Weiterentwicklung und Verbesserung der Sicherheit in kerntechnischen Einrichtungen. Betriebserfahrungen ergeben sich aus der Auswertung und Analyse aufgetretener Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb und von Störfällen. Insbesondere die vertiefte Auswertung von Ereignissen in den Versorgungs- und Entsorgungseinrichtungen ermöglicht die weitere Verbesserung der Sicherheit in den kerntechnischen Einrichtungen sowie das Teilen von Betriebserfahrungen in nationalen und internationalen Gremien.

In diesem Zusammenhang sind insbesondere Fragestellungen zu Kritikalität, Störfallanalysen, Strahlungsabschirmung, zu deterministischen und probabilistischen Sicherheitsanalysen sowie zu meldepflichtigen Ereignissen wichtig. Hierzu zählen u. a. die Erstellung und Pflege des „Handbuchs zur Kritikalität“, des Handbuchs zu Störfallanalysen für Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung („Handbuch der Störfallanalyse“) sowie die konkrete Durchführung von Sicherheitsanalysen für frische und abgebrannte Kernbrennstoffe sowie andere radioaktive Quellen und die vertiefte Auswertung signifikanter Ereignisse.

Im Bereich der nuklearen Versorgung erfordern weiterentwickelte Sicherheitskonzepte und technische Veränderungen, wie z. B. Anreicherungs-erhöhungen, die Weiterentwicklung der Rechenverfahren, der zugrundeliegenden Datenbasis für den rechnerischen Sicherheitsnachweis und der Methoden für die Störfall- und Sicherheitsanalyse. Das Handbuch zur Kritikalität muss laufend auf Aktualität und Genauigkeit überprüft werden. Die dort enthaltenen Daten und Parameter werden stichprobenartig neu berechnet und ggf. aktualisiert. Hierfür werden auch die Neuveröffentlichungen zu Rechenverfahren zur nuklearen Sicherheit stets verfolgt und nach Bedarf, soweit erforderlich, angepasst und in die bestehende Software implementiert. Darüber hinaus ist geplant, das „Handbuch zur Störfallanalyse“ um einen weiteren Themenbereich zu erweitern, in dem die Störfallanalysen auf periodische Sicherheitsüberprüfungen (PSÜ) unter Berücksichtigung von probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA) in deutschen Versorgungsanlagen ausgedehnt wird. Während die PSA bei Kernkraftwerken bereits etabliert ist, steht ihre Anwendung bei anderen kerntechnischen Anlagen erst in den Anfängen. So werden zurzeit für die Anlagen der nuklearen Versorgung die technisch-wissenschaftlichen Grundlagen für eine PSA erarbeitet und bedingen für die Zukunft entsprechenden Forschungsbedarf. Die hierzu geplanten Forschungsarbeiten dienen strategisch dem Ziel, eine PSA für Anlagen der nuklearen Versorgung durchzuführen.

International wird an der Entwicklung unterschiedlicher innovativer Reaktorkonzepte gearbeitet. Dies hat zur Folge, dass auch entsprechende neuartige Brennstoffkonzepte entwickelt werden. Diese neuen Brennstoffkonzepte werden Auswirkungen auch auf die deutschen Anlagen der nuklearen Versorgung haben, da davon auszugehen ist, dass diese zukünftig mehr den internationalen Markt beliefern werden. Deshalb wird hier weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Sicherheitsanforderungen für diese Anlagen gesehen und geplant. Die diskutierten und verfolgten Ansätze müssen dargestellt, analysiert und beurteilt werden. Entwicklungen neuartiger

3.8 Stilllegung Kerntechnischer Anlagen


Brennstoffkonzepte mit Fokus auf die Ver- und Entsorgung sowie neue Ansätze zur Reduzierung der radioaktiven Abfälle werden verfolgt. Weiterhin werden besondere Vorkommnisse aus deutschen sowie ausländischen Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung erfasst und bewertet. Relevante Vorkommnisse mit einer Übertragbarkeit auf deutsche oder ggf. auch auf ausländische Anlagen werden einer vertieften ingenieurmäßigen Bewertung unterzogen. Ziel ist es, das Instrumentarium für die sicherheitstechnischen Beurteilungen zu Fragestellungen der nuklearen Ver- und Entsorgung auf aktuellem Stand zu halten. Darüber hinaus ist der internationale Wissenstransfer auf dem Gebiet der nuklearen Sicherheit und der Störfallvorsorge in Anlagen der nuklearen Versorgung und Entsorgung zu gewährleisten. Ein weiteres Ziel ist, den Erfahrungsrückfluss aus der Auswertung der besonderen Vorkommnisse in inländischen als auch in ausländischen Anlagen für eine Sicherheitsverbesserung in deutschen Anlagen der nuklearen Versorgung nutzbar zu machen und ggf. auch für ausländische Anlagen bereitzustellen. Aus diesen Zielen ergeben sich u. a. folgende Grundsatzfragen:

- Wie entwickelt sich der Stand von W&T bei der Produktionstechnik? Wie wird begleitend die Aktualität der Methoden und Kenntnisse auf dem Gebiet der Sicherheitstechnik und -analyse gewährleistet?
- In welche Richtung gehen innovative Reaktorkonzepte und damit einher neuartige Brennstoffkonzepte? Welche Auswirkung haben sie auf die Gewährleistung der Sicherheit?
- Welchen Beitrag können die oben genannten Arbeiten dem strategischen Ziel, eine PSA für Anlagen der nuklearen Versorgung durchzuführen, leisten?

Das Thema Stilllegung von kerntechnischen Anlagen wird in Deutschland wegen des 2011 im AtG festgeschriebenen schrittweisen Ausstiegs aus der Kernenergienutzung bis spätestens Ende 2022 noch bis weit in die 2030er Jahre hinein aktuell bleiben. Der Umgang mit den dabei entstehenden Reststoffen und radioaktiven Abfällen sogar deutlich darüber hinaus. International steht die Hauptwelle der weltweit abzuschaltenden und stillzulegenden Kernkraftwerke noch bevor. Wegen der Bedeutung der Stilllegung für die Prognose der Menge zu entsorgender radioaktiver Abfälle ist das Thema auch im Hinblick auf den geplanten Betrieb des Endlagers Konrad und die Suche nach einem geeigneten Endlagerstandort in Deutschland relevant.

Grundsätzlich ist die Stilllegung von kerntechnischen Anlagen in Deutschland eine technisch und organisatorisch gelöste Aufgabe, zu der vielfältige Erfahrungen vorliegen. Dennoch stellt, wegen der großen Anzahl der in relativ kurzer Zeit neu hinzukommenden Stilllegungsprojekte, der sichere Rückbau und die Entsorgung der dabei entstehenden radioaktiven Abfälle eine Herausforderung dar, welche neue Fragestellungen mit Forschungsbedarf generiert. Wie in den vergangenen Jahren auch, sind weiterhin Forschungsanstrengungen notwendig, um die verwendeten Verfahren und Techniken im Hinblick auf Effizienz und Strahlenschutzaspekte zu optimieren. Das derzeitige nationale gesetzliche und untergesetzliche Regelwerk deckt die regulatorischen Erfordernisse für die Stilllegung ab, wenngleich für die Stilllegung relevante Regelungen in verschiedenen Gesetzen und Verordnungen zu finden sind und die internationalen Anforderungen einer ständigen Weiterentwicklung unterliegen.

Das Thema Stilllegung kerntechnischer Anlagen kann als kerntechnische Querschnittsaufgabe begriffen werden. Es gibt Schnittstellen zu anderen im BfE behandelten Fragestellungen wie z. B. meldepflichtige Ereignisse, Transporte, Zwischenlagerung von Brennelementen sowie zum Projekt Konrad. Insofern haben Untersuchungen im Bereich Stilllegung in verschiedenen Bereichen einen Nutzen für die Aufgabenerfüllung des BfE.



Vor dem Hintergrund der Beendigung der Kernenergienutzung in Deutschland ist das öffentliche Interesse an der Thematik Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen gestiegen. Es besteht Untersuchungsbedarf, wie die Information und ggf. Beteiligung der Öffentlichkeit an Stilllegungsverfahren, über die während des Genehmigungsverfahrens für die erste Stilllegungsgenehmigung durchgeführte Öffentlichkeitsbeteiligung hinaus, weiter optimiert werden kann.

Untersuchungswürdige Fragestellungen in diesem Themenfeld sind beispielsweise sicherheitstechnische Fragestellungen beim Übergang vom Betrieb auf die Stilllegung, unter Berücksichtigung des in der Anlage vorhandenen radiologischen Inventars einschließlich ggf. noch vorhandener Brennelemente.

Fragen der Reststoff- und Abfallströme bei der Stilllegung sind im Hinblick auf die Planung und Durchführung der Stilllegung von Relevanz. Dabei sind Aspekte der längerfristigen Zwischenlagerung, der Endlagerung der radioaktiven Abfälle sowie die Deponierung von freigegebenen Stoffen zu beachten. In diesem Zusammenhang sind die Themenfelder Freigabe von radioaktiven Stoffen und Stilllegungsstrategien (z. B. Abklinglagerung) untersuchungswürdig, da diese einen Einfluss auf die benötigten Abfallprognosen haben.

Die radiologische Charakterisierung ist nicht nur vor Beginn der Stilllegung im Rahmen der Planung wichtig, sondern auch am Ende, wenn Gebäude und Bodenflächen aus der atomrechtlichen Überwachung entlassen werden sollen. Insbesondere wenn Gebäudefundamente im Boden verbleiben sollen, ergeben sich besondere Anforderungen an die verfahrensmäßige und messtechnische Nachweisführung der radiologischen Unbedenklichkeit (Freigabe). In diesem Zusammenhang spielt auch die Quantifizierung und Bewertung eventueller radiologischer Vorbelastungen und deren Berücksichtigung bei der Freigabe eine Rolle. Untersuchungsbedarf besteht bei der Weiterentwicklung der im Rahmen der Stilllegung praktisch einsetzbaren Verfahren zum messtechnischen Nachweis schwer messbarer Nuklide.

Besondere Herausforderungen bei der Beurteilung von Standorteigenschaften können sich ergeben, wenn die Freigabe von Bodenflächen unter Berücksichtigung vorhandener Standorteigenschaften (geografische Lage oder geogene Verhältnisse) bewertet werden soll und dementsprechend bestimmte Expositionspfade einzelfallbezogen detaillierter betrachtet werden müssen (z. B. durch Modellierung von Transportprozessen im Grundwasser).

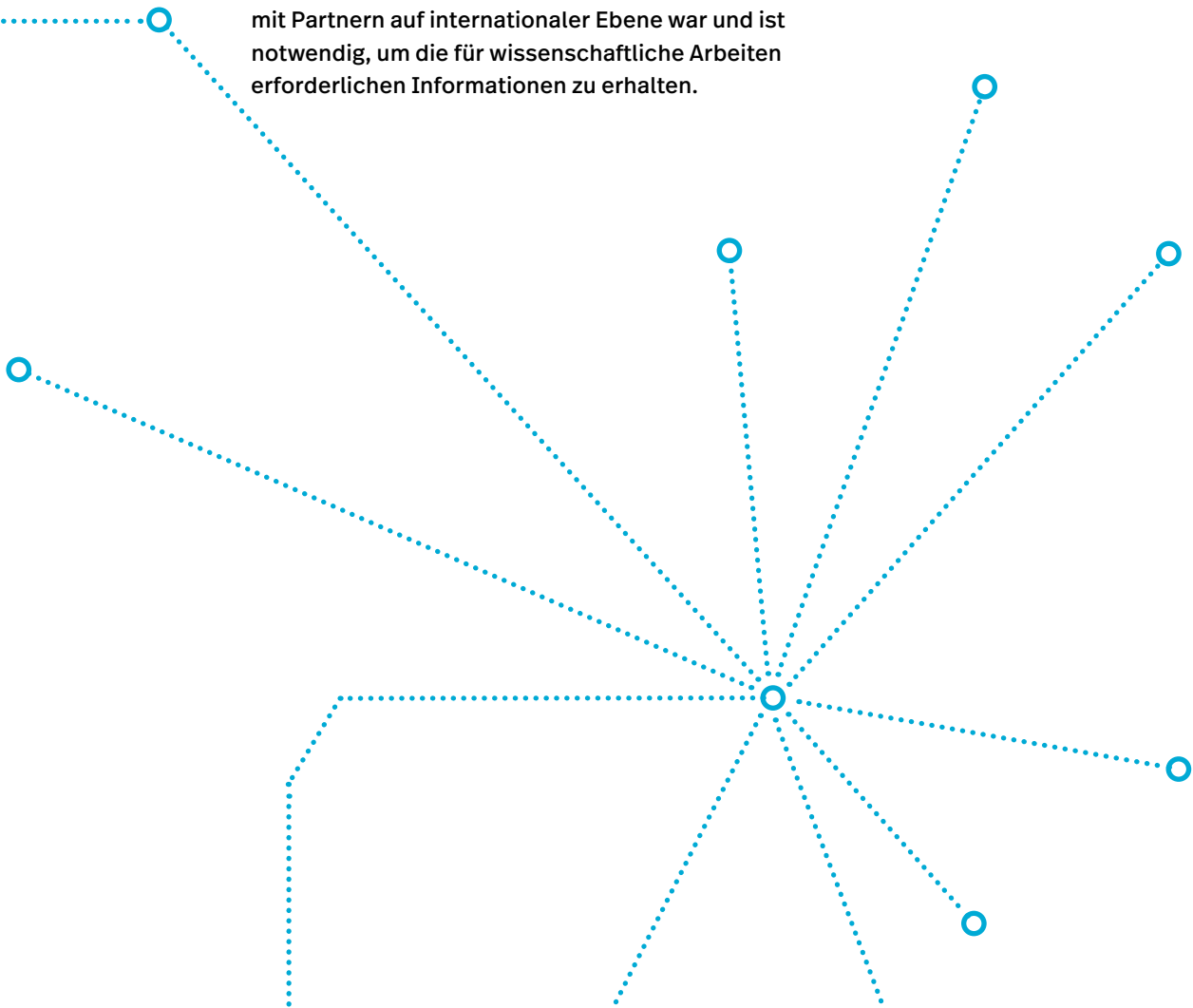
In zunehmendem Maße rückt die Sanierung von Anlagengelände am Ende der Stilllegung in den Blickpunkt. In diesem Zusammenhang ist eine Untersuchung der Anwendbarkeit konventioneller Umwelttechnologien bei der Sanierung radioaktiv kontaminierter Standorte kerntechnischer Anlagen ein mögliches Forschungsthema. In diesem Zusammenhang sind auch Fragen der Abwägung von Strahlenschutz- und sonstigen Umweltaspekten bei der Stilllegung von Interesse. Weiterentwicklungsbedarf besteht bei der automatisierten Anwendung von Trenn- und Zerlegetechniken sowie Dekontaminationstechniken, da hier das Potential noch nicht ausgeschöpft ist. Das deutsche gesetzliche und untergesetzliche Regelwerk muss auch in Zukunft dem Stand von W&T Rechnung tragen und erforderlichenfalls weiterentwickelt werden. Es muss deshalb sichergestellt werden, dass der Stand von W&T auch international bei der Stilllegung verfolgt wird, hieraus sich ergebender Weiterentwicklungsbedarf auf nationaler Ebene auch in Zukunft erkannt wird und dann auch umgesetzt werden kann.

3.9 Internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Kern- technischen Sicherheit

Um international Einfluss auf eine möglichst hohe Sicherheitsgewährleistung in ausländischen Anlagen nehmen zu können und bei Anfragen aus Parlament und Bevölkerung aussagefähig zu sein, müssen in Deutschland ausreichende Kenntnisse über die Sicherheitstechnik dieser Anlagen vorhanden sein. Dazu ist es erforderlich, die Entwicklung des Standes von W&T auf dem Gebiet der Kernkraftwerkstechnik und der Gewährleistung der Sicherheit von Kernkraftwerken im Ausland in erforderlichem Umfang weiter zu verfolgen. Auch die Kenntnis der staatlichen Rahmenbedingungen in den Kernkraftwerke betreibenden Staaten ist für die Beurteilung der nuklearen Sicherheit im Ausland von Bedeutung.

Möglich ist dies nur durch wissenschaftlich-technische Untersuchungen und die Beteiligung an internationalen Aktivitäten zu Fragen der Gewährleistung der nuklearen Sicherheit im Ausland sowie durch die Verfolgung der zugehörigen technischen Entwicklungen und der regulatorischen Rahmenbedingungen. Der Informationsaustausch mit Partnern auf internationaler Ebene war und ist notwendig, um die für wissenschaftliche Arbeiten erforderlichen Informationen zu erhalten.

Dies schließt die Mitarbeit in Gremien und deren Arbeitsgruppen internationaler Organisationen mit ein. Die Nutzung der Kooperation mit europäischen Regulatoren und deren Sachverständigenorganisationen ermöglicht die Bereitstellung von Informationen und Wissen bezüglich Status, Aktivitäten und Ergebnissen bei der Verbesserung der nuklearen Sicherheit in Europa. Darüber hinaus erfolgt hier auch die Erfassung und Nutzung der fachlichen Informationen aus multilateralen Kooperationsprogrammen der EU. Ziel von laufenden und geplanten Forschungsvorhaben ist die Sicherstellung von ausreichenden Kenntnissen über die kerntechnische Sicherheit von ausländischen Anlagen sowie der regulatorischen Rahmenbedingungen Kernkraftwerke betreibender Staaten. Ziel ist weiterhin, die Entwicklung des Standes von W&T in erforderlichem Umfang weiter zu verfolgen, um international Einfluss auf eine möglichst hohe Sicherheitsgewährleistung in ausländischen Anlagen nehmen zu können.





4.1
Behältersicherheit
bei Transporten und
Zwischenlagerung



4.2
Sicherung

Der Nachweis der ausreichenden Schadensvorsorge zwischengelagerter hochradioaktiver Abfälle wurde im Genehmigungsverfahren für die heutigen Zwischenlager für den Zeitraum von 40 Jahren erbracht. Eine Verlängerung bedürfte gemäß § 6 (5) AtG unabweisbarer Gründe und einer Befassung des deutschen Bundestags. Laut § 1 (5) StandAG ist die Entscheidung zu einem Endlagerstandort für 2031 angestrebt. Gemäß des optimistischen Szenarios 1 des Kapitels 5.6 „Zeitbedarf zur Realisierung des empfohlenen Entsorgungspfades“ des Abschlussberichts der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe soll die anschließende Realisierung aller benötigten bergtechnischen Funktionen etwa 2050 abgeschlossen sein, so dass dann mit der Einlagerung der Abfälle begonnen werden könnte. Selbst für dieses optimistische Szenario ist daher davon auszugehen, dass die derzeit genehmigte Aufbewahrungsdauer der Zwischenlager für hochradioaktive Abfälle nicht ausreichen wird, um vor Ablauf der Genehmigungen alle zwischengelagerten Gebinde an das Endlager abzugeben. Damit ist Forschungsbedarf absehbar, da die notwendigen Nachweise zur Gewährleistung der Sicherheit verlängerter Lagerung sowie des Abtransportes nach Lagerung nach aktuellem Kenntnisstand noch nicht prüfbar sind. Fragen der Alterung der Materialien (Degradationsverhalten) stehen dabei im Mittelpunkt der Nachweisführung und somit im Fokus des BfE. Die benötigten Erkenntnisse können nicht in kurzer Zeit gewonnen werden, daher müssen entsprechende Forschungsvorhaben rechtzeitig angestoßen bzw. fortgeführt werden. Beispielsweise wird im Auftrag des BfE von der BAM (Bundesanstalt für Materialforschung) das Langzeitverhalten von Metaldichtungen untersucht. Die Experimente wurden 2001 begonnen und sollten unbedingt fortgesetzt werden, um auch für eine möglicherweise notwendige Verlängerung der Zwischenlagerung über 40 Jahre hinaus Vorhersagen zum Verhalten der Dichtung der Behälter treffen zu können.

Weiterhin können sich aus den verlängerten Standzeiten und möglicherweise noch zu treffenden technischen Veränderungen an den Abfallgebinden Fragestellungen zur Langzeitsicherheit des Endlagers ergeben, da jede Veränderung an Abfällen

oder Behältern potenziell die Prozesse im verschlossenen Endlager beeinflussen kann.

Zur Gewährleistung der Sicherheit beim Transport radioaktiver Stoffe ist zum einen die Wirksamkeit und das sicherheitstechnisch hohe Niveau der Gefahrgutbeförderungsvorschriften entsprechend dem Stand von W&T regelmäßig zu hinterfragen. Zum anderen müssen im Rahmen der Genehmigung von Transporten immer wieder offene Fragen geklärt werden, beispielsweise bei Konzentration von Transporten in einem begrenzten Gebiet oder ungewöhnlichen Transport- und Umschlagsituationen, für die mögliche Dosisbelastungen betroffener Personen ermittelt werden. Forschungsfragen in diesem Zusammenhang betreffen derzeit die Aktualisierung von Modellen und deren Datenbasis zur Bewertung des Sicherheitsniveaus beim Transport radioaktiver Stoffe, Verfahren zur Berechnung von Freistellungs-grenzwerten und Fragen zur Kritikalitätssicherheit bei der Beförderung radioaktiver Stoffe.

Forschungsbedarf besteht außerdem bezüglich des Schutzes von Kernbrennstoffzwischenlagern und -transporten gegen Störmaßnahmen und sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD). Insbesondere können Weiterentwicklungen in der Waffentechnik neue Bedrohungsszenarien erzeugen und somit die Durchführung von Forschungsvorhaben zum Schutz der radioaktiven Abfälle notwendig machen. Vor dem Hintergrund, dass das BfE im Interesse einer zügigen und effektiven Durchführung von Genehmigungsverfahren auf die Überprüfung des vom Antragsteller gewählten Nachweisweges beschränkt ist, sind Forschungsvorhaben vorliegend zur Vergrößerung der Datenbasis und damit zur Stärkung von Argumentationslinien, insbesondere im Rahmen von potentiellen Gerichtsverfahren, angezeigt. Dies gilt vor allem mit Blick darauf, dass aufgrund der erforderlichen Geheimhaltung eine Offenlegung der Inhalte von sicherungstechnischen Prüfungen nur sehr eingeschränkt möglich ist.

4.1 Behältersicherheit bei Transporten und Zwischenlagerung

Das BfE erteilt Aufbewahrungsgenehmigungen für Kernbrennstoffe gemäß § 6 AtG (Genehmigung zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen, etwa für Zwischenlager), Beförderungsgenehmigungen gemäß § 4 AtG und § 16 StrlSchV sowie Zulassungen für Behälter zum Transport radioaktiver Stoffe gemäß Gefahrgutbeförderungsgesetz.

Die von den Antragstellern einzureichenden Nachweisunterlagen sind entsprechend den Anforderungen der jeweiligen Rechtsvorschriften durch das BfE darauf zu prüfen, ob z. B. die nach dem Stand von W&T erforderliche Vorsorge gegen Schäden getroffen ist. Dies erfordert ein nachhaltiges Verständnis des jeweils aktuellen Standes von W&T durch Befassung mit neuen Erkenntnissen aus der Forschung sowie die gezielte Klärung von Fachfragen durch das BfE selber.

Die Forschungsvorhaben des BfE dienen auch dazu, die aus der Genehmigungs- bzw. Zulassungstätigkeit gewonnenen Erfahrungen und Fragestellungen in die Weiterentwicklung des Standes von W&T einzubringen. Dies geschieht beispielsweise durch die Mitarbeit an Regelwerken und die Mitarbeit in nationalen und internationalen Gremien. Ein weiteres Ziel von Forschungsvorhaben ist die Überprüfung und Weiterentwicklung von Bewertungsmethoden und der zugehörigen Datenbasis. Der Erkenntnisgewinn aus Forschungsprojekten soll es dem BfE ermöglichen, auch zukünftig die Sicherheitsnachweise der Antragsteller prüfen und Genehmigungen bzw. Zulassungen erteilen zu können. Somit ist es wichtig, dass das BfE auch im Hinblick auf seine Genehmigungstätigkeit Forschungsfragen identifiziert und bearbeitet.

Alterung von Behältermaterialien und Behälterkomponenten und ihre Auswirkungen auf die Sicherheit der verlängerten Zwischenlagerung

Da die Genehmigungen zur Aufbewahrung nach § 6 AtG basierend auf einer Begutachtung für einen Lagerzeitraum von 40 Jahren durchgeführt wurden, besteht ein hohes Sicherheitsniveau. Durch deutlich längere Lagerzeiten könnte die Alterung von Behälterkomponenten das Schutzziel des sicheren Einschlusses des radioaktiven Inventars jedoch gefährden. Versagensmechanismen können direkt durch ein Nachlassen der Dichtheit oder

indirekt, durch einen alterungsbedingten Handhabungsstörfall wie beispielsweise das Versagen eines Tragzapfens aufgrund von Alterungseffekten wirken. Daher sind die Behälterkomponenten, Lastanschlagpunkte am Behälter und alle Komponenten des Dichtheitsüberwachungs- sowie des Doppeldeckeldichtungssystems auf Anfälligkeit gegenüber Alterung durch unterschiedlichste Einflüsse zu untersuchen. Da die Alterung ein stark temperaturabhängiger Vorgang ist, kommt der Bestimmung von Temperaturen eine hohe Bedeutung zu.

Die Fragestellungen sollen durch Fortführung bereits laufender Langzeitversuche mit Metalldichtungen sowie durch Simulationen bzw. Berechnungen bearbeitet werden. Eine Ergänzung der laufenden Versuchsreihen um bisher nicht untersuchte Temperaturbereiche kann notwendig sein. Erkenntnisse und Messwerte Dritter werden analysiert. Auch eine systematische Auswertung der Periodischen Sicherheitsüberprüfung der Standortzwischenlager sollte auf Bundesebene erfolgen. Die Ergebnisse und Befunde können dann direkt in Sicherheitsanforderungen umgewandelt werden, deren Erfüllung im Genehmigungsverfahren durch die Antragsteller nachzuweisen ist.

Die aktuelle Zeitplanung bis zum Beginn der Einlagerung hochradioaktiver Abfälle in ein Endlager impliziert eine Verlängerung der Zwischenlagerdauer. Um die damit verbundenen Fragestellungen der weiteren sicheren Aufbewahrung beantworten zu können, muss frühzeitig Fachwissen im BfE aufgebaut werden. Auch muss das Wissen über den bei Ablauf der Genehmigungen der Zwischenlager vorliegenden Ist-Zustand der Behälter so umfangreich wie möglich sein, da dann wieder eine Entscheidung über eine lange Aufbewahrungsdauer zu treffen ist. Fragestellungen in diesem Themenfeld sind bspw.:

- Welche Mechanismen führen zu einer Verschlechterung der Materialeigenschaften?
- Wie verlief die Temperaturentwicklung von der Abfertigung bis zum Ende der Zwischenlagerung?
- Ist das Doppeldeckeldichtsysteem auch nach einer Verlängerung noch in der Lage, einen sicheren Abtransport zu gewährleisten?
- Ist die Handhabung der Behälter auch nach einer verlängerten Aufbewahrungsdauer noch sicher möglich?

Veränderungen an Strukturteilen, Hüllrohren und Behälterinventaren über die Aufbewahrungsdauer

Veränderungen innerhalb des Behälters sind für die weitere Zwischenlagerung zunächst von untergeordneter Bedeutung, da bei allen bestehenden Genehmigungen nach § 6 AtG sehr konservative Annahmen bezüglich des Inventarzustandes getroffen wurden. Mit Inbetriebnahme des Endlagers endet allerdings die Zwischenlagerung und die Behälter müssen zum Endlager transportiert werden. Dann folgt nach derzeitigem Stand ein Öffnen und Entleeren der Transport- und Lagerbehälter, um den Inhalt endlagerfähig zu konditionieren. Aus diesem Grund sind Betrachtungen über den Inventarzustand notwendig, da dieser massiv die notwendige Infrastruktur am zukünftigen Endlagerstandort beeinflusst.

Experimentelle Untersuchungen an Brennelementstrukturteilen, nach Anwendung im Reaktor (bestrahlter Zustand) und im unbestrahlten Zustand sind notwendig, um die zur Konditionierung notwendigen Anlagen planen zu können. Weitere experimentelle Daten und Untersuchungen werden für die Ermittlung von Werkstoffkennwerten und Betrachtungen zum Bruchverhalten bestrahlter Brennstäbe als Eingangsgröße für die Endlagerung benötigt. Erst nach Vorliegen entsprechender Daten kann eine geeignete Simulationssoftware entwickelt werden. Der derzeit öffentlich zugängliche Datenbestand ist dafür zu gering. Bisher wurden derartige Untersuchungen von den Betreibern vorgenommen; da diese aber einen Rückschluss auf die Reaktorfahrweise ermöglichen, wurden sie als Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse streng geschützt. Für die Genehmigung einer verlängerten Aufbewahrungsdauer und die Bewertung eingereicherter Sicherheitsnachweise müssen diese Daten vorliegen. Die Betrachtungen von Handhabungsstörfällen setzt ebenfalls die genaue Kenntnis des Behälterzustandes voraus.

Fragestellungen in diesem Themenfeld sind bspw.:

- Wie belastbar sind die Strukturteile eines Brennelements nach langer, trockener Zwischenlagerdauer? Gibt es relevante Unterschiede zwischen DWR- und SWR-Brennelementen?
- Erfüllen die Hüllrohre auch nach langer Zwischenlagerung noch ihre Rückhaltefunktion bzw. ist diese Barriere noch wirksam?
- Welche Druckverhältnisse herrschen in den Brennstäben?
- Welche mechanischen Kennwerte haben die unterschiedlichen Hüllrohrmaterialien?
- Unterscheiden sich die mechanischen Eigenschaften der in Deutschland verwendeten Brennstofftypen (ERU, WAU und MOX) nach langer Lagerung?

Spezielle Inventare: Verglaste Abfälle, Defektbrennstäbe und Brennstoffe aus der Forschung

Das derzeitige Konzept zur Entsorgung von Defektbrennstäben sieht vor, diese in Köcher zu verpacken, welche analog zu den Brennelementen in Behälter eingestellt werden können. Hier wird also die beschädigte Barriere des Hüllrohrs durch eine neue ersetzt. Da diese nicht den Belastungen des Reaktorbetriebs unterlag und zum Zwecke der Genehmigung zur Zwischenlagerung qualifiziert und begutachtet wurde, liegt hier ein sehr gut dokumentierter Zustand vor.

Brennstoffe aus der Forschung wie beispielsweise die Brennelemente des Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktors (AVR) Jülich, des Thorium-Hochtemperatur-Reaktors (THTR) und des Forschungsreaktors München (FRM) sind, durch ihre Unterschiedlichkeit und Einzigartigkeit, losgelöst von den Brennelementen der Leistungsreaktoren zu betrachten. Hier wurden bzw. werden andere Brennelemente mit anderen Anreicherungen verwendet, da die Funktionsweise und die Zielrichtung eine andere ist. Dadurch ist die Datenbasis bei diesen Abfällen national sowie auch international sehr viel geringer und eine Einzelfallbetrachtung ist unvermeidlich. Insbesondere durch die teilweise hohe Anreicherung der Forschungsreaktorbrennelemente sind hier spezielle Betrachtungen notwendig.

Grundsätzlich wichtige Aspekte bei der Bewertung der speziellen Inventare sind die Informationsbeschaffung und der Erhalt der Informationen über lange Zeiträume, da die Dokumentation bei Forschungsreaktoren möglicherweise von der bei Leistungsreaktoren abweicht.

Die Betrachtung der speziellen Inventare ist notwendig, um auch hier die Datenbasis für die Endlagerung und ggf. auch für die verlängerte Zwischenlagerung zu schaffen. Eventuell sind genau diese speziellen Inventare für die Auslegung des Endlagers relevant.

Fragestellungen in diesem Themenfeld sind bspw.:

- Kann bei verglasten Abfällen die Kokille als Barriere bei Zwischenlagerung und Transport, im Sinne des sicheren Einschusses, dienen?
- Wie ist die Gaszusammensetzung im Kopfraum der Kokille nach langer Zwischenlagerung?
- Können die Köcher zum Entnehmen des Inventars geöffnet werden?
- Sind die Strukturteile der Brennelemente aus Forschungsreaktoren noch handhabbar?
- Wie verhalten sich Sonderinventare (z. B. Brennelemente, die nur in geringer Stückzahl eingesetzt wurden)?

Bewertung der Wirksamkeit der Vorschriften zum sicheren Transport radioaktiver Stoffe

Zur Gewährleistung der Sicherheit bei der Beförderung radioaktiver Stoffe sind gefahrgutrechtliche Vorschriften vorhanden. Diese sehen unter anderem vor, dass die Wirksamkeit dieser Vorschriften regelmäßig durch die zuständigen Behörden zu bewerten ist. Eine solche Bewertung ist ein fortlaufender Prozess und sollte auf verschiedenen Wegen geschehen.

Es ist notwendig, bei Vorliegen von Hinweisen auf Probleme mit der technischen Begründung der Vorschriften, die Basis der technischen Grundlagen zu untersuchen. Da die Vorschriften aus Empfehlungen der IAEA abgeleitet werden, sollten dabei die Bewertung und Priorisierung des Transport Safety Standards Committee (TRANSSC) der IAEA beachtet werden, denn dieses koordiniert und entwickelt die Empfehlungen. Zur Berücksichtigung eigener Interessen sollten daher insbesondere auch durch die IAEA initiierte Vorhaben unterstützt werden. Weiterhin ist konkret die Sicherheit der Beförderung radioaktiver Stoffe in Deutschland zu prüfen. Dazu werden Häufigkeiten und Auswirkungen von Zwischenfällen ebenso untersucht wie Dosisleistungen aus dem Transport radioaktiver Stoffe für Beschäftigte und die Bevölkerung. Hierzu müssen Daten ermittelt und Modelle entwickelt werden.

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen dienen zum einen der Weiterentwicklung der gefahrgutrechtlichen Vorschriften für den sicheren Transport radioaktiver Stoffe. Dazu zählt auch die Absicherung dieser Vorschriften gegenüber neuen Erkenntnissen zu Transportpraktiken, Unfallszenarien und neuen Kriterien des Strahlenschutzes. Zum anderen sollten auch Erkenntnisse zu neuen Transportsituationen in Deutschland gewonnen werden (spezifische Probleme wie u.a. die Sicherheit der Rückführung radioaktiver Abfälle auf dem Seeweg, oder die Bündelung von Transporten im Zusammenhang mit Endlagerstandorten).

Fragestellungen in diesem Themenfeld sind bspw.:

- Wie müssen die grundlegenden Radionuklidwerte der gefahrgutrechtlichen Vorschriften angepasst werden, um aktuelle Erkenntnisse des Strahlenschutzes zu berücksichtigen? Müssen Freistellungskriterien verändert werden?
- Wie lassen sich die Freisetzung radioaktiver Stoffe aus Versandstücken und die Ausbreitung dieser Stoffe unter Unfallbedingungen der Beförderung modellieren?

- Wie verändert sich die Häufigkeit von Unfällen beim Transport radioaktiver Stoffe, auch bezogen auf die Gesamtzahl solcher Transporte? Welche Lehren werden aus diesen Unfällen gezogen?

Weitere Fragen werden sich zu speziellen Themen der Entsorgung ergeben, z. B. nach einer Bewertung von Transporten im Zusammenhang mit potentiellen Endlagerstandorten (u. a. Schacht Konrad für schwach- bis mittelradioaktive Abfälle), der Klassifizierung von Abfällen, dem Altersmanagement von Behältern und Inhalt.

Bewertung von Methoden für Sicherheitsnachweise auf den Gebieten Inventarberechnung, Dosisleistungsberechnung und Kritikalitäts-sicherheitsnachweis

Ein wichtiger Eckpfeiler der Sicherheit bei der Beförderung radioaktiver Stoffe ist die Verwendung nachweislich sicherer Versandstücke. Für jedes zulassungspflichtige Versandstückmuster muss ein von der zuständigen Behörde positiv bewerteter Sicherheitsbericht vorliegen, der u. a. die Einhaltung der verkehrsrechtlichen Dosisleistungsgrenzwerte, die Kritikalitätssicherheit und die Einhaltung der Freisetzungsgrenzwerte für Radionuklide nachweist. Die zugehörigen Analysen basieren grundsätzlich auf Rechnungen mit komplexen Programmen und Modellen. Die Methodik der Analysen einschließlich der Rechenmethoden ist laufend an den Stand von W&T anzupassen. In den Aufgabenbereich des BfE fällt deswegen auch, dessen Entwicklung zu verfolgen und mitzugestalten.

In Gremien und auf Konferenzen werden die verwendeten Methoden vorgestellt und diskutiert, andererseits auch neue Ideen und Ansätze verfolgt. Dabei steht auch immer wieder die Neubewertung des bisherigen Vorgehens im Fokus, d. h. es wird nicht nur diskutiert, ob eine Methode verfeinert und weiterentwickelt werden sollte, sondern auch, ob sie sicherheitstechnisch einen lückenlosen Nachweis erlaubt. Darüber hinaus findet eine Entwicklung der Methoden sowohl innerhalb der Behörde als auch bei den Antragstellern statt, da die in den Zulassungsverfahren gewonnenen Erfahrungen sich auf Folgeverfahren auswirken. Dieser Lernprozess wird ergänzt durch den genannten fachlichen Austausch auf anderen Ebenen, d. h. das BfE prüft fortlaufend, ob die in den Verfahren eingesetzten Methoden dem Stand von W&T entsprechen, und vermittelt Antragstellern die Entwicklung, sofern sie dies nicht selbstständig tun.

4.2 Sicherung

Sowohl die nationale als auch die internationale Entwicklung bedürfen eines unabhängigen forschungsgetriebenen fachlichen Hintergrunds, damit überhaupt ein Austausch von Wissen stattfinden kann.

Ohne eine von konkreten Zulassungsverfahren abgekoppelte Forschung würde sich ein beinahe statischer Stand von W&T einstellen, dessen Entwicklung maßgeblich von den Antragstellern und den von Ihnen geführten Verfahren und angewendeten Methoden abhängt.

Um Themen gezielt und in der nötigen Tiefe für eine fachliche Diskussion oder die direkte Berücksichtigung in den angewendeten Nachweis- und Analysemethoden zu bearbeiten, ist dezidierte Forschungstätigkeit notwendig. Die fachliche Begleitung für extern vergebene Aufträge durch Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des BfE, die die Methoden selbst anwenden, sichert die Übertragung auf die eigenen Prozesse.

Das Ziel und gleichzeitig der Nutzen für das BfE sind die Weiterentwicklung und die Rechtfertigung bestehender, in Zulassungsverfahren angewendeter Methoden. Dies betrifft sowohl die eigenen Analysen als auch die von Antragstellern vorgelegten. Weiterhin erarbeitet sich das BfE mit Hilfe der Forschungsergebnisse den nötigen fachlichen Hintergrund, um die Methodenentwicklung und Diskussion auf nationaler und internationaler Ebene mitzugestalten.

Fragestellungen in diesem Themenfeld sind bspw.:

- Existieren Nichtkonservativitäten in angewendeten Analyseverfahren?
- Sind Sicherheitsmargen bei der Anwendung einer Methode notwendig?
- Wie kann die Validierungspraxis für Rechenprogramme verbessert werden?
- Mit welchen Unsicherheiten sind die Ergebnisse der Rechenmethoden behaftet?
- Gibt es nicht berücksichtigte Effekte, die die Sicherheit einschränken können?
- Wie können mathematisch komplexe Sachverhalte wie Korrelationen mit vertretbarem Aufwand berücksichtigt werden?
- Was ist die Quelle von Abweichungen zwischen Rechen- und Messergebnissen?

Voraussetzung für die Erteilung von Genehmigungen für die Beförderung sowie die Aufbewahrung von Kernbrennstoffen ist gemäß § 4 Abs. 2 Nr. 5 und § 6 Abs. 2 Nr. 4 AtG, dass der erforderliche Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD) gewährleistet ist. Dieses Themengebiet wird allgemein als „Sicherung“ bezeichnet und beinhaltet insbesondere Prüfungen der vom Genehmigungsinhaber zu ergreifenden Sicherungsmaßnahmen gegen Terror- und Sabotageakte. Zentrale sicherungstechnische Forschungsaspekte sind u.a. die Bewertung der radiologischen Auswirkungen eines gezielt herbeigeführten Flugzeugabsturzes, die Bestimmung und Bewertung der maximalen thermischen und mechanischen Belastungsgrenzen der Transport- und Lagerbehälter sowie die Bestimmung der radiologischen Auswirkungen von SEWD unabhängig von einer konkreten Transportkonfiguration.

Vergleichende Rechenmodelle und Simulationen im Hinblick auf den gezielt herbeigeführten Flugzeugabsturz

Gezielte terroristische Einwirkungen unter Verwendung gängiger Verkehrsflugzeuge entziehen sich weitestgehend der technisch-wissenschaftlichen Erfahrung. Die Übertragbarkeit von Erkenntnissen aus unfallbedingten Absturzszenarien ist erheblich eingeschränkt. Insofern gibt es keine unmittelbar verwendbaren technischen Maßstäbe für die Bewertung von Annahmen im Hinblick auf dieses Szenario. In Anbetracht fehlender Erfahrungen, Regelungen und internationaler Bewertungsweisen kommen daher im Rahmen der sicherungstechnischen Prüfung dieses Szenarios insbesondere ingenieurtechnische Einschätzungen zum Tragen. Die Begründetheit, Belastbarkeit und Willkürfreiheit dieser ingenieurtechnischen Einschätzungen sind sowohl für die Öffentlichkeit als auch die Gerichte in der Regel nur schwer nachvollziehbar. Erschwerend tritt hinzu, dass eine detaillierte Darstellung der Prüfungen sowie der den Prüfungen zugrunde liegenden Annahmen größtenteils bereits aus Gründen des Geheimnisses nicht möglich ist. Eine Validierung der bisherigen Berechnungen zu den radiologischen Folgen eines gezielt herbeigeführten Flugzeugabsturzes ist deshalb geboten. Zum einen kann hierdurch die Datenbasis im Hinblick auf die

Auswirkungen eines gezielt herbeigeführten Flugzeugabsturzes vergrößert werden. Zum anderen können die gewonnenen Erkenntnisse dazu dienen, die Vorgehensweise des BfE in Genehmigungsverfahren nach § 6 AtG zu bestätigen sowie die Argumentationslinie des BfE in möglichen Gerichtsverfahren zu stärken. Die Validierung sollte anhand der Durchführung von vergleichenden Rechenmodellen und Simulationen, z. B. in Form von Berechnungen mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM), erfolgen. Alternativ besteht inzwischen auch die Möglichkeit einer vollständigen numerischen Simulation dieses Szenarios. Zudem ist im Hinblick auf einzelne Teilaspekte dieses Szenarios die Durchführung von experimentellen Versuchen angezeigt.

In diesem Feld ergeben sich damit folgende Forschungsfragen:

- Sind neuere und effektivere Rechenmodelle zur Bewertung der radiologischen Auswirkungen eines gezielt herbeigeführten Flugzeugabsturzes vorhanden? Sind diese Rechenmodelle hinreichend validiert und verifiziert?
- Kommen diese neuen Rechenmodelle im Hinblick auf die Bewertung der radiologischen Auswirkungen eines gezielt herbeigeführten Flugzeugabsturzes zu vergleichbaren Ergebnissen? Falls nicht, was ist die Ursache für die unterschiedlichen Ergebnisse und welche Bedeutung kommt den Differenzen im Hinblick auf die Verwaltungspraxis des BfE in Genehmigungsverfahren nach § 6 AtG zu?
- Können die Berechnungen zur Bewertung der radiologischen Auswirkungen eines gezielt herbeigeführten Flugzeugabsturzes – zumindest in Bezug auf Teilaspekte – experimentell bestätigt werden?

Maximale thermische und mechanische Belastungsgrenzen der Transport- und Lagerbehälter

In Genehmigungsverfahren nach § 6 AtG wird das Verhalten der Transport- und Lagerbehälter unter mechanischen und thermischen Lastwirkungen bei einem gezielt herbeigeführten Flugzeugabsturz auf ein Kernbrennstoffzwischenlager bewertet. Bisher wurde nachgewiesen, dass eine erhebliche Freisetzung von radioaktiven Stoffen infolge dieses Szenarios sicher ausgeschlossen werden kann. Daher bestand bislang nicht die Notwendigkeit, die maximalen thermischen und

mechanischen Belastungsgrenzen der Transport- und Lagerbehälter im Rahmen von Genehmigungsverfahren nach § 6 AtG zu bestimmen.

Anhand von Berechnungen, Simulationen sowie ggf. experimentellen Versuchen sollen die maximalen thermischen und mechanischen Belastungsgrenzen der Transport- und Lagerbehälter bestimmt werden.

Eine Bestimmung dieser Aspekte ermöglicht dem BfE, insbesondere im Rahmen von Gerichtsverfahren oder Diskussionen mit der Öffentlichkeit fundiert auf über die eigentlichen Aspekte des Genehmigungsverfahrens hinausgehende Fragestellungen zum gezielt herbeigeführten Flugzeugabsturz zu reagieren. Zudem können die Erkenntnisse genutzt werden, um dem Informations- und Transparenzbedürfnis der Öffentlichkeit/Gerichte zu entsprechen und zugleich Aspekten des Geheimschutzes im Rahmen von Genehmigungsverfahren nach § 6 AtG Rechnung zu tragen.

Fragestellungen in diesem Feld sind z.B.:

- Was sind die maximalen mechanischen und thermischen Belastungsgrenzen der Transport- und Lagerbehälter?
- Bis zu welcher Temperatur bzw. Dauer der thermischen Belastung können die derzeit angesetzten Freisetzungsraten bestätigt werden?
- Treten bei einer größeren thermischen oder mechanischen Belastung der Transport- und Lagerbehälter Effekte auf, die bei bestimmten thermischen oder mechanischen Belastungssprunghaft zu extremen Freisetzungen radioaktiver Stoffe führen?

Entwicklung von generischen Rechenmodellen zur Bestimmung der radiologischen Auswirkungen von SEWD unabhängig von der konkreten Transportkonfiguration

In den vergangenen Jahren wurde das sicherungstechnische Regelwerk für die Beförderung von Kernbrennstoffen umfassend überarbeitet. In Abhängigkeit vom zu befördernden Material, dem eingesetzten Behälter etc. können nunmehr auch Freisetzungsberechnungen im Rahmen von Genehmigungsverfahren nach § 4 AtG erforderlich werden.

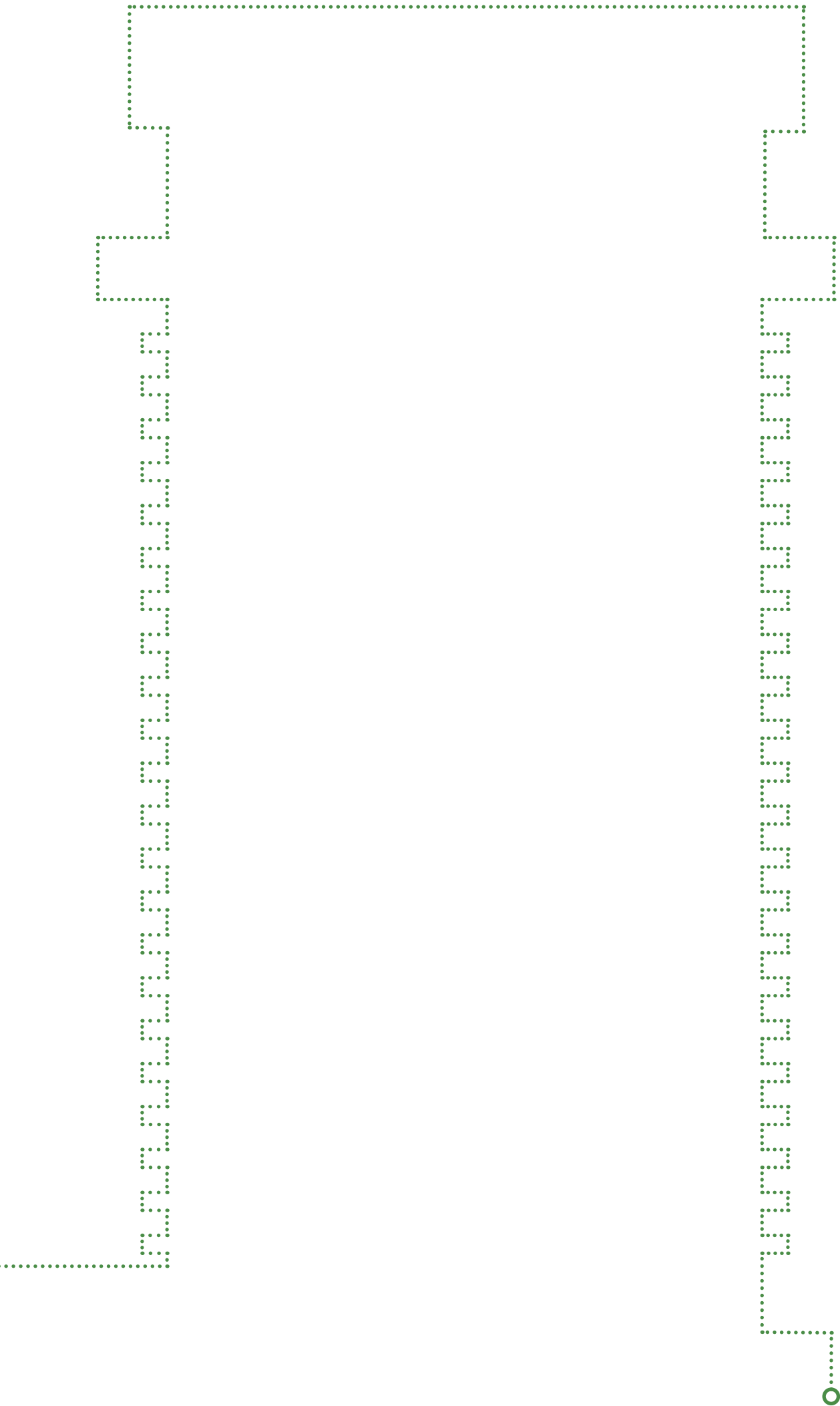
In Ermangelung einer vorhandenen Datenbasis werden derzeit die Freisetzungsberechnungen anhand der konkreten Transportkonfiguration durchgeführt, was aufgrund des erforderlichen

Aufwandes zur Erstellung der notwendigen Rechenmodelle hierfür grundsätzlich zu aufwendigen Prüfungen führt. Im Interesse einer zügigen und effektiven Durchführung von Genehmigungsverfahren nach § 4 AtG, in denen eine Freisetzungsberechnung zu erfolgen hat, ist es angezeigt, generische Rechenmodelle zu entwickeln, anhand derer ohne aufwendige Prüfungen die radiologischen Auswirkungen von SEWD bestimmt werden können.

Sofern es gelingt, ein auf konkrete Transportkonfigurationen übertragbares generisches Rechenmodell zur Bestimmung der radiologischen Auswirkungen von SEWD zu entwickeln, können die sicherungstechnischen Prüfungen in Genehmigungsverfahren nach § 4 AtG, in denen Freisetzungsberechnungen durchzuführen sind, deutlich effizienter bearbeitet werden.

Fragestellungen in diesem Feld sind z. B.:

- Gibt es generische Rechenmodelle, anhand derer die radiologischen Auswirkungen unabhängig von der konkreten Transportkonfiguration bestimmt werden können?
- In welcher Weise hat die Transportkonfiguration Auswirkungen auf den Grad der Freisetzung?



5.
Endlagerstandort
mit der
bestmöglichen
Sicherheit

5.1

Umsetzung des Standortauswahlverfahrens

5.2

Anforderungen und Kriterien des StandAG

5.3

Methoden zur Erkundung, Untersuchung und Auswertung

5.4

Prozessverständnis und naturwissenschaftliche Zusammenhänge

5.5

Sicherheitskonzepte und Bewertungsmethoden

5.6

Szenarienentwicklung

5.7

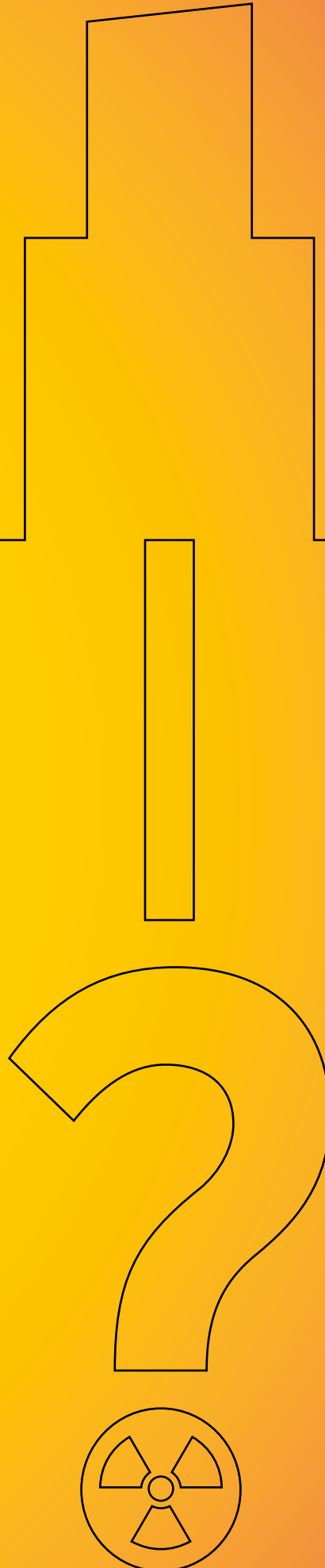
Sicherheitsbetrachtungen


5.8

Nachweisführung für die technische Machbarkeit von Endlagerkomponenten

5.9

Bewertungsmaßstäbe und Vergleichsmöglichkeiten





Auf Grundlage des am 16.05.2017 in Kraft getretenen Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (StandAG) ist in Deutschland für die im Inland verursachten hochradioaktiven Abfälle der Endlagerstandort mit der bestmöglichen Sicherheit zu ermitteln.

Entsprechend der gesetzlichen Regelung soll die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen erfolgen, für die grundsätzlich die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein in Betracht kommen. Das Verfahren zur Auswahl des Standortes mit der bestmöglichen Sicherheit und die im Verfahren anzuwendenden Anforderungen und Kriterien sind im StandAG formuliert und definiert.

Zur Identifizierung der im Bereich der Forschung zu betrachtenden Themenkomplexe im Rahmen des Standortauswahlverfahrens und der Endlager-sicherheit orientiert sich das BfE an den international anerkannten Inhalten des Safety Case und dem Vorgehen bei dessen Erstellung.

Gemäß Definitionen der IAEA (IAEA 2012) und OECD/NEA (OECD 2013) verfolgt der Safety Case insbesondere das Ziel, über den gesamten Zeitraum des Projektes die Argumente zu dokumentieren, aus denen letztendlich die Sicherheit eines Endlagers abzuleiten ist. Dabei wird nicht nur auf den aktuellen Wissensstand fokussiert, sondern ausdrücklich auch die im Laufe des Projektes noch zu klärenden Fragen thematisiert (Forschungsbedarf) sowie der Umgang mit noch verbleibenden Ungewissheiten diskutiert. In diesem Prozess ist für sämtliche Entscheidungsschritte eine transparente und nachvollziehbare Dokumentation notwendig.

Im Hinblick auf das Standortauswahlverfahren leiten sich der Forschungsbedarf wie auch die inhaltliche und zeitliche Ausrichtung der Forschung aus den Aufgaben des StandAG und den zugehörigen Verordnungen ab (der Forschungsbedarf zur Öffentlichkeitsbeteiligung wird in Kapitel 6.1 aufgeführt). Durch Identifizierung von Lücken und Defiziten zwischen dem zur Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen benötigten Wissensstand und dem bestehenden Wissen lässt sich der Bedarf an Forschung formulieren.

Im Folgenden werden die einzelnen, derzeit identifizierbaren Themenfelder benannt, die für die Ermittlung des Standortes mit der bestmöglichen Sicherheit voraussichtlich von Bedeutung sein werden. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der prinzipiellen Herausforderung, Kriterien, Anforderungen und Indikatoren zu identifizieren, die einen Vergleich unterschiedlicher wirtsgesteinsspezifischer Charakteristika und Sicherheitskonzepte erlauben.

5.1 Umsetzung des Standortauswahl- verfahrens

Im StandAG wird der grundsätzliche Ablauf der Standortauswahl für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle festgeschrieben. Das Verfahren ist nicht nur national ein Einzelfall, sondern auch international in dieser Form noch nicht vergleichbar umgesetzt worden. In vielen Punkten kann daher nicht auf Erfahrungswerte Dritter zurückgegriffen werden. Die Umsetzung des Standortauswahlverfahrens stellt das BfE vor neue Herausforderungen.

Damit das BfE eigene Bewertungsgrundlagen und Prüfkataloge erstellen kann, müssen Schnittstellen, Pfadabhängigkeiten sowie Handlungsbedarfe innerhalb der Umsetzung des Standortauswahlverfahrens definiert und bekannt sein. Insbesondere ist es wichtig zu wissen, wann im Verfahrensablauf von den Verantwortlichen und vor allem dem BfE verfahrensrelevante Entscheidungen getroffen werden müssen und welche möglichen Auswirkungen auf den weiteren Prozessablauf damit verbunden sein können. Gleichzeitig benötigt das BfE Wissen zu den möglichen Handlungsspielräumen der jeweiligen Verfahrensbeteiligten, da das StandAG keine konkreten Vorgaben zu solchen Handlungsspielräumen macht. Diese Kenntnisse unterstützen das BfE dabei, Prozess- und Terminrisiken im Standortauswahlverfahren frühzeitig zu erkennen und zu minimieren. Gleichzeitig eröffnen sie dem BfE die Gelegenheit, Lösungen für verschiedene generische Fallbeispiele zu erarbeiten und vorzubereiten, um somit im Standortauswahlverfahren schnell und lösungsorientiert handeln zu können. Darüber hinaus muss möglicher weiterer Forschungsbedarf zu den einzelnen Themenfeldern des Standortauswahlverfahrens im Allgemeinen oder zum Prozess selbst identifiziert und spezifiziert werden.

5.2 Anforderungen und Kriterien des StandAG

Die §§ 22 bis 25 des StandAG legen qualitative und quantitative Anforderungen und Kriterien für die Auswahl eines Standortes für hochradioaktive Abfälle fest. Die Anlagen 1 bis 12 des StandAG spezifizieren die geowissenschaftlichen (§ 24) und planungswissenschaftlichen (§ 25) Abwägungskriterien und unterteilen diese in verschiedene Wertungsgruppen. Allerdings enthält das StandAG keine detaillierte wissenschaftliche Begründung insbesondere der quantitativen Anforderungen und Kriterien sowie der Einteilung in die verschiedenen Wertungsgruppen. Auch gibt das StandAG keine Handlungsanweisungen oder Hinweise, wie mit Unsicherheiten einzelner Daten bzw. Datensätze sowie mit Datenlücken in Bezug auf die Beurteilung und Anwendung der §§ 22 bis 25 umzugehen ist. Die Entscheidungen im Rahmen des Standortauswahlverfahrens erfordern eine belastbare Dokumentation der Entscheidungsgrundlagen. Ferner lassen sich getroffene Entscheidungen nur dann vermitteln, wenn nachvollziehbar ist, auf welchen Begründungen die angewandten Anforderungen und Kriterien basieren und wie diese anzuwenden sind. Auch mögliche Rücksprünge im Verfahren lassen sich nur dann begründen, wenn die Grundlagen für frühere Entscheidungen hinreichend belegt und dokumentiert sind. Dadurch ergeben sich auch Fragestellungen zum Umgang mit verschiedenen Arten von Ungewissheiten, die den Daten und Datenlücken innewohnen.

5.3 Methoden zur Erkundung, Untersuchung und Auswertung

Die Vorhabenträgerin hat die nach § 15 StandAG bestimmten Standortregionen übertägig zu erkunden und günstige Standorte zu ermitteln und vorzuschlagen. Anschließend hat sie die nach § 17 StandAG bestimmten Standorte untertägig zu erkunden. Sowohl für die übertägige als auch untertägige Erkundung erarbeitet die Vorhabenträgerin standortbezogene Erkundungsprogramme und Prüfkriterien nach Maßgabe der Anforderungen und Kriterien der §§ 22 bis 24 StandAG sowie den Anforderungen an die weiterentwickelten und umfassenden, vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß § 27 StandAG. Dem BfE obliegt es, diese Erkundungsprogramme und Prüfkriterien zu prüfen und abschließend festzulegen. Es ist dabei sicherzustellen, dass Erkundungs- und Untersuchungsmethoden gewählt werden, die dem Stand von W&T entsprechen und Ergebnisse liefern, die eine belastbare und nachvollziehbare Anwendung der Anforderungen und Kriterien erlauben. Für die Erfüllung dieser Aufgabe ist es erforderlich, dass sich das BfE einen vollständigen Überblick bereits existierender oder sich in der Entwicklung befindlicher Erkundungs- und Untersuchungsmethoden verschafft. Hierbei ist zu berücksichtigen, welche Charakteristika und Randbedingungen (Nachweisgrenzen, Anwendungsbeschränkungen, Messunsicherheiten, zeitlich beeinflussende Faktoren etc.) für die einzelnen Methoden gelten. Hierauf aufbauend muss das BfE bewerten, welche der Methoden für die geforderten Erkundungsziele geeignet sind. Des Weiteren sind mögliche Methoden zur Auswertung der jeweiligen Daten kritisch zu analysieren und ggf. zu entwickeln. Im Falle mehrerer in Betracht kommender Methoden muss das BfE die jeweiligen Vor- und Nachteile und die daraus erwachsenden möglichen Konsequenzen bei der Anwendung der Anforderungen und Kriterien betrachten und bewerten. Unterschiedliche Bewertungsmöglichkeiten sind dabei nicht allein für die zukünftig zu generierenden Erkundungs- und Untersuchungsergebnisse wichtig, sondern bereits bei der Auswertung vorhandener Daten für die Ermittlung der Teilgebiete zu berücksichtigen. Hierbei ist insbesondere auf unterschiedliche Datenqualitäten sowie räumliche und zeitliche Auflösung zu achten.

5.4 Prozessverständnis und naturwissenschaftliche Zusammenhänge

Von zentraler Bedeutung für den gemäß StandAG zu ermittelnden Endlagerstandort mit der bestmöglichen Sicherheit ist die Langzeitsicherheit. Um diese bewerten zu können, ist ein wirtsgesteinspezifisches Verständnis der relevanten Prozesse und naturwissenschaftlichen Zusammenhänge sowohl im Nah- als auch im Fernfeld erforderlich. Wesentliche Elemente für Betrachtungen der Langzeitsicherheit sind die einzulagernden radioaktiven Abfälle (Menge, Art, radiologische und stoffliche Eigenschaften, Anordnung, etc.) sowie gekoppelte thermische, hydraulische, mechanische und chemische/biologische („THMC/B“) Prozesse und ihre Abhängigkeit von internen und externen Rahmenbedingungen. Ein fundiertes Verständnis der (möglicherweise) ablaufenden Prozesse ist notwendig, um die numerischen Betrachtungen und Modellierungen der Langzeitsicherheitsanalysen durchführen zu können. Zentrale interne Prozesse im Endlagersystem sind der radioaktive Zerfall und die daraus (unter Berücksichtigung weiterer, spezifischer Informationen) ableitbare zeitliche Änderung der Zusammensetzungen der Abfälle, die Temperaturentwicklung sowie eine Gasentwicklung bzw. -freisetzung. Externe Prozesse sind beispielsweise Änderungen des gebirgsmechanischen Spannungszustandes sowie Änderungen hydrodynamischer (z.B. verstärkter Lösungsfluss) oder hydrogeochemischer (z.B. veränderte Grundwasserzusammensetzung) Parameter. Neben der Betrachtung des Gesamtsystems muss auch die Betrachtung von Teilsystemen erfolgen. Dies erfordert ein hinreichend detailliertes Verständnis für die im Nah- und Fernfeld der einzulagernden radioaktiven Abfälle ablaufenden Prozesse sowie ihre wechselseitigen Abhängigkeiten und Beeinflussungen. Wichtig für ein entsprechendes Prozessverständnis sind einerseits eine qualifizierte und validierte Datenbasis, andererseits eine auf die zu betrachtenden Zeiträume belastbare Modellierung. Wie verschiedene Arten von Unsicherheiten in solchen Modellierungen am besten berücksichtigt werden können, ist eine der entscheidenden Fragen, der in den nächsten Jahren nachgegangen werden muss.

Eine der elementaren Eingangsgrößen in vielen Modellierungen sind thermodynamische Daten, welche experimentell in Laboren ermittelt werden können. Allerdings sind z. B. gerade für Radionuklide und ihrer Verbindungen bei erhöhten Temperaturen, wie sie im Umfeld der Behälter mit hochradioaktiven Abfällen zu erwarten sind, kaum experimentelle Daten verfügbar. Diese Datenlücken werden derzeit durch Schätzungen bzw. Übertragung von Daten aus bekannten, chemisch ähnlichen Systemen geschlossen, ermittelt bzw. extrapoliert.

Das für eine Bewertung der Langzeitsicherheit notwendige Prozessverständnis erfordert somit Forschungstätigkeit auf verschiedenen Ebenen. So erfordern einige Aspekte von (repräsentativen) Sicherheitsuntersuchungen und generellen Betrachtungen der Langzeitsicherheit eines Endlagers noch Verbesserungen im fundamentalen Prozessverständnis. Auch sind Arbeiten zu leisten, die die Übertragbarkeit und Abbildung von Prozessen in quantitative Modellierungen ermöglichen.

Themen sind beispielsweise

- Ermittlung wirtsgesteinsspezifischer, belastbarer experimenteller Daten in den zu betrachtenden Szenarien (insbesondere bei erhöhten Temperaturen oder höher bis hochkonzentrierten salinaren Lösungen)
- Verhalten unterschiedlicher Abfallklassen (z. B. verschiedene Brennstabtypen und verglaste hochradioaktive Abfälle) unter Endlagerbedingungen inklusive dem Verständnis des Freisetzungsverhaltens der Radionuklide
- (Weiter-)Entwicklung und Überprüfung bestehender numerischer THMC/B Modelle bzw. Modellierungsansätze für eine eigenständige und unabhängige Bewertung der Prozesse auf verschiedenen Skalen
- Korrosions-/Alterationsverhalten technischer und geotechnischer Materialien
- Sorption von Radionukliden an den unterschiedlichen Barrieren eines Endlagers
- Quantifizierung der Unsicherheiten und Entwicklung einer Methodik zum Umgang mit diesen Unsicherheiten im Rahmen von Modellierungen

Zudem muss das BfE in der Lage sein, die Berücksichtigung des Standes von W&T in naturwissenschaftlich-fachlichen Aspekten des Standortauswahlverfahrens prüfen und bewerten zu können. Durch experimentelle Labor- oder in-situ Untersuchungen sowie Modellierungsvorhaben, beispielsweise im Rahmen geeigneter Kooperationen mit (inter)nationalen Institutionen, kann dieses Prozessverständnis verbessert werden und Eingang in die Suche nach einem Endlagerstandort finden.

5.5 Sicherheitskonzepte und Bewertungsmethoden

Ein grundlegender Schritt bei der Planung eines Endlagerkonzeptes ist die Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes und einer sicherheitsgerichteten Bewertungsmethode für das Langzeitverhalten. Das Sicherheitskonzept beschreibt dabei zunächst, durch welche geologischen Gegebenheiten und technischen Maßnahmen die geforderte Sicherheit für ein Endlager erreicht werden kann. Für die unterschiedlichen Wirtsgesteine kommen dabei unterschiedliche Grundsätze zur Anwendung.

Intaktes Steinsalz ist unter Idealbedingungen praktisch undurchlässig für Lösungen und Gase. Daher wird für dieses Wirtsgestein der vollständige Einschluss der Abfälle angestrebt. Lösungen von außerhalb des Wirtsgesteins kommen somit bei intakter Barriere nicht in Kontakt mit den Abfällen, und eine Ausbreitung von Radionukliden wird vollständig verhindert. Es ist jedoch zu zeigen, dass das Steinsalz im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) über den Bewertungszeitraum integer bleibt. Aufgrund der Löslichkeit von Steinsalz gegenüber untersättigten Salzlösungen besteht eine zentrale Anforderung darin, dass ein Kontakt des Wirtsgesteins mit ungesättigten Salzlösungen ausgeschlossen ist. Das Wirtsgestein Tongestein ist zwar nicht als dicht anzusehen, jedoch kann das Gestein so gering durchlässig sein, dass der Transport von Radionukliden ausreichend verzögert wird, um ihren sicheren Einschluss zu gewährleisten. Dazu müssen jedoch Richtung und Geschwindigkeit der bevorzugten Transportwege identifiziert werden. Auch müssen die Sorptionseigenschaften des Tongesteins gegenüber zahlreichen Radionukliden berücksichtigt werden, die zusätzlich transportverzögernd wirken.

Im Kristallin basiert das Sicherheitskonzept im Wesentlichen auf dem Erhalt der Integrität der geotechnischen und technischen Barrieren über den gesamten Bewertungszeitraum von einer Million Jahre. Das Gebirge schützt den Behälter dabei weitestgehend vor mechanischen Einwirkungen. Bei bekanntem und prognostizierbarem geochemischen Milieu muss der Behälter dann ausreichend korrosionsstabil ausgelegt werden, um eine Freisetzung von Radionukliden während des Bewertungszeitraums zu verhindern.

Für alle drei grundsätzlich in Frage kommenden Wirtsgesteine liegen national und international

bereits generische Sicherheits- und Endlagerkonzepte vor. Mit zunehmendem Kenntnisgewinn sind diese im Laufe des weiteren Verfahrens zu spezifizieren und an die vorgefundenen Gegebenheiten anzupassen.

Für die im Sicherheitskonzept beschriebenen Komponenten und die an sie gestellten Anforderungen sind geeignete Bewertungskonzepte zu entwickeln und Bewertungsmethoden anzuwenden, um die geforderten Eigenschaften und Funktionen gewährleisten zu können. Diese Bewertungsmethoden haben sich am Stand von W&T zu orientieren. Bei Weiterentwicklungen des Standes von W&T müssen die Bewertungsmethoden einerseits angepasst werden, andererseits ist zu beurteilen, inwieweit die Weiterentwicklungen einen Einfluss auf die bereits getroffenen Sicherheitsaussagen haben.

Neben diesen generellen Forschungsthemen zu den Sicherheitskonzepten und Bewertungsmethoden gibt es zwei weitere Aspekte, die für das deutsche Standortauswahlverfahren wichtig sind. Das StandAG schreibt in § 27 (5) vor, dass im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen eine Beurteilung erfolgen soll, inwiefern zusätzlich zu den hochradioaktiven Abfällen eine Endlagerung von schwach- bis mittelradioaktiven Abfällen am gleichen Standort erfolgen kann, ohne dabei die Sicherheit in Bezug auf die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle negativ zu beeinflussen. Die Auswirkungen dieser gesetzlichen Vorgabe auf die Standortauswahl (Größe der erforderlichen Gesteinsformation) und die Sicherheitskonzepte (z.B. chemische Wechselwirkungen, Gasbildung) sind zu analysieren und im weiteren Prozess zu berücksichtigen.

Weiterhin ist der Einfluss der gesetzlich geforderten Gewährleistung der Rückholbarkeit und der Ermöglichung einer Bergung der Abfälle auf die bereits bestehenden Sicherheitskonzepte zu prüfen und der sich für die Langzeitsicherheitsbewertungen Änderungsbedarf auszuweisen, um ihn bei weiterführenden Planungen und Prüfungen berücksichtigen zu können.

Für die Phase nach Verschluss des Endlagers sind die Anforderungen an ein mögliches Überwachungskonzept zu entwickeln, anhand dessen kontrolliert werden kann, ob sich das Endlager-system in Bezug auf sicherheitsrelevante Aspekte entsprechend der Planung entwickelt.

5.6 Szenarientwicklung

Die Szenarientwicklung ist ein fundamentaler Baustein der Langzeitsicherheitsanalyse, die die Sicherheit eines Endlagers in der Nachverschlussphase bewertet. Durch die systematische Analyse von möglichen Ereignissen, den Bedingungen am Standort sowie den ablaufenden Prozessen innerhalb des Endlagers und seiner Umgebung werden zukünftige mögliche Entwicklungen (relevante Szenarien) identifiziert. Bei der Szenarientwicklung werden relevante Szenarien ausgewählt und ausführlich beschrieben.

Bereits in den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß § 27 StandAG soll bewertet werden, inwieweit der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle unter Ausnutzung der geologischen Standortgegebenheiten erwartet werden kann. Dabei werden Aspekte betrachtet, die sich auf die Szenarientwicklung für die Nachverschlussphase beziehen. Allerdings gibt es keine genauen Anforderungen hinsichtlich der Anwendung und Entwicklung einer Methode zur systematischen Ableitung von Szenarien im Verlauf des Standortauswahlverfahrens. Hierzu besteht Klärungs- und Forschungsbedarf.

Folgende Betrachtungen sind für die systematische Ableitung von relevanten Szenarien im Verlauf des Standortauswahlverfahrens in Abhängigkeit von der jeweiligen Datenlage zu dokumentieren und durch Forschungstätigkeiten zu untermauern, gegebenenfalls zu bearbeiten und zu vertiefen:

- Vollständigkeit der „Feature, Events and Processes“ (FEPs),
- Einordnung von unterschiedlich zu bewertenden Entwicklungen,
- Umgang mit Ungewissheiten,
- Phasenabhängige Ermittlung der Anwendbarkeit genereller oder standortbezogener Methoden,
- Gegenüberstellung genereller und standortbezogener Methoden zur systematischen Ableitung von Szenarien und Ermittlung der phasenbezogenen Anwendbarkeit,
- Qualitätseinschätzung zu den Methoden.

Ziel ist es, die Robustheit des Endlagersystems und der einzelnen Komponenten zu verifizieren.

5.7 Sicherheits- betrachtungen

Das Standortauswahlverfahren und das Genehmigungsverfahren für ein Endlager erfordern transparente und nachvollziehbare Methoden zur Entscheidungsfindung. Um dem Primat der Sicherheit gerecht zu werden, sind verschiedene Sicherheitsanalysen (u. a. zur Kritikalitätssicherheit) notwendig. Alle Elemente zur Bewertung der Sicherheit eines Standorts zur Endlagerung werden unter dem Begriff „Sicherheitsbetrachtungen“ zusammengefasst (DAEF 2017). Zur Sicherheitsbewertung ist die Darstellung des Standes von W&T hinsichtlich der angewendeten Methodik notwendig. Im Verlauf des Standortauswahlverfahrens werden numerische Modelle ein wesentlicher Bestandteil dieser Methodik sein. Zunächst muss das BfE die Möglichkeiten und Grenzen von verbal-argumentativen Vorgehensweisen und numerischen Modellierungen beurteilen und anschließend für die anzuwendenden Modelle Anforderungen entwickeln.

Bei der numerischen Modellierung sind spezielle Anforderungen für deterministische und probabilistische Modelle zu erarbeiten. Gleiches gilt für die Frage, unter welchen Voraussetzungen realistisch oder konservativ zu modellieren ist. Darüber hinaus sind auch Empfehlungen hinsichtlich der Kombination der anzuwendenden Methoden zur Erhöhung der Aussagekraft zu erarbeiten.

Bei einer Modellierung handelt es sich um die Approximation des realen Verhaltens. Sowohl bei der physikalisch-chemischen als auch bei der numerischen Umsetzung der Modellierung treten Unschärfen auf. Die im Rahmen der Sicherheitsanalysen betrachteten Zeiträume für die Entwicklung eines Endlagersystems über eine Million Jahren gehen über die experimentell überprüfbaren Zeiträume weit hinaus. Aussagen über die Gültigkeiten der Modellannahmen können daher nur für einen Teilbereich der Betrachtungen erfolgen. Es sind daher Anforderungen an die Validierung und Kalibrierung von numerischen Modellen zu entwickeln.

Neben der eigentlichen Umsetzung der Modellierung spielt der gewählte Code selbst eine wichtige Rolle. Bei der Entwicklung eines Codesystems ist darauf zu achten, dass die Umsetzung der physikalisch-chemischen Modellierung dem Stand von W&T und der jeweils zu beantwortenden Frage entspricht. Die Nachvollziehbarkeit der Implementierung ist einerseits zur Qualitätssicherung notwendig, andererseits ist dies auch ein bedeutendes Element des Wissensmanagements bzw. des Kompetenzerhalts und trägt zugleich zur Transparenz der verwendeten Methodik bei. Diesbezüglich ist auch zu prüfen, ob die Modellierung in frei verfügbaren Open Source Programmen umgesetzt werden kann. Dabei sind Anforderungen an die Strategie zur Dokumentation und Verifizierung eines Codes zu entwickeln.

5.8 Nachweisführung für die technische Machbarkeit von Endlagerkomponenten

Die genehmigungsfähige Planung eines Endlagers umfasst neben den theoretischen Nachweisführungen auch die praktischen Belege der technischen Machbarkeit und der geforderten Funktionalität für technische Maßnahmen unter den gegebenen Randbedingungen am Standort. In der Regel werden hierbei sowohl laborteknische Methoden als auch Labor- und in situ-Versuche herangezogen. Diese sind sowohl für die Errichtung des Bergwerks, die Funktionalität der gesamten Infrastruktur während der Betriebs- und Verschlussphase als auch für geplante Bauwerke oder technische Maßnahmen und die dabei zur Anwendung kommenden Materialien zu erbringen. Durch die Anforderungen des StandAG bezüglich der Rückholbarkeit sowie der Ermöglichung einer Bergung sind wirtsgesteinsspezifische Untersuchungen an den unterschiedlichen Behältertypen durchzuführen, um den Beleg für die technische Machbarkeit zu erbringen.

Während die theoretischen Nachweisführungen dem Stand von W&T entsprechen müssen, ist für die technische Machbarkeit der Nachweis nach Stand der Technik gefordert. Für diese zu erbringenden Nachweise sind Anforderungen für die Prüfung durch das BfE zu formulieren sowie Kriterien für experimentelle und rechnerische Nachweise zu entwickeln.

Bei der Endlagerung existieren zudem vielfach Anforderungen an die technischen Funktionsnachweise, die über das hinausgehen, was nach heutigem Stand von W&T mess- und ermittelbar ist. Diese Problematik bezieht sich sowohl auf einzelne Messgrößen als auch nachzuweisende Zeiträume. Es ist zu klären, inwieweit hier anerkannte Extrapolationsverfahren zur Anwendung kommen können oder diese neu zu entwickeln sind.

5.9 Bewertungsmaßstäbe und Vergleichs- möglichkeiten

Während des Standortauswahlverfahrens sind für die Identifizierung und Festlegung eines Endlagerstandortes mit der bestmöglichen Sicherheit mehrfache sicherheitsgerichtete Abwägungen auf Grundlage der in den §§ 24 und 25 Stand AG definierten Kriterien sowie sicherheitsgerichtete Vergleiche und vergleichende Bewertungen im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (§ 27 StandAG) durchzuführen. Das StandAG enthält jedoch keine Vorgabe, wie die verschiedenen Vergleiche und Bewertungen durchzuführen sind.

Insbesondere sind Bewertungen und Vergleiche durchzuführen für die:

- Ergebnisse der Sicherheitsuntersuchungen,
- Sicherheitsgerichtete Abwägung der Ergebnisse der einzelnen Abwägungskriterien,
- Ergebnisse der geologischen Gesamtsituation,
- Ergebnisse der ermittelten Standortregionen und Standorte,
- Abwägung fachlicher, öffentlicher und privater Interessen.

Die bei verschiedenen vergleichenden Bewertungen angewandten Methoden können einen großen Einfluss auf das Ergebnis haben. Eine tiefergehende Auseinandersetzung mit den Methoden ist daher notwendig, um ein transparentes und nachvollziehbares Verfahren gewährleisten zu können. Da unterschiedliche und komplexe Informationen miteinander verglichen werden müssen, ist hierfür zudem eine interdisziplinäre Herangehensweise notwendig.

Für die zuvor genannten Bewertungen und Vergleiche müssen bereits bestehende Methoden überprüft und ggf. weiterentwickelt werden. Dabei sind folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Wirtsgesteinsspezifische wie auch wirtsgesteinsunabhängige Eigenschaften,
- Ungewissheiten aufgrund unterschiedlicher Datenverfügbarkeiten, -qualitäten und -vergleichbarkeiten,
- Entwicklung der Datenverfügbarkeit, -menge und -qualität während des Verfahrens.



6.1
Öffentlichkeitsbeteiligung

6.2
Historisch-
sozialwissenschaftliche
Forschung

6.3
Informationsmanagement
und Langzeitdokumentation

6.4
Umgang mit Ungewiss-
heiten, Unsicherheiten und
fehlendem Wissen

6.5
Sicherheitsmanagement,
Sicherheitskultur,
menschliche und
organisatorische Faktoren

Die Diskussionen in den vergangenen Jahrzehnten haben gezeigt, dass neben den in den Kapiteln drei bis fünf dargelegten technisch-naturwissenschaftlichen Fragen auch sozialwissenschaftliche und gesellschaftliche Aspekte bei der nuklearen Sicherheit berücksichtigt werden müssen. Nur so kann unter dem klaren Primat der Sicherheit ein zielorientierter Umgang mit der Reaktorsicherheit, der Zwischenlagerung und den Transporten sowie der Endlagerung nuklearer Abfälle gelingen. Die lange Verfahrensdauer, insbesondere im Endlagerbereich, stellt zudem hohe Ansprüche an die Weiterentwicklung und Umsetzung nicht nur des Standes von W&T und der Regelwerke, sondern auch des Informationsmanagements und der gesellschaftlichen Beteiligung.

Im folgendem liegt der inhaltliche Fokus auf diesen übergreifenden sozialwissenschaftlich-gesellschaftlichen Aspekten. Übergreifende technisch-naturwissenschaftliche Themen wie z. B. kernphysikalische Grundlagen und ihre Anwendung im Bereich Kritikalitätssicherheit, Abschirmung, Berechnung von Behälterinventaren, Zerfallsleistungen oder auch die Grundlagen der technischen Sicherheitsbewertung und Zuverlässigkeitsanalyse, IT-Sicherheit und Zuverlässigkeit von softwarebasierten Einrichtungen sind in den Kapiteln drei bis fünf enthalten.

6.1 Öffentlichkeits- beteiligung

Die Standortsuche für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle ist eine technisch-naturwissenschaftliche und eine gesellschaftliche Aufgabe. Durch die Entscheidung zur Beendigung der Kernenergienutzung im Jahr 2022 öffnet sich eine Chance, einen sachorientierten und offenen Dialog über die Fragen der kerntechnischen Entsorgung zu führen. Ziel des 2013 geschaffenen und 2017 novellierten StandAG ist es, in einem vergleichenden, partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahren den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland zu ermitteln.

Für das BfE ist die Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Standortauswahl nicht nur eine gesetzliche Aufgabe, sondern eine unabdingbare Voraussetzung für die gesamtgesellschaftliche Akzeptanz des Verfahrens und die Tolerierung der Entscheidung in der betroffenen Region. Das StandAG formuliert hohe Standards für die Beteiligung der Öffentlichkeit im Rahmen des Standortauswahlverfahrens. Als Träger der Öffentlichkeitsbeteiligung in der Standortauswahl hat das BfE den Anspruch und die Aufgabe, diesen Standards gerecht zu werden, sie im Laufe des Verfahrens kontinuierlich an neue Entwicklungen anzupassen und Beteiligungsformate innovativ zu gestalten. Darüber hinaus hat das BfE in allen seinen Aufgabebereichen den Anspruch, umfassend, verständlich und adressatenorientiert zu informieren, um die Möglichkeit und die Bereitschaft der Bürgerinnen und Bürger zum Dialog und zur Teilhabe zu fördern. Die Forschung des BfE im Bereich der Öffentlichkeitsbeteiligung dient dazu, Grundsatzfragen, Methoden und Instrumente der Öffentlichkeitsbeteiligung vor dem Hintergrund der sozialwissenschaftlichen Forschung zu innovativen Partizipationsverfahren systematisch zu reflektieren und für die Aufgaben des BfE zu konkretisieren.

Wichtige Forschungsthemen im Bereich Öffentlichkeitsbeteiligung sind z. B.:

- Öffentlichkeitsbeteiligung im Rahmen des StandAG (wissenschaftlich-methodische Grundlagen zum gesetzlich geregelten Beteiligungsverfahren)
- Öffentlichkeitsbeteiligung in unterschiedlichen Bereichen der kerntechnischen Entsorgung außerhalb des Standortauswahlverfahrens vor dem Hintergrund des Primats der Sicherheit
- Gestaltung des Standortauswahlverfahrens als selbsthinterfragendes und lernendes Verfahren
- Beteiligungsbereitschaft der Öffentlichkeit über einen langen Zeitraum
- Einbindung der jungen Generation in das Standortauswahlverfahren
- Narrative und Zukunftsbilder im Themenfeld der Endlagerung
- Kontinuierliche Evaluation der Öffentlichkeitsbeteiligung im Standortauswahlverfahren
- Bedeutung verfahrensbezogener Aushandlungsprozesse für die Akzeptanz von Entscheidungen
- Risikokommunikation
- Stakeholder Involvement: Betrachtung und Einbindung von Sichtweisen verschiedener Beteiligter und Interessengruppen

6.2 Historisch- sozialwissenschaftliche Forschung

Historisch-sozialwissenschaftliche Aspekte im Bereich der kerntechnischen Sicherheit und der nuklearen Entsorgung zu berücksichtigen bedeutet, diese Bereiche als komplexe soziotechnische Systeme zu begreifen, deren Verständnis und Management multidisziplinäre Analysen erfordern.

Der Neustart der Endlagersuche ist nicht ohne seine historische Dimension zu verstehen. Die schrittweise Realisierung eines selbsthinterfragenden, lernenden und partizipativen Verfahrens muss auch das Wissen um die Entwicklungen der vergangenen Jahrzehnte, um Entscheidungsprozesse und Konflikte in Politik und Gesellschaft, beinhalten. Auch im Rahmen der kerntechnischen Sicherheit gibt es historische und sozialwissenschaftliche Fragestellungen, deren Beantwortung die Aufgabenwahrnehmung in diesem Bereich unterstützen kann. Dies gilt sowohl national als auch mit Blick in den internationalen Raum.

Der wissenschaftlich fundierte, generationenübergreifende Diskurs über verbliebene Streitfragen und neue Forschungsergebnisse kann zu einem tieferen Verständnis und einer nachhaltigen Akzeptanz der Endlagersuche beitragen. Problematische Situationen und Handlungsweisen können in ihrem historischen Kontext identifiziert und dahingehend geprüft werden, wie sie im Rahmen des neu geregelten Standortauswahlverfahrens bewältigt würden. Die so gewonnenen Ergebnisse sollen der jungen Generation, zukünftigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in den beteiligten Organisationen und allen anderen, bislang unbeteiligten Bürgerinnen und Bürgern verlässliche Orientierung ermöglichen.

Als Träger der Öffentlichkeitsbeteiligung im Standortauswahlverfahren wird der Fokus historisch-sozialwissenschaftlicher Forschung des BfE daher zunächst darauf liegen, Wechselwirkungen zwischen den staatlichen Akteuren und den organisierten Bürgern in Vergangenheit und Gegenwart in ausgewählten Bereichen zu analysieren. Hierbei sind politik-, partizipations- und kommunikationswissenschaftliche Anteile vorgesehen. Längerfristig ist auch daran gedacht, anlagen-spezifische Fragestellungen und Meilensteine der bisherigen Entwicklung näher zu untersuchen.

6.3 Informationsmanagement und Langzeitdokumentation

In dem 2017 in Kraft getretenen StandAG wird in § 38 dem BfE die Aufgabe zugewiesen, für die Zwischen- und Endlagerung relevante Daten und Dokumente dauerhaft aufzubewahren und ihre Verfügbarkeit und Lesbarkeit über sehr lange Zeiträume zu gewährleisten. Zum Zwecke der Nachvollziehbarkeit und Reversibilität von Entscheidungen, muss der Wissenserhalt für nachfolgende Generationen gewährleistet werden. Die besondere Bedeutung der Langzeitdokumentation für Fragen der nuklearen Entsorgung wurde schon im BMU-Bericht „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ sowie im „Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter als Anlage zur Endlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung“ thematisiert. In internationalen Fachkreisen ist der Abstimmungsbedarf hinsichtlich endlagerrelevanter Dokumentation und der Aufbewahrung der Dokumente bereits in den frühen 1970er Jahren erkannt worden. Seit Anfang der 1980er Jahre wird die Langzeitdokumentation vermehrt auch mit der Frage der Nutzung von Zeichen zur Übermittlung von Informationen in Verbindung gebracht und unter dem Begriff der Atomsemiotik bzw. „nuclear semiotics“ zusammengefasst. Generell empfiehlt es sich, Vorbereitungen für die Aufbewahrung von Aufzeichnungen und den Wissenserhalt auf Datenträgern über Generationen vorzunehmen, solange die Problematik der sicheren Entsorgung des erzeugten radioaktiven Abfalls und die Wichtigkeit einer Langzeitdokumentation anerkannt sind und damit auch die für diesen Zweck notwendigen Finanzmittel verfügbar sind. Im Zeitraum von 2011 bis 2018 wurde bei der OECD/NEA ein Projekt mit dem Titel „Preservation of Records, Knowledge & Memory (RK&M) across Generations“ durchgeführt. Aus Sicht des BfE gehört zur Langzeitdokumentation auch das entsprechende Informationsmanagement.

Der Stand von W&T kann durch die Mitarbeit im Projekt RK&M und die Mitgliedschaft in „nestor“, einem Kooperationsverbund von Partnerinnen und Partnern aus verschiedenen Bereichen, die mit dem Thema „Digitale Langzeitarchivierung“ zu tun haben, abgeschätzt werden.

Absehbare Forschungsfragen umfassen insbesondere technische und strategische Fragen zu Speichermedien und Datenformaten, Prozeduren zur regelmäßigen Überprüfung und eventuellen Umschreibung der Speicherinhalte, die geeignete Markierung von Endlagerstandorten sowie Mechanismen zur internationalen Vereinheitlichung und Standardisierung von Vorgehensweisen und Begrifflichkeiten bei der Langzeitdokumentation. Fragestellungen in diesem Themenfeld sind bspw.:

- Evaluierung der Langzeitbeständigkeit von Papiersorten, der Beständigkeit aufgebrachtener Kennzeichnungen (z.B. Stift- und Stempelfarbe) sowie der Haltbarmachung von bereits verwendetem Papier;
- Evaluierung der Langzeitbeständigkeit von verschiedenen technischen Speichermedien.

6.4 Umgang mit Ungewissheiten, Unsicherheiten und fehlendem Wissen

Die Frage des transparenten und nachvollziehbaren Umgangs mit Ungewissheiten, Unsicherheiten und fehlendem Wissen ist für das BfE als Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde von zentraler Bedeutung. Die Kultur des BfE im Umgang mit diesen Fragen liefert einen erheblichen Beitrag zur Akzeptanz der notwendigen Entscheidungen, insbesondere wenn es sich um die nukleare Sicherheit handelt.

Das Standortauswahlverfahren soll gemäß § 1 (2) StandAG partizipativ, wissenschaftsbasiert, transparent, selbsthinterfragend und lernend gestaltet werden. Für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bzw. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in den beteiligten Organisationen hat dies weitreichende Konsequenzen für die tägliche Arbeit (z. B. bei der Erstellung von Unterlagen). Für die Öffentlichkeitsbeteiligung (siehe 3.1) ergibt sich aus dieser Perspektive die Notwendigkeit, einer für Laien sowie interessierte Bürgerinnen und Bürger verständlichen, offenen Kommunikation. Dies umfasst ebenso die Risikokommunikation. Die erfolgreiche Durchführung des Standortauswahlverfahrens und die Errichtung des Endlagers sind ein voraussichtlich Jahrzehnte beanspruchendes, komplexes Vorhaben. Je weiter wir heute in diesem Verfahren in die Zukunft schauen, desto größer sind Ungewissheiten und die voraussichtlichen Veränderungen in Bezug auf unsere heutigen Rahmenbedingungen. Maßgebliche Einflussfaktoren entziehen sich aus heutiger Sicht der Vorhersagbarkeit und bringen Risiken bzw. die Gefahr des Scheiterns mit sich. Das Projektmanagement bzw. die das Verfahren steuernden Akteure sind hierdurch in besonderem Maße gefordert. Strategien und Prozesse zum Umgang mit heute bereits bekannten aber auch mit zukünftig zu erwartenden Ungewissheiten müssen entwickelt werden.

Das StandAG und das Atomgesetz fordern, dass Entscheidungen auf der Grundlage des aktuellen Stands von W&T getroffen werden. Ungewissheiten sind hiernach umfassend zu identifizieren, explizit auszuweisen und zu bewerten. Grundsätzlich erfolgen die geforderten Bewertungen von Ungewissheiten und fehlendem Wissen in jedem Einzelfall.

Umfassende und generische Methoden, die eine einheitliche Bewertung von Ungewissheiten entsprechend den Anforderungen aus dem StandAG, AtG und StrSchG ermöglichen, liegen nur in Teilbereichen vor. Die Entwicklung einer systematischen Herangehensweise ist eines der Forschungsziele für die nächsten vier Jahre. Auch wenn es darum geht, die Ursachen des Konflikts um die Kernenergie zu verstehen (vgl. Abschnitt 6.2), liegt in der fallbezogenen Analyse des damaligen Umganges mit Ungewissheiten und fehlendem Wissen eine wesentliche Perspektive.

6.5 Sicherheitsmanagement, Sicherheitskultur, menschliche und organisa- torische Faktoren

Für das BfE sind der Erhalt und der Ausbau seiner fachlichen Expertise und Beratungskompetenz auf den Gebieten des Sicherheitsmanagements, der Sicherheitskultur und des Mensch-Technik-Organisation-(MTO)-Bereiches aufgrund ihrer Bedeutung für die kerntechnische Sicherheit zentrale Anliegen. Dies gilt auch im Hinblick auf den langfristigen Kompetenzerhalt der Bundesrepublik Deutschland auf dem Gebiet der kerntechnischen Sicherheit bzgl. möglicher Vorkommnisse und Fragestellungen im internationalen Bereich und insbesondere in Nachbarländern, die weiterhin Kernkraftwerke betreiben oder betreiben wollen. Im Unterschied zu den technisch geprägten Bereichen der nuklearen Sicherheit zeichnet sich der Bereich der menschlichen und organisatorischen Faktoren durch seinen stark vernetzten Charakter aus. Der Mensch, sein Handeln als Individuum und als Teil einer Gruppe sowie die daraus entstehenden Abläufe innerhalb einer Organisation sind immer nur gemeinsam mit den Schnittstellen zu den technischen Einrichtungen und unter Einbeziehung der betrieblichen Abläufe zu verstehen und zu analysieren. Diese Eigenschaft führt zu einem hohen Grad an Komplexität von menschlichen und organisatorischen Faktoren innerhalb des MTO-Bereiches.

Managementsystem sowie Sicherheitskultur der Regulierungsbehörde

Auf internationaler Ebene werden zunehmend Anforderungen im Bereich Sicherheitsmanagement, Sicherheitskultur und MTO auch an die Aufsichts- und Genehmigungsbehörden selbst gestellt. Die Analyse von Unfallursachen und Störfällen hat die wichtige Rolle und Bedeutung der Aufsicht als Teil eines größeren Systems für die kerntechnische Sicherheit gezeigt. Das BfE als neu gegründete Regulierungsbehörde baut deshalb Organisations- und Managementstrukturen auf, die geeignet sind, die Aufgabenwahrnehmung bei Aufsichts- und Genehmigungstätigkeiten in optimaler Weise und insbesondere unter Beachtung von Sicherheitsaspekten zu unterstützen. Die Anforderungen an solche Managementstrukturen entwickeln sich z. B. aufgrund von gesellschaftlichen, rechtlichen, technischen

oder sozialen Einflussparametern sowie aufgrund von nationalen und internationalen Erfahrungen kontinuierlich weiter. Um neue Erkenntnisse auf internationaler Ebene durch Zusammenarbeit und Austausch fachlich-wissenschaftlich mit zu erarbeiten und für die nationalen Fragestellungen nutzbar machen zu können, ergeben sich auch aus dem internationalen Kontext Forschungsfragen, die aus Sicht der Bundesaufsicht zu bearbeiten sind. Forschungsvorhaben zur Ermittlung relevanter Einflussparameter, deren Veränderungen über die Zeit und daraus abgeleitet zum Aufbau, zur Weiterentwicklung und zum Betrieb anforderungsgerechter Managementstrukturen sollen initiiert werden.

Sicherheit kerntechnischer Anlagen

Menschliche und organisatorische Faktoren haben auf die Sicherheit kerntechnischer Anlagen einen erheblichen Einfluss. Bei einer signifikanten Zahl von Ereignissen und Vorkommnissen in kerntechnischen Anlagen wurden Ursachen im Bereich der menschlichen und organisatorischen Faktoren festgestellt. Es hat sich gezeigt, dass diese besonders bei den aufgetretenen schweren Unfällen (z. B. in Tschernobyl und Fukushima) erheblich zum Unfallablauf beigetragen haben. Dieser Umstand hat zu einer kontinuierlich wachsenden Bedeutung des Themas und der stetigen Erweiterung der betrachteten Fragestellungen geführt. Das kerntechnische Regelwerk stellt zahlreiche Anforderungen an die Sicherheit kerntechnischer Anlagen auf, die dem Bereich MTO zugeordnet werden können. Zu diesen gehören unter anderem die Einrichtung und Anwendung eines integrierten Managementsystems, die dauerhafte Bereithaltung, Aus- und Fortbildung angemessener Personalressourcen und die Aufrechterhaltung sowie die kontinuierliche Verbesserung der Sicherheitskultur durch den Genehmigungsinhaber. Um das kerntechnische Regelwerk auf dem aktuellen Stand von W&T fortzuschreiben und dessen sachgerechte Anwendung prüfen zu können, greift das BMU als Bundesaufsicht bei wissenschaftlich-technischen Fragestellungen auf dem Gebiet des Sicherheitsmanagements, der Sicherheitskultur und im Bereich MTO auf die Expertise des BfE zurück (BfKEG § 2.2). Um diese

Aufgabe erfüllen zu können, ist es notwendig, MTO-Konzepte, deren Anwendung und sich ergebende sicherheitstechnische Fragestellungen bewerten zu können.

Die Schwerpunkte der fachlichen Arbeit im Bereich MTO liegen in der theoretischen Konzept- und Methodenentwicklung, der Anwendung auf konkrete Fragestellungen und Vorgehensweisen sowie deren Beurteilung.

Zur Verfolgung und Fortschreibung des Standes von W&T auf dem Gebiet des Sicherheitsmanagements, der Sicherheitskultur und im Bereich MTO führt das BfE, wie auch in den anderen Aufgabenbereichen, eigene Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durch und beauftragt ergänzend Forschungsarbeiten durch externe Forschungseinrichtungen. Zudem beteiligt sich das BfE aktiv an nationalen wie internationalen Fachkonferenzen, ist in nationalen wie internationalen Gremien vertreten und wird in „Technical Meetings“ sowie „Consultancy Meetings“ als Experte eingeladen.

Die generische Natur der Konzepte und Methoden im Bereich des Sicherheitsmanagements, der Sicherheitskultur und des MTO ermöglicht es, die erarbeiteten Fragestellungen und bearbeiteten Themen aus dem Bereich der Kernkraftwerke auf andere Bereiche zu übertragen. Hierzu gehören z. B. Anlagen der Ver- und Entsorgung, Anlagen in Stilllegung sowie Anlagen der Zwischen- und Endlagerung.

Ziel der laufenden und geplanten Vorhaben ist es, den Stand von W&T fortzuschreiben, aktuelle und zukünftige wichtige Fragestellungen zu bearbeiten, Konzepte und Methoden zu entwickeln und zu verbessern sowie die Beurteilung von sicherheitstechnischen Fragestellungen und die Anwendung in der aufsichtlichen Praxis weiterzuentwickeln.

Wichtige Forschungsthemen und Fragestellungen im Bereich **Sicherheitsmanagement** sind z. B.:

- Welche organisatorischen Veränderungen sind beim Übergang vom Betrieb zur Stilllegung eines Kernkraftwerks zu berücksichtigen? Welche Auswirkungen können diese auf die kerntechnische Sicherheit haben?
- Welche Auswirkung hat der Einsatz von Eigen- und Fremdpersonal auf die kerntechnische Sicherheit? Was muss dabei berücksichtigt werden?
- Welche Rolle spielen das Sicherheitsmanagement und die Einrichtung und Anwendung integrierter Managementsysteme für die kerntechnische Sicherheit insgesamt? Wie kann ihre Wirksamkeit bewertet werden? Wie sind diese weiterzuentwickeln?

- Wie lernen Organisationen aus Betriebs- erfahrung? Welche Methoden zur MTO-Analyse von Ereignissen stehen zur Verfügung (z. B. ganzheitliche Ereignisanalyse GEA)? Wie wirksam sind diese?
- Wie kann das Konzept der organisationalen Resilienz (die Fähigkeit von Organisation Veränderungen langfristiger Natur, z. B. Stilllegung, und auch kurzfristiger Natur, z. B. Notfall, zu bewältigen) bei den aktuellen Fragestellungen zu organisatorischen Veränderungen im Hinblick auf die Stilllegung von KKWs (Kernkraftwerken), der Sicherheitskultur und bei der Beherrschung von Störfällen und bei Notfallmaßnahmen berücksichtigt werden?

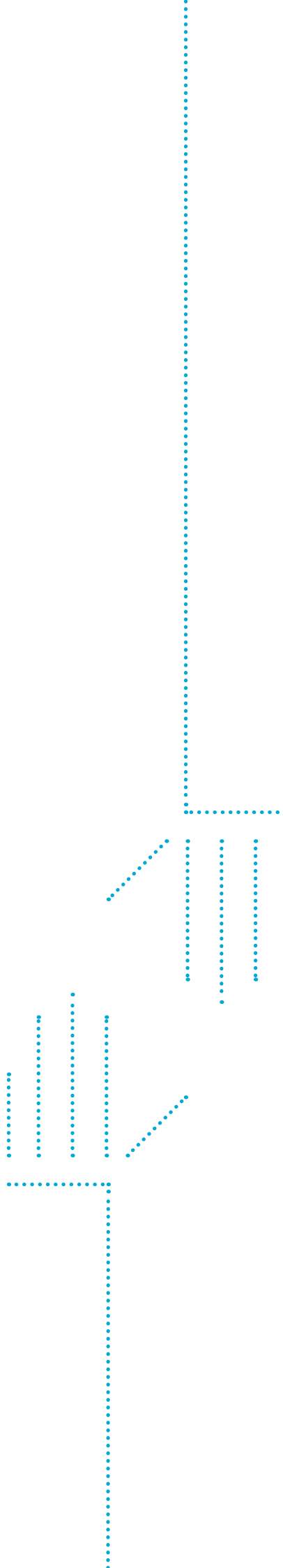
Wichtige Forschungsthemen und Fragestellungen im Bereich **Sicherheitskultur** sind z. B.:


- Was ist Sicherheitskultur und wie kann diese erfasst werden? Wie kann Sicherheitskultur verbessert werden?
- Welche Rolle kommt der Aufsichts- und Genehmigungsbehörde als Teil eines größeren Systems für die kerntechnische Sicherheit zu? Welche Auswirkungen hat das Vorgehen der Aufsichtsbehörde auf die Sicherheitskultur des Betreibers?
- Welche Bedeutung haben das eigene Sicherheitsmanagement, das eigene Managementsystem und die eigene Sicherheitskultur der Aufsichts- und Genehmigungsbehörde für die Erfüllung ihrer Aufgabe?
- Wie kann ein ganzheitlicher, systemischer Ansatz für die Beurteilung von sicherheitstechnischen Fragestellungen im Bereich Sicherheitsmanagement, Sicherheitskultur und MTO und im Aufsichtskonzept in der Praxis implementiert werden?
- Welche Bedeutung und Rolle hat Führung für Sicherheitskultur und die nukleare Sicherheit?
- Wie sind die Konzepte der Sicherheitskultur und des integrierten Managementsystems fachwissenschaftlich verknüpft? Welche Auswirkung hat das auf die Aufsicht?
- Welche Schulungen und Kontrollen durch Vorgesetzte können Fehlhandlungen wirksam entgegenwirken? Wie sind dabei die Wechselwirkungen und der Unterschied von Eigen- und Fremdpersonal zu berücksichtigen?

Wichtige Forschungsthemen und Fragestellungen im Bereich **Mensch-Technik-Organisation** sind

z. B.:

- Mit welchen Methoden ist die Ergonomie bei Mensch-Maschine-Schnittstellen, z. B. bei Wartung, Arbeitsmitteln, etc. zu bewerten?
- Wie wirken sich Zustände und Eigenschaften des Menschen auf das menschliche Handeln aus? Welche „Human Performance Tools“ haben welchen Effekt?
- Wie verhalten sich Gruppen (Betriebspersonal, Schichtpersonal) unter Extrembedingungen?
- Wie unterscheiden sich die existierenden Konzepte und Definitionen für die Begriffe HF (Human Factors), HOF (Human and Organisational Factors) und HP (Human Performance)? Wie sind diese verknüpft? Welche Auswirkung haben diese Punkte für die kerntechnische Aufsicht über menschliche und organisatorische Faktoren?
- Wie kann die Motivation und das Wissen des Personals in der Kerntechnik erhalten werden, vor allem unter Stilllegungsbedingungen?
- Welche Tätigkeiten wird das Personal beim Übergang zur Stilllegung ausführen? Welche Tätigkeiten verändern sich, werden nicht mehr nötig sein oder kommen neu dazu? Welche Auswirkungen kann das auf die kerntechnische Sicherheit haben?
- Welche Qualifikation, Kompetenz, Quantität von Personal wird beim Übergang vom Betrieb zur Stilllegung eines Kernkraftwerks benötigt, um keinen negativen Einfluss auf die kerntechnische Sicherheit zu haben?
- Wie entstehen Expertenurteile? Was ist zu beachten, um diese nach Stand von W&T belastbar zu machen?





Zur Erfüllung seiner Aufgaben als Regulierungs- und Fachbehörde auf den Gebieten der Reaktorsicherheit, der Beförderung und Aufbewahrung radioaktiver Stoffe und der Endlagerung radioaktiver Abfälle betreibt das BfE ergebnisoffen und systematisch wissenschaftliche Forschung. Es greift aktuelle wissenschaftliche und gesellschaftliche Fragen und Entwicklungen auf, erkennt wichtige gegenwarts- und zukunftsbezogene Herausforderungen und erarbeitet Handlungsoptionen für die eigenen Amtsaufgaben. Dabei werden sowohl mittel- bis langfristig angelegte Fragestellungen kontinuierlich bearbeitet und wissenschaftliche Kompetenzen nachhaltig aufgebaut und erhalten, als auch kurzfristig wissenschaftliche Expertise bereitgestellt. Ziel ist dabei nicht nur die Verfolgung, sondern auch die aktive Weiterentwicklung des Standes von W&T.

Die Forschung des BfE basiert auf anerkannten wissenschaftlichen Methoden zur Gewinnung neuer Erkenntnisse und folgt den allgemein anerkannten Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis. Forschung soll die Qualität der Bewertungen und Entscheidungen sicherstellen sowie weiter verbessern und leistet somit einen maßgeblichen Beitrag zu einer wissenschaftsbasierten, lernenden und selbsthinterfragenden Arbeitsweise. Aus diesem Grund sind die BfE Forschungstätigkeiten nach einem transparenten und nachvollziehbar begründeten Verfahren ausgerichtet und priorisiert.

Die Forschungsagenda des BfE ist das Bindeglied zwischen den in der Forschungsstrategie definierten übergeordneten Zielen und den in dem jährlichen BfE-Forschungsplan konkretisierten Einzelvorhaben. Sie bildet die Grundlage für die Auswahl und Priorisierung der zu beantwortenden Forschungsfragen. Die Forschungsagenda benennt die technisch-naturwissenschaftlichen sowie sozialwissenschaftlich-gesellschaftlichen Themenfelder mit aufgabenbezogenem Forschungsbedarf in den Bereichen der Reaktorsicherheit, der Zwischenlagerung und des Transports radioaktiver Abfälle sowie des Standortauswahlverfahren und der Endlagersicherheit für den Zeitraum bis 2022. Eine Aktualisierung ist im zweijährigen Rhythmus vorgesehen.

Aktuell befindet sich das BfE in der Aufbauphase, mit unterschiedlichen Entwicklungsständen in seinen einzelnen Abteilungen. Das 2017 angelaufene Standortauswahlverfahren mit den damit verbundenen Neuerungen in den behördlichen und institutionellen Zuständigkeiten sowie der beschlossene Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie bis 2022 führen dazu, dass Entwicklungen dynamisch verlaufen und kontinuierliche Anpassungen an neue Randbedingungen erforderlich sind. Mit seiner Forschungsagenda berücksichtigt das BfE sowohl die notwendige Fortschreibung bereits bestehender Forschungsaktivitäten auf den Feldern Reaktorsicherheit, Zwischenlagerung und Transport radioaktiver Abfälle als auch neuer Forschungsaufgaben im Rahmen des Standortauswahlverfahrens und der Öffentlichkeitsbeteiligung. Hiermit stellt das BfE sicher, dass es auf allen seinen Aufgabenfeldern stets den aktuellen Stand von W&T anwenden kann.

Im Sinne größtmöglicher Transparenz wird das BfE Forschungsergebnisse verständlich aufbereiten, grundsätzlich publizieren und fordert die Öffentlichkeit zu einer aktiven und kritischen Begleitung auf. Daher wird das BfE seine Forschungsagenda und ihre Fortschreibungen mit der Forschungscommunity und der Öffentlichkeit diskutieren. Die hierbei gewonnenen Anregungen und Erkenntnisse werden bei der Weiterentwicklung der Forschungsagenda mit einbezogen.

AK-FR Arbeitskreis Forschungs- reaktoren, Unterausschuss des LAA	BMU Bundes- ministerium für Umwelt, Natur- schutz und Reaktorsicherheit (bis 2013)	EVA Einwirkungen von außen	IAEA / IAE0 International Atomic Energy Agency bzw. Internationale Atomenergie- Organisation	OECD Organisation for Economic Cooperation and Development	SÜ Sicherheits- überprüfung
ASME American Society of Mechanical Engineers	BMUB Bundes- ministerium für Umwelt, Natur- schutz, Bau und Reaktorsicherheit (2013 -2018)	eWG Einschluss- wirksamer Gebirgsbereich	IEC International Electrotechnical Commission	PSA Probabilistische Sicherheits- analyse	SWR Siedewasser- reaktor
AtG Atomgesetz	Brand-PSA Probabilistische Brandanalysen	FAK Facharbeitskreis	ISO Internationale Organisation für Normung (auch Bezeichnung für eine Norm)	PSÜ Periodische Sicherheits- überprüfung	THMC/B Thermisch- hydraulisch- mechanisch- chemische / -biologische Prozesse
AVR Arbeits- gemeinschaft Versuchsreaktor	DAEF Deutsche Arbeits- gemeinschaft Endlager- forschung	FAK PSA Facharbeitskreis „Probabilistische Sicherheits- analysen für Kernkraftwerke“	IT Informations- technik	QMS Qualitäts- management- system	THTR Thorium- Hochtemperatur- Reaktor
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung	DIN Deutsche Institut für Normung (Bezeichnung für eine Norm)	FEM Finite-Elemente- Methode	KKW Kernkraftwerk	RK&M Preservation of Records, Knowledge & Memory across Generations – OECD/NEA Projekt	TRANSSC Transport Safety Standards Committee
BfE Bundesamt für kerntechnische Entsorgungs- sicherheit	DSa Deterministische Sicherheits- analyse	FEP Features, Events and Processes	KTA Kerntechnischer Ausschuss	RSK DKW Reaktorsicher- heitskommission, Unterausschuss „Druckführende Komponenten und Werkstoffe“	WAU Wiederauf- gearbeitetes Uran
BfKEG Gesetz über die Errichtung eines Bundesamtes für kerntechnische Entsorgungs- sicherheit	DWR Druckwasser- reaktor	FPGA Field Programmable Gate Array	KTA UA-EL Kerntechnischer Ausschuss, Unterausschuss „Elektro- und Leittechnik“	RSK EE Reaktor- sicherheits- kommission, Unterausschuss „Elektrische Einrichtungen“	W&T Wissenschaft und Technik
BfS Bundesamt für Strahlenschutz	EN Europäische Norm	FR Forschungs- reaktor	KTA UA-MK Kerntechnischer Ausschuss, Unterausschuss „Mechanische Komponenten“	SEWD Sonstige Einwirkungen Dritter	WENRA Western European Nuclear Regulators Association
BGE Bundes- gesellschaft für Endlagerung mbH	ERSI Eidgenössisches Nuklear- sicherheits- inspektorat	FRM Forschungs- reaktor München	LAA Länderausschuss für Atom- kernenergie	SiAnf Sicherheits- anforderungen	WGELEC Working Group on Electrical Power Systems (der OECD/NEA)
BMBF Bundes- ministerium für Bildung und Forschung	ERU enriched reprocessed Uranium	GEA ganzheitliche Ereignisanalyse	MOX Mischoxid	StandAG Standortauswahl- gesetz	StrlSchG Strahlenschutz- gesetz
BMU Bundes- ministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (ab 2018)	EU Europäische Union	GRS Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH	MTO Mensch – Technik – Organisation	StrlSchV Strahlenschutz- verordnung	
	EURATOM European Atomic Energy Community	GVA Gemeinsam Verursachte Aus- fälle	NEA Nuclear Energy Agency		
		HF Human Factor	nestor Kompetenz- netzwerk Langzeit- archivierung		
		HOF Human and Organisation Factors			
		HP Human Performance			

Gesetze:**(AtG 2016)**

Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie gegen ihre Gefahren (Atomgesetz)

(BfKEG 2016)

Gesetz über die Errichtung eines Bundesamtes für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE-Errichtungsgesetz)

Richtlinie 2009/71/EURATOM

RICHTLINIE 2009/71/EURATOM DES RATES vom 25. Juni 2009 über einen Gemeinschaftsrahmen für die nukleare Sicherheit kerntechnischer Anlagen

Richtlinie 2014/87/EURATOM

RICHTLINIE DES RATES 2014/87/EURATOM vom 8. Juli 2014 zur Änderung der Richtlinie 2009/71/Euratom über einen Gemeinschaftsrahmen für die nukleare Sicherheit kerntechnischer Anlagen

(StandAG 2017)

Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz)

(StrSchG 2017)

Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz)

Sonstige Quellen:**(BMBF 2007)**

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Konzept einer modernen Ressortforschung. Bonn, Berlin 2007

(BMU18)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Ressortforschungsplan 2018 und Forschungsrahmen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Oktober 2017.

(DAEF 2017)

Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF): Standortauswahl für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle: Empfehlungen der DAEF zu Rolle und Methodik der im Standortauswahlgesetz vorgesehenen Sicherheitsuntersuchungen.
http://www.daef2014.org/DAEF/assets/daef_standortauswahl_2017-06_web.pdf, Stand Juni 2017.

(SiAnf)

Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke und Interpretationen zu den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke; Bekanntmachungen des BMUB; Stand 3. März 2015.

(FAK15)

Facharbeitskreis Probabilistische Sicherheitsanalysen (FAK PSA): Methoden und Daten zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Stand: Mai 2015, BfS SCHR 61/16, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Salzgitter, September 2016,
<url:nbn:resolving.de/>
<urn:nbn:de:0221-2016091314090>.

(IAEA 2012)

The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards, International Atomic Energy Agency, Wien, 2012

(OECD 2013)

The Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art, Radioactive Waste Management Committee, 2013

