



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

BMWi-Forschungsförderung zur nuklearen Sicherheit

*Projektförderprogramm des Bundesministeriums
für Wirtschaft und Energie zur Sicherheitsforschung
für kerntechnische Anlagen*

2021–2025

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)
Öffentlichkeitsarbeit
11019 Berlin
www.bmwi.de

Stand

Januar 2021

Diese Publikation wird ausschließlich als Download angeboten.

Gestaltung

PRpetuum GmbH, 80801 München

Bildnachweis

Becker Technologies GmbH / S. 26
BGZ / S. 12
Framatome GmbH / S. 9
GRS gGmbH / S. 13, 23, 33
IAEA ImageBank / S. 48
Studsvik / S. 34
S. Schefer / swisstopo / S. 36, 40, 43
S. Mrugalla / BGR / S. 37

Zentraler Bestellservice für Publikationen der Bundesregierung:

E-Mail: publikationen@bundesregierung.de

Telefon: 030 182722721

Bestellfax: 030 18102722721

Diese Publikation wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit herausgegeben. Die Publikation wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament.

Inhalt

1	Ziele und Herausforderungen	5
	Reaktorsicherheitsforschung (A)	8
	Forschung zur verlängerten Zwischenlagerung und Behandlung hochradioaktiver Abfälle (B)	10
	Endlagerforschung (C)	12
	Forschung zu Querschnittsfragen (D)	14
	Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung	14
	Internationale Zusammenarbeit	15
2	Zuständigkeiten und Aufgabenverteilung	17
3	Forschungsschwerpunkte	20
	A. Forschungsgebiet Reaktorsicherheit	22
	FuE-Bereich A1: Prüfung und Bewertung der Sicherheit von Komponenten und Strukturen	22
	FuE-Bereich A2: Nachweisverfahren zur Beherrschung von Transienten, Stör- und Unfällen	25
	FuE-Bereich A3: Wechselwirkung Mensch-Technik und probabilistische Sicherheitsanalysen	28
	B. Forschungsgebiet verlängerte Zwischenlagerung und Behandlung hochradioaktiver Abfälle	32
	FuE-Bereich B1: Verlängerte Zwischenlagerung	32
	FuE-Bereich B2: Abfallbehandlungs- und Konditionierungsoptionen für die Endlagerung	33
	FuE-Bereich B3: Behandlungs- und Entsorgungsmethoden	34
	C. Forschungsgebiet Endlagerung	36
	FuE-Bereich C1: Standortauswahl	36
	FuE-Bereich C2: Sicherheits- und Endlagerkonzepte; Endlagertechnik und (geo-)technische Barrieren	38
	FuE-Bereich C3: Sicherheitsnachweis	41
	D. Querschnittsfragen	45
	FuE-Bereich D1: Wissens- und Kompetenzmanagement	45
	FuE-Bereich D2: Sozio-technische Fragestellungen	46
	FuE-Bereich D3: Kernmaterialüberwachung (Safeguards)	47
4	Umsetzung des Förderprogramms	49

Hiermit legt das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) das Programm seiner Projektförderung zur Sicherheitsforschung für kerntechnische Anlagen für die Jahre 2021 – 2025 vor.

Vorwort

Das am 26. August 2020 verabschiedete Konzept der Bundesregierung zur Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung für die nukleare Sicherheit bildet in unserer durch den Beschluss zum Ausstieg aus der nuklearen Stromerzeugung geprägten Zeit einen wesentlichen Grundstein für die zukünftigen nuklearen Aktivitäten in Deutschland. Dazu leisten BMWi-geförderte Projekte der anwendungsorientierten Grundlagenforschung zur Sicherheit kerntechnischer Anlagen einen maßgeblichen Beitrag. Deren Forschungsergebnisse tragen dazu bei, dass auch im Hinblick auf Anlagen jenseits unserer Landesgrenzen der relevante Stand von Wissenschaft und Technik zum Wohle von Mensch und Umwelt vorangetrieben wird. Dabei reicht das Spektrum dieser sicherheitsgerichteten Forschung von der Betrachtung bestehender Reaktortypen, ihrer Laufzeiten und Ausstattungen, über weiter- und neuentwickelte Anlagentypen und Fragen der verlängerten Zwischenlagerung, der Behandlung von Abfallmaterialien und Behälterfragen bis hin zu allen Fragen der nuklearen Endlagerung inklusive der Methodik zur Auswahl von Standorten und der Ausgestaltung des Endlagers und diese überwölbende Querschnittsfragen etwa zu sozio-technischen Schnittstellen.

Drei mit hochkarätigen Vertreterinnen und Vertretern aus Forschung und Anwendung besetzten Arbeitsgruppen unter Leitung der Professoren Dirk Bosbach, Klaus-Jürgen Röhlrig und Robert Stieglitz sowie der Koordinierung durch die Projektträger GRS (PT GRS) und Projektträger Karlsruhe (PTKA) ist es zu verdanken, dass eine aktuelle, ausgewogene und zukunftsfähige Forschungsagenda entstanden ist, die die Vorgaben des 7. Energieforschungsprogramms in allen Aspekten ausfüllt. Jetzt sind die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Zug, das BMWi-Projektförderprogramm nukleare Sicherheit 2021–2025 in Anspruch zu nehmen und mit klugen Projektvorschlägen zu Erkenntnisgewinn und technologischer Innovation für Mensch und Umwelt beizutragen.

1 Ziele und Herausforderungen

Grundlegendes Ziel der öffentlich geförderten nuklearen Sicherheitsforschung ist der Schutz von Mensch und Umwelt. Durch Forschung und Entwicklung (FuE) sollen die Sicherheit kerntechnischer Anlagen verbessert und die wissenschaftlichen Grundlagen für die sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle geschaffen und weiterentwickelt werden. Diese Zielstellungen bleiben auch über die in Deutschland beschlossene Beendigung der kommerziellen Kernenergienutzung zur Stromerzeugung im Jahr 2022 hinaus aktuell und bestimmen kontinuierlich die Schwerpunktsetzung der nuklearen Sicherheitsforschung.

Für die verbleibende Betriebsdauer deutscher Kernkraftwerke (KKW), die anschließende Nachbetriebsphase sowie für Stilllegung und Rückbau der Anlagen müssen hohe Sicherheitsstandards gewährleistet bleiben. Auch für den sicheren Betrieb von Forschungsreaktoren muss weiterhin gesorgt werden. Mit hoher Priorität sind zudem die sichere und geordnete Behandlung, Lagerung und weitere Entsorgung der entstandenen radioaktiven Abfälle zu verfolgen. Dazu müssen geeignete Endlager bereitgestellt und die radioaktiven Abfälle bis zur Endlagerung sicher zwischengelagert werden. Ergänzend sind auch Behandlungs- und Entsorgungsoptionen sowie im Ausland präferierte Entsorgungsmethoden, die sich positiv auf den Schutz von Mensch und Umwelt auswirken könnten, zu betrachten. Neben den national zu bewältigenden Aufgaben liegt insbesondere auch, und künftig fokussiert, der sichere Betrieb kerntechnischer Anlagen im Ausland in unmittelbarem deutschen Sicherheitsinteresse, denn die Folgen kerntechnischer Unfälle und Ereignisse können sich grenzüberschreitend auswirken. Daher muss Deutschland auch weiterhin und verstärkt internationale

Entwicklungen in der Kerntechnik und in der nuklearen Entsorgung begleiten und sich aktiv in die internationale Diskussion kerntechnischer Sicherheitsfragen sowie die Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik einbringen.

Zur Bewältigung der vielfältigen anstehenden Aufgaben bleibt eigene Forschung und Entwicklung unerlässlich. Dementsprechend hat die Bundesregierung im aktuellen 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die Energiewende“¹ die nukleare Sicherheitsforschung als einen integralen Bestandteil der Energieforschung in Deutschland bekräftigt.

Mit diesem Förderprogramm „*Forschung zur nuklearen Sicherheit*“ setzt das BMWi die forschungspolitischen Vorgaben des 7. Energieforschungsprogramms auf dem Gebiet der nuklearen Sicherheitsforschung in seiner Projektförderung um. Das Programm ist für die kommenden fünf Jahre aufgesetzt. Damit ist keine budgetäre Zeitfestlegung verbunden, sondern die Absicht, die inhaltlichen Vorgaben nach diesem Zeitraum zu überprüfen und ggf. zu aktualisieren. Das Förderprogramm ist Ergebnis eines breit angelegten Erörterungsprozesses zu den zukünftigen Förderinhalten. Um ein weites Spektrum fachlicher Kompetenz, die Ergebnisse politischer Diskussionen und konkrete Bedarfe der wesentlichen in Deutschland auf den Gebieten der Reaktorsicherheit und nuklearen Entsorgung tätigen Akteure angemessen zu berücksichtigen, führte das BMWi eine Erörterung zu den zukünftigen Förderinhalten durch. Das Förderprogramm wurde ausgehend von den Empfehlungen eines breiten Kreises von ausgewiesenen Sachverständigen sowie Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern mit Hilfe der zuständigen Projektträger erstellt. In einem anschließenden

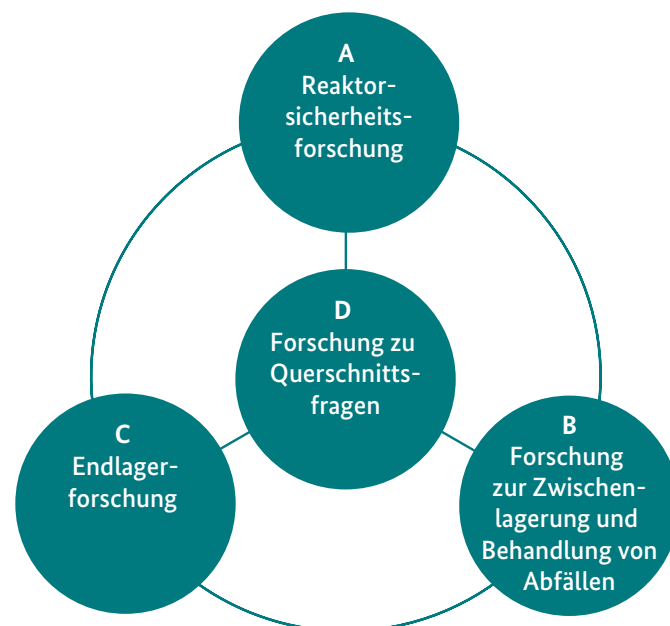
1 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Innovationen für die Energiewende – 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, Berlin, September 2018

Konsultationsprozess wurden neben den Bundesministerien mit Zuständigkeiten in der nuklearen Sicherheit auch Fachgremien wie z. B. der Kompetenzverbund Kerntechnik (KVKT) und die Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF) sowie internationale Expertinnen und Experten eingebunden. Die Ergebnisse der Konsultationen wurden bei der Erstellung des Förderprogramms berücksichtigt.

Der identifizierte Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur nuklearen Sicherheit wurde in Forschungsgebiete strukturiert (s. Abbildung 1). Jedes der Forschungsgebiete (A) „Reaktorsicherheitsforschung“, (B) „Zwischenlagerung und Behandlung hochradioaktiver Abfälle“² sowie (C) „Endlagerforschung“² und die unter (D) zusammengefassten

Querschnittsfragen zu diesen Forschungsgebieten wurde mit konkreten Forschungsthemen hinterlegt. Gleichzeitig wurden untereinander bestehende Wechselwirkungen und Abhängigkeiten berücksichtigt. Übergreifende Ziele, wie die zentrale forschungspolitische Vorgabe der Bundesregierung zur Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung in der nuklearen Sicherheit (siehe auch das vom Bundeskabinett am 26.08.2020 beschlossene „Konzept zur Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung für die nukleare Sicherheit“), sind in der grundlegenden Konzeption der Fördermaßnahmen berücksichtigt. Dieses Ziel wird mit gezielten Maßnahmen, wie der Initiative „Kompetenzerhalt in der Kerntechnik (KEK)“, besonders adressiert (siehe auch den Abschnitt „Kompetenzentwicklung und Nachwuchsförderung“ in diesem Förderprogramm).

Abbildung 1: Darstellung der Forschungsgebiete



² Die Forschungsgebiete B und C beziehen sich auf hochradioaktive Abfälle. Bestrahlte Brennelemente und Abfälle aus der Wiederaufarbeitung werden in diesem Dokument und nach internationaler Nomenklatur als hochradioaktive Abfälle (*high-level waste*) bezeichnet. In Deutschland werden diese Abfälle auch als wärmeentwickelnde Abfälle bezeichnet, im Gegensatz zu radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, für die in Deutschland das Endlager Konrad vorgesehen ist.

In den folgenden Abschnitten sind Bedarfe, Zielstellungen und wesentliche nationale und internationale Randbedingungen für jedes der drei Forschungsgebiete im themenspezifischen Kontext dargestellt.

Reaktorsicherheitsforschung (A)

Eigenständige Forschung zur Reaktorsicherheit liegt angesichts fortdauernder Nutzung der Kernkraft im Ausland im unmittelbaren deutschen Sicherheitsinteresse. Gegenstand der Reaktorsicherheitsforschung sind neben dem Betrieb der Forschungs- und Leistungsreaktoren im Inland künftig zunehmend die im Ausland betriebenen, errichteten oder mit wahrnehmbarer Dynamik in Entwicklung befindlichen Anlagen und Anlagenkonzepte. Dabei nimmt die Reaktorsicherheitsforschung alle sicherheitstechnischen Aspekte kerntechnischer Anlagen in den Blick, in denen nuklearer Brennstoff genutzt wird. Die Kernaufgabe bleibt unverändert, durch Forschung und Entwicklung ein möglichst hohes, wissenschaftlich fundiertes Sicherheitsniveau aller kerntechnischen Anlagen zu gewährleisten und an der Weiterentwicklung internationaler Sicherheitsstandards mitzuwirken, um so (auch) eigenständige Einschätzungen vornehmen zu können. Im Mittelpunkt steht hierfür die Weiterentwicklung einer unabhängigen, fachlich fundierten und auf eigenen Erkenntnissen beruhenden sicherheitstechnischen Kompetenz.

Das 7. Energieforschungsprogramm führt für den Bereich der Reaktorsicherheit folgende strategische Ziele auf:

- „*technisch-wissenschaftliche Absicherung des verbleibenden Leistungsbetriebs deutscher KKW und Forschungsreaktoren sowie des sich daran anschließenden mehrjährigen Stilllegungsbetriebs*“;
- „*Erhalt und Ausbau sicherheitstechnischer Kompetenz zur Beurteilung und Weiterentwicklung der Sicherheit nuklearer Anlagen im Ausland einschließlich neuer Reaktorkonzepte, die sich international in Entwicklung befinden und deren sicherheitstechnische Konzeption sich von den in Deutschland betriebenen Anlagen unterscheidet*“;
- „*Einsatz von Methoden und Werkzeugen der Reaktorsicherheitsforschung für die Untersuchung ausgewählter Fragestellungen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle, insbesondere im Zusammenhang mit der verlängerten Zwischenlagerung (z. B. Langzeitverhalten bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle) und einschließlich alternativer Entsorgungsstrategien sowie im Ausland verfolgter Entsorgungsstrategien*“³;
- „*Leistung eines substanziellen Beitrags zu Aufbau, Weiterentwicklung und Erhalt der wissenschaftlich-technischen Kompetenz und der Nachwuchsförderung im Bereich der nuklearen Sicherheitsforschung in Deutschland*“.

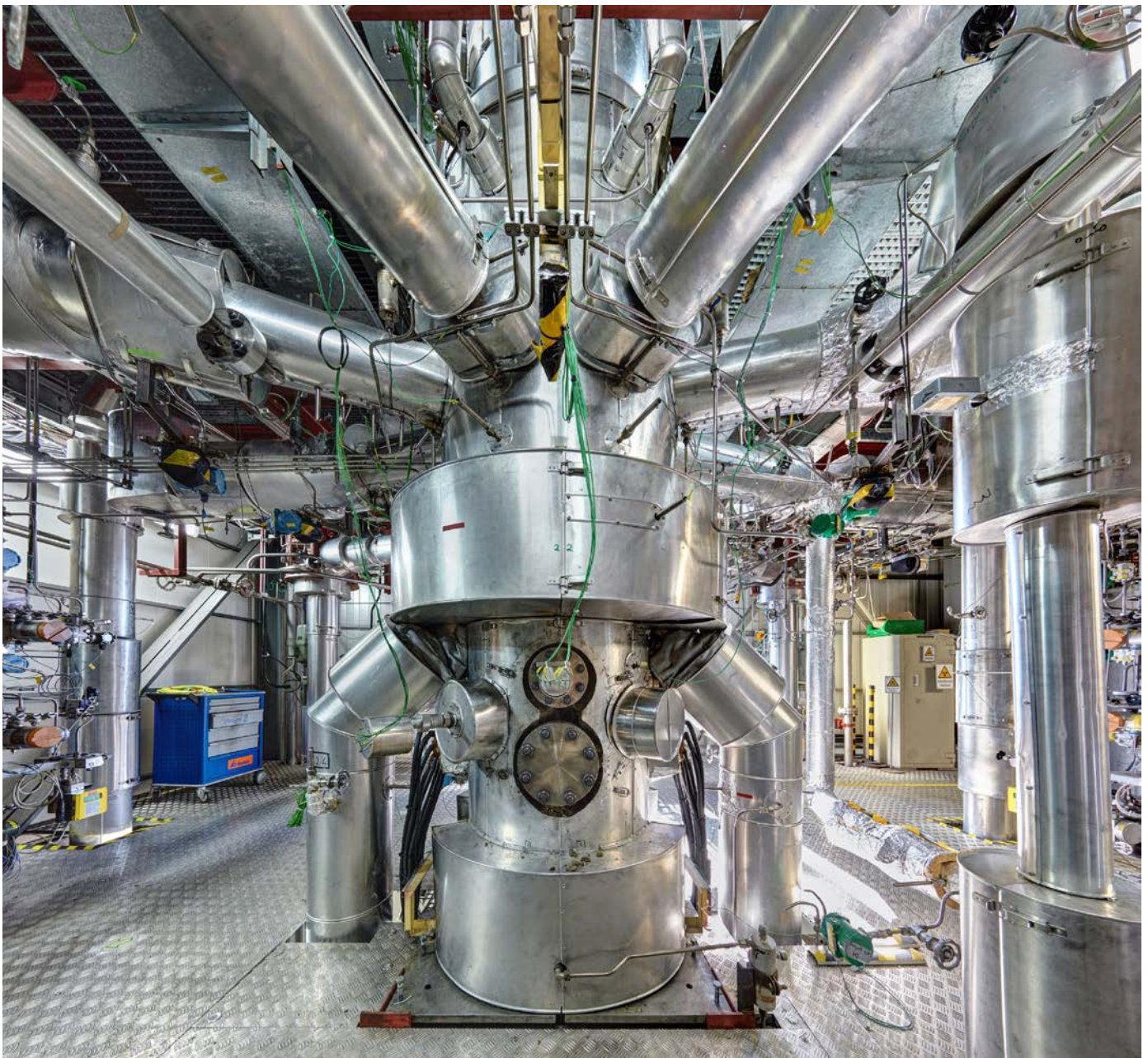
Innerhalb der Förderperiode werden in Deutschland alle Kernkraftwerke den Leistungsbetrieb einstellen. Es schließt sich ein mehrjähriger Nach- und Restbetrieb an, der durch die Reaktorsicherheitsforschung zu begleiten sein wird. Auch mit Blick auf die in Deutschland betriebenen Forschungsreaktoren, wie beispielsweise die Forschungs-Neutronen-

3 Die FuE-Themen zur Zwischenlagerung und Behandlung werden im Forschungsgebiet (B) „Zwischenlagerung und Behandlung hochradioaktiver Abfälle“ aufgegriffen. Dabei kommen auch Methoden und Werkzeuge zum Einsatz, die in der Reaktorsicherheitsforschung entwickelt werden.

quelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) in München, bleibt Reaktorsicherheitsforschung für nationale Anwendungsfälle wesentlich.

Weltweit und auch innerhalb Europas ist eine heterogene Entwicklung bei der Nutzung kerntechnischer Leistungsreaktoren zu beobachten. Die Palette

reicht von mittelfristigen Ausstiegsszenarien über die Verlängerung der Laufzeiten bestehender Reaktoren (Langzeitbetrieb) bis hin zu der Errichtung neuer Anlagen, deren Sicherheitskonzepte sich von den in Deutschland betriebenen Kernkraftwerken unterscheiden. International werden auch neuartige nukleare Technologien und Sicherheitskonzepte



Reaktordruckbehälter mit Hauptkühlmittelleitungen der PKL (Primärkreislauf)-Versuchsanlage der Framatome GmbH

erforscht und teilweise umgesetzt. Dies reicht von Brennstoffkonzepten für existierende Anlagen bis hin zu neuartigen Reaktorkonzepten, die sich grundlegend von den bestehenden Anlagen unterscheiden. Neben großen Leistungsreaktoren werden zunehmend kleinere modulare Reaktoren, wie z. B. SMR (*Small Modular Reactor*) und gar Mikroreaktoren, z. T. auch für den mobilen Einsatz, entwickelt. Die technologische Breite dieser Entwicklung, die neben etablierten Firmen auch von vielen Start-ups betrieben wird, ist mannigfaltig und bringt neue sicherheitstechnische Fragestellungen mit sich.

Entsprechend breit gefasst sind die in der projektgeförderten Reaktorsicherheitsforschung des BMWi zu bearbeitenden Themen. Sie werden in der Regel im internationalen Kontext zu verfolgen sein. Dafür kann auf bewährte und erprobte Instrumentarien und Kooperationsplattformen zurückgegriffen werden. Dies umfasst neben bilateralen Forschungskooperationen zur Reaktorsicherheit auch das Forschungsprogramm der *Europäischen Atomgemeinschaft* (Euratom) sowie die Zusammenarbeit im Rahmen der *Internationalen Atomenergie-Organisation* (IAEO) und der *Nuclear Energy Agency der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung* (OECD/NEA). Speziell unter Schirmherrschaft der OECD/NEA und unter maßgeblicher Beteiligung der Reaktorsicherheitsforschung des BMWi haben sich auch spezifische Formate gemeinsamer internationaler Forschung entwickelt und bewährt. Beispielhaft seien hier die gemeinsamen Forschungsprojekte „*Joint Projects*“ der OECD/NEA genannt, die im internationalen Teilnehmerkreis üblicherweise an großen, weltweit einzigartigen Forschungsanlagen durchgeführt und gemeinsam finanziert werden. Die internationale Kooperation auf unterschiedlichen Ebenen bietet neben hochwertigen Messdaten und Forschungsergebnissen auch eine wertvolle Plattform für den wissenschaftlich-technischen Erfahrungsaustausch und die Ver-

netzung deutscher Forscherinnen und Forscher mit der internationalen Forschungsgemeinschaft. Die Einbindung in internationale Forschungsaktivitäten ist für eine fundierte Weiterentwicklung der Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland unabdingbar.

Exzellente Reaktorsicherheitsforschung und der damit einhergehende Erhalt und Ausbau kerntechnischer Kompetenz werden auch künftig essenziell dafür sein, den deutschen Bemühungen um größtmögliche Sicherheit in der Kerntechnik Wirkung zu verschaffen. Die Bundesregierung hat dies mit ihrem Konzept zur Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung für die nukleare Sicherheit als eine zentrale forschungspolitische Zielstellung definiert. Hierzu leistet die Projektförderung des BMWi durch die Förderung von Forschungsarbeiten zu international aktuellen und anspruchsvollen Fragestellungen einen wesentlichen Beitrag. Denn Gewicht und Einfluss deutscher Expertise in der Sicherheitsbewertung bestehender und neuer kerntechnischer Anlagen sowie der Formulierung internationaler Sicherheitsstandards und Regelwerke wird entscheidend von Qualität und Renommee der in Deutschland betriebenen Forschung zur Reaktorsicherheit und deren Sichtbarkeit im internationalen Rahmen beeinflusst.

Forschung zur verlängerten Zwischenlagerung und Behandlung hochradioaktiver Abfälle (B)

Im zweiten Themengebiet der Projektförderung sollen wissenschaftliche Grundlagen für eine zukünftig verlängerte Zwischenlagerung und für eine Behandlung hochradioaktiver Abfälle geschaffen bzw. weiterentwickelt werden. Dieses Forschungsgebiet weist Schnittstellen sowohl zur Reaktorsicherheitsforschung als auch zur Endlagerforschung

auf. Im 7. Energieforschungsprogramm (Abschnitte 4.5.1 und 4.5.2) sind die folgenden hierfür relevanten strategischen Ziele definiert:

- „Entwicklung erforderlicher Methoden und Techniken für spezifische Maßnahmen zur Vorbereitung der Endlagerung, insbesondere im Hinblick auf die Wirkung verlängerter Zwischenlagerzeiten, z. B. auf Abfälle und Behälter, sowie für Konzeption, Errichtung, Betrieb und Stilllegung eines Endlagers, verbunden mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik“;
- „Einsatz von Methoden und Werkzeugen der Reaktorsicherheitsforschung für die Untersuchung ausgewählter Fragestellungen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle, insbesondere im Zusammenhang mit der verlängerten Zwischenlagerung (z. B. Langzeitverhalten bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle) einschließlich alternativer Entsorgungsstrategien sowie im Ausland verfolgter Entsorgungsstrategien“;
- „Schaffung einer erweiterten, fundierten Wissens- und Entscheidungsbasis durch Untersuchungen zu alternativen Entsorgungsstrategien und zu im Ausland präferierten Entsorgungsoptionen“;
- „Leistung eines substanziellen Beitrags zu Aufbau, Weiterentwicklung und Erhalt der wissenschaftlich-technischen Kompetenz und der Nachwuchsförderung im Bereich der nuklearen Entsorgung in Deutschland“.

Hochradioaktive Abfälle stammen im Wesentlichen aus der Nutzung der Kernenergie, können aber auch aus Anwendungen in Forschung und Industrie resultieren. Sie enthalten langlebige Radionuklide und

müssen zum Schutz von Bevölkerung und Umwelt sicher von der Biosphäre getrennt verwahrt werden. Mit seiner Forschungsförderung zur Zwischenlagerung und Behandlung hochradioaktiver Abfälle zielt das BMWi darauf ab, durch unabhängige Forschung den Stand von Wissenschaft und Technik weiterzuentwickeln und dabei auf den im In- und Ausland erzielten technologischen Fortschritt aufzusetzen. Die geförderten Arbeiten sollen darüber hinaus die Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung in der nuklearen Entsorgung unterstützen.

Konkret soll zur Klärung der Fragestellungen beigetragen werden, die sich aus den unvermeidlich längeren Zwischenlagerzeiten der hochradioaktiven Abfälle vor Verbringung in ein Endlager ergeben. Dies umfasst beispielsweise Untersuchungen zum Zustand der eingelagerten hochradioaktiven Abfälle und Behälter während der längeren Zwischenlagerzeiten einschließlich der damit verbundenen Auswirkungen auf die Transportier- und Handhabbarkeit sowie zur Schutzwirkung der Gebäude über die verlängerten Nutzungsdauern. Darüber hinaus sollen Abfallbehandlungs- und Konditionierungsoptionen zur Vorbereitung der Endlagerung untersucht werden. Die Endlagerkommission stellt für die empfohlene Option *Endlagerbergwerk mit Reversibilität* fest: „Die Option Endlagerbergwerk mit Reversibilität erlaubt hohe Flexibilität zur Nutzung neu hinzukommender Wissensbestände. Ein Umschwenken auf andere Entsorgungspfade bleibt über lange Zeit im Prozess möglich.“ Um mögliche Technologie- und Wissensfortschritte bewerten und in zukünftige Erwägungen einbeziehen zu können, soll der Blick daher zudem bewusst auch auf alternative bzw. ergänzende Behandlungs- und Entsorgungsmethoden sowie im Ausland präferierte Entsorgungsoptionen, wie beispielsweise der Langzeitzwischenlagerung und/oder Behandlung bestrahlter Brennelemente, gerichtet werden. Die Einbindung in internationale Forschungsaktivitä-



Blick auf die im Zwischenlager Gundremmingen eingelagerten Transport- und Lagerbehälter für hochradioaktive Abfälle (TLB)

ten ist für das in der Projektförderung des BMWi vergleichsweise neue Forschungsgebiet zur Zwischenlagerung und Behandlung hochradioaktiver Abfälle von hoher Bedeutung. Internationale Kooperationen beispielsweise über das Euratom Forschungsprogramm oder gemeinsame Forschung im Rahmen der OECD/NEA sind bereits etabliert und sollen im Zuge dieses Förderprogramms weiter ausgebaut werden.

Endlagerforschung (C)

In der Endlagerforschung verfolgt die Bundesregierung mit ihren Fördermaßnahmen folgende, im 7. Energieforschungsprogramm (Abschnitt 4.5.2) dokumentierte, sich ergänzende strategische Ziele:

- „Schaffung der wissenschaftlich-technischen Grundlagen zur Realisierung eines Endlagers insbesondere für Wärme entwickelnde Abfälle“,

- „Entwicklung erforderlicher Methoden und Techniken für spezifische Maßnahmen zur Vorbereitung der Endlagerung, insbesondere im Hinblick auf die Wirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten, z. B. auf Abfälle und Behälter, sowie für Konzeption, Errichtung, Betrieb und Stilllegung eines Endlagers, verbunden mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik“;
- „Leistung eines substanziellen Beitrages zu Aufbau, Weiterentwicklung und Erhalt der wissenschaftlich-technischen Kompetenz und zur Nachwuchsförderung im Bereich der nuklearen Entsorgung in Deutschland“.

Die Endlagerforschung in Deutschland hat über mehrere Jahrzehnte dafür gesorgt, dass eine ausgezeichnete, international anerkannte wissenschaftliche Expertise zur Entsorgung radioaktiver Abfälle existiert. Die Standortauswahl für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland mit der gleichwertigen, ergebnisoffenen Betrachtung aller Wirtsgesteine stellt neue Herausforderungen an die nukleare Entsorgungsforschung. Zu den künftig zu bearbeitenden Themen der projektgeförderten Endlagerforschung gehören insbesondere die Weiterentwicklung der Instrumente und der Methodik für den *Safety Case* (Sicherheitsanalysen und -nachweis) sowie vertiefte Untersuchungen zu Systemverhalten und -entwicklung sowie zu technischer Machbarkeit und Langzeitverhalten von



Blick in einen Experimentiertunnel im Felslabor Mt. Terri in der Schweiz

Endlagerkomponenten. Dazu sind auch Maßnahmen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit sowie zum Monitoring des Endlagersystems und seines Umfelds zu zählen. Als Erkenntnisgewinn für Entsorgungsoptionen können beispielsweise Forschungsvorhaben zu tiefen Bohrlöchern dienen. Im Hinblick auf die möglichen Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf hochradioaktive Abfälle und deren Lagerbehälter können sich Schnittstellen zum Forschungsgebiet (B) „Zwischenlagerung und Behandlung hochradioaktiver Abfälle“ ergeben.

Die internationalen Kooperationen auf dem Gebiet der Endlagerforschung sind seit Jahrzehnten gewachsen – sei es auf bilateraler Ebene z. B. mit den USA, der Schweiz, Frankreich, Schweden, Tschechien, Belgien, Russland und China oder auf multilateraler Ebene z. B. im Rahmen von Euratom im *European Joint Programming* (EJP), der OECD/NEA oder der *Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform* (IGD-TP). Auch weiterhin wird Endlagerforschung in internationaler Kooperation stattfinden. Dabei spielt vor allem die Mitarbeit in ausländischen Untertagelaboren eine zentrale Rolle. Da in Deutschland kein Untertagelabor zur Verfügung steht, stellt die internationale Kooperation künftig die einzige Möglichkeit dar, In-situ- und Demonstrationsversuche durchzuführen bzw. sich an diesen zu beteiligen. Darüber hinaus tragen internationale Forschungsk Kooperationen zur Verbesserung des für die Sicherheitsbewertung von Endlagerkonzepten notwendigen Systemverständnisses und zur Fortentwicklung methodischer Ansätze u. a. im Hinblick auf die Erstellung eines Sicherheitsnachweises bei. Bei der Entwicklung von Werkzeugen für die Sicherheitsanalysen kann durch den Vergleich von Rechenmodellen (Benchmarking) sowie den Vergleich numerischer Simulationen mit Messkampagnen von internationalen Kooperationen ebenso profitiert werden.

Forschung zu Querschnittsfragen (D)

Die Querschnittsfragen fassen schließlich Themenstellungen zusammen, die übergreifend für die drei zuvor beschriebenen Forschungsgebiete (A–C) relevant sind. Dies betrifft Forschung zum Wissens- und Kompetenzmanagement in der nuklearen Sicherheit, zu sozio-technischen Fragestellungen sowie zu Aspekten der Kernmaterialüberwachung („Safe-guards“). Bei der Bearbeitung sollen u. a. inter- und transdisziplinäre Ansätze verfolgt werden.

Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung

Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung zählt zu den zentralen Herausforderungen im Bereich der Reaktorsicherheit und der nuklearen Entsorgung in Deutschland. Als Element der staatlichen Daseinsvorsorge gilt es, die bereits gewonnene Wissens- und Erfahrungsbasis aus der über Jahrzehnte betriebenen Forschung und praktischen Umsetzung für nachfolgende Generationen langfristig zu erhalten und insbesondere gespiegelt an den aktuellen und künftigen Herausforderungen stetig weiterzuentwickeln. Die Bedeutung dieser gesellschaftlichen Aufgabe, eine auf Sicherheit ausgerichtete Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung zu erhalten sowie das deutsche Sicherheitsverständnis auch weiterhin international aktiv einzubringen, wird im Koalitionsvertrag der die Bundesregierung tragenden Parteien vom März 2018 unterstrichen und ist sowohl im 7. Energieforschungsprogramm vom September 2018 als auch im Konzept der Bundesregierung zur Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung für die nukleare Sicherheit vom 26. August 2020 als strategisches Ziel gesetzt.

Um die Fachkräfte von morgen für Themengebiete in der nuklearen Sicherheit zu begeistern, gilt es, herausfordernde Forschungsfragestellungen im

Sinne der nuklearen Sicherheit zu beantworten und Perspektiven für eine berufliche Zukunft aufzuzeigen bzw. zu ermöglichen.

Die Projektförderung des BMWi zur Reaktorsicherheits- und nuklearen Entsorgungsforschung trägt seit vielen Jahren durch die Förderung von Forschungsvorhaben an Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen wesentlich zu Erhalt, Aufbau und Weiterentwicklung der wissenschaftlich-technischen Kompetenz sowie zur Nachwuchsförderung bei. Die Einbindung des wissenschaftlichen Nachwuchses in die projektgeförderten Forschungsvorhaben wird ausdrücklich unterstützt. Zudem soll die gezielt auf die Nachwuchsförderung ausgerichtete Förderinitiative „Kompetenzerhalt in der Kerntechnik“ (KEK), seit Jahren ein erfolgreicher Bestandteil des BMWi-Förderprogramms, fortgesetzt werden. Darüber hinaus soll durch die Aufbereitung und Vermittlung von Forschungsergebnissen einerseits für die wissenschaftliche Gemeinschaft und andererseits auch für die interessierte Öffentlichkeit der Dialog zwischen wissenschaftlichen und nicht-wissenschaftlichen Akteuren erleichtert und damit das Interesse an einer Auseinandersetzung mit kerntechnischen (Sicherheits-)Themen gestärkt werden.

Internationale Zusammenarbeit

Internationale Kooperationen sind in der nuklearen Sicherheitsforschung essenziell. So bestätigt das 7. Energieforschungsprogramm (Kapitel 6.4): *„Nur durch fundierte sicherheitstechnische Kompetenz, die auf Basis eigenständiger Forschung und Entwicklung zur nuklearen Sicherheit international eingebracht wird, kann Deutschland auch künftig in internationalen Sicherheitsdiskussionen ausreichend Gehör finden und seine berechtigten Sicherheitsinteressen vertreten.“* Um international anerkannte Beiträge

und dauerhaften Einfluss Deutschlands auf Reaktorsicherheit und sichere nukleare Entsorgung erreichen zu können, ist die international vernetzte Nutzung deutscher kerntechnischer und wissenschaftlich-technischer Infrastruktur und Expertise sowie die deutsche Beteiligung an internationalen Projekten in diesen Bereichen wesentlich. Zukünftige FuE-Inhalte, die auf Grundlage des vorliegenden Förderprogramms realisiert werden sollen, sind unter Berücksichtigung des beträchtlichen Wissensstandes aus nationalen und internationalen Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsaktivitäten so anzulegen, dass anhand bereits vorliegender Erkenntnisse die zielgerichtete Ableitung offener Fragestellungen und deren Beantwortung erfolgt. Dabei können durch internationale Kooperationen wissenschaftlich-technische, sicherheitsbezogene und ökonomische Synergien unter anderem durch folgende Maßnahmen und Effekte genutzt werden:

- Informations- und Erfahrungsaustausch zu aktuellen Forschungsfragen und -programmen sowie zu Kernenergie- und Entsorgungsprogrammen;
- Verbreiterung der nationalen und internationalen Wissensbasis;
- Gemeinsame Nutzung und Finanzierung von Forschungsinfrastrukturen (z. B. Versuchsstände in (groß)technischem Maßstab, Fels- und Untertagelabore);
- Austausch zu Ansätzen der jeweiligen nationalen Sicherheitsphilosophien und -kulturen;
- Vergleich und Bewertung unterschiedlicher wissenschaftlich-technischer Methoden, Ansätze und Konzepte;

- Möglichkeit zur Evaluierung des Wissensfortschritts einschließlich Peer-Review-Verfahren.

Langjährig etablierte Kooperationsplattformen bestehen sowohl auf Grundlage bilateraler wissenschaftlich-technischer Zusammenarbeit mit einer Reihe von Ländern als auch im Rahmen von Euratom, der OECD/NEA oder der IAEO. Entsprechend sind die BMWi-geförderten Forschungsaktivitäten zur nuklearen Sicherheit bereits eng in internationale Kooperationen eingebunden. Dies soll für alle drei Forschungsgebiete und die darauf basierenden zusätzlichen Querschnittsfragen künftig weiter fortgeführt und intensiviert werden, insbesondere da die Entwicklung neuartiger Reaktor- und Sicherheitskonzepte sowie die Nutzung von Untertagelaboren in anderen Staaten verstärkt wird.

2 Zuständigkeiten und Aufgabenverteilung

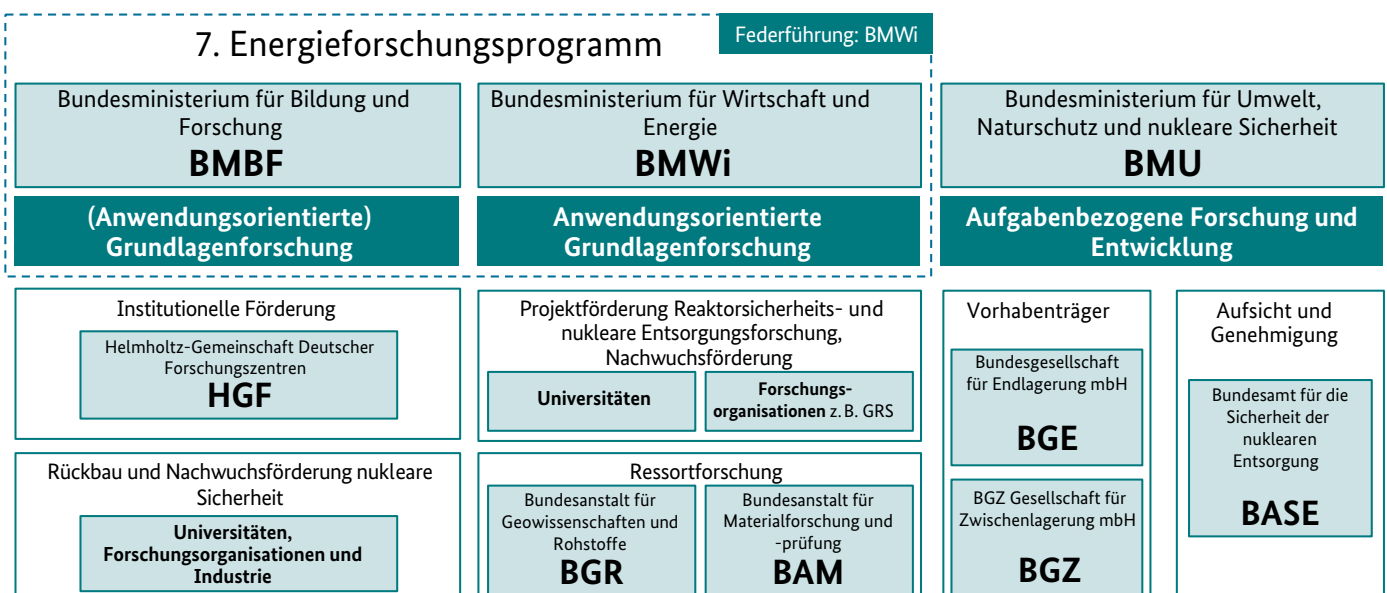
In die Forschung zur nuklearen Sicherheit auf Bundesebene sind drei Bundesministerien, das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), arbeits- teilig eingebunden.

Das BMWi ist für die programmatische Ausgestaltung der Energieforschung federführend zuständig; aktuell bildet das 7. Energieforschungsprogramm die themenorientierte Programmstruktur ab. Auf dem Gebiet der nuklearen Sicherheitsforschung verantwortet das BMWi die Projektförderung in der Reaktorsicherheits- und Entsorgungsforschung, die auch Maßnahmen zur Nachwuchsförderung und zur Kompetenzentwicklung beinhaltet. Die Förderinhalte sind in dem vorliegenden Förderprogramm zusammengefasst. Die in diesem Rahmen geförderte Reaktorsicherheits- und nukleare Entsorgungsforschung der vergangenen Jahre hat erheblich zur Sicherheit kerntechnischer Anlagen, zur Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik

in der nuklearen Sicherheit sowie zur Weiterentwicklung der kerntechnischen Kompetenz in Deutschland beigetragen. Weiterführende Informationen zu Inhalten und Ergebnissen der Projektförderung des BMWi der letzten Jahre können auf den Internetseiten von BMWi (<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Energie/kern-energie.html>) und den Projektträgern PT GRS (<https://www.grs-fbw.de/>) und PTKA (<https://www.ptka.kit.edu/entsorgung-berichte.html>) eingesehen werden.

Die Ressortforschungseinrichtungen im Geschäftsbereich des BMWi führen im Bereich der nuklearen Entsorgung eigene Forschungsarbeiten durch. So forscht und berät die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) zu geologisch-geotechnischen Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle, u.a. auch in Auftragsarbeiten im Rahmen einer Zusammenarbeitsvereinbarung mit der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE). Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) forscht und berät auf dem Gebiet der nuklearen

Abbildung 2: Aufgabenverteilung in der nuklearen Sicherheitsforschung in Deutschland



Entsorgung derzeit vor allem zur Sicherheit von Transport- und Lagerbehältern.

Die Projektförderung des BMWi wird durch eine Projektförderung des BMBF zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses in den Bereichen Reaktorsicherheits-, Entsorgungs- und Strahlungsforschung flankiert. Daneben fördert das BMBF Forschungsmaßnahmen zum Rückbau kerntechnischer Anlagen.

Im Rahmen der Programmorientierten Förderung der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) werden im Programm NUSAFE (Nuclear Waste Management, Safety und Radiation Research) die Themen nukleare Entsorgung und Reaktorsicherheit sowie Strahlungsforschung bearbeitet. Die Programmorientierte Förderung der Helmholtz-Gemeinschaft wird vom BMBF zusammen mit den Ländern finanziert.

Die Ressortforschung des BMU ist grundsätzlich darauf ausgerichtet, die Erfüllung der Aufgaben des Ministeriums und seiner Bundesoberbehörden zu unterstützen. Der Beratungs- und Forschungsbedarf, der sich aus den Ressortaufgaben des BMU ergibt, wird mit dem mittelfristigen Forschungsrahmen beschrieben und jährlich in einem Ressortforschungsplan festgelegt. In diesem Rahmen führt das BMU auch Untersuchungen u. a. zur Reaktorsicherheit und nuklearen Entsorgung durch. Diese umfassen Arbeiten zur Ermittlung des internationalen Stands von Wissenschaft und Technik, zu dessen Umsetzung in Deutschland in Form der Weiterentwicklung des kerntechnischen Gesetzgebungsrahmens (Atomgesetz, Strahlenschutzgesetz) und der untergeordneten sicherheitstechnischen Anforderungen sowie Untersuchungen zu grundlegenden und aktuellen sicherheitstechnischen Problemstellungen des Betriebs von kerntechnischen

Anlagen. Im Geschäftsbereich des BMU arbeiten auf diesen Gebieten das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), die BGZ Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH (BGZ) sowie die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE).

Das BASE forscht auf Grundlage seiner gesetzlichen Aufgaben (z. B. Genehmigungs- und Aufsichtsaufgaben) sowie zur wissenschaftlichen Beratung des BMU im Bereich der nuklearen Sicherheit. Hierbei erfolgt die Bearbeitung aufgabenbezogener Forschungsthemen je nach wissenschaftlicher Fragestellung u. a. nicht nur durch die Beauftragung Externer, sondern auch durch eigenes Personal.

Die BGE führt im Rahmen ihrer Aufgaben als Vorhabenträgerin und Betreiberin von Endlagervorhaben in Deutschland auch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durch. Ebenso forscht die BGZ auf dem Gebiet der nuklearen Entsorgung mit dem Schwerpunkt Sicherheit von Transport- und Lagerbehältern und den darin befindlichen hochradioaktiven Abfällen.

Begleitend zu den Aktivitäten im Zuständigkeitsbereich der drei Bundesministerien sind drei wesentliche Kompetenzverbünde und Arbeitsgruppen ins Leben gerufen worden, die seit Jahren erfolgreich arbeiten. Ihre Aufgaben liegen in der inhaltlichen Abstimmung der Forschungsarbeiten sowie in der Umsetzung von Initiativen zum Kompetenzerhalt. Dies geschieht in der Reaktorsicherheits- und Entsorgungsforschung im Rahmen des Kompetenzverbundes Kerntechnik (KVKT) und der Deutschen Arbeitsgemeinschaft für Endlagerforschung (DAEF). Der Kompetenzverbund Strahlungsforschung (KVVSF) hat die Sicherstellung der Aus- und Weiterbildung von Fachleuten im Bereich Strahlungsforschung zum Ziel.

3 Forschungsschwerpunkte



In diesem Kapitel sind die Forschungsthemen, die im Rahmen des BMWi-Förderprogramms „*Forschung zur nuklearen Sicherheit*“ für die drei **Forschungsgebiete** (A) „Reaktorsicherheitsforschung“, (B) „Forschung zur Zwischenlagerung und Behandlung hochradioaktiver Abfälle“ sowie (C) „Endlagerforschung“ gefördert werden können, näher beschrieben. Zusätzliche Themen mit Querschnittscharakter, die sich nicht ausschließlich einem der genannten Forschungsgebiete zuordnen lassen, werden unter (D) „Forschung zu Querschnittsfragen“ aufgeführt. Zu den Forschungsgebieten wurde eine Untergliederung in **FuE-Bereiche** gewählt (Tabelle 1).

Die FuE-Bereiche sind zumeist in **FuE-Felder** untergliedert, zu denen einzelne **FuE-Themen** beitragen. Die genannten FuE-Themen stellen keine abschließende Liste förderfähiger Forschungsinhalte dar. Andere Themen und FuE-Vorhaben, die nicht explizit in den einzelnen FuE-Themen dieses Förderprogramms genannt sind, können von Antragstellern vorgeschlagen und gefördert werden, wenn Relevanz und Aktualität für das Fachgebiet vorliegen. So bleibt es möglich, die Forschungsförderung an aktuelle Entwicklungen und Bedarfe der nuklearen Sicherheit anzupassen.

Tabelle 1: Überblick über die FuE-Bereiche

	A Reaktorsicherheitsforschung	B Forschung zur verlängerten Zwischenlagerung und Behandlung hochradioaktiver Abfälle	C Endlagerforschung	D Forschung zu Querschnittsfragen
FuE-Bereiche	A1 Prüfung und Bewertung der Sicherheit von Komponenten und Strukturen	B1 Verlängerte Zwischenlagerung	C1 Standortauswahl	D1 Wissens- und Kompetenzmanagement
	A2 Nachweisverfahren zur Beherrschung von Transienten, Stör- und Unfällen	B2 Abfallbehandlungs- und Konditionierungsoptionen für die Endlagerung	C2 Sicherheits- und Endlagerkonzepte; Endlagertechnik und (geo-)technische Barrieren	D2 Sozio-technische Fragestellungen
	A3 Wechselwirkung Mensch-Technik und probabilistische Sicherheitsanalysen	B3 Behandlungs- und Entsorgungsmethoden	C3 Sicherheitsnachweis	D3 Kernmaterialüberwachung (Safeguards)

A. Forschungsgebiet Reaktorsicherheit

Übergeordnete und unmittelbar aus dem 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung abgeleitete Zielstellung der projektgeförderten Reaktorsicherheitsforschung des BMWi ist der Ausbau unabhängiger sicherheitstechnischer Kompetenzen zur Beurteilung und Weiterentwicklung der Sicherheit kerntechnischer Anlagen im In- und Ausland. Neben den nationalen verbleibenden Anwendungsfällen (Nach- und Restbetriebsphase, Forschungsreaktoren) sollen die im Forschungsgebiet Reaktorsicherheitsforschung geförderten Vorhaben insbesondere sicherheitstechnische Fragestellungen von im Ausland betriebenen, errichteten oder in Entwicklung befindlichen Anlagen adressieren. Dabei sollen auch neue Reaktorkonzepte und im Ausland erwogene neue Einsatzgebiete Gegenstand der sicherheitsgerichteten Betrachtungen sein. Ein wesentlicher Aspekt ist die Weiterentwicklung und experimentelle Absicherung numerischer Methoden zur Sicherheitsbewertung der verschiedenen Anlagentypen und Konzepte. Hier spielt die Verfügbarkeit moderner nationaler Forschungsinfrastruktur, z. B. Versuchsstände, heiße Zellen, eine entscheidende Rolle. Nur durch eigenständige Forschung zur Reaktorsicherheit können

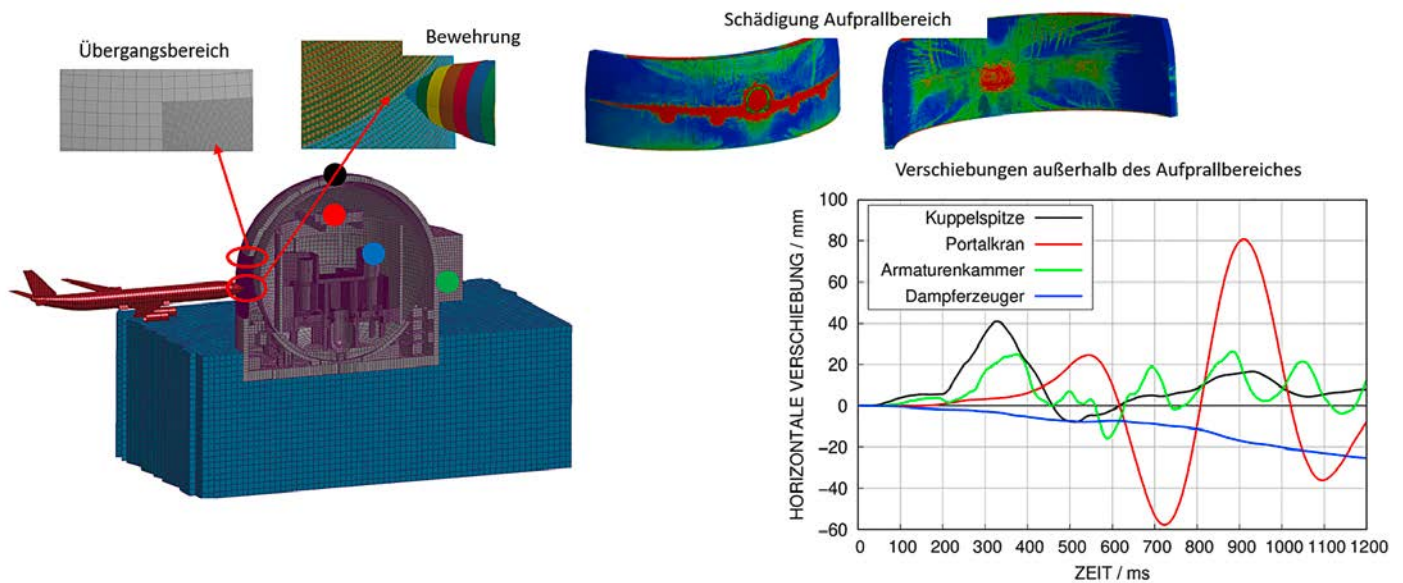
- das hohe Niveau sicherheitsgerichteter kerntechnischer Kompetenz,
- die dadurch mögliche Mitwirkung an der Gestaltung und Verbesserung internationaler Sicherheitsstandards,
- die sicherheitstechnische Verbesserung des Betriebs sowie
- die Wirksamkeitsbewertung präventiver und schadensmindernder Maßnahmen bis hin zur Optimierung nationaler Notfallschutzmaßnahmen

dauerhaft sichergestellt werden. Für technische Fragestellungen mit gesellschaftlich relevanten partizipativen Komponenten können zudem sozio-technische Aspekte untersucht werden.

Im Themengebiet Reaktorsicherheitsforschung können Vorhaben in den folgenden FuE-Bereichen gefördert werden.

FuE-Bereich A1: Prüfung und Bewertung der Sicherheit von Komponenten und Strukturen

Die FuE-Arbeiten der Vergangenheit haben erprobte Methoden und Werkzeuge zur sicherheitstechnischen Bewertung von Komponenten und Strukturen in kerntechnischen Anlagen hauptsächlich deutscher Bauart bereitgestellt. Zur bestmöglichen Vorsorge hinsichtlich des Schutzes von Bevölkerung und Umwelt bedürfen diese Methoden und Werkzeuge einer kontinuierlichen Weiterentwicklung auf dem fortschreitenden Stand von Wissenschaft und Technik über das Ende der Betriebsdauer deutscher Kernkraftwerke hinaus. Künftig wird ein Schwerpunkt auf einer Verbesserung der Anwendbarkeit für kerntechnische Anlagen sowie Nachweiskonzepte im Ausland liegen, die sich von den deutschen Anlagen unterscheiden können, beispielsweise in Auslegung, Konstruktion, Werkstoffwahl, Fertigungstechnologie oder hinsichtlich ihres Betriebs (z. B. Langzeitbetrieb). Auch die Besonderheiten neuartiger Kernkraftwerkstypen sowie neuer Reaktorkonzepte, die derzeit international entwickelt bzw. implementiert werden, sind Gegenstand der Betrachtungen. Die übergeordnete Zielsetzung ist es, auch zukünftig in sicherheitstechnisch relevanten Belangen aussage- und prognosefähig zu sein.



Simulation eines Flugzeugaufpralls auf ein generisches Modell eines Kernkraftwerks

FuE-Feld A1.1: Integrität baulicher Strukturen

Gebäude und bauliche Strukturen in Kernkraftwerken schützen die Kraftwerkskomponenten vor Einwirkungen von innen und außen und stellen im Falle eines Stör- oder Unfalls die letzte Barriere gegen die Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung dar. Für Einwirkungen von außen (z. B. Erdbeben) und innen (z. B. Explosionen, Brand) sowie für Notstandsfälle (z. B. Flugzeugabsturz) ist zu ermitteln, ob und inwieweit die Tragfähigkeit und die Schutzfunktionen der Gebäude und baulichen Strukturen, insbesondere des Containments, gewährleistet werden. Abgesehen davon kann ihre Integrität auch durch alterungsbedingte Effekte beeinträchtigt werden; diese Frage ist insbesondere für Anlagen mit längeren Laufzeiten relevant, wie vermehrt international zu beobachten.

Zum Integritätsnachweis baulicher Strukturen werden aktuell Berechnungs- und Modellierungsmethoden und Analysewerkzeuge entwickelt, die sowohl einzelne Effekte als auch Überlagerungen

aus verschiedenen Einwirkungen berücksichtigen. Diese Entwicklungen sollen fortgeführt werden. Dabei sollen künftig die Interaktionen der installierten Komponenten (Anlagentechnik) mit den Gebäudestrukturen verstärkt betrachtet werden. Durch Weiterentwicklung der Berechnungs- und Modellierungsmethoden, die mittels einer Erweiterung der experimentellen Datenbasis verifiziert und validiert werden sollen, können Prognosen präzisiert und Sicherheitsmargen bestehender baulicher Strukturen genauer bestimmt werden.

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- Untersuchungen zu Einwirkungen von innen (z. B. Radiolysegasexplosion, Brand) und außen (z. B. Explosionsdruckwelle, Projektile, Erdbebenwirkungen), Notstandsfälle (z. B. Flugzeugabsturz) sowie von Einwirkungsüberlagerungen und deren Einflüssen auf das Materialverhalten und die Baustruktur

- Materialverhalten und Alterungseffekte von Beton, Bewehrung und Verbund zwischen Beton und Bewehrung
- Entwicklung von Ansätzen und Methoden zur Beschreibung der Einflüsse aus Interaktionen (z. B. Baustruktur mit installierten Komponenten)

FuE-Feld A1.2: Integrität von Komponenten und Systemen

Sowohl für den regulären Betrieb, Auslegungsstörfälle, aber auch auslegungsüberschreitende Ereignisse werden Methoden und Werkzeuge zur Bewertung der Integrität von Komponenten und Systemen gemäß dem Stand von Wissenschaft und Technik entwickelt. Erhöhte Rechnerkapazitäten erlauben heute die Entwicklung präziserer Beschreibungen mittels Multiphysik-Multiskalen-Methoden, wie beispielsweise einer gekoppelten Behandlung von Thermohydraulik und Strukturmechanik. Gerade mit Blick auf Anlagen im benachbarten Ausland ist zudem die sicherheitstechnische Bewertung des Langzeitbetriebes, unter Berücksichtigung spezifischer Phänomene der Komponentenalterung (z. B. zyklische Belastung, Neutronenversprödung), von hoher Priorität. Durch kontinuierliche Verbesserung der Modellierung sollen die Sicherheitsmargen in der Auslegung der Komponenten genauer ermittelt und ihr Beitrag zur Robustheit der Anlage vor allem gegen auslegungsüberschreitende bzw. multiple Belastungen präziser bestimmt werden können. Aber auch für neue und neuartige Reaktoren müssen aus nuklearen Sicherheitsgesichtspunkten belastbare Erkenntnisse zu strukturelevanten Werkstoffen und ihrem Verhalten unter Normal-, Stör- und Unfallbedingungen gewonnen werden. Dies beinhaltet die Wechselwirkung von Komponenten mit den für neuartige Reaktorkonzepte vorgesehenen Kühlmitteln (z. B. Flüssigsalze,

-metalle, Gase). Auch die sicherheitstechnische Bewertung absehbarer neuer Fertigungsverfahren oder das strukturmechanische Verhalten neuer Brennstoffkonzepte sind Forschungsthemen.

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- Weiterentwicklung von Methoden zur Integritätsbewertung (Bruchmechanik, Schädigungsmechanik, skalenübergreifende Methoden u. a.)
- Bestimmung des Verhaltens von Komponenten und Systemen bei auslegungsüberschreitenden Einwirkungen sowie bei multiplen Störfallbelastungen
- Charakterisierung von Strukturwerkstoffen und Funktionswerkstoffen (Hüllrohre, Kabel, Brennstoffkonzepte u. a.) und Verhalten bei Auslegungs- und auslegungsüberschreitenden Transienten für etablierte und neue Reaktorkonzepte
- Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Medien auf das Werkstoffverhalten (z. B. korrosive Medien, Gas, Flüssigmetalle, Flüssigsalze, überkritisches Wasser)
- Identifikation und Untersuchung von Alterungsphänomenen (z. B. Neutronenversprödung, zyklische Belastung, Korrosion, Erosion, Ermüdung) sowie sicherheitstechnische Bewertung des Langzeitbetriebs
- Analysen zu Einflüssen aus der Fluid-Struktur-Wechselwirkung
- Methodenentwicklung zur sicherheitstechnischen Bewertung neuer Fertigungsverfahren (z. B. additive Fertigung, Fügeverfahren)

FuE-Feld A1.3: Prüfverfahren und Monitoring

Zum Nachweis der Integrität von Komponenten und Systemen ist es erforderlich, ihren strukturellen Zustand zerstörungsfrei während des Betriebs permanent mit Monitorsystemen (Condition Monitoring) zu erfassen und periodisch mit Methoden der zerstörungsfreien Prüfung zu überwachen. Hierfür sollen Konzepte entwickelt werden, die u. a. auf den bewährten Methoden der zerstörungsfreien Prüfung aufbauen und diese optimieren. Für die Anwendung von Verfahren zur Bestimmung der aktuellen Lebensdauer von Anlagenkomponenten sowie zur In-situ-Überwachung sind die Einsatzmöglichkeiten neuartiger („smarter“) Sensoren weiterzuentwickeln und für den Einsatz in kerntechnischen Anlagen zu qualifizieren.

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- (Weiter-)Entwicklung von Messverfahren und Konzepten zur Absicherung des Betriebs (z. B. Methodenkopplung aus Zustandsbewertung, Monitoring und zerstörungsfreier Prüfung von Vollmaterial wie Fügeverbindungen)
- Entwicklung von Methoden und Verfahren zur Erhöhung der Nachweiswahrscheinlichkeit in der zerstörungsfreien Prüfung (z. B. für Schweißnähte, Grundstoffbereiche) auch unter Einbeziehung menschlicher Faktoren
- Qualifizierung von Smart-Sensorik

FuE-Bereich A2: Nachweisverfahren zur Beherrschung von Transienten, Stör- und Unfällen

Im Rahmen der Reaktorsicherheitsforschung werden kontinuierlich spezifische Methoden und Rechenprogramme zur Simulation des Ablaufs von betrieblichen Transienten sowie von Stör- und Unfällen entwickelt. Ziel ist eine möglichst realitätsnahe und aussagegenaue Beschreibung der zu erwartenden Abläufe und des Anlagenverhaltens als Grundlage für sicherheitstechnische Analysen und Bewertungen. Dazu ist eine ständige Weiterentwicklung der Methoden und Rechenprogramme erforderlich, um in erster Linie den international fortschreitenden Wissensstand und technologische Weiterentwicklungen in der Kerntechnik, z. B. bezüglich neuer Reaktorkonzepte und SMR, abzubilden, aber auch um die stetig steigende verfügbare Rechenleistung und sonstigen Fortschritt in der Informationstechnologie für die Reaktorsicherheitsforschung zu nutzen.

Neben den etablierten Systemcodes werden verstärkt auch zeitlich und räumlich hochauflösende Berechnungsmethoden wie beispielsweise Computational Fluid Dynamics (CFD) in der Reaktorsicherheitsforschung eingesetzt. Um das Anlagenverhalten möglichst umfassend zu beschreiben, wird zunehmend eine Kopplung von Codes aus unterschiedlichen Bereichen wie Neutronenkinetik, Thermohydraulik, Strukturmechanik, Chemie und Spaltproduktverhalten angestrebt. Auch Kopplungen von Systemcodes mit hochauflösenden lokalen Rechenverfahren finden zunehmend Anwendung. Steigende Rechnerleistungen ermöglichen die Entwicklung gekoppelter Multiphysik-Multiskalen-Methoden zur zunehmend präziseren Beschreibung relevanter Phänomene und des integralen Anlagenverhaltens. Zusätzlich werden Methoden zur Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse entwickelt, um

den Einfluss relevanter Parameter und Randbedingungen auf das Sicherheitsverhalten präziser evaluieren zu können.

Die Entwicklung neuer Modelle und Berechnungsmethoden erfordert deren Validierung mittels experimenteller Ergebnisse. Daher werden im Rahmen der projektgeförderten Reaktorsicherheitsforschung des BMWi in erheblichem Umfang experimentelle Programme, von Laborexperimenten bis hin zu großskaligen Versuchen, gefördert. Dabei werden neben Einzeleffektuntersuchungen, die gezielt für die Untersuchung einzelner Phänomene ausgelegt sind, auch Integralversuche benötigt, die die Wechselwirkung unterschiedlicher Phänomene und Sicherheitssysteme eines kompletten Kernkraft-

werkes sowie ganze Transienten und Störfallabläufe abbilden. Die dafür notwendigen Experimente werden auch unter Einbindung internationaler Partner und durch Beteiligung an internationalen Programmen durchgeführt.

Zusammenfassend sollte die Methodenentwicklung für Nachweisverfahren zur Beherrschung von Transienten, Stör- und Unfällen vordringlich folgende Unterpunkte umfassen:

- Weiterentwicklung und Validierung thermohydraulischer und neutronenphysikalischer Berechnungsmethoden auf lokaler Ebene wie auf Systemebene, abgesichert durch Experimente bzw. internationale Benchmarks



Moderne Lasermesstechnik an der THAI-Anlage

- Entwicklung und Validierung von Multiphysik- und Multiskalen-Methoden (z. B. gekoppelte Codes in den Gebieten Neutronenkinetik/Thermohydraulik/Brennstoff/Chemie/Spaltproduktverhalten) zur integralen Beschreibung des internen Anlagenverhaltens
- Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen auf lokaler wie systemischer Ebene
- Entwicklung von „Faster than Real-Time“-Verfahren für Anlagensimulatoren und den Notfall-schutz
- Störfälle (z. B. Verlagerung, Kühlbarkeit, Kritikalität) für etablierte sowie neue Reaktoren
- Entwicklung von Methoden zur Beschreibung chemischer Effekte im Reaktorkern (beispielsweise Kühlmittelchemie, Hüllrohrkorrosion)
- Methodenentwicklung zur sicherheitstechnischen Bewertung neuer Brennstoffe und Hüllrohrmaterialien (z. B. Accident Tolerant Fuel (ATF)) sowie neuer Brennelementkonzepte und Beladestrategien
- Verbesserte Beschreibung von Wärmeübertragungsphänomenen (z. B. Gase, Flüssigmetalle, kritischer Wärmestrom (CHF), Filmsieden, Dry-out, Post-Dryout)

FuE-Feld A2.1: Reaktorkern

Zur Beschreibung der Vorgänge im Reaktorkern bestehender und neuartiger Anlagen ist das Verständnis der dort relevanten physikalischen bzw. chemischen Vorgänge inkl. des Brennstoffverhaltens essenziell. Entsprechende Methoden und Werkzeuge zur Modellierung und Bewertung sind kontinuierlich an den aktuellen Wissensstand anzupassen. Betrachtet werden soll das Verhalten unter Normalbetrieb, Stör- und Unfallbedingungen. Auch neue Brennstoffe und Brennstoffkonzepte sollen untersucht und die gewonnenen Erkenntnisse in die Modellierungen einbezogen werden.

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- (Weiter-)Entwicklung von Methoden und Rechenprogrammen zur Analyse des Betriebs- und Transientenverhaltens von Reaktorkernen, Hüllrohrwerkstoffen, Brennstoffen – auch bei Hochabbrand – (z. B. Neutronenflussschwankungen, Verbiegung von Brennelementen) für den Normalbetrieb und Störfälle vom Auslegungsbereich bis hin zur Spätphase schwerer

FuE-Feld A2.2: Kühlkreislauf

Auch für die Beschreibung der Vorgänge im Kühlkreislauf sind eine stetige Weiterentwicklung der vorhandenen Rechencodes sowie deren Validierung anhand experimenteller Daten erforderlich. Im Fokus der Untersuchungen steht das thermohydraulische Verhalten des Kühlkreislaufs. Neben dem Verhalten von Wasser als Kühlmittel der Leichtwasserreaktoren (LWR) stellen alternative Kühlmittel wie Gase, Flüssigmetalle, Flüssigsalze und überkritisches Wasser, wie sie in neuartigen Reaktorkonzepten betrachtet werden, neue Forschungsgegenstände dar. Auch die Untersuchung innovativer Komponenten, wie z. B. Wärmeübertrager oder passive Komponenten, sind relevante Forschungsthemen für neue Reaktoren und SMR. Ebenso können Untersuchungen zu verschiedenen international diskutierten Maßnahmen zur Rückhaltung der Schmelze im Reaktordruckbehälter im Falle eines Kernschadens (IVR-Maßnahmen) gefördert werden. Dies trifft auch auf Arbeiten zum

Spaltprodukttransport und ggf. zur Spaltproduktfreisetzung sowie zu möglichen mitigativen Maßnahmen zu.

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- Untersuchung und Bewertung des Kühlmittelverhaltens (Wärmeübertragung, Kreislaufchemie) auch für Störfälle (Spaltprodukttransport) und unter Einbeziehung neuer Kühlmedien (Gas, Flüssigmetalle, Flüssigsalze, überkritisches Wasser)
- Forschung und Entwicklung zu fortschrittlichen Sicherheitskonzepten, unter anderem zu innovativen Komponenten (z.B. Wärmeübertrager, passive Bespeisung), zu Rückhaltemaßnahmen im Reaktordruckbehälter (sog. In-Vessel-Retention – IVR), zu passiver Kühlung (einschließlich Naturkonvektion), zur Interaktion von passiven Systemen sowie bei funktionalem Versagen der Wirksamkeit passiver Systeme
- Spezifische Fragestellungen zur gesicherten Verfügbarkeit von aktiven Sicherheitssystemen
- Analysen zur Spätphase bei schweren Störfällen (z.B. Kühlungsstrategie, externe Maßnahmen, Spaltproduktfreisetzung)

FuE-Feld A2.3: Containment und angrenzende Gebäude

Als letzte Barriere gegen einen Austritt von Spaltprodukten in die Umwelt kommt dem Containment eine besondere Bedeutung zu. Ein mögliches Versagen der Sicherheitsbarriere muss durch gezielte Maßnahmen verhindert werden. Dazu werden Analysewerkzeuge entwickelt und experimentell abgesichert. Vor diesem Hintergrund werden unter anderem Untersuchungen zum Druckaufbau im Containment, zur Freisetzung und zum Verhalten

inertter und explosiver Gase, zum Verhalten und zur Freisetzung von Spaltprodukten und von Kernschmelze gefördert. Gegenmaßnahmen zur Prävention bzw. Mitigation des Unfallablaufes werden bewertet und gegebenenfalls weiterentwickelt. Auch Fragestellungen im Zusammenhang mit der Kühlung und Reaktivitätskontrolle im Brennelementlagerbecken, das in der Regel innerhalb des Containments lokalisiert ist, werden untersucht.

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- Analyse der Containmentintegrität (z.B. Kühlung, Druckbegrenzung, Verhalten inertter und explosiver Gase, Aerosole) sowie des Leckverhaltens
- Untersuchung des Spaltproduktverhaltens (inkl. Quellterm)
- Schmelzerückhaltung im Containment (z.B. Core Catcher)
- Untersuchungen zum Verhalten von Wasserpools, zur Brennelemente-Kühlung sowie zur Reaktivitätskontrolle im Lagerbecken (auch im Nach- und Restbetrieb) und Weiterentwicklung methodischer Ansätze

FuE-Bereich A3: Wechselwirkung Mensch-Technik und probabilistische Sicherheitsanalysen

Die Leittechnik bildet das Nervensystem einer kerntechnischen Anlage und besitzt somit einen maßgeblichen Einfluss auf das sicherheitstechnische Verhalten des Gesamtsystems; mögliche Fehlfunktionen sind in der Lage, Störfälle zu initiieren. Ihre Funktionsfähigkeit und Robustheit ist für die Gewährleistung der Anlagensicherheit von hoher

Priorität. Digitale Leittechnik (DLT) sowie weitere neuartige Unterstützungssysteme finden in modernen Kernkraftwerken zunehmend Verwendung und sind bei fortgeschrittenen Reaktorkonzepten Bestandteil des Designs. Daneben werden auch in laufenden kerntechnischen Anlagen im Zuge von Modernisierungsmaßnahmen analoge durch digitale Systemkomponenten ersetzt oder ergänzt. Die zunehmende Digitalisierung in der Kerntechnik umfasst, insbesondere bei neuen Kernkraftwerken, auch die Sicherheitsleittechnik (SILT) sowie die Anlagenüberwachung und -steuerung (SCADA-Systeme). Den Vorteilen von DLT, beispielsweise der reduzierten Anzahl an Baugruppen sowie der digitalen Signalverarbeitung und -übertragung, stehen dabei Nachteile wie zum Beispiel erschwerte Prüfbarkeit durch hohe Komplexität und Angriffsmöglichkeiten durch externe Dritte gegenüber. Die Entwicklung von Methoden zur Bewertung der Sicherheit und Zuverlässigkeit der DLT-Systeme sowie die Ableitung von Sicherheitsanforderungen für den Einsatz der DLT in der Kerntechnik sind daher international ein vordringliches Forschungsfeld.

Auch die Bedienoberflächen und damit die Schnittstellen zum handelnden Anlagenpersonal ändern sich. Grundsätzlich kann das System „kerntechnische Anlage“ nicht isoliert von menschlichen Einflüssen betrachtet werden, da dem Personal, den Strukturen und Prozessen der Organisation sowie der insgesamt gelebten Sicherheitskultur eine wesentliche Bedeutung für die Anlagensicherheit zukommt. Sicherheitsrelevantes Verhalten des Menschen sowie seine Interaktion mit der Anlage werden daher im Rahmen der Reaktorsicherheitsforschung methodisch analysiert.

In probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA) werden alle wichtigen Informationen über Anlagenauslegung, Betriebsweisen, Betriebserfahrung, Kom-

ponenten- und Systemzuverlässigkeit, menschliche Handlungen sowie anlagenübergreifende Einflüsse analysiert und zu einer Gesamtbewertung für eine Anlage zusammengeführt. Im internationalen Umfeld gewinnt die PSA bei der sicherheitstechnischen Anlagenbewertung und -prüfung zunehmend an Bedeutung. Entsprechend werden die angewandten Methoden kontinuierlich weiterentwickelt. Zudem ergeben sich beispielsweise mit der sicherheitstechnischen Bewertung von neuen Anlagenkonzepten und Anlagen, zu denen (noch) nicht ausreichend Betriebserfahrung vorhanden ist oder die Daten für eine deterministische Analyse nicht im benötigten Ausmaß zur Verfügung stehen, neue Forschungs- und Anwendungsfelder für die PSA. In Bezug auf eine ganzheitliche Anlagenbetrachtung ist zudem die Interaktion von Safety und Security ein bisher methodisch noch nicht vollständig durchdrungenes Forschungsfeld.

FuE-Feld A3.1: Digitale Leittechnik und Unterstützungssysteme

Die Funktionsdichte der Baugruppen, die hohe Komplexität der Systemhard- und -software, eine zunehmende Vernetzung sowie die rasanten technischen Entwicklungsfortschritte stellen eine Herausforderung bei Qualifizierung und Bewertung von DLT dar. Die Entwicklung geeigneter Methoden für eine unabhängige Bewertung ist daher von zentraler Bedeutung. Da der Einsatz von DLT das Risiko der Beeinträchtigung durch Dritte u. a. mittels Malware mit sich bringt, ist die Methodenbereitstellung für die Überwachung der DLT sowie die Bewertung der Resilienz der Leittechnik gegen derartige Angriffe der zweite zentrale Forschungsschwerpunkt. Weitere grundlegende Fragestellungen ergeben sich im Rahmen der Alterung von DLT-Systemen im Lauf des kerntechnischen Betriebs. Zu berücksichtigen ist darüber hinaus der Einfluss des Menschen und dessen Kommunikation mit

dem System mittels moderner Mensch-Maschine-Schnittstellen. Auch Eingriffe bei der Wartung oder Systemupdates müssen betrachtet werden, einschließlich der in der Anlage eingesetzten Unterstützungssysteme. Letztere können beachtliche Datenströme innerhalb, aber auch aus der Anlage heraus generieren und müssen insbesondere in Bezug auf ihre Sicherheit gegen Fremdeinwirkungen bewertet werden.

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- Weiterentwicklung methodischer Ansätze zur Qualifizierung, Zuverlässigkeits- und Sicherheitsbewertung von DLT (z. B. Bewertung vorentwickelter Soft- und Hardwarekomponenten, wiederkehrender Prüfungen) sowie Alterung von DLT-Systemen (z. B. Lebenszyklus DLT, Strahlung)
- Untersuchungen zur Cybersicherheit, Security-Monitoring
- Untersuchung der Sicherheit moderner Operateur-Support-Systeme (z. B. Digital Twins, Live-Datenaustausch mit Notfallzentren)
- Analyse des Einflusses von Human Factors und Mensch-Maschine-Schnittstellen auf Sicherheit und Zuverlässigkeit der DLT

FuE-Feld A3.2: Mensch-Technik-Organisation

Das Anlagenpersonal hat einen wesentlichen Einfluss auf die Sicherheit kerntechnischer Anlagen. Entsprechend ist eine fortgesetzte Analyse und Modellierung der menschlichen Faktoren (HF – *Human Factors*) ein Forschungsschwerpunkt. Neben sozialen Aspekten wie Teambildung, Führungsstil und Unabhängigkeit der Rollen der Mitglieder der Schicht sind auch Faktoren wie z. B.

Entscheidungen unter Unsicherheit oder hohem Stress (z. B. während eines Unfalls) zu betrachten. Auch die Interaktion des Personals mit der Anlage mittels Mensch-Maschine-Schnittstellen ist ein wesentlicher Aspekt. Für neue Reaktorkonzepte können hier neue technische Optionen (z. B. Augmented Reality oder der Einsatz künstlicher Intelligenz) wesentliche Änderungen mit sich bringen. Schließlich ist auch die Organisation selbst mit der dort gelebten Sicherheitskultur ein wichtiger Faktor, zu dessen Charakterisierung und Optimierung Forschungsarbeiten gefördert werden können.

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- Modellierung des menschlichen Faktors und Quantifizierung anhand neu zur Verfügung stehender empirischer Datenquellen
- Analyse des Einflusses sozialer Dynamik auf die Zuverlässigkeit von Personalhandlungen (z. B. Führungsstil, Teambildung)
- Untersuchung der Auswirkungen von Entscheidungen unter Unsicherheit auf die Zuverlässigkeit von Personalhandlungen, Personalhandlungen unter Unfallbedingungen
- Untersuchung der Zuverlässigkeit von Personalhandlungen bei Verwendung moderner Benutzeroberflächen, Mensch-Maschine-Schnittstellen in neuen Reaktoren (z. B. neue Interaktionsmöglichkeiten, Kooperation mit KI-Systemen) sowie Entwicklung methodischer Ansätze zu deren Modellierung
- Entwicklung von Indikatoren in Bezug auf Sicherheitskultur, Unterstützung sicherheitsgerechter Entscheidungsfindung in Unternehmen

FuE-Feld A3.3: Probabilistische Sicherheitsanalyse

Die probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA) beinhaltet Methoden und Werkzeuge zur sicherheitstechnischen Bewertung des Gesamtsystems einer kerntechnischen Anlage. Die Weiterentwicklung dieser Methoden und Werkzeuge soll ausgehend vom erreichten Entwicklungsstand fortgesetzt werden. Dabei sollen Schwerpunkte auf die Berücksichtigung von Personalhandlungen im Zusammenwirken mit dem Systemverhalten, von zeitabhängigen Einflüssen, die Berücksichtigung komplexer Unfallszenarien nach Einwirkungen von innen und außen sowie die Berücksichtigung technischer Neuerungen wie der DLT gelegt werden. Auch auf einen gesamten Standort ausgeweitete Betrachtungen, z. B. unter Berücksichtigung mehrerer Reaktorblöcke, oder die Weiterentwicklung von Prognoseverfahren zur Freisetzung von Radionukliden, können gefördert werden. Vor allem mit Blick ins internationale Umfeld ist darüber hinaus die Ertüchtigung der PSA-Werkzeuge für die Bewertung neuartiger Reaktorkonzepte ein wichtiger Förderschwerpunkt. Aufgrund der zunehmenden Multidimensionalität der PSA wird schließlich Forschungsbedarf zur Bereitstellung effizienter Rechenmethoden unter Nutzung neuer technologischer Optionen (z. B. maschinelles Lernen) gesehen.

In ganzheitlichen Sicherheitsanalysen bisher unterrepräsentiert ist die methodische Erfassung der Wechselwirkungen zwischen Anlagensicherheit (z. B. Störfallbeherrschungs- und Notfallmaßnahmen) und Anlagensicherung (z. B. Zugangsbeschränkungen). Hier sollen methodische Grundlagen geschaffen werden.

Die FuE-Themen im Überblick:

- Weiterentwicklung methodischer Grundlagen zur Durchführung und Bewertung von PSA, z. B. unter Berücksichtigung von Personalhandlungen, Einwirkungen von innen und außen (inkl. Einwirkungskombinationen), technischen Neuerungen (wie DLT) sowie für einen gesamten Anlagenstandort („Site-Level PSA“) mit Berücksichtigung aller Reaktorblöcke („Multi-Unit PSA“)
- Verwendung neuer Ansätze (z. B. Netzwerktheorie, maschinelles Lernen) zur Entwicklung effizienterer Rechenmethoden und Werkzeuge
- Bewertung neuartiger Reaktorkonzepte mittels PSA
- Weiterentwicklung von Werkzeugen zur Prognose von Freisetzung und Ausbreitung von Radionukliden zur Nutzung in Notfallzentren
- Erarbeitung und Weiterentwicklung eines integrierten deterministischen und probabilistischen Bewertungsansatzes für komplexe, zeitlich veränderliche Ereignisabläufe
- Entwicklung von Methoden zur systematischen Identifikation von Schnittstellen und Interaktionen zwischen Sicherheits- und Sicherungsmaßnahmen (Safety-Security-Interaction)

B. Forschungsgebiet verlängerte Zwischenlagerung und Behandlung hochradioaktiver Abfälle

Zum Schutz von Bevölkerung und Umwelt müssen radioaktive Abfälle dauerhaft sicher von der Biosphäre getrennt werden bzw. das Verhalten in der Biosphäre muss bestmöglich bekannt sein (Konzentrationen, Migrationsgeschwindigkeit, Nuklidzusammensetzung etc.). Vor der Verbringung in ein Endlager müssen sie sicher zwischengelagert und für die Endlagerung vorbereitet werden. Neben der Gewährleistung der Sicherheit nach Stand von Wissenschaft und Technik über die gesamte Lagerzeit stehen Untersuchungen zur Entwicklung des Zustandes von Abfällen und Behältern über die verlängerten Lagerzeiträume und deren sicherheitstechnische Auswirkungen im Mittelpunkt des Interesses und können gefördert werden. Die anschließende Vorbereitung der Abfälle für das Endlager wird wesentlich von der Endlagerkonzeption und vom Zustand der Abfälle nach der Zwischenlagerung beeinflusst werden. Daher sollen Methoden zur Zustandsermittlung und Handhabung entwickelt werden. Auch Untersuchungen zur Behandlung von Abfällen mit dem Ziel der sicheren, endlagerechten Konditionierung können gefördert werden. Dabei sind auch Zusammenhänge mit den Forschungsfragen zur Entwicklung von Endlagerbehälterkonzepten in Forschungsgebiet (C) „Endlagerung“ zu berücksichtigen. Schließlich können wissenschaftliche Arbeiten zu neuartigen oder im Ausland betrachteten Behandlungs- und Entsorgungsmethoden ergänzender Gegenstand der Förderung sein.

Die im Forschungsgebiet „Zwischenlagerung und Behandlung hochradioaktiver Abfälle“ geförderten Arbeiten sollen den Stand von Wissenschaft und Technik weiterentwickeln und die Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung in der nuklearen Ent-

sorgung unterstützen. Vorhaben in den folgenden FuE-Bereichen werden gefördert.

FuE-Bereich B1: Verlängerte Zwischenlagerung

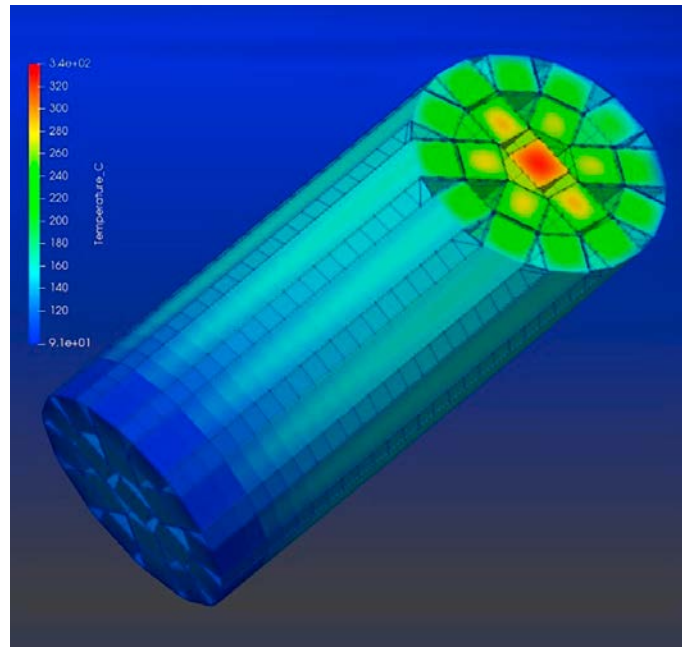
Das Standortauswahlgesetz sieht einen Zeitplan vor, der einen Einlagerungsbeginn nicht vor dem Jahr 2051 vorsieht. Gleichzeitig ist nicht gesichert, dass das Endlager tatsächlich zu diesem Zeitpunkt zur Verfügung stehen wird⁴. An den Einlagerungsbeginn wird sich ein Jahrzehnte währender Einlagerungsbetrieb bis ins nächste Jahrhundert anschließen. Damit ergibt sich die Notwendigkeit einer über die derzeit genehmigten Zeiträume hinausgehenden, verlängerten Zwischenlagerung. Resultierende Fragestellungen hinsichtlich der langfristigen Gewährleistung der Sicherheit einer verlängerten Zwischenlagerung bedürfen einer Fortsetzung und Intensivierung der diesbezüglichen Forschungsarbeiten. Im Fokus stehen dabei die Auswirkungen der verlängerten Zwischenlagerzeiten auf die eingelagerten Abfälle und die Transport- und Lagerbehälter (TLB) sowie die Transportierbarkeit nach der Lagerung. Hierfür sollen im Rahmen der Projektförderung des BMWi eine fundierte Wissensgrundlage und geeignete Bewertungswerkzeuge bereitgestellt werden. Um den Zustand bzw. die Integrität von Abfällen und Behältern nach den zu erwartenden Lagerzeiten hinreichend valide einschätzen zu können, ist die (Weiter-) Entwicklung geeigneter Prognosemodelle und deren experimentelle Absicherung erforderlich. Hierzu sollte auch die Entwicklung von Methoden zur nicht-invasiven Zustandsüberwachung von Behältern und Inventaren weiterverfolgt werden. Einen weiteren Aspekt stellt

⁴ Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfälle: Abschlussbericht – Verantwortung für die Zukunft, ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes, Berlin, Deutschland, August 2016, S. 244 ff.

die Bereitstellung von Methoden und Werkzeugen für das Alterungsmanagement der Zwischenlager und das erforderliche Wissensmanagement dar. Nicht zuletzt sollen sozio-technische Aspekte (Akzeptabilität, Standortfragen, Kompetenzerhalt etc.) einer zu verlängernden Betriebsdauer der Zwischenlager bzw. der Entwicklung möglicher konsolidierter Zwischenlager untersucht werden.

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- Untersuchungen zum Langzeitverhalten der Behälter und deren Komponenten (z.B. Dichtsysteme)
- Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Brennelementen (z.B. Hüllrohr-, Brennstab- bzw. Brennstoffverhalten), insbesondere MOX und hochabgebrannte UOx-Brennstoffe, sowie von sonstigen Behälterinventaren einschließlich defekter Brennstäbe
- Entwicklung von Prognosemodellen (z.B. Erhalt der dichten Umschließung, Integrität der Behälterinventare)
- Untersuchungen zur Transportierbarkeit der Behälter
- Weiterentwicklung von Methoden zur Bewertung der Schutzwirkung der Gebäudestrukturen gegenüber anthropogenen (z.B. Terroranschläge) und natürlichen Einwirkungen (z.B. Extremwetterereignisse)
- Entwicklung von Konzepten, Methoden und Werkzeugen zum Monitoring (z.B. Methoden der nicht-invasiven Behälterüberwachung) und zur Kernmaterialüberwachung (Safeguards) (Schnittstelle zu FuE-Bereich D3)



Visualisierung der Temperaturverteilung im Inneren eines Transport- und Lagerbehälters für hochradioaktive Stoffe (TLB) bei homogener Beladung

FuE-Bereich B2: Abfallbehandlungs- und Konditionierungsoptionen für die Endlagerung

Hochradioaktive Abfälle müssen unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen für die Endlagerung vorbereitet und ggf. konditioniert werden. Hierfür sollen im Rahmen der BMWi-geförderten Forschung die benötigten wissenschaftlichen Grundlagen gelegt werden. Ausgehend von dem zu erwartenden Zustand der hochradioaktiven Abfälle muss untersucht werden, inwieweit diese noch handhabbar sind und mit welchen Einschränkungen der Handhabbarkeit ggf. zu rechnen ist. Zu diesem Zweck sind auch Abfallbehandlungsoptionen bzw. Optionen zur Rekonditionierung mit dem Ziel einer möglichst sicheren, endlagergerechten Konditionierung zu entwickeln. Dies schließt Untersuchungen zu weiterführenden Konditionierungsoptionen, bspw. der Abtrennung und Konditionierung von

Radionukliden mit hoher Relevanz für die Langzeitsicherheit im Endlager (beispielsweise Jod), mit ein.

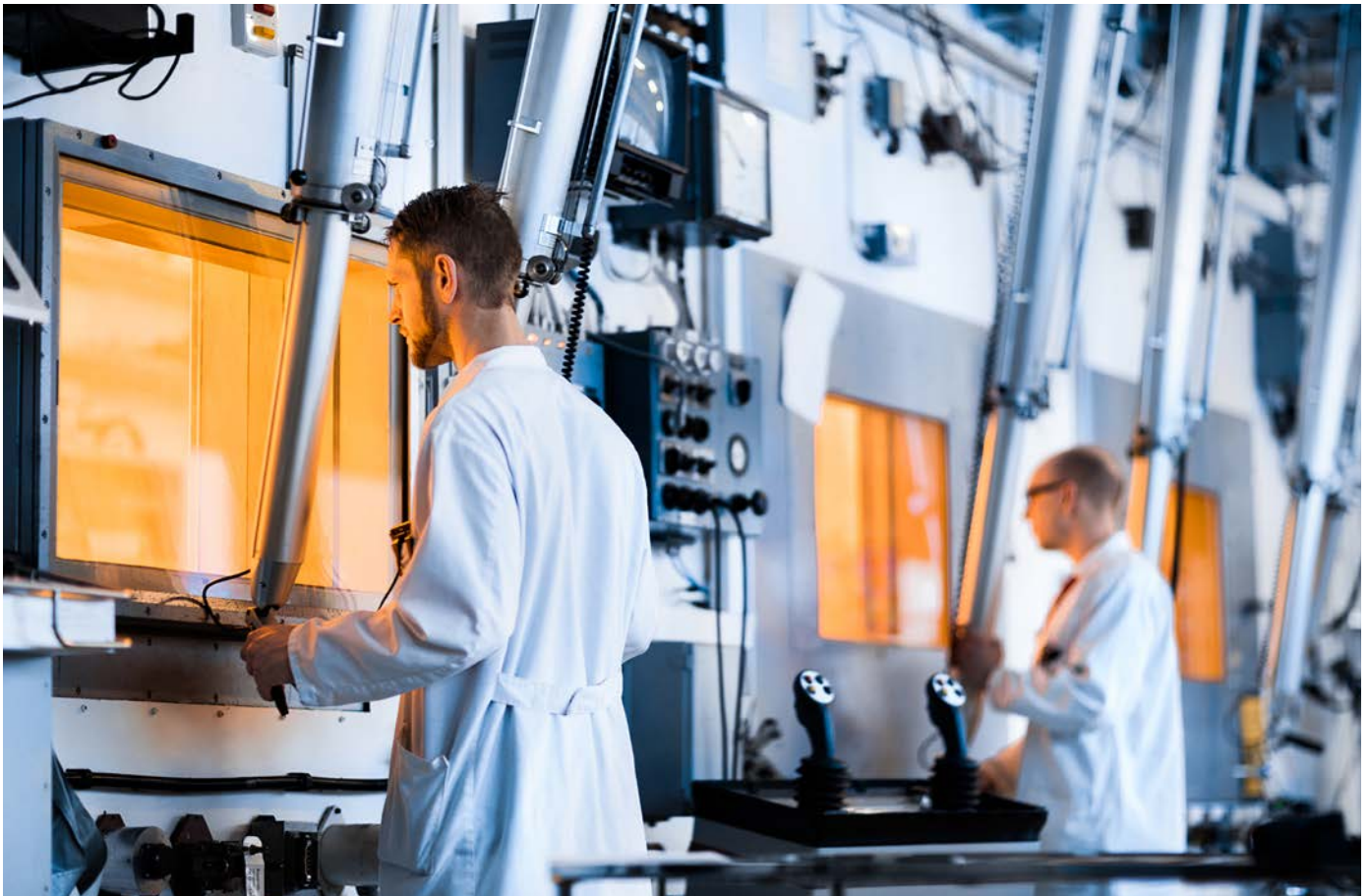
Die **FuE-Themen** im Überblick:

- Entwicklung von Analyseverfahren zur Zustandsermittlung und von Methoden zur Handhabung der Behälterinventare (Handhabbarkeit)
- Methoden und Verfahren zur Re-Konditionierung und Untersuchungen zu TLB-Konzepten (Schnittstelle zu FuE-Bereich C2)

- Untersuchungen zu weiterführenden Konditionierungsoptionen wie insbesondere der Abtrennung und Konditionierung von Radionukliden mit hoher Relevanz für die Langzeitsicherheit im Endlager (z. B. C-14, Cl-36, I-129)

FuE-Bereich B3: Behandlungs- und Entsorgungsmethoden

Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen in einem Endlagerbergwerk ist in Deutschland als Entsorgungsweg politisch beschlossen und im Standortauswahlgesetz



Heiße Zellen der Firma Studsvik in Nyköping, Schweden, die im Rahmen des OECD/NEA-Projektes SCIP IV der Untersuchung des Verhaltens bestrahlter Brennstäbe bei betrieblichen Transienten und Störfällen sowie während Transport und Zwischenlagerung dienen

(StandAG) verankert. Sie stellt aus heutiger Sicht den für die Gewährleistung der notwendigen Einschlusszeiten unverzichtbaren Endpunkt in der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle dar. Unabhängig davon werden im Ausland technologische Entwicklungen und Maßnahmen verfolgt, die diesen Entsorgungspfad beeinflussen könnten und für die in Deutschland anstehenden Entsorgungsaufgaben zu bewerten sind. Auch die Endlagerkommission hebt für die favorisierte Option „Endlagerbergwerk mit Reversibilität“ die hohe Flexibilität zur Nutzung neu hinzukommender Wissensbestände hervor, die ein Umschwenken auf andere Entsorgungspfade über lange Zeit im Prozess ermöglichen. Vor diesem Hintergrund können Forschungsarbeiten zu neuartigen sowie vorgelagerten Behandlungs- und Entsorgungsmethoden und im Ausland präferierten Entsorgungsoptionen sowie zur Bewertung entsprechender Ansätze in Bezug auf ihre ökonomische, technische und ökologische Machbarkeit gefördert werden. Dies schließt die Bewertung und Analyse etwaiger, mit der Umsetzung einhergehender Auswirkungen auf das Endlager sowie sozio-technischer Aspekte mit ein.

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- Beobachtung und ggf. Beteiligung an internationalen Forschungsaktivitäten zu Behandlungs- und Entsorgungsmethoden sowie im Ausland präferierten Entsorgungsoptionen mit dem Ziel, methodische Grundlagen, die einen Beitrag zur nuklearen Entsorgung in Deutschland leisten könnten, zu untersuchen
- Identifizierung von Optionen und Bewertung der Machbarkeit neuartiger Behandlungs- und Entsorgungsansätze (ökonomisch, technisch und ökologisch), auch unter Verwendung von Simulationen und Experimenten

C. Forschungsgebiet Endlagerung

Die in den vergangenen Jahrzehnten durch die Bundesregierung geförderte Endlagerforschung hat wesentlich dazu beigetragen, die wissenschaftlich-technischen Grundlagen für zukünftige Endlagerkonzepte und Sicherheitsnachweise zu schaffen. Deutschland verfügt über eine thematisch umfassende und gut abgesicherte wissenschaftliche Basis sowie über eine Reihe international anerkannter Forschungsstellen auf dem Gebiet der Endlagerung. Deren konsequente Beobachtung und Mitgestaltung relevanter Entwicklungen im Rahmen internationaler Kooperationen trägt wesentlich zu dem erzielten fortschrittlichen Stand bei. Im Hinblick auf die Standortsuche wird aktuell in Deutschland parallel zu den verschiedenen Wirtsgesteinsoptionen Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein geforscht. Zudem wird die Mitwirkung in mehreren internationalen Untertagelabors in verschiedenen Wirtsgesteinen intensiviert.

Die unabhängige und fachlich breit angelegte Forschungs- und Entwicklungstätigkeit dient der Bereitstellung der wissenschaftlichen Grundlagen in Deutschland für die Entsorgung radioaktiver Abfälle. Sie entwickelt damit den Stand von Wissenschaft und Technik kontinuierlich weiter und dient überdies dem perspektivischen Kompetenzerhalt wie auch der Nachwuchsförderung für die Langfristaufgabe der sicheren Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland. Aktivitäten zur Umsetzung von Einzelfalllösungen im standortbezogenen Verfahren fallen in den Zuständigkeitsbereich der Vorhabenträgerin.

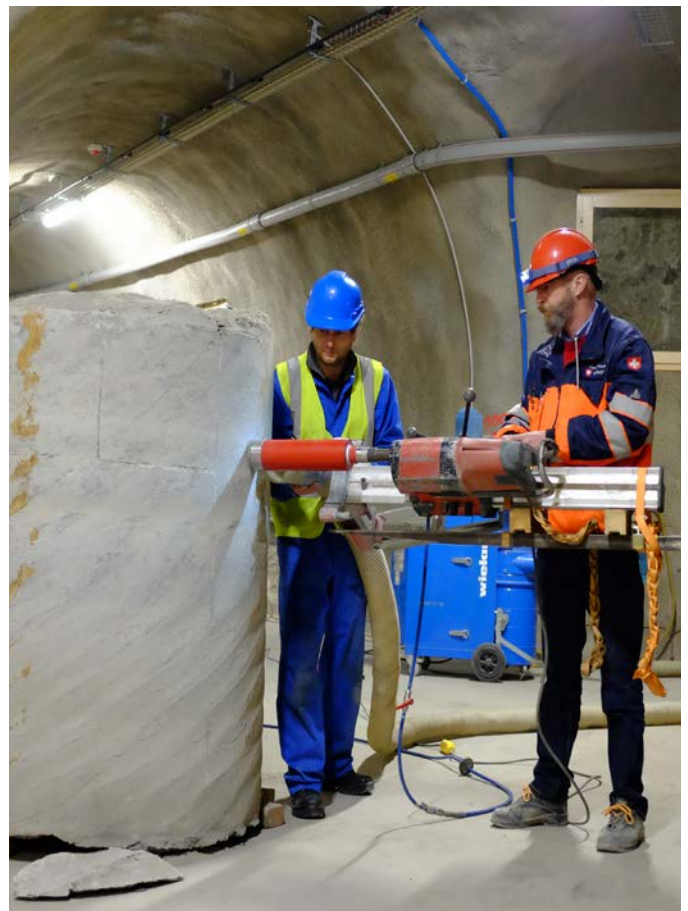
FuE-Bereich C1: Standortauswahl

Das BMWi fördert die Erarbeitung und fortlaufende Verbesserung der wissenschaftlichen Grundlagen zur Auswahl von Endlagerstandorten. Dazu zählen innovative Methoden der Standorterkundung sowie

Verfahren und Methoden zur Charakterisierung des an potenziellen Standorten vorzufindenden Geosystems. Auch grundlegende methodische Arbeiten zur Schaffung der wissenschaftlichen Basis eines Standortvergleichs können gefördert werden.

FuE-Feld C1.1 Geowissenschaftliche und geotechnische Methoden zur Standorterkundung (Feld und Labor)

Die Entwicklung geowissenschaftlicher und geotechnischer Methoden zur Standorterkundung sollte den Stand von Wissenschaft und Technik berücksichtigen und Grundlagen zu einem fundierten Standorterkundungs- und -auswahlpro-



Entnahme einer Tonsteinprobe aus einem Großbohrkern

gramm bereitstellen, das auf die Endlagersicherheit ausgerichtet ist. Bereits in einer frühen Phase der Standorterkundung und Endlagerplanung ist der geowissenschaftliche Informationsbedarf für die Sicherheitsbewertung zu identifizieren. Diesem Ansatz folgend ist die Charakterisierung der geologischen Barriere bezüglich ihrer Stabilität, Prognostizierbarkeit, ihrer Einschluss- bzw. Rückhaltepotenziale und ihrer Wechselwirkungen mit technischen und geotechnischen Komponenten vorzunehmen, um letztlich zur Bewertung der Wirksamkeit des gesamten Barrierensystems zu gelangen. Vermehrt werden zerstörungsfreie Verfahren betrachtet, deren Tauglichkeit und Einsatzreife im Labor und im Feldversuch nachzuweisen sind.

FuE-Themen sind die Überprüfung vorhandener Methoden hinsichtlich der genannten Zielsetzung, die Erarbeitung wissenschaftlicher Beiträge für die ggf. erforderliche Weiterentwicklung grundsätzlich geeigneter sowie für die Entwicklung innovativer und zerstörungsfreier Methoden zur Standorterkundung in den Bereichen:

- Geologie und Mineralogie
- Geophysik (Methoden zur Standorterkundung über und unter Tage)
- Hydrogeologie und Hydrogeochemie
- Felsmechanik

FuE-Feld C1.2 Charakterisierung des Geosystems und Geosynthese

Die grundlegenden Methoden und Verfahren zur Charakterisierung von Geosystemen und zur Gewinnung von Informationen über deren Genese und die historische Entwicklung sind vorhanden.



Geologische Feldarbeit zur Charakterisierung der Eigenschaften eines Tongesteins in einem Steinbruch

Im Kontext der Endlagerung radioaktiver Abfälle stehen die Weiterentwicklung und Verbesserung dieser methodischen Ansätze und etablierten Verfahren im Fokus, die hinsichtlich der sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Geosystems besondere Bedeutung haben und schließlich zu einer ganzheitlichen Beschreibung, Dokumentation und Interpretation aller sicherheitsrelevanten geowissenschaftlichen Informationen zu einem Standort in einer für Sicherheitsbewertungen angemessenen Weise (Geosynthese) führen.

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- Weiterentwicklung der Verfahren zur Modellierung des Geosystems (z. B. Skalentransfer, Übertragbarkeit, Visualisierung der Ergebnisse)
- Weiterentwicklung der Methoden der Genesemodelle

FuE-Feld C1.3 Methodische Grundlagen eines Standortvergleichs

Als grundlegende methodische Arbeiten zur Schaffung der wissenschaftlichen Basis eines Standortvergleichs können Entscheidungs- oder Prüfkriterien, die im Zuge der Standortfestlegung zur Anwendung kommen, untersucht und Grundlagen für die Definition weiterer Kriterien entwickelt werden. Der Vergleich von Endlagersystemen an unterschiedlichen Standorten und ggf. mit verschiedenen Sicherheitskonzepten in unterschiedlichen Wirtsgesteinen erfordert ein wissenschaftlich abgesichertes und methodisch nachvollziehbares Verfahren. Dies gilt insbesondere angesichts möglicher Zielkonflikte und einer Vielzahl von Kriterien.

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- Untersuchung vorliegender Kriterien und Erarbeitung der methodischen Grundlagen zur Empfehlung weiterer Kriterien (inkl. Prüfkriterien für die untertägige Erkundung) für die Standortsuche
- Erarbeitung wissenschaftlicher und methodischer Grundlagen für den Vergleich von Endlagersystemen

FuE-Bereich C2: Sicherheits- und Endlagerkonzepte; Endlagertechnik und (geo-)technische Barrieren

Die Forschung und Entwicklung zu Sicherheits- und Endlagerkonzepten sowie zu Endlagertechniken und geotechnischen Barrieren umfasst konzeptionelle und methodische Arbeiten bis hin zu wissenschaftlichen Grundlagen für die Entwicklung von Endlagerreferenzkonzepten in den drei für Deutschland relevanten Wirtsgesteinstypen. Dabei werden die jeweils erforderliche Bergbautechnik, Bautechnik und die spezifischen Abfallformen und Behälterkonzepte sowie die Anforderungen zur Rückholbarkeit und zur Ermöglichung einer Bergung berücksichtigt. Methodische Untersuchungen zur Endlagertechnik werden im Wesentlichen Analogie- und Machbarkeitsuntersuchungen beinhalten. Verfüll- und Verschlusskonzepte beinhalten auch die Konzeption geotechnischer Barrieren, die hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit und Funktionalität in geeigneten Demonstrationsversuchen zu untersuchen sind. Beim Thema Monitoring liegt das Augenmerk auf Entwicklung und Erprobung störungs- und ausfallfrei arbeitender Überwachungs- und messtechnischer Methoden für die Phasen bis zum Verschluss des Endlagers sowie auf der Entwicklung von Konzepten und Methoden für eine intelligente und zuverlässig betreibbare zeitlich begrenzte Standortüberwachung nach Verschluss.

FuE-Feld C2.1 Sicherheits- und Endlagerkonzepte

Ein Sicherheitskonzept beschreibt, wie die Sicherheit im Endlager beim Bau, beim Betrieb, beim Verschluss und danach erreicht und gewährleistet werden soll. Endlagerkonzepte sind so zu entwickeln, dass sie die Anforderungen, die sich aus dem Sicherheitskonzept ergeben, erfüllen. Aufbauend

auf Erfahrungen bei der Entwicklung einiger generischer Sicherheits- und Endlagerkonzepte sind insbesondere für die Wirtsgesteine Tongestein und Kristallingestein dazu weitere Entwicklungsarbeiten erforderlich. Mit Blick auf die Vielzahl möglicher Endlagerkonzepte für die drei potenziellen Wirtsgesteine in Deutschland und den schon begonnenen Standortauswahlprozess rücken methodische Fragen zur Priorisierung von Endlagerkonzepten und zur zuverlässigen Entscheidungsfindung in den Vordergrund. Dieses FuE-Feld umfasst auch die Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von digitalen Verfahren und Informationssystemen (z.B. Building Information Modeling) bei der Konzeptentwicklung und -findung.

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- Weiterentwicklung generischer Sicherheits- und Endlagerkonzepte für die drei Wirtsgesteinstypen (inkl. Endlagerauslegung, Bergbau- und Bautechnik, Ausbau, Behälterkonzepte, Abfallformen etc.) unter Berücksichtigung der Themen Rückholbarkeit und Ermöglichung einer Bergung sowie Wirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten
- Methodenentwicklung zur Priorisierung und Auswahl von Endlagerkonzepten
- Untersuchungen zur Anwendbarkeit von Methoden der Digitalisierung relevanter Daten und Informationen und Bauwerksdatenmodellierung (Building Information Modeling, BIM) im Bereich der Planung über- und untertägiger Komponenten des Endlagers
- Forschung zur Anwendbarkeit digitaler Leitetchnik auf Endlagerbergwerke
- Untersuchung möglicher Konzepte für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen alternativ zur Endlagerung in einem Bergwerk

FuE-Feld C2.2 Endlagertechnik

Weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zielen auf die Entwicklung der in generischen Endlagerkonzepten vorgesehenen technischen Systeme und Komponenten zum Transport, zur Handhabung und Einlagerung von radioaktiven Abfällen. Dabei ist auf die technische und qualitätsgesicherte Realisierbarkeit der Endlagerung hinzuwirken. Konzepte für Demonstrationsversuche sind zu entwickeln. Dabei sind auch alternative und innovative Ansätze für Endlagersysteme vor auszudenken und zu berücksichtigen. Im Kontext der Sicherheits- und der Nachweiskonzepte sind technische Lösungsansätze für die Endlagerung weiterzuentwickeln und ggf. zu testen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sollen die Vorhabenträgerin in die Lage versetzen, die technische Umsetzung im konkreten Endlagerprojekt auf breiter und gut abgesicherter wissenschaftlicher Grundlage zu realisieren.

FuE-Themen sind methodische Untersuchungen zu:

- Transport- und Handhabungstechnik
- Einlagerungs- und Rückholungstechnik
- Verfüll- und Verschlusstechnik
- Betrieblicher Sicherheitstechnik
- Technischer Realisierbarkeit/Konzepten für Demonstrationsversuche

FuE-Feld C2.3 Geotechnische und technische Barrieren

Wesentliche Voraussetzungen für den langfristig sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle im Endlager sind neben dem integren Barrieregestein die bestimmungsgemäße Funktion der technischen und geotechnischen Barrieren über den ihnen zugewiesenen Funktionszeitraum. Geotechnischen Barrieren werden je nach Wirtsgestein und Sicherheitskonzept unterschiedliche Funktionen zugewiesen. Weitere FuE-Arbeiten zum Integritätsnachweis von geotechnischen Barrieren können Beiträge

leisten, um z. B. die Funktionsweise von als Versatz fungierendem Salzgrus oder Sorelbeton in einem salinaren Wirtsgestein oder des Buffermaterials Bentonit in kristallinem Wirtsgestein oder Ton/Tonstein und den Einfluss von Gasdrücken auf geotechnische Barrieren hinreichend genau beschreiben zu können. Untersuchungen im Labor sind letztlich fallweise durch großmaßstäbliche Demonstrationsversuche zu ergänzen. Im Rahmen der Projektförderung können wissenschaftliche Beiträge zu Behälterkonzepten und -materialien, die im Endlagersystem auch eine Funktion als wesentliche technische Barriere übernehmen können, erarbeitet werden.



Bohranlage für Großbohrlöcher (120 cm Durchmesser) zur Erforschung von Verschlusselementen für Endlagerschächte nach dem Sandwich-Prinzip

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- Wissenschaftliche Grundlagen zur Funktion, Konzept und Planung geotechnischer Barrieren
- Untersuchungen zu Material und an Komponenten von Barriersystemen, einschließlich zu Prozessen der Radionuklidrückhaltung durch geotechnische Barrieren (Schnittstelle zu FuE-Feld C3.1)
- Erforschung und Entwicklung von Behälterkonzepten und Behältermaterialien, die im Endlagersystem auch eine Funktion als wesentliche technische Barriere übernehmen können
- Überprüfung und Nachweis der Funktionalität (insbesondere Radionuklidrückhaltevermögen) und technischen Realisierbarkeit unter anderem durch Demonstrationsversuche

FuE-Feld C2.4 Monitoring

Die erfolgreiche Umsetzung eines Endlagerprogramms stützt sich sowohl auf eine technisch fundierte Sicherheitsstrategie als auch auf Akzeptanz und Vertrauen von Seiten der Interessengruppen. Monitoring gilt als Schlüssel, um beiden Aspekten gerecht zu werden. Monitoring kann zum allgemeinen Verstehen der Endlagerabläufe und zur Vertrauensbildung in die prognostizierte Endlagerentwicklung beitragen. Ein Monitoring liefert nützliche Informationen für einen sicheren Betrieb in den verschiedenen Phasen einer Endlagerentwicklung sowie für die Verifizierung der im Vorfeld durchgeführten Langzeitsicherheitsanalyse. Ferner stellen Monitoring-Ergebnisse eine Unterstützung für die Entscheidungen dar, die in den verschiedenen Phasen eines Endlagerprogramms zu fällen sind. Beim Monitoring liegt deshalb das Augenmerk auf der Entwicklung von Konzepten und Systemen so-

wohl für eine zuverlässige Umgebungsüberwachung als auch für ein effizientes und technisch sinnvolles Monitoring der Funktion des Endlagersystems inklusive transparenter Ergebnisbewertung. Auch hierfür können im Rahmen der Projektförderung Beiträge erarbeitet werden.

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- Konzepte für ein Monitoring des Standorts bzw. der Funktion des Endlagersystems vor und während der Errichtung, während des Betriebs und nach Verschluss des Endlagers inkl. Datenmanagement (Schnittstelle zu FuE-Feld D1.1)
- Methoden zum Umgang mit Ungewissheiten in Monitoringsystemen auch im Hinblick auf mögliche Änderungen des Endlagerprozesses
- Konzeption und wissenschaftliche Beiträge zur Entwicklung wartungsfreier ausfallsicherer Monitoring-Systeme

FuE-Bereich C3: Sicherheitsnachweis

Die Förderung wissenschaftlicher Arbeiten zur Entwicklung des Instrumentariums zum Sicherheitsnachweis umfasst alle nicht auf ein konkretes Endlagerprojekt bzw. einen Endlagerstandort ausgerichteten grundlegenden Arbeiten, die für die Realisierung eines Sicherheitsnachweises erforderlich sind. Dazu sind experimentelle Arbeiten zur Untersuchung sicherheitsrelevanter Phänomene und Prozesse zu zählen, die im Endlagersystem auftreten und sich gegenseitig beeinflussen können. Auf Basis dieser Erkenntnisse können prozessbeschreibende thermische, hydraulische, mechanische, chemische und eventuell auch (mikro-) biologische (ggf. gekoppelte) Modelle (THMCb) entwickelt und Codes auf der Teilsystem- bzw.

Prozessebene (so genannte „process level codes“) bereitgestellt und qualifiziert werden. Die Methodik zur Führung von Sicherheitsnachweisen ist dem fortschreitenden Stand von Wissenschaft und Technik anzupassen bzw. weiterzuentwickeln, wobei die Wechselwirkungen von betriebssicherheitlichen und langzeitsicherheitlichen Aspekten angemessen zu berücksichtigen sind. Die Methoden und Rechenprogramme für Sicherheitsanalysen sind ebenfalls an den fortschreitenden Stand von Wissenschaft und Technik anzupassen. Soweit zielführend, ist die Befassung mit natürlichen oder anthropogenen Analoga vorzusehen.

FuE-Feld C3.1 Thermische, hydraulische, mechanische, chemische und (mikro-)biologische (THMCb-)Phänomene und Prozesse sowie deren Modellierung

Ein vertieftes Verständnis zu und die Entwicklung von Modellen zur Simulation sicherheitsrelevanter gekoppelter THMCb-Prozesse stellt die Grundlage für Sicherheitsanalysen bzw. Sicherheitsbetrachtungen sowie damit auch von Sicherheitsaussagen zu Endlagersystemen dar. Gegenstand dieses FuE-Feldes sind die Vertiefung des Prozessverständnisses sowie die Identifikation sicherheitsrelevanter Phänomene und Prozesse auf der Basis von Experimenten und Modellen.

Die **FuE-Themen** im Überblick:

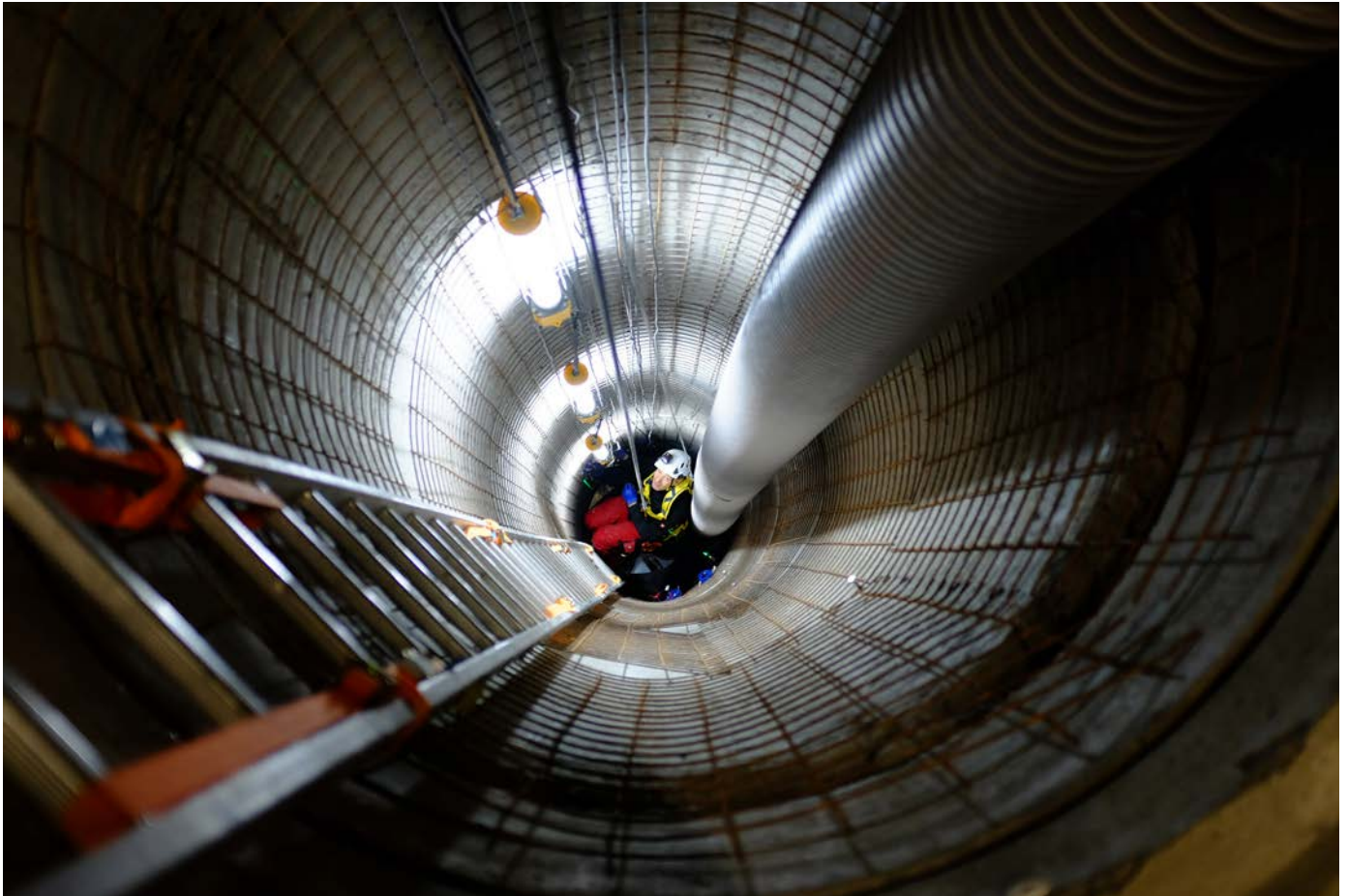
- Weiterentwicklung des Verständnisses zu den im Endlagersystem und der Biosphäre ablaufenden thermischen, hydraulischen, mechanischen, chemischen und biologischen (THMCb-)Prozessen und ihrer Kopplung
- Entwicklung prozessbeschreibender Modelle und von process level codes (Skaleneinfluss – upscaling) sowie deren Qualifizierung
- Weiterentwicklung der THMC-gekoppelten physikalisch-mathematischen Modelle (Multi-physics) für den Integritätsnachweis
- Entwicklung und Realisierung von THMCb-Demonstrationsexperimenten (Feld und Labor)

FuE-Feld C3.2 Methodische Grundlagen der Nachweisführung

In den vergangenen Jahrzehnten wurden die Grundlagen zur Führung eines Sicherheitsnachweises für Endlagersysteme in den in Deutschland in Betracht kommenden Wirtsgesteinen erarbeitet. Diese methodischen Ansätze sind im permanenten Austausch mit der internationalen Forschungsgemeinschaft dem fortschreitenden Stand von Wissenschaft und Technik anzupassen und anforderungsgerecht weiterzuentwickeln. Dazu zählt die Entwicklung von Funktions- und Verhaltensindikatoren entsprechend der OECD/NEA-Nomenklatur. Derartige Indikatoren lassen Aussagen zu wesentlichen sicherheitsrelevanten Aspekten des betrachteten Endlagersystems zu und können damit sicherheitsgerichtete Vergleiche unterstützen. Für das Verständnis von in der Geosphäre ablaufenden Prozessen, bei denen große räumliche Dimensionen, komplexe heterogene Geologie und vor allem lange (geologische) Zeiträume von Bedeutung sind, sowie zur Beurteilung der Relevanz der wesentlichen Prozesse sowie der Plausibilität und Realitätsnähe der Modellannahmen kann das Studium von natürlichen oder auch anthropogenen Analoga eine wertvolle Unterstützung im Sicherheitsnachweis sein.

Die **FuE-Themen** beinhalten Weiterentwicklungen in den Bereichen:

- Nachweiskonzepte
- Methodik der Szenarienentwicklung



Aufbau eines In-situ-Versuchs in einem Großbohrloch im Felslabor Mont Terri (Schweiz) im Rahmen des Verbundprojekts Sandwich-HP zur Endlagerforschung

- Methodik zum Umgang mit Ungewissheiten
- Methodik zur Bewertung der Robustheit des Sicherheitsnachweises
- Funktions- und Verhaltensindikatoren entsprechend der OECD/NEA-Nomenklatur und ihre Nutzung in Sicherheitsuntersuchungen und beim Vergleich von Endlagersystemen
- Methoden zur Festlegung und Charakterisierung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs
- Methoden zur Festlegung der wesentlichen Barrieren (für Endlagersysteme, für die kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann) sowie zur Bewertung ihrer Wirksamkeit
- Natürliche und anthropogene Analoga sowie weitere unterstützende Elemente des Sicherheitsnachweises
- Methoden zur Bewertung der Wechselwirkung von Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit

FuE-Feld C3.3 Werkzeuge der Sicherheitsanalysen

Eine Umsetzung der in FuE-Feld C3.2 erarbeiteten Methoden zur Führung eines Sicherheitsnachweises bedarf der Entwicklung von geeigneten Werkzeugen für die Sicherheitsanalyse sowie für die numerische Simulation mit Rechenprogrammen. Zu berücksichtigen sind dabei Sicherheitsanalysen während der Betriebsphase und nach Verschluss des Endlagers (Langzeitsicherheitsanalysen). Die Rechenprogramme der Sicherheitsanalysen sind dem fortschreitenden Stand von Wissenschaft und Technik anzupassen und müssen daher vor allem eine hohe Modularität der Programmstruktur und eine hohe Flexibilität gegenüber neuen fachlichen Erkenntnissen (funktionalen Anforderungen) als auch nicht funktionalen Anforderungen (Robustheit, Anwendbarkeit, Ressourcenverbrauch etc.) aufweisen.

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- Weiterentwicklung und Aktualisierung der Methoden und Rechenprogramme für Sicherheitsanalysen für die Betriebsphase
- Aktualisierung, Weiterentwicklung und weitere Qualifizierung der Methoden und Rechenprogramme für Langzeitsicherheitsanalysen einschließlich der Analyse für Ungewissheiten
- Weiterentwicklung und Aktualisierung der Methoden des Sicherheitsmanagements unter Berücksichtigung der Aspekte der menschlichen Zuverlässigkeit

D. Querschnittsfragen

FuE-Bereich D1: Wissens- und Kompetenzmanagement

Die lange Zeitspanne bis zur Einlagerung hochradioaktiver Abfälle und des Verschlusses eines Endlagers wirft Fragen hinsichtlich der erforderlichen Methoden und Instrumente des Wissensmanagements auf. Der langfristige Erhalt von Daten und Wissen, die Verfügbarkeit von fachlich qualifiziertem Personal sowie von geeigneten Methoden des Wissenstransfers sind zu gewährleisten. Dies gilt grundsätzlich für sämtliche Wissens- und Kompetenzgebiete in der nuklearen Sicherheit, denn der Ausstieg aus der Nutzung der Kernkraft in Deutschland darf nicht gleichbedeutend sein mit einem „Ausstieg“ aus den sicherheitsgerichteten kerntechnischen Kompetenzen. Wissenschaftliche Untersuchungen können zur Überprüfung und Entwicklung geeigneter Methoden und Verfahren für Wissensmanagement, Kompetenzerhalt, die Kompetenzentwicklung und die Vermittlung komplexer Sachverhalte beitragen.

FuE-Feld D1.1 Methoden und Instrumente des Wissens- und Kompetenzmanagements

Für eine langfristige Gewährleistung der nuklearen Sicherheit ist es erforderlich, für mögliche Zukunftsszenarien die Informationen und das Wissen darüber, wie das Sicherheits-, das Anlagen- und das Endlagerkonzept sowie die Auslegungskriterien festgelegt wurden („Know-why“ und „Know-how“), für eine bestmögliche Entscheidungsgrundlage lebendig zu erhalten und weiterzugeben. Auch für den Erhalt des Wissensstandes bei personeller Fluktuation ist ein entsprechendes Wissensmanagement erforderlich. Aus diesen Anforderungen entsteht Forschungsbedarf dahingehend, welches Wissen konkret festzuhalten ist, wie Wissen erhalten, weiterentwickelt und gepflegt wird und wie es an andere

Personen möglichst effizient weitergegeben werden kann. Kritisch wäre ein Verlust von Wissen, welches für mögliche Zukunftsszenarien unerlässlich ist.

Verfahren der künstlichen Intelligenz können hier neue Möglichkeiten der Wissenserfassung und -aufbereitung eröffnen, die gerade bei den umfangreichen und komplexen Betrachtungen zur nuklearen Sicherheit aussichtsreiche Möglichkeiten ergeben, Wissensmanagement ohne Wissensverlust zu betreiben. Darüber hinaus sind Verfahren zur effektiven Vermittlung dieses Wissens zu entwickeln. Moderne digitale Lernsysteme, die neben Faktenwissen auch Erfahrungswissen sowie komplexe Wechselwirkungen im System vermitteln können, können dazu den Einstieg darstellen.

Kompetenzen umfassen das Wissen über Ursachen und Lösungen und die Fähigkeit zur kompetenten Anwendung des Wissens auch auf neue Herausforderungen. Neben dem Aspekt des Wissensmanagements stehen Forschungsfragen im Vordergrund, wie das Wissen umgesetzt werden kann und wichtige Kompetenzen für kritische Szenarien aufgebaut werden können, beispielsweise durch Szenarientechniken mit Hilfe digitaler Systeme.

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- Methoden zu Erwerb, Entwicklung, Speicherung/Aufbewahrung, Pflege, Nutzung und Verteilung/Transfer von Informationen inklusive Methoden zum langfristigen Informations- und Datenerhalt
- Entwicklung von Methoden des Wissenstransfers von Faktenwissen (und Erfahrungswissen), insbesondere zu den Gründen, aus denen bestimmte Entwicklungslinien nicht weiterverfolgt worden sind („Know-why“)

- Entwicklung von Anforderungen und Methoden zur effizienten Kompetenzentwicklung (Bezug zu allen FuE-Bereichen)
- Entwicklung von Anforderungen und Methoden zur Vermittlung von Erfahrungswissen („Know-why“ und „Know-how“)

FuE-Bereich D2: Sozio-technische Fragestellungen

Dieser FuE-Bereich adressiert inter- und ggf. transdisziplinäre Forschung zu Themen an der Schnittstelle von Technik und Gesellschaft in der nuklearen Sicherheit. Dabei können u. a. sozio-technische Fragestellungen der verlängerten Zwischenlagerung und zu Methoden der Behandlung und Entsorgung von radioaktiven Abfällen betrachtet werden. Die Gesellschafts- und Sozialwissenschaften sind ebenso wie naturwissenschaftlich-technische Disziplinen Bestandteil dieser inter- und transdisziplinären Forschung, welche eine über die einzelnen Disziplinen reichende unterstützende Wirkung im gesellschaftlichen Umfeld erzielen kann.

FuE-Feld D2.1 Long-Term Governance

Aufgrund der generationenübergreifenden Zeiträume und für die Fortsetzung der nuklearen Entsorgungspolitik (nach StandAG und den Empfehlungen der Endlagerkommission) kommt der Erforschung von Koordinations- und Kooperationsprozessen für die langfristige Governance eine besondere Bedeutung zu. Forschungsarbeiten sollen in diesem Zusammenhang zur Klärung beitragen, wie eine Governance ausgestaltet werden kann, um mit dem Ziel angemessener gesellschaftlicher Verteilung von Nutzen und Lasten eine langfristige Partizipation mit verbindlichen Festlegungen der Akteure (Expertenkommissionen,

akademischer Wissenschaft und Nichtspezialisten) in allen Phasen des Entsorgungspfades zu gewährleisten. Interdisziplinarität ist erforderlich, um langfristige technische und prozessuale Konsequenzen von Entscheidungen in einer reversiblen Entsorgungsstrategie (Pfadabhängigkeiten) zu identifizieren und zu bewerten. Ethische Gesichtspunkte im Hinblick auf die Entsorgung können Fragen der distributiven Gerechtigkeit unter negativen Bedingungen und der gerechten Verteilung von Projektnutzen und -lasten beinhalten.

FuE-Themen sind:

- Pfadabhängigkeit, Technologie und reversibler Prozess
- Long-Term Governance und Reversibilität im selbst hinterfragenden System
- Prozedurale und distributive Gerechtigkeit in den Phasen des Entsorgungspfades
- Kompensationen und Anreize
- Monitoring im Kontext der Partizipation
- Sozio-technische Aspekte von Abfallbehandlungs- und Konditionierungsoptionen

FuE-Feld D2.2 Sicherheitskultur und Mechanismen der Fehlerkorrektur im selbst hinterfragenden System

Es besteht Forschungsbedarf im Hinblick auf die Frage, welche Anforderungen an die Sicherheits- und Fehlerkultur der beteiligten Institutionen und möglicher partizipativer Foren/Gremien zu stellen sind und mit welchen Methoden diese Anforderungen umzusetzen sind. Darüber hinaus ergibt sich im gesellschaftlichen Prozess der Standortaus-

wahl für ein Endlager eine besondere Herausforderung hinsichtlich der Erhöhung der Akzeptabilität von Ergebnissen von Sicherheitsuntersuchungen und des Sicherheitsmanagements.

FuE-Themen sind:

- Mechanismen der Selbsthinterfragung (in Organisationen, über Organisationsgrenzen hinaus, in der Gesellschaft)
- Wechselwirkung von Sicherheitskultur und Sicherheitskonzepten (Schnittstelle zu FuE-Feld C2.1)
- Wechselwirkungen zwischen technischen Prozessen und soziokulturellen Anforderungen
- Bewertung der Wirksamkeit von Organisationen und deren Prozessen im Hinblick auf die Anforderungen der Sicherheitskultur im Bereich der nuklearen Sicherheit
- Entwicklung einer Methodik zur zuverlässigen Planung und Entscheidung bzgl. menschlicher Einflüsse auf die Auslegung technischer Anlagen

FuE-Feld D2.3 Multi-kriterielle Entscheidungsprozesse

Wissenschaftliche Untersuchungen können dazu beitragen, im Rahmen des Standortauswahlverfahrens relevante nicht-technische Kriterien sinnvoll abzuwägen, multi-kriterielle Entscheidungen möglichst transparent und nachvollziehbar zu treffen und mögliche Konflikte und Entscheidungsblockaden zu verhindern und aufzulösen, wenn in diesen Entscheidungsprozessen ethische, sozialwissenschaftliche, technische und naturwissenschaftliche Aspekte integriert werden müssen (Schnittstelle zu FuE-Feld C1.3).

FuE-Themen sind Untersuchungen zu:

- Abwägung anhand inkommensurabler (nicht vergleichbarer) Kriterien
- Fragen der Akzeptabilität und ethischer Aspekte auch im Hinblick auf verlängerte Zwischenlagerung und Methoden zur Behandlung und Entsorgung von radioaktiven Abfällen
- Transparenz und Nachvollziehbarkeit komplexer Entscheidungsprozesse
- Konfliktlösung und Auflösung von Entscheidungsblockaden

FuE-Bereich D3: Kernmaterialüberwachung (Safeguards)

Die Kernmaterialüberwachung in Deutschland soll sicherstellen, dass kein Kernmaterial aus den Anlagen für unzulässige, nicht deklarierte Zwecke abgezweigt wird. Die Förderung von Arbeiten zur Kernmaterialüberwachung umfasst konzeptionelle und methodisch-technische FuE, um den Betreiber, die Euratom und die IAEA dahingehend zu unterstützen, dass beispielsweise die in das Endlager verbrachten Kernmaterialien ihrer Deklaration gegenüber IAEA und Euratom entsprechen und in diesem Endlager verbleiben.

FuE-Feld D3.1 Konzepte zur Kernmaterialüberwachung

Wissenschaftliche Untersuchungen können dazu beitragen, unter Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen zur Rückholbarkeit und Ermöglichung einer Bergung die Auswirkungen von Safeguards-Maßnahmen auf Betrieb und Langzeitsicherheit eines Endlagers besser zu ver-

stehen und Konzepte zu entwickeln, um die Anwendung von Safeguards bereits bei Auslegung (Design) und Bau der Anlagen zu berücksichtigen.

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- Wissenschaftliche Beiträge zur Fortschreibung der Safeguards-Konzepte für unterschiedliche Endlagerkonzepte (unter Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen zur Rückholbarkeit und Ermöglichung einer Bergung; „Safeguards-by-Design“)
- Untersuchung der Auswirkungen von Safeguardsmaßnahmen auf Betrieb, Langzeitsicherheit und Sicherung eines Endlagers (3S-Konzept: Safety-Security-Safeguards, „3S-by-Design“)

FuE-Feld D3.2 Methoden und Techniken zur Kernmaterialüberwachung

Zur Kernmaterialüberwachung eines geologischen Endlagers können wissenschaftliche Beiträge zu Methoden und Techniken geleistet werden, die vor und während der Errichtung, während des Betriebs und nach Verschluss des Endlagers sowie im Falle einer Rückholung eine weitgehend automatisierte Überwachung über einen längeren Zeitraum mit minimalem Wartungsaufwand ermöglichen und strenge Systemspezifikationen und -standards erfüllen.



Messung von Uranhexafluorid durch eine Safeguardsinspektorin – URENCO

Die **FuE-Themen** im Überblick:

- Methoden zu Einschluss und Überwachung während des Betriebs und nach Verschluss des Endlagers
- Methoden zur Überprüfbarkeit der Grubengebäude während Errichtung und Betrieb des Endlagers (Design Information Verification bzw. Überprüfung der grundlegenden technischen Merkmale), z. B. 3D-Laser, Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)
- Methoden zur rechtzeitigen Entdeckung von unabhängigen Bergbauaktivitäten und Hohlräumen am Standort vor und während der Errichtung, während des Betriebs und nach Verschluss des Endlagers (z. B. Umweltüberwachung, geophysikalische Messverfahren, Satellitenerkundung) (Schnittstelle zu FuE-Feld C2.4)

4 Umsetzung des Förderprogramms



Für die durch das BMWi projektgeförderte Forschung zur nuklearen Sicherheit steht im Bundeshaushalt ein jährlicher Betrag von etwa 38 Millionen Euro (Stand 2019) zur Verfügung. Antragsberechtigt sind Hochschulen und außeruniversitäre Forschungs-/Wissenschaftseinrichtungen sowie Gebietskörperschaften und Einrichtungen der öffentlichen Verwaltung. Im Einzelfall kann auch für Forschungseinrichtungen, die von Bund und/oder Ländern grundfinanziert werden, neben ihrer institutionellen Förderung eine Projektförderung für ihren zusätzlichen Aufwand bewilligt werden. Ebenfalls zur Antragstellung berechtigt sind Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft sowie kleinere und mittlere Unternehmen (KMU) jeweils mit Forschungs- und Entwicklungskapazitäten in Deutschland, die jedoch einen angemessenen Eigenanteil der Vorhabenkosten erbringen müssen.

Die Einbindung des wissenschaftlichen Nachwuchses in die projektgeförderten Forschungsvorhaben wird ausdrücklich unterstützt. Darüber hinaus soll durch die Aufbereitung und Vermittlung von Forschungsergebnissen, einerseits für die wissenschaftliche Gemeinschaft, andererseits auch für die interessierte Öffentlichkeit, der Dialog zwischen wissenschaftlichen und nicht-wissenschaftlichen Akteuren erleichtert werden.

Deutsche Forschungsstellen werden durch die Bundesregierung ausdrücklich darin unterstützt, sich an Aktivitäten z. B. von Euratom, der IAEO oder der OECD/NEA zu beteiligen und sich in Konsortien und Arbeitsgruppen einzubringen, in denen die wechselseitige Nutzung wissenschaftlicher Erkenntnisse und Daten sowie eine die Projekte überdauernde Zusammenarbeit im Vordergrund stehen. Die Bearbeitung der Forschungsthemen in internationalen Kooperationen ist gewünscht und wird besonders unterstützt.

Grundsätzliche Hinweise zur Projektförderung können dem Förderportal des Bundes entnommen werden (foerderportal.bund.de). Für die Förderung geltende Richtlinien, Vordrucke, Merkblätter, Hinweise und Nebenbestimmungen können dort in der Rubrik „Formularschrank BMWi“ abgerufen werden.

Für die Bearbeitung der Förderprojekte hat das BMWi Projektträger beauftragt, die in enger Abstimmung untereinander die Forschungsförderung umsetzen. Für die Forschungsgebiete (A) „Reaktorsicherheitsforschung“ und (B) „Forschung zur Zwischenlagerung und Behandlung hochradioaktiver Abfälle“ ist derzeit die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH – Projektträger GRS verantwortlich. Die Umsetzung des Forschungsgebietes (C) „Endlagerforschung“ erfolgt derzeit durch den Projektträger Karlsruhe am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Forschungsvorhaben zu Querschnittsfragen werden je nach inhaltlichem Schwerpunkt von dem jeweils für das Forschungsgebiet zuständigen Projektträger bearbeitet.

Kontakt:

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH – Projektträger GRS
E-Mail: projekttraeger@grs.de
Telefon: +49 2 21/20 68-7 20
<https://www.projekttraeger.grs.de>

Projektträger Karlsruhe (PTKA)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
E-Mail: info@ptka.kit.edu
Telefon: +49 7 21/6 08-2 57 90
<https://www.ptka.kit.edu/entsorgung.html>

