



Bundesamt
für Strahlenschutz

Forschungsprogramm des Bundesamtes für Strahlenschutz

Stand 2022

Planungszeitraum 2022-2026



Impressum

Bundesamt für Strahlenschutz
Postfach 10 01 49
38201 Salzgitter

Tel.: +49 30 18333-0
Fax: +49 30 18333-1885
E-Mail: ePost@bfs.de
De-Mail: epost@bfs.de-mail.de

www.bfs.de

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2022031531827

Inhalt

0	Das Forschungsprogramm als Grundlage des wissenschaftlichen Arbeitens.....	4
1	Expositionen durch ionisierende Strahlung natürlichen Ursprungs, insbesondere Radon ..	9
2	Expositionen durch zivilisationsbedingte Radioaktivität.....	13
3	Schutz vor den Auswirkungen nuklearer Unfälle und anderer Bedrohungen mit radioaktivem Material.....	18
4	Strahlenschutz in der Medizin	23
5	Strahlenschutz im Beruf	27
6	Wirkungen und Risiken ionisierender Strahlung für den Menschen und Strahlenschutzkonzepte	31
7	Expositionen, Wirkungen und Risiken nichtionisierender Strahlung und Strahlenschutzkonzepte	35
8	Querschnittsthema: Wissenschaftliche Fragestellungen zur Risiko- und Wissenschaftskommunikation.....	40
9	Abkürzungsverzeichnis	44

0 Das Forschungsprogramm als Grundlage des wissenschaftlichen Arbeitens

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat den gesetzlichen Auftrag und den eigenen Anspruch, auf der Grundlage der neuesten fachlichen und wissenschaftlichen Erkenntnisse das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), die Politik und die Gesellschaft in allen Fragen des Strahlenschutzes und seiner gesundheitlichen Belange zu beraten und zu informieren.

Durch die Forschungsarbeiten des BfS werden potenzielle Gefahren und mögliche gesundheitliche Risiken von Strahlenexpositionen untersucht und bewertet, um Mensch und Umwelt vor schädlichen Wirkungen ionisierender und nichtionisierender Strahlung zu schützen. Der Mensch ist ständig von einer Vielzahl von Strahlungen umgeben. Das Licht und die Wärme der Sonne, die das Leben auf der Erde erst möglich machen, gelangen als Strahlung zur Erde. Natürlich auftretende Strahlung kommt auch von natürlich radioaktiven Stoffen in der Umwelt, vor allem in den Böden und Gesteinen der Erdkruste (radioaktives Edelgas Radon). Daneben erfolgt aber auch eine zusätzliche zivilisatorische Exposition durch technische Entwicklungen, die in zunehmendem Maße ionisierende Strahlung nutzbar macht.

Forschung sichert dem BfS das notwendige Handlungs- und Orientierungswissen sowie solide und wissenschaftsbasierte Entscheidungsgrundlagen für einen am Stand von Wissenschaft und Technik orientierten Strahlenschutz.

Das vorliegende Forschungsprogramm des BfS konkretisiert den Forschungsbedarf für den Zeitraum von 2022-2026, der sich aus seinem gesetzlichen Auftrag und den daraus abgeleiteten Zielen des BfS ergibt.

Forschungsverständnis im BfS

Strahlung umgibt uns immer und überall. Sie ist einerseits von großem Nutzen für den technischen und medizinischen Fortschritt. Andererseits ist sie ein Risiko für die Gesundheit von Mensch und Umwelt.

Ob künstliche oder natürliche Strahlung (z. B. Radon und UV-Licht): Als Gesellschaft stehen wir regelmäßig vor der Frage, welche Risiken wir bereit sind einzugehen und in welchem Umfang. Eine bessere Abschätzung gesundheitlicher Risiken durch Strahlung ist eine wesentliche Grundlage für den Schutz des Menschen – im Alltag, am Arbeitsplatz, in der Kosmetik, in der Medizin oder bei einem radiologischen Notfall. Durch Strahlenforschung werden Wissenslücken geschlossen, gerade auch für besonders empfindliche Gruppen wie Kinder. Ein zunehmender Teil der künstlichen Strahlenbelastung der Menschen in Deutschland wird durch Fortschritte in der Medizin erzeugt, die in der Behandlung vieler Krankheiten nicht mehr ohne fortschrittliche Strahlendiagnostik oder Strahlentherapie auskommt. Fundierte Bewertungen des Risikos müssen aber immer eine wichtige Grundlage für das Ergreifen von Maßnahmen sein und im Einklang zum technischen Fortschritt stehen – auch für die Abwägung zwischen einem möglichen gesundheitlichen Schaden einerseits und dem potenziellen Nutzen andererseits.

Der Strahlenschutz muss in Deutschland gemäß dem Strahlenschutzgesetz und der Strahlenschutzverordnung unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik erfolgen. Dazu ist das Bundesamt für Strahlenschutz gesetzlich zur wissenschaftlichen Forschung verpflichtet. Die Ermittlung, Beschreibung, Anwendung und Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik ist damit Teil der Arbeit des BfS. Die wissenschaftlichen Tätigkeiten umfassen sowohl wissenschaftsbasiertes Arbeiten –

das heißt, die Anwendung von wissenschaftlichen Erkenntnissen – als auch Forschung. Unser Verständnis vom wissenschaftlichen Arbeiten¹ haben wir in unserem Internetauftritt näher ausgeführt.

Das vorliegende Forschungsprogramm des BfS beschreibt sowohl den fachlichen Fokus sowie die thematische Einbindung in die Ressortforschung des BMUV als auch den Rahmen für Beteiligungen des BfS an nationalen und internationalen Forschungsprojekten und -programmen Dritter zur Strahlenforschung. Die externe Förderung von Strahlenforschung im BfS durch Dritte erfolgt auf nationaler Ebene u.a. im Rahmen des Kompetenzverbundes Strahlenforschung (KVSF) – einer Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) in Kooperation mit dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) – und auf internationaler Ebene insbesondere durch die Europäische Kommission im Rahmen der EURATOM- und Horizont Europa-Forschungsprogramme.

Forschungsinfrastruktur im BfS

Die für die Forschung im Bereich des Strahlenschutzes benötigte Infrastruktur ist sehr breit und divers. Dies bringt einige Herausforderungen für die Strahlenforschung mit sich. Das BfS stützt sich insbesondere für die Durchführung von Vorhaben der Eigenforschung im Rahmen seiner wissenschaftlichen Arbeit auf eine Reihe von Laboren und Leitstellen, eine aktuelle Übersicht über diese Laborinfrastruktur² findet sich auf unserer Internetseite. Das Vorhalten von eigener Forschungsinfrastruktur im BfS wird immer wichtiger angesichts eines Umfelds in Deutschland, in dem nicht nur die Kompetenzen, sondern auch die strahlenschutzbezogene Forschungsinfrastruktur bei Dritten eher abgebaut wird.

Das BfS betreibt eine wissenschaftliche Fachbibliothek, die sich aus der Zentralbibliothek in Salzgitter, den Standortbibliotheken in Berlin und München (Neuherberg) sowie einer Literatursammlung in der Dienststelle Freiburg zusammensetzt. Aufgabe der Bibliothek ist es, für das BfS relevante Fachinformationen zu sammeln, zu erfassen, zu ordnen und den Mitarbeitenden elektronisch verfügbar zu machen. Dies beschränkt sich nicht auf Bücher und Zeitschriften, sondern umfasst auch Forschungsberichte, Loseblattwerke, Drucksachen, Dissertationen, Artikel, Newsletter, Karten, elektronische Medien sowie die Beschaffung und Vermittlung von Fakteninformation. Auf Anfrage werden von der Bibliothek Literaturrecherchen zu vorgegebenen Sachthemen durchgeführt, unter anderem in externen Datenbanken und anderen bibliographischen Quellen. Die Präsenzbibliothek ist nach Vereinbarung eines Termins auch für die Öffentlichkeit zugänglich, wenn berechtigtes wissenschaftliches Interesse besteht. Die BfS-Bibliothek ist Mitglied im Deutschen Bibliotheksverband (dbv³).

Das Management und die Auswertung von (Forschungs-)Daten haben sich in den vergangenen Jahrzehnten zu einem Schlüsselfaktor für die wissenschaftliche Arbeit entwickelt, auch und gerade im internationalen Kontext. Hierzu hat das BfS eigene Softwareprodukte entwickelt und führt die Arbeit daran weiter fort. BfS-eigene Entwicklungen werden auf der Internetplattform GitHub⁴ veröffentlicht, so dass Behörden mit ähnlichen Aufgaben von der Arbeit des BfS profitieren und Parallelentwicklungen vermieden können. Gleichzeitig werden Behörden und andere Interessierte eingeladen, die Programme weiterzuentwickeln. Die zunehmende Bedeutung künstlicher Intelligenz (KI) wird gerade in der Datenaufbereitung und

¹ <https://www.bfs.de/DE/bfs/wissenschaft-forschung/forschungsverstaendnis/forschungsverstaendnis.html>

² https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/fachinfo/ion/labor-organigramm.pdf?__blob=publicationFile&v=30

³ <https://www.bibliotheksverband.de/>

⁴ <https://github.com/OpenBfS>

-verarbeitung neue Möglichkeiten für die Forschung eröffnen, die eine entsprechende Ausstattung und dauerhaft vorhandene personelle Expertise voraussetzen.

Strahlenforschung im internationalen Kontext

Forschung kann ohne internationale Vernetzung nicht stattfinden – dieses Prinzip gilt auch in der Strahlenforschung. Der deutsche Strahlenschutz muss internationalen Standards entsprechen und harmonisiert sein. Die enge Zusammenarbeit mit internationalen Gremien ist daher unabdingbar. Das BfS ist für verschiedene Themenfelder anerkanntes internationales Kooperationszentrum der Weltgesundheitsorganisation (WHO-CC: Collaborating Centre for Ionizing and Non-Ionizing Radiation and Health) und bringt seine Fachkompetenz in international beratenden Gremien ein, z. B. in der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP), dem United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), bei der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEA), bei der Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency (OECD/NEA), bei den Heads of the European Radiological Competent Authorities (HERCA) sowie in der Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) und vielen weiteren Organisationen.

Dem BfS als oberste Fachbehörde im Strahlenschutz in Deutschland ist vor allem auch die Vernetzung mit den europäischen Partnerorganisationen ein wichtiges Anliegen. Durch die aktive Beteiligung an den europäischen Forschungsplattformen MELODI (Strahlenrisiko im Niedrigdosisbereich), ALLIANCE (Radioökologie), NERIS (Nuklearer und radiologischer Notfallschutz), EURADOS (Dosimetrie), EURAMED (Strahlenschutz in der Medizin) und SHARE (Sozialwissenschaft) wirkt das BfS gezielt an der strategischen Ausrichtung und Stärkung der internationalen Strahlenschutzforschung mit, um Strahlenschutz in Europa zu verbessern, offene Fragen zu beantworten und wissenschaftliche Unsicherheiten zu reduzieren. Ebenso ist das BfS an zentralen und europäisch integrierend arbeitenden Forschungsvorhaben im Kontext von EURATOM beteiligt.

Megatrends für die Strahlenforschung

In vielen Bereichen ist das vorliegende Forschungsprogramm geprägt von zukunftsweisenden Strategien und Initiativen, wie der „Nationalen Dekade gegen Krebs“ oder der „Nationalen Strategie für Künstliche Intelligenz (KI)“ mit Initiativen wie „Nutzbarkeit von KI-Systemen im Gesundheitssektor“, den Anforderungen des neuen Strahlenschutzgesetzes wie auch von Erfordernissen, die sich aufgrund wesentlicher gesellschaftspolitischer und ökonomischer Änderungen etwa infolge der Strategie der Bundesregierung zur Energiewende oder der Mobilfunkstrategie der Bundesregierung ergeben. Diese Änderungen werden geprägt durch Megatrends wie Dekarbonisierung, Alterung und Digitalisierung.

Gerade die Entwicklung der Künstlichen Intelligenz und Lernender Systeme ist für alle Bereiche der Strahlenforschung kurz-, mittel- und langfristig von großer Bedeutung. Hier steht insbesondere das Spannungsfeld zwischen Regulation, Strahlenschutz und Verantwortlichkeiten im medizinischen Bereich im Blickfeld. Dies gilt aber auch mit Blick auf die Entwicklung von Modellierungen, die Möglichkeiten von Prognoserechnungen sowie die Nutzung und Verwertbarkeit großer Datenmengen. Im Vorlauf neuer Entwicklungen ist die Fachkompetenz des BfS bezüglich der Abschätzung und Bewertung von Expositionen, von Wirkungen auf und Risiken für Gesundheit und Umwelt sowie bei der Entwicklung von Schutzkonzepten notwendig (z. B. elektromagnetische Felder beim 5G- und 6G-Netz, Einführung neuer Modalitäten in der Krebstherapie, Entwicklung von Elektromobilität, solare und künstliche UV-Strahlung etc.). Diese Fachkompetenz des BfS basiert wesentlich auf den eigenen wissenschaftlichen Arbeiten des BfS und auf der Beteiligung des BfS an nationalen und internationalen Forschungsprojekten und -programmen.

In seinen wissenschaftlichen Fragestellungen greift das BfS die den Strahlenschutz prägenden Expositionsszenarien auf und fokussiert seine Forschungsarbeiten auf Bereiche mit wesentlichen wissenschaftlichen und technischen Unsicherheiten, von denen möglicherweise Risiken für Mensch und Umwelt ausgehen. Im Hinblick auf die Schutzgüter Mensch und Umwelt und auf konkrete Schutzziele erarbeitet das BfS die wissenschaftlich-fachlichen Grundlagen zur Bewertung von Risiken und Chancen

neuer Anwendungen und bewertet diese. Dabei sieht sich das BfS dem Auftrag verpflichtet, auf der Basis des Standes von Wissenschaft und Technik Strahlenexpositionen differenziert und in ihrer Langzeitentwicklung zu erfassen und sowohl über wissenschaftlich bewiesene als auch über wissenschaftlich-fachlich mögliche Wirkungen und Risiken zu informieren. Diese Risiken werden vor dem Hintergrund eines möglichen Nutzens für den Einzelnen und die Gesellschaft insgesamt bewertet, daraus Strahlenschutzempfehlungen für den Gesetzgeber, die Regierung sowie den Vollzug und die Gesellschaft abgeleitet und darüber informiert.

Zielstruktur der Strahlenforschung im BfS

Die Gliederung dieses Forschungsprogramms erfolgt nach den Ziel- und Aufgabenbereichen des BfS, die sich aus seinen Aufgaben ergeben, und denen die folgenden gleichlautenden Forschungsbereiche zugeordnet sind. Die Forschungsbereiche sind charakterisiert durch die fachlich-wissenschaftliche sowie multidisziplinäre Ausrichtung des BfS und beschreiben die „Kettenkompetenz“ des BfS im Strahlenschutz entlang der Wirkungs- und Bewertungskette von der Strahlenquelle über reale und mögliche Expositionen, Wirkungen auf und Risiken für Mensch und Umwelt und Strahlenschutzmaßnahmen für natürliche, geplante und kontrollierte Situationen sowie für Notfälle. Dies berührt in den einzelnen Forschungsbereichen auch immer die erforderliche sozialwissenschaftliche Kompetenz, mit der Wechselwirkungen zwischen naturwissenschaftlich-technischen Fortschritten und gesellschaftspolitischen sowie ökonomischen Entwicklungen erfasst und bewertet werden. Die daraus erwachsenden Fragestellungen werden mit Blick auf die Informationsbeschaffung und -bereitstellung, die Kommunikation und Beteiligung, die Transparenz, Neutralität und Vertrauensbildung in Forschungsvorhaben einbezogen.

Die fachlichen Oberziele des BfS gliedern als Kapitel dieses Forschungsprogramm:

1. Expositionen durch ionisierende Strahlung natürlichen Ursprungs, insbesondere Radon
2. Expositionen durch zivilisationsbedingte Radioaktivität
3. Schutz vor den Auswirkungen nuklearer Unfälle und anderer Bedrohungen mit radioaktivem Material
4. Strahlenschutz in der Medizin
5. Strahlenschutz im Beruf
6. Wirkungen und Risiken ionisierender Strahlung für den Menschen und Strahlenschutzkonzepte
7. Expositionen, Wirkungen und Risiken nichtionisierender Strahlung und Strahlenschutzkonzepte

Die Kapitel 1 – 5 beziehen sich dabei konkret auf verschiedene Expositionsquellen ionisierender Strahlung und zugehörigen Strahlenschutz, während Kapitel 6 als Querschnittsthema biologische Wirkungen und gesundheitliche Risiken ionisierender Strahlung allgemein abdeckt. Kapitel 7 betrachtet dagegen nichtionisierende Strahlung und hier sowohl Exposition, Wirkung und Risiko und zugehörigen Strahlenschutz. Als weiteres Querschnittsthema zu den Oberzielen tritt ein ergänzendes Kapitel hinzu:

8. Wissenschaftliche Fragestellungen zur Risiko- und Wissenschaftskommunikation

Qualitätssicherung und wissenschaftliches Selbstverständnis

Unsere Aufgabenwahrnehmung beruht auf einem offenen wissenschaftlichen Diskurs und einem hohen Maß an Fachkompetenz und wissenschaftlicher Urteilsfähigkeit. Unsere Arbeitsweise ist objektiv und ergebnisoffen. Sie folgt den allgemeinen Grundsätzen guter wissenschaftlicher Praxis in Anlehnung an die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), insbesondere auch in Bezug auf Vermeidung von Interessenskonflikten, und berücksichtigt das im BfS geltende Qualitätsmanagementsystem.

In diesem Rahmen entwickeln wir spezifische, an die jeweilige Aufgabe angepasste Maßnahmen zur Qualitätssicherung wissenschaftlichen Arbeitens⁵. Ausgehend von einer konkreten Fragestellung erarbeiten wir belastbare Ergebnisse, die transparent und nachvollziehbar dokumentiert werden⁶. Die wissenschaftliche Publikation unserer Forschungsergebnisse erfolgt in Zeitschriften, die ein Peer Review-Verfahren standardmäßig zur Qualitätssicherung einsetzen.

Unsere Mess-, Forschungs- und Bewertungsergebnisse dienen sowohl unseren Auftraggebern als wesentliche Entscheidungshilfe für Maßnahmen als auch der breiten Öffentlichkeit als wichtige Orientierungshilfe. Dabei verpflichten wir uns zu einer unabhängigen und neutralen Informationsvermittlung. Die allgemeinverständliche Vermittlung wissenschaftlicher Ergebnisse für die unterschiedlichen Zielgruppen unserer Wissenschaftskommunikation ist für uns dabei handlungsleitend.

Rahmenbedingungen und Geltungsbereich

Das Forschungsprogramm des BfS nimmt eine über die konkrete, projektbezogene Planung hinausgehende, mittelfristige Perspektive in den Blick, wird anlassbezogen aktualisiert, an neue Entwicklungen angepasst und mit Datumangabe veröffentlicht.

Das Forschungsprogramm orientiert sich am Leitbild⁷ des BfS sowie den Prinzipien der Chancengleichheit⁸.

⁵ <https://www.bfs.de/DE/bfs/wissenschaft-forschung/forschungsverstaendnis/forschungsverstaendnis.html>

⁶ Das "Digitale Online-Repository und Informationssystem" des BfS (kurz: DORIS) <http://doris.bfs.de/jsui/>

⁷ <https://www.bfs.de/DE/bfs/wir/arbeiten/so-arbeiten-wir/mission-leitbild.html>

⁸ <https://www.bfs.de/DE/bfs/wir/arbeiten/so-arbeiten-wir/chancengleichheit.html>

1 Expositionen durch ionisierende Strahlung natürlichen Ursprungs, insbesondere Radon

1.1 Ausgangssituation

Die Anforderungen an den Schutz vor erhöhter Exposition aus natürlichen Quellen bei Radon und „Naturally Occurring Radioactive Materials“ (NORM) wurden mit dem Inkrafttreten des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG) zum 31. Dezember 2018 deutlich angehoben.

Bezüglich Radon gibt es erstmals verbindliche Regelungen zum Schutz vor hohen Expositionen in Wohngebäuden. Die Anforderungen für den Schutz an Arbeitsplätzen wurden deutlich erweitert. In den nächsten Jahren werden umfangreiche neue Daten aus Messkampagnen von Bund und Ländern sowie von Messungen der Radonkonzentration am Arbeitsplatz nach § 127 StrlSchG verfügbar werden. Durch aktuelle „Radon-Surveys“ in den Jahren 2020 – 2022 wird die Datenbasis zum Vorkommen von Radon in Gebäuden (Wohnungen und Arbeitsplätze) erheblich verbessert. Die Entwicklung optimaler Studiendesigns, insbesondere für repräsentative Studien unter Berücksichtigung des Ziels, hohe Perzentile der Verteilung, die für die Bestimmung von Überschreitungswahrscheinlichkeiten bestimmter Radonkonzentrationen benötigt werden, mit ausreichender Genauigkeit bestimmen zu können, ist Gegenstand der Forschungsarbeiten des BfS. Die im Strahlenschutzgesetz geforderte Festlegung und Überprüfung der sogenannten Radonvorsorgegebiete muss mindestens alle zehn Jahre durch die Länder rechtssicher auf wissenschaftlichen Grundlagen erfolgen.

Das Radon-Kalibrierlabor des BfS nimmt über Deutschland hinaus eine herausragende Rolle in der Radon-Metrologie ein. Es sichert als messtechnisches Referenzlabor die präzise Rückführbarkeit von Radon-Messungen auf nationale Referenznormale und führt Vergleichsmessprogramme zur Qualitätssicherung für Radon-Messstellen durch.

Das Strahlenschutzrecht beinhaltet erstmals verbindliche Regelungen für radiologische Altlasten. Mit den Bestimmungen zur natürlichen Radioaktivität in Baustoffen wurde ein gänzlich neuer Regelungsbereich geschaffen.

1.2 Zukünftige Forschungsthemen

Radon

Die gegenwärtig neu gewonnen Radon-Messdaten werden zusammen mit gemachten Erfahrungen und Erkenntnissen aus Forschungsvorhaben für eine zukünftige weitere Verbesserung des Schutzes vor Radon ausgewertet. Die entsprechende Forschung zur Exposition konzentriert sich auf die verbesserte Erfassung von erhöhten Expositionen, deren Dosimetrie sowie die Evaluation der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen zur Vermeidung bzw. Reduzierung von Expositionen.

Das BfS treibt mit seinen Forschungsarbeiten die Entwicklung geostatistischer Modelle und Verfahren des Machine Learnings voran, um deutlich verbesserte Prognosen der geographischen Verteilung der Radonkonzentrationen in Böden und in Gebäuden zur Verfügung zu stellen. Diese können von den Ländern bei der Überprüfung der Radon-Vorsorgegebiete berücksichtigt werden.

Eine qualitative Verbesserung der Prognose von Radonkonzentrationen, d.h. des Jahresmittelwertes, in Innenräumen ist nur unter dem vertiefenden Verständnis des Einflusses vom Wetterverlauf und Nutzerverhalten während der Messzeit möglich. Dies führt auch zu einem Fortschritt in der Quantifizierung der zusätzlichen Unsicherheiten von Messungen über eine von einem Jahr deutlich abweichende Dauer zur Bewertung im Hinblick auf die Überschreitung von Referenzwerten.

Ähnliches gilt für die Bewertung von Messungen der Bodenluft. Hierfür muss der Einfluss von Wetterparametern auf die zeitliche Dynamik der Radonkonzentration in der Bodenluft untersucht und müssen ggf. Methoden zur Korrektur der Messwerte auf Standardbedingungen abgeleitet werden.

Neuere Studien haben die Erkenntnisse zur gesundheitlichen Wirkung der Inhalation von Radon und Radon-Zerfallsprodukten weiter verbessert. In Kapitel 6 wird auf die möglichen Wirkungen und Risiken von Radon eingegangen. Auf dieser Grundlage empfiehlt internationale Strahlenschutzkommission (ICRP) nunmehr die Anwendung der biokinetisch-dosimetrischen Modelle für die Berechnung der effektiven Dosis und hat neue Konversionsfaktoren empfohlen. Die für die Berechnung zu Grunde gelegten Annahmen über die Expositionsbedingungen hat ICRP publizierten Messungen an Arbeitsplätzen entnommen. Der Umfang dieser Messungen ist, auch weltweit betrachtet, sehr gering, so dass die daraus abgeleiteten Annahmen erheblichen Unsicherheiten unterliegen. Das BfS wird an Arbeitsplätzen repräsentative Untersuchungen sowohl der Potentielle Alpha-Energiekonzentration (PAEC) als auch des Verhältnisses von angelagertem zu nicht-angelagertem Anteil der Radon-Zerfallsprodukte durchführen, um Kenntnislücken zu schließen.

Neue Entwicklungen, beispielsweise ein möglicherweise dauerhafter Anstieg des Arbeitens im Home-Office als eine Folge der Corona-Pandemie oder Klimaschutzmaßnahmen an Gebäuden durch Dämmung und Lüftungstechniken, könnten Einfluss auf die Strahlenexposition des Menschen insbesondere durch Radon haben und müssen folglich auf ihre Auswirkungen betrachtet werden.

Für die zunehmend eingesetzten sogenannten aktiven elektronischen Radonmessgeräte wird das BfS im Rahmen der Eigenforschung ein entsprechendes Prüfprogramm zur Bewertung messtechnischer Eigenschaften entwickeln. Hiermit verfolgt das BfS das Ziel, die erforderlichen Informationen über adäquate und zuverlässige Messsysteme zu erhalten und Dritten zur Verfügung zu stellen.

Die Forschung der Relevanz des Radon-Isotops Thoron wird durch metrologische Weiterentwicklungen ausgebaut. Mittelfristig wird im BfS ein akkreditiertes Referenzmesssystem für die Kalibrierung von Thoron-Gas- und Thoron-Folgeproduktmessgeräten entstehen.

Im europäischen Forschungsprojekt RadoNorm (2020 – 2025) bringt das Radonkalibrierlabor aktiv seine Kompetenz mit dem Ziel ein, die Qualität von Radonmessungen auf allen Ebenen sicherzustellen und auszubauen, Unsicherheiten der Messungen zu reduzieren sowie die Bewertung der Folgeproduktkonzentration von Radon und Thoron, insbesondere an Arbeitsplätzen, zu verbessern. Die Entwicklung und Bewertung von Methoden zur Messung von Radon/Radon-Folgeproduktkonzentrationen und -expositionen in Gebäuden, an Arbeitsplätzen und in der Umwelt ist Bestandteil des Programms zur Qualitätssicherung. Eine Eignungsprüfung für passive nicht-elektronische Radonmesssysteme ist bereits zuverlässig auf der Basis von Vergleichsprüfungen möglich. Das Forschungsprojekt RadoNorm deckt die offenen Fragestellungen, die auf internationale Ebene betrachtet werden können, überwiegend ab. Weitergehende Forschungsfragen werden sich von den Ergebnissen des RadoNorm-Projektes ableiten lassen.

Die Strahlenexposition durch an Aerosolpartikel gebundene Radonfolgeprodukte wird vertieft erforscht. Diese Partikel gelangen durch Inhalation in den Atemtrakt des menschlichen Körpers und können dort abgelagert werden. Für ultrakleine Partikel ist dabei die Wahrscheinlichkeit, tiefere Regionen des Atemtraktes zu erreichen, höher als für größere Teilchen. Über die Lungenbläschen können die ultrakleinen Partikel zudem in die Blutbahn vordringen und sich über das Blut im Körper verteilen. Tragen diese Partikel eine Radioaktivität, so verursachen sie auch eine Strahlenexposition des umgebenden Gewebes. Berechnungen mit biokinetisch-dosimetrischen Modellen ergeben, dass insbesondere Partikelcluster im Größenbereich von unter 10 nm einen bis zu 10-fach höheren Beitrag zur Strahlendosis liefern als Partikel mit angelagerten Radon-Zerfallsprodukten im mittleren Größenbereich typischer Innenräume. Aufgrund des hohen Beitrages zur Strahlendosis ist die Kenntnis der Aktivitätsgrößenverteilung dieser ultrakleinen Partikel eine wichtige Information für die radiologische Bewertung von Radonexpositionen an Arbeitsplätzen und in Wohnräumen.

Die physikalischen Eigenschaften luftgetragener Partikel im Nanometerbereich stellen hohe Anforderungen an die Messtechnik. Weltweit gibt es bis heute nur wenige Messungen ihrer Aktivitätsgrößenverteilung. Für die Dosisberechnung mit biokinetisch-dosimetrischen Modellen ist es deshalb notwendig, die Datengrundlage insbesondere im Hinblick auf die Aktivitätsgrößenverteilung von Partikeln im Bereich bis 10 nm an Arbeitsplätzen und in Wohnräumen zu verbessern. Die Forschung des BfS berücksichtigt dabei auch die Schaffung der messtechnischen Voraussetzung.

NORM und Altlasten

Im Bereich NORM erarbeitet das BfS Hilfestellungen zur Untersetzung der gesetzlichen Regelungen zu bergbaulichen und industriellen Rückständen hinsichtlich der Dosisermittlung. Diese berücksichtigen spezifische Charakteristika einzelner Industrieprozesse (z. B. veränderte Radionuklidverhältnisse). Obwohl das in Deutschland anfallende Aufkommen an Rückständen und deren Charakterisierung im Wesentlichen bekannt ist, besteht zu speziellen, sehr heterogenen Rückständen, z. B. aus der Trinkwasseraufbereitung oder der Tiefengeothermie, weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und ihres Verhaltens. Schwerpunkt der künftigen Fragestellungen bleibt die Prüfung und Weiterentwicklung radioökologischer Modelle, insbesondere für die Freisetzung über den Staubpfad.

Radionuklide in Lebensmitteln

Die Bestimmung und Bewertung der Exposition der Bevölkerung durch natürliche Radionuklide in Nahrungsmitteln und Trinkwasser in Deutschland ist Aufgabe des BfS. Im Rahmen der Trinkwasserverordnung (TrinkwV) steht ein großer Datensatz zu vielen Wasserversorgungsanlagen zur Verfügung, da grundsätzlich für alle zentralen Wasserwerke eine Untersuchungspflicht gilt. Dies ermöglicht die Erstellung detaillierter Karten und die Entwicklung von effektiven Konzepten zur Reduzierung natürlicher Radionuklide im Trinkwasser. Im Rahmen eines mehrjährigen Eigenforschungsvorhabens zu natürlichen Radionukliden in Lebensmitteln wird unter Verwendungen zeitgemäßer Verzehrsmengen die Expositionsabschätzung für die Bevölkerung aktualisiert. Die Ergebnisse, die in Zusammenarbeit mit dem Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) und dem Max Rubner-Institut (MRI) erarbeitet werden, bilden die Grundlage, mögliche Risiken durch den Verzehr von Lebensmitteln auf der Basis aktueller Daten zu erkennen und ggf. entsprechende Verzehrempfehlungen für empfindliche Bevölkerungsgruppen abzuleiten.

1.3 Ausblick

Die klimaschutzbedingte Notwendigkeit zur Reduzierung der CO₂-Emission führt zur Entwicklung neuer Technologien und Materialien. Der Ausstieg aus der Kohleverstromung wird dazu führen, dass die Baustoffindustrie auf die massenhafte Verwendung von REA-Gips, Filterstäuben und Kesselsande verzichten muss. Da eine bergbauliche Förderung natürlicher Rohstoffe, wie Puzzolane und Naturgips, wegen des Eingriffs in die natürlichen Lebensumstände von Flora und Fauna nicht nachhaltig und nicht umweltschonend ist, ist im Sinne der Kreislaufwirtschaft die Verwendung neuer industrieller Rückstände sowie die Wiederverwendung von Baustoffrückständen („Bauschutt“) notwendig. CO₂-intensive Bauprodukte, wie Beton und zunehmend auch Ziegel, werden als Bauprodukte einem besonderen Innovationsdruck unterliegen. Alternativen, wie Holz oder ungebrannter Lehm, werden mehr und mehr an Relevanz gewinnen. Die Auswirkungen auf die Exposition der Bevölkerung mit ionisierender Strahlung natürlichen Ursprungs müssen beobachtet und bewertet werden.

Die durch die Erderwärmung bedingten zunehmenden Extremwetterereignisse und Dürren können zu vermehrter Oberflächenerosion führen. Da dies auch bergbauliche oder industrielle Rückstände betrifft, ist die entsprechende potentielle Strahlenexposition des Menschen, beispielsweise durch Ablagerungen in landwirtschaftlich genutzten Flächen oder Flussauen, künftig zu erheben.

Die Gewinnung und Aufbereitung Seltener Erden ist nur unter Inkaufnahme von NORM-haltigen Rückständen möglich. Die verstärkte Ansiedlung solcher Industrien in Deutschland zur Nutzung der nationalen Ressourcen kann zu einem verstärkten Aufkommen von Rückständen führen. Möglichkeiten der Wiederverwertung von Rückständen müssen untersucht und bewertet werden.

Die Ressourcenstrategie der Europäischen Union und der Klimaschutzplan der Bundesregierung sehen langfristig eine Flächenkreislaufwirtschaft („Netto-Null-Ziel“) vor. Dies bedingt eine zunehmende Nutzung ehemaliger Industrieflächen für den Wohnungsbau und erhöht die Notwendigkeit der Identifizierung, Bewertung und Sanierung von Altlasten. Damit wird die Frage nach der Entdeckung, Bewertung und Sanierung von – auch radiologischen - Altlasten präsenter.

2 Expositionen durch zivilisationsbedingte Radioaktivität

2.1 Ausgangssituation

Emissionen und Immissionen

Sofern die zuständige Behörde den Betreibern von kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen Emissionsmessungen zur Eigenüberwachung auferlegt, ist auch die Durchführung der Kontrolle der Eigenüberwachung obligatorisch. Für die Durchführung von Messungen zur Kontrolle der Eigenüberwachung und der bei der Stilllegung sowie aus dem Rückbauprozess kerntechnischer Anlagen anfallenden Reststoffe ist seit 2021 grundsätzlich das BfS zuständig. Bei der Weiterentwicklung einheitlicher Qualitätsstandards bei der Emissionsüberwachung und der Kontrolle der Eigenüberwachung sind vielfältige Fragestellungen zu beantworten. Für den Bereich Fortluft sind dies beispielsweise die Güte der Probenentnahme sowie Nuklidvektoren und Partikelgrößenverteilungen bei Ableitungen in verschiedenen Betriebszuständen. Zudem müssen die Mess- und Beurteilungsverfahren von den Leitstellen Fortluft und Abwasser kontinuierlich weiterentwickelt werden.

Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung – Luft- und Wasserpfad

Das bei der Berechnung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch kerntechnische Anlagen und Einrichtungen verwendete Gauß-Modell wurde 2021 durch ein Lagrange-Partikelmodell ersetzt. Ein entsprechendes atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell (ARTM) wurde über ein Ressortforschungsvorhaben entwickelt und steht seit 2007 als Open Source Software zur Verfügung. Mit dieser Umstellung erhöht sich die Zahl der Eingangsparameter deutlich, welche von den Betreibern zur Verfügung gestellt werden müssen. Gleichzeitig ergeben sich dadurch auch höhere Anforderungen an die vom BfS eingesetzten Modelle für den Luft- also auch für den Wasserpfad im Hinblick auf Verifizierung und Weiterentwicklung.

Radioökologie

Ziel der Radioökologie ist das quantitative Verständnis und die zuverlässige Prognose des dynamischen Verhaltens radioaktiver Stoffe in der Umwelt sowie die Ermittlung der realitätsnahen Exposition von Mensch und Umwelt. Das BfS entwickelt die erforderlichen radioökologischen Modelle und die Berechnungsgrundlagen laufend fort. Das BfS leitet zudem aus den einschlägigen Dosisgrenz- bzw. Dosisrichtwerten mithilfe radioökologischer Modelle sekundäre Grenz- oder Richtwerte, wie z. B. Freigabewerte, ab. Die radioökologische Forschung am BfS steht im Wesentlichen auf drei Fundamenten, der (Weiter-)Entwicklung radioökologischer Modelle, der (Weiter-)Entwicklung radiochemischer (Schnell-) Methoden im Labor sowie der Zusammenführung von Messungen und Modellprognosen.

Analyse- und Messmethoden (Radioökologielabor)

Der quantitative Nachweis von Radionukliden in verschiedensten Umweltmedien im Routinebetrieb ist unverzichtbarer Bestandteil der Erfüllung der Amtsaufgaben des BfS, insbesondere seiner vielfältigen Leitstellenfunktionen. Er ist jedoch auch unverzichtbare Voraussetzung für eine zuverlässige Einsatzfähigkeit und agile Reaktion in nuklearen und radiologischen Notfallsituationen.

Aerogammaspektrometrie

Das BfS ist für die großräumige Ermittlung der Umweltradioaktivität und für das Aufspüren von Strahlenquellen aus der Luft zuständig. Um diese Aufgabe je nach Einsatzgebiet (z. B. Umweltüberwachung, Notfallschutz, Suche nach hochaktiven radioaktiven Quellen) sicherzustellen, sind wissenschaftliche Untersuchungen bei der Auswertung und Entfaltung von Messspektren, bei der Modellierung von Strahlungsfeldern sowie bei der automatisierten Flugplanung in radiologisch komplexen Gebieten notwendig.

Spurenanalyse

Eine Sonderstellung in der Überwachung der Umweltradioaktivität hat die Spurenanalyse. Hier steht nicht der Schutz des Menschen im Mittelpunkt, sondern die empfindliche Messung und Dokumentation der vorhandenen Umweltpegel künstlicher Radioaktivität, deren Variabilität sowie das grundsätzliche Verständnis von Herkunft und Ausbreitung in der Atmosphäre. Erhöhte Aktivitätskonzentrationen künstlicher Radionuklide sind zu analysieren und deren Herkunft zu klären. Auch für die Überwachung des Kernwaffenteststoppabkommens (CTBT - Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty) sind hochempfindliche Messsysteme und Labore zur Qualitätssicherung sowie Verfahren der atmosphärischen Rückwärtsmodellierung entscheidend.

2.2 Zukünftige Forschungsthemen

Emissionen und Immissionen

Bei der Bestimmung der Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Fortluft und dem Abwasser werden seit Langem etablierte Verfahren eingesetzt und nach neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen weiterentwickelt. Forschungsbedarf besteht jedoch neben bei kerntechnischen Einrichtungen, insbesondere auch im nuklearmedizinischen Bereich. Über die Emissionen von sonstigen Anlagen und Einrichtungen (z. B. Radiotherapie, Radiopharmaka-Herstellung, Positronen-Emissions-Tomographie, Strahlentherapie), die sich oftmals in dicht besiedeltem Umfeld befinden, liegen dem BfS bisher nur unzureichende Informationen vor. Um hier realitätsnahe Expositionsabschätzungen vornehmen zu können sowie Emissions- und Kontrollmessprogramme festzulegen, sind sowohl eigene Projekt- und Forschungsarbeiten als auch extern zu vergebende Forschungsvorhaben notwendig. Den Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten stellt die Charakterisierung der Art und Aktivität der mit der Fortluft und dem Abwasser abgeleiteten radioaktiven Stoffe dar.

Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung – Luft- und Wasserpfad

In der neuen Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) wird anstelle des Gauß-Fahnenmodells ein Lagrange-Partikelmodell zur realitätsnäheren Modellierung der atmosphärischen Ausbreitung ab 2021 gefordert. Insbesondere die Anforderungen aus der neu erstellten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) „Tätigkeiten“, die an realitätsnahe atmosphärische Ausbreitungsrechnungen besonders bei Einrichtungen in urbanen Gebieten gestellt werden, sind im Vergleich zu den bisherigen Berechnungsverfahren, die sich vor allem auf den nicht-urbanen Bereich beziehen, wesentlich höher. Um diese umsetzen zu können, müssen im Rahmen von intramuraler und extramuraler Forschung die wissenschaftlichen Grundlagen zunächst aufgearbeitet, verifiziert und anschließend in die Modelle eingearbeitet werden. Des Weiteren muss die Qualitätssicherung bei atmosphärischen Ausbreitungsmodellen gewährleistet werden. Dazu ist beispielsweise die Beteiligung des BfS an internationalen Vergleichsstudien erforderlich.

Die Berechnungsvorschriften für die Ermittlung der Exposition der repräsentativen Person infolge von Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen sind in der AVV Tätigkeiten festgelegt. Diese Berechnungsvorschriften werden kontinuierlich in der Software umgesetzt und weiterentwickelt.

Die Ausbreitungsmodelle (Atmosphäre, Oberflächengewässer) sind auch im Hinblick auf radiologische Notfallszenarien weiterzuentwickeln. Dies umfasst beim Luftpfad neben der Verbesserung von spezifischen orografischen Auflösungen auch Anpassungen des Programms an neueste Erkenntnisse im Bereich der Meteorologie. Beim Wasserpfad sind die Modellvereinfachungen und -annahmen dahingehend zu prüfen, ob sie – insbesondere bei radiologischen Notfällen und ortsspezifischen Betrachtungen – zugunsten komplexerer hydrodynamischer Modelle partiell überarbeitet werden müssen. Zudem ist im Zuge des Klimawandels auch verstärkt mit extremen Niederschlagsereignissen zu rechnen, die bei der

Weiterentwicklung der Modelle zum Radionuklidtransport in Oberflächengewässern berücksichtigt werden müssen.

Da die Entwicklungen auf dem Gebiet der beim BfS durchgeführten Ausbreitungsrechnungen immer komplexer und datenumfangreicher werden, soll die Einbindung von künstlicher Intelligenz und die Einbindung von Big-Data Prozessen zukünftig berücksichtigt werden.

Radioökologie

In den kommenden Jahren sollen unterschiedliche Modellierungsansätze weiterverfolgt oder neu entwickelt werden. Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes RadoNorm (2020 – 2025) wird der mechanistische Ansatz zur Quantifizierung des Verteilungskoeffizienten (Kd-Wert), der die Verteilung eines chemischen Elements auf die feste und flüssige Phase beschreibt und der Beschreibung Sorptionsprozessen im Boden unterliegt, erweitert. Als Alternative zur expliziten Modellierung von Sorptionsprozessen im Boden wird die Anwendbarkeit von Machine Learning geprüft.

Auch probabilistische/stochastische Ansätze werden betrachtet. Am Beispiel ausgewählter Prozesse, etwa die Radiocäsiumkontamination von Wildschweinfleisch, die einen stochastischen Charakter aufweist, wird untersucht, ob sich die Variabilität radioökologischer Messdaten und deren statistischen Kenngrößen durch die explizite stochastische Modellierung abbilden lassen. Zur realistischen Ermittlung der Exposition durch Direktstrahlung wird in Eigenforschung in stärkerem Maße auch auf komplexere Monte-Carlo-Simulationen gesetzt. Künftige Eigenforschungen werden sich ebenfalls Fragen der Rechenzeitreduktion (sog. Varianzreduktion) widmen.

Mit zunehmenden trockenen und heißen Sommern spielen Waldbrände in der hoch kontaminierten Umgebung von Tschernobyl eine immer größere Rolle. Bei einem Waldbrand können Radionuklide in der oberirdischen Biomasse und in den obersten organischen Bodenschichten in die Atmosphäre freigesetzt werden. Die sich hieraus ergebende Exposition soll künftig in der Eigenforschung mittels Computersimulationen abgeschätzt werden. Bei der Dosisabschätzung für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle ist der Klimawandel mit seinen tiefgreifenden Veränderungen in der Biosphäre auch zu berücksichtigen. Von besonderem Forschungsbedarf ist auch das Auftauen der Permafrostböden. Dadurch werden die zuvor im Boden gebundenen gasförmigen Radionuklide (z. B. C-14) freigesetzt. Im Rahmen eines Ressortforschungsvorhabens wird in den nächsten Jahren auch untersucht, welche Exposition sich aus der Nutzung kontaminierter Biomasse, insbesondere in Biomassekraftwerken, ergeben kann.

Auch die Fortschritte in der Medizin, z. B. die therapeutische Anwendung neuartiger Radiopharmaka, haben einen Einfluss auf die Forschung im Bereich Radioökologie. Für die Berechnung potentiell auftretender Dosen für Einzelpersonen der Bevölkerung (unbeteiligte Dritte) durch den Einsatz von Radiopharmaka werden radioökologische Modelle eingesetzt. Diese Modelle müssen für die Anwendung in der gesamten Bundesrepublik Deutschland geeignet sein und werden in Eigenforschung entwickelt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden möglicherweise auch für die Freigabe relevant sein, da radioaktive Klinikabfälle bei diesen Therapien freigegeben werden müssen.

Analyse- und Messmethoden (Radioökologielabor)

Im Notfallschutz und bei der nuklearspezifischen Gefahrenabwehr sind möglichst rasche Informationen über die Kontaminationssituation unerlässlich. Insbesondere die Entwicklung von Schnellmethoden für rein alpha- oder betastrahlende Radionuklide ist als eigene Forschung vorgesehen. Für neu zu betrachtende Radionuklide aus dem medizinischen Bereich kann auch die Entwicklung gänzlich neuer analytischer Nachweismethoden erforderlich sein. Die Teilautomatisierung von Analyseverfahren, die Anwendung modernerer radiochemischer Anreicherungs- und Reinigungsverfahren sowie die Implementierung alternativer Messverfahren (beispielsweise Massenspektrometrie) werden auch eine Rolle spielen.

Aerogammaspektrometrie

Um den zeitnahen, effizienten Einsatz von luftgestützten Messsystemen, z. B. unmittelbar nach einem kerntechnischen Unfall, sicherzustellen und dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik gerecht zu werden, ist die in der Aero-Gammaspektrometrie eingesetzte Software für die Flugvorbereitung sowie die Nachbearbeitung und Aufbereitung der Messdaten weiterzuentwickeln.

Die Software für die Flugroutenplanung wird basierend auf selbstoptimierenden mathematischen Algorithmen fortentwickelt bzw. neugestaltet werden. Dabei müssen mehrere Randbedingungen (im Zielgebiet gegebene Geländestruktur, Vegetation und Bebauung sowie mit dem genutzten Hubschraubertyp erreichbare Flugleistung) für eine optimale Flächendeckung pro Missionszeit berücksichtigt werden. Wesentlich ist dabei eine automatische eins zu eins Übertragung der geplanten Flugroute in das on-board-Navigationssystem der genutzten Hubschrauber.

Die Software für die hubschraubergestützte Aerogammaspektrometrie ist darüber hinaus zukünftig derart auszulegen, dass sie auch für die In-Flight-Optimierung von Flugrouten unter Berücksichtigung gleichzeitiger Hindernisvermeidung für den effektiven autonomen Betrieb von Drohnen genutzt werden kann. Zu diesem Zweck werden auch die während des Messflugs aufgenommenen Messdaten in einem reaktiven Optimierungsprozess berücksichtigt werden, so dass die Flugroute, zum Beispiel nach Auffinden eines Hotspots, online entsprechend geändert werden kann.

Spurenanalyse

Auf dem Schauinsland betreibt das BfS eine Messstation für das „International Monitoring System (IMS)“ der Organisation zur Überwachung des Kernwaffenteststopp-Vertrags (CTBTO). Außerdem unterstützt das akkreditierte Edelgaslabor des BfS als Support-Labor die CTBTO. Um diese Organisation herum gruppiert sich ein breites Feld von Forschung und Entwicklung zur Verifikation des Kernwaffenteststoppabkommens. Die Entwicklung auf dem Gebiet der Edelgasmesstechnik im Bereich Spurenanalyse erfordert einerseits die Einbeziehung modernster Sammel- und Messsysteme in den Laborbetrieb, zum anderen auch die Begleitung der Entwicklung und die Bewertung neuer, teils automatisierter Systeme des Integriertes Mess- und Informationssystem (IMIS).

2.3 Ausblick

Die Forschungstätigkeit im Bereich der Radioökologie bei der Expositionsermittlung der Bevölkerung wird in den kommenden Jahren nicht zuletzt durch den Klimawandel, die weltweit rapide voranschreitende Digitalisierung und den Einsatz künstlicher Intelligenz geprägt sein. Ersteres wird einen Einfluss auf atmosphärische und radioökologische Modelle haben, letzteres auf die Art und Weise, wie wir in der Forschung mit diesen Modellen umgehen. Beispielsweise werden sich mit zunehmender Digitalisierung neue Möglichkeiten eröffnen, komplexe Fragestellungen computergestützt zu lösen oder Berechnungen durchzuführen, welche bis dato als zu rechenaufwendig verworfen wurden. Data-Mining oder die Handhabung großer Datenmengen, etwa aus Messungen oder der Geoinformatik, sind weitere Beispiele.

Der Gesellschaft muss zudem eine Möglichkeit eröffnet werden, um am wissenschaftlichen Diskurs teilhaben oder ihn zumindest besser verstehen zu können. Eine naheliegende Schnittstelle mit der Öffentlichkeit ist Citizen Science, die perspektivisch verstärkt berücksichtigt wird, wo dies machbar und zielführend ist. Darüber hinaus ist eine transparente, nachvollziehbare Darstellung der Forschung und der darauf aufbauenden Entscheidungsprozesse ebenfalls sehr wichtig, um das Vertrauen in die wissenschaftliche Arbeit des BfS zu erhalten. Beispiele hierfür sind die mit dem Rückbau von Kernkraftwerken verbundene Freigabe geringfügig radioaktiver Stoffe und die Endlagerung radioaktiver Abfälle, aber auch die Emissions- und Immissionsüberwachung bei nichtkerntechnischen Anlagen und Einrichtungen.

3 Schutz vor den Auswirkungen nuklearer Unfälle und anderer Bedrohungen mit radioaktivem Material

3.1 Ausgangssituation

Nach den EURATOM-Grundnormen wie auch nach den Empfehlungen der IAEA ist Deutschland verpflichtet, ein Notfallschutzmanagementsystem zu etablieren und weiter zu entwickeln, um bei radiologischen bzw. nuklearen Notfällen die negativen Folgen für Gesundheit, Umwelt, Wirtschaft und sozialem Leben zu minimieren. Hierfür betreibt der Bund u. a. Überwachungsprogramme und ein Radiologisches Lagezentrum (RLZ), welches im Notfall eine umfassende Bewertung der radiologischen Lage vornimmt, die maßgeblich für alle deutschen Behörden ist.

Auch nach dem Ausstieg Deutschlands aus der Kernenergie gibt es weiterhin dreizehn Notfall-Szenarien – von Unfällen in grenznahen ausländischen Kernkraftwerken, die ein unverändert hohes Schadenspotential haben, bis hin zu nuklearterroristischen Szenarien.

Die Nuklearspezifische Gefahrenabwehr (NGA) dient der Bewältigung von solchen Szenarien, in denen radioaktive Stoffe unbefugt gehandelt, missbräuchlich verwendet oder gezielt eingesetzt werden und bei denen es zu einer potenziellen Gefährdung von Leben und Sachgütern kommt. Im Rahmen des Unterstützungsverbundes CBRN (steht für: chemisch, biologisch und radiologisch/nuklear) unterstützt das BfS andere Bundesbehörden fachlich und operationell bei der Bewältigung solcher Situationen.

In einer zunehmend komplexer werdenden und vernetzten Welt ändern sich die Bedrohungsszenarien ständig. Neue Reaktortypen - auch wenn in Deutschland nicht eingesetzt, aber für den Einsatz in Nachbarländern in Diskussion –, neue Reaktorstandorte (z. B. in Polen) und neue Arten von kerntechnischen Anlagen (z. B. schwimmende Kernreaktoren) und kerntechnischen Anwendungen (z. B. Nuklearantriebe im militärischen Bereich) müssen in Hinblick auf ihr Schadenspotential analysiert werden.

Schutzstrategien dürfen sich nicht auf den rein physischen Schutz vor Strahlung beschränken. Aspekte der Kommunikation, der psychosozialen und ökonomischen Folgewirkungen von Schutzmaßnahmen werden bisher in der Notfallschutzplanung noch nicht ausreichend berücksichtigt. Auch bestehen noch weitere Optimierungspotenziale bei der Verzahnung des radiologischen Notfallschutzes mit dem allgemeinen nationalen Notfallmanagementsystem in Deutschland.

3.2 Zukünftige Forschungsthemen

Software-Tools

Ein effizient arbeitender Notfallschutz benötigt ausfallsichere, schnell arbeitende und leicht bedienbare Werkzeuge, um tatsächliche und zu erwartende Dosen für die Bevölkerung zu ermitteln. Dabei sind auch besonders vulnerable Gruppen sowie im Extremfall auch Einzelpersonen zu berücksichtigen.

Die Fähigkeit zur schnellen Erstellung des bundesweit maßgeblichen Radiologischen Lagebilds – das immer stärker differenzierte Bedürfnisse eines immer größeren Adressatenkreises bedient – muss kontinuierlich verbessert werden.

Prognosemodelle zur schnellen Vorhersage von radiologischen Auswirkungen von Notfällen müssen weiterentwickelt werden und an geänderten Rahmenbedingungen (z.B. höhere Flexibilisierung im Einsatz) angepasst werden.

Die IMIS-Softwarekomponenten müssen entsprechend den Entwicklungsprämissen permanent weiterentwickelt werden. Hierbei spielen auch Aspekte der Robustheit und Ausfallsicherheit der Kommunikationsinfrastruktur bei großräumigen komplexen Schadenslagen eine zunehmende Rolle. IMIS

ermöglicht es so, die Umweltradioaktivität flächendeckend schnell und zuverlässig zu erfassen, zusammenzuführen, zu dokumentieren und zu bewerten und auch der Öffentlichkeit in nutzerfreundlicher Form zur Verfügung zu stellen. Hierzu sind auch Aspekte der Wissens- und Risikokommunikation zu beforschen.

Mess- und Analysemethoden

Mobile Messsysteme für Rucksack-, Fahrzeug- und unbemannte Trägersystem-gestützte Anwendungen müssen permanent weiterentwickelt werden, ebenso wie Messstrategien und Verfahren zur Koordinierung und Einsatzleitung der beteiligten Messdienste.

Mess- und Analysemethoden zur Bestimmung von Radionukliden in der Atmosphäre müssen fortlaufend weiterentwickelt werden (u. a. zur Berücksichtigung von „untypischen“ Radionukliden, wie bei internationalen Vorfällen mit Freisetzungen von radioaktiven Stoffen in die Atmosphäre in der jüngeren Vergangenheit zu beobachten).

Das BfS ist auf dem Gebiet der Nuklearen Forensik tätig und wird die Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Partnern pflegen. So werden die BfS Methoden der nuklearen Forensik weiterentwickelt, um die Sicherheitsbehörden optimal unterstützen zu können.

Nach einer Freisetzung müssen die intrinsisch unsicheren Prognosen umgehend durch Messungen ergänzt werden. Dabei haben Messungen der Ortsdosisleistung eine Schlüsselfunktion. Sie müssen schnell erfolgen und in einer geografischen Auflösung, die eine zügige und konsistente Entscheidung über Schutzmaßnahmen ermöglicht. Optimierte Messstrategien unter Verwendung moderner Messtechnik – basierend auf spektroskopischen Detektoren und insbesondere mobilen Trägersystemen – sind weiter zu entwickeln. Dazu zählen Hubschraubersysteme, Messfahrzeuge sowie unbemannte Fluggeräte (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs).

Die operative Detektionstechnik wird in diesem Zeitraum um aktive Methoden wie Neutronenaktivierung und mobile Röntgenblitzgeräte erweitert werden. Damit werden den Einsatzkräften stark verbesserte Möglichkeiten bei der Suche nach radioaktiven Stoffen zur Verfügung stehen. Durch UAV-gestützte Detektion wird die Aufklärung der radiologischen Lage beschleunigt und mit weniger Risiken für die Einsatzkräfte verbunden sein.

Auswertung von Messdaten

Automatisierte Auswerteverfahren, die auf Verfahren der Künstlichen Intelligenz (KI) basieren, können zu einer weiteren Beschleunigung des Messprozesses und der Evaluation der Messdaten führen. Derartige KI-Verfahren sollen auch genutzt werden, um Messdaten optimal mit zusätzlichen nicht-radiologischen Daten und Informationen zu kombinieren (z. B. mit Angaben zu Aufenthaltsorten und -zeiten der betroffenen Bevölkerung), um individuelle Dosisabschätzungen für die Bevölkerungen und für Einsatzkräfte zu verbessern. Besonderer Schwerpunkt soll hierbei auf die messdatengestützte Dosisrekonstruktion in urbanen Gebieten gelegt werden.

Einbeziehen der Bevölkerung

Wichtig für die Bewältigung eines radiologischen Notfalles ist auch die vertrauenswürdige Vermittlung der Messdaten an die Bevölkerung. Die Möglichkeiten zur Berücksichtigung von „Citizen Science“-Projekten sowie deren potenzielle Integration in das Gesamtkonzept der Datenermittlung und -vermittlung sowie in das Radiologische Lagebild ist zu prüfen.

Schutzstrategien

Radiologische Schutzziele und Schutzstrategien sowie die Instrumente und Maßnahmen zur Bewältigung einer radiologischen Lage müssen stärker in Kontext zu den Zielen anderer Entscheidungstragende in einer Krisenlage gesetzt werden und Erkenntnisse aus anderen Krisen verstärkt berücksichtigt werden. Negative Folgen für Gesundheit, Umwelt, Wirtschaft und sozialem Leben müssen auf Grundlage einer ganzheitlicheren Betrachtungsweise und Krisen-Bewältigungsstrategie besser minimiert oder vermieden werden.

Prognosen und Modellierungen

Im Rahmen der Eigenforschung werden die im BfS vorhandenen Modellierungs-Fähigkeiten ausgebaut werden. So wird der Anwendungsbereich von Ausbreitungsmodellen auf Szenarien mit Kernexplosionen ausgeweitet werden, um die Fähigkeiten zur Lagebild-Erstellung auch auf derartige Szenarien auszuweiten. Weiterhin wird die Dosisrekonstruktion für die Anwendung auf besonders vulnerable Gruppen in der Bevölkerung und Einsatzkräfte erweitert werden.

Innovative Methoden der inversen Modellierung (Quantifizierung unfallbedingter Freisetzungen oder Bestimmung eines unbekanntes Freisetzungsortes) mit Hilfe Bayes'scher Ansätze liefern wichtige Zusatzinformationen und könne auch im Rahmen der Umweltüberwachung bis hin zur Verifikation von Rüstungskontrollsystemen eingesetzt werden. Die bereits im BfS genutzten Verfahren für die inverse Modellierung werden – in enger internationaler Zusammenarbeit – weiterentwickelt und mit anderen international genutzten Verfahren verglichen.

Durch eine immanente Abschätzung von Unsicherheiten von Prognosen bei Ausbreitungssimulationen wird deren Belastbarkeit bei der Entscheidung von Schutzmaßnahmen verbessert werden.

Gefährdungsanalysen

Als Grundlage für die regelmäßige Anpassung der staatlichen Notfallschutzplanung müssen zukünftig regelmäßig Gefährdungsanalysen für die unterschiedlichsten Notfallszenarien überprüft und ggf. neu erstellt werden. Dies ist absehbar notwendig für Gefährdungsanalysen für neue Reaktortypen (z. B. „Small Modular Reactors“ SMRs) oder neue, vor allem europäische Standorte, aber auch für neue Notfallszenarien wie z. B. Unfälle mit schwimmenden Kernkraftwerken (KKWs), nuklear angetriebenen Schiffen oder neue terroristische Bedrohungslagen (z. B. „Improvised Nuclear Devices“).

Inkorporationsüberwachung

Durch das neue Strahlenschutzrecht wird auch der Bestimmung der Exposition von Einsatzkräften und der Bevölkerung mehr Gewicht als bislang gegeben. Die bisher geringe Bedeutung dieses Themas hat dazu geführt, dass kaum methodische und organisatorische Kenntnisse darüber vorliegen, wie eine Inkorporationsüberwachung unter den besonderen Belangen des Notfallschutzes gelingen kann. Das betrifft die Anwendung von schnellen chemischen Analyseverfahren in der Ausscheidungsanalytik, die Möglichkeiten von Vor-Ort-Messungen bei den In-vivo-Verfahren sowie in beiden Bereichen die Messbarkeit exotischer Radionuklide. Die methodischen Kenntnisse, die auch im internationalen Umfeld noch nicht ausreichend vorhanden sind, können vor allem durch Eigenforschung im Rahmen von internationalen Kooperationen gewonnen werden. Eine verbesserte Organisation der Inkorporationsüberwachung in Notfällen, die auf die strukturellen Gegebenheiten in Deutschland eingehen muss, soll entwickelt werden.

Interdisziplinäres Lageverständnis

Ein interdisziplinärer Forschungsansatz soll neue Erkenntnisse zu Lagebildern und zum Lageverständnis untersuchen, um daraus Optimierungspotentiale für das Radiologische Lagebild des Bundes abzuleiten. Im Zentrum stehen wissenschaftliche Fragestellungen nach Methoden, Prognosemodellen, Instrumenten und Arten der Informationsaufbereitung, die die Grundlage für gemeinsames Verstehen, Handeln und Entscheiden in Krisensituationen bilden. Untersucht werden sollen vielfältige Fach-Organisationen aus Wirtschaft, Politik und Verwaltung, die in Krisenlagen agieren und reagieren. So kann die Entwicklung von (interdisziplinären) Prognosen zu den kurz-, mittel- und gegebenenfalls langfristige Konsequenzen von Entscheidungen, die auf Grundlage eines Lagebildes getroffen werden, ein wesentlicher neuer Baustein sein, um künftig komplexen Krisen- und Großschadenslagen in ihrer Bewältigung sicherer zu begegnen. Außerdem soll das radiologische Lagebild so weiterentwickelt werden, dass es auch für die Nutzung als Grundlage für die Information der Bevölkerung besser verwendbar ist.

Forschungsplattformen

Das BfS ist über Forschungsplattformen wie die internationale Notfallschutzplattform (European Platform on Preparedness for Nuclear and Radiological Emergency Response and Recovery – NERIS) gut vernetzt und wird sich in unterschiedlichem Ausmaß an Ausschreibungen für Kollaborationen beteiligen. Diese Form der Forschung bietet sich vor allem für die „klassischen“ Themen des Notfallschutzes an, die sich um die Aufgaben der Dosismodellierung, Ausbreitungsprognosen, Schutzstrategien sowie der Messtechnik und Messstrategie gruppieren.

Auswirkungen von neuen Notfallszenarien

Auch für die Analyse der möglichen Auswirkungen von neuen Notfallszenarien – wie z. B. Notfälle in neuen Reaktortypen (z. B. SMRs) oder an neuen Standorten (so werden etwa zukünftig international vermutlich zahlreiche „kleine“ Leistungsreaktoren näher an Städten gebaut als bisher), Unfälle mit schwimmenden KKWs oder nuklear angetriebenen Schiffen oder neue terroristische Bedrohungslagen (z. B. „Improvised Nuclear Devices“) – bieten sich internationale Forschungsprogramme als geeigneter Rahmen an.

Nationale und internationale Kollaborationen des BfS sind Teil ebenfalls des kontinuierlichen Prozesses, in dem spezifische Fragen im Bereich der nuklearen Forensik erforscht werden und die technischen und operativen Möglichkeiten der NGA auf zukünftige Anforderungen vorbereitet werden. Von besonderem Interesse für die NGA sind dabei die Themen Nukleare Forensik, Funde bzw. Untersuchungen von Material außerhalb der regulativen Kontrolle (engl. "Material Out of Regulatory Control", MORC) und radiologische Detektionstechnik. Die NGA des BfS beteiligt sich an internationalen Kollaborationen mit zahlreichen Partnern und steuert physikalisches, chemisches und medizinisches Fachwissen rund um das Thema Radioaktivität sowie den Einsatz von Messtechnik zur Gefahrenabwehr bei.

Zu ausgewählten Themen wie z.B. der Remote-Detektion von Alpha-Strahlung durch UV-Emissionen gibt es zusätzlich bilaterale Kooperationen mit ausländischen Forschungseinrichtungen (Universität Tampere, Finnland) oder Behörden.

Mittelfristig ist auch durch diese Kollaborationen eine kontinuierliche Verbesserung der technischen und operativen Fähigkeiten der NGA in Deutschland zu erwarten.

3.3 Ausblick

Auch langfristig wird sich der Forschungsbedarf im Notfallschutz auf die Themen Messtechnik und radiologische Detektionstechnik, Nutzung von Robotertechnik, unbemannten Fahrzeugen und Drohnen, nukleare Forensik, Datenauswertung, Dosisprognosen, Schutzstrategien und Information der Bevölkerung konzentrieren. Dabei werden in zunehmendem Maße neue IT-technische Hilfsmittel zum Einsatz kommen, wie Verfahren zur Analyse großer Datenmengen („Big Data“), künstliche Intelligenz bei der Datenauswertung und der Beurteilung der radiologischen Lage, bei der synoptischen Datenprüfung, sowie beim Einsatz und der Steuerung von unbemannten mobilen Detektorsystemen und Robotern. Beispielsweise ist zukünftig der koordinierte Einsatz einer Vielzahl von unbemannten luft- oder boden-gestützten Messsystemen vorstellbar („Schwarm-Messungen“), die die schnelle und detaillierte radiologische Analyse auch von großen Gebieten ohne Gefährdung von Einsatzkräften ermöglichen würde.

In einer breiter gefassten Perspektive muss der Notfallschutz sich noch mehr in ein gesamtstaatliches Konzept der Katastrophenvorsorge und des Bevölkerungsschutzes einfügen. Themenfelder der allgemeinen Katastrophenforschung müssen mit den spezifischen Themen des Strahlenschutzes verknüpft werden. Neben dem physischen Schutz vor Strahlung nach einem radiologischen oder nuklearen Notfall müssen Schutzmaßnahmen und Krisenkommunikationskonzepte sich einer interdisziplinären Evaluierung stellen. Den grundlegenden Anforderungen des Strahlenschutzes von Optimierung und Rechtfertigung muss auch im gesamten Kontext einer komplexen Schadenslage unter gleichberechtigter Gewichtung von strahlenschutzfachlichen, soziologischen, psychologischen, ökonomischen und politischen Aspekten entsprochen werden können.

4 Strahlenschutz in der Medizin

4.1 Ausgangssituation

Diagnostische und therapeutische Strahlenanwendungen haben in den letzten Jahren enorme methodische Fortschritte zum Wohle der Patient*innen erfahren. Andererseits hat diese Entwicklung aber auch zu einem erheblichen Anstieg der Strahlenexposition der Bevölkerung geführt. Mehr als 95 % der kollektiven Strahlenexposition der Bevölkerung aus zivilisatorischen Quellen in Deutschland resultieren derzeit aus medizinischen Strahlenanwendungen. Mit ca. 110 Mio. Projektionsradiographien und rund 13 Mio. Computertomographien – Tendenz steigend – leistet die Röntgendiagnostik den überwiegenden Beitrag dazu. Hinzu kommen pro Jahr etwa 470.000 Strahlentherapien.

Wesentlicher Faktor für die erzielten Fortschritte ist die rasante technologische Entwicklung neuer radiologischer, nuklearmedizinischer und strahlentherapeutischer Technologien. Diese Entwicklung wird sich zukünftig durch die fortschreitende Digitalisierung sowie den Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) weiter beschleunigen. Aus diesem Grund kommt der Erfassung und Bewertung der Exposition der Bevölkerung und spezieller Patientengruppen durch medizinische Strahlenanwendungen (vgl. § 185 Abs. 2 Nr. 2 StrlSchG) sowie der Optimierung (vgl. §§ 14 Abs. 1 Nr. 5 und 83 Abs. 5 StrlSchG) und Rechtfertigung (vgl. §§ 6 Abs. 1 und 83 Abs. 2 StrlSchG) dieser Verfahren ein hoher Stellenwert zu.

Die langjährige Erfahrung des BfS zeigt jedoch, dass der Schwerpunkt der Hersteller medizinischer Geräte und klinisch tätiger Ärzteschaft bei der Bewertung neuer Strahlenanwendungen primär auf dem Aspekt des Nutzens liegt. Strahlenhygienische Aspekte wie Dosimetrie, Risikobewertung und Qualitätssicherung werden oft nur am Rande berücksichtigt. Geräte mit neuen Funktionsprinzipien, verbesserten Gerätetechnologien sowie neuen Methoden der Bildrekonstruktion, -bearbeitung und -auswertung erfordern aber eine kontinuierliche Bewertung und Neubewertung im Hinblick auf die Patientendosis, die Qualitätssicherung und Patientensicherheit (insbesondere von vulnerablen Personen wie Kindern oder Schwangeren). Eine besondere Herausforderung stellt der Einsatz neuer Methoden der künstlichen Intelligenz in allen Phasen der Bildgebung dar, angefangen von der Bildgewinnung bis zur Befundung.

Es ist daher von erheblicher Bedeutung, diese Entwicklungen unter strahlenhygienischen Gesichtspunkten stets zu begleiten und zu bewerten.

4.2 Zukünftige Forschungsthemen

Strahlenhygienische Bewertung neuer Geräte- und Software-Technologien

Ende 2021 befinden sich verschiedene neue Gerätetechnologien der medizinischen Bildgebung in der (prä)klinischen Erprobungsphase. Hierzu gehören in der Röntgenbildgebung u. a. die Single-Photon-Counting-Computertomographie (CT), durch die der Messprozess vollständig digitalisiert wird, sowie die Phasenkontrast-Bildgebung und die damit verbundene Dunkelfeldkontrastradiographie mit einem vollständig neuen Kontrastmechanismus. Weiterhin sind quasi monoenergetische Röntgenquellen (Brilliant Light Sources) mit ersten Prototypen für medizinische Anwendungen Gegenstand der Forschung. Eine zentrale Bedeutung kommt auch innovativen Bildrekonstruktionsverfahren, teilweise unter Verwendung von Methoden der Künstlichen Intelligenz, zu. Sie bieten die Möglichkeit, die Dosis zu reduzieren ohne die Bildqualität zu beeinträchtigen. Innovative Ansätze in der Strahlentherapie, wie die Therapie mit sehr hohen Dosisraten („Flash“-Therapie), die Einbeziehung neuer Methoden der physiologischen und molekularen Bildgebung in die Bestrahlungsplanung oder die hochfokussierte Hypofraktionierung, erlauben neue Behandlungskonzepte. Auch in der Nuklearmedizin sind rasante technische Entwicklungen zu verzeichnen, z. B. Silizium-Photoelektronenvervielfacher und Compton-Kameras, die es ermöglichen, die zu applizierende Radioaktivität wesentlich zu reduzieren und damit auch die Strahlenexposition bei vergleichbarer oder sogar besserer Bildqualität. Um den Strahlenschutz von Patient*innen bei der

Anwendung radioaktiver Stoffe oder ionisierender Strahlung bestmöglich zu gewährleisten, sind u. a. die vorgenannten Entwicklungen unter strahlenhygienischen Aspekten (Optimierung und Qualitätssicherung) durch eigene Untersuchungen oder im Rahmen von Ressortforschungsvorhaben kontinuierlich zu bewerten.

Softwareseitig hat der Einsatz von KI-basierten Methoden in den letzten Jahren zu einer Vielzahl neuer Entwicklungen geführt. Zu nennen sind hier etwa neue Algorithmen zur computerassistierten Diagnose von Tumoren, welche von Experten als erster Schritt hin zur automatisierten Computerdiagnose gesehen wird. Darüber hinaus verspricht der Einsatz von KI-basierten Algorithmen bei der Bilderzeugung, insbesondere in der CT, eine deutliche Reduktion der Patientendosis bei gleichbleibender Bildqualität. Die Gefahr bei KI-basierten Bildrekonstruktionsverfahren besteht jedoch darin, dass einerseits Artefakte erzeugt werden können, die medizinisch als Läsionen interpretiert werden, und andererseits kleine pathologische Strukturen nivelliert werden. KI-basierte Methoden liefern besonders gute Ergebnisse in Situationen mit einfachen Geometrien oder in Fällen auf die sie speziell trainiert wurden. Das hat zur Folge, dass die etablierten messtechnischen Prüfungen, z. B. zur Bestimmung der Bildqualität, unter Verwendung einfacher geometrischer Phantome mit homogener Dichte und Materialzusammensetzung nicht mehr zu aussagekräftigen Ergebnissen führen. Daher sind insbesondere auch neue Methoden der Qualitätskontrolle zu entwickeln und zu bewerten.

Ein vielversprechender methodischer Ansatz zur Bewertung bildgebender Systeme beruht auf der Verwendung komplexer statistischer Modelle ("Modell-basierte Beobachter"), mit denen es möglich ist, bildgebende Systeme unter Berücksichtigung von Bildqualität und Dosis bezüglich ihrer Dosiseffizienz zu charakterisieren. Dieser innovative Ansatz soll konkret im Hinblick auf die Anwendbarkeit an etablierten CT-, neuartigen Photon-Counting-CT-, digitalen Volumentomograph (DVT) - sowie Tomosynthese-Systemen im Rahmen der Eigenforschung in Kooperation mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt fortentwickelt und insbesondere durch umfangreiche Messkampagnen in Kliniken und Praxen evaluiert werden.

Individualisierung der Patientendosimetrie und der Bestrahlungsplanung

In den letzten 20 Jahren hat die rasante technologische Entwicklung in der Strahlentherapie mit externen Quellen (Teletherapie) zu hochpräzisen Bestrahlungsverfahren geführt, die kontinuierlich weiterentwickelt werden. Leider hat die Bewertung verschiedener strahlenhygienischer Aspekte mit dieser Entwicklung nicht Schritt gehalten. So beruht beispielsweise die Dosisabschätzung für Gewebe außerhalb des Bestrahlungsfeldes (wie z. B. für Embryo und Fötus bei einer medizinisch indizierten Strahlentherapie der Mutter) auf Daten für ältere, weniger präzisen Bestrahlungstechniken, die häufig nicht auf moderne Verfahren übertragbar sind. Der diesbezüglich bestehende Forschungsbedarf soll über eine Kombination eigener Forschung (intramurale Forschung) und Vergabe von Forschungsaufträgen an Dritte (extramurale Forschung) gedeckt werden.

Neben der Strahlentherapie hat sich auch die nuklearmedizinische Therapie stark weiterentwickelt. In der nuklearmedizinischen Therapie von Tumoren und Stoffwechselerkrankungen werden immer häufiger Alpha- und Beta-emittierende Radiopharmaka eingesetzt. Sie deponieren aufgrund der kurzen Reichweite der von ihnen emittierten Strahlung (zwischen Mikro- und Millimetern) Energie hochfokussiert im Gewebe. Voraussetzung für den sicheren Einsatz ist jedoch, dass sich das Radiopharmakon spezifisch im erkrankten Gewebe und nicht oder nur schwach in gesunden Geweben anreichert. Die Biokinetik und die interne Dosimetrie möglicher Radiopharmaka sind aktuell noch nicht ausreichend erforscht. Insbesondere der beim Alphazerfall erzeugte Rückstoß kann eine Abtrennung des Radionuklids vom Trägermolekül verursachen, was zu einer Ablagerung von Radionukliden im gesunden Gewebe und einer unbeabsichtigten Bestrahlung desselben führen kann. Daher sind Verfahren fortzuentwickeln und zu validieren, mit deren Hilfe auf Basis von Bilddaten und Monte-Carlo-Simulationen die tatsächliche Dosisverteilung und eventuelle Abweichungen von der geplanten Dosisverteilung ermittelt werden können. Auch in der Diagnostik und Therapie mit Radiopharmazeutika werden strahlenhygienische Aspekte bei vulnerablen Personengruppen - wie Kindern, Schwangeren, Feten oder Personen, bei denen Vorerkrankungen die Biokinetik der

applizierten Substanzen stark beeinflussen können - oft nicht adäquat berücksichtigt. Hierzu besteht Forschungsbedarf.

Bewertung der Strahlenexposition und des Strahlenrisikos der Bevölkerung und bestimmter Patientengruppen

Die Früherkennung von Krankheiten spielt eine wichtige Rolle in der gesundheitlichen Versorgung der Bevölkerung. Hierbei kommt radiologischen Verfahren eine hohe Bedeutung zu. Prominentes Beispiel und gleichzeitig das Stand 2021 einzige in Deutschland zugelassene strahlendiagnostische Verfahren ist die Mammographie zur Früherkennung von Brustkrebs im Rahmen des qualitätsgesicherten organisierten Mammographie-Screening-Programms (MSP) für Frauen im Alter zwischen 50 und 69 Jahren. Zum einen begleitet das BfS seit 2010 aktiv die äußerst komplexe Evaluation des MSP hinsichtlich der langfristigen Wirkung auf die Brustkrebsmortalität im Rahmen eines langjährigen Ressortforschungsvorhabens. Hierbei wird das Gesamtprojekt durch einen Wissenschaftlichen Beirat fachlich begleitet. Zum anderen wird durch das BfS zukünftig geprüft werden, ob eine Erweiterung der Altersgrenzen im MSP hinsichtlich des Nutzens und der Risiken zu rechtfertigen ist. Die Prüfung von Früherkennungsverfahren ist gesetzlich vorgesehen. Hierzu verfasst das BfS gemäß Strahlenschutzverordnung jeweils einen wissenschaftlichen Bericht unter Einbeziehung einer interdisziplinären Sachverständigengruppe und kommt so auch seiner Pflicht zur ressortübergreifenden Politikberatung nach.

Differenzierte Erfassung und Bewertung der medizinischen Strahlenexposition spezieller Patientengruppen

Die Abschätzung und strahlenhygienische Bewertung der medizinischen Strahlenexposition in der Bevölkerung ist eine Amtsaufgabe des BfS. Für die Risikobewertung ist es unabdingbar, nicht nur die Dosis, sondern auch Alter und Geschlecht der Patient*innen zu berücksichtigen, da diese Parameter wichtige Einflussfaktoren für das individuelle Strahlenrisiko darstellen. Ebenso ist es von Bedeutung, indikationenspezifische Auswertungen durchzuführen, da häufige und strahlenintensive radiologische Maßnahmen bei einer schweren Erkrankung mit geringer Lebenserwartung strahlenhygienisch anders zu bewerten sind als bei einer Erkrankung, die mit einer hohen Heilungschance einhergeht. Im Hinblick auf diese Fragestellungen plant das BfS, differenzierte Studien auf Basis bereits etablierter Quellen durchzuführen oder durchführen zu lassen.

Bewertung der Exposition von Hirn und Herz durch diagnostische und interventionelle Strahlenanwendungen

Die ICRP geht in aktuellen Bewertungen davon aus, dass bei einer Organdosis von mehr als 500 mSv langfristig kardio- und zerebrovaskuläre Strahlenschäden auftreten können. Um die Relevanz dieser Neubewertung für diagnostische und interventionelle Strahlenanwendungen beurteilen zu können, soll für ein großes repräsentatives Kollektiv von Patient*innen die über einen längeren Zeitraum kumulierte Herz- und Hirndosis personenspezifisch ermittelt und im Hinblick auf die zugrundeliegenden Erkrankungen, das Alter der Patient*innen sowie ihre mittlere Lebenserwartung analysiert werden.

4.3 Ausblick

Es ist zu erwarten, dass die rasante Entwicklung von Strahlenanwendungen in der Medizin weiter anhält oder sich sogar beschleunigt. Für das BfS sind unter anderem folgende Aspekte von besonderem Interesse:

Gerätetechnische Entwicklungen

Verschiedene in der methodischen Entwicklung befindliche Technologien, wie z. B. quasi-monoenergetische Röntgenquellen, werden voraussichtlich in den nächsten Jahren in die klinische Erprobungsphase kommen und eine Verbesserung der Bildqualität durch ein deutlich besseres Kontrast-Rausch-Verhältnis ermöglichen. Hierfür müssen ggf. neue Konzepte der Qualitätssicherung entwickelt werden. Darüber hinaus werden bereits existierende Geräte mit integrierter MR-Bildgebung, wie Elektronenlinearbeschleunigern in der Strahlentherapie, Positronen-Emissions-Tomographen in der Diagnostik oder weiteren Gerätekombinationen, immer häufiger Anwendung finden. In diesem Zusammenhang bedürfen grundlegende strahlenhygienische Fragen einer Klärung, wie beispielsweise der physikalischen und insbesondere der biologischen Wechselwirkung von ionisierender Strahlung oder radioaktiven Stoffen mit der für die MR-Bildgebung erforderlichen magnetischen und elektromagnetischen Feldkomponente.

Früherkennung schwerwiegender Erkrankungen mittels radiologischer Bildgebung

Aktuelle Strategien im Gesundheitswesen zielen immer stärker auf die frühzeitige Erkennung von häufig in der Bevölkerung auftretenden und gesundheitsökonomisch relevanten schweren Krankheiten oder deren Risikofaktoren ab. Hierfür bieten radiologische Bildgebungsverfahren, insbesondere die CT, aufgrund ihrer Nichtinvasivität und hohen Ortsauflösung ideale Voraussetzungen. Für alle Früherkennungsuntersuchungen gilt, dass aufgrund der typischerweise geringen Prävalenz der in Betracht gezogenen schweren Krankheiten nur ein kleiner Teil der asymptomatischen Teilnehmer von dem jeweiligen Test profitiert, wohingegen alle die mit dem Test verbundenen unerwünschten Wirken (falsch-positive und falsch-negative Befunde, Invasivität der Abklärungsdiagnostik, Überdiagnostik) sowie - bei radiologischen Verfahren - die Strahlenrisiken tragen. Daher kommt der evidenzbasierten Nutzen-Risiko-Bewertung möglicher Früherkennungsuntersuchungen eine hohe Bedeutung zu.

Digitalisierung und künstliche Intelligenz

Die sich noch am Anfang befindliche Entwicklung von assistiven IT-Systemen in der medizinischen Diagnostik und Therapie wird weiter an Bedeutung gewinnen. Die automatisierte Befundung und Bestrahlungsplanung wird schrittweise Einzug in den klinischen Alltag halten. Auch Dosismanagementsysteme zur automatisierten Überwachung der Patientendosis werden immer mehr Verbreitung finden. Diese Systeme können zu Präventionssystemen weiterentwickelt werden, um IT-gestützt, ggf. unter Verwendung von KI-basierten Algorithmen, Warnmeldungen über Geräteveränderungen oder -fehlfunktionen auszugeben, aber auch Optimierungsbedarf automatisiert zu ermitteln. Für den sicheren Einsatz von assistiven IT-Systemen müssen Kriterien bezüglich Qualitätssicherungsaspekten und der Patientensicherheit entwickelt und festgelegt werden.

Individualisierung der Therapie

Die aktuellen Fortschritte in der medizinischen Bildgebung erlauben eine deutlich stärkere Individualisierung der Therapie. So wird die verbesserte Charakterisierung von Tumoren bezüglich ihrer physiologischen und molekularen Eigenschaften, z. B. die Bestimmung ihrer Therapieresistenz mittels spezifischer Hypoxietracer oder die Berücksichtigung der individuellen Strahlenempfindlichkeit, eine patientenspezifische biologische Therapie ermöglichen.

Die vorgenannten Entwicklungen sind vom BfS in enger und kontinuierlicher Zusammenarbeit mit Universitätsklinik, Forschungszentren sowie der medizintechnischen und pharmazeutischen Industrie wissenschaftlich kompetent und systematisch unter strahlenhygienischen Aspekten zu bewerten und durch die Entwicklung adäquater Qualitäts- und Sicherheitsstandards zu flankieren.

5 Strahlenschutz im Beruf

5.1 Ausgangssituation

In Deutschland sind zurzeit ca. 450.000 Personen insbesondere in der Industrie, Medizin, Forschung und Luftfahrt als beruflich exponierte Personen eingestuft. Die Vielfalt der Berufsfelder und Expositionsbedingungen erfordern eine weit gefächerte Betrachtung der technologischen und gesellschaftlichen Entwicklungen, die auf die unterschiedlichen Bereiche des beruflichen Strahlenschutzes Auswirkungen haben können. Diese Vielfalt bietet jedoch auch die Chance, themenübergreifende Entwicklungen in verschiedenen Bereichen gemeinsam nutzen zu können.

In allen Bereichen des beruflichen Strahlenschutzes spielen neue Verfahren, die abschaltbare Strahlenquellen einsetzen oder ganz ohne ionisierende Strahlung auskommen, als Ersatz für die Verwendung radioaktiver Stoffe eine große Rolle. Zum Beispiel zeichnen sich mit dem Einsatz von Ultrakurzpuls-Lasern (UKP-Laser) als Strahlenquellen und von Generatoren monoenergetischer Röntgenstrahlung neue Verfahren ab, die bezüglich des beruflichen Strahlenschutzes in Genehmigungsverfahren und bei Bauartzulassungen verstärkter Beschäftigung bedürfen.

In der Nuklearmedizin wurden in den letzten Jahren neue diagnostische und therapeutische Strahlenanwendungen eingeführt, die auch Auswirkungen auf die Strahlenexposition des medizinischen Personals haben und im beruflichen Strahlenschutz untersucht und bewertet werden müssen. Das betrifft insbesondere Radionuklide wie Ra-223, Th-227 und Ac-225, die in ihrer Zerfallsreihe mehrere Alphateilchen pro Atom emittieren und deshalb besonders große Dosiskoeffizienten besitzen.

In der Kerntechnik sind die weitreichenden Entwicklungen im Zusammenhang mit dem Ausstieg aus der Kernenergie zu nennen, die auch mit großen Veränderungen im Bereich des beruflichen Strahlenschutzes einhergehen. Lag in der Vergangenheit der Fokus auf dem Schutz der Beschäftigten beim Betrieb von Kernkraftwerken, so treten immer mehr die Themen Rückbau, Stilllegung, Zwischen- und Endlagerung in den Vordergrund, bei denen aufgrund anderer Arbeitstätigkeiten neue Aspekte und Herausforderungen für den beruflichen Strahlenschutz gelten.

5.2 Zukünftige Forschungsthemen

Differenzierte Erfassung und Bewertung beruflicher Expositionen des medizinischen Personals

Aufgrund verbesserter beruflicher Strahlenschutzmaßnahmen sind in den letzten Jahren die beruflichen Expositionen in vielen Berufsfeldern im Mittel stetig zurückgegangen. Gleichzeitig sind durch technische Innovationen, insbesondere im Bereich der Medizin, spezialisierte Bereiche entstanden, in denen die Beschäftigten einer erhöhten Strahlenexposition ausgesetzt sein können. Beispiele hierfür sind die interventionelle Radiologie und die Therapie mit Radiopharmaka. So ist es möglich, dass entgegen dem allgemeinen Trend einzelne Beschäftigte bzw. Berufsgruppen einer zunehmenden Strahlenexposition ausgesetzt sind. Konkrete Auswertungen und Zahlen liegen hierzu jedoch noch nicht vor. Aus diesem Grund werden eine grundlegende wissenschaftliche Untersuchung dieses Themas und eine entsprechende strahlenhygienische Bewertung angestrebt. Zur Betrachtung der Risikopotenziale sollen sowohl die effektive Dosis als auch die Organ-Äquivalentdosis (z. B. Hand, Augenlinse) mit einbezogen werden. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für die Überprüfung bzw. Verbesserung bestehender oder die Erarbeitung neuer Regelungen, um insgesamt die arbeitsplatzspezifische Strahlenexposition des gesamten medizinischen Personals niedrig zu halten.

Inkorporationsüberwachung für neu angewendete Radionuklide, insbesondere in der Nuklearmedizin

Die Entwicklung neuer Radiopharmaka für die nuklearmedizinische Diagnostik und Therapie erfordert zum Schutz der Beschäftigten in Herstellung und Anwendung Kenntnisse über die Biokinetik, Dosimetrie und Messbarkeit der verwendeten Radionuklide. Vor allem sind für die in den letzten Jahren und auch weiterhin immer wieder neu entwickelten therapeutischen Radionuklide, die Alphastrahlung emittieren, neue Verfahren der chemischen Analytik erforderlich. Eine Herausforderung stellen die während der Herstellung durchlaufenen, unterschiedlichen chemischen Verbindungen bis zum fertigen Radiopharmakon, in dem das Radionuklid teils an ein komplexes Biomolekül gebunden ist, dar. Forschungsvorhaben zur Entwicklung geeigneter analytischer Verfahren können je nach den eingesetzten Methoden entweder im In-vitro-Labor des BfS durchgeführt oder im Rahmen des Ressortforschungsplans vergeben werden. Für manche Radionuklide und Radiopharmaka ist auch die Entwicklung geeigneter biokinetischer Modelle erforderlich.

Ausweitung der Nutzung der Monte-Carlo-Simulation in der Inkorporationsüberwachung

Monte-Carlo-Simulationen sind ein etabliertes Verfahren zur Berechnung des Verhaltens ionisierender Strahlung in Materie. Damit kann unter anderem die Messbarkeit von Radionukliden in der Inkorporationsüberwachung simuliert werden. Dennoch gibt es verschiedene Aspekte, insbesondere bei der Anwendung exotischer Radionuklide, die mit dieser Methode noch zu bearbeiten sind und die vor dem Hintergrund der verbreiteteren Anwendung solcher Nuklide an Bedeutung gewinnen. Insbesondere kann die Messbarkeit von Nukliden, die Neutronenstrahlung, Beta-plus-Strahlung und hochenergetische Beta-minus-Strahlung emittieren, mit Ganz- und Teilkörperzählern unter einer Vielzahl an Bedingungen durch solche Simulationen untersucht werden. Im Rahmen von Forschungsvorhaben sollen Simulationen zukünftig verstärkt eingesetzt werden, um offene Fragen des Strahlenschutzes zu beantworten.

Beruflicher Strahlenschutz im Rahmen der zukünftigen Entwicklungen beim Ausstieg aus der Kernenergie

Bis Ende 2022 sollen alle deutschen kerntechnischen Anlagen (Leistungsreaktoren) abgeschaltet werden. Für den Strahlenschutz liegt die zentrale Aufgabe künftig darin, die bislang hohen Sicherheitsstandards deutscher Kernkraftwerke im Betrieb auf den Bereich der Stilllegung zu übertragen. Dies bedeutet, dass dem beruflichen Strahlenschutz bei Arbeiten im Nachbetrieb, bei der Stilllegung und beim Rückbau dieser Anlagen sowie im Bereich Zwischen- und Endlagerung eine immer größere Bedeutung zukommt. So können beim Abriss von kontaminierten Gebäuden und Anlagen besondere Herausforderungen durch die dabei auftretenden Expositionen entstehen, die einen hohen Anspruch an den radiologischen Arbeitsschutz stellen. Ähnliches gilt auch für den Betrieb standortnaher Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente sowie für die Lagerung radioaktiver Abfälle aus Stilllegung und Abbau von Leistungsreaktoren. Auch hier hat der Strahlenschutz für die Umwelt, für die Bevölkerung und für die Beschäftigten einen sehr hohen Stellenwert. Um diesen hohen Standard im Bereich des beruflichen Strahlenschutzes zu gewährleisten, sind die Tätigkeiten durch umfangreiche Forschungsarbeiten zu begleiten. Da zu erwarten ist, dass bei der Stilllegung und beim Rückbau an vielen Stellen Neuland betreten wird, also neue Techniken einzusetzen sind und neue Expertise aufzubauen ist, müssen auch die begleitenden Forschungsaktivitäten über das bisherige Maß hinaus ausgebaut werden. Ziel dieser Arbeiten ist die Entwicklung von konkreten Handlungsanweisungen, von Vorschlägen zur Optimierung der Arbeitseinsätze und Arbeitsmittel und damit von Maßnahmen zur Optimierung des beruflichen Strahlenschutzes insgesamt.

Weltraumwetterphänomene und Auswirkungen auf die Strahlenexposition des fliegenden Personals

Flugpersonal ist Höhenstrahlung ausgesetzt, welche sich aus galaktischer und solarer Teilchenstrahlung zusammensetzt (GCR bzw. SCR für Galactic bzw. Solar Cosmic Radiation). Erstere trägt maßgeblich zur Ortsdosisleistung auf Reiseflughöhe bei, während letztere kaum das Erdmagnetfeld durchdringt. Während einer Sonneneruption kann es jedoch zur Entstehung hochenergetischer Teilchen kommen, die in die Erdatmosphäre eindringen können. Treten diese nach unserem derzeitigen Kenntnisstand nicht vorhersagbaren sogenannten Solar Particle Events (SPE) auf, so kann dies lokal zu einer erheblichen Erhöhung der Ortsdosisleistung auf Reiseflughöhe führen, welche jedoch in der

Strahlenschutzüberwachung noch nicht erfasst werden kann. Die Strahlenschutzüberwachung des fliegenden Personals erfolgt mittels spezieller Dosisberechnungsprogramme, die zur Berechnung der Körperdosis nur den Anteil der GCR berücksichtigen, da für eine Berücksichtigung der SCR durch SPEs eine für die Prüfung notwendige Datengrundlage fehlt. Da sich die Messung von Werten für die Ortsdosisleistung auf Reiseflughöhe während eines SPEs als sehr schwierig gestaltet, existieren bereits Modelle zur Berechnung von Dosiswerten infolge von SPEs auf Basis der Messdaten von Neutronenmonitoren und Weltraumwetter-Satelliten. Ziel ist es, die wissenschaftlichen Grundlagen zu erforschen, die die Entwicklung von Dosisberechnungsprogrammen ermöglichen, die bei der Berechnung der Körperdosis sowohl den Anteil der GCR als auch den Anteil der SCR berücksichtigen. Vergleiche bereits vorhandener Berechnungsmethoden des Anteils der SCR können die Datengrundlage liefern, den Einfluss von SPEs auf die Körperdosis des fliegenden Personals in die übliche Strahlenschutzüberwachung zu integrieren.

Ersetzung radioaktiver Strahlenquellen, alternative Technologien

Um die Risiken bei der Nutzung radioaktiver Strahlenquellen zu minimieren, sollen deren Anwendungen ggf. durch alternative Technologien, die auf den Einsatz radioaktiver Stoffe verzichten, ersetzt werden. Mögliche Anwendungsgebiete umfassen z. B. die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, Bestrahlungsgeräte in Medizin und Forschung sowie in Messeinrichtungen der Industrie. Nachdem in einem früheren Forschungsvorhaben bereits die Notwendigkeit, Möglichkeit und Machbarkeit der Ablösung hochradioaktiver Strahlenquellen (HRQ) durch alternative Technologien in Deutschland geprüft wurde, soll diese Untersuchung in den nächsten Jahren auch auf Strahlenquellen mit Aktivitäten unterhalb des HRQ-Wertes ausgedehnt werden. Dafür sollen erneut – diesmal jedoch mit dem Fokus auf Strahlenquellen geringerer Aktivität – aktuelle Anwendungsbereiche radioaktiver Strahlenquellen und deren mögliche alternative Technologien auf dem internationalen Markt eruiert und vergleichend bewertet werden.

Strahlenschutz beim Umgang mit Ultrakurzpuls-Lasern (UKP-Lasern)

Beim Einsatz von ultrakurzgepulster Laserstrahlung, insbesondere in der Materialbearbeitung, kann aufgrund der sehr hohen Energie- bzw. Leistungsdichten ionisierende Strahlung entstehen, die unter bestimmten Umständen zu sehr hohen Ortsdosisleistungen von bis zu 10 mSv/h an diesen Geräten führen kann. Daher ist es notwendig, das Gefährdungspotenzial von UKP-Lasersystemen verschiedener Bauarten für unterschiedliche Betriebsszenarien zu untersuchen, um die wissenschaftlichen Grundlagen für eine differenzierte Weiterentwicklung des geltenden Strahlenschutzrechts zu erarbeiten. Hierzu wird in bereits laufenden Forschungsvorhaben

- die beim Betrieb von UKP-Lasern verschiedenster Bauart auftretende Strahlenexposition von Beschäftigten und anderen Betroffenen erfasst und bewertet sowie
- die Möglichkeit und Praktikabilität einer Prüfung solcher UKP-Laser unter strahlenschutzrechtlichen Gesichtspunkten untersucht.

Während in diesen Vorhaben – aufgrund ihrer häufigen Anwendung – vor allem UKP-Laser in der Materialbearbeitung im Fokus stehen, sollen zukünftig auch andere Anwendungen, insbesondere der Einsatz von UKP-Lasern am Menschen, genauer untersucht werden. Dabei sollen realistische Betriebsszenarien sowie mögliche Unfallszenarien und die dabei entstehenden Strahlenexpositionen bei der Verwendung von UKP-Lasern außerhalb der Materialbearbeitung beschrieben und bewertet werden.

Einsatz von UKP-Lasern als Anlagen zur Strahlungserzeugung

Die Entwicklung in der Forschung der letzten Jahrzehnte zu immer kürzeren Impulslängen und immer höheren Energiedichten bei UKP-Lasern hat für diese auch neue Anwendungsgebiete erschlossen. So konnte im Forschungsmaßstab bereits gezeigt werden, dass UKP-Laser beim Einsatz spezieller Targets mithilfe des Wirkmechanismus „Target Normal Sheath Acceleration“ (TNSA) zur Erzeugung und Beschleunigung von Protonen, Schwerionen und auch Neutronen verwendet werden können. UKP-Laser

könnten daher zukünftig als Strahlungsgeneratoren benutzt werden und damit konventionelle Technologien (z. B. Linearbeschleuniger) ggf. ersetzen. Allerdings sind vor einer Marktreife dieser Systeme noch sehr viele Fragestellungen zu bearbeiten, so dass deren Verfügbarkeit frühestens mittelfristig erwartet wird. Es ist jedoch bekannt, dass bereits einzelne Industrieunternehmen Interesse an der Entwicklung solcher Systeme für die kommerzielle Anwendung bekundet haben. In den nächsten Jahren sollte daher in Forschungsvorhaben untersucht werden,

- in welchen Bereichen UKP-Laser zur Strahlungserzeugung eingesetzt werden können,
- welche Strahlenexposition in den damit verbundenen Anwendungsszenarien auftreten kann und
- ob die Einführung derartiger Systeme Anpassungen des strahlenschutzrechtlichen Regelwerks erforderlich macht.

Die rasante Entwicklung im Bereich der UKP-Laser muss aus Sicht des Strahlenschutzes bei der Einführung neuer Anwendungsgebiete langfristig eng begleitet werden. Wie relevant die Fragen des betrieblichen Strahlenschutzes hier sind, lässt sich bereits an den aktuell verwendeten Geräten klar erkennen.

5.3 Ausblick

Es ist abzusehen, dass ähnlich wie in allen anderen in diesem Bericht dargestellten Teildisziplinen des Strahlenschutzes, auch der berufliche Strahlenschutz auf längere Sicht von den bereits jetzt maßgeblichen Entwicklungen der Digitalisierung und Automation beeinflusst sein wird. Hervorzuheben sind hier insbesondere der zunehmende Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz und des Machine Learnings, z. B. beim Einsatz automatisch arbeitender Systeme für Messungen und deren Auswertung im Rahmen der beruflichen Strahlenschutzüberwachung.

Ein Forschungsthema, das in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird, ist die Raumfahrt, wie u. a. aktuelle Beispiele von kommerziell durchgeführten Flügen in den Weltraum zeigen. Hier besteht ein gewisses Potenzial für die Forschung, insbesondere zur Bedeutung solarer Ereignisse. Die Erkenntnisse hierzu würden zudem auch dem Strahlenschutz des fliegenden Personals in der Luftfahrt zugutekommen.

Bei der Anwendung neuer Radionuklide in der Medizin, Forschung und Industrie eröffnet die Annäherung an die sogenannte „Insel der Stabilität“ neuen Forschungsbedarf. Hierbei handelt es sich um eine Gruppe von besonders schweren künstlichen Radionukliden, die zukünftig in Großforschungseinrichtungen erzeugt werden sollen und vergleichsweise lange Halbwertszeiten besitzen. Unter Umständen werden diese Radionuklide Anwendung in den genannten Bereichen finden, jedoch aufgrund ihrer Schwere möglicherweise nicht mit den bisher dort angewandten Radionukliden vergleichbar sein.

6 Wirkungen und Risiken ionisierender Strahlung für den Menschen und Strahlenschutzkonzepte

6.1 Ausgangssituation

Die Abschätzung und Bewertung gesundheitlicher Risiken durch ionisierende Strahlung nach aktuellem Stand der Wissenschaft ist eine zentrale Aufgabe des BfS. Eine wissenschaftlich fundierte Risikobewertung ist eine wesentliche Grundlage für die kontinuierliche Weiterentwicklung von Strahlenschutzkonzepten. Dies betrifft sowohl das Risikomanagement im Notfall, die Nutzen-Risiko-Abwägung in der Medizin als auch Grenzwerte für beruflich Strahlenexponierte oder die Allgemeinbevölkerung. Sie ist auch eine wichtige Grundlage für eine erfolgreiche Risikokommunikation und für die Anerkennung von strahlenbedingten Berufskrankheiten. Hierzu ist eine fundierte Kenntnis der Risikomodelle, die die Expositions-Wirkungs-Beziehung zwischen ionisierender Strahlung und spezifischen Erkrankungen beschreiben, zwingend nötig.

Wissenschaftliche Basis einer Risikobewertung sind Zellstudien, Tierexperimente, humanbiologische Studien und epidemiologische Studien. Unsicherheiten in der Risikobewertung bestehen insbesondere bezüglich: 1) Krebserkrankungen bei niedrigen Dosen oder Dosisraten, 2) Nichtkrebs-Effekten bei moderaten oder niedrigen Dosen, 3) individueller Strahlenempfindlichkeit und -sensitivität und 4) Effekten bei unterschiedlichen Strahlenqualitäten, insbesondere internen Emittern wie Radon. Das BfS verfügt über ein strahlenbiologisches Labor mit Biobanken strahlenexponierter Kollektive, ein Labor für Zytogenetik und biologische Dosimetrie und führt die weltweit größte Uranbergarbeiter-Kohortenstudie durch. Die genannten Forschungsthemen werden in intramuralen sowie extramuralen Forschungsvorhaben und Beteiligung an Drittmittelforschung bearbeitet. Dies geschieht zumeist in internationaler Kooperation und folgt inhaltlich den Forschungsprioritäten der europäischen Forschungsplattformen MELODI, EURAMED und EURADOS sowie der Gremien UNSCEAR, ICRP Committee 1 bzw. High-level Group on Low Dose Research (HLG-LDR) der OECD.

6.2 Zukünftige Forschungsthemen

Krebsrisiko im Niedrigdosis-Bereich

Bisher ermöglichen epidemiologische Studien eine belastbare Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Krebsrisiken und Exposition durch externe Strahlung für Dosen oberhalb von etwa 100 mSv. Für den Strahlenschutz heute und auch in Zukunft ist jedoch der Dosisbereich unter 100 mSv besonders relevant. Aussagen hierzu werden im Allgemeinen unter Annahme einer linearen Dosis-Wirkungsbeziehung ohne Schwellenwert abgeleitet (Linear-no-Threshold – LNT). Dieses Vorgehen ist mit großen Unsicherheiten verbunden. Zudem ist unklar, wie sich die zeitliche Verteilung der Exposition (chronisch vs. akut) auf das Krebsrisiko auswirkt. Die Reduktion der resultierenden Unsicherheiten durch eine Erweiterung der Datenbasis durch epidemiologische Studien und durch die Aufklärung zugrundeliegender biologischer Wirkmechanismen im Niedrigdosis-Bereich ist deshalb ein wichtiger Forschungsschwerpunkt. Eine verbesserte Kenntnis des Krebsrisikos im Niedrigdosis-Bereich ist zur Weiterentwicklung der Strahlenschutzkonzepte und für eine klare Risikokommunikation von großer Bedeutung.

Vor diesem Hintergrund sollen insbesondere die biologischen Wirkungen von Niedrigdosis-Strahlung auf individuelle Organe in verschiedenen Modellsystemen und Kollektiven unter Anwendung moderner „omics“-Analysen in Verbindung mit molekular-epidemiologischen Studien und systembiologischen Ansätzen aufgeklärt werden. Durch multidisziplinäre Ansätze soll gezielt ein ursächlicher Zusammenhang zwischen Niedrigdosisstrahlung, genetischer Prädisposition, Erkrankungsalter und weiteren Faktoren für das Leukämierisiko im Kindesalter erforscht werden. Weiterhin sollen strahlenbedingte gesundheitliche Risiken im Niedrigdosis-Bereich über informative epidemiologische Studien weiter erforscht werden, z.B.

genauere Charakterisierung des Krebsrisikos durch externe Strahlung im Niedrigdosis-Bereich unter Verwendung der Wismut-Kohorte des BfS.

Risiko für Nichtkrebs-Erkrankungen

Lange wurde angenommen, dass Nicht-Krebserkrankungen erst durch Strahlendosen induziert werden, die weit über denen der beruflichen oder diagnostischen Strahlenbelastung liegen. Aktuelle epidemiologische und experimentelle Studien weisen aber auf mögliche erhöhte Risiken für strahleninduzierte Nicht-Krebserkrankungen, wie z. B. Erkrankungen des Herzkreislaufsystems, Katarakte, und kognitive/neurologische Effekte, bei moderaten und auch bei niedrigen Dosen hin. Diese möglicherweise „stochastischen Effekte“ sind im derzeitigen Strahlenschutzsystem nicht ausreichend berücksichtigt. Da Erkrankungen des Herzkreislaufsystems eine wesentliche Komplikation bei Langzeitüberlebenden nach einer Strahlentherapie (hohe lokale Dosen, aber auch niedrige Out-of-Field Expositionen) darstellen und deren Zahl in Zukunft voraussichtlich deutlich zunehmen wird, ist eine genauere Beschreibung des Risikozusammenhangs im gesamten Dosisbereich von großer Bedeutung. Eine verbesserte Kenntnis des Risikos für Nicht-Krebserkrankungen ist notwendig, um diese Erkrankungen zukünftig im Strahlenschutzsystem adäquat berücksichtigen zu können, wie z. B. zur Berechnung von Gewebewichtungsfaktoren und Grenzwerten.

Forschungsansätze sind hier der Ausbau mechanistischer Studien an Modellsystemen des Herz-Kreislaufsystems, um sowohl durch funktionelle Analysen als auch durch Proteom- und Epigenomanalysen bzw. durch die Untersuchung systemischer Effekte tiefere Einblicke in strahleninduzierte pathologische Prozesse und deren Dosisabhängigkeit zu erhalten. Des Weiteren soll durch den Ausbau molekularepidemiologischer Studien zu ionisierender Strahlung und Nichtkrebs-Effekten (z. B. Mayak-Kohorte, Biobanken BfS) die Untersuchung von molekularen Markern, die mit einem Krankheitsrisiko in Beziehung gesetzt werden, ermöglicht werden. Mit dem Aufbau eines sogenannten Adverse-Outcome-Pathway (AOP)-Konzepts zur Risikobewertung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen soll eine Methode, die epidemiologische und biologische Daten mit systembiologischen Ansätzen verknüpft, etabliert werden. So kann eine Abfolge von Ereignissen beginnend mit der initialen Strahlenwirkung über nachfolgende Effekte bis zu Schäden des Herz-Kreislaufsystems identifiziert werden. Zudem soll das Risiko für Nicht-Krebs-Erkrankungen im Niedrig-Dosis-Bereich über informative epidemiologische Studien (z.B. gepoolte Uranbergarbeiter-Studien (PUMA), Semipalatinsk-Kohorte) untersucht werden.

Individuelle Strahlenempfindlichkeit

Große Unsicherheiten bestehen bezüglich der Abschätzung und Vorhersage individueller Strahlenempfindlichkeit. Insbesondere ist nicht geklärt, in welchem Ausmaß bestimmte Faktoren wie Alter, Geschlecht, Lebensstilfaktoren und genetische und epigenetische Effekte das individuelle Risiko beeinflussen. Bessere Kenntnisse zur individuellen Strahlensensitivität sind besonders relevant für die therapeutische Bestrahlung von Tumorerkrankungen. Unter Berücksichtigung der zunehmenden Zahl von Langzeitüberlebenden nach Strahlentherapie wird die Beurteilung individueller Empfindlichkeiten für die Vermeidung von Therapiespätschäden weiter an Bedeutung gewinnen. Um möglicherweise besonders vulnerable Gruppen im Strahlenschutz adäquat zu schützen, sind eine Quantifizierung der Unterschiede im individuellen Strahlenrisiko und die Identifikation von Faktoren und Prozessen für Strahlenempfindlichkeit sowie die Entwicklung von Biomarkern zur Vorhersage notwendig. Dies soll durch molekulare Analysen an Modellsystemen und primären Bioproben zur Untersuchung von Alters- und Geschlechtsunterschieden in der zellulären Strahlenantwort erreicht werden. Neben DNA-Reparaturprozessen liegt ein Schwerpunkt auf Proteom- und Sekretomanalysen. Durch den Aufbau prospektiver Kohorten und die Entwicklung von Strategien zur optimalen Nutzung bereits vorhandener Kollektive (z. B. Requite-Studie) werden die Voraussetzungen für zukünftige, molekular-epidemiologische Ansätze zur Beantwortung von Fragen zur individuellen Strahlenempfindlichkeit verbessert. Ergänzend sollen datenbankgestützte, bioinformatische Analysen zur Identifizierung von Biomarkern bzw. Biomarker-Signaturen für Strahlenempfindlichkeit herangezogen werden.

Wirkungen und Risiken von Radon

Generell ist gut belegt, dass eine langjährige Exposition gegenüber dem radioaktiven Edelgas Radon das Lungenkrebsrisiko erhöht. Wenig geklärt ist jedoch, wie sich zeitliche Charakteristika der Exposition in Innenräumen oder Eigenschaften der exponierten Personen (z. B. Alter, Geschlecht) auf das Risiko auswirken. Unsicherheiten bestehen auch hinsichtlich anderer Erkrankungen als Lungenkrebs und Kombinationseffekten. Zudem werden valide Risikomodelle für Verfahren zur Anerkennung von Berufskrankheiten und zur Bestimmung des Lebenszeitriskos als Basis für die Berechnung von Radon-Dosiskonversionsfaktoren benötigt. Eine verbesserte Kenntnis der Wirkungen und Risiken von Radon ist für die Weiterentwicklung von Strahlenschutzkonzepten und eine erfolgreiche Risikokommunikation notwendig.

Zu den Forschungsfragen, die zum Teil auch über das EU-Projekt RadoNorm (2021-2025) bearbeitet werden, zählen z. B. die fortlaufende Auswertung der vom BfS durchgeführten weltweit größten Uranbergarbeiter-Kohortenstudie und der zugehörigen gemeinsamen Auswertungen aller weltweit vorhandenen Uranbergarbeiter- (PUMA) und Uranaufbereiterstudien (iPAUW). Zusätzlich sollen die weitere Auswertung der BfS-Bioprobenbank mit biologischen Proben von ehemaligen Wismutbeschäftigten sowie eine Erweiterung der Bioprobenbank mit Proben unterschiedlich radon-exponierter Bevölkerungsgruppen erfolgen. Durch die Analyse molekularer und zellulärer Effekte einer Radonexposition in Modellsystemen und deren Validierung in Bioproben sollen (retrospektive) Expositionsmarker, molekulare Faktoren und Signaturen, die das radonbedingte Risiko beeinflussen, identifiziert werden. Eine aktualisierte Berechnung des bevölkerungsattributablen Risikos durch Radon in Wohnungen soll vorgenommen werden, d.h. Bestimmung des Anteils der Lungenkrebserkrankungen in der Bevölkerung (in %), die durch die Exposition gegenüber dem Risikofaktor Radon in Wohnungen verursacht wird. Des Weiteren soll ein Vergleich von Lebenszeitriskiken zu Lungenkrebs und Radon aus verschiedenen Studien und hinsichtlich verschiedener Einflussfaktoren zur genaueren Abschätzung des Radon-Dosis-Konversionsfaktors erfolgen.

Risikomodelle

Es existiert eine Reihe von Risikomodelle, die den Zusammenhang zwischen Exposition bzw. Dosis und Krebsrisiko beschreiben. Hier bestehen zum Teil Unsicherheiten in der genauen Form der Expositions-Wirkungs-Beziehung und ihrer Abhängigkeit von Zeit und Alter. Diese Risikomodelle dienen zum Beispiel als Grundlage für die Berechnung von Verursachungswahrscheinlichkeiten oder Lebenszeitriskiken, die wiederum Basis für die Entwicklung und Anwendung von Strahlenschutzkonzepten sind. Eine genauere Kenntnis der Risikomodelle führt zu einer Verbesserung der Strahlenschutzkonzepte. Vor diesem Hintergrund wird die Software ProZES (Programm zur Berechnung der Zusammenhangswahrscheinlichkeit zwischen einer Erkrankung und einer Strahlenexposition) zur Verursachungswahrscheinlichkeit durch das BfS weiterentwickelt. Neben einer Aktualisierung der Risikomodelle für strahlenbedingte Krebserkrankungen sollen zukünftig auch Nichtkrebs-Erkrankungen einbezogen werden. Weitere Forschungsansätze betreffen die:

- Prüfung, Vergleich und Weiterentwicklung der Risikomodelle zu einzelnen Krebslokalisationen in Abhängigkeit von Zeit seit Exposition, Alter und Geschlecht.
- Weiterentwicklung integrativer Risikokonzepte, die biologische mit gesundheitlichen Effekten verknüpfen, wie z.B. das Konzept des „Adverse Outcome Pathways“.

Biologische Dosimetrie

Mithilfe der biologischen Dosimetrie können ein retrospektiver Nachweis und die Dosisabschätzung mit biologischen Markern beim Menschen erfolgen, auch wenn keine direkte Strahlung mehr gemessen werden kann. Dazu betreibt das BfS das Referenzlabor zur individuellen Dosisabschätzung nach einem Strahlenunfall und führt Chromosomenanalysen von Blutproben potentiell bestrahlter Personen durch. Übersteigt die Anzahl der betroffenen Personen die Kapazität eines Labors ist es notwendig entsprechende Strategien bereit zu stellen, um den Probendurchsatz signifikant zu erhöhen. Dadurch ergeben sich auch erweiterte Einsatzmöglichkeiten der Verfahren zur biologischen Dosimetrie in der biologischen Strahlenforschung (Niedrig-Dosisbereich). Die Qualitätssicherung und Optimierung der Methoden ist sowohl für den Einsatz im Notfallschutz als auch in der Strahlenforschung von entscheidender Bedeutung.

Forschungsansätze des BfS betreffen hier vor allem die Weiterentwicklung und Optimierung bestehender Methoden der biologischen Dosimetrie zur Dosisrekonstruktion bei unklarer Strahlenexposition sowie die Weiterentwicklung der Automatisierung der mikroskopischen Analyseverfahren. Der Einsatz von künstlicher Intelligenz (KI) in der Bildanalyse, die Evaluierung der Einsatzmöglichkeit und Anwendung von neuartigen Hochdurchsatzverfahren sollen zur Beschleunigung der z. B. dizentrischen Chromosomenanalyse erprobt werden. Darüber hinaus wird die Entwicklung von mathematischen Modellen zur Verbesserung von Aussagen zur Strahlenbelastung und zur strahlenbiologischen Empfindlichkeit verfolgt. Das unter der Federführung des BfS geführte Europäische Biodosimetrie-Netzwerk RENE (Running the European Network of Biological Dosimetry and Retrospective Physical Dosimetry) ist als Analyseplattform für den Notfallschutz und für großangelegte Forschungsprojekte in die europäische Forschungslandschaft (MELODI-Arbeitsgruppe „Infrastruktur“) nachhaltig integriert und gewährleistet kontinuierliche Qualitätssicherung durch regelmäßig durchzuführende Ringversuche.

6.3 Ausblick

Eine genauere Beschreibung des Krebsrisikos im Bereich sehr niedriger Dosen (deutlich unterhalb von 100 mSv) durch Integration von epidemiologischen Befunden mit Erkenntnissen aus biologischen Studien ist ein zentrales Ziel für die kommenden Jahre. Besondere Beachtung sollen Kinder und andere möglicherweise besonders empfindliche Personen dabei haben. Sehr niedrige Dosen sind beispielsweise beim Rückbau von Kernkraftwerken und im Notfallschutz relevant. Bezüglich Nicht-Krebserkrankungen werden metabolische Erkrankungen und kognitive/neurologische Erkrankungen bei moderaten und niedrigen Dosen im Fokus stehen sowie Herz-Kreislauf-Erkrankungen bei Dosen deutlich unter 500 mGy. Hier sollen neue innovative Methoden in experimenteller Biologie zum Einsatz kommen und epidemiologische Kohortenstudien mit Bioproben aus- bzw. aufgebaut werden. Im Bereich individueller Strahlenempfindlichkeit wird sich weitere Forschung mehr auf den Bereich niedriger Dosen konzentrieren. Neue intelligente Methoden werden dabei angewandt, um Biomarker zur Vorhersage zu finden. Als zukünftige Herausforderung muss in alle diese Forschungsansätze auch die Analyse von Wirkungen und Risiken weiterer Expositionsszenarien, wie neue medizinische Strahlenanwendungen (z. B. Partikeltherapie, FLASH) und im gewissen Maß auch kosmische Strahlung (z. B. Weltraumtourismus), integriert werden. Konzepte zur Untersuchung der Entwicklung der Radon-induzierten Lungenkrebs-Inzidenz sollen entwickelt werden. Die bereits etablierten Risikomodelle sollen verfeinert und aufbereitet werden z. B. in digitaler Form, so dass ihre Anwendung erleichtert wird. Ein wichtiges zukünftiges Ziel ist die Untersuchung von erblichen Effekten in informativen Kohorten über mehrere Generationen. Im Rahmen der biologischen Dosimetrie wird fortlaufend die methodische Weiterentwicklung durch Implementierung von automatisierten Analyseverfahren, Einbindung von neuartigen, verifizierten Hochdurchsatzverfahren und dem Ausbau von Labornetzwerken vorangetrieben.

7 Expositionen, Wirkungen und Risiken nichtionisierender Strahlung und Strahlenschutzkonzepte

7.1 Ausgangssituation

Zu nichtionisierender Strahlung zählt man optische Strahlung (ultraviolette Strahlung (UV)), sichtbares Licht und Infrarot), elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder - im Folgenden kurz „EMF“ - genannt sowie definitionsgemäß auch Infra- und Ultraschall. Durch Einführung zahlreicher Technologien, die nichtionisierende Strahlung nutzen, und durch klimawandelbedingte Änderungen der solaren UV-Belastung nimmt die Exposition der Bevölkerung durch nichtionisierende Strahlung zu. Betroffene Bereiche sind u.a. UV (Klimawandel), künstliche erzeugte optische Strahlung (z.B. UV-C, Laser, Beleuchtungssysteme), statische und niederfrequente elektrische und magnetische Felder (z.B. Stromnetzausbau), höherfrequente (z.B. Elektromobilität) und hochfrequente elektromagnetische Felder (z.B. Mobilfunk). Um Entwicklungen aus Strahlenschutzsicht besser bewerten zu können, ist weitere Forschung i) zur Charakterisierung der Exposition, ii) zu möglichen biologischen und gesundheitsrelevanten Wirkungen sowie iii) zu Risikowahrnehmung und -kommunikation notwendig. Daraus werden Strahlenschutzkonzepte, Präventionsstrategien und zielgruppenspezifische Kommunikationskonzepte für die Allgemeinbevölkerung abgeleitet und wissenschaftlich evaluiert.

Das BfS verfügt über ein EMF-Messlabor, ein Messlabor für solare UV-Strahlung, eines für optische Strahlung allgemein und koordiniert das deutschlandweite solare UV-Messnetz des BfS/UBA. Die oben genannten Themen werden über Eigenforschung und extramurale Forschung bearbeitet, im EMF-Bereich auch durch begleitende große Forschungsprogramme (z. B. zum Stromnetzausbau). Die Themen folgen inhaltlich den Forschungsbedürfnissen, wie sie u. a. durch WHO, ICNIRP, SCENIHR, SCHEER, SSK und UV-Schutz-Bündnis formuliert wurden.

7.2 Zukünftige Forschungsthemen

UV-Strahlung und Klimawandel

Solare UV-Strahlung ist Ursache unterschiedlicher Krankheitsbilder der Augen und der Haut bis hin zu Krebserkrankungen. UV-bedingte Erkrankungen an Auge und Haut nehmen seit Jahrzehnten zu. Der Klimawandel kann diese Situation verschärfen. Forschung in diesem Bereich betrifft 1) biologische Wirkmechanismen und gesundheitliche Effekte, 2) Datenanalyse erfasster UV-Bestrahlungsstärken, 3) Entwicklung der UV-Strahlung in Deutschland, 4) klimawandelbedingte Konsequenzen der UV-Exposition für Mensch und Umwelt sowie 5) Weiterentwicklung bestehender Präventionsstrategien (Verhältnis- und Verhaltensprävention) und Strahlenschutzkonzepte. Mittels Forschung sollen die Dosis-Wirkungsbeziehung zwischen UV und Hautkrebs erarbeitet und eine Klimatologie anhand messtechnisch ermittelter UV-Bestrahlungsstärken aufgestellt werden. Durch die Erstellung von UV-Projektionen für Deutschland bezogen auf bestehende IPCC-Emissionsszenarien („Intergovernmental Panel on Climate Change“ IPCC) kann eine verbesserte Klimawirkungs-Risikoanalyse erzielt werden. Zur Hautkrebsprävention soll die mikroskalige Modellierung von UV-Belastung erfolgen.

Künstlich erzeugte optische Strahlung

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt im Bereich der optischen Strahlung liegt in der Analyse der Exposition durch künstlich erzeugte optische Strahlung (UV-Strahlung, Licht, Infrarot), wie sie in Alltag und Technik von der Bevölkerung angewandt wird, und in der Bewertung damit verbundener gesundheitlicher Risiken. Der Fokus ist hier auf unterschiedliche Anwendungsbereiche neuer Technologien zu legen, beispielsweise moderne Beleuchtungssysteme oder Laseranwendungen. Gesundheitliche Risiken sind für Augen, Haut und das Gesamtsystem Mensch zu bewerten. Beispielsweise sind beim Auge Gefährdungen durch Blaulicht, thermische Netzhautgefährdung sowie gesundheitliche Beeinträchtigungen durch Blendung und temporale

Lichtartefakte (stroboskopische Effekte, Flimmern, Flickern, etc.) näher zu erforschen. Im stetig erweiterten Anwendungsbereich liegen unzureichende Daten hinsichtlich genauer Charakteristika unterschiedlicher Strahlenquellen vor. Vor diesem Hintergrund wird eine Verbesserung der Datenlage hinsichtlich a) der Wirkung von UV-C-Strahlung bei unterschiedlichen Expositionsszenarien und Wellenlängen auf den Menschen sowie b) hinsichtlich Exposition und Wirkung auf den Menschen durch künstlich erzeugte optische Strahlung bei neuen Technologien (z. B. Visible Light Communication (VLC)/Light Fidelity (LiFi)) verfolgt. Des Weiteren wird die Langzeitwirkung von optischer Strahlung und hier speziell die gesundheitlichen Wirkungen von Blaulicht auf den Menschen untersucht.

Energiewende und Elektromobilität

Mit der Beendigung der Kernenergienutzung und Kohleverstromung sind der Aus- und Umbau des Stromnetzes und die Nutzung alternativer Energieträger der Elektrizitätsgewinnung vorgegeben. Für einen Teil der Bevölkerung kann dies zu einer Veränderung der Exposition gegenüber statischen und niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern führen. Biologische und gesundheitsrelevante Wirkungen statischer und niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder sind gut untersucht. Verbliebenen offenen Fragen geht das BfS in einem Forschungsprogramm nach, das begleitend zum Stromnetzausbau in Deutschland durchgeführt wird. Wirkungen durch Felder mit höheren Frequenzen – im sogenannten Zwischenfrequenzbereich – sind deutlich weniger gut untersucht. Eine Quelle solcher Felder ist zum Beispiel die Leistungselektronik in Elektrofahrzeugen oder die Ladeinfrastruktur. Da die Verbreitung solcher Fahrzeuge und anderer Quellen, die Felder im Zwischenfrequenzbereich emittieren, zunimmt und die Datenlage zu möglichen Wirkungen eingeschränkt ist, besteht Bedarf an begleitender Forschung. Um bestehende wissenschaftliche Unsicherheiten in der Risikobewertung zu verringern und offene Fragen beantworten zu können, wird ein begleitendes Forschungsprogramm zum Stromnetzausbau⁹ mit 35 Forschungsvorhaben zu Themenschwerpunkten wie z.B. Leukämie bei Kindern, neurodegenerative Erkrankungen, Korona-Ionen, Exposition und Dosimetrie, Risikowahrnehmung und -kommunikation durchgeführt. Daneben werden die Erhebung der Magnetfeldexposition der Allgemeinbevölkerung, die Vergabe von experimentellen Studien zum Einfluss nieder- oder hochfrequenter Felder auf Insektenpopulationen und ausgewählten Pflanzenarten (u. a. Wiederholungsstudien) erfolgen. Mittels Forschungsvorhaben zur Elektromobilität (Zwischenfrequenzbereich) werden die Expositionen während des Fahrens und bei Ladevorgängen erfasst und bewertet sowie Daten zu möglichen Wirkungen gewonnen.

Digitalisierung und der stete Wandel der Mobilfunktechnologien

Der anhaltende starke Anstieg der zu übertragenden Datenmengen führt zu einem Ausbau der Mobilfunknetze. Zur Kapazitätssteigerung werden in verstärktem Maße Kleinzellen und intelligente Antennen (Beamforming) sowie neue Frequenzbereiche eingesetzt werden, wodurch Sendeanlagen mit kleinen Leistungen näher an Nutzende heranrücken und sich Feldverteilungen in Mobilfunkzellen dynamisch ändern. Inwiefern sich die Exposition der Bevölkerung dadurch ändert, ist zu untersuchen. Mögliche Gesundheitswirkungen durch hochfrequente elektromagnetische Felder des Mobilfunks wurden national wie international intensiv erforscht. Auch bei vergleichsweise hohen Expositionen, d. h. bei Kopfexposition durch das Mobiltelefon, wurden bei Einhaltung der empfohlenen Grenzwerte bisher keine gesundheitsrelevanten Wirkungen nachgewiesen. Dennoch verbleiben wissenschaftliche Unsicherheiten in der Risikobewertung, insbesondere bezüglich Langzeitwirkungen bei vergleichsweise hoher lokaler Exposition. Bei perspektivischer Nutzung höherer Mobilfunkfrequenzen (> 20 GHz) führt eine geringere Eindringtiefe der Felder in den Körper dazu, dass mögliche unmittelbare Wirkungen auf Haut und Augen

⁹ https://www.bfs.de/DE/bfs/wissenschaft-forschung/bfs-forschungsprogramm/stromnetzausbau/netzausbau_node.html

beschränkt sind. Auch hier ist die Datenlage für eine Risikobewertung unzureichend. Das BfS verfolgt hier Forschungsansätze zu theoretisch möglichen Wirkungen höherer Frequenzen (> 20 GHz) auf Haut und Auge und plant eine prospektive Kohortenstudie zur Handynutzung in Deutschland unter Beteiligung an dem internationalen Konsortium COSMOS zur Untersuchung möglicher Langzeitwirkungen. Durch ein EMF-Monitoring sollen Veränderungen der Expositionen über die Zeit erfasst und bewertet werden, um Auskunft zur EMF-Belastung der Bevölkerung geben zu können. Grundlegende Erkenntnisse zu Auswirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder werden durch High-Throughput-Analysen von kurzfristigen und längerfristigen strahleninduzierten Veränderungen wie dem Transkriptom und Epigenom untersucht. Das BfS koordiniert systematische Reviews zu hochfrequenten EMF-Feldern und oxidativem Stress sowie kognitiven Effekten im Auftrag der WHO.

Anwendung am Menschen (optische Strahlung, EMF und Ultraschall)

Anwendungen nichtionisierender Strahlung außerhalb der Medizin im Wellness- und Kosmetikbereich finden immer weitere Verbreitung. Die Analyse der Exposition durch nichtionisierende Strahlung und Bewertung damit verbundener gesundheitlicher Risiken stellt den Strahlenschutz vor eine Herausforderung. Im stetig erweiterten Anwendungsbereich in Kosmetik und Wellness liegen unzureichende Daten hinsichtlich der genauen Charakteristika der unterschiedlichen Strahlenquellen vor. Nebenwirkungen und Risiken dieser Anwendungen am Menschen sind bisher nicht systematisch untersucht. Zudem finden sich immer mehr Geräte auf dem Markt, die mehrere unterschiedliche Arten nichtionisierender Strahlung in Kombination verwenden. Hierunter fallen beispielsweise Laseranwendungen, intensive Quellen optischer Strahlung, Magnetfeldstimulation zum Muskelaufbau und Anwendungen zu Body Shaping. Gesundheitliche Risiken sind hier für Augen, Haut und das Gesamtsystem Mensch zu bewerten. Mittels Forschungsvorhaben wird eine Verbesserung der Datenlage zu Nebenwirkungen und möglichen (Langzeit-)Schäden hergestellt. Die Exposition sowie die gesundheitliche Wirkung bei Anwendung von Tageslichtlampen, Infrarotkabinen, etc. auf den Menschen wird ermittelt. Leistungsstarke Feldquellen im professionellen oder häuslichen Bereich werden charakterisiert.

Risikowahrnehmung und Risikokommunikation

Die Risikokommunikation im nichtionisierenden Bereich ist geprägt durch wissenschaftsbasierte Risikobewertung und der dieser Bewertung gegenüberstehenden gesellschaftlichen Wahrnehmung. Die Risiken elektromagnetischer Felder werden von Teilen der Bevölkerung regelmäßig deutlich höher eingeschätzt als es eine gut gesicherte Forschungsbasis hergibt. Umgekehrt entspricht das Schutzbedürfnis der Bevölkerung gegenüber optischer Strahlung nicht hinreichend den wissenschaftlichen Erkenntnissen über Gesundheitsschädigungen, insbesondere bei UV-Strahlung. Weitere sozialwissenschaftliche Forschung ist nötig, um eine adressatengerechte Risikokommunikation mit unterschiedlichen Kommunikationsstrategien erfolgreich im Strahlenschutz umzusetzen.

Forschung zu EMF betrifft den Vergleich verschiedener Ansätze der Wissenschaftskommunikation von EMF-Themen sowie die Diskursanalyse in Massen- und Sozialen Medien. Weiterhin sollen Ursachen und Konsequenzen von (Nicht-)Akzeptanz wissenschaftlicher Informationen und Empfehlungen zu EMF-Risiken in individuellen und sozialen Kontexten sowie die Einstellungen und Risikowahrnehmung zu EMF-Themen bei relevanten Bevölkerungsgruppen untersucht werden. Eine begleitende Evaluation verschiedener EMF-Kommunikationsangebote und Erprobung neuer Angebote soll durchgeführt werden. Die EMF-Risikowahrnehmung und -kommunikation von Multiplikator*innen (bspw. Allgemeinmediziner*innen; Kinder- und Jugendmediziner*innen) soll erforscht werden. Forschung zu optischer Strahlung betrifft Umfragen und Zielgruppenanalysen zu gesundheitlichen Risiken bei Laserquellen in Verbraucherhand mit dem Ziel der Erarbeitung eines gangbaren Strahlenschutzkonzeptes zur Verbesserung der Informiertheit der Bevölkerung. Des Weiteren soll die Wirkung von Risikokommunikationsmaßnahmen (Kommunikation verhaltens- und verhältnispräventiver Maßnahmen) hinsichtlich einer Verbesserung des UV-Schutzes und Akzeptanz von UV-Schutzmaßnahmen in den Lebenswelten der Bevölkerung evaluiert werden.

7.3 Ausblick

UV und Klimawandel

Wetterabhängige Verhaltensgewohnheiten sind zu quantifizieren und klimawandelbedingte Einflüsse hinsichtlich der UV-Strahlungsbelastung zu klären. UV-Projektionen für Deutschland sind unter Berücksichtigung der Einflüsse von Bewölkung, Aerosolen und Albedo weiter zu entwickeln. Die gesundheitlichen Wirkungen der UV-Strahlung sind in Abhängigkeit von Luftschadstoffen und meteorologischen Faktoren zu analysieren.

Langzeiteffekte, Kombinationswirkungen

Bezüglich optischer Strahlung sind sowohl gesundheitliche Langzeiteffekte über das gesamte optische Spektrum hinweg zu untersuchen, als auch kombinatorische Effekte also die Frage, wie UV, Licht und Infrarotstrahlung zusammenwirken. Die Datenlage zu Exposition und Wirkung bei Geräten, die optische Strahlung, EMF und/oder Ultraschall in Kombination verwenden, ist zu verbessern. Langzeiteffekte von Handynutzung sind bislang nicht bekannt, werden aber im Rahmen einer prospektiven Handykohorte in den nächsten Jahrzehnten untersucht (deutsche COSMOS-Studie).

Neue Technologien

Die Datenlage hinsichtlich der Exposition und der Wirkung auf den Menschen durch künstlich erzeugte optische Strahlung bei neuen Technologien ist zu verbessern. Ein Beispiel für relevante neue Technologien ist die optische Freiraum-Datenübertragung (z.B. VLC, LiFi). Auch bei der Anwendung nichtionisierender Strahlung zu kosmetischen und sonstigen nicht-medizinischen Zwecken ist die Erhebung gesundheitlicher Effekte (Nebenwirkung und Schäden) zu verbessern. Die Veränderung der Exposition einzelner Bevölkerungsgruppen durch EMF-Felder aus neuen Mobilfunktechnologien (6G und danach), steigendem Digitalisierungsgrad, etc. wird kontinuierlich erfasst und bewertet (EMF-Monitoring). Ein besonderer Fokus liegt bei neuen körpernah betriebenen Feldquellen.

Risikowahrnehmung und -kommunikation

Im Bereich der optischen Strahlung sind Umfragen und Zielgruppenanalysen zu gesundheitlichen Risiken sowohl der natürlichen als auch der künstlich erzeugten Strahlung bei unterschiedlichen Anwendungsszenarien durchzuführen. Präventive Maßnahmen sind hinsichtlich Motivation und Akzeptanz zu evaluieren.

Bezüglich EMF sind folgende Forschungsthemen langfristig relevant: „Elektrosensible“ Menschen leiden unter vielfachen Beschwerden, die sie EMF zuschreiben – der ursächliche Zusammenhang ist aus Forschungssicht nicht gegeben. Sozialforschung und psychologische Forschung ist für ein besseres Verständnis notwendig und um Kommunikationsangebote für diese Menschen weiterzuentwickeln. EMF-Expositionsquellen, mit denen die Bevölkerung im Alltag konfrontiert ist, müssen durch Quer- und Längsschnittstudien dauerhaft erfasst werden, um hieraus Informationsangebote zu erstellen und Korrelationen zu entsprechender Risikowahrnehmung zu untersuchen. Quer- und Längsschnittstudien zu EMF-kritischen sozialen Gruppen und Individuen sollen ermitteln, wie sich EMF-kritische Wahrnehmungen, Motive, Einstellungen, Überzeugungen, Dispositionen bilden und entwickeln. Interkulturelle Unterschiede EMF-bezogener Wissenschafts- und Technologieskepsis sollen untersuchen, welche Möglichkeiten und Grenzen kulturübergreifender Information und Kommunikation es gibt, und inwiefern erfolgreiche Maßnahmen übertragbar sind. Mediale Diskurse (Massenmedien, Social Media) über EMF-Themen sollen besser wissenschaftlich beschreibbar und nachvollziehbar gemacht werden, um daraus Strategien für Information und Kommunikation ableitbar zu machen und den Einfluss dieser Diskurse auf Wahrnehmungen, Motive, Einstellungen, Überzeugungen und Dispositionen besser untersuchen zu können. Strategien zum Umgang mit Fehl- und Desinformationen sollen entwickelt und getestet werden. Weitere wissenschaftliche Fragestellungen zur Risikokommunikation sind im Kapitel 8 zu finden.

Eine durch diese Forschung effizienter gestaltete Risikokommunikation bzgl. EMF trägt dazu bei, Individuen und Bevölkerungsgruppen eine stärker wissenschaftsbasierte Handlungs- und Entscheidungskompetenz bezüglich EMF-Risiken zu vermitteln. Im Hinblick auf Digitalisierung und Energiewende trägt dies zu stärker wissenschaftsbasierten Diskursen etwa über den Bau neuer Mobilfunkbasisstationen oder neuer Hochspannungsleitungen bei.

8 Querschnittsthema: Wissenschaftliche Fragestellungen zur Risiko- und Wissenschaftskommunikation

8.1 Ausgangssituation

Der Forschungsschwerpunkt Risiko- und Wissenschaftskommunikation untersucht, wie Informationen über Strahlung und Strahlenschutz in der Öffentlichkeit wahrgenommen werden und wie diese so vermittelt werden können, dass ein informierter Umgang mit und ein bestmöglicher Schutz der Bevölkerung vor Strahlenrisiken gewährleistet ist. Zentral ist hierbei die sozialwissenschaftliche Forschung. Sie nimmt mittels qualitativer Methoden (Interviews, Fokusgruppen) und quantitativer Zugänge (repräsentative Umfragen, Experimente) Fragen nach dem gesellschaftlichen Umgang mit Strahlenrisiken in den Blick. Darüber hinaus stehen die Gestaltung und Vermittlung wissenschafts- und risikobezogener Informationen, deren Verarbeitung in der Öffentlichkeit sowie die Konzeption von Kommunikations-, Dialog- und Beteiligungsprozessen im Fokus. Risiko- und Wissenschaftskommunikation ist ein Querschnittsthema im BfS, da sowohl Fragestellungen aus allen Bereichen des Strahlenschutzes behandelt als auch verschiedene sozialwissenschaftliche Disziplinen und Herangehensweisen in sich vereint werden müssen. In den vergangenen Jahren hat das BfS bereits zahlreiche Studien durchführen lassen, die sich mit der Risikowahrnehmung und dem gesellschaftlichen Umgang mit den verschiedenen Strahlenthemen befassen.

Vor dem Hintergrund aktueller gesellschaftlicher Entwicklungen, wie die zunehmende Infragestellung wissenschaftlicher Kompetenzen, die Intensivierung digitaler Kommunikation und die Bestrebungen, die Bürger*innen in die Gewinnung und Bewertung wissenschaftlicher Daten mit einzubeziehen, ergibt sich auch für den Strahlenschutz neuer Forschungsbedarf im Bereich des Querschnittsthemas Risiko- und Wissenschaftskommunikation.

8.2 Zukünftige Forschungsthemen

Im Folgenden werden die Forschungsthemen im Bereich der Risiko- und Wissenschaftskommunikation anhand der Schwerpunkte digitale Kommunikation, Krisenkommunikation, Wissenschaftskommunikation und Evaluation von Kommunikation und Forschung vorgestellt. Darüber hinaus bildet die Verbesserung der Risiko- und Gesundheitskommunikation im Bereich Radon einen eigenen Schwerpunkt. Ausführungen zur Erforschung der Risikowahrnehmung und Verbesserung der Risikokommunikation im Bereich der nichtionisierenden Strahlung sind in Kapitel 7 zu finden.

Digitale Kommunikation

Im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung und der Etablierung von digitalen Kommunikationsformaten stellt sich die Frage nach einer veränderten Wirkung und Rezeption der im BfS eingesetzten Risiko-, Wissenschafts- und Krisenkommunikation. So bietet digitale Kommunikation die Möglichkeit, Forschungsergebnisse schneller und weitreichender zu verbreiten und dabei, wie etwa im Fall von Twitter, mit den Rezipient*innen direkt zu kommunizieren. Die Bedeutung digitaler Kommunikationsformate (wie Bewegtbild, redaktionelle Online-Formate, Social Media etc.) im Vergleich zu analogen Formaten im Kontext der Risiko- und Wissenschaftskommunikation wurden bislang kaum sozialwissenschaftlich untersucht. Einer der Schwerpunkte des Forschungsbereichs Risikokommunikation ist daher die Analyse digital verbreiteter Informationen zum Strahlenschutz sowie die Bewertung und Rezeption digitaler Kommunikations- und Informationsangebote sein. Dabei werden auch die Effekte einer interaktiven Wissensvermittlung auf die Wahrnehmung wissenschaftlicher Erkenntnisse und Risiken bei Rezipient*innen untersucht. Konkrete Forschungsfragen zur digitalen Kommunikation ergeben sich darüber hinaus innerhalb der Forschungsschwerpunkte zur Wissenschafts- und Krisenkommunikation.

Krisenkommunikation

Nukleare Notfälle wie das Reaktorunglück in Fukushima zeigen Handlungsbedarf in der Gestaltung der Krisenkommunikation auf, die einen weiteren Ansatzpunkt der Forschung bildet (siehe hierzu auch Ausführungen in Kapitel „3 Schutz vor den Auswirkungen nuklearer Unfälle und anderer Bedrohungen mit radioaktivem Material“). Hier werden auch andere Krisensituationen aufgearbeitet, um Erkenntnisse zur Vorbereitung der Krisenkommunikation in radiologischen Notfällen zu sammeln (z.B. Covid-19 Pandemie, Flutkatastrophe in Deutschland Juli 2021). Gerade die Corona-Krise hat bestätigt, dass der Kommunikation von Schutzmaßnahmen und wissenschaftlichen Wissens im Krisenfall eine wichtige Rolle zukommt. Zum Schutz der Bevölkerung muss sichergestellt sein, dass wissenschaftlich fundierte Informationen über Gefährdungslagen und Handlungsmöglichkeiten die Bevölkerung auch erreichen. Dabei können häufige Korrekturen und Überarbeitungen, aber auch die Widersprüchlichkeit wissenschaftlicher Erkenntnisse viele Personen an der Vertrauenswürdigkeit von Wissenschaft zweifeln lassen. Hinzu kommt, dass wissenschaftliche Institutionen und ihre Vertreter*innen zunehmend unter Legitimationsdruck geraten. Die Frage nach der Rolle und der Grundlage für Vertrauen in der Krisen-, aber auch Risikokommunikation im Allgemeinen, soll Gegenstand zukünftiger Forschungsvorhaben sein. Zudem verändert der Trend zur Digitalisierung auch die Kommunikation im Krisenfall. Immer häufiger informieren sich Betroffene direkt über die vielzitierte Google-Suche oder Social Media. Welchen Einfluss die digitale Kommunikation auf die Rezeption von Kriseninformationen und das Verhalten der Bevölkerung hat und wie digitale Kanäle bestmöglich für die Krisenkommunikation des BfS genutzt werden können, ist Teil des Forschungsschwerpunktes.

Wissenschaftskommunikation

Auch außerhalb der Krisenkommunikation spielt die Vermittlung wissenschaftlichen Wissens eine zentrale Rolle für das BfS. Sowohl in Deutschland als auch international lässt sich ein Erstarren wissenschaftlicher Forschung zur Wissenschaftskommunikation beobachten. Dabei steht auch die Frage der Wechselwirkungen zwischen Wissenschaft und Gesellschaft im Fokus. Im Forschungsfeld der Wissenschaftskommunikation im BfS werden Fragen bezüglich der Vermittlung wissenschaftlichen Wissens an die Öffentlichkeit gestellt. Unter anderem geht es darum, Informations- und Kommunikationsangebote wirksam zu gestalten, um das Verständnis der Bevölkerung für die Wirkung von Strahlung und von möglichen Schutzmaßnahmen zu stärken. Eine Frage ist zum Beispiel, wie eine unterschiedlich variierte Informationsaufbereitung (sowohl textbasiert als auch visuell) auf das inhaltliche Themenverständnis der Rezipient*innen und deren Risikowahrnehmung wirkt. Wissenschaftskommunikation geht jedoch über die reine Vermittlung von wissenschaftlichem Wissen hinaus. Daher ist zu reflektieren, welchen Anspruch das BfS und die Öffentlichkeit an den Vermittlungsprozess in den verschiedenen Strahlenthemen haben und wie mit einer möglichen Diskrepanz umgegangen werden kann. Das Spektrum der Gestaltung von Wissenschaftskommunikation reicht dabei von einer Top-Down-Wissensvermittlung bis zur partizipativen Mitgestaltung. In jüngerer Zeit lässt sich ein deutlicher Trend zur Partizipation erkennen. Es kommen vermehrt Formate zum Einsatz, in denen nicht-wissenschaftliche Akteure in Diskussionen über wissenschaftliche Erkenntnisse eingebunden werden (etwa im Rahmen von Bürgerdialogen), oder im Kontext von Citizen Science an der Produktion von wissenschaftlichem Wissen beteiligt werden (siehe auch Kapitel 2 und 3). Auch im Bereich der Strahlenforschung gewinnt Citizen Science zunehmend an Relevanz, bspw. indem sich Bürger an der Erhebung von Daten zur Umweltradioaktivität oder EMF-Exposition beteiligen, um die auf Strahlenschutzthemen bezogene Forschung um andere Formen des Wissens wie etwa Alltags- und Erfahrungswissen zu erweitern und zu ergänzen. Die Möglichkeiten und Perspektiven der Einbindung von Bürger*innen sind Gegenstand zukünftiger Forschung. Citizen Science bietet auch für das BfS ein vielversprechendes neues Forschungsfeld, das nicht nur einen Zugewinn an sonst schwer zu erhebenden Daten bedeutet, sondern auch eine Möglichkeit, die Bevölkerung durch ihre Einbindung in den Wissenschaftsbetrieb für bestimmte Themen zu sensibilisieren (z.B. Notfallschutz, Radon oder UV-Schutz) und ihr Verständnis für Wissenschaft zu stärken. Welchen qualitativen Gewinn die Risikokommunikation dadurch hat, wird ebenso betrachtet, wie die Frage danach, welche Möglichkeiten hierzu die digitale Kommunikation bietet.

Evaluation der Risiko- und Wissenschaftskommunikation

Ein weiteres Forschungsfeld betrifft die Evaluation der Risiko- und Wissenschaftskommunikation des BfS. Gerade im Bereich der Wissenschaftskommunikation ist in den letzten Jahren eine Vielzahl neuer Formate entstanden, die auf unterschiedliche Art und Weise entweder auf die Vermittlung wissenschaftlicher Erkenntnisse oder auf die Einbindung nicht-wissenschaftlicher Akteure in die wissenschaftliche Wissensproduktion setzen. Allerdings liegen hier bislang nur wenige Evaluationen und damit noch kaum wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse bezüglich der Wirkung von Formaten der Risiko- und Wissenschaftskommunikation vor. Dies ist jedoch insofern relevant, als sowohl auf Seiten der Wissenschaft als auch auf Seiten der Öffentlichkeit zunehmend das Bewusstsein dafür wächst, dass wissenschaftliche Informationen auch für eine breite Öffentlichkeit verständlich und nachvollziehbar sein sollen. Darüber hinaus kommen gerade im digitalen Raum vermehrt neue Möglichkeiten der Gestaltung und Vermittlung von Wissen zum Einsatz, deren Wirkung nur selten überprüft wird. Die Evaluation von Risiko-, aber auch von Wissenschafts- und Krisenkommunikation ist daher wichtig, um Hinweise für die Optimierung, Weiterentwicklung und Ergänzung der im BfS zu diesen Zwecken eingesetzten analogen und digitalen Kommunikationsformate zu erhalten und die digitale Kommunikation evidenzbasiert zu gestalten. Ein wichtiger Schritt hierbei ist die wissenschaftsbasierte Entwicklung von Indikatoren zur Bewertung der Reichweite, Qualität und Wirkung der im BfS praktizierten Risiko und Wissenschaftskommunikation.

Radon

Beim konkreten Strahlenschutzthema Radon steht im Vordergrund, das Schutzverhalten der Bevölkerung zu verbessern. Radon ist ein Beispiel dafür, wie Probleme des Strahlenschutzes, die im Umgang der Gesellschaft mit dem Risiko begründet sind, mit gesellschaftswissenschaftlichen Forschungsmethoden adressiert werden. Über die Bestrebungen einer verbesserten Risiko- und Wissenschaftskommunikation hinaus kommt hier auch der Forschungszweig der Gesundheitskommunikation zum Einsatz, da nicht nur Wissensvermittlung und Aufklärung im Vordergrund stehen, sondern explizit die Fragen nach den Determinanten gestellt werden, die das Verhalten hin zu einem umsichtigen Umgang mit Radon beeinflussen könnten. Aus Sicht der Gesundheitspsychologie handelt es sich um einen komplexen Prozess der Motivation und Verhaltensumsetzung. Auch Erkenntnisse und Ansätze der Public-Health-Communication fließen hier mit ein. Untersucht werden in diesem Themenschwerpunkt unter anderem, welche Wirkung Botschaften, Emotionen und grafisch aufbereitete Radondaten (z.B. Karten) auf die Risikowahrnehmung und Handlungsbereitschaft der Bürger*innen haben.

Bei den beschriebenen Forschungsfeldern handelt es sich um Querschnittsthemen, die sich innerhalb konkreter Forschungsvorhaben in vielfacher Weise berühren und daher miteinander verzahnt behandelt werden. Weitere wissenschaftliche Fragestellungen zur Risikokommunikation, die sich mit konkreten Strahlenthemen befassen, sind in den Kapiteln 3 und 7 zu finden.

Übergreifendes Ziel des Forschungsschwerpunktes Risikokommunikation ist es, mithilfe der Forschung zur Wirkung und Rezeption der Risiko- und Wissenschaftskommunikation dazu beizutragen, den Strahlenschutz in Deutschland zu verbessern – d. h. den Rezipient*innen einen informierten Umgang mit Strahlenrisiken zu erleichtern, Strahlenschutzverhalten zu verbessern und auch in radiologischen Notfällen den Schutz der Bevölkerung nachhaltig sicherzustellen. Über die Optimierung der Kommunikationspraxis hinaus sollen auch die zugrundeliegenden Konzepte auf der Basis wissenschaftlicher Evidenz fortlaufend überprüft und ggf. verbessert werden.

Der Forschungsbereich Risikokommunikation trägt dazu bei, die Kommunikationspraxis des BfS aktuell zu halten und weiter zu entwickeln, indem Diskussionen der Kommunikationswissenschaften in die Kommunikationspraxis Eingang finden und die Bedürfnisse der Gesellschaft berücksichtigt werden. Dazu dienen die Untersuchungen im Bereich der digitalen Kommunikation, die Betrachtungen von Nutzen und Grenzen partizipativer Wissenschaftskommunikation im Strahlenschutz und die Entwicklung von Indikatoren und Verfahren zur Evaluation der Risiko- und Wissenschaftskommunikation.

Durch die theoriegeleitete und evidenzbasierte Entwicklung von Kommunikationskonzepten sollen Theorie und Praxis der Risiko- und Wissenschaftskommunikation des BfS stärker miteinander verzahnt werden, was letztlich eine reflektierte und zielorientierte Risiko- und Wissenschaftskommunikation erleichtert.

8.3 Ausblick

Der Forschungsschwerpunkt Risiko- und Wissenschaftskommunikation wird auch in Zukunft in seiner inhaltlichen Ausrichtung gesellschaftlichen und technischen Entwicklungen Rechnung tragen. So ist die Erforschung der digitalen Kommunikation eine Daueraufgabe, da sich Online-Angebote und technische Möglichkeiten zur digitalen Kommunikation stetig weiterentwickeln. Für eine wirkungsvolle Kommunikation des BfS ist es nötig, mit diesen Entwicklungen Schritt zu halten, indem ein kontinuierliches „Horizon Scanning“ betrieben wird.

Auch der Trend zur Partizipation am Wissenschaftsprozess wird in Zukunft eine stärkere Rolle spielen. Zudem steht die Entwicklung von Modellen der Risiko- und Wissenschaftskommunikation kontinuierlich im Fokus. Werden neue Modelle – bedingt durch gesellschaftliche Entwicklungen – von der wissenschaftlichen Community entwickelt, und wie gut eignen sie sich als Grundlage für die Kommunikation im Strahlenschutz?

In Bezug auf konkrete Strahlenschutzthemen wird das Auseinanderklaffen zwischen wissenschaftlicher Evidenz und gesellschaftlichem Umgang mit Strahlenrisiken auch weiterhin die Forschung im Bereich Wissenschafts- und Risikokommunikation beschäftigen. Beispiele sind die fehlende öffentliche Aufmerksamkeit im Umgang mit bekannten Risiken wie Radon, das riskante Sonnenexpositionsverhalten großer Teile der Bevölkerung, die wissenschaftskritische Haltung bei Themen wie EMF, und das mangelnde Wissen der Bevölkerung in vielen Bereichen optischer Strahlung. Aktive Informations- und Kommunikationsbemühungen werden durch sozialwissenschaftliche Forschung begleitet, um die Wirkung der Aktivitäten in die gewünschte Richtung zu verbessern.

Da es sich bei dem Forschungsschwerpunkt Risiko- und Wissenschaftskommunikation um ein Querschnittsthema handelt, greift er zudem laufend weitere Themen auf, die sich aus den Arbeitsbereichen des BfS ergeben.

9 Abkürzungsverzeichnis

5G	bezeichnet das Funknetz der fünften Mobilfunkgeneration; 5G ist Nachfolger von LTE bzw. Advanced LTE (4G) und UMTS (3G).
ALLIANCE	European Radioecology Alliance; (Radioökologie),
AOP	Adverse-Outcome-Pathway
ARTM	atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell
AVV Tätigkeiten	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten
BfR	Bundesinstitut für Risikobewertung
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
CBRN	chemisch, biologisch und radiologisch/nuklear
CC	Collaborating Centre
CT	Computertomographie
CTBT	Kernwaffenteststoppabkommen (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty)
CTBTO	Organisation zur Überwachung des Kernwaffenteststopp-Vertrags (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization)
DNA	Desoxyribonukleinsäure
DRW	diagnostischer Referenzwert
DVT	digitale Volumetomographie
EMF	elektromagnetische Felder
ERNICIP	European Reference Network for Critical Infrastructure Protection
EURADOS	European Radiation Dosimetry Group, (Dosimetrie)
EURAMED	European Alliance for Medical Radiation Protection Research, (Strahlenschutz in der Medizin)
Flash (-Bestrahlung)	Kurzgepulstehoch dosierte Strahlentherapie
GCR	Galactic Cosmic Radiation
GICNT	Global Initiative to Combat Nuclear Terrorism
HERCA	Heads of the European Radiological Competent Authorities

HLG-LDR	High-level Group on Low Dose Research
HRQ	hochradioaktive Strahlenquelle
IAEA	internationale Atomenergieorganisation
ICNIRP	Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung
ICRP	internationale Strahlenschutzkommission
IMIS	Integrierten Mess- und Informationssystem
IMS	International Monitoring System
iPAUW	International Pooled Analysis of Uranium Processing Workers
IT	Informationstechnik
Kd-Wert	Verteilungskoeffizient
KI	künstliche Intelligenz
KKW	Kernkraftwerk
LiFi	Light Fidelity
MELODI	Multidisciplinary European Low Dose Initiative, (Strahlenwirkungen und –risiken im Niedrigdosisbereich),
MORC	Material Out of Regulatory Control
MR	Magnetresonanz
MRI	Max-Rubner-Institut
MSP	Mammographie-Screening-Programm
mGy	Milligray (Energiedosis)
mSv	Millisievert (Äquivalentdosis)
NERIS	Network of European organisations involved in emergency and recovery preparedness and management, (Nuklearer und radiologischer Notfallschutz)
NGA	Nuklearspezifische Gefahrenabwehr
nm	Nanometer (Längeneinheit)
NORM	Naturally Occurring Radioactive Materials
OECD /NEA	Organisation for Economic Co-operation and Development /Nuclear Energy Agency
Omics	Omics dient als Oberbegriff für molekularbiologische Methoden, die auf "-omik" (engl. "-omics") enden, wie Genomik, Proteomik, Metabolomik u.a.
PAEC	Potentielle Alpha-Energiekonzentration

ProZES	Programm zur Berechnung der Zusammenhangswahrscheinlichkeit zwischen einer Erkrankung und einer Strahlenexposition
PUMA	gepoolte Uranbergarbeiter-Studien (Pooled Uranium Miners Analysis)
RadoNorm	Towards effective radiation protection based on improved scientific evidence and social considerations – focus on Radon and NORM https://www.radonorm.eu
RANET	Response and Assistance Networks
RENEB	Running the European Network of Biological and retrospective Physical dosimetry (Realisierung des Europäischen Netzwerks in Biologischer Dosimetrie (<i>RENEB</i>))
SCENIHR	Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks
SCHEER	Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks
SCR	Solar Cosmic Radiation
SHARE	European platform for Social Sciences and humanities research relating to ionising radiation, (Sozialwissenschaft)
SMR	Small Modular Reactor
SPE	Solar Particle Events
SSK	Strahlenschutzkommission
StrlSchG	Strahlenschutzgesetz
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
TNSA	Target Normal Sheath Acceleration
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
UAVs	unbemannte Fluggeräte (unmanned aerial vehicle)
UBA	Umweltbundesamt
UKP-Laser	Ultrakurzpuls-Laser
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
UV	Ultraviolett
UV-C	Ultraviolettstrahlung im Wellenlängenbereich von 280 bis 100 Nanometer
VLC	Visible Light Communication
WHO	Weltgesundheitsorganisation