



Bundesamt
für Strahlenschutz

Schriften

Strahlenschutzforschung

Programmreport 2022

Bericht über das vom Bundesamt für Strahlenschutz
fachlich begleitete und administrativ umgesetzte
Forschungsprogramm Strahlenschutz des
Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare
Sicherheit und Verbraucherschutz

BfS SCHR-70/25

Dr. Christiane Hauk
Dr. Vanessa Bednarz
Andreas Balbach
Anita Lovsky
Claudia Bernhard-Ströl

Impressum

Bundesamt für Strahlenschutz
Postfach 10 01 49
38201 Salzgitter

Tel.: +49 30 18333-0

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:0221-2025102356455](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0221-2025102356455)

Stand: Oktober/2025

Inhaltsverzeichnis

Einführung	7
Zusammenfassung der Forschungsergebnisse 2022.....	9
Introduction.....	14
Summary of results from research projects in 2022	16
Abgeschlossene Vorhaben (Abschlussberichte).....	21
Themenbereich 01 - Natürliche Strahlenexposition	22
Untersuchung zur Nutzbarkeit von Citizen Science zur Gewinnung von Daten zur Radoninnenraumkonzentration	23
Ermittlung der Unsicherheiten in der Strahlenexpositionsabschätzung in der Wismut-Kohorte – Teil 2	26
Themenbereich 02 - Strahlenschutztechnik.....	31
Themenbereich 03 - Strahlenbiologie - Wirkung von ionisierender und nichtionisierender Strahlung, Strahlenempfindlichkeit.....	32
Themenbereich 04 - Medizinische Strahlenexposition	33
Bestimmung von Mindestanforderungen an Bildqualität und Dosis in der Brusttomosynthese .	34
Themenbereich 05 - Radioökologie	44
Alters- und produktgruppenspezifische Auswertung der in Deutschland erhobenen Verzehrsdaten	45
Modellierung von Hydrodynamik und Stofftransport bei wasser gebundenen Transportprozessen im Strahlenschutz unter Berücksichtigung der Freigabe schwach radioaktiver Stoffe.....	49
Themenbereich 06 - Notfallschutz	53
Entwicklung einer Progressiven Web App (PWA) für Mobiltelefone (Smartphones) zur Dosisrekonstruktion und Information der Bevölkerung und der Einsatzkräfte bei einem radiologischen Notfall	54
Themenbereich 07 - Allgemeine und Gesellschaftliche Aspekte des Strahlenschutzes	56
Durchführung einer repräsentativen Erhebung im Jahr 2021 mit dem Titel „Was denkt Deutschland über Strahlung? Umfrage 2021“	57
Themenbereich 08 - Elektromagnetische Felder	62
Machbarkeitsstudie eines auf Smartphone-Apps beruhenden Hochfrequenz-Messnetzwerkes zur Abschätzung der Exposition der Bevölkerung mit elektromagnetischen Feldern des Mobilfunks.....	63
Erprobung, Weiterentwicklung und Validierung von neuartiger Messtechnik für statische und niederfrequente elektrische und magnetische Felder	71

Machbarkeitsstudie für eine interdisziplinäre Studie zur Untersuchung eines Zusammenhangs zwischen Umwelt-, genetischen Faktoren und Leukämie in B-Zell ALL-Patienten	77
Laufende Vorhaben (Statusberichte)	84
Themenbereich 01 - Natürliche Strahlenexposition	85
Untersuchung der Abhängigkeit der Radonkonzentration in der Bodenluft in rund 1 Meter Tiefe von Wetterparametern für Böden mit verschiedenen Permeabilitäten und Nutzungshistorie...	86
Untersuchung der Abhängigkeit von Radoneintrittsrates und Luftwechsel von Witterungsparametern und Nutzerverhalten als Grundlage für die Beurteilung der Radondichtheit von Gebäuden.....	89
Mikroskalige Modellierung von UV-Belastungen in urbanen Umgebungen für verschiedene Bevölkerungsgruppen zur Hautkrebsprävention	96
Themenbereich 02 - Strahlenschutztechnik.....	102
Aufbau und Charakterisierung eines Referenzfeldes zur Sicherstellung des Strahlenschutzes an Beschleunigeranlagen in Medizin und Forschung und zur Prüfung und Kalibrierung entsprechender Messgeräte	103
Analyse von Urankonzentrationen aus Deutschland mit bekannter Herkunft: Unterstützung der Nuklearen Forensik in Deutschland.....	106
Themenbereich 03 - Strahlenbiologie - Wirkung von ionisierender und nichtionisierender Strahlung, Strahlenempfindlichkeit.....	109
Validierung genetischer Loci, die das Lungenkrebsrisiko in Abhängigkeit von der Radonexposition beeinflussen - Qualitätssicherung und Auswertung	110
Untersuchung biologischer Mechanismen strahlen-induzierter Herz-Kreislauf-Erkrankungen .	113
Validierung genetischer Loci, die das Lungenkrebsrisiko in Abhängigkeit von der Radonexposition beeinflussen - genetische Typisierung	116
Themenbereich 04 - Medizinische Strahlenexposition	119
Erstellung und Überarbeitung von technischen Normen für den Strahlenschutz und die Qualitätssicherung in der medizinischen Radiologie	120
Simulation von interventionellen Strahlenanwendungen in virtueller Realität zur Optimierung des Strahlenschutzes von Personal und Patienten	124
Themenbereich 05 - Radioökologie	127
Validierung des atmosphärischen Ausbreitungsmodells ARTM durch experimentelle Untersuchungen	128
Weiterentwicklung des atmosphärischen Radionuklid-Transport-Modells ARTM zur Verarbeitung komplexer und realitätsnaher Wind- und Turbulenzfelder für eine realitätsnähere Modellierung von emittierten radioaktiven Stoffen in die Umwelt	133
Themenbereich 06 - Notfallschutz	137

Erweiterung des Anwendungsbereichs der Werkzeuge zur Kombination anlagentechnischer und radiologischer Informationen zur Einschätzung von Freisetzen	138
Analyse von Gamma-Spektren unter Anwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz	143
Interdisziplinäre Lageinformationen zur Optimierung des radiologischen Lagebildes (ILaS RLB)	152
Analyse radiologisch signifikanter Gefährdungspotentiale und Ereignisabläufe zur Konkretisierung von Schutzmaßnahmen im Rahmen der Notfallpläne	154
Ausbau und Bereitstellung von Nutzungsmöglichkeiten ausführlicher Abfallkataster aus radiologischer Sicht für alle im allgemeinen Notfallplan des Bundes beschriebenen Referenzszenarien zur Vorbereitung und Unterstützung bei der Evaluierung des besonderen Notfallplans des Bundes "Abfälle"	157
Themenbereich 07 - Allgemeine und gesellschaftliche Aspekte des Strahlenschutzes	161
Erfassung der Schallfelder von frei am Markt erhältlichen Ultraschallquellen: Abschätzung des Schädigungspotentials	162
Überarbeitung von technischen Strahlenschutznormen aus dem Bereich des Normenausschuss Materialprüfung (NMP) sowie aus dem Komitee K967 der DKE	165
Fortschreibung der Untersuchung und Bewertung der tätigkeitsbezogenen Strahlenexposition in Anlagen nach AtG und standortnahen Zwischenlagern für radioaktive Abfälle sowie sonstigen Einrichtungen nach StrlSchG	168
Themenbereich 08 - Elektromagnetische Felder	173
Leukämie im Kindesalter – Einfluss des Immunsystems auf die Entstehung der Erkrankung (experimentelle Studie an einem geeigneten Tiermodell)	174
Systematischer Review zum Einfluss elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf die Fruchtbarkeit bei Menschen sowie in Tier- und Laborstudien	176
Bewertende Literaturstudie zum Einfluss elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf oxidative Prozesse bei Menschen sowie in Tier- und Laborstudien	178
Beteiligung an einer Folgestudie zur Verifikation oder Falsifikation der Ergebnisse der NTP-Langzeitstudie an Mäusen und Ratten zu Ganzkörperexposition mit Mobilfunkfeldern	181
Bestimmung von Expositionen gegenüber elektromagnetischen Feldern der Elektromobilität	184
Wirkungen auf Zellen der Körperoberfläche bei Exposition mit Zenti- und Millimeterwellen (5G Frequenzen)	189
Untersuchung zum Auftreten von Leukämie bei prädisponierten, Magnetfeld-exponierten Tiermodellen	191
Smart cities: Abschätzung der Gesamtexposition des Menschen durch zusätzliche 5G Mobilfunktechnologien anhand modellierter Zukunftsszenarien	194
Einfluss der zwischenfrequenten Magnetfelder der induktiven Leistungsübertragung beim Aufladen von Elektrofahrzeugen auf das Verhalten von Labornagern	197

Entwicklung und Verfeinerung dosimetrischer Modelle für die Expositionsanalyse und -bewertung	200
Wahrnehmungsschwellen und Wirkmechanismen statischer und niederfrequenter elektrischer Felder bei Menschen	204
Einfluss von niederfrequenten Magnetfeldern auf den Schlaf und Marker der Alzheimer Demenz bei Menschen	209
Wirkung von niederfrequenten magnetischen Feldern auf die Alzheimer-Erkrankung im humanen Zellkultur-Modell.....	213
Untersuchung eines möglichen Effekts einer Exposition mit elektromagnetischen Feldern auf das Epigenom und das Transkriptom	216
Begonnene Forschungsvorhaben	219
Themenbereich 01 - Natürliche Strahlenexposition	220
Themenbereich 02 - Strahlenschutztechnik.....	221
Themenbereich 03 - Strahlenbiologie - Wirkung von ionisierender und nichtionisierender Strahlung, Strahlenempfindlichkeit.....	222
Themenbereich 04 - Medizinische Strahlenexposition	223
Themenbereich 05 - Radioökologie	224
Charakterisierung der Ableitung von radioaktiven Stoffen aus speziellen Arten von Einrichtungen im Bereich Medizin und Industrie mit der Fortluft	225
Themenbereich 06 - Notfallschutz	226
Detailbewertung ausgewählter Ereignisse aus dem Spektrum des Referenzszenarium S3 "Kernkraftwerk im übrigen Europa" des allgemeinen Notfallplans des Bundes für den Notfallschutz zum Ausbau der Wissensbasis des Team Strahlenschutz für den Einsatz im Notfall	227
Themenbereich 07 – Allgemeine und gesellschaftliche Aspekte des Strahlenschutzes	228
Themenbereich 08 - Elektromagnetische Felder	229
5G: Risikokommunikation der Bevölkerung und Möglichkeiten dialogorientierter Wissenschaftskommunikation	230
Risiken elektromagnetischer Felder aus Sicht von Allgemeinmediziner*innen und Kinderärzt*innen in Deutschland II	233
Umfrage Stellenwert Magnetfelder in der öffentlichen Wahrnehmung des Stromnetzausbaus II	234
Molekulardynamik von Proteinfaltung unter Einfluss von externen magnetischen Feldern	235
Abkürzungen	236
Kontaktadressen.....	237

Einführung

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) vergibt im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) Forschungsvorhaben auf dem Gebiet des Strahlenschutzes. Die Ergebnisse dieser Vorhaben dienen als Entscheidungshilfen bei der Erarbeitung von Strahlenschutzvorschriften und bei der Erfüllung sonstiger Fachaufgaben im Bereich Strahlenschutz. Die Planung, fachliche und administrative Vorbereitung, Vergabe, Begleitung sowie fachliche Bewertung der Ergebnisse der Untersuchungsvorhaben ist grundsätzlich Aufgabe des BfS. Der vorliegende Bericht informiert über Ergebnisse (in Form von Abschlussberichten) bzw. Zwischenergebnisse (in Form von Statusberichten) von Strahlenschutzvorhaben im Rahmen der Ressortforschung des BMUV, die im Jahr 2022 erzielt wurden, sowie über im Jahr 2022 begonnene Vorhaben. Die Forschungsvorhaben wurden mit Mitteln des BMUV finanziert. Zusätzliche Mittel für das Forschungsprogramm "Strahlenschutz beim Stromnetzausbau" (vgl. Themenbereich 8) wurden dem BMUV von den Stromnetzbetreibern zur Verfügung gestellt. Sämtliche Forschungsvorhaben wurden allein vom BfS vergeben und fachlich betreut, so dass interessensgesteuerte Einflüsse ausgeschlossen waren.

Der Schutz von Mensch und Umwelt vor den Gefahren der ionisierenden und nichtionisierenden Strahlung ist eine zentrale Aufgabe des BMUV und des BfS. Die Wahrnehmung dieser Aufgabe sowie insbesondere die Erarbeitung von Strahlenschutzvorschriften und die Aufsicht des Bundes über den Vollzug des Atom- und Strahlenschutzrechts durch die Länder sind nur auf einer breiten wissenschaftlich-technischen Grundlage möglich. Dabei sind sowohl grundsätzliche Fragestellungen als auch solche im Zusammenhang mit der Durchführung einzelner Strahlenschutzmaßnahmen zu untersuchen und zu beantworten. Zur Gewinnung von Entscheidungshilfen und zur sachgerechten Erfüllung der Fachaufgaben müssen Untersuchungsvorhaben zu einem weitgespannten Themenspektrum durchgeführt werden (Ressortforschung).

Im Folgenden werden alle **Themenbereiche** (TB) der Strahlenschutzforschung näher erläutert, auch wenn 2022 keine Vorhaben in einem Bereich durchgeführt wurden. Hierbei können manche Themenbereiche Forschungsvorhaben sowohl im Bereich der ionisierenden als auch der nichtionisierenden Strahlung enthalten.

Eine vordringliche Aufgabe besteht darin, die **zivilisatorische und natürliche Strahlenexposition** (TB 01) von Mensch und Umwelt zu erfassen und zu bewerten. So müssen etwa Anreicherungsprozesse natürlicher radioaktiver Stoffe (z. B. Radon) oder Entwicklungstendenzen bei der zivilisatorischen Nutzung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung rechtzeitig erkannt und bewertet werden. Dadurch kann frühzeitig mit geeigneten Maßnahmen einer Gefährdung von Mensch und Umwelt entgegengewirkt werden. Ebenso nimmt, beispielsweise durch die Einführung neuer Technologien und die klimawandelbedingte Änderung der solaren UV-Belastung, die Exposition der Bevölkerung durch optische Strahlung zu. Die Forschung zu optischer Strahlung erfasst daher die Exposition der Bevölkerung gegenüber UV-Strahlung, sichtbarem Licht und Infrarot-Strahlung und dient der Bewertung gesundheitlicher Risiken dieser Strahlungsarten sowie der Entwicklung von Strahlenschutzkonzepten.

Eine Voraussetzung für viele Untersuchungen, aber auch für den Nachweis der Einhaltung der Dosisgrenzwerte, ist die Verfügbarkeit entsprechender Messtechniken und Verfahren zur Dosismessung. Die vielfältigen und komplizierten Messaufgaben der **Strahlenschutztechnik** (TB 02) führen dazu, dass bestehende Messsysteme verbessert, neue Systeme entwickelt sowie dosimetrische Modelle und Daten ständig überprüft und angeglichen werden müssen.

Die Strahlenschutzverordnung enthält Grenzwerte für den Schutz von Einzelpersonen in der Bevölkerung und für den Schutz beruflich strahlenexponierter Personen. Diese Grenzwerte basieren auf wissenschaftlichen Erkenntnissen, die im Interesse eines möglichst umfassenden

Strahlenschutzes ständig zu aktualisieren und dem Stand naturwissenschaftlicher und medizinischer Forschung anzupassen sind. Die **biologische Reaktion auf ionisierende und nichtionisierende Strahlung** (TB 03) kann individuell sehr unterschiedlich sein und muss deshalb weiter untersucht und bewertet werden. Insbesondere müssen Verfahren zur Erkennung individueller **Strahlenempfindlichkeit** weiterentwickelt werden.

Da die zivilisatorische Strahlenexposition der Bevölkerung zum überwiegenden Teil durch die **medizinische Strahlenexposition** (TB 04) moderner Diagnosemethoden bestimmt wird, ist diese ein weiterer Schwerpunkt der Projekte im Ressortforschungsplan des BMUV. Hier kommt es vor allem darauf an, dass der gesundheitliche Nutzen einer Anwendung am Menschen gegenüber dem Strahlenrisiko überwiegt. Nutzen und Risiken von Untersuchungsverfahren sind abzuwägen, nach risikoärmeren Alternativverfahren ist zu suchen und die Strahlenexposition ist durch geeignete Verfahren zu reduzieren.

Für die Abschätzung der Strahlenexposition von Einzelpersonen in der Bevölkerung ist es wichtig zu wissen, wie sich radioaktive Stoffe in der Umwelt verhalten, wie sie sich in Luft und Wasser ausbreiten, in den verschiedenen Ökosystemen anreichern und über die Ernährungsketten auf den Menschen einwirken. Deshalb werden Detailkenntnisse der **Radioökologie** (TB 05) benötigt.

Überall, wo mit radioaktiven Stoffen oder ionisierender Strahlung gearbeitet wird, kann es auf Grund menschlichen und/oder technischen Versagens zu Zwischenfällen kommen, bei denen radioaktive Stoffe freigesetzt und/oder Personen Strahlung ausgesetzt werden. Deshalb sind die Ermittlung und Optimierung von Vorsorgemaßnahmen zur Vermeidung von Störfällen und Unfällen ständige Aufgaben des BfS. Der **Notfallschutz** (TB 06) ist ständig zu verbessern und die Effektivität der Schutzmaßnahmen bis hin zu medizinischen Maßnahmen im Falle einer schädigenden Exposition ist laufend zu optimieren.

Sowohl die **Allgemeinen** als auch die **Gesellschaftlichen Aspekte des Strahlenschutzes** (TB 07) sind neben den naturwissenschaftlichen Fragestellungen ein wesentlicher Bestandteil der Strahlenschutzforschung. Dieser Bereich umfasst Forschungsprojekte zur Risiko- und Wissenschaftskommunikation im weiteren Sinn. Im Fokus steht das Ziel, die öffentliche Wahrnehmung und das Verständnis von Informationen über Strahlung zu erfassen und aufbauend darauf stärken, und einen verantwortungsvollen Umgang mit Strahlenrisiken zu fördern. Durch optimierte Informationsstrategien soll das Vertrauen der Bevölkerung in Strahlenschutzmaßnahmen gefestigt werden. Zudem wird analysiert, welche Faktoren die Risikowahrnehmung beeinflussen und wie die individuelle und gesellschaftliche Umsetzung von Strahlenschutzmaßnahmen erhöht werden kann. Darüber hinaus werden in einer Reihe von Vorhaben Fragen von allgemeiner Bedeutung für den Strahlenschutz untersucht. Hierzu zählen beispielsweise Forschungsvorhaben zum Thema beruflicher Strahlenschutz.

Elektromagnetische Felder (TB 08) sind das Ergebnis von Technologien wie Stromversorgungsnetzen und Mobilfunk, die elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder erzeugen. Diese Felder, als nichtionisierende Strahlung kategorisiert, werden in hoch- und niederfrequente Felder unterteilt. Die Forschungsarbeiten in diesem Bereich zielen darauf ab, die potenziellen gesundheitlichen Auswirkungen zu verstehen und zu bewerten. Dabei werden Schutz- und Vorsorgekonzepte entwickelt, um die Bevölkerung vor möglichen Risiken zu schützen und diese so weit wie möglich zu minimieren. Ein Teil der Forschungsvorhaben in diesem Themenbereich wurde im Rahmen des Forschungsprogramms "Strahlenschutz beim Stromnetzausbau" durchgeführt, welches zum Teil aus Mitteln des BMUV finanziert wurde, sowie zum Teil aus Mitteln, die dem BMUV von den Stromnetzbetreibern zur Verfügung gestellt wurden. Sämtliche Forschungsvorhaben wurden allein vom BfS vergeben und fachlich betreut, so dass interessensgesteuerte Einflüsse ausgeschlossen waren.

Zusammenfassung der Forschungsergebnisse 2022

Im Folgenden wird über Ergebnisse im Jahr 2022 abgeschlossener Forschungsvorhaben berichtet.

Themenbereich 01 - Natürliche Strahlenexposition

Untersuchung zur Nutzbarkeit von Citizen Science zur Gewinnung von Daten zur Radoninnenraumkonzentration (3621S12230)

Das Forschungsprojekt „Untersuchung zur Nutzbarkeit von Citizen Science zur Gewinnung von Daten zu Radoninnenraumkonzentration“ (Laufzeit 11/2021 – 07/2022) zeigt, dass ein Citizen-Science-Projekt in Deutschland einen Beitrag zur Gewinnung von Daten zur Radoninnenraumkonzentration leisten kann. Dies gilt vor allem dann, wenn sich ein derartiges Projekt möglichst nahtlos in die Gesamtstrategie des BfS zur Datengewinnung von Radoninnenraumkonzentration einfügt. Ansatzpunkte hierfür sind beispielsweise durch die Messpflichten von Arbeitsstätten gegeben. Als Nebenfolge kann ein Citizen-Science-Projekt einen Beitrag zur Verbesserung des Radonwissens in der Bevölkerung leisten.

Die in Deutschland durchgeführten bürgerwissenschaftlichen Projekte mit naturwissenschaftlichen Bezügen sowie die internationalen Projekte im Bereich der Radon-Forschung zeigen, dass die Einbeziehung von Bürger*innen auf vielfältige Arten und Weisen und bei gleichzeitiger Einhaltung von rechtlichen Rahmenbedingungen wie dem Datenschutz erfolgen kann. Von zentraler Bedeutung für die Motivation der Bürgerwissenschaftler*innen und für das Gelingen einer erfolgreichen Bürgerbeteiligung ist das Erkenntnisinteresse bzw. die Formulierung und Vermittlung der Forschungsfrage, auf die mit Hilfe der Bürger*innen Antworten gefunden werden sollen.

Das im Abschlussbericht skizzierte bürgerwissenschaftliche Projekt hätte den Charakter einer kontinuierlichen Aktion. Die Projektlogik könnte darin bestehen, dass sich Bürgerwissenschaftler*innen elektronische Messgeräte an zentralen Leihstellen ausleihen, selbständig die Radonkonzentration in Innenräumen messen, anschließend die Daten übertragen und das Messgerät wieder zurückgeben. Aufgrund des kontinuierlichen Charakters und der Projektlogik, ist eine Zusammenarbeit mit relevanten (lokalen) Akteur*innen notwendig, um möglichst viele Bürger*innen zur Beteiligung zu motivieren und die notwendigen Messgeräte zur Verfügung zu stellen.

Es ist nicht zu erwarten, dass Citizen Science Projekte zu Radon per se eine kostengünstige und personalschonende Alternative zu professionellen Forschungsprojekten darstellen. Eine Abwägung über den Wert des Citizen Science Gedanken gegenüber den damit verbundenen Folgen ist unabdingbar.

Ermittlung der Unsicherheiten in der Strahlenexpositionsabschätzung in der Wismut-Kohorte – Teil 2 (3618S12223)

In diesem Forschungsvorhaben wurde eine statistische Methode für die Wismut-Studie entwickelt, die es ermöglicht, Risikomodelle für die Sterblichkeit an Lungenkrebs durch Radon zu berechnen und gleichzeitig Unsicherheiten in den Expositionsabschätzungen zu berücksichtigen. Auf der Grundlage des vorangegangenen Forschungsvorhabens "Teil 1" wurde in Teil 2 ein Konzept zur Quantifizierung von Expositionsunsicherheiten in der Wismut-Studie erarbeitet und umgesetzt. Es wurde ein hierarchischer Bayesianischer Ansatz entwickelt, der die Expositionsunsicherheiten bei der Risikomodellierung berücksichtigt. In diesem Ansatz wird die komplexe Berechnung der Radon-Exposition in der Wismut-Studie abgebildet. Die entwickelte Methode wurde implementiert und anhand einer Simulationsstudie untersucht. Die Simulationen zeigten, dass die entwickelte Methode die komplexen Expositionsunsicherheiten in der Wismut-Studie adäquat berücksichtigt und dass die

Anwendung der Methode bessere Ergebnisse liefert als klassische Methoden zur Berücksichtigung von Expositionsunsicherheiten.

Die entwickelte Methode wurde auf die Wismut-Studie angewandt. Das zusätzliche Risiko (excess hazard ratio, EHR) für Lungenkrebs durch Radonfolgeprodukte betrug 0,54 pro 100 WLM (95%-Unsicherheitsintervall: 0,35-0,81) und ist etwas höher als das Risiko, das sich ergab, wenn die Unsicherheiten in der Expositionsabschätzung nicht berücksichtigt wurden (EHR/100 WLM = 0,33; 95%-Unsicherheitsintervall: 0,27-0,40). Wurden nur Wismut-Beschäftigte betrachtet, die ihre Beschäftigung bei der Wismut 1960 oder später aufgenommen haben, war das Lungenkrebs-Risiko durch Radonfolgeprodukte unter Berücksichtigung der Expositionsunsicherheiten ebenfalls höher (EHR/100 WLM = 1,80; 95%-Unsicherheitsintervall: 0,70-3,36) als ohne Berücksichtigung der Unsicherheiten (EHR/100 WLM = 1,44; 95%-Unsicherheitsintervall: 0,73-2,52). Die Ergebnisse sind vorläufig, da nicht die Daten für alle Arten der Expositionsabschätzung in die Analyse eingeschlossen werden konnten, nur Subgruppen der jeweiligen Kohorten betrachtet wurden und keine effektmodifizierenden Variablen eingeflossen sind.

Themenbereich 02 – Strahlenschutztechnik

Zu diesem Themenbereich liegt für das Jahr 2022 kein Bericht vor.

Themenbereich 03 - Strahlenbiologie - Wirkung von ionisierender und nichtionisierender Strahlung, Strahlenempfindlichkeit

Zu diesem Themenbereich liegt für das Jahr 2022 kein Bericht vor.

Themenbereich 04 - Medizinische Strahlenexposition

Bestimmung von Mindestanforderungen an Bildqualität und Dosis in der Brusttomosynthese (3619S42363)

Ziel des Projektes war die Entwicklung multipler Qualitätssicherungskonzepte (QS-Protokolle) zur Bestimmung der Bildqualität an Tomosynthesegeräten (DBT) unterschiedlicher Hersteller. Um den Aufwand und die Subjektivität gegenüber visuellen Auswertungen zu reduzieren, sollten modellbasierte Analysen (Model Observer, MO), zum Einsatz kommen. Zum Schluss sollten hinsichtlich der Bildqualität Mindestanforderungen erarbeitet sowie eine Korrelation zur Parenchymdosis hergestellt werden (Dosiseffizienz).

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass eine Prüfung der Bildqualität mit dem L2-Phantom in der Praxis möglich ist. Das L2-Phantom zeigte die Stärke der DBT überlagernde Strukturen, in Abhängigkeit der z-Auflösung der Systeme, zu minimieren. Weiter konnte gezeigt werden, dass das L2-Phantom unter Verwendung einer Randomisierungssoftware in einem akzeptablen Zeitaufwand ebenfalls visuell ausgewertet werden kann. Mit Hilfe der beiden Maßzahlen für die Bildqualität (Calc-Score und Mass-Score) konnte durch Korrelation mit der Strahlenexposition zusätzlich der Dosis-Effizienz-Index der Systeme bestimmt werden. Die Anwendung eines Model Observer für die Auswertung des L2-Phantom war prinzipiell möglich. Es konnten keine Hersteller und Systemtypen übergreifenden Kanalparameter gefunden werden. Diese könnten allerdings im Rahmen einer Typenprüfung pro Systemtyp ermittelt werden.

Themenbereich 05 – Radioökologie

Alters- und produktgruppenspezifische Auswertung der in Deutschland erhobenen Verzehrsdaten (3620S52550)

Die Berechnungsvorschriften zur Ermittlung der Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung verwenden altersgruppen- und lebensmittelgruppenspezifischen Verzehrswerten. Im Zuge der Fortschreibung dieser Berechnungsvorschriften müssen diese Verzehrswerten auf Aktualität überprüft werden. In dem Forschungsvorhaben wurden Mittelwerte sowie weitere statistische Kennzahlen für diese Verzehrswerten für sechs Altersgruppen aus aktuellen Erhebungen ermittelt. Außerdem wurden zeitliche Trends und regionale Unterschiede untersucht. Die Ergebnisse wurden mit der gültigen Tabelle für Verzehrswerten verglichen, wichtige Abweichungen herausgestellt und im Kontext der verwendeten Studien bewertet.

Modellierung von Hydrodynamik und Stofftransport bei wassergebundenen Transportprozessen im Strahlenschutz unter Berücksichtigung der Freigabe schwach radioaktiver Stoffe (3618E03510)

In diesem auf Zuwendungsbasis geförderten Forschungsvorhaben mit externer Promotion an der Universität Stuttgart wurde der sogenannte Wasserpfad bei der Freigabe geringfügig radioaktiver Stoffe einer äußerst detaillierten fachlichen Untersuchung unterzogen. Nach erfolgter Freigabe kann beispielsweise Bauschutt aus dem Rückbau der Kernkraftwerke auf konventionellen Deponien oberflächennah entsorgt werden, denn freigegebenes Material ist juristisch als nicht radioaktiv anzusehen. Die zusätzliche individuelle Dosis infolge der Freigabe ist vernachlässigbar und berücksichtigt die aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Wirkung geringer zusätzlicher Strahlenexpositionen auf Mensch und Umwelt. Beim Wasserpfad wird untersucht, ob in die Deponie eindringendes Regenwasser zu einem Eintrag von Radionukliden in die Umwelt führen kann. Damit ist der Untersuchungsgegenstand auch von grundsätzlichem Interesse für die Radioökologie. Die Universität Stuttgart hat sich mit dieser Problematik im vorliegenden Forschungsprojekt mittels state-of-the-art Computermodellierung befasst. Hierbei wurden bisherige Modellierungsansätze erweitert und um Aspekte wie Heterogenität des Materials oder Klimawandel ergänzt.

Themenbereich 06 – Notfallschutz

Entwicklung einer Progressiven Web App (PWA) für Mobiltelefone (Smartphones) zur Dosisrekonstruktion und Information der Bevölkerung und der Einsatzkräfte bei einem radiologischen Notfall (3621S62510)

In diesem Forschungsprojekt wurde der Prototyp einer Progressiven Web App (PWA) auf Basis von Open Source Software entwickelt. Eine PWA kann sowohl über den Browser aufgerufen als auch betriebssystemunabhängig auf mobilen Endgeräten installiert werden, sodass Inhalte auch ohne Internetverbindung genutzt werden können. Der entwickelte PWA-Prototyp enthält allgemeine und notfallspezifische Informationen für die Bevölkerung im Falle eines radiologischen Ereignisses. Zudem kann der entwickelte PWA-Prototyp zur Unterstützung der Dosisrekonstruktion eingesetzt werden, indem Benutzer (abhängig vom genutzten Endgerät) ihre Bewegungsprofile aufzeichnen können. Aufbauend auf den während der technischen Umsetzung gewonnenen Erkenntnissen wurde ein Konzept für eine PWA zur Information der Einsatzkräfte in radiologischen Notfällen ausgearbeitet. Das Projekt wurde im oben genannten Zeitraum vollständig umgesetzt.

Themenbereich 07 - Gesellschaftliche Aspekte des Strahlenschutzes

Durchführung einer repräsentativen Erhebung im Jahr 2021 mit dem Titel "Was denkt Deutschland über Strahlung? Umfrage 2021" (3621S72210)

In einer kombinierten qualitativen und quantitativen Studie (qualitative Interviews und Gruppendiskussionen sowie bevölkerungsrepräsentative CATI-Befragung) wurden Wissen, Wahrnehmung, Risikoempfinden, Schutzverhalten sowie Informationsbedarf zu ausgewählten Strahlenthemen erhoben.

Als Ergebnis zeigt sich ein sehr heterogenes Bild nicht nur zwischen den Befragten, sondern auch bei einzelnen Individuen, wenn es um den Vergleich von Strahlenschutzthemen geht. So gibt es bekanntere bzw. präsentere Strahlenarten (z. B. UV-Strahlung) sowie weniger bekannte bzw. präsente (z. B. Radon).

Diese Heterogenität lässt sich durch Faktoren wie Informiertheit, Betroffenheit, Risikoaffinität oder Vertrauen in staatliche Institutionen erklären. Im Vergleich zur Vorgängerstudie 2019 fühlen die Menschen sich durch staatliche Institutionen bei Strahlung besser informiert und geschützt. Dabei sind die bekanntesten staatlichen Institutionen im Bereich Strahlenschutz das BMUV und das BfS.

Insgesamt besteht der Wunsch nach weiterer Information zu Strahlenthemen durch staatliche Institutionen, insbesondere zu Mobilfunkmasten und Strahlung von Hochspannungsleitungen.

Themenbereich 08 – Elektromagnetische Felder

Machbarkeitsstudie eines auf Smartphone-Apps beruhenden Hochfrequenz-Messnetzwerkes zur Abschätzung der Exposition der Bevölkerung mit elektromagnetischen Feldern des Mobilfunks (3619S82468)

Die vorliegende Machbarkeitsstudie hat sich mit der Fragestellung befasst, ob es technisch und wirtschaftlich möglich ist, die im Rahmen eines crowdsourcingbasierten Ansatzes auf gewöhnlichen Smartphones gemessenen Signalstärken zu nutzen, um ein repräsentatives Bild der Exposition durch elektromagnetische Felder des Mobilfunks zu generieren. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die grundsätzlichen technischen Voraussetzungen hierfür gegeben sind. Die wichtigsten erforderlichen Parameter zur Abschätzung der Maximalimmission im Downlink können mit Smartphones erfasst werden und es besteht ein ausreichender Zusammenhang zwischen der gemessenen Signal- und der vorherrschenden Feldstärke. Allerdings hat sich bei der praktischen Auswertung von Smartphone-Signalstärkemessungen eines existierenden Crowdsourcingnetzwerks gezeigt, dass die Abdeckung aller relevanten Immissionsbeiträge des Mobilfunks einschließlich aller Netzwerkgenerationen und Frequenzbänder nicht verlässlich gewährleistet werden kann. Weiterhin ist die Anwendbarkeit bei 5G und darüber hinaus bei der Nutzung von aktiven Antennen absehbar nicht möglich. Dem Anspruch eines vollumfänglichen Monitoringsystems zur quantitativen Abschätzung der Immission kann ein Messnetzwerk mit Smartphones daher nicht gerecht werden.

Erprobung, Weiterentwicklung und Validierung von neuartiger Messtechnik für statische und niederfrequente elektrische und magnetische Felder (3619S92411)

Freileitungen zur Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) und Hochspannungswechselstromübertragung (HWÜ) sind von elektrischen Feldern umgeben. Das Forschungsvorhaben verfolgte das Ziel, neuartige Messtechnik für die Erfassung von statischen und niederfrequenten elektrischen Feldern zu identifizieren und für Messungen im Einwirkungsbereich von HGÜ und HGÜ-HWÜ-Hybridleitungen anzupassen, zu erproben und zu validieren. Das Verfahren sollte dabei feldverzerrungsfrei sowie ionenfluss- und potenzial-unabhängig sein und auf einem Mikrosystem basieren.

Zu Beginn des Projektes wurden der relevante Stand von Wissenschaft und Technik und potenziell geeigneten Messverfahren ermittelt und darauf aufbauend ein Prototyp eines neuartigen Messsystems entwickelt. Kernstück des Systems ist ein mikroelektro-mechanischer Wandler, der die elektrische Feldstärke in eine mechanische Auslenkung eines miniaturisierten Balkens überführt, welche interferometrisch ausgelesen wird. Der entwickelte Prototyp wurde im Labor kalibriert und unter verschiedenen Störeinflüssen, wie Vibrationen, akustischen Störsignalen, Luftfeuchtigkeit, Temperaturschwankungen und dem Auftreten von Luftionen oder Feldinhomogenitäten, untersucht. Zusätzlich fanden Erprobungsmessungen im Hochspannungslabor der TU Graz unter einem Modell einer HGÜ-HWÜ-Freileitung statt. Eine starke Temperaturabhängigkeit wurde neben der bestehenden Beeinflussung durch Ionen als das größte Hindernis im Hinblick für einen realen Einsatz unter Freileitungen identifiziert. Mit diesem System konnte für Gleichfelder bei einer gleitenden Mittelung über eine Sekunde eine dreifache Standardabweichung $3\sigma = 570 \text{ V/m}$ erreicht werden. Diese Werte sind nur für eine Messdauer im Bereich der Dauer einer sogenannten Roundtrip-Messung ($\approx 100 \text{ s}$) gültig und berücksichtigen keine Schwankungen, welche durch den Regelzyklus des Temperaturcontrollers und durch andere interne Temperaturänderungen verursacht werden.

Machbarkeitsstudie für eine interdisziplinäre Studie zur Untersuchung eines Zusammenhangs zwischen Umwelt-, genetischen Faktoren und Leukämie in B-Zell ALL-Patienten (3620S92412)

Das Forschungsvorhaben untersuchte die Machbarkeit einer interdisziplinären Studie zum Zusammenhang zwischen Umwelt- und genetischen Faktoren für das Auftreten von B-Zell ALL im Kindesalter. Eine solche interdisziplinäre Studie soll einen Beitrag zum Verständnis der Ätiologie von B-Zell ALL im Kindesalter leisten und könnte den Strahlenschutz betreffende Implikationen haben. Im Rahmen dieser Machbarkeitsprüfung wurde geklärt, ob eine solche interdisziplinäre Studie in eine klinische Studie zur pädiatrischen ALL in Deutschland eingebunden werden kann. Die Machbarkeitsprüfung zeigte, dass eine Pilotstudie (CLERF-Pilot) in Deutschland zum Zusammenhang zwischen Umwelt- und genetischen Faktoren für das Auftreten von B-Zell ALL im Kindesalter in Kooperation mit der ALL-BFM-Studiengruppe durchführbar wäre. Eine solche Pilotstudie hätte eine Gesamtlaufzeit von 2,5 Jahren, wovon 12 Monate für die Hauptphase mit Rekrutierung von Studienteilnehmern eingeplant sind. Die Gesamtkosten für eine solche Pilotierung wären insgesamt ca. 430.000 € und umfassen eine retrospektive Expositionserfassung mittels Fragebögen, Auswertung von genetischen Untersuchungen, die im Rahmen der ALL-BFM-Studiengruppe erhoben werden und vor-Ort Expositionsbestimmungen von extrem niederfrequenten Magnetfeldern (ELF-MF).

Die Pilotstudie (CLERF-Pilot) würde wichtige Erkenntnisse zur Teilnahmebereitschaft und zur Expositionsbestimmung liefern sowie erste Ergebnisse für die Fragestellung möglicher Unterschiede in Umweltexpositionen, insbesondere ELF-MF, in verschiedenen genetischen ALL-Subgruppen erzielen. Basierend auf den Ergebnissen dieser Machbarkeitsstudie wird die Durchführung einer Pilotstudie als aussichtsreich bewertet.

Introduction

On behalf of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection (BMUV) the Federal Office for Radiation Protection (BfS) awards research grants for projects in the field of radiation protection. The findings of these projects serve as decision aiding information in the development of radiation protection regulations as well as in the fulfilment of specific tasks in the field of radiation protection. The tasks of the BfS involve planning, technical and administrative preparation, awarding of contracts, general support as well as the technical evaluation of research and study projects. This report provides information on the results, i.e. preliminary (in the form of status reports) and, where applicable, final results of radiation protection projects in the context of the BMUV's departmental research, which were achieved in the year 2022, as well as on projects started in 2022. The research projects were financed with funds from the BMUV. Additional funds for the research programme "Radiation protection in the Process of Power Grid Expansion" (cf. subject area 08) were provided to the BMUV by the electricity grid operators. All research projects were assigned and scientifically overseen solely by the BfS, in order to exclude possible conflicts of interest.

Protecting man and the environment from the risk of ionising and non-ionising radiation is a central responsibility assigned to the BMUV and the BfS. Implementation of these tasks and in particular the development of radiation protection guidelines and the supervision of the implementation of nuclear and radiation protection laws by the Federal States is only possible on a broad scientific-technical basis. Fundamental issues as well as questions related to the implementation of individual radiation protection measures have to be investigated and answered. To develop the necessary decision-aiding tools and for adequate implementation of the tasks, investigative projects covering a broad thematic spectrum must be carried out (departmental research).

All subject areas (TB) of the radiation protection research will be explained in detail in the following, even if no projects were carried out in one area in 2022. Some subject areas may include research projects in the field of both ionising and non-ionising radiation.

One of the primary tasks consists in the assessment and evaluation of **natural and artificial radiation exposures** (TB 01) of man and the environment. For example, enrichment processes of natural radioactive substances (e. g. radon) or emerging trends in the artificial use of radioactive substances and ionising radiation must be identified and evaluated in a timely fashion. As a result, appropriate measures can be taken at an early stage to counteract any danger to man and the environment. Similarly, the exposure of the population to optical radiation is increasing, for example through the introduction of new technologies and the change in solar UV exposure caused by climate change. The research on optical radiation therefore covers the exposure of the population to UV radiation, visible light and infrared radiation and serves to assess the health risks of these types of radiation and to develop radiation protection concepts.

A prerequisite not only for many of the studies but also for proving that dose level values have been kept is the availability of adequate measurement techniques and dose assessment procedures. The multifaceted and complicated measurements of **radiation protection technology** (TB 02) require that existing measurement techniques are improved, new systems are developed and dosimetric models and data are continually checked and adjusted.

The Radiation Protection Ordinance sets forth dose limits to protect members of the public and persons occupationally exposed to radiation at work. These limits are based upon scientific knowledge. They have to be updated continually and adapted to the state of the art of scientific and medical research in order to ensure radiation protection to the fullest possible extent. Since **biological reactions to ionising and non-ionising radiation** (TB 03) can vary considerably depending

on the individual, further research and evaluation is required. Therefore, procedures to identify individual radio-sensitivity must be further developed.

Since man-made radiation exposure of the public is mainly made up of **medical radiation exposure (TB 04)** from diagnostic procedures, this latter is another focal point of the BMUV departmental research. In this context, it is particularly important that the health benefit associated with the use of radiation in man outweighs the radiation risk. It is crucial to balance the benefits and risks of diagnostic procedures, to search for alternative procedures involving lower risks, and to reduce radiation exposure by appropriate procedures.

Assessment of the radiation exposure of members of the public requires knowledge of how radioactive substances behave in the environment, how they disperse in air and water, how they are enriched in the different ecosystems and their subsequent effect on man via the food chain. Thus, detailed information on **radioecology (TB 05)** is needed.

Incidents can happen, due to human or technical error, at any place where people work with radioactive substances or ionising radiation. This may cause radioactive substances to be released or people to be exposed to radiation. Determination and optimisation of precautionary measures against accidents and incidents is therefore one of the BfS' permanent tasks. **Emergency management (TB 06)** is an area requiring continual improvement and the effectiveness of safety measures culminating in medical protective measures in the case of an overexposure needs to be optimised on an on-going basis.

In addition to scientific questions, the **general and social aspects of radiation protection (TB 07)** are a central component of radiation protection research. This area includes research projects on risk and science communication in a broader sense. The focus is on capturing and strengthening public perception and understanding of information about radiation, and on promoting responsible management of radiation risks. Optimized information strategies are intended to strengthen the public's confidence in radiation protection measures. In addition, it analyses which factors influence risk perception and how the individual and social implementation of radiation protection measures can be increased. In addition, a number of projects examine issues of general importance for radiation protection. These include, for example, research projects on occupational radiation protection.

Electromagnetic fields (TB 08) are the result of technologies such as power grids and mobile communications that generate electric, magnetic and electromagnetic fields. These fields, categorized as non-ionizing radiation, are divided into high- and low-frequency fields. Research in this area aims to understand and evaluate the potential health effects. Protection and precautionary concepts are developed to protect the population from possible risks and to minimise them as much as possible. Some of the research projects in this area were carried out as part of the research programme "Radiation protection in the Process of Power Grid Expansion", which was partly financed from funds provided by the BMUV, as well as from funds provided to the BMUV by the electricity grid operators. All research projects were assigned and scientifically overseen solely by the BfS, in order to exclude possible conflicts of interest.

Summary of results from research projects in 2022

In the following results of research projects concluded in 2022 will be reported.

Subject area 01 – Natural radiation exposure

Study on the usability of citizen science to obtain data on indoor radon concentration (3621S12230)

The research project “Study on the usability of citizen science to obtain data on indoor radon concentration” shows that a citizen science project in Germany can make a contribution to obtaining data on indoor radon concentration. This is especially true if such a project fits as seamlessly as possible into the BfS's overall strategy for obtaining data on indoor radon concentration. Starting points for this are provided, for example, by the measurement obligations of workplaces. As a side effect, a citizen science project can make a contribution to improving radon knowledge among the population.

The citizen science projects with scientific reference carried out in Germany as well as the international projects in the field of radon research show that citizens can be involved in a variety of ways and at the same time comply with legal framework conditions such as data protection. Of central importance for the motivation of citizen scientists and for the success of citizen participation is the interest in knowledge and the formulation and communication of the research question to which answers are to be found with the help of citizens, respectively.

The citizen science project outlined in the final report would have the character of a continuous action. The logic of the project could consist of citizen scientists borrowing electronic measuring devices from central lending points, independently measuring the radon concentration indoors, then transferring the data and returning the measuring device. Due to the continuous nature and logic of the project, cooperation with relevant (local) stakeholders is necessary in order to motivate as many citizens as possible to participate and to provide the necessary measuring devices.

Citizen science projects on radon are not expected to represent a cost-effective and labor-saving alternative to professional research projects per se. A careful assessment of the value of citizen science versus the associated consequences is essential.

Determination of uncertainties in radiation exposure assessment in the Wismut cohort - Part 2 (3618S12223)

In this research project, a statistical method was developed for the Wismut study that makes it possible to calculate risk models for lung cancer mortality due to radon while simultaneously taking uncertainties in the exposure assessments into account. On the basis of the previous research project "Part 1", a concept for quantifying exposure uncertainties in the Wismut study was developed and implemented in part 2. A hierarchical Bayesian approach was developed that takes into account exposure uncertainties in risk modeling. This approach maps the complex calculation of radon exposure in the Wismut study. The developed method was implemented and tested using a simulation study. The simulations showed that the developed method adequately takes into account the complex exposure uncertainties in the Wismut study and that the application of the method provides better results than classical methods for considering exposure uncertainties.

The developed method was applied to the Wismut study. The excess hazard ratio (EHR) for lung cancer from radon decay products was 0.54 per 100 WLM (95% uncertainty interval: 0.35-0.81) and is slightly higher than the risk that resulted if the uncertainties in the exposure assessment were not taken into account (EHR/100 WLM = 0.33; 95% uncertainty interval: 0.27-0.40). If only Wismut

employees who started working for Wismut in 1960 or later were considered, the risk of lung cancer from radon decay products was also higher when exposure uncertainties were taken into account (EHR/100 WLM = 1.80; 95% uncertainty interval: 0.70-3.36) than without taking uncertainties into account (EHR/100 WLM = 1.44; 95% uncertainty interval: 0.73-2.52). The results are preliminary because the data for all types of exposure assessment could not be included in the analysis, only subgroups of the respective cohorts were considered and no effect-modifying variables were included.

Subject area 02 – Radiation protection techniques

There is no report available for 2022 on this subject area.

Subject area 03 – Effects of ionising and non-ionising radiation, radiosensitivity

There is no report available for 2022 on this subject area.

Subject area 04 – Medical radiation exposures

Determination of minimum requirements for image quality and dose in breast tomosynthesis (3619S42363)

The aim of the project was to develop multiple quality assurance concepts (QA protocols) for determining image quality on tomosynthesis devices (DBT) from different manufacturers. In order to reduce the effort and subjectivity compared to visual evaluations, model-based analyses (Model Observer, MO) were to be used. Finally, minimum requirements regarding image quality should be developed and a correlation to parenchymal dose should be established (dose efficiency).

The present work has shown that image quality testing with the L2-phantom is possible in practice. The L2-phantom showed the advantage of the DBT to minimize overlapping structures, depending on the z-resolution of the systems. Further, it was shown that the L2-phantom can also be evaluated visually in an acceptable amount of time using randomization software. Using the two measures of image quality (calc-score and mass-score), the dose efficiency index of the systems could additionally be determined by correlation with radiation exposure. The use of a model observer for the evaluation of the L2-phantom was possible in principle. No channel parameters spanning manufacturers and system types could be found. However, these could be determined within the scope of a type test per system type.

Subject area 05 – Radioecology

Age- and product group-specific evaluation of food consumption data collected in Germany (3620S52550)

The calculation rules for determining the radiation exposure of individuals in the population use consumption rates specific to age groups and food groups. These calculation regulations have been updated, hence the consumption rates must be checked to ensure they are up to date. In the research project, average values and other statistical indicators for the consumption rates were determined from current surveys. Temporal trends and regional differences were also examined. The results were compared with the valid table for consumption rates and important deviations were highlighted and evaluated in the context of the studies used.

Modeling of hydrodynamics and mass transport in water-bound transport processes in radiation protection, taking into account the clearance of weakly radioactive substances (3618E03510)

In this grant-funded research project with an external doctorate at the University of Stuttgart, the so-called water pathway was subjected to a detailed technical examination. Once released from regulatory control, construction rubble from the dismantling of nuclear power plants, for example, can be disposed of close to the surface in conventional landfills, because released material is legally regarded as non-radioactive. The additional individual dose resulting from clearance is negligible and takes into account the current scientific knowledge on the effect of small additional radiation exposures on humans and the environment. The water pathway takes into account that rainwater entering the landfill could lead to the release of radionuclides into the environment. The subject of investigation is therefore also of fundamental interest for radioecology. The University of Stuttgart has addressed this problem in this research project using state-of-the-art computer modeling. Previous modeling approaches were expanded and supplemented to include aspects such as heterogeneity of the material or climate change.

Subject area 06 – Emergency management

Development of a Progressive Web App (PWA) for cell phones (smartphones) for dose reconstruction and information of the population and the emergency services in the event of a radiological emergency (3621S62510)

In this research project, the prototype of a progressive web app (PWA) was developed on the basis of open source software. A PWA can be accessed via the browser or installed on mobile devices regardless of the operating system, so that content can be used even without an internet connection. The developed PWA prototype contains general and emergency-specific information for the population in the event of a radiological emergency. In addition, the developed PWA prototype can be used to support dose reconstruction by allowing users to record their movement profiles (depending on the device used). Based on the knowledge gained during the technical implementation, a concept for a PWA to inform emergency services in radiological emergencies was developed. The project was fully implemented in the period mentioned above.

Subject area 07 – General and social aspects of radiation protection

Conduct of a representative survey on “What does Germany think about radiation? Survey 2021” (3621S72210)

In a combined qualitative and quantitative study (qualitative interviews and group discussions as well as population-representative CATI survey), knowledge, perception, risk perception, protective behaviour as well as information needs on selected radiation topics were surveyed.

As a result, a very heterogeneous picture emerges, not only among the respondents, but also among individuals, when it comes to comparing types of radiation. There are more well-known or present types of radiation (e.g. UV radiation) as well as less well-known or present ones (e.g. radon).

This heterogeneity can be explained by factors such as information, concern, risk affinity or trust in state institutions. Compared to the previous study in 2019, people feel better informed and protected by state institutions when it comes to radiation. The best-known state institutions in the field of radiation protection are the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection and the Federal Office for Radiation Protection.

Overall, there is a desire for more information on radiation topics from state institutions, especially on mobile phone masts and radiation from high-voltage power lines

Subject area 08 – Electromagnetic fields

Feasibility study of a high-frequency measurement network based on smartphone apps for estimating the exposure of the population to electromagnetic fields of mobile radio (3619S82468)

The present feasibility study has addressed the question whether it is technically and economically possible to use the signal strengths measured on ordinary smartphones in a crowdsourcing-based approach to generate a representative picture of exposure to mobile phone electromagnetic fields. The investigations have shown that the basic technical requirements for this are given. The most important parameters required for estimating the maximum exposure in the downlink can be recorded with smartphones, and there is a sufficient correlation between the measured signal strength and the prevailing field strength. However, practical evaluation of smartphone signal strength measurements of an existing crowdsourcing network has shown that the coverage of all relevant exposure contributions of mobile radio, including all network generations and frequency bands, cannot be reliably guaranteed. Furthermore, applicability to 5G and beyond is foreseeably not possible when using active antennas. Therefore, a measurement network with smartphones cannot meet the requirement of a fully comprehensive monitoring system for the quantitative estimation of exposure.

Development and Validation of new measurement techniques for the measurement of static and low frequency electric and magnetic fields (3619S92411)

Overhead lines for high-voltage direct current (HVDC) and high-voltage alternating current (HVAC) transmission are surrounded by electric fields. The research project pursued the goal of identifying new measurement technology for the detection of static and low-frequency electric fields and adapting, testing and validating it for measurements in the area of influence of HVDC and HVDC-HVDC hybrid lines. The method should be free of field distortion, ion flux and potential-independent and based on a microsystem.

At the beginning of the project, the relevant state of the art in science and technology and potentially suitable measurement methods were determined and, based on this, a prototype of a novel measurement system was developed. The core of the system is a microelectro-mechanical transducer that converts the electric field strength into a mechanical deflection of a miniaturized beam, which is read out interferometrically. The developed prototype was calibrated in the laboratory and examined under various disturbing influences, such as vibrations, acoustic disturbance signals, humidity, temperature fluctuations and the occurrence of air ions or field inhomogeneities. In addition, test measurements were carried out in the high-voltage laboratory of TU Graz under a model of an HVDC overhead line. In addition to the existing influence of ions, a strong temperature dependence was identified as the greatest obstacle with regard to a real application under overhead lines. The resolution limit of the complete measurement system in a temperature-stabilized environment can be given for DC fields as the threefold standard deviation $3\sigma \sim 570$ V/m using a sliding average over one second. These values are only valid for a measurement duration in the range of the duration of the round trip measurement (≈ 100 s) and do not take into account fluctuations caused by the control cycle of the temperature controller and other internal temperature changes.

Feasibility study for an interdisciplinary study on the association between environmental as well as genetic risk factors and risk of childhood B-cell acute lymphoblastic leukaemia in Germany (3620S92412)

This research project investigated the feasibility of an interdisciplinary study on the relationship of environmental and genetic risk factors on B-Cell ALL in children. Such an interdisciplinary study is expected to advance the understanding of the etiology of pediatric B-Cell ALL and could have implications for radiation safety. In this feasibility study it was evaluated if such an interdisciplinary study could be integrated into an ongoing or starting clinical study on pediatric ALL in Germany as a pilot study. The feasibility study showed that a pilot study in Germany (CLERF-Pilot) on environmental and genetic risk factors on B-Cell ALL in children would be feasible in cooperation with the ALL-BFM study group. The pilot study should have a total duration of 2,5 years, of which 12 months are planned for the main phase including recruitment of study participants. The total costs of a pilot would be around 430,000 €, including a retrospective exposure assessment via questionnaire, genetic analyses carried out by the ALL-BFM study group, and on site exposure measurements of extremely low frequency magnetic fields (ELF-MF).

The pilot study (CLERF-Pilot) would provide important scientific insights into response rates regarding study participation, into exposure assessment, as well lead to first results on the possible difference of environmental exposure, in particular ELF-MF, in different genetic ALL subgroups. Based on the results of this feasibility study, the conduct of a pilot study is evaluated as promising.

Abgeschlossene Vorhaben (Abschlussberichte)

der vom BfS begleiteten Strahlenschutz-Forschungsvorhaben des BMUV im Jahr 2022

Themenbereich 01 - Natürliche Strahlenexposition

Untersuchung zur Nutzbarkeit von Citizen Science zur Gewinnung von Daten zur Radoninnenraumkonzentration

Forschungskennzeichen 3621S12230	Beginn 01.11.2021	Ende 31.07.2022	Fördermittel 78.003,00 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH			
Projektleitung Carolin Kahlisch	Fachbegleitung BfS Dr. Nils Suhr	verantwortlich für den Text Carolin Kahlisch	

Hintergrund

Der Schutz der Bevölkerung vor Radon in Innenräumen wird in Deutschland im Strahlenschutzgesetz geregelt. Im § 124, Abschnitt 2 „Schutz vor Radon in Aufenthaltsräumen des Strahlenschutzgesetzes“ wurde ein Referenzwert von 300 Becquerel pro Kubikmeter Luft festgelegt. Wird dieser überschritten, sollten Maßnahmen zur Senkung der Radon-Konzentration im Gebäude ergriffen werden. Konkrete Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung wurden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) im sog. Radonmaßnahmenplan festgehalten. Ein Bereich des Maßnahmenplans betrifft die Öffentlichkeitsarbeit und die Förderung der Eigeninitiative der Bevölkerung zum Schutz vor Radon in Innenräumen.

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) arbeitet für die Sicherheit und den Schutz des Menschen und der Umwelt vor den Gefahren durch Strahlung. Zu den behördlichen Aufgaben zählt auch die Information der Öffentlichkeit. Vor diesem Hintergrund prüft das BfS, ob und inwiefern sich Citizen Science eignet, um die Datengewinnung von Radonkonzentrationen in Innenräumen zu erhöhen sowie das Radonwissen in der Bevölkerung zu erhöhen.

Zielsetzung

Aufgabe des Forschungsvorhabens war es, den Nutzen sowie ggf. konkrete Vorschläge zur Umsetzung eines Citizen-Science-Projektes zu Radon in Deutschland zu erarbeiten. Zentrale Aufgaben eines etwaigen Citizen-Science-Projektes soll die Datengewinnung von Radoninnenraumkonzentrationen, vorzugsweise mit elektronischen Messgeräten, sowie die Verbesserung des Radonwissens in der breiten Bevölkerung sein. Bei der Konzeption eines Citizen-Science-Projektes waren messtechnische, soziale, gesellschaftliche und rechtliche Aspekte einzubeziehen.

Methodik

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde in einem ersten Schritt zunächst der Stand der Wissenschaft im Bereich Citizen Science erarbeitet. Darüber hinaus wurden gelungene Citizen-Science-Projekte im naturwissenschaftlich-technischen Bereich in Deutschland sowie internationale Radon-Projekte identifiziert, beschrieben sowie Erfolgsfaktoren herausgearbeitet. Im zweiten Arbeitspaket standen darauf aufbauend Vorschläge zur Umsetzung eines Citizen-Science-Projektes durch das BfS im Mittelpunkt. Auf Basis der vorangegangenen Analysen sowie inhaltlicher Überlegungen der wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen wurden Projektideen verdichtet und dann die Umsetzungsmöglichkeiten mit Fachleuten der jeweiligen Themenfelder diskutiert. Ziel der Experteninterviews war es, eine erste Einschätzung zur Relevanz des Themas Radon im jeweiligen Handlungsfeld sowie zur möglichen Umsetzung von Citizen-Science-Projekten zu erhalten. Darauf aufbauend wurden Kriterien für erfolgversprechende Strategien zur Umsetzung eines Citizen-

Science-Projektes zu Radon aufgezeigt. Hierzu wurde sowohl auf aktuelle Citizen-Science-Projekte und -Veröffentlichungen als auch auf Hinweise der interviewten Fachleute zurückgegriffen.

Ergebnisse

Leitgedanken für ein Citizen-Science-Projekt zu Radon in Deutschland

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes zur Nutzbarkeit von Citizen Science für die Gewinnung von Daten zur Radonkonzentration in Innenräumen lassen sich wie folgt zusammenfassen. Citizen Science eignet sich grundsätzlich für die Gewinnung von Daten zur Radoninnenraumkonzentration und kann eine Ergänzung zu behördlich und gesetzlichen vorgeschriebenen Radonmessungen darstellen. Als Voraussetzung für eine breite Beteiligung der Bürger*innen ist die klare Formulierung einer Forschungsfrage ausschlaggebend. Mit einem Citizen-Science-Projekt ist es möglich, die Bekanntheit des Themas Radon und seiner Auswirkungen auf die Gesundheit der Menschen in Deutschland zu steigern. Diese Wirkung ist zwar als Nebenfolge intendiert, darf jedoch hinsichtlich ihrer Bedeutung nicht das vorrangige Ziel des wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns bzw. die „Forscherrolle“ der Bürger*innen dominieren. Im Vordergrund stehen muss die Wertschätzung der Bürger*innen im wissenschaftlichen Erkenntnis- bzw. Citizen-Science-Prozess. Der Einsatz von elektronischen Messgeräten für Kurzzeitmessungen ist denkbar, jedoch ist zu definieren, nach welchem Prinzip die Messungen erfolgen müssen, damit die Daten für das BfS verwertbar sind. Die Bereitstellung elektronischer Messgeräte ist mit Kosten, Prozessgestaltungen sowie in der Regel mit Partnerschaften mit Multiplikator*innen verbunden.

Öffentliche Bibliotheken und ein „Leihsystem an zentralen Orten“

Für die Umsetzung eines Radon-Citizen-Science-Projekts in Deutschland kann es deshalb sinnvoll sein, die Adressaten über Bibliotheken zu erreichen und elektronische Messgeräte in dieser Zusammenarbeit zur Verfügung zu stellen. Der vorgeschlagene Lösungsweg berücksichtigt die Fokussierung auf Citizen Science bei gleichzeitiger nachgelagerter Berücksichtigung von Öffentlichkeits- und Informationskampagnen zur Sensibilisierung der Bevölkerung für das Thema Radon. Die Zusammenarbeit mit Bibliotheken kann erfolgsversprechend sein, da sie die meistgenutzten Bildungs- und Kultureinrichtungen sind und auf Erfahrungswissen in vergleichbaren Projekten zurückgreifen können. Außerdem kann das Anbindungspotenzial an bestehende geobasierte Radon-Datensammlungen des BfS genutzt werden sowie ein zeitlich begrenztes Leihsystem für die Nutzung von elektronischen Radon-Messgeräten umgesetzt werden. Die einzusetzenden elektronischen Messgeräte sollten eine hohe Bedienungsfreundlichkeit und die Möglichkeit zur Gewährleistung von Datenschutz und Privatsphäre bieten. Dieser Lösungsvorschlag wird als am aussichtreichsten eingestuft. Kooperationen mit anderen Multiplikator*innen wie Schulen, Nachbarschaftsinitiativen oder Betriebs- und Personalräten sind als Optionen ebenfalls denkbar.

Schlussbetrachtung

Citizen Science bietet das Potenzial, die Datengrundlage zur Radonkonzentration in Innenräumen für wissenschaftliche Zwecke zu verbessern, vorausgesetzt, dass Bürger*innen die Forscherrolle dominieren und die Information über Radon nur einen sekundären Nutzen darstellt. Derzeit relevante Fragestellungen erfordern die Erfassung vieler Daten zur statistischen Auswertung, was den Einfluss der Leistung und der Erkenntnis einzelner Teilnehmer*innen auf das Endergebnis minimiert. Es ist kritisch zu hinterfragen, wie eine solche Datenerhebung zu repräsentativen Schlussfolgerungen auf Bund- und Länderebene gelangen kann. Auch individuelle Situationen (z. B. Gebäude mit speziellen Charakteristika) müssen messtechnisch umfangreich untersucht werden und weitere Parameter erfassen. Die Durchführung der Projekte und die damit verbundene Betreuung der Teilnehmer*innen bindet Ressourcen, die langfristig zur Verfügung stehen müssen. Es ist nicht zu

erwarten, dass Citizen Science Projekte zu Radon per se eine kostengünstige und personalschonende Alternative zu professionellen Forschungsprojekten darstellen. Eine Abwägung über den Wert des Citizen Science Gedanken gegenüber den damit verbundenen Folgen ist unabdingbar.

Ermittlung der Unsicherheiten in der Strahlenexpositionsabschätzung in der Wismut-Kohorte – Teil 2

Forschungskennzeichen 3618S12223	Beginn 01.01.2019	Ende 30.04.2021	Fördermittel 319.442,47 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Ludwig-Maximilians-Universität, Institut für Medizinische Informationsverarbeitung, Biometrie und Epidemiologie			
Projektleitung Dr. S. Hoffmann	Fachbegleitung BfS Dr. V. Deffner	verantwortlich für den Text N. Ellenbach Dr. S. Hoffmann	

Hintergrund

Epidemiologische Studien zu Uranbergarbeitern liefern wesentliche Erkenntnisse über das Gesundheitsrisiko durch ionisierende Strahlung. Seit den 1990er Jahren führt das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) die Wismut-Kohortenstudie durch. Die Wismut-Kohortenstudie ist eine der weltweit größten Kohortenstudien beruflich radonbelasteter Bergarbeiter. Die Hauptziele dieser Studie sind die Abschätzung von Gesundheitsrisiken durch ionisierende Strahlung und die Verbesserung des Strahlenschutzes der Bevölkerung. Unter großem Aufwand wurde nachträglich für jede Person in der Studie die individuelle Radonexposition während der Beschäftigung bei der Wismut abgeschätzt. Für diese Expositionsschätzung wurde eine sogenannte „Job-Exposure-Matrix“ (JEM) erstellt. Für die Anfangsjahre der Wismut (1946 bis etwa 1954) basieren die Werte der JEM auf Expertenschätzungen, danach überwiegend auf Messungen. Die Expositionswerte sind, unabhängig davon, ob sie auf Expertenschätzungen oder Messungen beruhen, mit Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten konnten in den bisherigen zahlreichen Risikoanalysen zur Wismut-Kohorte nicht berücksichtigt werden.

Zielsetzung

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die in der Wismut-Kohorte auftretenden Unsicherheiten bei der Abschätzung der Exposition durch Radon und seine Folgeprodukte zu quantifizieren und diese Unsicherheiten bei der Risikoschätzung für Lungenkrebs durch Radon sowohl für die gesamte Wismut-Kohorte als auch für die Teilkohorte der Uranbergarbeiter mit Beschäftigungsbeginn ab 1960 zu berücksichtigen. Dabei sollten die Auswirkungen der verschiedenen auftretenden Unsicherheiten auf die Risikoschätzer beschrieben und nachvollzogen werden. Zusätzlich sollte durch die Berücksichtigung der Unsicherheiten die Belastbarkeit der bisherigen Schätzer für das Lungenkrebsrisiko durch Radon in der Wismut-Kohorte beurteilt werden.

Methodik

Das vorliegende Forschungsvorhaben baute auf dem Forschungsvorhaben „Ermittlung der Unsicherheiten in der Strahlenexpositionsabschätzung in der Wismut-Kohorte – Teil 1“ (Forschungskennzahl 3616S12223) auf. In diesem Vorhaben wurden das Vorgehen der Expositionsabschätzung für Radon und seine Folgeprodukte in der Wismut-Kohorte detailliert beschrieben sowie potenzielle Quellen für Unsicherheiten identifiziert und vorläufig qualitativ bewertet. Für die Entwicklung der statistischen Methode im zweiten Teil des Forschungsvorhabens wurden Erkenntnisse aus Arbeiten für die französische Uranbergarbeiter-Kohortenstudie genutzt, für die vergleichbare Analysen durchgeführt wurden.

Quantifizierung der Unsicherheiten

Zur Abschätzung der Größe bzw. Varianz der in der Wismut-Kohorte auftretenden Unsicherheiten wurden geeignete Literaturquellen identifiziert. Dazu wurden insbesondere Berichte des dosimetrischen Dienstes der Wismut sowie Literatur zur Quantifizierung der Messfehler in der französischen Uranbergarbeiterstudie herangezogen. Basierend auf der Quantifizierung der Unsicherheiten konnte die Relevanz der verschiedenen Arten von Unsicherheiten analysiert werden.

Entwicklung einer statistischen Methode zur Berücksichtigung der relevanten Unsicherheiten in der Risikomodellierung

Die zu entwickelnde statistische Methode zur Berücksichtigung der in der Wismut-Kohorte relevanten Expositionsunsicherheiten bei der Risikoanalyse für Lungenkrebs durch Radon sollte geeignet sein, die spezielle Struktur der Unsicherheiten als eine Mischung unterschiedlicher Typen und Größen von Unsicherheiten zu berücksichtigen. Die Risikoschätzer und Unsicherheitsintervalle (Kreditintervalle) dieses Modells können durch Bayes-Inferenz mithilfe eines MCMC-Algorithmus bestimmt werden.

Simulationsstudie zur systematischen Untersuchung der statistischen Methode

Zur Generierung der Daten für die Simulationsstudie wurde ein vom BfS zur Verfügung gestellter fiktiver Datensatz genutzt, der sich an den individuellen Daten der Wismut-Kohortenstudie orientierte. Für die Simulationsstudie wurden zunächst auf der Basis eines datengenerierenden Prozesses, der an die Daten der Wismut-Studie angelehnt ist, künstliche Datensätze generiert. Hierbei wurden Expositionsprofile von 1000 Arbeitern der Wismut-Kohorte gewählt, die im Zeitraum der Expositionsabschätzung basierend auf Radongasmessungen beschäftigt waren. Zusätzlich wurden Unsicherheiten generiert, die sowohl in ihrer Größe als auch in ihrer Struktur den Expositionsunsicherheiten in der Wismut-Kohorte entsprechen. Zudem wird ein Risikoschätzer, hier der relative Zuwachs der Hazardrate (EHR), von 0,30 pro 100 Working Level Months (WLM) angenommen. Basierend auf diesem Risikoschätzer wurden für jeden Arbeiter Überlebenszeiten generiert. In einem letzten Schritt wurden Risikomodelle mit den generierten, mit Expositionsunsicherheiten behafteten Daten geschätzt und verglichen. Die Exposition durch Radon und seine Zerfallsprodukte wurde als zeitvariierende Variable betrachtet. Die entwickelte Methode zur Berücksichtigung von Unsicherheiten wurde durch die Simulationsstudie mit klassischen Ansätzen wie Regression Calibration oder Simulation Extrapolation (SIMEX) verglichen, die speziell auf die Daten der Wismut-Kohorte angepasst wurden. Datensituation und Messfehlermodell wurden dabei schrittweise komplexer gestaltet.

Anwendung des entwickelten Verfahrens auf die Daten der Wismut-Kohorte

Zur Anwendung des entwickelten Verfahrens auf den Daten der Wismut-Kohorte wurde ein Datensatz ohne Aufbereiter erstellt, der um einige Variablen erweitert wurde. Diese Variablen beinhalteten Informationen zur Berechnung der Exposition und charakterisieren und quantifizieren – soweit möglich – die Arten von Unsicherheit in der Kohorte näher. Die resultierenden Risikoschätzer wurden mit Ergebnissen aus Berechnungen ohne Berücksichtigung von Expositionsunsicherheiten verglichen.

Ergebnisse

Quantifizierung der Unsicherheiten

Im Rahmen des Vorhabens wurde für jede im vorangegangenen Vorhaben als relevant erachtete Unsicherheitsquelle ein Konzept zur Quantifizierung erarbeitet. Zusätzlich wurde für jede Methode der Strahlenexpositionsabschätzung ein Messfehlermodell erarbeitet. Diese Messfehlermodelle

beschreiben detailliert die Unsicherheiten in der Expositionsabschätzung für verschiedene Regionen (Sachsen, Thüringen), Zeitperioden (Expositionsschätzung basierend auf Expertenschätzungen, Radongasmessungen in der Umgebungsluft, Messungen der Radonfolgeprodukte in der Umgebungsluft) und Arbeitsbereiche der Wismut-Beschäftigten (unter Tage, Aufbereitung, Tagebau).

Entwicklung der statistischen Methode zur Berücksichtigung der relevanten Unsicherheiten und der Risikomodellierung in der Wismut-Kohorte

Ein Bayesianischer hierarchischer Ansatz wurde zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Expositionsabschätzung in der Wismut-Kohorte entwickelt und implementiert. Das entwickelte Verfahren ist ein hierarchisches Modell, das im Wesentlichen aus einem Risikomodell, einem Messfehlermodell und einem Expositionsmodell besteht. Als Risikomodell wird ein Proportional-Hazard-Modell ohne effektmodifizierende Variablen verwendet. Das Messfehlermodell beschreibt die Unsicherheit bei der Verwendung von Konzentrationsmessungen in der Umgebungsluft zur Schätzung der individuellen Exposition, sowie, je nach Expositionsjahr, verschiedene Unsicherheitskomponenten in der Bestimmung verschiedener Faktoren, die zur Berechnung der Expositionen herangezogen wurden, zum Beispiel für den Gleichgewichtsfaktor, den Arbeitszeitfaktor, den Faktor zur Gewichtung der Tätigkeiten und den Faktor zur Korrektur der Belüftung. Die Methode wurde in einzelnen, inhaltlich abgeschlossenen, funktionalen Programmen objektorientiert in Python implementiert. Um die Unsicherheiten in der Wismut Kohorte abbilden zu können, wurden verschiedene Messfehlermodelle für verschiedene Zeitperioden und Arbeitsplätze implementiert. In diesen Messfehlermodellen können sowohl Berkson als auch klassische Fehlerkomponenten für die verschiedenen Parameter berücksichtigt werden. Die Abhängigkeitsstruktur in den Schätzungen der Parameter können durch geteilte Fehler abgebildet werden.

Mit dem entwickelten Ansatz können Risikoschätzer und die zugehörigen Unsicherheitsintervalle unter der Berücksichtigung der Expositionsunsicherheiten berechnet werden.

Simulationsstudie zur systematischen Untersuchung der statistischen Methode

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Simulationsstudie für den entwickelten Ansatz im Vergleich zu einer Schätzung ohne Berücksichtigung von Unsicherheiten, sowie zu den klassischen Ansätzen Regression Calibration und SIMEX für die komplexeste, und damit auch realistische, Struktur des Messfehlermodells, die in der Simulationsstudie berücksichtigt wurde.

Wenn Expositionsunsicherheiten im Risikomodell nicht berücksichtigt werden, erhält man im Mittel einen Schätzer für den EHR pro 100 WLM von 0,23. Dieser Risikoschätzer ist im Vergleich zum wahren Wert von 0,3 im Mittel um ca. 21% geringer (Spalte „Relative Verzerrung“ in Tabelle 1). Sowohl Regression Calibration als auch der vorgeschlagene Bayesianische Ansatz können die absolute relative Verzerrung auf unter 5% reduzieren, während SIMEX eine absolute relative Verzerrung von etwa 14% aufweist. In der Spalte „Überdeckungswahrscheinlichkeit“ wird eine Schätzung der Wahrscheinlichkeit angegeben, mit der das Unsicherheitsintervall des Risikoschätzers den wahren Wert von 0,30 pro 100 WLM, der für die Datengenerierung verwendet wurde, überdeckt. Regression Calibration führt allerdings zu sehr engen Unsicherheitsintervallen, die den wahren Wert nur in 37% der Fälle überdecken, während der vorgeschlagene Bayesianische Ansatz zu einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 98 % führt. Insgesamt konnte in der Simulationsstudie gezeigt werden, dass die entwickelte Methode die Expositionsunsicherheiten in der Wismut-Studie adäquat berücksichtigt und dass die Anwendung der Methode bessere Ergebnisse liefert als klassische Methoden zur Berücksichtigung von Expositionsunsicherheiten.

Tabelle 1 Vergleich der Risikoschätzer in der Simulationsstudie für den vorgeschlagenen Bayesianischen Ansatz mit Regression Calibration, SIMEX und einer naiven Schätzung, die die Unsicherheiten nicht berücksichtigt.

	Risikoschätzer pro 100 WLM	Relative Verzerrung	Überdeckungswahr- scheinlichkeit
Ohne Berücksichtigung von Unsicherheiten	0,23	-20,63%	22%
Regression Calibration	0,29	-3,91%	37%
SIMEX	0,26	-13,81%	60%
Bayesianischer Ansatz	0,31	3,50%	98%

Anwendung des entwickelten Verfahrens auf die Daten der Wismut-Kohorte

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse mit und ohne Berücksichtigung von Expositionsunsicherheiten für die gesamte Wismut-Kohorte und die Teilkohorte mit Beschäftigungsbeginn 1960 oder später. Es handelt sich hierbei um vorläufige Ergebnisse, bei denen nur Arbeiter eingeschlossen wurden, die ausschließlich in Jahren gearbeitet haben, deren Unsicherheiten in der Expositionsabschätzung durch bestimmte Messfehlermodelle beschrieben werden konnten. Diese Einschränkung führte in der Teilkohorte mit Beschäftigungsbeginn 1960 oder später zu einer Reduktion auf 18852 Arbeiter und 286 Todesfälle durch Lungenkrebs (im Vergleich zu 23899 Arbeitern und 458 Todesfällen durch Lungenkrebs, die insgesamt in dieser Teilkohorte beobachtet wurden). In der gesamten Wismut-Kohorte führte die Einschränkung zu einer Reduktion auf 30271 und 1302 Todesfälle durch Lungenkrebs (im Vergleich zu 50470 Arbeitern und 3438 Todesfälle durch Lungenkrebs in der Gesamtkohorte). Sowohl in der gesamten Kohorte als auch auf der Teilkohorte mit Beschäftigungsbeginn 1960 oder später wird das für Unsicherheiten korrigierte Risiko etwas höher geschätzt, als das Risiko, das sich ergibt, wenn die Unsicherheiten in der Expositionsabschätzung nicht berücksichtigt werden. Die Ergebnisse sind vorläufig, da nicht die Daten für alle Arten der Expositionsabschätzung in die Analyse eingeschlossen werden konnten. Zudem wurden nur Subgruppen der jeweiligen Kohorten betrachtet und es wurden keine effektmodifizierenden Variablen berücksichtigt.

Tabelle 2 **Vergleich der Risikoschätzer auf der gesamten Wismut-Kohorte und auf der Teilkohorte mit Beschäftigungsbeginn 1960 oder später mit und ohne Berücksichtigung von Unsicherheiten**

	Ohne Berücksichtigung von Unsicherheiten	Mit Berücksichtigung von Unsicherheiten
Risikoschätzer (pro 100 WLM) und 95%-Unsicherheitsintervall basierend auf der Teilkohorte mit Beschäftigungsbeginn 1960 oder später	1,44 [0,73; 2,52]	1,80 [0,70; 3,36]

Schlussbetrachtung

Das Vorhaben liefert eine Methode zur Berücksichtigung von Expositionsunsicherheiten in den Risikomodellen der Wismut-Studie und eine erste Einschätzung über deren mögliche Auswirkungen auf die Risikoschätzer: Expositionsunsicherheiten führen in einfachen Risikomodellen zu einer leichten Unterschätzung des Risikos. In weiteren Sensitivitätsanalysen muss geprüft werden, ob dies auch für komplexere Modelle und die Gesamt-Kohorte gilt. Die entwickelte statistische Methode bietet die Grundlage, um zusätzliche Messfehlerstrukturen in der Wismut-Kohorte zu berücksichtigen und dadurch deutlich mehr Arbeiter und Todesfälle durch Lungenkrebs in die Analyse mit einzubeziehen. Darüber hinaus ist die Methode für Analysen anderer Erkrankungen als Lungenkrebs und weiterer Strahlenexpositionen als Radon in der Wismut-Kohorte anwendbar. Die Ergebnisse des Vorhabens können für gemeinsame Analysen mit anderen Uranbergarbeiter-Kohorten, auch bezüglich der Expositionsunsicherheiten, verwendet werden. Eine möglichst verzerrungsfreie Abschätzung des Lungenkrebsrisikos durch Radon ist wesentlich für Strahlenschutzkonzepte und Verfahren zur Anerkennung von Berufskrankheiten.

Themenbereich 02 - Strahlenschutztechnik

Zu diesem Themenbereich liegt für das Jahr 2022 kein Bericht vor.

Themenbereich 03 - Strahlenbiologie - Wirkung von ionisierender und nichtionisierender Strahlung, Strahlenempfindlichkeit

Zu diesem Themenbereich liegt für das Jahr 2022 kein Bericht vor.

Themenbereich 04 - Medizinische Strahlenexposition

Bestimmung von Mindestanforderungen an Bildqualität und Dosis in der Brusttomosynthese

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3619S42363	01.10.2019	31.03.2022	277.472,91 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Westfälische Wilhelms-Universität Münster Klinik für Radiologie			
Projektleitung	Fachbegleitung BfS	verantwortlich für den Text	
Rainer Eßeling	Dr. de las Heras Gala	Alexander Sommer	

Hintergrund

Die Tomosynthese der Brust existiert als Verfahren bereits über 14 Jahre. 2009 wurden für Deutschland die ersten Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Qualitätssicherungsrichtlinie (QS-RL) beschrieben. Diese enthielten allerdings keine Anforderungen an die physikalische Bildqualität. Auch andere internationale Vorschriften für die Tomosynthese der Brust (engl. DBT, Digital Breast Tomosynthesis) beinhalten bis heute keine Grenzwerte für die Bildqualität der DBT oder teilweise nur Prüfkörperempfehlungen aus dem Bereich der digitalen Mammographie (DM).

Eine Problematik stellt hierbei die heterogene technische Umsetzung der DBT der einzelnen Hersteller dar. So unterschieden sich DBT-Systeme besonders im verwendeten Scanwinkel, in der Anzahl der erstellten Aufnahmen während des Scans als auch im Bildeindruck durch die verwendeten Rekonstruktionsverfahren. Für mammographische Untersuchungsverfahren steht besonders die Darstellung von feinen Mikroverkalkungen als auch von Läsionen mit nur sehr geringen Kontrastunterschieden im Vordergrund. Auch die DBT-Systeme müssen in der Lage sein, diese Anforderungen zu erfüllen. Weiter sollen gerade 3D-Verfahren Überlagerungseffekte und maskierte Befunde durch anatomische Hintergrundstrukturen reduzieren, um so die diagnostische Sicherheit zu steigern. Dies bestimmt somit ebenfalls die Anforderungen an einen physikalischen Bildqualitätstest. QS-Phantome müssen demnach sowohl Strukturen, die entsprechend fein aufgelöst sind, als auch Strukturen mit niedrigen Kontrastunterschieden enthalten. Außerdem sollten Überlagerungseffekte simuliert werden können, die durch anatomische Hintergrundstrukturen entstehen.

Zielsetzung

Ziel des Projektes war die Entwicklung multipler Qualitätssicherungskonzepte (QS-Protokolle) zur Bestimmung der Bildqualität an Tomosynthesegeräten unterschiedlicher Hersteller. Ein besonderes Augenmerk sollte dabei auf den Einsatz von modellbasierten Analysen gelegt werden (Model Observer, MO). Dadurch sollen Aufwand und Subjektivität gegenüber visuellen Auswertungen reduziert werden. Die beschriebenen Anforderungen an ein QS-Phantom muss der MO ebenfalls erfüllen. Eine Zielsetzung hinsichtlich des MO war es, Kanalparameter zu finden, die die unterschiedlichen Herstellercharakteristiken berücksichtigen, also auch möglichst analoge Ergebnisse hinsichtlich Niedrigkontrastobjekt- und Mikrokalkerkennung zum Menschen aufzuweisen. Weiter sollten hinsichtlich der Bildqualität Mindestanforderungen erarbeitet sowie eine Korrelation zur Parenchymdosis hergestellt werden (Dosiseffizienz).

Methodik

Für die Realisierung wurde das Projekt in zwei Arbeitspakete (AP) aufgeteilt. Ziel des ersten Arbeitspakets waren der Vergleich und die Analyse der aktuell verfügbaren Prüfvorschriften sowie der internationalen Literatur. Weiter wurden mehrere QS-Phantome auf Datenbasis verglichen. Mit einer Auswahl von fünf QS-Phantomen wurden Testmessungen durchgeführt. Anschließend wurden zwei QS-Protokolle entwickelt, denen dasselbe Basis-Prüfprotokoll zugrunde liegt.

Im AP 2 erfolgte die Erstellung der Aufnahmen, das Training des Model Observers sowie die Auswertung der Ergebnisse und die Festlegung von Mindestanforderungen, die wiederum in Korrelation zur Strahlenexposition gesetzt werden konnten.

QS-Protokolle

Für die Entwicklung der Qualitätssicherungskonzepte wurde, basierend auf den verfügbaren Normen, Messvorschriften und Richtlinien, ein Basis-Prüfprotokoll entwickelt. Mit diesem sollen grundlegende physikalische Parameter von DBT-Systemen (Signaldifferenz-Rausch-Verhältnis, z-Auflösung) sowie die Strahlenexposition (AGD) ermittelt werden. Berücksichtigt wurden die QS-RL (Stand 2014), IEC 61223-3-6 ED1 CDV, EUREF QC-Tomo Pro. V1.03, TOSYMA QS-Protokoll, Arbeitspapier der DIN 6868-164 sowie DIN 6868-162.

Die anschließenden Testmessungen mit 5 vorausgewählten QS-Phantomen berücksichtigten sowohl die Praxistauglichkeit, die Anwendung für DBT- und s2D-Datensätze, die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse als auch die Tauglichkeit für die Verwendung von Model Observern. Aus den Ergebnissen wurden abschließend zwei Qualitätssicherungskonzepte (QS-Protokoll 1 und QS-Protokoll 2) für die Ermittlung der Bildqualität entwickelt. Diese sollen die Qualität einer DBT-Anlage aus unterschiedlichen Blickwinkeln beurteilen. Hierzu zählen physikalische Parameter, anatomische Vergleichsstrukturen und typische klinische Anforderungen (Früherkennung, Abklärungsdiagnostik, kurative Mammographie). Die Konzepte sollten Prüfpunkte für die Differenzierbarkeit von DBT-Systemen enthalten wie bspw. das Auflösungsvermögen (x, y, z-Orientierung), die Abhängigkeit vom Scanwinkel, die Strahlenexposition und die Kontrast-Detail-Erkennbarkeit. Das QS-Protokoll 1 sollte sowohl die Möglichkeit einer klassischen visuellen Auswertung als auch einer Auswertung mittels MO bieten. Damit wurden Systeme von 5 unterschiedlichen DBT-Herstellern geprüft. Das QS-Protokoll 2 sollte einen hohen Automatisierungsgrad aufweisen und ausschließlich mittels MO ausgewertet werden. Es wurde an jeweils 5 Systemen von zwei Herstellern evaluiert.

Weiterhin wurde untersucht, inwieweit eine Abhängigkeit zwischen Bildqualität und Dosis besteht. Ziel war es, eine Verbindung zu einem Dosisindikator und somit zu eventuellen Mindestanforderungen für die Bildqualität von DBT-Systemen innerhalb des Arbeitspaketes 2 herstellen zu können.

Auswahl der Phantome

Zurzeit befinden sich einige Phantome auf dem internationalen Markt, die speziell für die Qualitätssicherung der Kontrast-Detail-Erkennbarkeit in der Tomosynthese entwickelt wurden. Weiterhin werden Prüfkörper teilweise empfohlen und verwendet, die ursprünglich für die konventionelle Mammographie konstruiert worden sind.

Eine der Stärken der Tomosynthese gegenüber der konventionellen Mammographie ist die Reduzierung oder bestenfalls die Aufhebung der Überlagerung von klinisch wichtigen Strukturen. Deshalb sollten DBT-Phantome sowohl befundrelevante Strukturen wie Mikrokalk, Fasern sowie Niedrigkontraststrukturen beinhalten als auch einen brustgewebesimulierenden Hintergrund aufweisen. Die Größe, Form und Verteilung der eingebetteten Objekte sollte sich an befundrelevanten Strukturen orientieren und die Möglichkeit bieten, Schwankungen in der Geräteleistung zu detektieren. Anhand eines Literaturvergleichs und von Testmessungen wurden letztendlich drei DBT-Phantome für die Beurteilung der Bildqualität ausgewählt (TORMAM, CIRS20, L2). Das L2-Phantom wurde speziell für die Auswertung mittels MO gebaut. Sein variabler und strukturierter Hintergrund bietet die besten Voraussetzungen für die Evaluation mittels MO. Für den Vergleich zur Bildqualitätssicherung der digitalen Mammographie wurde zusätzlich ein CDMAM-Phantom mit strukturiertem Hintergrund verwendet.

Auswahl der Hersteller

Die Auswahl der Hersteller erfolgte anhand eines repräsentativen Querschnitts der im Mammographie-Screening eingesetzten Gerätehersteller. Es wurde jeweils das modernste sich auf dem Markt befindliche System geprüft. Dabei handelte es sich um eine Amulet Innovality (Fuji), eine Pristina (GE), eine Giotto Class (Giotto), eine 3Dimensions (Hologic) und ein Mammomat Revelation (Siemens).

Die beiden Hersteller Siemens und Hologic, die für die Evaluierung des QS-Protokolls 2 verwendet wurden, repräsentieren zum einen den höchsten Anteil an DBT-Systemen, die im Rahmen der Abklärungsdiagnostik eingesetzt werden und verwenden zum anderen eine sehr unterschiedliche DBT-Technik. So verwendet die Firma Hologic den kleinsten DBT-Scanwinkel von $\pm 7,5^\circ$ und Siemens den größten mit $\pm 25^\circ$. Weiterhin gibt es zwischen den beiden Herstellern große Dosisunterschiede.

Auswertung

Als visuelle Auswerteverfahren kamen sowohl eine klassische visuelle Auswertung, bei der die gesuchten Strukturen und deren Lage bekannt war, als auch eine randomisierte visuelle Auswertung zur Anwendung. Die klassische Auswertung wurde beim TORMAM genutzt, da die Strukturtypen (Faser, Kalk, Niedrigkontrast) und deren Lage es nicht erlaubten, das Bild für eine randomisierte Auswertung aufzubereiten. Für die randomisierte Auswertung wurden die im Phantom eingebetteten Prüfobjekte und der heterogene Hintergrund in kleine Bildausschnitte (regions of interest, ROIs) zerlegt. Den auswertenden Personen wurden jeweils 4 Bildausschnitte präsentiert, dabei enthielt einer der Bildausschnitte das jeweilige Objekt (sog. „Signal-ROI“). Die drei anderen zeigten hingegen Bereiche des Phantoms ohne Prüfobjekt (sog. „Hintergrund-ROIs“). Die Anordnung der ROIs, und damit auch die Position der Signal-ROI, wurde durch die Software bei jeder Auswertung zufällig gewählt. Abweichend vom herkömmlichen 4-AFC-Verfahren hatte die auswertende Person zusätzlich die Möglichkeit, das jeweilige Objekt als „nicht erkennbar“ zu klassifizieren (4AFC+1). Die randomisierten Auswertungen des L2-Phantoms, dienten zusätzlich als Grundlage für das Training des MO.

Für die Bewertung der Bildqualität wurden die folgenden Maßzahlen verwendet:

Detektionsrate

Gibt den Anteil der Auswertungen an, in denen eine bestimmte Struktur (definiert durch Strukturtyp und -größe) erfolgreich erkannt wurde. Die Berechnung einer Detektionsrate erfolgt stets bezogen auf eine definierte Gruppe von Bildern.

Strukturtyp-Scoring

Das Scoring gibt die Anzahl erfolgreich erkannter Objekte (z. B. einzelne Kalk-Punkte) eines Strukturtyps wieder. Hieraus ergibt sich eine Maßzahl pro Strukturtyp und Aufnahme unabhängig von der Strukturgröße (Mass-Scoring; Calc-Scoring und Fiber-Scoring). Das Scoring eignet sich aufgrund der Übersichtlichkeit (max. 3 Maßzahlen) besonders dafür, die Ergebnisse in Relation zur Strahlenexposition zu setzen und damit einen Dosis-Effizienz-Index zu bestimmen.

Auswahl des MO

Die aufgabenbasierten Verfahren zur Bewertung von Bildqualität (engl. „task-based approach“) beruhen im Gegensatz zu den physikalisch-technischen Parametern gerade darauf, direkt zu prüfen, inwiefern ein Bild zur Beantwortung einer Fragestellung geeignet ist. Ein Beispiel für ein solches Verfahren ist die in der Qualitätssicherung der herkömmlichen 2D-Mammographie etablierte CDMAM-Prüfung. Menschliche Auswertende bringen jedoch verschiedene Nachteile mit sich, wie Inter- und Intraobserver-Variabilität (z. B. Erfahrungen, sowie Ermüdungs- und Lerneffekte). Außerdem bedeutet die Auswertung einer größeren Anzahl von Bildern einen erheblichen Personal-

und Zeitaufwand. Hieraus resultiert der Ansatz, die menschlichen Auswertenden durch Computer mit geeigneten mathematischen Algorithmen („Modellen“) zu ersetzen. Diese Algorithmen werden als „modellbasierte Beobachter“ (engl.: „model observer“) bezeichnet.

Das Ziel für die MO-Algorithmen war ein anthropomorphes Verhalten, d. h. eine möglichst gute Übereinstimmung der durch den Model Observer erzeugten Ergebnisse mit denen von menschlichen Auswertenden. Für alle automatisierten Auswertungen kam der Channelized Hotelling Observer (CHO) mit einem Kanalsatz aus acht Gabor-Funktionen zum Einsatz. Gabor-Kanäle weisen anthropomorphe Eigenschaften auf. Die Verwendung von acht Gabor-Kanälen hat sich bei Petrov et al. für eine Optimierung von CHOs bewährt.

Mindestanforderungen

Im regulären Patientenbetrieb arbeiten die Mammographiesysteme bei der eingestellten Dosisstufe 100 %. Daraus ergibt sich eine gewisse diagnostische Sicherheit für die Bildqualität, weshalb sich die Mindestanforderungen auf den regulären Patientenbetrieb beziehen. Um die Dosiseffizienz zu analysieren, wurden Aufnahmen unterschiedlicher Dosisniveaus erstellt und ausgewertet. Für die Bestimmung von Mindestanforderungen im Rahmen des Projektes werden die Struktur-Scores bei der Dosisstufe 100 % sowie die 25 % Perzentile der Medianwerte betrachtet. Weitere Orientierungspunkte stellen sowohl die Mindestanforderungen des CDMAM-Verfahrens für die Mammographie als auch das von dem American College of Radiology (ACR) entwickelte ACR-Phantom (ACR Digital Mammography Phantom) dar. Die Strukturtypen des ACR-Phantoms finden sich in diversen Phantomen wieder. Das ACR hat Empfehlungen für die Erkennbarkeit von mindestens sichtbaren Strukturen angegeben, die ebenfalls für DBT-Systeme gültig sind. Trotz der Limitierungen bei der Übertragbarkeit von CDMAM-Grenzwerten erfolgt im ersten Schritt für die Bestimmung von Mindestanforderungen eine Orientierung an den modifizierten CDMAM-Aufnahmen.

Durchführung

In AP 2 erfolgte die praktische Evaluierung der erarbeiteten Protokolle. Zum Abgleich mit etablierten Verfahren in der 2D-Mammographie, erfolgte in beiden Protokollen die Bestimmung der Kontrast-Detail-Erkennbarkeit (CDMAM) nach der Prüfanleitung der Referenzzentren für Mammographie.

QS-Protokoll 1: Kurative Mammographie

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der verwendeten Phantome, der eingestellten Dosisniveaus sowie der ausgewerteten Bildobjekte mit der jeweiligen Auswertungsart. Dabei stellt das Dosisniveau 100 % die Parameter der jeweiligen Belichtungsautomatik bei 60 mm äquivalenter Brustdicke (50 mm PMMA) dar. Pro Phantom und Dosisniveau wurden je zwei Aufnahmen hintereinander angefertigt. Alle Aufnahmen (mit Ausnahme von CDMAM und CDMAM (M)) wurden jeweils von sechs Personen ausgewertet. Die Aufnahmen wurden jeweils an zwei Hologic 3Dimensions, zwei Siemens Revelations, einer Giotto Class, einer GE Pristina sowie einer Fuji Amulet Innovality angefertigt.

QS-Protokoll 2: Mammographie-Screening (hoher Automatisierungsgrad)

Insgesamt wurden an zehn Systemen zweier Hersteller (Siemens und Hologic; je fünf Geräte) für drei Dosisstufen (50 %, 100 %, 150 %) im Regelfall jeweils 25 Aufnahmen erstellt, sodass pro Gerät insgesamt 75 Aufnahmen angefertigt wurden (siehe Tabelle 2). Diese wurden von sechs Personen zufällig (4AFC+1) ausgewertet. Anschließend wurde an einer Auswahl der Aufnahmen der MO trainiert und anschließend auf die restlichen Aufnahmen angewendet. Die Ergebnisse wurden mit denen der menschlichen Auswertenden verglichen (siehe Abbildung 1). Bei der Optimierung des MO wurden die Parameter der Kanäle systematisch innerhalb gewisser Grenzen verändert. Das jeweils zugehörige MO-Ergebnis wurde anhand von zwei Bilddatensätzen („Trainings-“ und

„Vergleichsbilder“) ermittelt und mit den Ergebnissen der menschlichen Auswertenden (PCHO „percentage correct, human observers“ und PCMO „percentage correct, model observer“, Anteil der richtigen Ergebnisse bei den menschlichen Auswertenden bzw. des MO) verglichen. Hierzu wurden die verschiedenen Kennzahlen und Kriterien, wie die mittlere Abweichung (mean error, ME), die Steigung der Regressionsgeraden durch die (PCHO, PCMO)-Punkte sowie der Pearson-Korrelationskoeffizient der (PCHO, PCMO)-Punkte.

Ziel ist es, einen Satz von Kanalparametern zu finden, der bei allen drei genannten Optimierungskriterien möglichst gut abschneidet (mittlere Abweichung nahe Null, Steigung der Regressionsgeraden nahe Eins und Korrelationskoeffizient nahe Eins).

Tabelle 1 **Übersicht der Phantome zur visuellen Bestimmung der Bildqualität im Rahmen des Prüfprotokolls 1**

Phantom	Dosisniveau	Bildobjekt	Auswertung
CIRS20	50 %, 75 %, 100 %, 125 %, 150 %	2D, 3D, s2D	4 AFC+1
TORMAM (50 mm) mit zusätzlichem heterogenem Hintergrund	50 %, 75 %, 100 %, 125 %, 150 %	2D, 3D, s2D	visuell, strukturbasiert
TORMAM (70 mm) mit zusätzlichem heterogenem Hintergrund	50 %, 75 %, 100 %, 125 %, 150 %	2D, 3D, s2D	visuell, strukturbasiert
L2 (mit variablem Hintergrund)	50 %, 75 %, 100 %, 125 %, 150 %	2D, 3D, s2D	4 AFC+1
CDMAM (M) mit zusätzlichem heterogenem Hintergrund	100 % 50 %, 150 %	2D, 3D, s2D 3D	4 AFC+1 - angepasst 4 AFC+1 - angepasst
CDMAM mit homogenem Hintergrund	100 %	3D	4 AFC+1 - angepasst

Tabelle 2 **Übersicht über die Anzahl der im Rahmen des Prüfprotokolls 2 erstellten Aufnahmen des L2-Phantoms.**

Systemtyp	Phantom	Aufnahmen pro Dosisniveau			Gesamtanzahl der Auswertungen (Aufnahmen x 6 Auswerter)
		50 %	100 %	150 %	
Hologic 3Dimensions ohne Binning	L2	100	125	100	1.950
Hologic 3Dimensions mit Binning	L2	25	25	25	450
Siemens Revelation	L2	124	124	124	2.232

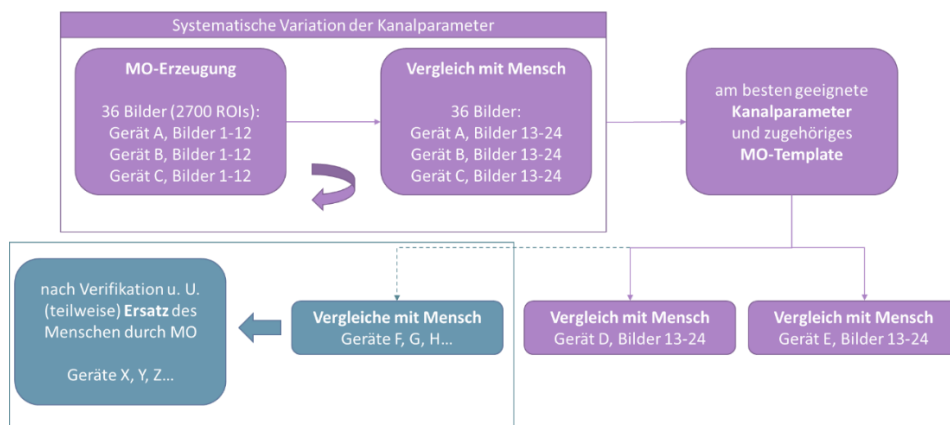


Abbildung 1 Lila-farbig hinterlegt ist der Workflow im aktuellen Projekt pro Gerätemodell; petrol-farbig hinterlegt sind noch zukünftige Schritte.

Ergebnisse

Physikalisch-Technische Ergebnisse

Die mittlere Parenchymdosis (engl. average glandular dose, AGD) für 50 mm PMMA liegt im 2D-Modus zwischen 1,0 mGy (Siemens2) und 1,9 mGy (Hologic1) und im 3D-Modus zwischen 1,4 mGy (GE) und 2,4 mGy (Hologic1). Bei sechs der sieben Geräte liegt die 3D-AGD über der 2D-AGD. Nur das Gerät von GE appliziert in beiden Modi die gleiche Dosis, nämlich 1,4 mGy und liegt somit für die Tomosynthese am niedrigsten. Die beiden Systeme von Hologic liegen mit 2,4 mGy und 2,3 mGy am höchsten. Tabelle 3 stellt den mit QS-Protokoll 2 ermittelten Median der 3D-AGD gegenüber. Die Medianwerte der fünf Hologic-Geräte liegen stabil zwischen 2,3 und 2,4 mGy. Die Werte der fünf Siemensgeräte schwanken stärker (1,6 - 2,0 mGy), liegen dafür allerdings deutlich niedriger als die Hologic-Werte.

Tabelle 3 Die berechneten AGD-Werte der 10 Geräte aus dem Prüfprotokoll 2 für die Dosisstufe 100 %.

Hersteller	Hologic	Siemens
Median (Min - Max) 3D [mGy]	2,3 (2,3 – 2,4)	1,8 (1,6 – 2,0)

Visuelle Auswertung „Human observer“

Insgesamt ist das CIRS20-Phantom für die Bestimmung der Bildqualität in der Tomosynthese nicht geeignet. Zum einen sind die Strukturen zu groß. So lag die Detektionsrate vom Kalk teilweise bei 100 %. Zum anderen gibt es keine Kontrastabstufung der Niedrigkontrastobjekte. Diese unterscheiden sich lediglich im Durchmesser. Außerdem ähneln die Faserstrukturen den Verwirbelungen des Hintergrundes sehr. Die maximale Anzahl der Hintergrund-ROIs ist mit 24 sehr begrenzt, sodass ein Lerneffekt nicht vermeidbar war. Die Auswertung der TORMAM-Aufnahmen konnte nicht randomisiert erfolgen, da die Strukturen zu nah beieinanderliegen und somit das Festlegen einzelner Struktur-ROIs nicht möglich ist. Deshalb gab es einen BIAS bei der Auswertung, weil die Lage und Größe der Strukturen bekannt waren. Positiv ist, dass das TORMAM-Phantom eine hohe Anzahl an unterschiedlichen Objekten in verschiedenen Kontraststufen (Niedrigkontrastobjekte) und Ausrichtungen (Fasern) aufweist. Allerdings überlagern sich unterschiedliche Größen der Kalkstrukturen in den einzelnen Kalkobjekten. Da die Strukturen in einer 10 mm homogenen Platte eingebettet sind, war die Modifizierung des Aufbaus mit heterogenen, verwirbelten Platten nur teilweise erfolgreich. Durch die gute z-Auflösung der Tomosynthese wurde die Heterogenisierung des Hintergrundes in der scharfen Schicht wieder aufgelöst. Auch das CDMAM-Phantom wurde mit den CIRS20-Hintergrundplatten modifiziert und wie das CIRS20 randomisiert ausgewertet. Allerdings liegt auch hier analog zum TORMAM die scharfe Schicht

weiterhin im homogenen Bereich. Durch die Randomisierung konnten die bekannten Lerneffekte bei der CDMAM-Auswertung eliminiert werden. Bei der visuellen L2-Auswertung konnten die Lerneffekte durch den variablen Hintergrund auf ein Minimum beschränkt werden. Die Abstufung der Strukturgrößen ist ausreichend, sodass die Detektionsrate meist unter 100 % lag und der Strukturtyp-Score nicht ausgereizt wurde. Letztendlich ähneln die gesuchten 3D-Niedrigkontrastobjekte den Hintergrundstrukturen, wodurch die visuelle Auswertung zum Teil sehr anspruchsvoll ist. Da der Hintergrund variabel ist, wird eine hohe Anzahl an Aufnahmen benötigt, um reproduzierbare Ergebnisse zu bekommen. Primär wurde das L2-Phantom deshalb im Protokoll 2 eingesetzt.

Struktur-Scores

Mit Hilfe des Struktur-Scores können gegenüber der Detektionsrate feinere Unterschiede zwischen den einzelnen Geräten und Systemtypen besser differenziert und zueinander abgegrenzt werden. Mit Ausnahme des binnenden Hologic-Systems (Hologic4 (B)), weisen die Hologic-Systeme untereinander insgesamt ähnliche Werte auf (siehe Tabelle 4).

Im Gegensatz zum Calc-Score weisen die Siemens-Systeme bzgl. des Mass-Scores einen höheren Strukturtyp-Score gegenüber den Hologic-Systemen auf. In Abhängigkeit zur gewählten Dosisstufe ergab sich für alle Systemtypen keine gesteigerte Erkennbarkeit, denn die Ergebnisse pro System lagen für alle Dosisstufen auf einem ähnlichen Niveau.

Tabelle 4 Score-Werte für Calc- und Mass-Objekte des L2-Phantoms im Bildtyp 3D. Angegeben ist der Medianwert für die Dosisstufen von 50 % bis 150 %.

Hersteller	N	Median (Min-Max) 50 %-Dosis	Median (Min-Max) 100 %- Dosis	Median (Min-Max) 150 %- Dosis	Median (Min-Max) 50 %-Dosis	Median (Min-Max) 100 %- Dosis	Median (Min-Max) 150 %- Dosis
		Calc-Score			Mass-Score		
Siemens	5	14,0 (11-15)	18,0 (17-18)	18,0 (18-18)	7,0 (6-7)	7,0 (6-7)	7,0 (7-7)
Hologic	4	17,3 (17-18)	21,5 (21-22)	23,8 (22-24)	5,0 (5-5)	5,0 (5-6)	5,5 (5-6)
Hologic (B)	1	16,0	18,0	20,5	5,0	4,0	4,0

Als Grundlage zur Bestimmung des Dosis-Effizienz-Index (1/mGy) diente das oben benannte Strukturtyp-Scoring, welches ins Verhältnis zur verwendeten Strahlenexposition (AGD) gesetzt wurde. Den höchsten Calc-Dosis-Effizienz-Index erzielt bei allen Systemen die Dosisstufe 50 %. Insgesamt liegen sowohl der Calc- als auch der Mass-Dosis-Effizienz-Index auf einem relativ ähnlichen Niveau für alle Systeme der jeweiligen Dosisstufe.

Die vergleichsweise niedrige AGD der Siemens-Systeme bei einem Dosisniveau von 50 % (0,9 mGy) führt zu einem sehr hohen Dosis-Effizienz-Index. Bei den Hologic-Systemen fallen die Werte aufgrund der höheren AGD (1,18 mGy) niedriger aus.

Tabelle 1 Zusammenfassung der Medianwerte des Dosis-Effizienz-Index für Hoch- (Calc) und Niedrigkontrastobjekte (Mass) aller analysierten Systemtypen.

Hersteller	N	Median (Min-Max) 50 %-Dosis	Median (Min-Max) 100 %-Dosis	Median (Min-Max) 150 %- Dosis	Median (Min-Max) 50 %- Dosis	Median (Min-Max) 100 %- Dosis	Median (Min-Max) 150 %- Dosis
		Dosis-Effizienz Calc [1/mGy]			Dosis-Effizienz Mass [1/mGy]		
Siemens	5	15,0 (13,7-15,5)	9,4 (9,0-10,6)	6,4 (5,6-8,2)	7,0 (6,7-8,7)	3,5 (3,3-3,9)	2,5 (2,2-3,2)
Hologic	4	14,6 (13,5-15,4)	9,2 (9,1-9,6)	6,6 (6,5-6,8)	4,2 (3,8-4,5)	2,2 (2,1-2,6)	1,6 (1,3-1,7)
Hologic (B)	1	14,5	7,8	6,0	4,5	1,7	1,2

Model Observer

Für jeden Satz von Kanalparametern wurde berechnet, wie gut jeweils die Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen des Model Observers und denen der menschlichen Auswertenden ist. Hierzu wurden die folgenden Kennzahlen und Kriterien herangezogen:

- Die mittlere Abweichung (mean error, ME): $ME = \frac{\sum_{i=1}^n (PC_{HO,i} - PC_{MO,i})}{n}$
- Die Steigung der Regressionsgeraden durch die (PC_{HO}, PC_{MO})-Punkte.
- Der Pearson-Korrelationskoeffizient der (PC_{HO}, PC_{MO})-Punkte (engl.: „percentage correct, human observers“ und „percentage correct, model observer“, Anteil der richtigen Ergebnisse bei den menschlichen Auswertenden bzw. des MO) als Maß für den linearen Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der menschlichen Auswertenden und des Model Observers.

Tabelle 6 stellt die Übereinstimmung der Ergebnisse der jeweils an einer Gruppe von drei Geräten eines Typs erstellten „besten“ Model-Observer-Parameter für die Detektion von Niedrigkontrastobjekten mit den menschlichen Ergebnissen bei der Anwendung an jeweils zwei weiteren Geräten gleichen Typs dar.

Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse für die Mikrokalkzifikationen.

Tabelle 8 zeigt den Vergleich der resultierenden Mass-Score-Werte mit denen der menschlichen Auswerter. Für den Calc-Score gibt es die Herausforderung, dass die Sichtbarkeit einzelner Kalkpunkte „absolut“ bewertet werden muss, sodass ein Schwellwert notwendig ist. Dieser muss erst festgelegt werden.

Die Anwendung eines Model Observer für die Auswertung des L2-Phantom ist somit prinzipiell möglich. Es konnten keine hersteller- und systemtypenübergreifenden Kanalparameter gefunden werden. Diese könnten allerdings im Rahmen einer Typenprüfung pro Systemtyp ermittelt werden. Zusätzlich muss die Implementierung des Calc-Scores in den Model Observers erfolgen.

Tabelle 6 *MO: Verifikation Niedrigkontrast*

Erzeugt mit	Verifiziert an	Mittlere Abweichung	Steigung der Regressionsgeraden	Korrelationskoeffizient
Hologic 3, 5, 7	Hologic 4 (Binning)	- 3,2 %	1,00	0,86
Hologic 3, 5, 7	Hologic 6	+ 3,9 %	0,91	0,83
Siemens 4, 5, 6	Siemens 3	- 6,8 %	1,04	0,95
Siemens 4, 5, 6	Siemens 7	- 5,7 %	1,05	0,97

Tabelle 7 *MO: Verifikation Mikrokalk*

Erzeugt mit	Verifiziert an	Mittlere Abweichung	Steigung der Regressionsgeraden	Korrelationskoeffizient
Hologic 3, 5, 7	Hologic 4 (Binning)	+ 23,9 %	0,72	0,94
Hologic 3, 5, 7	Hologic 6	- 3,3 %	1,02	0,99
Siemens 4, 5, 6	Siemens 3	+ 1,1 %	0,93	0,92
Siemens 4, 5, 6	Siemens 7	- 2,2 %	0,99	0,98

Tabelle 8 *MO: Vergleich Mass-Score*

Gerät	Model Observer	Menschliche Auswerter		
	Mittelwert	Mittelwert	SD	Median
Hologic 4 (Binning)	4,6	4,5	1,7	4
Hologic 6	4,8	5,0	1,6	5
Siemens 3	7,2	6,6	1,4	7
Siemens 7	7,4	6,7	1,2	7

Mindestanforderungen

Für die Festlegung von Mindestanforderungen eignet sich der Strukturtyp-Score eher als die Detektionsrate (siehe Auswertung). Der niedrigste Score-Wert bei der 100 % Dosisstufe lag bei 17 erkannten Kalk-Strukturen im Prüfprotokoll 2 (siehe Tabelle 4). Dies entspricht mindestens einer erkannten Strukturgröße von 0,17 mm sowie mindestens 4 von 6 Objekten in der 0,17 mm Struktur. Die niedrigste 25 % Perzentile, bezogen auf einen Hersteller, lag bei einem Calc-Score von 16 (siehe

Tabelle 9). Hieraus lässt sich ein möglicher Grenzwert von 16 erkannten Kalk-Strukturen ableiten, der ebenfalls gewisse Schwankungen innerhalb der Auswertung berücksichtigt. Der niedrigste Mass-Score liegt bei 4 erkannten Strukturen (Hologic (B)). Hierbei handelt es sich um das System mit aktivem 2x2 Binning. Wird das System aus der Analyse ausgeklammert, so liegt der niedrigste Mass-Score bei 5. Die niedrigste 25 % Perzentile, bezogen auf die Hersteller, liegt bei 4 erkannten Strukturen im Mass-Score. Eine Empfehlung für die Mindestanforderungen des Mass-Scores wäre ein Wert von 4. Hieraus resultiert, dass mindestens eine Strukturgröße von 3,6 mm erkannt werden muss.

Tabelle 9 *Perzentilen und Medianwerte der Strukturtyp-Scores bei 100 % Dosis und die sich daraus ergebenden Mindestanforderungen*

Her- steller	N	25 % Perzen- tile	Me- dian	75 % Perzen- tile	Min- dest- anfor- derung	25 % Perzen- tile	Me- dian	75 % Perzen- tile	Min- dest- anfor- derung
		Calc-Score 100 % Dosislevel				Mass-Score 100 % Dosislevel			
Siemens	5	16,0	18,0	19,0	16	6,0	7,0	8,0	4
Hologic	4	19	21,5	23,5		4,0	5,0	6,0	
Hologic (B)	1	14	16	18		3,0	4,0	6,0	

Umsetzung der Ergebnisse

Die in diesem Projekt erprobte Anwendung eines Modell-basierten Beobachters, der die Wahrnehmung eines menschlichen Beobachters simuliert (deshalb anthropomorphes Modell genannt), ist für lokale Konstanzprüfungen (für ein bestimmtes Gerät) anwendbar. Jedoch erwies sich der implementierte und bewertete Modell-basierte Beobachter als nicht geeignet für die vergleichende Bewertung verschiedener DBT-Gerätetypen.

Für Typ- oder Abnahmeprüfungen sollte deshalb die Benutzung eines sogenannten „idealen“ Beobachters erprobt werden, der nicht darauf festgelegt ist, einen menschlichen Beobachter möglichst gut zu simulieren, sondern die maximal in den Bilddaten verfügbare Information zu nutzen.

Sollte sich dieser Ansatz als erfolgreich erweisen, könnte er in einer zukünftigen Überarbeitung der Norm „DIN EN IEC 61223-3-6:2020: Bewertung und routinemäßige Prüfung in Abteilungen für medizinische Bildgebung - Teil 3-6: Abnahmeprüfungen und Konstanzprüfungen – Leistungsmerkmale zur Bildgebung im Betrieb für die mammographische Tomosynthese von Röntgen-Mammographiegeräten“ berücksichtigt werden. Für Konstanzprüfungen könnte auch weiterhin ein einfacherer Ansatz ausreichen.

Themenbereich 05 - Radioökologie

Alters- und produktgruppenspezifische Auswertung der in Deutschland erhobenen Verzehrsdaten

Forschungskennzeichen 3620S52550	Beginn 01.01.2021	Ende 31.12.2022	Fördermittel 129.195,14 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH			
Projektleitung Dr. Maria-Teresa Hussels	Fachbegleitung BfS Dr. Philipp Hartmann Dr. Alexander Diener	verantwortlich für den Text Dr. Philipp Hartmann Dr. Alexander Diener	

Hintergrund

Im Zuge der Fortschreibung von Berechnungsvorschriften zur Ermittlung der Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung (repräsentative Person im Sinne der ICRP) muss überprüft werden, ob die derzeit verwendeten altersgruppen- und lebensmittelgruppenspezifischen Verzehrsdaten aktualisiert bzw. geändert werden müssen. Diese Werte beruhen vorwiegend auf den Ergebnissen der 1. Nationalen Verzehrsstudie und damit auf Ernährungserhebungen zwischen 1985 und 1988, die ausschließlich auf die alten Bundesländer beschränkt waren.

Zielsetzung

In dem Forschungsvorhaben sollten die nach 2000 in Deutschland durchgeführten Verzehrsstudien ausgewertet werden. Eine statistische Unsicherheitsanalyse war außerdem durchzuführen. Ziel des Vorhabens war es, für die nach Anlage 11 Teil B Tabelle 1 der Strahlenschutzverordnung zu berücksichtigenden sechs Altersgruppen und zehn Lebensmittelgruppen die jeweils für Deutschland repräsentativen Verzehrsmengen zu erheben und Abweichungen zur aktuell geltenden Tabelle herauszustellen. Anzugeben waren jeweils die arithmetischen und geometrischen Mittelwerte, die Erwartungswerte und die 95. Perzentile der entsprechenden Verzehrsmengen. Zudem war es Ziel des Vorhabens, Aussagen über die Repräsentativität und Unsicherheit der erhobenen Verzehrsmengen sowie über die langfristige zeitliche Entwicklung zu treffen.

Methodik und Durchführung

Datengrundlage der aktuell gültigen Verzehrsmengen

Im Rahmen der Berechnung von Strahlenexpositionen werden entsprechend der in Deutschland gültigen Berechnungsvorschriften verschiedene Annahmen zu den Expositionssituationen getroffen. Bei der Ermittlung der Dosis aufgrund von Ingestion finden die Verzehrsmengen verschiedener Lebensmittelgruppen Eingang in die Berechnungsvorschrift. Die anzunehmenden Verzehrsmengen werden für definierte Alters- und Lebensmittelgruppen in der Strahlenschutzverordnung festgesetzt. Die Altersgruppen decken alle Altersklassen von Säuglingen (< 1 Jahr) bis hin zum Erwachsenenalter (> 17 Jahre) ab.

Die bisher zur Ermittlung der Ingestionsdosis verwendeten altersgruppen- und lebensmittelspezifischen Verzehrsmengen basieren hauptsächlich auf Daten der 1. Nationalen Verzehrsstudie der 80er Jahre, die sich ausschließlich auf die alten Bundesländer beschränkte. Angesichts der deutlichen Veränderungen des Lebensmittelangebots und auch der Lebensumstände, führte das Max Rubner-Institut (MRI, Bundesforschungsinstitut für Ernährung und Lebensmittel) im Auftrag des früheren Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Mitte der 2000er Jahre die zweite Nationale Verzehrsstudie (NVS II) durch. Darin finden sich unter anderem Aussagen zum Verzehr der wichtigsten Lebensmittelgruppen. Ein Ergebnis der NVS II ist z. B., dass sich die Ernährungsgewohnheiten von Männern und Frauen insbesondere in Bezug auf den

Fleischverzehr unterscheiden. An die zweite Nationale Verzehrsstudie schloss sich eine langfristige Beobachtung des Ernährungsverhaltens in Deutschland im Rahmen des Nationalen Ernährungsmonitorings (NEMONIT) an.

Datengrundlage des Forschungsvorhabens

Neben der Nationalen Verzehrsstudie, welche nur die Ernährungsgewohnheiten von Personen über 14 Jahren berücksichtigt, sind ab dem Jahr 2000 auch verschiedene Ernährungsstudien für die darunter liegenden Altersstufen durchgeführt worden.

Die in den einzelnen Verzehrerhebungen abgefragten Alters- und Lebensmittelgruppen sind jeweils unterschiedlich detailliert und gruppiert. Dabei verfolgten die Erhebungen andere Ziele als die zur Berechnung der Ingestionsdosis und Abschätzung eines potenziellen Strahlenrisikos. Weiterhin enthalten die Erhebungen u. U. zusätzliche Informationen, wie z. B. geschlechtsspezifische und regionale Angaben sowie zeitliche Trends. Um die Daten als Grundlage für die Berechnung der Ingestionsdosis nutzbar zu machen, mussten diese demnach zunächst entsprechend umgruppiert und umfassend analysiert werden.

In diesem Forschungsvorhaben wurden daher im Zuge der Fortschreibung von Berechnungsvorschriften die nach dem Jahr 2000 in Deutschland durchgeführten Verzehrsstudien erfasst und die erhobenen Daten gemäß der in Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV aufgeführten Alters- und Lebensmitteleinteilung umgruppiert. Dabei wurden insbesondere die gruppenspezifischen Mittelwerte und die 95. Perzentile der jährlichen Verzehrsmengen für sechs Altersklassen und bestimmte Lebensmittelgruppen bestimmt. Zusätzlich wurden die Repräsentativität und Unsicherheit dieser Datensätze untersucht sowie mögliche Fehlerquellen bei der Umgruppierung der Daten aufgezeigt. Ebenso wurde untersucht, wie stark regionale Verzehrsmengen von den nationalen Durchschnittswerten abweichen und ob sich langfristige Ernährungstrends abzeichnen.

Arbeitspakete

Im ersten Arbeitspaket (AP 1) des Vorhabens „Zusammenstellung der nach 2000 in Deutschland durchgeführten Verzehrsstudien und Erstellung eines Konzepts zur Umgruppierung der Rohdaten entsprechend der in der Strahlenschutzverordnung vorgegebenen Lebensmittelgruppen“ wurden in einem ersten Schritt Informationen zu den Verzehrsstudien recherchiert und die Datenverfügbarkeit geprüft. Ziel war dabei die Erstellung eines Konzeptes, wie die in den einzelnen Erhebungen aufgeführten Ernährungsgruppen entsprechend den Vorgaben der Strahlenschutzverordnung umgruppiert werden können. Dementsprechend wurden anonymisierte Daten einzelner Verzehrsstudien beschafft und im Hinblick auf die Umgruppierung der Datensätze untersucht.

Im Arbeitspaket 2 (AP 2) „Umgruppierung der Rohdaten deutscher Verzehrsstudien und Ermittlung der jährlichen Verzehrsmengen für die in der Strahlenschutzverordnung vorgegebenen Lebensmittelgruppen“ wurde für jede der ausgewählten Studien eine Umgruppierung der Verzehrsmengen entsprechend dem in AP 1 entwickelten und abgestimmten Konzept durchgeführt, d. h. die Daten wurden unter Anwendung der in AP 1 definierten Annahmen weiter detailliert und in neue Gruppen zusammengefasst. Dadurch wurde eine Gruppierung der Daten gemäß den geltenden Vorgaben der Strahlenschutzverordnung zu den Lebensmittelgruppen erzielt. Gemäß dem in AP 1 erarbeiteten Konzept wurden neben dem arithmetischen Mittelwert der jährlichen Verzehrsmenge, die Standardabweichung, der Median (P50) und das 95. Perzentil angegeben.

Im Rahmen des Arbeitspaketes 3 (AP 3) „Darstellung der lebensmittelgruppenspezifischen Verzehrsmengen entsprechend der in der Strahlenschutzverordnung vorgegebenen Altersgruppen“ des Forschungsvorhabens war die Umgruppierung der Studiendaten in die Altersgruppen laut Tabelle 1 in Anlage 11 Teil B StrlSchV vorgesehen. Zudem erfolgte je nach Datenlage eine zusätzliche Aufteilung in unterschiedliche Regionen Deutschlands (vorzugsweise Nielseengebiete). Diese Daten wurden

dahingehend analysiert, ob geschlechtsspezifische, altersbedingte, regionale oder bezogen auf den Erhebungszeitraum stark abweichende Verzehrsmengen bei einzelnen Lebensmittelgruppen auftreten und zusammenfassend der Tabelle 1 in Anlage 11 Teil B StrlSchV gegenübergestellt.

Ergebnisse

Zielerreichung

Das Hauptziel, die Aktualisierung der Verzehrsmengen auf der Grundlage von Verzehrsstudien ab dem Jahr 2000, wurde erreicht. Die in den Studien erhobenen Daten wurden gemäß den Vorgaben von Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV umgruppiert. Es konnten alle Datensätze berücksichtigt werden, die vor Projektbeginn eingeplant waren. Für die verschiedenen Verzehrsstudien wurden für alle 6 Altersgruppen die geforderten statistischen Kennzahlen (Mittelwerte und 95. Perzentile) der jährlichen Verzehrsmengen angegeben und es wurden aktualisierte Werte für Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV vorgeschlagen. Eine Übersicht der ermittelten mittleren Verzehrsmengen für die Altersgruppe >17 Jahre im Vergleich zu den Werten der StrlSchV gibt Tabelle 1.

Tabelle 1 *Mittlere jährliche Verzehrsmengen in kg/a für die Lebensmittelgruppen für die Altersgruppe >17 Jahre laut StrlSchV aus der Verzehrsstudie NVS II gegenüber den aktuell gültigen Verzehrsmengen gemäß Tabelle 1 in Anlage 11, Teil B, StrlSchV*

Lebensmittel	StrlSchV (>17 Jahre)	NVS II (17 - 80 Jahre)
Trinkwasser (ohne Mineralwasser)	350	381/ 464*
Muttermilch, Milchfertigprodukte mit Trinkwasser	-	-
Milch, Milchprodukte	130	335
Fisch (und Fischprodukte)	7,5	11
Fleisch, Wurst, Eier	90	65
Getreide, Getreideprodukte	110	84
Einheimisches Frischobst, Obstprodukte, Säfte	35	109
Kartoffeln, Wurzelgemüse, Säfte	55	36
Blattgemüse	13	9
Gemüse, Gemüseprodukte, Säfte	40	52
Nicht erfasste Lebensmittel	-	182

* Mittlere jährliche Trinkwassermengen von 14–80-jährigen Männern/14–80-jährigen Frauen laut Ergebnisbericht der NVS II ohne Mineralwasserverzehr

Methodische Herausforderungen und zeitliche Trends

Die größte Herausforderung in dem Forschungsvorhaben war die methodische Heterogenität der betrachteten Verzehrsstudien. Die Studien unterschieden sich sowohl in der Methodik der Erhebung, der Gruppierung von Altersgruppen, regionaler Gruppierung und Gruppierung der Lebensmittel. Zielführend war es daher, die Umrechnung der unterschiedlichen Lebensmittelgruppen der Studien in die Roheinheiten (Bspw. Käse in Rohmilch) auf identische Weise durchzuführen. Trotz der methodischen Unterschiede bei der Erhebung der Verzehrsgewohnheiten und der unterschiedlichen Zielrichtungen in den einzelnen Verzehrsstudien sind die Ergebnisse für die unterschiedlichen Altersgruppen und Lebensmittelgruppen relativ homogen. Die Auswertung der Verzehrswerten deutscher Verzehrsstudien seit dem Jahr 2000 in den Lebensmittel- und Altersgruppen der Strahlenschutzverordnung zeigte keine Hinweise auf eine generelle Notwendigkeit für eine geschlechtsspezifische oder regionale Einteilung der Verzehrswerte. Zeitliche Trends konnten in einigen Lebensmittelgruppen identifiziert werden. Die Änderungen liegen aber im betreffenden Zeitrahmen in der Regel unterhalb methodisch bedingter Abweichungen zwischen den Studien.

Abweichungen der ermittelten Werten zur StrlSchV

Die Ergebnisse zeigen die höchste Abweichung von der derzeit geltenden Tabelle bei der Verzehrswert von Milch und Milchprodukten. In bestimmten Altersgruppen ist der ermittelte Wert mehr als einen Faktor 2 höher als der Wert in Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV. Im neu berechneten Wert für die Verzehrswert der Gruppe „Milch, Milchprodukte“ führt die Verschneidung verschiedener Milchprodukte bei der Rückrechnung zu Mehrfacherfassungen. So werden aus demselben Liter Rohmilch etwa Butter und andere Produkte hergestellt. In der Rückrechnung auf den Rohmilcheinsatz über alle Milchprodukte konnte dieser Effekt allerdings nicht berücksichtigt werden. Außerdem sind die berücksichtigten Massenverhältnisse von Rohmilcheinsatz zu Nahrungsmittel für z. B. Käse in den aktuellen Studien deutlich höher als die für die Tabelle der Strahlenschutzverordnung angenommenen Faktoren. Diese Ursachen könnten die Abweichung von der Verzehrswert in der derzeit geltenden Tabelle zu einem wesentlichen Teil erklären. Es gibt auch Abweichungen für die Verzehrswerten anderer Nahrungsmittelgruppen. Allerdings ist die Beurteilung und fachliche Umsetzung der Abweichung bei Milch und Milchprodukten aus Sicht der Fachbegleitung die größte Herausforderung.

Schlussbetrachtung

Das BfS wird einen Vorschlag für eine aktualisierte Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV erstellen und diesen Vorschlag mit dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) und mit Gremien wie der Strahlenschutzkommission diskutieren. Darüber hinaus können nun auch detaillierte Angaben zu verschiedenen Fragestellungen bezüglich der Verzehrsmengen gemacht werden, wie beispielsweise geschlechtsspezifische Unterschiede ausfallen, wie verschieden die regionalen Unterschiede im Verzehr sind und wie Trends in einzelnen Lebensmittelgruppen ausschauen.

Modellierung von Hydrodynamik und Stofftransport bei wassergebundenen Transportprozessen im Strahlenschutz unter Berücksichtigung der Freigabe schwach radioaktiver Stoffe

Forschungskennzeichen 3618E03510	Beginn 01.09.2019	Ende 30.11.2022	Fördermittel 202.273,30 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Universität Stuttgart Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung			
Projektleitung Prof. Dr. Bernd Flemisch	Fachbegleitung BfS Dr. Rainer Merk	verantwortlich für den Text Dr. Rainer Merk	

Hintergrund

Die Ausbreitung von konventionellen und radioaktiven Schadstoffen mit Wasserströmungen ist aufgrund der fundamentalen Bedeutung solcher Vorgänge in Wissenschaft, Technik und Umweltschutz seit längerem gut in der Literatur belegt. Am Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) wird die Untersuchung des Radionuklidtransports in porösen Medien, zum Beispiel im Grundwasserleiter, seit geraumer Zeit in den Bereichen Freigabe geringfügig radioaktiver Stoffe, NORM und allgemein in der Radioökologie verfolgt. Hier lag der Schwerpunkt vor allem darauf, die Berechtigung vereinfachender Modellierungsansätze in der Freigabe geringfügig radioaktiver Stoffe zur Beseitigung auf Oberflächendeponien zu prüfen. Diese Stoffe können beispielsweise beim Rückbau der Kernkraftwerke (KKW) nach erfolgter Freigabe anfallen. Die Hydrodynamik von Strömungen in porösen Medien ist in zahlreichen Gebieten von Bedeutung, u. a. in der Bodenphysik, in Geophysik und Hydrologie und im Ingenieurwesen bzw. in Chemie und Verfahrenstechnik. Innerhalb der Mathematik wäre die Fragestellung im weiteren Umfeld der Theorie partieller Differentialgleichungen, typischerweise Derivate der Navier-Stokes-Gleichung und ihrer numerischen Lösungen angesiedelt. Demgemäß ist die Literaturlage, auf der das Projekt aufbaut als gut entwickelt einzustufen.

Zielsetzung

Ausgehend von einer umfangreichen Ermittlung des Standes der Literatur sowie des technischen Standes entsprechender Software zur numerischen Lösung der betreffenden Gleichungen, sollte als Basis für alle weiteren Arbeiten untersucht werden, ob bisher verwendete Ansätze (Darcy-Ansatz mit Modell nach van Genuchten/Mualem) zur Behandlung von Wasserströmungen in porösen Medien auch für den Fall stark heterogener (teil-)poröser Medien (Vorhandensein von Rissen, Klüften, Materialbrocken und Hohlräumen) tragfähig sind. Andernfalls sollte eine hierauf passende Theorie für Wasserströmungen entwickelt und die Lösungsalgorithmen in ein Computerprogramm umgesetzt werden. In einem weiteren Schritt sollten die für die Wasserströmungen gewonnenen Erkenntnisse, mathematischen Modelle und Computerprogramme um den eigentlichen Stofftransport der Radionuklide in heterogenen porösen Medien erweitert werden. Als konkreter Anwendungsfall dienen konventionelle Deponien mit Bauschutt aus dem KKW-Rückbau, in die Regenwasser eindringen kann und somit Radionuklide ausgewaschen werden können und mit der Wasserströmung schließlich auch zum Menschen gelangen könnten.

Methodik

Die Forschungsarbeiten wurden als naturwissenschaftliche Promotion von Herrn Roman Winter mithilfe mathematischer Methoden und Computersimulation an der Universität Stuttgart ausgeführt. Die Simulationsarbeiten beinhalteten Planung, Erstellung und Lauf von Computerprogrammen im Rahmen einer Anwendung der Software DuMux der Universität Stuttgart. Die Rechenergebnisse

wurden dann weiter analysiert und interpretiert. Angewandt wurde aber auch weitere etablierte Software zur Berechnung des Schadstofftransports mit Wasserströmungen in porösen Medien (HYDRUS). Die Forschungstätigkeit war daher rein theoretisch ausgelegt, d. h. im Vorhabenszeitraum noch ohne Laborexperimente. Da in diesem Vorhaben im Rahmen der Vorlauftforschung grundlegende wissenschaftliche Fragestellungen angegangen wurden, die der Weichenstellung in der durch BfS/Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) betreuten bzw. durchgeführten Strahlenschutzforschung für das kommende Jahrzehnt dienen, waren die Arbeiten in eine naturwissenschaftliche Promotion mit Teilaufenthalt des Kandidaten am BfS eingebettet. Am BfS existieren bereits strahlenschutzrelevante Erkenntnisse zu dem bearbeiteten Thema. Die Methodik beinhaltet daher auch einen umfassenden Diskurs des Doktoranden mit dem wissenschaftlichen Personal im BfS, insbesondere mit der Fachbegleitung.

Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse betreffen den Einfluss der porösen und heterogenen Grundstruktur des Modellgebietes (Deponie aus Bauschutt vom KKW-Rückbau) auf die Wasserströmung und den Radionuklidaustrag aus dem Bauschutt durch eindringenden Regen. Berechnet wird dabei letztlich meistens die Radionuklidkonzentration im Grundwasser an einem stromabwärts gelegenen Modellbrunnen. Das ist wichtig, weil an dieser Stelle entnommenes Wasser theoretisch über Trinkwasser und die Nahrungskette zum Menschen gelangen kann. Freigabewerte richten sich u. a. an den dort berechneten Radionuklidkonzentrationen aus. Im Projekt wurden extreme Witterungsbedingungen (Starkregen, Dürre) infolge des Klimawandels mit berücksichtigt. Um solche Extremereignisse mathematisch angemessen abbilden zu können, genügen frühere Ansätze zur Hydrodynamik, wie sie zum Beispiel durch Gutachter, die IAEA (International Atomic Energy Agency) oder auch durch die BfS-Fachbegleitung publiziert wurden, in der Regel nicht mehr. Es könnten sich zum Beispiel bei Starkregen große Luftblasen im Deponiekörper bilden. Auch eine höhere Fließgeschwindigkeit bis hin zum Auftreten von Turbulenz kann die Anwendung klassischer Ansätze, wie die Beschreibung der Wasserströmung durch die Modellansätze nach Darcy und Richards, in Frage stellen. Dieser Themenkomplex wurde im Projekt in ausreichender Tiefe untersucht und die erzielten Ergebnisse in einer Fachzeitschrift publiziert bzw. auf Konferenzen vorgestellt.

Anspruchsvolle Computersimulationen zu Wasser- und Radionuklidtransport in porösen Medien

Die Universität Stuttgart hat zwei vom grundlegenden Darcy-Ansatz abweichende Modelle für Wasserströmungen getestet. Beide sind in der Hydrologie etabliert und mussten nicht entwickelt werden. Die Computersimulationen dazu erfolgten mit der an der Universität Stuttgart entwickelten Software DuMux und waren wesentlich aufwändiger als die ohnehin schon rechenintensiven klassischen Simulationen zum Wasserpfad (mit HYDRUS zum Beispiel). Hierzu wurde ein zweidimensionaler Profilschnitt durch eine stark heterogene und poröse Bauschuttaufschüttung zugrunde gelegt und die Wasserströmung mithilfe der beiden Ansätze simuliert. Diese Simulationen umfassten auch präferentielle Fließwege und größere Materialbrocken, welche den Wasserfluss begünstigen bzw. blockieren können. Ausgangspunkt waren Bauschuttdaten, die für Bauschutt aus einem KKW charakteristisch sind. Einerseits wurde durch explizite Simulation mittels der Differentialgleichungen für eine Zweiphasenströmung (Gas und Flüssigkeit) untersucht, ob sich überhaupt bei höheren Niederschlagsintensitäten größere Luftblasen bilden können. Andererseits wurde mittels der Forchheimer-Gleichung untersucht, wie sich Strömungen verhalten, die Fließgeschwindigkeiten jenseits des Gültigkeitsbereichs der klassischen Beschreibung nach Darcy/Richards aufweisen. Hieran anschließend wurde in verschiedenen Varianten der Modellgeometrie in bis zu drei Dimensionen untersucht, wie sich die hydrodynamischen Ergebnisse auf den Radionuklidtransport aus einer Bauschuttdeponie mit KKW-Bauschutt bis zu einem Modellbrunnen in 500 Metern Entfernung stromabwärts auswirken können.

Einige Forschungsergebnisse in Stichpunkten

Nach Analyse durch die Universität Stuttgart lassen sich aus den Untersuchungen die folgenden Schlüsse ziehen:

- Die Modellerweiterungen zur Wasserströmung ergeben rechenintensive Simulationen und erfordern entsprechend schnelle Computer. Je weiter man von etablierten Modellen zur Wasserströmung abweicht, desto schwieriger wird es, die Modellierung auf ein sicheres Fundament an Werten für die Modellparameter aufzubauen, da diese (noch) nicht sicher ermittelt wurden.
- Es ergaben sich keine Anhaltspunkte für die Ausbildung großer Luftblasen, welche die Strömung substantiell beeinflussen würden. Bei moderat erhöhten Reynoldszahlen gegenüber den Verhältnissen bei einer Darcy-Strömung durch porösen Bauschutt ergeben sich nur geringe Abweichungen von der klassischen Beschreibung der Wasserströmung nach Darcy/Richards. Treten vermehrt präferentielle Fließwege und Makroporen auf, können stärker erhöhte Reynoldszahlen die Folge sein. In solchen Bereichen werden manche Parameterwerte aber immer unsicherer.
- Die Forschungsergebnisse stützen die Sichtweise der Fachbegleitung, dass immer stärker ausgeprägter präferentieller Wasserfluss schließlich dazu führt, dass auch der gewählte erweiterte Modellansatz versagt. Schließlich kann es sogar zu Abrasion von Matrixmaterial kommen und die bisher verwendeten Gleichungen versagen, weil sie unter solchen Bedingungen nicht verwendet werden dürfen. Stattdessen müssten schließlich die Navier-Stokes-Gleichung (Wasserfluss) sowie der Transport von Kolloiden (Radionuklidtransport) simuliert werden.
- Wird zumindest im Grundwasserleiter präferentielle Wasserströmung weitgehend ausgeschlossen, legen die Untersuchungen der Universität Stuttgart nahe, dass der Klimawandel eher zu einem verminderten Radionuklidaustrag aus Bauschuttdeponien führt.

Nach Ansicht der Universität Stuttgart kann gegenwärtig davon ausgegangen werden, dass die früheren Simulationen der Fachbegleitung am BfS (mit HYDRUS) sowie die Modellbetrachtungen in der Empfehlung SR 44 der IAEA ausreichend sind, um den Wasserpfad bei der Freigabe geringfügig radioaktiver Stoffe korrekt zu beschreiben.

Ausblick

Die Ergebnisse dienen der Erfüllung der Ressortaufgaben des BfS in den Bereichen Freigabe geringfügig radioaktiver Stoffe und allgemeine Radioökologie gemäß dem Stand von Wissenschaft und Technik bei der fachlichen Beurteilung wassergebundener Transportprozesse von Radionukliden. Unter anderem werden die Ergebnisse bei der Abschätzung der Strahlenexposition des Menschen infolge der Freigabe direkt umgesetzt. Um eine solche Abschätzung robust durchführen zu können, ist das BfS auf Erkenntnisse nach dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik angewiesen, insbesondere zur Konservativität von verwendeten Modellen, zu ihrer Realitätsnähe und zum vorhandenen Unsicherheitsbudget. Die gewonnenen Erkenntnisse werden voraussichtlich in weiteren Bereichen der Radioökologie Anwendung finden. Zu nennen wären die Untersuchung von Ablagerungen von Material mit erhöhten Gehalten natürlich vorkommender Radionuklide (NORM) auf Halden hinsichtlich Auslaugung und Radionuklidtransport sowie die Migration von Radionukliden in Böden.

Die Ergebnisse werden Fragen zu einer langfristigen Revisionsbedürftigkeit internationaler Empfehlungen zur Freigabe beantworten helfen und aller Voraussicht nach in revidierten Empfehlungen umgesetzt werden können. Künftig kann dies auch das deutsche Regelwerk zur Freigabe beeinflussen und wird insgesamt dazu beitragen, die hohen Strahlenschutzstandards der Bundesrepublik Deutschland auch langfristig zu garantieren.

Die Ergebnisse werden insbesondere dem BMUV dazu dienen, die künftige Revisionsbedürftigkeit der IAEA-Empfehlung SR 44 oder verwandter Empfehlungen besser beurteilen zu können. Die Empfehlung SR 44 ist von unmittelbarer Bedeutung auch für die Ressortaufgaben des BfS, da sie den uneingeschränkten Freigabewerten in der Bundesrepublik Deutschland entsprechend der Richtlinie 2013/59/Euratom zugrunde liegt.

Themenbereich 06 - Notfallschutz

Entwicklung einer Progressiven Web App (PWA) für Mobiltelefone (Smartphones) zur Dosisrekonstruktion und Information der Bevölkerung und der Einsatzkräfte bei einem radiologischen Notfall

Forschungskennzeichen 3621S62510	Beginn 01.02.2022	Ende 31.12.2022	Fördermittel 193.363,10 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer DiaLOGIKa GmbH			
Projektleitung C. Lambert	Fachbegleitung BfS M. Fabry	verantwortlich für den Text C. Lambert Dr. C. Grammes M. Fabry	

Hintergrund

Eine aktuelle Studie zur Krisenkommunikation im radiologischen Notfallschutz (FKZ 3617S62555) stellt fest, dass für den Fall eines Ereignisses mit potentiell akuter Gesundheitsgefahr, insbesondere mobile Apps für die Krisenkommunikation geeignet sind. In Deutschland existieren mehrere Apps, um die Bevölkerung bei Gefahrenlagen zu informieren, z. B. die Warn-App NINA des BBK. Eine spezielle App, die Warnungen, Informationen und gegebenenfalls auch Maßnahmenempfehlungen für die Bevölkerung oder Einsatzkräfte bei einem radiologischen Notfall verteilt, fehlt derzeit.

Im BfS existiert bereits ein operationelles Verfahren zur Dosismessung von betroffenen Einzelpersonen. Die Möglichkeit, Standortdaten von Smartphones für eine präzise individuelle Dosisrekonstruktion heranzuziehen, wird aktuell jedoch nicht genutzt.

Aus dieser Motivation heraus, sollte im vorliegenden Forschungsvorhaben der Prototyp einer betriebssystemunabhängigen Progressiven Web App (PWA) entwickelt werden, die die Bevölkerung im Alltag für Strahlenschutzthemen sensibilisiert, im Notfall warnt und informiert, und die individuelle Dosisrekonstruktion unterstützen kann.

Zielsetzung

Ziel des Projekts war es, die Möglichkeiten und Limitationen der Progressiven Web App Technologie (PWA) für den Einsatz in der Öffentlichkeitsinformation und bei der Unterstützung der Dosisrekonstruktion im radiologischen Notfall zu erkunden. Hierzu wurde ein funktionsfähiger PWA Prototyp entwickelt. Basierend auf den während der Umsetzung gewonnenen Erkenntnissen und weiterer Recherchen sollte zudem ein Konzept für eine PWA zur Information der Einsatzkräfte in radiologischen Notfällen entwickelt werden.

Methodik

Das Projekt bestand aus vier Arbeitspaketen zur technischen Umsetzung der Progressiven Web App und zwei Berichten zu möglichen Weiterentwicklungsoptionen. Im ersten Arbeitspaket wurde die technische Feinkonzeption des PWA-Prototyps erarbeitet. Für die Umsetzung wurden die Open-Source-Frameworks Vue.js und Spring Boot gewählt. Im zweiten Arbeitspaket wurde die rudimentäre App-Struktur aufgebaut und Daten des vorhandenen IMIS-Geoportals als Kartenkomponenten eingebunden. Anschließend wurde die Logik zur Aufzeichnung von Bewegungsprofilen für die Dosisrekonstruktion umgesetzt. In Arbeitspaket Nummer vier wurden MoWaS-Warnmeldungen sowie filterbare Pushbenachrichtigungen bei Meldungseingang implementiert. Nach Abschluss der technischen Umsetzungen wurden in einem Bericht die Voraussetzungen für eine mögliche Weiterentwicklung des Prototyps zur Marktreife zusammengetragen. Basierend auf den Ergebnissen

der technischen Umsetzung und weiterer Recherchen wurde zudem ein Konzept für eine mögliche Weiterentwicklung des Prototyps zu einer PWA für Einsatzkräfte erstellt.

Ergebnisse

Der entwickelte Progressive Web App Prototyp beinhaltet eine Anzeige einer interaktiven Karte mit Daten aus dem IMIS-Geoportal, eine Anzeige von Warnmeldungen aus dem MoWaS, Pushbenachrichtigungsoptionen, Artikel mit allgemeinverständlichen Informationen über Radioaktivität, eine Möglichkeit zur Aufzeichnung, Speicherung und Editierung von Bewegungsprofilen für die Dosisrekonstruktion und eine Onlinehilfe. Somit konnten alle vorgesehenen Inhaltstypen und Funktionalitäten grundsätzlich mit der PWA umgesetzt werden. Die App-Inhalte wurden auf verschiedenen Bildschirmgrößen korrekt dargestellt. Die PWA konnte auf verschiedenen Smartphone-Betriebssystemen (und ohne App-Store) unkompliziert installiert werden. Die für die Offline-Nutzung vorgesehenen Inhalte standen nach der PWA-Installation auch ohne Internetverbindung zur Verfügung. Limitationen zeigten sich in zwei Bereichen: 1. Pushbenachrichtigungen für Progressive Web Apps wurden zum Zeitpunkt des Forschungsvorhabens auf iOS-Geräten nicht unterstützt. (Die Funktionalität wird jedoch bereits ab dem Jahr 2023 zur Verfügung stehen.) 2. Die Aufzeichnung der Bewegungsprofile funktionierte nur, wenn die PWA im Vordergrund ausgeführt wurde, was bedeutet, dass das Smartphone während der Aufzeichnung nicht für andere Aufgaben verwendet werden konnte.

Der Bericht über Weiterentwicklungsoptionen zu einer PWA für Einsatzkräfte schlägt insbesondere eine Erweiterung um Kommunikationsmöglichkeiten vor, sodass Informationen nicht nur - wie im aktuellen Modell - in eine Richtung weitergegeben, sondern auch unter den Einsatzkräften ausgetauscht werden können.

Schlussbetrachtung

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens legen nahe, dass eine Progressive Web App auf der Basis von Open-Source-Software aus technischer Sicht ein geeignetes Werkzeug zur Information und Warnung der Bevölkerung wäre, da vielfältige Inhalte vermittelt und responsiv dargestellt werden können, die Hürden zur Installation niedrig sind und Inhalte den Nutzern auch offline zur Verfügung stehen. Zu klären wäre, ob eine solche App für radiologische Notfälle vor dem bestehenden Markt an Warn-Apps von der Bevölkerung angenommen würde. In Bezug auf die Aufzeichnung von Bewegungsprofilen zur Unterstützung der Dosisrekonstruktion stellt die oben genannte Tatsache, dass die Ausführung nur im Vordergrund möglich ist, eine deutliche Einschränkung in der Benutzerfreundlichkeit dar, die vor einer Markteinführung unbedingt zu lösen wäre. Da man diesbezüglich von Entwicklungen auf Seiten der Betriebssystemhersteller abhängig ist, kann nur bedingt Einfluss genommen werden. Die vielversprechenden Ergebnisse des Prototyps zeigen jedoch, dass es sich lohnt, die technologischen Entwicklungen im Bereich Progressive Web App genau zu verfolgen.

Themenbereich 07 - Allgemeine und Gesellschaftliche Aspekte des Strahlenschutzes

Durchführung einer repräsentativen Erhebung im Jahr 2021 mit dem Titel „Was denkt Deutschland über Strahlung? Umfrage 2021“

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3621S72210	01.10.2021	30.06.2022	155.771,00 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer GIM Gesellschaft für Innovative Marktforschung Heidelberg			
Projektleitung Dr. Tomas Jerković, Alexandra Wachenfeld-Schell	Fachbegleitung BfS Christiane Pölzl-Viol	verantwortlich für den Text Dr. Tomas Jerković Alexandra Wachenfeld-Schell	

Zielsetzung

Als übergeordnete operative Ziele gelten für die zuständigen Behörden, das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) und das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), die Information der Bevölkerung über Strahlenwirkungen und Strahlenrisiken sowie über das richtige Strahlenschutzverhalten.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die allgemeine gesellschaftliche Verankerung von Strahlung und Strahlenschutz, die Wahrnehmungen, Kenntnisse und Informationsbedürfnisse der Bevölkerung in Deutschland zu erheben.

Um diese operativen Ziele mittels empirischer Erkenntnisse zu erreichen, wurde eine mehrphasige sozialwissenschaftliche Studie initiiert. Forscherische Ziele und Fragestellungen waren:

- Wissen und Wahrnehmung zu Strahlung allgemein
- Risikowahrnehmung von Strahlung
- Strahlenschutzverhalten bzw. -absicht
- Informationsverhalten und -bedarf
- Wahrnehmung des BfS sowie Erwartungen an Informationsmaßnahmen

Einzelzielsetzung

Zur Erreichung der Zielsetzungen wurden zwei Arbeitspakete (AP) in Auftrag gegeben, die jeweils individuelle, aber aufeinander aufbauende Zielsetzungen verfolgten.

AP 1: Qualitative Erhebung

Im Fokus der qualitativen Exploration standen die generelle Wahrnehmung über den Stellenwert von Strahlung, die Risikowahrnehmung zu unterschiedlichen Strahlenschutzthemen, das Wissen über Schutzverhalten und Schutzlogiken sowie die Nutzung relevanter Informationskanäle zum Thema Strahlung. Es wurde eine Kombination aus Gruppendiskussionen und Einzelinterviews gewählt, um sowohl die individuelle als auch die kollektive Perspektive im Kontext Strahlung und Strahlenschutz zu ermitteln. Mithilfe der qualitativen Erhebung konnten ferner Hypothesen für die nachfolgende quantitative Befragung gewonnen werden, um damit auch die Methodik der quantitativen Vorgängerstudie aus dem Jahr 2019 weiter zu optimieren.

AP 2: Quantitative Erhebung

Ziele des quantitativen Teils der Studie war es, zum einen die Ergebnisse aus der qualitativen Untersuchung einzubinden und quantitativ zu untersuchen, um repräsentative Aussagen zum Kenntnisstand, der Risikowahrnehmung und dem Schutzempfinden in der Bevölkerung ableiten zu

können. Zum anderen galt es, die Ergebnisse im Sinne eines Zeitreihenvergleichs mit den Ergebnissen aus der Vorgängerstudie, die 2019 durchgeführt wurde, in Beziehung zu setzen.

Methodik

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde ein Forschungsdesign in zwei Schritten gewählt: Auf eine qualitative Primärdatenerhebung folgt eine quantitative Primärdatenerhebung.

AP 1: Qualitative Erhebung

Um den kollektiven Diskurs rund um Strahlung nachzuvollziehen, wurden zunächst zwei Gruppendiskussionen von je 2,5 Stunden Dauer in einem Face-to-Face-Setting im Studio durchgeführt. Zusätzlich wurden in den Gruppen Fachbegriffe aus dem Bereich Strahlung genauer untersucht.

In einem zweiten Schritt wurden insgesamt 40 Einzelinterviews von je einer Stunde Dauer durchgeführt.

In diesen face-to-face Interviews wurde die individuelle Perspektive auf Strahlung und Strahlenschutz erforscht und besonders individuelle Themen wie Barrieren, Motive, Ängste, individuelles Wissen und (Fehl-)Konzeptionen sowie der individuelle Umgang mit Risiken vertiefend diskutiert.

AP 2: Quantitative Erhebung

Um einen bevölkerungsrepräsentativen Querschnitt der deutschsprachigen Wohnbevölkerung ab 16 Jahren zu befragen, wurden insgesamt $n = 2000$ Telefoninterviews auf Basis einer Dual Frame Stichprobe (kombinierte Festnetz- und Mobilfunkstichprobe) durchgeführt. Die durchschnittliche Interviewdauer betrug dabei 27 Minuten. Vor der Hauptfeldphase wurde ein Pre-Test mit $N = 30$ Interviews durchgeführt.

Durchführung

AP 1: Qualitative Erhebung

Die qualitative Erhebung wurde Ende 2020 / Anfang 2021 in einem Face-to-Face-Setting in Teststudios durchgeführt. Am 18.11.2021 erfolgte der Pre-Test.

In einem ersten Schritt wurden am 25.11.2021 zwei Gruppendiskussionen in Mannheim durchgeführt. In einem zweiten Schritt fanden vom 13.01. bis 21.01.2022 an vier Erhebungsorten (Mannheim, München, Erfurt, Berlin) insgesamt 40 Einzelinterviews von je einer Stunde statt. Am 26.01.2022 erfolgte das Debriefing aller beteiligten Interviewer, bei dem auch die beiden Studienleiterinnen für die repräsentative Bevölkerungsbefragung von AP 2 sowie das BfS anwesend waren. Ein Zwischenbericht wurde im März 2022 bereitgestellt.

AP 2: Quantitative Erhebung

Um vor allem auf Basis qualitativer Erkenntnisse neu entwickelte Fragebogenbereiche auf seine Verständlichkeit zu überprüfen, wurde im Vorfeld der Haupterhebung ein Pretest durchgeführt. Hierfür wurden 30 Telefoninterviews in der Zeit vom 24.03. bis 28.03.2022 geführt. Um eine Verzerrung durch verschiedene Alltags- und Lebensroutinen der Befragten zu minimieren, wurden die Interviews in der Zeit zwischen 16:30 und 21:00 Uhr geführt, so dass auch die meisten Erwerbstätigen erreicht werden konnten.

Die Erkenntnisse wurden im Pretest-Bericht dokumentiert und ein Vorschlag zur Straffung des Erhebungsinstruments mit dem Auftraggeber abgestimmt.

Die Hauptbefragung wurde in der Zeit vom 06.04. bis 05.05.2022 durchgeführt. Insgesamt konnten hier 2 000 Interviews mit einer durchschnittlichen Befragungslänge von rund 27 Minuten realisiert werden.

Da es bei Primärerhebungen im Laufe des Erhebungsprozesses aufgrund von Interviewausfällen (Verweigerungen, Zielperson konnte im Erhebungszeitraum nicht erreicht werden, etc.) zu leichten Schiefen in der Abbildung soziodemographischer Verteilungen kommen kann, wurden die Daten nach der Feldphase einer Design- und Redressmentgewichtung unterzogen. Als Referenzdaten für die demografische und soziostrukturelle Verteilungen wurde der aktuelle Mikrozensus herangezogen.

Ergebnisse

Die Menschen fühlen sich durch staatliche Institutionen bei Strahlung besser informiert und geschützt als noch 2019. Dabei sind die bekanntesten staatlichen Institutionen im Bereich Strahlenschutz das BMUV (Werte jeweils gestützt; 83 %), das BfS (71 %) und die Internationale Atomenergiebehörde (IAEA; 68 %). Die qualitativen Gespräche zeigen, dass das Bundesamt für Strahlenschutz ein inhaltlich nachvollziehbarer Absender ist, dem als öffentliche Behörde und aufgrund seines Namens hohe Sachkompetenz und hohe Glaubwürdigkeit zugeschrieben wird. Spontan würden sich, im Falle eines nuklearen Unfalls, rund 13 % der Befragten beim BfS informieren, 66 % geben ganz allgemein das Internet an.

Die qualitativen Ergebnisse zeigen ein sehr heterogenes Ergebnisspektrum bei Beantwortung der Frage: „Was denkt Deutschland über Strahlung?“. Wissen, Bewertungen und assoziierte Emotionen streuen sehr stark nicht nur zwischen den Befragten, sondern auch bei einzelnen Individuen, wenn es um den Vergleich von Strahlenschutzthemen geht. Diese Heterogenität lässt sich qualitativ anhand einer Reihe von Faktoren erklären. Diese sind: Informiertheit, Betroffenheit, Risikoaffinität, Vertrauen in staatliche Institutionen, allgemeine Lebenseinstellung, Geschlecht, geographische Nähe zu potenziellen Strahlungsquellen, Kontrollierbarkeit der Exposition, Kosten-Nutzen-Analyse, Wahrnehmbarkeit der Strahlung, Wissen um Schutzmaßnahmen sowie mediale Präsenz des jeweiligen Strahlenthemas. Auch in der quantitativen Untersuchung zeigt sich, dass vor allem abhängig von Informiertheit, Geschlecht und Alter unterschiedliche Wahrnehmungen beim Thema Strahlung vorhanden sind. Daneben wurde untersucht, wieviel Kontakt die Befragten mit der betreffenden Strahlungsart haben, inwieweit man sich selbst schützen kann bzw. inwiefern sich die Befragten durch staatliche Institutionen vor der betreffenden Strahlungsart geschützt fühlen.

Aus Sicht der Bürger*innen gibt es bekanntere bzw. präsentere Strahlenschutzthemen (z. B. UV-Strahlung, Radioaktivität, Röntgen- und Mobilfunkstrahlung, Elektrosmog, Mikrowellenstrahlung) sowie weniger bekannte bzw. präsente (z. B. Laserstrahlung, Infrarotstrahlung, Hochspannungsleitungen, „Erdstrahlung“, atmosphärische Strahlung, Satellitenstrahlung und Radon). Die qualitative Erhebung hat gezeigt, dass Bürger*innen Strahlung in ihren jeweiligen Lebenskontexten und Anwendungsfeldern wahrnehmen und verorten: Begriffe wie „optische Strahlung“ und „ionisierende Strahlung“ sind unbekannt und entsprechen weder der Wahrnehmung noch der Denkkategorie der Bürger*innen.

Hinsichtlich der Assoziationen im Kontext Strahlung werden in der quantitativen Studie am häufigsten Radioaktivität bzw. Atomwaffen genannt. Der Krieg in der Ukraine hat die Bedeutung des radiologischen Notfallschutzes wieder stärker in das Bewusstsein der Bevölkerung gerückt. Viele Menschen kennen im Falle eines nuklearen Unfalls keine Anlaufstelle für Informationen oder wüssten nicht, was zu tun wäre.

Neben Radioaktivität folgen sehr häufig Assoziationen im Zusammenhang mit Mobilfunk: Immer mehr Menschen verbinden den Mobilfunk mit dem Begriff „Strahlung“. Die Mehrheit der Befragten geht davon aus, dass sie hier viel Kontakt hat und man sich eher nicht gut schützen könne. Dennoch beunruhigt das Thema Mobilfunkstrahlung eher weniger (19 % Top2-Box).

Daneben wird auch UV-Strahlung / Sonnenstrahlung spontan sehr häufig mit dem Begriff „Strahlung“ in Verbindung gebracht. Insgesamt gibt nur rund ein Drittel der Befragten an, besorgt wegen der UV-Strahlung zu sein – was auch damit zusammenhängen könnte, dass nur rund ein Drittel der Befragten

denkt, hier viel Kontakt zu haben. In Bezug auf den Selbstschutz gehen rund zwei Drittel davon aus, dass man sich gut selbst vor dieser Strahlungsart schützen kann. Die häufigsten Maßnahmen, die hier mehrheitlich ergriffen werden, sind Sonnenschutzcreme / -spray zu verwenden, langen Aufenthalt in der Sonne zu vermeiden und eine entsprechend geeignete Sonnenbrille zu tragen. Das Risiko durch UV-Strahlung sowie mögliche Schutzmaßnahmen sind allgemein bekannt, allerdings wird oft nicht danach gehandelt. Immerhin geben 75 % der Befragten an, mindestens eine Maßnahme zum Schutz vor UV-Strahlung „immer“ anzuwenden. Außerdem ist das Schutzgefühl durch staatliche Institutionen eher hoch ausgeprägt: 56 % der Befragten geben an, sich vor UV-Strahlung mehrheitlich (sehr) gut durch staatliche Institutionen geschützt zu fühlen, während dies für rund 37 % (eher) nicht zutrifft. Die qualitativen Interviews zeigen in diesem Zusammenhang deutlich, dass Fehlkonzeptionen vorhanden sind (z. B. vorgebräunte Haut benötige keinen UV-Schutz) und dass persönliche Einstellungen (wie z. B. gebräunte Haut ist attraktiv, man sieht gesund aus) dem Ergreifen von Schutzmaßnahmen entgegenstehen, so dass hier ein Aufklärungsbedarf festzustellen ist – wenngleich der geäußerte Wunsch nach mehr Informationen niedrig ausgeprägt ist.

Daneben gibt es auch Themen im Bereich Strahlung, bei denen weniger Besorgnis besteht und auch weniger Möglichkeiten gesehen werden, sich selbst zu schützen, nämlich die Strahlung im medizinischen Bereich, Strahlung durch Hochspannungsleitungen und Strahlung beim Fliegen. Auch ist hier das Interesse an weiteren Informationen im Vergleich zu den anderen Strahlenschutzthemen am niedrigsten ausgeprägt. Strahlung im Bereich der Medizin wird eher selten bei den spontanen Assoziationen genannt. Rund 70 % der Befragten denken, dass sie hier (eher) wenig Kontakt haben. Allerdings genießt der Strahlenschutz in der Medizin sehr großes Vertrauen: Über 80 % der Befragten fühlen sich hier (sehr) gut durch staatliche Institutionen geschützt – mit deutlichem Abstand zu allen anderen Strahlenschutzthemen.

Die qualitative Auseinandersetzung zeigt, dass die Wahrnehmung der Notwendigkeit von Schutz und Schutzmaßnahmen von einer Reihe von Faktoren abhängig ist, die je nach Strahlenart unterschiedlich bewertet werden. Diese Faktoren ergeben sich aus den erklärenden Faktoren für Risikowahrnehmung und sind: Persönliche Betroffenheit / Erfahrung, Kosten-Nutzen-Abwägungen, Wissen um Strahlenschutzthemen an sich, Wissen um und Verfügbarkeit von Schutzmaßnahmen sowie Aufwand bei der Umsetzbarkeit und Tragweite der antizipierten Konsequenzen. Zu den Themen, bei denen eine hohe Notwendigkeit von Schutz empfunden wird, zählen Radioaktivität, Röntgenstrahlung, Laserstrahlung und Hochspannungsleitungen.

Dass vor allem mit Blick auf Röntgenstrahlung und Hochspannungsleitungen die Besorgnis in der Bevölkerung auf niedrigem Niveau liegt, ist – wie gezeigt werden konnte – auch auf das Schutzempfinden durch staatliche Institutionen zurückzuführen.

Zu den Themen, bei denen die Notwendigkeit von Schutz als (sehr) niedrig empfunden wird zählen Mikrowellen-, Infrarot, Erd-, atmosphärische und Satellitenstrahlung. Darüber hinaus gibt es Strahlenschutzthemen, bei denen die empfundene Schutznotwendigkeit polarisiert bzw. je nach Kontext variiert. Dies sind UV-Strahlung und Mobilfunkstrahlung. Hierbei zeigt sich, dass die beiden Strahlungsarten, vielleicht bedingt durch ihre kontinuierliche Präsenz im Alltag, dann doch zu einer relativ niedrigen Besorgnis in der Bevölkerung führen.

Das Informationsverhalten in Bezug auf Strahlung verläuft meist passiv. In der Regel besteht kein Informationsinteresse und -bedürfnis, insbesondere bei Strahlenarten, die weder als besonders riskant noch als besonders relevant für den eigenen Alltag erlebt werden oder die als „etablierte“ Strahlenschutzthemen als lang bekannt gelten mit ihren jeweiligen Risiken. Punktuell kann das Informationsinteresse jedoch durch Anstöße von außen geweckt werden. Das passiert insbesondere, wenn ein Strahlenthema unmittelbare Relevanz für den Alltag der Personen hat oder durch gesellschaftliche und politische Veränderungen eine starke Aufmerksamkeit erfährt. Dies ist im Zusammenhang mit dem Ukrainekrieg und der damit diskutierten Möglichkeit eines Atomkriegs oder

dem Angriff auf Atomkraftwerke der Fall. In diesem Kontext werden die allgemeinen Gefahren im Zusammenhang mit Radioaktivität und Kernenergie verstärkt wahrgenommen.

Die qualitativen Gespräche haben zudem gezeigt, dass im Vergleich der verschiedenen Strahlenschutzthemen ein Informationsbedürfnis vor allem in Bezug auf das Thema Mobilfunkstrahlung im Allgemeinen sowie 5G im Speziellen besteht, da hier die meisten Unsicherheiten festzustellen waren. In der Bevölkerung entspricht dies gut rund 59 %, die sich zum Thema Strahlung von Mobiltelefonen bereits informiert haben und rund 13 %, die weitere Informationen wünschen. Weitere Themenbereiche, zu denen sich viele Bürger*innen bereits informiert haben und sich zum Teil auch weitere Informationen wünschen, sind UV-Strahlung und Röntgenstrahlung beim Arzt / Zahnarzt. Demgegenüber liegt das Informationsbedürfnis bei den Themen Hochspannungsleitungen, Mobilfunkmasten und Fliegen in der repräsentativen Umfrage auf einem insgesamt niedrigeren Niveau.

Umsetzung der Ergebnisse

Die Ergebnisse dienen dem BMUV und dem BfS als Erkenntnisgewinn über den Stellenwert von Strahlung und Strahlenschutz in Deutschland. Sie bilden damit eine Grundlage der kontinuierlichen Verbesserung der Risikokommunikation und Öffentlichkeitsarbeit. Des Weiteren dienen sie den Facheinheiten des BfS als Orientierung, wie die Bevölkerung zu den jeweiligen Strahlenthemen steht.

Themenbereich 08 - Elektromagnetische Felder

Machbarkeitsstudie eines auf Smartphone-Apps beruhenden Hochfrequenz-Messnetzwerkes zur Abschätzung der Exposition der Bevölkerung mit elektromagnetischen Feldern des Mobilfunks

Forschungskennzeichen 3619S82468	Beginn 01.12.2019	Ende 31.05.2022	Fördermittel 298.133,32 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Institut für Hochfrequenztechnik, RWTH Aachen University			
Projektleitung Prof. Dr. D. Heberling	Fachbegleitung BfS Dr. J. Kuhne	verantwortlich für den Text S. Schießl	

Hintergrund

Die Realisierung eines flächendeckenden und kontinuierlichen Immissionsmonitorings elektromagnetischer Felder ist aufgrund des mit herkömmlichen Methoden verbundenen Aufwands nicht möglich. Für den Bereich des Mobilfunks könnte ein crowdsourcingbasierter Ansatz, der auf die Erhebung von Messdaten mittels gewöhnlicher Smartphones setzt, Abhilfe schaffen.

Zielsetzung

Das vorliegende Vorhaben hat daher die technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit dieses Ansatzes untersucht. Konkret sollte die Frage geklärt werden, ob die von vielen Endgeräten gemessenen Signalstärkeindikatoren ein repräsentatives Bild der Exposition über das gesamte genutzte Mobilfunkspektrum zeichnen können.

Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik (AP 1)

Als Grundlage zur Bearbeitung des Projekts war der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik zusammenzustellen und aufzubereiten. Schwerpunkte waren hierbei die Signalstärkeindikatoren der Mobilfunkstandards und deren Bezug zu den Messgrößen der Immissionsmesstechnik, die Verfügbarkeit der relevanten Informationen zur Immissionsabschätzung im Android-Betriebssystem sowie bestehende Arbeiten im Bereich des Vorhabens.

Beantwortung der Fragestellung: Welche Messgenauigkeit ist bei Nutzung von Endgeräte-internen Feldstärke-Proxies realistisch erreichbar? (AP 2)

Eine zentrale Fragestellung für die beabsichtigte Nutzung von Smartphone-Messwerten zur Immissionsabschätzung ist die Umrechnung von den aufgezeichneten Metriken in Feldstärkewerte. Daher wurde der Zusammenhang zwischen den im Android-Betriebssystem zugänglichen Signalstärkeindikatoren von Smartphones und der zugrundeliegenden Feldstärke bzw. Immission untersucht. Hierfür sollte die unter realistischen Bedingungen erreichbare Feldstärkemessgenauigkeit ermittelt, Einflussgrößen auf diese bestimmt und die Stärke der Einflüsse analysiert werden.

Beantwortung der Fragestellung: Welche Genauigkeit kann durch Einbeziehung weiterer für ein Messnetzwerk generell zugänglicher Informationen erreicht werden? (AP 3)

Der Einfluss der Vergrößerung der Datenbasis durch die Einbeziehung der erfassten Daten vieler Smartphones auf die Genauigkeit der Feldstärkeerfassung war zu bestimmen. Geeignete Maßnahmen zur Erhöhung der Genauigkeit der Feldstärkeermittlung waren zu erarbeiten, exemplarisch umzusetzen und unter realistischen Bedingungen zu validieren.

Bewertung der Eignung des Konzepts „Smartphone-basiertes Messnetzwerk“ zur quantitativen Erfassung der Exposition der Allgemeinbevölkerung mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern des Mobilfunks (AP 4)

Abschließend sollte die Fragestellung, ob sich ein Smartphone-basiertes Messnetzwerk zur zuverlässigen repräsentativen Erfassung der Exposition der Allgemeinbevölkerung mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern des Mobilfunks eignet, nachvollziehbar und objektiv beantwortet werden. Vorteile und Schwachstellen waren zu identifizieren und abzuwägen. Der Implementierungsaufwand eines derartigen Systems war außerdem abzuschätzen.

Methodik

Der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik wurde anhand einer Literaturstudie in einschlägigen Datenbanken und durch Internetrecherche zusammengetragen und in einem Bericht aufgearbeitet. Die Literaturstudie wurde unter Zuhilfenahme einer Literaturverwaltungssoftware durchgeführt. Die Quellen wurden kategorisiert und thematisch zusammenhängend ausgewertet und die Erkenntnisse in einem Zwischenbericht dokumentiert.

Der Zusammenhang der Signalstärkeindikatoren von Smartphones und der vorherrschenden Exposition wurde anhand von Labor- und Feldmessungen untersucht, um daraus Umrechnungsfaktoren in Feldstärkewerte und deren typische Schwankungsbreiten abzuleiten. Labormessungen erlaubten dabei die Untersuchung unter kontrollierbaren Bedingungen und in Signalpegelbereichen, die im freien Feld nur selten anzutreffen sind, während Messungen im freien Feld Untersuchungen unter typischen Ausbreitungsbedingungen ermöglichten. Vor allem für die Feldmessungen kam eine speziell für diesen Zweck vom Projektnehmer entwickelte Smartphone-App zur Erfassung der Messdaten aus dem Android-Betriebssystem zum Einsatz. Für die Labormessungen wurden geeignete Messaufbauten definiert und Messskripte zur Steuerung des Messablaufs und Abspeicherung der Messdaten programmiert. Die Messreihe mit insgesamt 40 Smartphones wurde abgeschlossen und die Messdaten ausgewertet. Zur Durchführung der Messungen im freien Feld wurden geeignete Messpunkte ausgewählt und ein entsprechender Messablauf festgelegt. Zur optimalen Unterstützung der Messreihe wurde die vorhandene Smartphone-App weiterentwickelt und auf die durchzuführende Messreihe angepasst. Auch diese Messreihe wurde ausgeführt und ausgewertet.

Die für die Untersuchung des Einflusses der Vergrößerung der Datenbasis benötigten Datenpakete wurden beschafft und einer gründlichen Plausibilitätsprüfung unterzogen. Unvollständige, unplausible und unzuverlässige Einträge wurden vor der weiteren Verarbeitung aussortiert.

Der Einfluss der Vergrößerung der Datenbasis wurde anhand zweier durch ein existierendes Crowdsourcingnetzwerk erhobene Datenpakete analysiert. Eines wurde über den Zeitraum eines Jahres im Großraum München erhoben und eines über die Dauer eines Monats im Stadtgebiet Aachen. Die erarbeiteten Auswertungsmethoden wurden anschließend angewendet, um einen Vergleich mit Feldstärkemessungen aus dem Erhebungszeitraum in den Untersuchungsgebieten vorzunehmen. Die Ableitung von Immissionswerten wurde mithilfe der zuvor bestimmten Umrechnungsfaktoren und geeigneten Interpolationsverfahren vorgenommen, sodass geschätzte Immissionskarten für das Untersuchungsgebiet erstellt werden konnten. Die Messungen zur Validierung der Ergebnisse wurden mit einem Feldstärkemessgerät durchgeführt und die Werte denjenigen aus der Immissionsabschätzung aus den Smartphone-Daten gegenübergestellt.

Ergebnisse

Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik

Die Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik hat gezeigt, dass in den Mobilfunkstandards von den Endgeräten auszuführende Messungen definiert sind, deren

Messgrößen in direktem Zusammenhang mit der Immission stehen. Die in der Immissionsmesstechnik gebräuchlichen codeselektiven Messmethoden basieren auf der Extraktion der gleichen Signalanteile, wie sie von den Smartphones genutzt werden. Ein Abgleich mit der Android-Dokumentation und die praktische Umsetzung einer für die Untersuchungen der Studie genutzten App machte deutlich, dass die wichtigsten Messgrößen und Informationen zur Funkzelle über entsprechende Schnittstellen innerhalb des Betriebssystems Android erhalten werden können. Diese ermöglichen eine Abschätzung der Maximalimmission des Downlinks, die unter Volllast der Funkzellen auftritt, nicht jedoch der Momentanimmission und des Beitrages des Uplinks zur Exposition. Allerdings sind für bestimmte Parameter der Extrapolation pauschale Annahmen zu treffen, da die entsprechenden Informationen nicht aus den Smartphone-Aufzeichnungen zu erhalten sind. Weiterhin verdeutlicht die Literaturstudie, dass die Fragestellung dieser Studie zuvor nicht ausreichend beantwortet wurde, da weder der Zusammenhang zwischen den Signalstärkeindikatoren von Smartphones und der elektrischen Feldstärke eingehend untersucht wurde noch der Ansatz des Crowdsourcings in diesem Kontext unter realistischen Bedingungen verfolgt worden ist. Beides wurde in der vorliegenden Studie vorgenommen.

Beantwortung der Fragestellung: Welche Messgenauigkeit ist bei Nutzung von Endgeräte-internen Feldstärke-Proxies realistisch erreichbar? (AP 2)

Die im Rahmen der Studie durchgeführten Untersuchungen der Messeigenschaften von Smartphones beinhalteten die Beobachtung des Verhaltens bei starken Signalpegelsprüngen und die Ermittlung von Aktualisierungsraten der Messwerte. Es konnte demonstriert werden, dass Signalpegeländerungen so zügig verfolgt werden, dass auch für den Fall eines bewegten Endgeräts verlässliche Messwerte der am Ort vorliegenden Signalstärke erhalten werden, vorausgesetzt, dass die GPS-Daten ausreichend genau aufgezeichnet werden. Durch weitere Messungen wurde verifiziert, dass die Messungen der Signalstärken auch durch starke Signale bei Frequenzen in unmittelbarer Nachbarschaft zum genutzten Frequenzkanal nicht beeinflusst werden, solange die Störungen außerhalb der jeweiligen Signalbandbreite des Mobilfunkkanals liegen. Labormessungen zur Überprüfung der Wertebereiche und Limits ergaben, dass sämtliche Signalpegel in 1 dB-Schritten über den gesamten im Standard vorgegebenen Wertebereich vom Smartphone-Modem erfasst und an die Basisstation gemeldet werden können. Die Erfahrungen bei der Verwendung des Datenzugriffs über Android haben jedoch für UMTS und GSM ergeben, dass die Signalstärken über die API nur in Schritten von 2 dB ausgegeben werden. Außerdem wird der obere Wertebereich bei -51 dBm abgeschnitten, obwohl dieser eigentlich bis -48 dBm (GSM) bzw. -24 dBm (UMTS) reicht. Dies bedeutet, dass bei hohen Feldstärken eine nicht kompensierbare Unterschätzung durch den Verlust der höheren Werte der Signalstärkeskala auftritt.

Bei den Messungen zur Ermittlung von Umrechnungsfaktoren von Signal- in Feldstärkewerte konnte ein linearer Zusammenhang zwischen der gemessenen Signalstärke der Smartphones und den vorliegenden Feldstärken festgestellt werden. Trotz einzelner Sprünge im linearen Verlauf unter Laborbedingungen wurde im freien Feld ein monotoner Zusammenhang festgestellt. Die ermittelten Umrechnungsfaktoren stiegen tendenziell mit zunehmender Kanalfrequenz. Die Schwankungsbreite der Umrechnungsfaktoren über die verschiedenen untersuchten Smartphones hinweg lag bei den Messungen im freien Feld abhängig vom Frequenzband und Funkdienst zwischen etwa 5 bis 8 dB. Es erscheint daher sinnvoll mögliche pauschale Faktoren für alle Smartphones eines Messnetzwerks anzuwenden. Eine Bestimmung von Umrechnungsfaktoren für jedes Smartphone-Modell, welches an der Datenerhebung in einem Messnetzwerk teilnimmt, scheidet aufgrund der Vielzahl der Geräte und des damit verbundenen Aufwands aus.

In den Labormessungen offenbarte sich für den Fall eines aus nur einer einzigen Richtung einfallenden Signals eine starke Richtungsabhängigkeit des Signalstärkemesswerts. Diese erwies sich jedoch bei ähnlichen Untersuchungen unter Freifeldbedingungen, wo durch Mehrwegeausbreitung

das Signal aus mehreren Richtungen gleichzeitig beim Endgerät eintrifft, als erheblich schwächer. Ähnlich, wenn auch nicht im gleichen Ausmaß, fiel die Dämpfung durch den Nutzereinfluss in den Labormessungen größer aus als im freien Feld. Insgesamt konnte aus den verschiedenen durchgeführten Messungen eine erweiterte Messunsicherheit für die Bestimmung der elektrischen Feldstärke aus einer einzelnen Smartphone-Signalstärkemessung von 16,7 dB abgeschätzt werden.

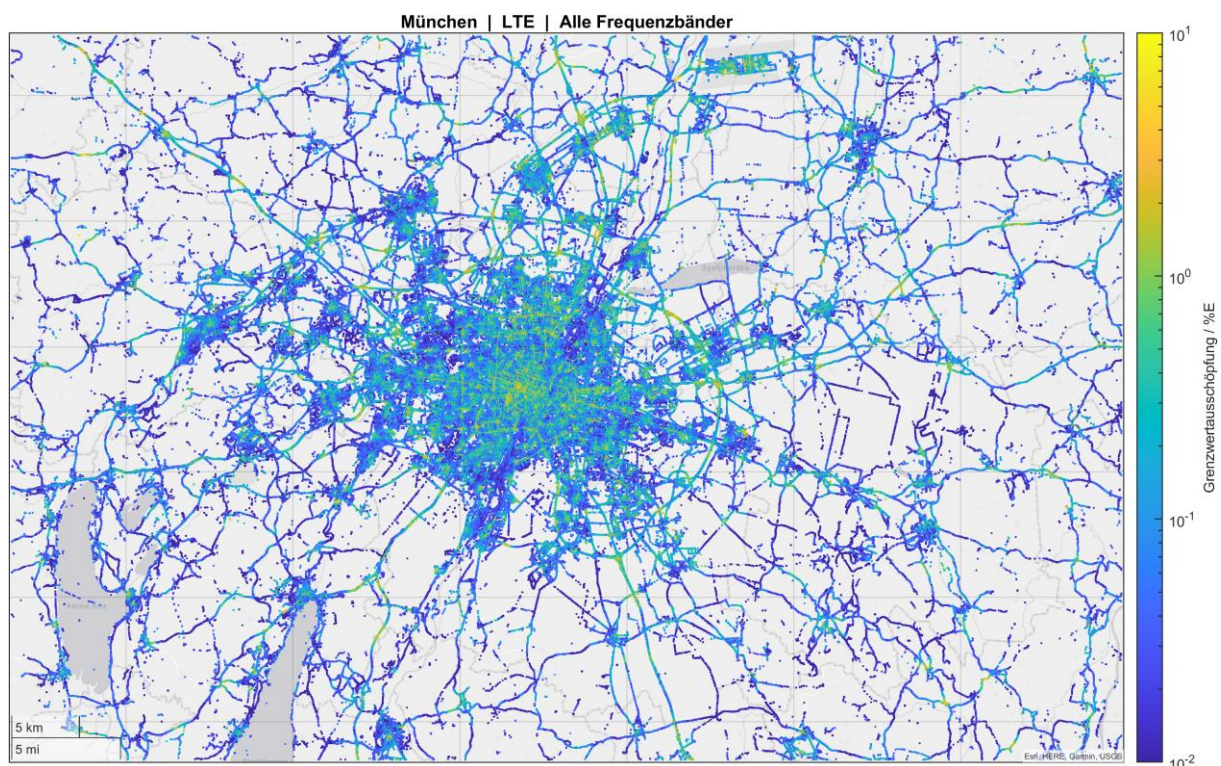
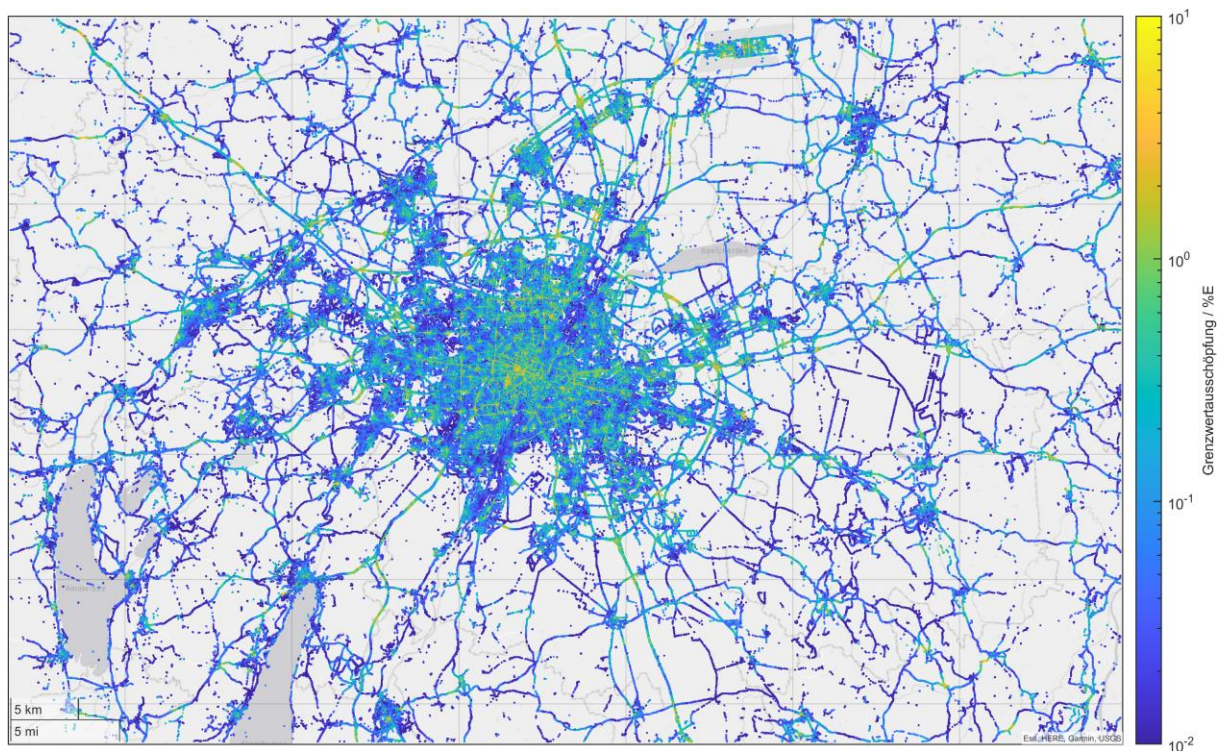
Die messtechnischen Untersuchungen haben deutlich gemacht, dass ein ausreichender Zusammenhang zwischen der elektrischen Feldstärke und den Signalstärkemessungen besteht und die wichtigsten messtechnischen Eigenschaften gegeben sind, um mit einer gewissen Unsicherheit Schätzwerte der Feldstärke ableiten zu können.

Beantwortung der Fragestellung: Welche Genauigkeit kann durch Einbeziehung weiterer für ein Messnetzwerk generell zugänglicher Informationen erreicht werden? (AP 3)

Die Ermittlung von Immissionsabschätzungen aus Smartphone-Signalstärkemessungen wurde in weiteren Arbeitsschritten praktisch anhand zweier Datenpakete erprobt, die durch ein bestehendes Crowdsourcing-Netzwerk erhoben wurden. Eines umfasste Smartphone-Daten aus dem Großraum München über den Zeitraum eines Jahres und das zweite aus dem Stadtgebiet Aachen über einen Monat. Hierfür wurde eine Verarbeitungskette entworfen und umgesetzt, die die Rohdaten vorbereitet und aussortiert, die Messdaten geeignet interpoliert, die Signalstärken in Feldstärken umwandelt sowie durch Überlagerung und Extrapolation aller Immissionsbeiträge die maximale Gesamtimmission für Standorte innerhalb der Untersuchungsgebiete zweidimensional orts aufgelöst abschätzt.

Bei der Vorbereitung der Daten musste ein Großteil der Daten aussortiert werden, weil die Datensätze als unzuverlässig eingestuft wurden oder unvollständig waren bzw. ungültige Werte enthielten. Der statistische Überblick über die Zusammensetzung der Datenpakete zeigte ein starkes Ungleichgewicht der Netzbetreiber. Telefónica war etwa doppelt so oft vertreten wie die beiden anderen deutschen Netzbetreiber. Noch gravierender fiel der Unterschied zwischen der Anzahl von Messungen bei LTE gegenüber UMTS und vor allem GSM aus. Auf diese Netzwerkgeneration entfielen im Großraum München insgesamt nur 2,3 % aller Einträge. Diese Angaben sind das Resultat der Zusammensetzung der Nutzerschaft des genutzten Crowdsourcingnetzwerks und der von Smartphones bevorzugten Nutzung neuerer Netzwerkgenerationen. Sie lassen keinen Rückschluss auf die tatsächliche Verbreitung der Netzbetreiber und Mobilfunkgenerationen zu.

Die erstellten Immissionskarten sind für den Großraum München in den Abbildungen 1. bis 4. für den gesamten Mobilfunk sowie die einzelnen Mobilfunkgenerationen (2G bis 4G) dargestellt. Es zeigt sich, dass sich Bereiche höherer und geringerer Immission erkennen lassen. Allerdings besteht Ungewissheit darüber, ob in Gebieten mit geringerer geschätzter Immission tatsächlich niedrigere Feldstärken vorliegen oder stattdessen nicht alle Funkzellen mit relevanten Immissionsbeiträgen erfasst wurden. Während für LTE über weite Bereiche der Karte durchgängig Immissionsschätzungen gewonnen werden konnten, gibt es bei UMTS und vor allem GSM deutliche Lücken in der Karte. Zusammen mit dem geringen Datenbestand wird klar ersichtlich, dass keine Abdeckung erreicht wurde, die alle Immissionsbeiträge enthalten kann.



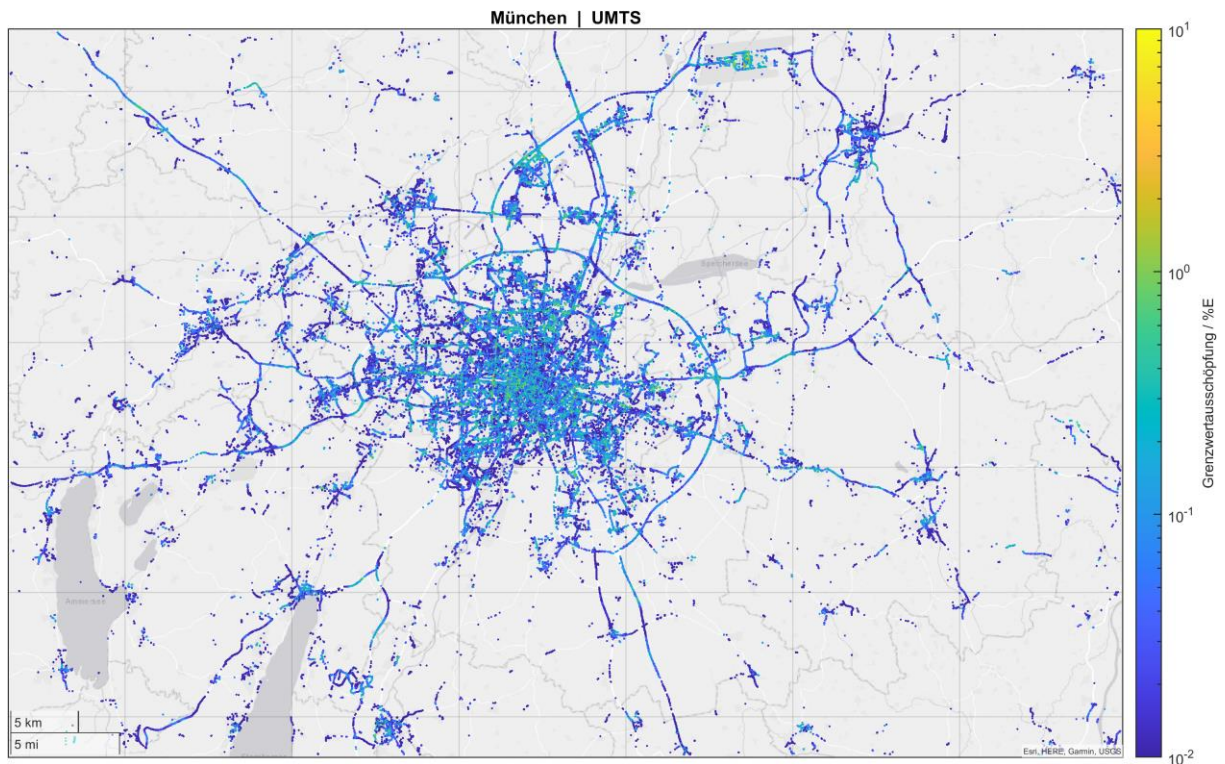


Abbildung 3 Gesamtkartenansicht der aus Smartphone-Crowdsourcingdaten geschätzten Maximalimmission des UMTS-Downlinks für den Großraum München

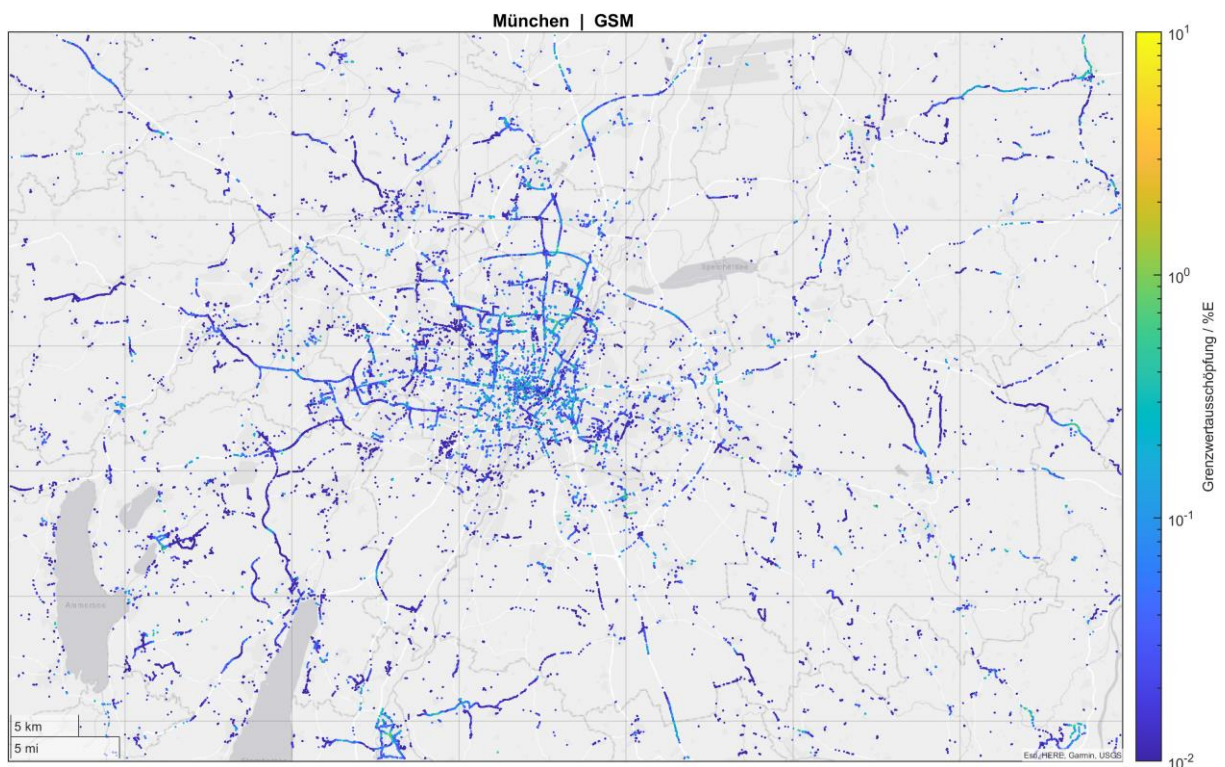


Abbildung 4 Gesamtkartenansicht der aus Smartphone-Crowdsourcingdaten geschätzten Maximalimmission des GSM-Downlinks für den Großraum München

Dies manifestiert sich schließlich auch beim Vergleich von Feldstärkemessungen mit der Immissionsabschätzung aus den Smartphone-Daten. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 5. zu sehen. An kaum einem der Messorte ist eine Immissionsabschätzung für GSM möglich gewesen. Dort, wo

überhaupt Schätzwerte erhalten wurden, unterschreiten diese die durch die Feldstärkemessung ermittelte Immission massiv. Für LTE hingegen fällt die Übereinstimmung der Messungen für den Großraum München deutlich besser aus. Zwar gibt es auch hier abhängig vom Frequenzband deutliche Unterschiede, in der Gesamtbilanz sind jedoch die wesentlichen Immissionsbeiträge erhalten. Eine leichte Tendenz zur Unterschätzung bleibt bestehen. Die maximale Unterschätzung der Grenzwertausschöpfung liegt etwa bei Faktor vier. Gemessen daran, dass die bei der Feldstärkemessung für LTE aufgetretenen Ausschöpfungsgrade insgesamt ungefähr über den Faktor 200 variieren, ist dies jedoch noch immer eine moderate Abweichung. Es kann daher davon gesprochen werden, dass zumindest zu LTE eine grobe Orientierung für die Gesamtimmission aus den Smartphone-Daten gewonnen werden kann. Die Daten aus nur einem Monat für das Gebiet Aachen reichten jedoch auch bei LTE nicht für eine brauchbare Immissionsschätzung aus. Die Ergebnisse werden daher an dieser Stelle ausgespart. Es sind längere Datenerhebungszeiträume erforderlich, um eine ausreichende Datenbasis aufzubauen.

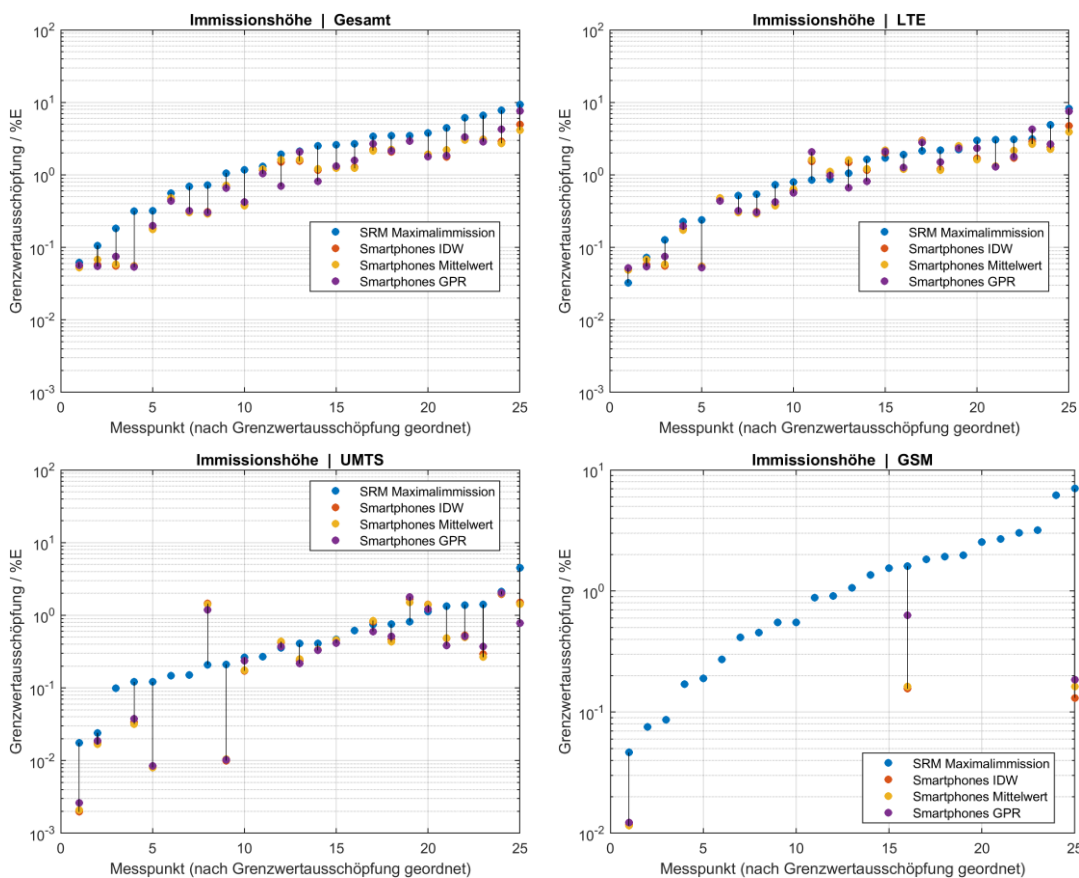


Abbildung 5 Ergebnis der Vergleichsmessungen in München für die Immission

Bewertung der Eignung des Konzepts „Smartphone-basiertes Messnetzwerk“ zur quantitativen Erfassung der Exposition der Allgemeinbevölkerung mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern des Mobilfunks (AP 4)

Insgesamt haben die Untersuchungen im vorliegenden Projekt zeigen können, dass die grundsätzliche technische Machbarkeit für ein auf Smartphones basierendes Messnetzwerk zur Immissionsabschätzung gegeben ist. Diese ergibt sich daraus, dass die wichtigsten erforderlichen Parameter von den Smartphones erfasst werden und im Betriebssystem Android für eine App abrufbar sind. Außerdem weisen die Messeigenschaften der Smartphones einen ausreichend direkten Zusammenhang zwischen der gemessenen Signalstärke und der vorliegenden Feldstärke auf. Auch die benötigte technische Infrastruktur lässt sich mit den heutigen Möglichkeiten mit vertretbarem Aufwand umsetzen.

Allerdings haben sich andererseits erhebliche Schwachpunkte herausgestellt, die einer erfolgreichen Anwendung entgegenstehen. Dazu gehört, dass die Abdeckung aller relevanten Immissionsbeiträge des Mobilfunks nicht gewährleistet werden kann. Insbesondere die ausreichende Erfassung aller Mobilfunkstandards ist nach derzeitigem Stand nicht zu erreichen. Weiterhin bleibt eine hohe Ungewissheit darüber bestehen, ob sämtliche Immissionsanteile für einen Ort ermittelt werden konnten oder nicht. Dies ist vor allem in weniger frequentierten Gebieten ein großes Problem. Zuletzt ist die zukünftige Anwendbarkeit bei 5G und darüber hinaus aufgrund der hohen Komplexität und erschwerten Bedingungen hinsichtlich einer pauschalen Extrapolation auf Maximalimmission beim Einsatz von aktiven Antennen nur bedingt oder nicht möglich.

Dem Anspruch eines vollumfänglichen Monitoringsystems zur quantitativen Abschätzung der Exposition kann ein Messnetzwerk mit Smartphones daher nicht gerecht werden. Trotzdem könnte ein derartiges System einen gewissen Nutzen entfalten. So wäre zumindest für den derzeit gebräuchlichsten Funkstandard, LTE, eine einigermaßen verlässliche Aussage zur Immission in gut abgedeckten Gebieten zu erreichen. Die ableitbaren Immissionskarten können einen Eindruck davon vermitteln wie die Immission verteilt ist und zur gezielten Auswahl von Messpunkten für Messkampagnen mit Feldstärkemessgeräten dienen. Dennoch bleibt der Nutzen einer Umsetzung voraussichtlich insgesamt zu gering und rechtfertigt daher vermutlich die erforderlichen Aufwendungen langfristig nicht.

Schlussbetrachtung

Die Machbarkeitsstudie hat gezeigt, dass ein Messnetzwerk mit Smartphones dem Anspruch eines vollumfänglichen Monitoringsystems zur quantitativen Abschätzung der Exposition nicht gerecht werden kann. Weitere Anstrengungen in diesem Bereich erscheinen daher nicht sinnvoll.

Erprobung, Weiterentwicklung und Validierung von neuartiger Messtechnik für statische und niederfrequente elektrische und magnetische Felder

Forschungskennzeichen 3619S92411	Beginn 01.02.2020	Ende 31.03.2022	Fördermittel 695.746,21 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Donau-Universität Krems (Universität für Weiterbildung Krems, UWK-DUK), Department für Integrierte Sensor-Systeme (DISS)			
Projektleitung Dr. W. Hortschitz	Fachbegleitung BfS Dr. Jens Kuhne	verantwortlich für den Text Dr. Hortschitz Prof. Keplinger	

Hintergrund

Das BfS hat die Aufgabe die von geplanten HGÜ-Freileitungen und HGÜ-HWÜ-Hybridfreileitungen ausgehenden gesundheitlichen Risiken zu ermitteln. Hierzu ist die Kenntnis der im Einwirkungsbereich der Leitungen vorherrschenden statischen und niederfrequenten elektrischen und magnetischen Felder notwendig. Herkömmliche Messmethoden erweisen sich jedoch als unzuverlässig oder problematisch. Ein Grund liegt unter anderem in Drifteffekten, Feldverzerrungen und in Querempfindlichkeiten, beispielsweise durch Luftionen, die zu Aufladungen und damit zu einer Beeinflussung des gemessenen elektrischen Feldes führen können.

Zielsetzung

Dieses Forschungsvorhaben verfolgte das Ziel neuartige Messmethoden zu identifizieren und ein Messsystem zur Erfassung statischer und niederfrequenter elektrischer und ggf. Magnetfelder im Einwirkungsbereich von HGÜ und HGÜ-HWÜ-Hybridleitungstrassen zu erproben und zu validieren. Das Verfahren sollte dabei möglichst feldverzerrungsfrei sowie ionenfluss- und potenzialunabhängig sein und auf einem Mikrosystem basieren.

Methodik

Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik, Identifikation von Sensortypen/Messsystemen und Detaillierung der Projektplanung (AP 1)

Basierend auf den Ergebnissen einer zu Beginn durchgeführten umfassenden Recherche zum Stand der Technik und Wissenschaft wurde ein Konzept eines Messsystems entwickelt. Dazu wurde einschlägige Fachliteratur hinsichtlich relevanter Messmethoden gesichtet und bewertet. Es wurde eine Übersicht zu den Bedingungen, die im Einwirkungsbereich von hybriden Hochspannungs-Übertragungs-Leitungen zu erwarten sind, und Anforderungen für ein entsprechendes Messsystem erstellt. Alle Ergebnisse wurden in einem Bericht zusammengefasst.

Aufbau, Anpassung und Erprobung des Mess- und Kalibriersystems sowie Kalibration (AP 2)

Nach Selektion des favorisierten Konzeptes wurde ein auf einem Mikrosystem basierendes Messsystem zur Messung von Gleich- und niederfrequenten Wechselfeldern entwickelt. Dabei wurde auch ein Konzept zur Abwehr von Luft-Ionen durch Betrieb des Mikrosystems im feldfreien Raum erarbeitet und im Messsystem integriert. Vor dem Zusammenbau wurden die Einzelkomponenten gesondert auf ihre Funktion getestet. Dabei wurden unter anderem auch z. B. Abschwächungsfaktoren der einzelnen Komponenten ermittelt. Es wurde eine Bediensoftware entwickelt, die neben der Durchführung, Auswertung und Speicherung von Messungen auch Funktionstests (Roundtrip-Testmessung) und eine Schnellkalibration vor Ort ermöglicht. Beim Funktionstest wird eine

Elektrode, die zur Abwehr von Luftionen in der Nähe des Mikrosystems verbaut ist, intern mit unterschiedlichen Spannungen versorgt und eine Kennlinie aufgenommen. Diese Kennlinie kann auch zur Beurteilung der Stabilität des Messsystems verwendet werden.

Das assemblierte Messsystem wurde in homogenen Gleich- und Wechselfeldern erprobt. Das Messsystem wurde in den Labors der UWK für Gleichfelder bis ± 40 kV/m und für Wechselfelder mit 50 Hz bis rund 8 kVRMS/m kalibriert. Dazu wurde das Messsystem in homogenen elektrischen Gleich- und Wechselfeldern bei 50 Hz betrieben und Kennlinien erstellt. Die Variation des Nullpunkts wurde durch Langzeitmessungen beurteilt. Es wurden Untersuchungen hinsichtlich der Querempfindlichkeiten gegenüber Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Akustik und Vibrationen, Feldinhomogenitäten und dem Einfluss von Ionen durchgeführt. Die Untersuchungen zu Querempfindlichkeiten hinsichtlich Temperatur und Luftfeuchtigkeit wurden in einer Klimakammer vom Typ CTS C-40/200 an der UWK durchgeführt. Der Einfluss der Temperatur wurde zwischen 10 °C und 40 °C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 40 % untersucht. Tieferer oder höherer Temperaturen wurden nicht evaluiert um Schäden durch Kondensation bzw. Eisbildung oder durch Verformungen von Kunststoffteilen im Inneren des Messsystems zu vermeiden. Der Einfluss der Luftfeuchte wurde bei konstanter Temperatur von 23,5 °C zwischen 10% und 80% relativer Luftfeuchtigkeit untersucht.

Bei der Untersuchung zu den Auswirkungen von Vibrationen und Akustik wurden einwirkende Vibrationsamplituden mittels Laser-Vibrometer bzw. Schalldruckmessgerät gemessen und mit den angezeigten Werten am Messgerät für Gleich- und Wechselfelder in Relation gesetzt

Validierung des Messsystems (AP 3)

Die Eignung des aufgebauten Messsystems wurde unter Rahmenbedingungen wie sie im Einwirkbereich von HGÜ und HGÜ-HWÜ-Hybridtrassen herrschen validiert. Die Validierung erfolgte einerseits in homogenen Gleich- und Wechselfeldern als auch im Hochspannungslabor der TU Graz in einem Aufbau ähnlich dem Einwirkungsbereich von HGÜ-HWÜ Trasse. Dort wurde das Messsystem auf einem Stativ montiert und unter einem Leiterseilbündel wie es auf Hochspannungstrassen Verwendung findet positioniert. Das elektrische Feld wurde unter dem Leiterseilbündel auch mit einer Feldmühle (EFM, phywe-Kleinwächter 11500.00) gemessen. Die Ionenstromdichten wurden parallel mit einer Wilson-Platte aufgenommen. Am Leiterseilbündel wurden sowohl reine Gleich- und reine Wechselfelder als auch gemischte Gleich- und Wechselfelder ohne die Emission von Ionen erzeugt. Durch Anbringen von Störstellen an den Leiterseilen wurden auch Messungen bei der Emission von Korona-Ionen durchgeführt. Bei den Validierungsmessungen in den Labors der UWK wurden parallel mit etablierter Messtechnik Messungen durchgeführt. Neben dem Test unter reinen elektrischen Feldern wurden Messungen bei emittierten Ionen durchgeführt, um das Konzept der Ionenabwehr zu erproben, wobei die Ionenstromdichten erfasst und dokumentiert wurden. Alle Messungen wurden in Berichten dokumentiert.

Ergebnisse

Das entwickelte Messsystem basiert auf einem mikromechanischen System als Wandler, der die elektrische Feldstärke in eine mechanische Auslenkung eines mikromechanischen Balkens überführt. Eine elektrische Ladung wird periodisch auf diesen Balken gebracht, die im zu messenden elektrischen Feld eine Kraft erfährt und so zu einer periodischen Auslenkung des Balkens führt. Die Auslenkungen sind extrem klein, im Bereich von Pikometern, und werden optisch und somit rückwirkungsfrei ausgelesen. Sehr vereinfacht beschrieben führt das periodische Aufbringen von Ladung zu einem „Hochmischen“ des zu messenden Gleichanteils und der niederfrequenten Frequenzanteile des elektrischen Feldes auf die Frequenz der Ladungsaufbringung. Mit dieser Methode wird aus einem Gleichsignal ein Wechselfeld, das deutlich leichter gemessen werden kann.

Erprobung

Die Hauptkomponenten des Messsystems sind in Abbildung 1 zu sehen, der Aufbau zur Erprobung des Systems im Hochspannungslabor der TU Graz ist in Abbildung 2 gezeigt. Bei der Erprobung im Hochspannungslabor der TU Graz zeigte sich, dass hybride Felder prinzipiell simultan gemessen werden können. Die im Hochspannungslabor unter einem Leiterseilbündel erzeugten, hohen, ungestörten Gleichfelder von mehr als +50 kV/m bzw. mehr als -40 kV/m konnten parallel zu herkömmlicher Messtechnik (Feldmühle) gemessen werden (siehe Abbildung 3). Bei kleineren Feldstärken wurden die Auswirkungen des Temperaturcontrollers sichtbar. Eine direkte Auswirkung der geringen Auflösung betrifft das Konzept der Ionenabwehr, das zur Regelung des Gleichfeldes rund um das Mikrosystem eine möglichst gute Auflösung benötigt. In den entsprechenden Tests konnten die Funktion der Ionenabwehr nicht gezeigt bzw. eine Anlagerung von Ionen mit dem vorhandenen System nicht unterbunden werden. Die zuletzt implementierte Kapselung erlaubt aber eine nachträgliche Abfuhr der angelagerten Ionen und damit ein Rücksetzen auf einen Anfangszustand ohne angelagerte Ionen.

Validierung

Bei der Validierung des Systems in einem Feldkondensatoraufbau zeigte sich, dass die Messdaten starken Drifts unterworfen sind, die auf Temperaturänderungen am Sensor zurückzuführen sind. Die damit im Zusammenhang stehenden Nullpunktfehler können jedoch korrigiert werden, wenn unmittelbar vor der Messung eine Schnellkalibrierung mithilfe der Roundtrip-Funktion durchgeführt wird; die in wiederholten Messungen auftretenden Messfehler sind dennoch nicht zu vernachlässigen (siehe Abbildung 4).

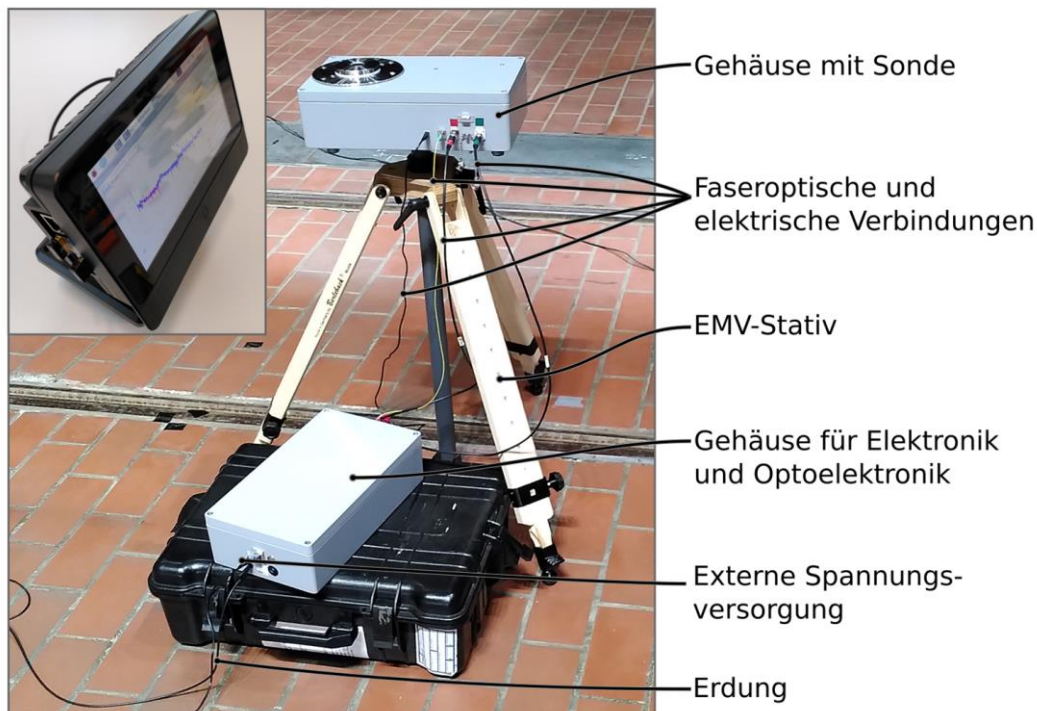


Abbildung 1 Hauptkomponenten des Messsystems. Das links oben eingefügte Bild zeigt die Bedieneinheit, die den Zugriff und die Bedienung über WLAN ermöglicht.

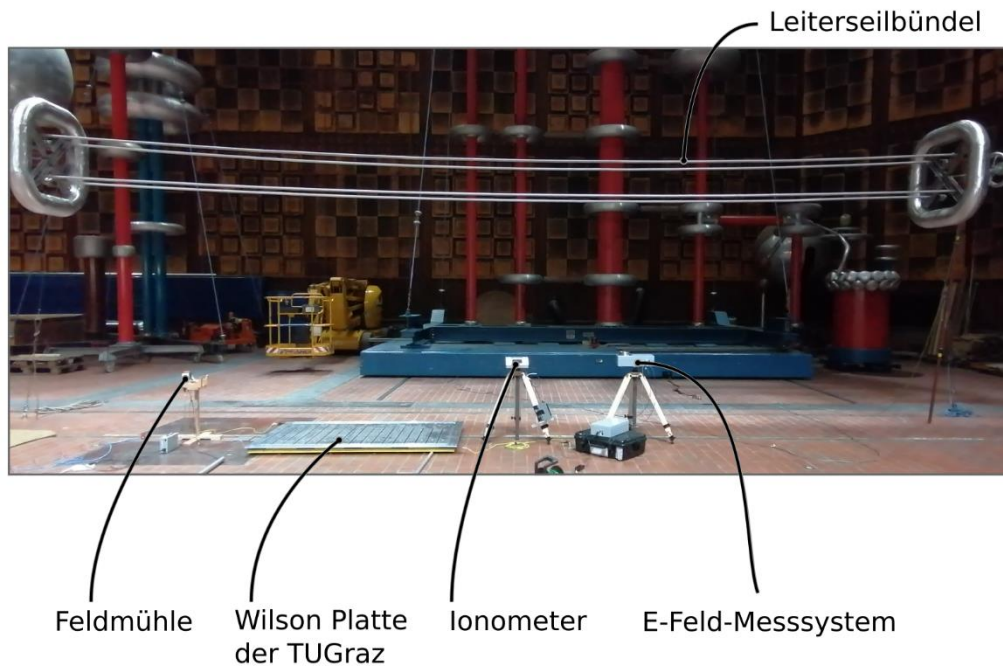


Abbildung 2 Aufbau der E-Feld- und Ionenmessung unter der Hochspannungsleitung an der TU-Graz.

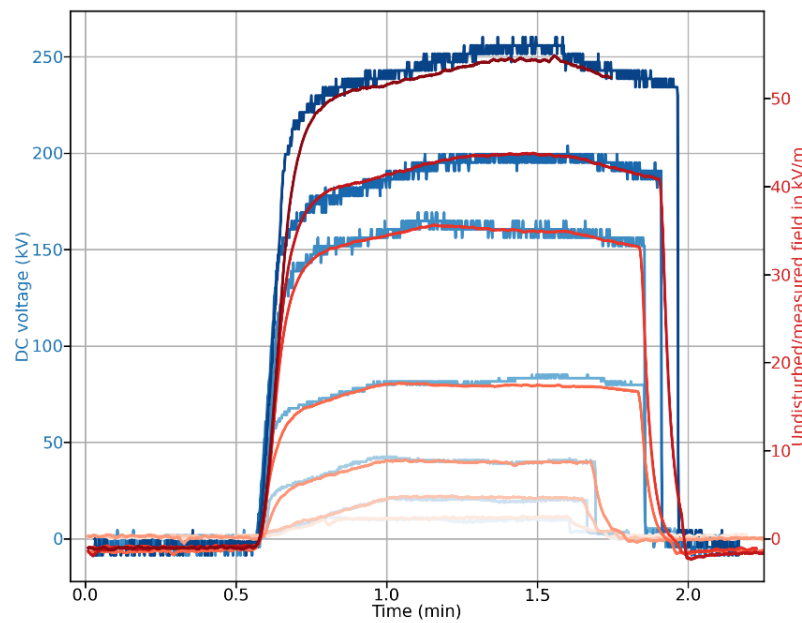


Abbildung 3 Beispielhafte Erprobungsmessungen im Hochspannungslabor der TU Graz in Form des Vergleichs der angelegten Hochspannung am Leiterbündel (blaue Kurven) mit den gemessenen Feldwerten (rote Kurven, rechte Skala). Die blauen Kurven können auch direkt als Feldwerte auf der rechten Skala abgelesen werden. Dazu wurde der Spannungswert mit $0,219 \text{ kV}/(\text{m kV})$ umgerechnet.

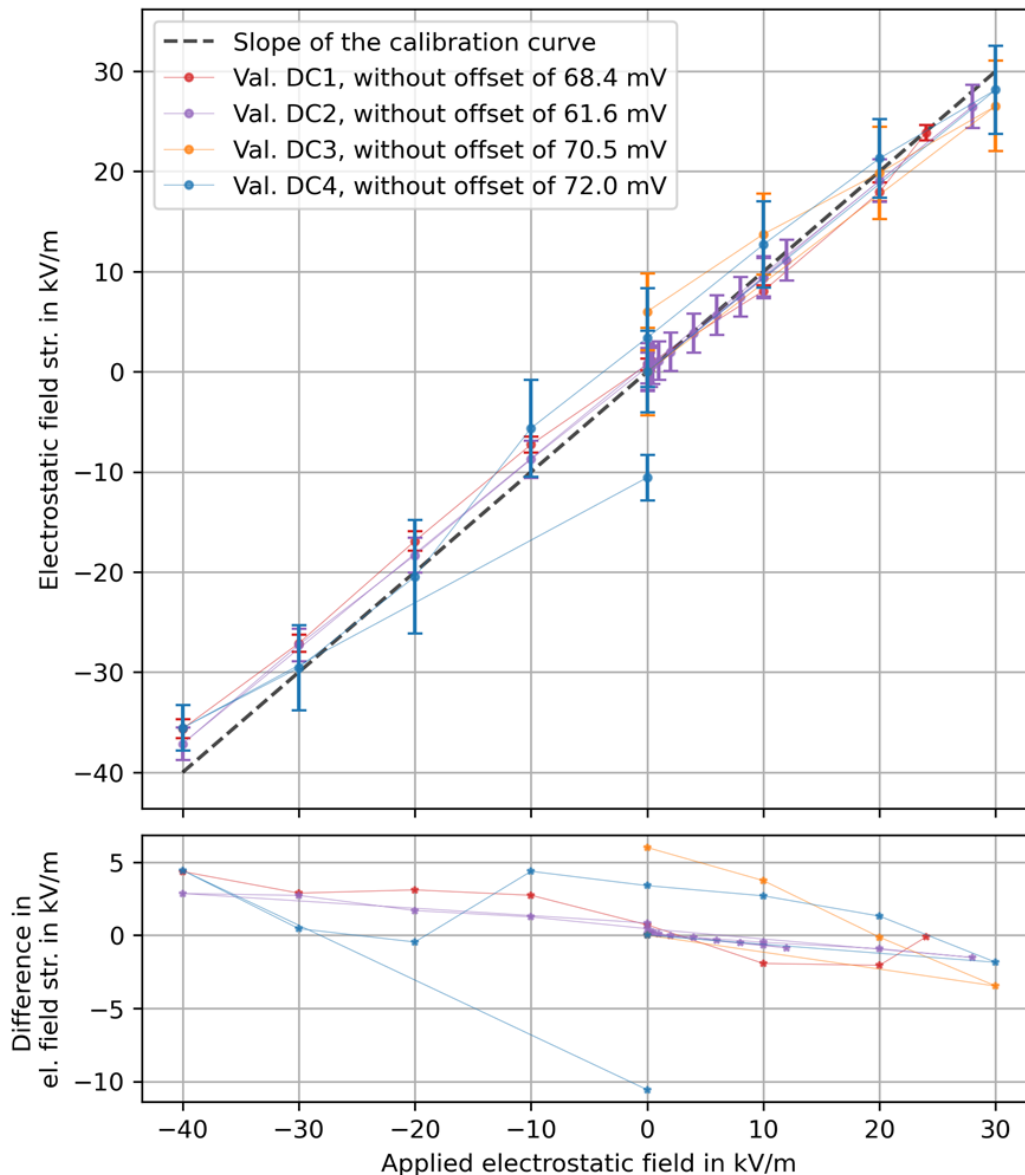


Abbildung 4 Zusammenführung aller durchgeführten Messungen zur Validierung für Gleichfelder. Im oberen Diagramm ist auf der Ordinate der gemessene Feldstärkewert abzulesen, während auf der Abszisse die Stärke des angelegten Feldes aufgetragen ist. Für jede Einzelmessung ist der Mittelwert als Kreis und die Standardabweichung als Fehlerbalken angeführt. Im unteren Diagramm ist die Differenz des gemessenen Wertes zum ungestörten Feldstärkewert angeführt.

Die Auflösungsgrenze des kompletten Messsystems in einer temperaturstabilisierten Umgebung kann bei einer gleitenden Mittelung über eine Sekunde eine dreifache Standardabweichung für Gleichfelder mit $3\sigma \sim 570 \text{ V/m}$ angegeben werden. In nicht stabilisierten Umgebungen, d. h. bei Verwendung des verbauten Temperaturreglers und der sich ergebenden Regelzyklen wird die Auflösungsgrenze schlechter. Schon sehr kleine Temperaturschwankungen an der Sonde von rund einem Zehntel Grad Celsius führen zu systematischen Fehlern in der Feldbestimmung von bis zu 11,6 kV/m (zum Vergleich: der gemäß der 26 BlmSchV bei 50 Hz zulässige Höchstwert beträgt 5 kV/m).

Herausforderungen

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass im Sinne des Primärziels des Vorhabens eine Messmethode auf Basis eines Mikrosystems für die Messung statischer und niederfrequenter

elektrischer Felder in typischer Umgebung von HGÜ und HGÜ-HWÜ-Hybridleitungen identifiziert und weiterentwickelt werden konnte. Im Rahmen von Entwicklung, Erprobung und Validierung wurden jedoch zwei potenzielle Fehlerquellen identifiziert, deren Lösung vorerst eine große technische Herausforderung bleibt. Zum einen verhindert die starke Temperaturabhängigkeit des derzeitigen Messsystems, dass außerhalb von kontrollierten Laborbedingungen eine für Messungen unter realen Freileitungen ausreichend große Sensitivität und Stabilität erreicht werden kann. Da die Temperaturabhängigkeit gegenüber anderen Querempfindlichkeiten stark dominiert, konnte der Einfluss von Potenzial und Luftfeuchtigkeit nicht belegt, widerlegt oder quantifiziert werden.

Neben der starken Temperaturabhängigkeit stellt die Anlagerung von Ionen ein bisher nicht gelöstes Problem dar, das zu starken Veränderungen der Systemcharakteristik führt. Es wurde zwar eine Lösung zur einfachen Wiederherstellung der ursprünglichen Kennlinie gefunden, zuverlässige Langzeitmessungen sind auf diese Weise jedoch nicht möglich. Die für eine Ionenabwehr entwickelte Vorrichtung zur Erzeugung eines Gegenfeldes konnte, entgegen der ursprünglichen Erwartungen, die im Labor erzeugten und von einer Versuchsleitung emittierten Ionenströme nicht abwehren. Ob hierfür lediglich eine, durch die vergleichsweise hohen Ionenstromdichten hervorgerufene, Überlastung der Vorrichtung verantwortlich ist oder andere Gründe gegen das prinzipielle Funktionieren der Ionenabwehr sprechen, ist derzeit unklar. Aus Sicht der Autoren sollte das Konzept einer Abwehr von Ionenströmen durch ein Gegenfeld weiterhin detailliert erforscht und weiterentwickelt werden, da hierfür noch hohes Verbesserungspotenzial gesehen wird.

Schlussbetrachtung

Das Messsystem basiert auf einem neuen interessanten Ansatz zur Messung von elektrischen Feldern, ist jedoch aufgrund der hohen Querempfindlichkeit (insbesondere bezüglich Temperatur und Ionen) nicht zur Erfassung der Exposition gegenüber statischen und niederfrequenten elektrischen Feldern im Umfeld von Freileitungen geeignet. Während die Temperaturabhängigkeit durch weitere, vermutlich kosten- und aufwandsintensive Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen mit hoher Wahrscheinlichkeit verringert werden könnte, stellt die Verfälschung der Messwerte durch sich an das Messsystem anlagernde Ionen ein aus derzeitiger Sicht prinzipbedingtes Problem dar, da das Mikrosystem auf eine nicht leitfähige Kapselung angewiesen ist. Ein Messsystem, das eine weitgehend feldverzerrungsfreie, ionenfluss- und potenzial-unabhängige Erfassung von statischen und niederfrequenten elektrischen Feldern im Umfeld von Hochspannungsleitungen ermöglicht, ist damit nach wie vor nicht verfügbar.

Machbarkeitsstudie für eine interdisziplinäre Studie zur Untersuchung eines Zusammenhangs zwischen Umwelt-, genetischen Faktoren und Leukämie in B-Zell ALL-Patienten

Forschungskennzeichen 3620S92412	Beginn 01.02.2021	Ende 30.05.2022	Fördermittel 143.473,06 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik (IMBEI) International Agency for Research on Cancer (IARC)			
Projektleitung Dr. Daniel Wollschläger Dr. Friederike Erdmann	Fachbegleitung BfS Dr. J. Schmidt	verantwortlich für den Text Dr. Wollschläger Dr. Erdmann	

Hintergrund

Bei der Entstehung von Leukämien im Kindesalter handelt es sich um ein multifaktorielles Geschehen, wobei genetische Veranlagung, weitere endogene Faktoren sowie äußere Umwelteinflüsse zusammenwirken. Trotz der verschiedenen Anstrengungen in unterschiedlichen Bereichen der Wissenschaft sind die genauen Ursachen für die Erkrankung und ihr Zusammenspiel nach wie vor unklar. Beruhend auf epidemiologischen Studien, die konsistent einen statistischen Zusammenhang von Leukämien im Kindesalter mit schwachen niederfrequenten Magnetfeldern (ELF-MF) beobachten konnten, hat die Internationale Agentur für Krebsforschung (IARC) Magnetfelder als „möglicherweise kanzerogen“ bewertet. Ein ursächlicher Zusammenhang zwischen dieser Umwelteinwirkung und dem Risiko für Leukämien bei Kindern ist jedoch nach dem Stand der Wissenschaft bisher nicht erklärbar. Auch ist unklar, inwiefern genetische Faktoren eventuell die Sensitivität gegenüber ELF-MF oder anderen Umweltrisikofaktoren, wie schwacher ionisierender Strahlung, erhöhen. Hier besteht Handlungsbedarf im Bereich des Strahlenschutzes.

Zielsetzung

Das Ziel des Vorhabens bestand darin, die Durchführbarkeit einer interdisziplinären Studie über umweltbedingte und genetische Risikofaktoren für die Entstehung der B-Zell akuten lymphatischen Leukämie (ALL) im Kindesalter zu prüfen. Im Rahmen einer solchen interdisziplinären Studie wäre zu untersuchen, ob Patienten mit verschiedenen genetischen Subtypen der pädiatrischen B-Zell-ALL vor Ausbruch der Krankheit unterschiedlichen Umweltrisikofaktoren ausgesetzt waren. Im Fokus stehen dabei ELF-MF und ionisierende Strahlung.

Methodik

Arbeitspaket 1

Zur Aufarbeitung des Standes der Wissenschaft wurde die Methode des Umbrella-Reviews angewendet, da bereits mehrere systematische Reviews und Metaanalysen zu diesem Thema veröffentlicht wurden. Bei den in Frage kommenden Studien musste es sich um relevante Meta-Analysen oder systematische Übersichten von Beobachtungsstudien (Kohorten- und Fall-Kontroll-Studien) oder gepoolten Studien handeln. Studien wurden in den Umbrella Review aufgenommen, wenn sie relative Risiken für umweltbedingte oder genetische Risikofaktoren für ALL bei Kindern berichteten. Pubmed und Web of Science wurden auf Basis eines vordefinierten Suchterms durchsucht und Duplikate eliminiert. Aus den systematisch ausgewählten Veröffentlichungen wurden zentrale bibliographische Angaben und die ermittelten Risikoschätzer mit Konfidenzintervallen

extrahiert. Abschließend wurde die methodische Qualität der Studien mit dem AMSTAR 2 Tool bewertet.

Arbeitspaket 2

Informationen zu ALL Studien wurden zum einen in informellen Interviews mit Vertretern der Studienzentrale erfragt und durch einen strukturierten Fragebogen ergänzt. Weitere Aspekte einer zukünftigen Pilotstudie wurden in einem Workshop erarbeitet. Datenschutzvotum und Ethikvotum wurden auf Basis eines vorläufigen Datenschutzkonzepts und Studienprotokolls eingeholt.

Hinsichtlich der Zuständigkeit wurde ermittelt, dass Voten zu Datenschutz und Ethik von den für die Auftragnehmer zuständigen Stellen einzuholen sind. Daher wurden der Landesbeauftragte für den Datenschutz Rheinland-Pfalz sowie die Ethik-Kommission der Landesärztekammer Rheinland-Pfalz angefragt und Anträge eingereicht. Um die Teilnahmebereitschaft der identifizierten Studienzentren, nämlich der **ALL-BFM-Studie** und der **CoALL-Studie**, abzuschätzen, wurde Kontakt mit den jeweiligen Koordinatoren aufgenommen. Im Rahmen von Web-Meetings wurde das Konzept einer Pilotstudie vorgestellt und mögliche Problemstellungen diskutiert. Im Anschluss an die einzelnen Web-Meetings wurden standardisierte Fragebögen entwickelt und verschickt, um u. a. die Charakteristika der klinischen pädiatrischen ALL-Studien zu erfassen. In Absprache mit der Fachaufsicht beim BfS wurde beschlossen, nur von der **ALL-BFM-Studie** eine "Absichtserklärung" zur Teilnahme an einer möglichen Pilotstudie einzuholen. Die Gründe hierfür waren: Das **ALL-BFM-Studienzentrum** umfasst mit ca. 85% aller Fälle die große Mehrheit der pädiatrischen ALL-Fälle in Deutschland. Darüber hinaus verfügt die **ALL-BFM-Studie** über ein formalisiertes Verfahren zur Bewertung von Vorschlägen für Begleitforschungsprojekte, die in die laufenden klinischen Studien aufgenommen werden sollen. Weiterhin verfügt das **ALL-BFM-Studienzentrum** über eine zentrale Studienkoordinationsstelle, die die Kommunikation mit allen 52 Studienkliniken koordinieren und rechtliche Angelegenheiten regeln kann. Ein Exposé zur vorgesehenen Pilotstudie wurde dem Begleitforschungsausschuss der **ALL-BFM Studie** über dessen Vorsitzenden zur Begutachtung vorgelegt.

Arbeitspaket 3

Als Konzept für die Durchführung einer Pilotstudie wurde CLERF-Pilot (Childhood Leukemia Environmental Risk Factors-Pilot) entwickelt. Ziel von CLERF-Pilot ist die Prüfung der Machbarkeit einer späteren interdisziplinären Studie zu Umweltrisikofaktoren und genetischen Faktoren in der Ätiologie der pädiatrischen B-Zell ALL in Deutschland (CLERF-GER). Diese interdisziplinäre Studie soll die Daten bereits laufender klinischer Studien zu B-Zell ALL als Basis zur Rekrutierung von Patientinnen und Patienten nutzen. Ein epidemiologischer Fragebogen sowie eine Expositionsmessung von ELF-MF sollen in eine solche klinische Studie integriert werden. CLERF-Pilot soll von drei Beteiligten durchgeführt werden:

Ein wissenschaftliches Institut für die Koordination, Durchführung und Auswertung von CLERF-Pilot, einschließlich der Datenanalyse und Berichterlegung;

die Leitung einer bereits laufenden klinischen ALL-Studie: Aus den in die klinische ALL-Studie eingeschlossenen Patientinnen und Patienten sollen B-Zell ALL Patientinnen und Patienten für CLERF-Pilot rekrutiert werden. In den klinischen Studien bereits erhobene Informationen zu Patientinnen- bzw. Patienteneigenschaften, insbesondere zu genetischen Faktoren, sollen CLERF-Pilot zur Verfügung gestellt werden. Die Leitung der klinischen Studie koordiniert die Fragebogenerhebung zu Umweltrisikofaktoren innerhalb von CLERF-Pilot;

ein Messinstitut für die vor-Ort-Expositionsmessungen von ELF-MF am Wohnort der B-Zell ALL-Patienten.

Zur retrospektiven Erfassung von Umweltrisikofaktoren wurde ein Fragebogen entwickelt und intern validiert. Dieser Fragebogen richtet sich an die Eltern von an Leukämie erkrankten Kindern, welche in

CLERF-Pilot eingeschlossen werden könnten. In dem Fragebogen werden im wesentlichen Aspekte abgefragt, die zeitlich vor der Krebserkrankung des Kindes liegen und das Risiko für diese Erkrankung möglicherweise beeinflusst haben könnten. Der Fragebogen umfasst ein Anschreiben und die folgenden Themenkomplexe: Allgemeine Angaben, Schwangerschaft und Geburt, Medizinische Fragen zum Kind, Soziale Kontakte des Kindes, Wohnsituation, Risikofaktoren der Eltern, Sozioökonomischer Status.

Hinsichtlich der Messung von ELF-MF wurde am 04. und 05. April 2022 ein internationaler Workshop unter Beteiligung des BfS am IMBEI in Mainz durchgeführt. Der Workshop umfasste die Vorstellung und Diskussion von CLERF-Pilot, das Thema elektromagnetische Felder am BfS, Betrachtungen zu einem möglichen Goldstandard für ELF-MF Expositionsbestimmungen in epidemiologischen Studien, Optionen für die Expositions-messung und die praktische Demonstration von Messgeräten.

Im Rahmen eines klinischen Workshops mit dem Koordinator der Begleitforschung der ALL-BFM Studiengruppe, wurde die Möglichkeit weiterer genetischer Untersuchungen im Rahmen einer möglichen Pilotstudie wie CLERF-Pilot diskutiert. Aus den vorausgegangenen Fragebogenbefragungen an die Studienkoordinatoren ging bereits hervor, dass die Verwendung von bereits erhobenem Probenmaterial der Patienten für weitere Untersuchungen grundsätzlich möglich ist. Im Rahmen eines weiteren Web-Meetings mit dem Koordinator wurde diese Möglichkeit weiter erörtert.

Für die erweiterte Fallzahlplanung wurden folgende Fragestellungen geklärt:

Wie viele ALL-Patienten könnten im Rahmen der jeweiligen klinischen Studie in die interdisziplinäre Hauptstudie eingebunden werden?

Sind statistisch aussagekräftige Ergebnisse zu erwarten?

Unter der Verwendung der vorgestellten Methoden wurde eine Reihe zusätzlicher möglicher Szenarien für die Zahl rekrutierbarer Patienten sowie für die tatsächliche Prävalenz von Umweltrisikofaktoren und die tatsächliche Stärke ihres Zusammenhangs betrachtet. Die durchgeführten Berechnungen der statistischen Power für die Analyse des Zusammenhangs von genetischen Risikofaktoren und umweltbedingten Risikofaktoren beruhen auf Simulationen für verschiedene Szenarien bzgl. der Teilnahmequote, der geschätzten Anteile der genetischen Varianten sowie der Prävalenzen der Umweltexpositionen.

Basierend auf dem avisierten Design von CLERF-Pilot wurde ein Zeit- und Kostenplan erstellt. Zur Abschätzung des Aufwands zur Durchführung einzelner Schritte wurde die Expertise von Experten im Bereich epidemiologischer Studien, klinischer Studien zu pädiatrischer ALL und Experten zu Messverfahren von ELF-MF eingeholt und berücksichtigt.

Arbeitspaket 4

Die über die drei vorausgegangenen APs gewonnenen Erkenntnisse wurden im AP 4 abschließend zusammengetragen und als Basis zur Formulierung von Empfehlungen für die Pilotstudie und einer interdisziplinären Hauptstudie verwendet.

Ergebnisse

Arbeitspaket 1

Umweltrisikofaktoren für das Auftreten von ALL im Kindesalter wurden getrennt nach Expositionszeiträumen (Exposition der Eltern, pränatale vs. postnatale Exposition des Kindes) betrachtet. Für zwei Risikofaktoren (niedrige Dosis ionisierender Strahlung in der frühen Kindheit und allgemeine Pestizidexposition der Mutter während der Schwangerschaft) wurde überzeugende Evidenz für eine Assoziation mit ALL im Kindesalter gefunden. Andere Risikofaktoren, darunter ELF-MF, das Wohnen in der Nähe von kerntechnischen Anlagen, die Exposition gegenüber Erdöl, Benzol,

Lösungsmitteln und Haushaltsfarben in der frühen Kindheit, zeigten alle ein gewisses Maß an Evidenz für einen Zusammenhang. Der mütterliche Konsum von Kaffee (hoher Konsum (>2 Tassen pro Tag)) und Cola (hoher Konsum) während der Schwangerschaft, das väterliche Rauchen während der Schwangerschaft des Indexkindes, die mütterliche Inanspruchnahme von Fruchtbarkeitsbehandlungen, ein hohes Geburtsgewicht (≥ 4000 g) und eine Kaiserschnittentbindung wiesen ebenfalls einen gewissen Grad an Evidenz für einen Zusammenhang auf. Die mütterliche Folsäure- und Vitaminzufuhr, das Stillen (≥ 6 Monate) und der Besuch einer Kindertagesstätte waren mit einem gewissen Evidenzgrad invers mit ALL im Kindesalter assoziiert. Die berücksichtigte Evidenz aus der Literatur stammt allerdings fast ausschließlich aus fragebogengestützten Fall-Kontroll-Studien, bei denen eine aktive Teilnahme erforderlich war. Sowohl Selektionseffekte als auch Erinnerungsfehler kommen daher als Verzerrungsmöglichkeiten in Betracht. Verbesserte Methoden zur retrospektiven Expositionsabschätzung sind erforderlich, damit in zukünftigen Studien kausal verantwortliche Risikofaktoren für Leukämie im Kindesalter ermittelt werden können, um eine Primärprävention möglich zu machen. Die Ergebnisse von **AP 1** wurden in einem internationalen peer-review Journal unter einer open-access Lizenz veröffentlicht.

In Deutschland wurden zwei klinische pädiatrische ALL-Studien identifiziert, die B-Zell-ALL-Fälle berücksichtigen. Etwa 85% der Kinder, die in Deutschland wegen ALL behandelt werden, werden nach dem AIEOP-BFM ALL 2017 Protokoll behandelt, welches vom Universitätsklinikum Schleswig-Holstein (UKSH) Kiel koordiniert wird. Die restlichen 15% der leukämiekranken Kinder in Deutschland werden im Rahmen der CoALL-08-09-Studie behandelt, die vom Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf (UKE) koordiniert wird.

Arbeitspaket 2

Relevante Studien in Deutschland sind derzeit die **ALL-BFM- und CoALL-Studien**, die jährlich ca. 400 (**ALL-BFM**) bzw. 70 (**CoALL**) pädiatrische Patienten im Jahr in Deutschland einschließen. Angaben zu genetischen Subtypen werden in beiden Studien standardmäßig erhoben. Der Landesbeauftragte für den Datenschutz Rheinland-Pfalz gab ein positives Votum zum zugehörigen Datenschutzkonzept. Die Ethikkommission der Landesärztekammer Rheinland-Pfalz gab ein positives Ethikvotum. Basierend auf einer Studienskizze und weiteren Begleitdokumenten wurde ein positives Votum des Begleitforschungsausschusses der **ALL-BFM Studiengruppe** hinsichtlich der Kooperation für eine Pilotstudie zur Untersuchung eines Zusammenhangs zwischen Umweltfaktoren und genetischen Faktoren bei B-Zell ALL im Kindesalter (**CLERF-Pilot**) eingeholt.

Arbeitspaket 3

CLERF-Pilot ist als eine Pilotstudie mit einer Rekrutierung über insgesamt 12 Monate geplant. Das Studienobjekt sind Kinder und Jugendliche (0 – 17 Jahre bei Diagnose), die an B-Zell ALL erkrankt sind und im Studienzeitraum im Rahmen ihrer Therapie oder Nachsorge einen Termin in einer der Studienkliniken der ALL-BFM-Studienzentrale haben und zum Zeitpunkt der Diagnose einen offiziellen Wohnsitz in Deutschland hatten. Studienteilnehmerin bzw. Studienteilnehmer ist jeweils eine für das an B-Zell ALL erkrankte Kind sorgeberechtigte Person. Diese Person wird hinsichtlich der Exposition durch Umweltrisikofaktoren der Kinder schriftlich befragt. Zusätzlich ist eine vor Ort Expositionsmessung von ELF-MF am Wohnort des Kindes geplant. Die Rekrutierung der Studienteilnehmerinnen bzw. -teilnehmer für CLERF-Pilot erfolgt durch die Studienzentrale der laufenden klinischen Studie AIEOP-BFM ALL 2017 aus den Patientinnen und Patienten, die in AIEOP-BFM ALL 2017 eingeschlossen wurden. Der Kontakt und die Kommunikation zu den potentiellen Studienteilnehmerinnen bzw. -teilnehmern von CLERF-Pilot erfolgt ausschließlich über die ALL-BFM-Studienzentrale. Im Rahmen des Studienprotokolls der AIEOP-BFM ALL 2017 werden routinemäßig molekulargenetische und zytogenetische Untersuchungen durchgeführt, sofern eine entsprechende Einwilligung vorliegt. Diese Untersuchungen umfassen eine Chromosomenanalyse, eine Fluoreszenz-

in-situ-Hybridisierung und eine PCR (Fusionstranskripte). Die daraus gewonnenen Informationen zu genetischen Aberrationen können für CLERF-Pilot zugänglich gemacht werden.

Der Entwurf zu CLERF-Pilot umfasst wesentliche Informationen zum Studiendesign, der Expositionserhebung, dem Datenschutz und Datensicherheit sowie eine ethische Nutzen-Risiko-Abwägung. Der Fragebogen zur retrospektiven Erfassung von Umweltrisikofaktoren bei Kindern mit B-Zell ALL wurde basierend auf eigenen Vorarbeiten sowie etablierten Instrumenten erstellt und intern validiert.

Basierend auf Ergebnissen eines im Rahmen dieses Projekts ausgerichteten internationalen EMF-Workshops wurden verschiedene Szenarien zur vor-Ort-Messung von ELF-MF evaluiert. Es wurde die Untersuchung von weiteren genetischen Risikofaktoren, die über die routinemäßig im Rahmen der klinischen Studie erhobenen Informationen hinausgehen geprüft und eine Fallzahlplanung vorgenommen. Die Fallzahlplanung ergab, dass für eine Studie, die nur deutsche Patienten berücksichtigt, Patienten über einen Zeitraum von mehreren Jahren rekrutiert werden müssten, um eine ausreichende statistische Power für den Nachweis unterschiedlicher Expositionsmuster in genetischen Untergruppen zu erreichen. Gleichwohl würde eine Pilotierung mit einem Erhebungszeitraum von einem Jahr wichtige Erkenntnisse zur Teilnahmebereitschaft liefern. Ein Zeit- und Kostenplan wurde erstellt, der eine Pilotstudie in drei Arbeitsphasen gliedert:

- 12 Monate **Vorbereitungs- und Planungsphase**: Erstellen des Studienprotokolls und Erstellung von Standard Operating Procedures, Verträge mit klinischer ALL-Studie/Studien, Verträge mit Messinstitut, Antrag Ethikkommission, Antrag Datenschutz, Erstellen des Fragebogens, Absprachen mit Messinstitut zur Durchführung der Messungen, Aufbau einer Studiendatenbank.
- 12 Monate **Hauptphase**: Rekrutierung der Patienten/Patientinnen, Aufklärungsgespräche, Fragebogenbefragung, Expositionsmessungen, Dateneingabe
- 6 Monate **Auswertungsphase**: Datenprüfung, Datenauswertung, Abschlussbericht, Publikation

Daraus ergibt sich eine Gesamtlaufzeit für eine Pilotierung von 2,5 Jahren mit Gesamtkosten von insgesamt ca. 430.000 €.

Arbeitspaket 4

Basierend auf den Befunden aus vorausgegangenen **APs** wurden folgende Empfehlungen hinsichtlich der Durchführung einer Pilotstudie und einer potentiellen Hauptstudie formuliert, welche die Kernergebnisse des gesamten Vorhabens beinhalten:

- Eine Pilotstudie wie **CLERF-Pilot** ist machbar. Zu diesem Zweck wird die Kooperation mit der **ALL-BFM-Studiengruppe** empfohlen. Die Nutzung der Infrastruktur der **ALL-BFM Studie** ist wesentlich für die grundsätzliche Machbarkeit und für die praktische Durchführung von **CLERF-Pilot**. Für eine spätere Hauptstudie wird zur Steigerung der Fallzahl und Abdeckung aller potentiellen Fälle in Deutschland die zusätzliche Einbindung der CoALL-Studie empfohlen.
- Als Studiendesign wird die Wahl eines wie für **CLERF-Pilot** skizzierten Querschnittsdesigns mit retrospektiven Erhebungselementen empfohlen, solange die primäre Forschungsfrage und das Interesse die Untersuchung einer differentiellen Exposition von genetischen Subtypen wie TEL/AML1 (ETV6-RUNX1) oder hohe Hyperdiploidie und Umweltrisikofaktoren wie die Exposition durch ELF-MF ist.
- Die Verwendung eines Fragebogens, welcher etablierte Erhebungsinstrumente für verschiedene Themenkomplexe wie beispielsweise die medizinische Exposition durch ionisierende Strahlung beinhaltet, wird empfohlen. Die Pilotierung könnte verschiedene

Erhebungstechniken prüfen. Von Teilnehmern selbst ausgefüllte Fragebögen könnten mit assistierter Fragebogenerhebung mittels CATI (Computer Assisted Telephone Interviewing) oder persönlicher Befragung in den Studienkliniken in Bezug auf Aufwand und Qualität der Angaben gegenübergestellt werden.

- Hinsichtlich der Bestimmung von ELF-MF Exposition sollte für alle rekrutierten Personen ausschließlich Geocode-basierte Distanzbestimmung zu Hochspannungsleitungen, Bahntrassen und Umspannwerken genutzt werden (**Szenario 1**). Zusätzlich wäre eine Messung von ELF-MF vor-Ort mit Hilfe eines zugesandten Messgeräts für die Hälfte der Familien möglich, die einer vor-Ort-Messung einwilligen (**Szenario 2**). Ebenso sollte eine Messung von ELF-MF mit persönlichem Besuch durch einen qualifizierten Mitarbeiter eines Messinstituts (**Szenario 3**) für die Hälfte der Familien, die in eine vor-Ort-Messung einwilligen, in Betracht gezogen werden. Für eine Hauptstudie ist abhängig von den Erfahrungen der Pilotstudie zu prüfen, ob aufgrund der besseren Skalierbarkeit, **hohen Objektivität und Vermeidung eines Selektionsbias** ausschließlich **Szenario 1** verwendet wird.
- Für eine Pilotstudie und eine mögliche Hauptstudie wird die Verwendung der durch die klinischen Studien routinemäßig erhobenen genetischen Untersuchungen empfohlen. Diese Untersuchungen sind durch das Studienprotokoll gedeckt, sind durch bereits eingeholte Ethik- und Datenschutzvoten abgesichert und entsprechen in ihrem Umfang dem aktuellen Stand der Wissenschaft. Zusätzlich würde damit vermieden, dass die Kinder und Eltern zusätzlichen Belastungen ausgesetzt werden, wenn beispielsweise eine Einwilligung für zusätzliche genetische Untersuchungen eingeholt werden müsste, für die ein zusätzliches ärztliches Aufklärungsgespräch notwendig ist. Würde dennoch Interesse an weiteren Untersuchungen bestehen, wäre die Keimbahndiagnostik als Erweiterung zu den bereits routinemäßig durchgeführten Untersuchungen zu diskutieren. Da diese Untersuchung nicht im Protokoll verankert ist, müsste ihre Durchführung gut begründet sein und von einer belastbaren Hypothese ausgehen. Solange es sich um eine rein explorative Untersuchung handelt, wird diese Option nicht empfohlen. Eine Keimbahndiagnostik bringt komplexe ethischen Fragen mit entsprechend höherem Aufklärungsaufwand mit sich, bedeutet einen zusätzlichen Aufwand für Kinder und Familien, und verursacht weitere finanzielle Kosten.
- Für eine Pilotierung wird eine Rekrutierungszeit von einem Jahr bei einer zu erwartenden Fallzahl von ca. 330 für die Fragebogenerhebung und 110 für die vor-Ort Expositionsbestimmung von ELF-MF empfohlen. Dieser Zeitraum wird eine ausreichende Grundlage bereitstellen, um die Teilnahmebereitschaft und Prävalenzen von Umweltrisikofaktoren zu schätzen, welche wichtige Grundlage für eine noch genauere Fallzahlplanung für eine Hauptstudie sind. In der Beschreibung eines möglichen Studiendesigns für einen Piloten wurde aus Effizienzgründen die Beschränkung auf die **ALL-BFM-Studie** vorgenommen. Um die fehlenden Fälle aus der CoALL-Studie auszugleichen, könnten zusätzlich zu den im Studienjahr neu an B-Zell ALL erkrankten Kinder ebenfalls solche Kinder eingeschlossen werden, die im Vorjahr erkrankt, bzw. behandelt wurden und im Studienjahr einen Nachsorgetermin haben. Für eine Hauptstudie wird die Erweiterung auf die CoALL nahegelegt. Zusätzlich empfiehlt sich für eine potentielle Hauptstudie die Erweiterung des Studienzeitraums auf mehrere Jahre, um ausreichend Fälle für belastbare Analysen mit einer ausreichenden Power auch bei moderaten Effektstärken gewinnen zu können.
- Die Auslegung einer Pilotstudie entsprechend dem vorgestellten Zeit- und Kostenplan wird empfohlen. Im Rahmen des Piloten können wesentliche Erkenntnisse hinsichtlich der Teilnahmebereitschaft und der damit verbundenen Anzahl an rekrutierbaren Fällen für eine mögliche Hauptstudie gewonnen werden.

- Für die Durchführung einer Pilotstudie und einer Hauptstudie sollte basierend auf den Vorarbeiten dieser Machbarkeitsstudie, ein Datenschutzvotum bei der verantwortlichen Datenschutzbehörde des Bundeslandes, in dem die Projektleitung für den Piloten bzw. der Hauptstudie sitzt, eingeholt werden. Die Beachtung der durch den Landesbeauftragten für Datenschutz und Informationsfreiheit Rheinland-Pfalz aufgeführten Anmerkungen wird empfohlen. Hinsichtlich eines Ethikvotums muss ein Antrag für eine Pilotstudie bzw. Hauptstudie bei der verantwortlichen Ethik-Kommission des Bundeslandes, in dem die Projektleitung eines Piloten bzw. eine Hauptstudie ansässig ist, erfolgen. Der in dieser Machbarkeitsstudie erarbeitete Ethikantrag mit Rückmeldungen der Ethik-Kommission kann hierfür als Ausgangspunkt verwendet werden.
- Würde der Auftraggeber die Ausweitung der potentiell einzubeziehenden Studien auf den europäischen Raum zwecks Erhöhung der Fallzahlen in Betracht ziehen, wird eine gesonderte Machbarkeitsprüfung und eine eigenständige Pilotierung empfohlen. Die frühe und enge Einbindung und Beratung durch die IARC in der Phase einer Machbarkeitsprüfung wäre hilfreich, da die IARC als Liaison zu internationalen Studien tätig werden kann. Die IARC unterhält ein internationales Netzwerk und besitzt umfangreiche Erfahrung in der Durchführung und Koordination von internationalen Studien.

Schlussbetrachtung

Die Machbarkeitsstudie hat Empfehlungen und Vorschläge geliefert, ob und wie eine Pilot- und Hauptstudie zur Untersuchung des Zusammenhangs von Umwelt- und genetischen Faktoren bei der Entstehung von Leukämie im Kindesalter durchgeführt werden könnte, welche Fallzahlen dafür nötig wären und welche Kosten dabei entstehen. Auf dieser Basis wird nun BfS-intern geprüft, ob eine Pilotstudie an die Machbarkeitsstudie im Rahmen eines Ressortforschungsvorhabens anschließen wird.

Laufende Vorhaben (Statusberichte)

der vom BfS begleiteten Strahlenschutz-Forschungsvorhaben des BMUV

Themenbereich 01 - Natürliche Strahlenexposition

Untersuchung der Abhängigkeit der Radonkonzentration in der Bodenluft in rund 1 Meter Tiefe von Wetterparametern für Böden mit verschiedenen Permeabilitäten und Nutzungshistorie

Forschungskennzeichen 3621S12240	Beginn 01.11.2021	Ende 31.07.2024	Fördermittel 368.067,00 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Sachverständigenbüro Dr. J. Kemski			
Projektleitung Dr. J. Kemski	Fachbegleitung BfS Dr. E. Petermann	verantwortlich für den Text Dr. J. Kemski	

Hintergrund

Das geogene Radonpotenzial bestimmt zusammen mit Gebäudeeigenschaften und Nutzerverhalten in wesentlichem Maße die Höhe der Radonkonzentration in der Raumluft. Es kann räumlich in Abhängigkeit von Gesteins- und Bodeneigenschaften variieren und hängt entscheidend von der Radonkonzentration in der Bodenluft und der Gaspermeabilität des oberflächennahen Bodens ab. Beide Parameter können durch Umweltfaktoren (z. B.: Witterung) beeinflusst werden und auch zeitliche Unterschiede aufweisen.

Bodenluftdaten in Deutschland sind in der Regel mittels standardisierter Kurzzeitmessungen erhoben worden. Hierbei ist der standortbezogene Einfluss der zeitlichen Variabilität auf die Messwerte nicht ohne Weiteres zu quantifizieren. Die Beschreibung und mögliche Quantifizierung dieser Einflüsse mit Hilfe von Bodenluftmessungen und Modellrechnungen ist Ziel des Vorhabens.

Zielsetzung

An drei Standorten, die sich im Wesentlichen in der Gasdurchlässigkeit des Bodens unterscheiden sowie einem Standort mit anthropogener Überprägung sollen Feldmessungen der Radonkonzentrationen und der Gasdurchlässigkeit des oberflächennahen Bodens über einen Zeitraum von 18 Monaten durchgeführt werden.

An jedem Standort sind kontinuierliche Radonmessungen in drei unterschiedlichen Tiefen sowie aktive Messungen in 1 m Tiefe mit zusätzlicher Bestimmung der Gasdurchlässigkeit in 14-tägigen Intervallen vorgesehen. Daneben sollen kontinuierlich Witterungs- und Bodenparameter aufgenommen werden, um mögliche Korrelationen zur Radonkonzentration erkennen und quantifizieren zu können.

Nach Abschluss der Messkampagnen sollen alle Messdaten zusammengeführt und mit Hilfe multivariater statistischer Methoden auf Korrelationen und Abhängigkeiten untersucht werden. Ziel ist die Benennung signifikanter Abhängigkeiten der Radonaktivitätskonzentration von äußeren Parametern, um dies ggf. für Prognosen der Radonkonzentration in der Bodenluft nutzen zu können.

Methodik

Konzeption der Messstellen

Konkret sind an jedem Standort kontinuierliche Messungen in drei unterschiedlichen Tiefen mit einem Messintervall von 1 Stunde vorgesehen. Die Messungen sollen in Tiefen von 40, 70, 100 cm stattfinden. Parallel dazu sollen an drei weiteren Pegeln in einem 14-tägigen Rhythmus aus jeweils 1 m Tiefe Bodenluftproben entnommen, die Radonkonzentration in der Bodenluft gemessen und zusätzlich die Gasdurchlässigkeit des Bodens bestimmt werden. Zusätzlich sind Witterungs- und

Bodenparameter (z. B.: Temperatur, Luftdruck, Feuchte, Niederschlag, Wind) in 1 Stunden-Intervallen zu erheben.

Die Probenahme der Bodenluft und die aktiven Kurzzeitmessungen werden nach der von den Auftragnehmern seit vielen Jahren für derartige Untersuchungen genutzten Vorgehensweise (u. a. Erstellung der Karten der Radonkonzentration in der Bodenluft und des geogenen Radonpotenzials) durchgeführt. Die Datenerhebung erfolgt somit mittels eines Standardverfahrens, welches dem heutigen Stand der Technik gemäß DIN ISO 11665-11 entspricht.

Kontinuierliche zeitauflösende Messungen der Radonkonzentration in der Bodenluft über lange Zeiträume stellen keine Standardanwendung dar, so dass hierfür – auch unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel – zunächst eine geeignete feldtaugliche und möglichst robuste Messmimik entwickelt und erprobt werden musste. Diese sollte im besten Fall bei allen Boden- und besonders Witterungsbedingungen ausreichend robust sein, um durchgängige und möglichst unterbrechungsfreie Messungen zu ermöglichen. Konkret wurden die verwendeten aktiven Messgeräte in stationäre Pegel eingebaut. Dadurch sollte eine sichere Abdichtung des Bohrloches und ggf. der Messmimik gegenüber der Atmosphäre und eine Beprobung unter stets identischen Bedingungen gewährleistet werden. Zudem sollte ein direkter Wassereintrag in den Bereich des eingebauten Messgerätes nach Möglichkeit verhindert werden.

Die meteorologischen Daten werden mittels einer kommerziell erhältlichen Wetterstation mit entsprechendem Datenlogger erfasst. Die Aufzeichnung bzw. Auswertung erfolgt in 1 h-Intervallen.

Auswahl und Einrichtung der Messflächen

Laut Leistungsbeschreibung sollten die Böden auf den Messflächen unterschiedliche Gaspermeabilitäten aufweisen. Als Orientierung wurden die „Kriterien“ niedrig ($<10^{-13}$ m²; z. B. Lehm), mittel (10^{-13} bis 10^{-12} m², z. B. Schluff) und hoch ($>10^{-12}$ m², z. B. Sand, Kies) vorgegeben. Die Höhe der Radonkonzentration spielte hierbei keine Rolle. Eine Nutzung der Flächen als Wiese oder Feld sollte präferiert werden. Eine vierte Messfläche sollte sich in einem anthropogen überprägten Gebiet mit einem „künstlichen“ Bodenaufbau befinden.

Nach umfangreichen Voruntersuchungen inklusive Probemessungen zwischen Februar und Mai 2022 wurden schließlich konkret je eine Messfläche auf einem Gelände der Universität Bonn, je einem Wasserwerk in Köln und Krefeld sowie einer Landesbehörde in Essen ausgewählt.

Als Messfläche mit einer niedrigen Gaspermeabilität wurde ein Areal auf dem Gelände einer Landesbehörde in Essen gewählt. Geologisch handelt es sich um Lössablagerungen über Schluff- und Tonsteinen der Sprockhöveler Schichten (Karbon). Die Messfläche mit der mittleren Gaspermeabilität liegt auf dem Gelände der Wassergewinnungsanlage in Krefeld. Geologisch handelt es sich um Terrassensande und -kiese, die oberflächennah von Hochflut- und Auenlehmen überlagert werden. In Abhängigkeit von der konkreten Lage auf dem Gelände sind lokal im oberflächennahen Bereich auch höhere Gasdurchlässigkeiten zu beobachten. Die Messfläche mit der hohen Gaspermeabilität befindet sich auf dem Gelände eines Wasserwerkes in Köln. Geologisch handelt es sich um fein- bis grobsandige quartäre Terrassenablagerungen des Rheins. Die Messfläche im urbanen Bereich mit anthropogener Überprägung ist in Bonn auf einem Gelände eines Universitätsinstitutes angesiedelt. Vor ca. 25 bis 30 Jahren wurde hier eine Lysimeteranlage mit anschließendem „Neuaufbau“ des Bodens eingerichtet.

Folgende Messstellen wurden an jedem der vier Standorte eingerichtet und werden seitdem betrieben:

- 1 Dauermessstelle mit drei unmittelbar benachbarten Pegeln für eine kontinuierliche Radonmessung in der Bodenluft (Zeitintervall: 1 Stunde) mit 3 unterschiedlichen Messtiefen (40, 70

und 100 cm) für eine geplante Messdauer von 18 Monaten; zusätzlich in den 3 genannten Tiefen Bestimmung der Bodentemperatur und der Bodenfeuchte (jeweils in 1 h-Intervallen)

- 3 Pegelmessstellen für 14-tägige (aktive) Kurzzeitmessungen der Radonkonzentration in der Bodenluft in räumlicher Nähe zu den Dauermessstellen (ca. 10 bis 20 m Entfernung) mit Probenahmen der Bodenluft aus jeweils 1 m Tiefe
- kontinuierliche Erhebung meteorologischer Parameter (Lufttemperatur, -druck, -feuchte, Niederschlag, Windgeschwindigkeit) in ca. 1,0 m über Grund (jeweils in 1 h-Intervallen).

Probemessungen

Laut Leistungsbeschreibung sollte in einer 6-monatigen Testphase geprüft werden, ob Daten in der gewünschten Art und dem notwendigen Umfang erhoben werden können. Die Einrichtung der o.g. Messstellen erfolgte zwischen Mitte Juli und Mitte Oktober 2022. Mit durchgängigen Messungen an allen Standorten wurde im November 2022 begonnen.

Ergebnisse

Die bis zum Jahresende 2022 gewonnenen Daten der kontinuierlichen Radonmessungen in der Bodenluft sind weitgehend vollständig. Kurzzeitige Ausfälle einzelner Messgeräte waren im Wesentlichen auf erhöhte Feuchtegehalte im Boden während des Spätherbstes zurückzuführen. Die aktiven Radonmessungen in 1 m Tiefe konnten wie geplant durchgeführt werden. Gleiches gilt für die Erhebung der Wetterdaten. Hierfür liegen vollständige Messreihen vor.

Geplante Weiterarbeit

Die kontinuierlichen sowie intervallmäßigen Radonmessungen und die Wetterbeobachtungen an den vier Standorten sollen wie beschrieben bis zum Ende der 6-monatigen Testphase im April 2023 fortgesetzt werden. Anschließend muss der Auftraggeber entscheiden, ob die Messungen für weitere 12 Monate fortgesetzt werden.

Untersuchung der Abhängigkeit von Radoneintrittsrates und Luftwechsel von Witterungsparametern und Nutzerverhalten als Grundlage für die Beurteilung der Radondichtheit von Gebäuden

Forschungskennzeichen 3621S12220	Beginn 02.07.2021	Ende 02.04.2024	Fördermittel 104.904,45 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Dr. Thomas Haumann Sachverständigenbüro für Radonanalytik und Baubiologie			
Projektleitung Dr. Thomas Haumann	Fachbegleitung BfS Dr. Nils Suhr	verantwortlich für den Text Dr. Thomas Haumann	

Hintergrund

Aus den Recherchen zu Arbeitspaket 1 kann festgestellt werden, dass sich bereits eine Vielzahl von Autoren seit Ende der 1980er Jahre mit dem Thema Radon in Innenräumen und auch insbesondere mit den Ursachen und dem Mechanismus des Radoneintrags in Innenräume beschäftigen. Als zentrale und treibende Kraft, mit welcher das Radon in die Innenräume gelangt, wird bereits vielfach die Druckdifferenz in Gebäuden durch Winddruck und Temperaturdifferenz genannt. Im konkreten Zusammenhang mit der Radonkonzentration im Innenraum und der Radon-Eintrittsrates wurden 41 Publikationen als besonders relevant herausgestellt. Es werden in den meisten Fällen einzelne Wetterparameter (Temperatur, Wind, Druck) im Zusammenhang mit der Radon-Raumluftkonzentration, der Radoneintrittsrates und der Luftwechselzahl untersucht und anhand von Beispielobjekten dokumentiert. Zudem wurden 19 Publikationen vorgestellt, welche sich mit dem Luftwechsel in Gebäuden, der Bestimmung der Luftwechselzahl in Gebäuden und der Bestimmung der Druckdifferenzen im Zusammenhang mit Schadstoffbelastungen beschäftigen.

Zielsetzung

Das Forschungsvorhaben behandelt die Untersuchung der Abhängigkeit von Radoneintrittsrates und Luftwechsel von Witterungsparametern und Nutzerverhalten als Grundlage für die Beurteilung der Radondichtheit von Gebäuden. In diesem Vorhaben sollen die beiden Zielgrößen für ausgewählte Gebäude kontinuierlich oder mittels typischer Wetterlagen abdeckenden Stichproben ermittelt werden. Dazu ist der aktuelle Stand von Forschung und Technik zu recherchieren. Geprüft werden soll dabei auch, welches in Innenräumen vorkommende, leicht messbare Gas anstelle einer Untersuchung mit Tracergas zur Bestimmung des Luftwechsels herangezogen werden kann. Auf der Basis der Ergebnisse sind die typischen Abhängigkeiten beider Größen von der Witterung zu untersuchen und der Einfluss des Nutzerverhaltens manuelle Lüftung zu ermitteln. Ziel ist es mit Hilfe der aus experimentellen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse und verfügbaren Modellen zu Innenraumnoxen Methoden zur Schätzung der benötigten Jahresmittelwerte zu entwickeln.

Das Forschungsvorhaben gliedert sich in 5 Arbeitspakete:

Arbeitspaket 1: Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik, abgeschlossen

Arbeitspaket 2: Planung einer Messstrategie und Abstimmung mit dem Auftraggeber, abgeschlossen

Arbeitspaket 3: Auswahl von Gebäuden und Durchführung der Messungen, abgeschlossen

Arbeitspaket 4: Auswertung der Zeitreihen, Bestimmung von Radoneintrittsrates u. Luftwechsel, in Bearbeitung

Arbeitspaket 5: Zusammenfassende Auswertung und Modellentwicklung, in Bearbeitung

Methodik

Die Planung der Messstrategie und die Durchführung wurde nach den Arbeitspaketen 1 und 3 in Abstimmung mit dem Auftraggeber konkretisiert. Nach der Auswahl von Gebäuden wurden Untersuchungen in den Gebäuden in 3 Stufen geplant und durchgeführt.

Auswahl von Gebäuden

Im Rahmen des Arbeitspaketes 3 wurden vier Gebäude an verschiedenen Standorten und Klimazonen in Deutschland ausgewählt.

- Objekt 1:** Wittingen, Niedersachsen
Freistehendes Einfamilienhaus, Bj. ca. 1975, Büroraum im UG/Gartengeschoss
- Objekt 2:** Bolsterlang / Nähe Oberstdorf, Bayern
Freistehendes Mehrfamilienhaus, Bj. 1978, Wohnraum im UG/Gartengeschoss
- Objekt 3:** Deckersberg / Happurg in Mittelfranken, Bayern
Freistehendes Haus, Altbau Bj. 1778 – im Jahr 2015 kernsaniert, nicht unterkellert
Wohnraum im EG
- Objekt 4:** Essen, NRW
Freistehend, Bj. 1951, durchgehende Beton-Bodenplatte, modernisiert 1989 u. 2008
Hobbyraum im UG

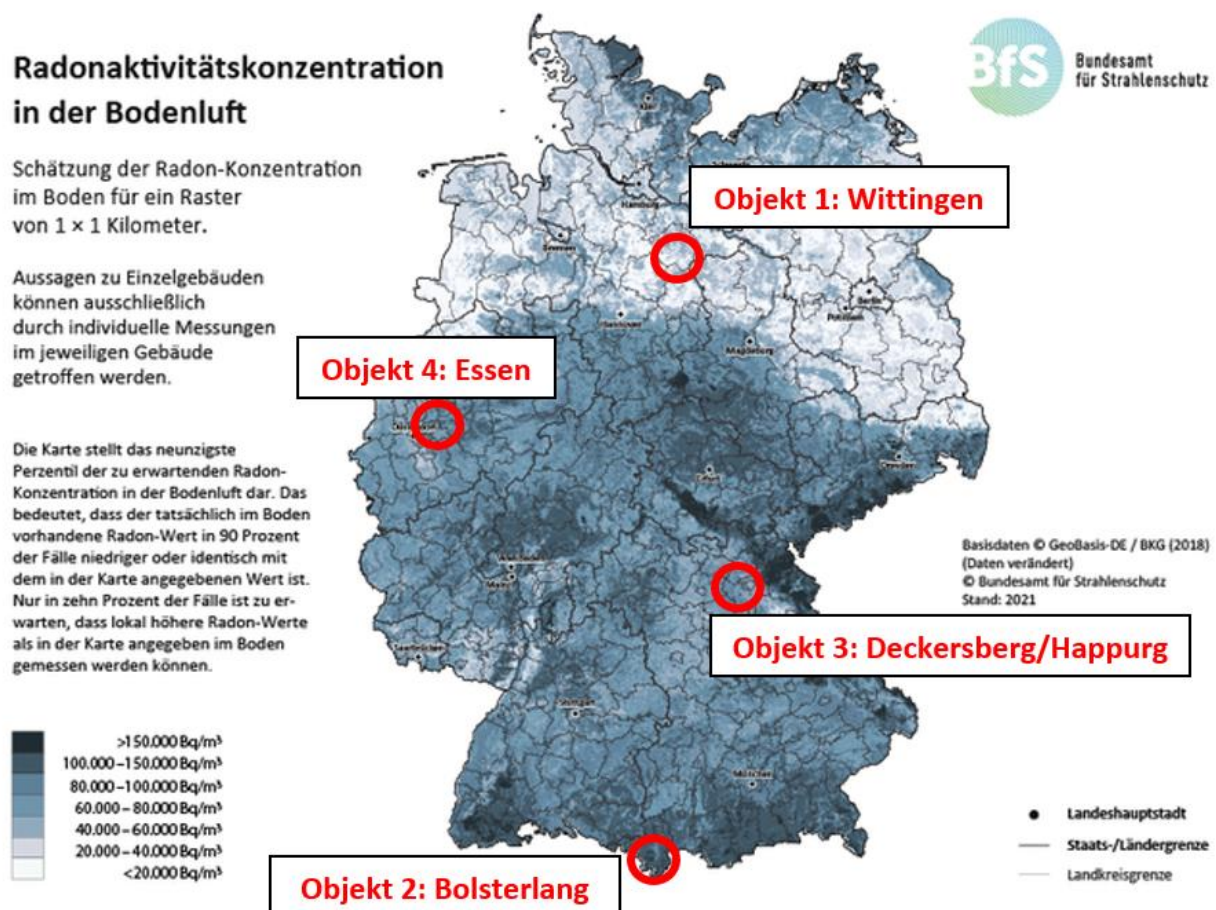


Abbildung 1 Lage der Messobjekte auf der Deutschlandkarte mit Angabe der Radonkonzentrationen in der Bodenluft (BfS)

Stufe 1 - Bestandsaufnahme und Erstmessungen

Bei der Erstmessung wurde jeweils eine umfassende Bestandsaufnahme des Gebäudes durchgeführt. Im Mittelpunkt standen hierbei Messungen der Radon-Aktivitätskonzentration in der Raumluft im definierten Unterdruck (50 Pascal) nach der erweiterten Blower-Door Methode (Rn50-Test) bis zur Gleichgewichtskonzentration. Weiterhin erfolgten die Bestimmung der Radon-Eintrittsrates sowie die Lokalisierung und Quantifizierung von Radon-Eintrittsstellen durch Radon-Sniffing im Unterdruck. Weiterhin wurde der n^{50} -Wert gemessen und der Infiltrationsluftwechsel nach DIN EN ISO 9972 bestimmt. Zusätzlich wurden Messungen der Radon-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft inkl. Permeabilitätsmessungen und Bestimmungen der Radonpotentials (RP) je Standort durchgeführt. Nach den Erstmessungen wurden jeweils die ersten Messintervalle der saisonalen Messungen gestartet.

Stufe 2 - Saisonale Messungen

Die saisonalen Messungen wurden in jedem Objekt mindestens 1mal pro Jahreszeit über min. 2 Wochen durchgeführt. Es wurden hierbei zeitauflösende Messungen von Differenzdruck, Luftdruck, Innen- und Außenklima, Radon-Aktivitätskonzentration in der Raumluft nach DIN EN ISO 11665-5 und zusätzlich an erkannten Eintrittsstellen (Radon-Sniffing) durchgeführt. Weiterhin wurde der Luftwechsel mit Tracergas CO_2 nach der Konzentrations-Abklingmethode jeweils abhängig von der Raumnutzung (Quellstärke Mensch) nach DIN EN ISO 12569 bestimmt. Zusätzlich wurde der Luftwechsel nach der Konzentrations-Abklingmethode mit der Tracergas SF_6 nach DIN EN ISO 12569 in einem Objekt exemplarisch bestimmt, um die Daten aus den CO_2 -Messungen zu verifizieren.

Stufe 3 - Langzeitmessungen

Die Langzeitmessungen wurden in jedem Objekt über 12 Monate durchgeführt. Es wurden hierbei zeitauflösende Messungen von Luftdruck, Innen- und Außenklima, Differenzdruck und Radon-Aktivitätskonzentration in der Raumluft während der normalen Nutzung durchgeführt. Zusätzlich wurden integrierende Messungen der Radon-Aktivitätskonzentration in der Raumluft nach DIN EN ISO 11665-4 an jeweils 3 Messpunkten durchgeführt.

Ergebnisse

Ergebnisse liegen zu den Arbeitspaketen 1 bis 3 vor. Derzeit sind die Arbeitspakete 4 und 5, welche die Auswertung und die Modellierung betreffen, noch in Bearbeitung.

Stufe 1 - Bestandsaufnahme und Erstmessungen

Bei der Erstmessung wurde jeweils eine umfassende Bestandsaufnahme des Gebäudes - wie unter 4.2 beschrieben - durchgeführt.

Es zeigen sich in zu untersuchenden Räumen in allen Objekten deutlich auffällige Radon-Eintrittsrates. Die Radon-Aktivitätskonzentration in der Raumluft im definierten Unterdruck (50 Pascal) nach der erweiterten Blower-Door Methode (Rn₅₀-Test) liegen bei 400 bis über 3000 Bq/m³ (Rn₅₀-Werte). Es ist daher auch im langzeitlichen Mittel mit auffällig hohen Radonkonzentrationen zu rechnen, was bereits durch die abgeschlossenen Messungen (siehe 5.3) bestätigt werden konnte. Die gemessenen n^{50} -Werte liegen im typischen Bereich von Bestandsgebäuden zwischen 2/h und 4/h. In allen Objekten können beim Radon-Sniffing signifikante Radon-Eintrittsstellen nachgewiesen werden mit Radonkonzentrationen zwischen 10 und 45 kBq/m³. Die Radon-Aktivitätskonzentrationen in der Bodenluft liegen bei 15 und 85 kBq/m³.

Stufe 2 - Saisonale Messungen

Die Ergebnisse der saisonalen Messungen sind in den Diagrammen 1 bis 3 beispielhaft für die Herbstmessungen im Objekt 4 (Essen) dargestellt. In dem Messintervall über 14 Tage wurde der Luftwechsel im Zeitverlauf aus den CO₂-Konzentrationsverläufen ermittelt und die Radon-Eintrittsraten bestimmt. Bei der weiteren Auswertung sollen die Radon-Eintrittsraten im Zusammenhang mit den zugehörigen Witterungsparametern (Temperatur, Niederschlag, Wind, Druckgradient etc.) sowie den Ergebnissen der Differenzdruckmessungen betrachtet werden. Die Luftwechselmessungen nach der Konzentrations-Abklingmethode mit der Tracergas SF₆ nach DIN EN ISO 12569 zeigen bei Messungen über 10 Tage sehr gute Übereinstimmungen mit den Daten aus den CO₂-Messungen.

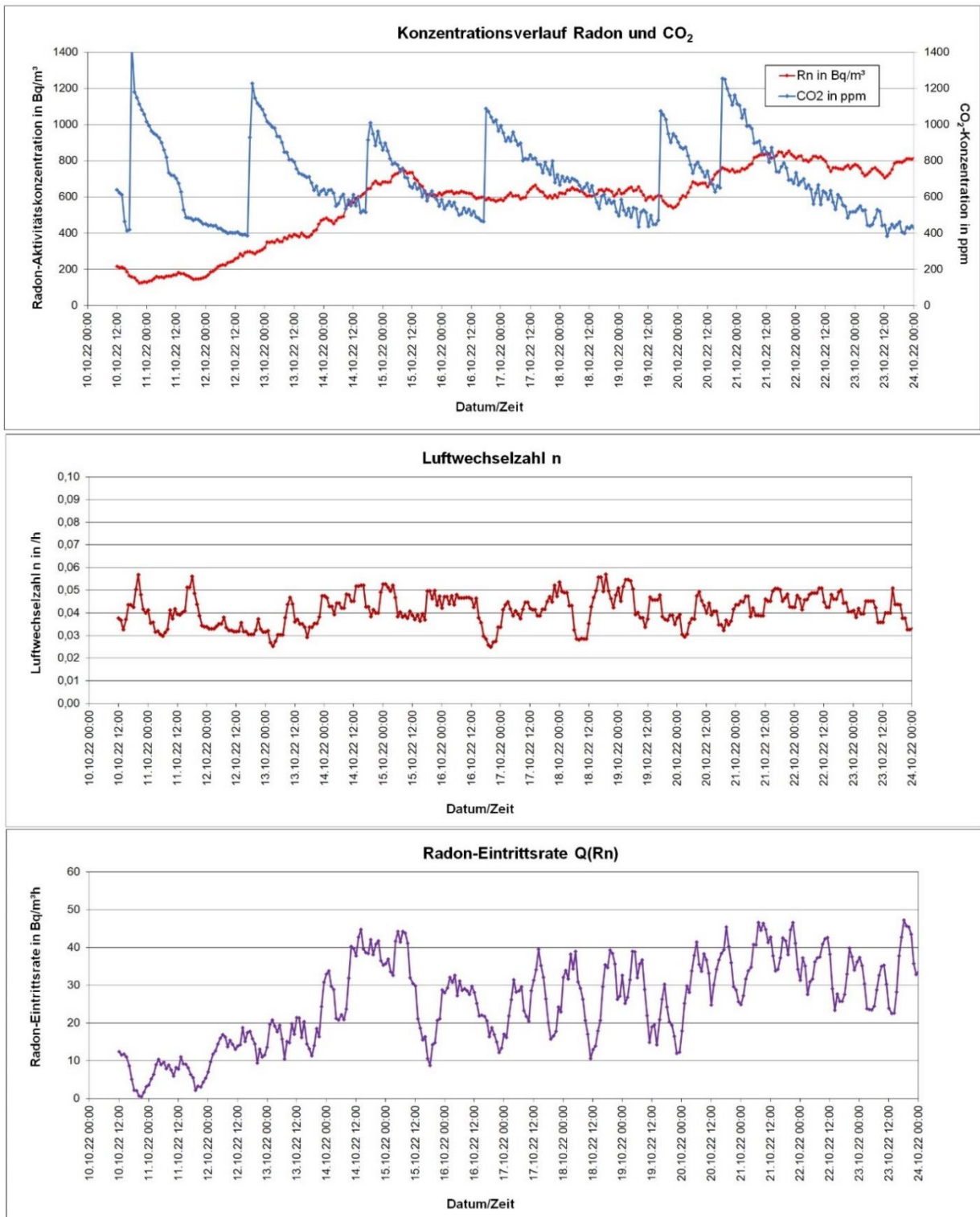


Abbildung 1 bis 3 Ergebnisse der saisonalen Herbstmessung in Objekt 4 in Essen mit Konzentrationsverläufen von CO₂, Radon und den daraus berechneten Luftwechselzahlen und Radon-Eintrittsraten im Zeitverlauf

Stufe 3 - Langzeitmessungen

Der Verlauf der Radon-Aktivitätskonzentrationen in der Raumluft ist im Jahresverlauf beispielhaft in Diagramm 4 für das Objekt 1 in Bolsterlang dargestellt. Es zeigt sich ein typischer Jahresgang mit tendenziell höheren Radonkonzentrationen in der Heizperiode bei überlagerten starken kurzzeitigen Konzentrationsschwankungen.

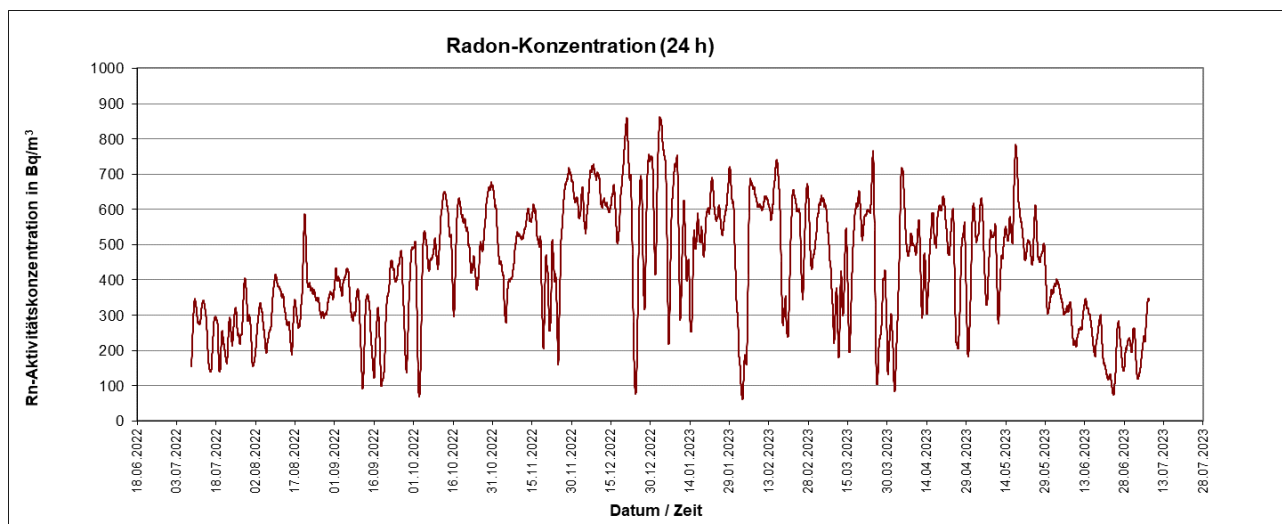


Abbildung 4 Verlauf der Radon-Aktivitätskonzentrationen in der Raumluft im Objekt 1 (Bolsterlang / Nähe Oberstdorf, Bayern), gleitende 24h Mittelwerte

In der nachfolgende Tabelle 1 sind die Ergebnisse der gemittelten Radon-Aktivitätskonzentrationen in der Raumluft für alle Objekte nach Abschluss der Messperiode als Jahresmittelwerte (zeitauflösend und integrierend) dargestellt. Grundsätzlich zeigen sich gute Übereinstimmungen der zeitauflösenden und integrierenden Messungen mit Abweichungen bis zu 10 %. In Objekt 3 liegt der Mittelwert aus den zeitauflösenden Messungen ca. 35 % über dem Wert der integrierenden Messung.

Tabelle 1 Radon-Aktivitätskonzentrationen in der Raumluft - Jahresmittelwerte

	Messzeit	Radon-AK in Bq/m ³ zeitauflösend (Mittelwert)	Radon-AK in Bq/m ³ integrierend
Objekt 1: Bolsterlang / Nähe Oberstdorf, Bayern	07.07.22 - 07.07.23	440	400
Objekt 2: Wittingen, Niedersachsen	17.08.22 - 05.07.23	350	310
Objekt 3: Deckersberg in Mittelfranken, Bayern	08.07.22 - 07.07.23	880	650
Objekt 4: Essen, NRW	26.09.22 - 29.09.23	460	460

Geplante Weiterarbeit

Die Arbeitspakete 4 und 5 befinden sich noch in Bearbeitung. Hier geht es um die detaillierte Auswertung der Zeitreihen mit Bestimmung von Radoneintrittsraten und Luftwechselraten im zeitlichen Gang für alle saisonalen Messungen und die zusammenfassende Auswertung und Modellentwicklung. Die Berechnung der Luftwechselraten erfolgt anhand der CO₂-Konzentrationen über die Exponentialfunktion (Konzentrations-Abklingmethode). Die Radon-Eintrittsraten werden im Zeitverlauf aus den Daten zum Luftwechsel und der Radonkonzentrationen abgeleitet.

Die Analysen von Abhängigkeiten erfolgen nach:

- Temperaturdifferenz (in/out) und Differenzdruck
- Rn-Eintrittsraten und Differenzdruck
- Rn-Eintrittsraten und Temperatur
- Rn-Eintrittsraten und Niederschlag (Bodenfeuchte)
- Nutzerverhalten/Witterung und Luftwechsel
- Druckgradient und Radon-Eintrittsraten
- Gewichtung der Abhängigkeiten

Für die Modellentwicklung sollen KI-Systeme (open-AI, Chat GPT) zum Einsatz kommen.

Mikroskalige Modellierung von UV-Belastungen in urbanen Umgebungen für verschiedene Bevölkerungsgruppen zur Hautkrebsprävention

Forschungskennzeichen 3621S72430	Beginn 01.01.2022	Ende 30.07.2023	Fördermittel 149.511,60 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer pecanode GmbH			
Projektleitung Dr. Matthias Sühling	Fachbegleitung BfS Dr. Cornelia Baldermann	verantwortlich für den Text Dr. Matthias Sühling Katrín Gehrke Helge Knoop	

Hintergrund

Einen kombinierten Ansatz zur Simulation explizit von UV- und Hitzebelastung inklusive der beeinflussenden Parameter im mikroskaligen Raum, wie z. B. für Außenbereiche von Kindergärten oder Schulen, bietet das GIS-basierte Stadtklimamodell PALM-4U (<https://palm.muk.uni-hannover.de/trac/wiki/palm4u>). PALM-4U ist eine freie Software und kann unter den Bedingungen der GNU General Public License (v3) weiterverbreitet und/oder modifiziert werden. PALM-4U enthält bereits ein UV-Modul und ein Hitzemodul (https://palm.muk.uni-hannover.de/trac/wiki/doc/app/biometeorology_parameters). Das derzeit vorhandene, sich nicht weiterentwickelnde UV-Modul arbeitet mit UV-Bestrahlungsstärken, die in Bezug auf die Wirkung von UV-Strahlung auf die Initiierung der körpereigenen Vitamin-D-Synthese gewichtet sind. Da alle Aussagen zur gesundheitlichen Wirkung von UV-Strahlung auf Basis der sonnenbrandwirksamen (erythemalen) UV-Bestrahlungsstärke erfolgen, soll dieses vorhandene UV-Modul ersetzt werden.

Zielsetzung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist die erythemgewichtete UV-Bestrahlungsstärke mit hoher räumlicher sowie zeitlicher Auflösung zu modellieren und ein entsprechendes UV-Modul in das Stadtklimamodell PALM-4U zu integrieren. Für die spätere, breite Anwendbarkeit des UV-Moduls in PALM-4U ist darauf zu achten, dass das UV-Modul ressourcenschonend bezüglich Speicherkapazität und benötigter Rechenressourcen implementiert wird, sodass Anwendungen auch auf üblichen Laptops gerechnet werden können.

Durchführung

Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik

Mittels einer Literaturrecherche wird zunächst der aktuelle Kenntnisstand zu den physikalischen Prozessen des UV-Strahlungstransfers in urbanen Bereichen sowie zu Möglichkeiten für dessen Modellierung auf der Mikroskala eruiert. Dabei werden insbesondere der Einfluss von Gebäuden und Bäumen auf den UV-Strahlungstransfer sowie die Relevanz von Reflexionen herausgearbeitet. Weiterhin werden Referenzen verfügbarer atmosphärischer UV-Strahlungstransfermodelle zusammengetragen.

Methodenbewertung

Die im Rahmen der Literaturrecherche erfassten Methoden und UV-Strahlungstransfermodelle werden hinsichtlich ihrer Genauigkeit sowie ihrer Vor- und Nachteile für eine Implementierung in PALM-4U geprüft. Zudem werden die Skalierbarkeit, der Speicherplatzbedarf sowie die benötigten

Rechenressourcen der ausgewählten Methodiken bewertet. Ziel ist es zu entscheiden, welcher methodische Ansatz für das Vorhaben am besten geeignet ist.

Planung der Implementierung des UV-Moduls und Umsetzung

Es wird ein detaillierter Plan zur Implementierung des UV-Moduls in die durch PALM-4U bereitgestellte Modellstruktur erstellt und das Datenformat und die Datenübergabe für die Kopplung von PALM-4U zum ausgewählten UV-Strahlungstransfermodell definiert.

Bereitstellung ausgewählter UV-Szenarien/Kopplung PALM-4U und externes Strahlungsmodell

Mittels des ausgewählten UV-Strahlungstransfermodells wird für ausgewählte Szenarien die an der urbanen Grenzschicht ankommende erythemwirksame UV-Bestrahlungsstärke bereitgestellt. Eine Datenkonvertierung wird entwickelt und in PALM-4U integriert, um die Ausgaben des UV-Strahlungstransfermodells in ein PALM-4U-lesbares Format zu bringen.

Implementierung des UV-Moduls

Die Daten aus dem UV-Strahlungsmodell werden in PALM-4U eingelesen. Abschattungen durch Gebäude, Pflanzenbestände und andere Objekte sind für den zur jeweiligen Tageszeit herrschenden Sonnenwinkel zu berechnen. Auf Basis dieser Daten ist die lokal wirkende, erythemwirksame UV-Bestrahlungsstärke zu berechnen und als UV-Index auszugeben.

Evaluierung und Demonstration der Funktionalität

Die modellierten Ergebnisse sind für ausgewählte Standorte zu evaluieren. Nach erfolgter Evaluierung ist die Funktionalität des UV-Moduls zu demonstrieren.

Ergebnisse

Literaturrecherche

Die Literaturrecherche führte zu folgenden Erkenntnissen:

Die diffuse Strahlung im UV-Spektralbereich übersteigt den direkten Anteil. Messungen zeigen, dass der diffuse Anteil je nach Wellenlänge anisotrop verteilt ist, insbesondere bei wolkenlosem Himmel. Um die räumliche und zeitliche Variabilität der UV-Bestrahlungsstärke in der Nähe von Gebäuden und Bäumen möglichst genau abbilden zu können, sollte daher die Anisotropie der diffusen UV-Strahlung am Himmel berücksichtigt werden, da die UV-Bestrahlungsstärke aufgrund der Anisotropie von der Raumrichtung der verschatteten Himmelsanteile abhängt. In der Literatur existieren verschiedene Ansätze zur Berücksichtigung der Anisotropie. Diese reichen von einfachen spektral unabhängigen Parametrisierungen der Anisotropie bis hin zur Verwendung von modellierten oder gemessenen Strahldichteverteilungen der spektralen diffusen und direkten UV-Strahlung.

Eine richtungsabhängige Betrachtung der ankommenden UV-Strahlung impliziert, dass auch weiter entfernt stehende Objekte oder Orographie bei der Modellierung der UV-Strahlung einen Einfluss auf die modellierte UV-Bestrahlungsstärke haben können, insbesondere bei niedrigstehender Sonne. Eine Nichtberücksichtigung ferner Objekte würde tendenziell zu einer Überschätzung der modellierten UV-Strahlung führen.

Das räumlich mittlere Rückstrahlvermögen (Albedo) verschiedener Oberflächen in städtischer Umgebung kann einen wesentlichen Einfluss auf die UV-Strahlung haben. In der Literatur angegebene Werte für den Mittelungsradius zur Ableitung der mittleren Albedo reichen von < 2,5 bis > 40 km.

Reflexionen im UV-Spektralbereich an Gebäudefassaden können relevant sein. Die meisten Baumaterialien und Oberflächen im urbanen Bereich agieren im UV als Lambert-Strahler und reflektieren etwa 5 - 10 % der UV-Strahlung diffus in alle Richtungen. An Fassaden aus spiegelndem Glas, poliertem Metall oder auch an einigen weißen Farbanstrichen kann der reflektierte Anteil noch deutlich höher sein und signifikante Auswirkungen auf die UV-Bestrahlungsstärke in der Umgebung haben. Die genannten Oberflächen zeigen zum Teil eine richtungsabhängige Reflexion, wodurch es zu lokalen und zeitlich sehr variablen „Hotspots“ der UV-Bestrahlungsstärke in der Nähe beispielsweise von Fassaden kommen kann. Reflexionen an Gebäudewänden sind dementsprechend im Rahmen der Modellierung zu berücksichtigen und als diffus anzunehmen.

Stadtbäume absorbieren unabhängig von Alter oder Zustand der Blätter UV-Strahlung effektiv, da aufgrund der unterschiedlichen Ausrichtung und Bewegung der Blätter reflektierte UV-Strahlung in erster Linie wieder auf Blätter trifft. Reflexionen an Stadtbäumen sind daher für die Modellierung der UV-Bestrahlungsstärke nicht wesentlich.

Unter Bäumen können aufgrund der vorhandenen diffusen UV-Strahlung relevante UV-Expositionen gegeben sein. Zusätzlich werden im Baumschatten auftretende Sonnenflecke beschrieben, die insbesondere bei Bäumen mit einer geringen Blattflächendichte einen Einfluss auf die mittlere UV-Bestrahlungsstärke unter Bäumen haben können. Um den Effekt auf die mittlere UV-Bestrahlungsstärke unter und in der Umgebung von Bäumen zu berücksichtigen, werden in der Literatur bereits Modellierungsansätze abhängig von der Blattflächendichte beschrieben. Diese sollten in die Modellierung der UV-Bestrahlungsstärke unter Bäumen integriert werden.

Messungen zeigen, dass mikroskalige Bebauungselemente wie Markisen, Sonnensegel oder Sonnenschirme wesentliche Elemente zur Reduktion der erythemwirksamen UV-Bestrahlungsstärke sind, die jedoch nur einen unzureichenden Schutz vor erythemwirksamer UV-B-Strahlung bieten, da sie nur einen kleinen Teil des Himmels abdecken und noch ein signifikanter Anteil diffuser UV-Strahlung aus nicht verschatteten Raumwinkeln empfangen wird. Für die Modellierung sind diese Bebauungselemente zu berücksichtigen. Allerdings sind diese derzeit aufgrund ihrer geringen vertikalen Ausdehnung in PALM-4U nicht darstellbar. Hier ist eine Lösung zu finden.

Der Anteil sowie die räumliche Verteilung der diffusen und direkten UV-Strahlung hängen maßgeblich von den atmosphärischen Bedingungen ab, insbesondere von der Bewölkung sowie der Aerosolkonzentration – der Einfluss von Stadtbäumen und Gebäuden unterscheidet sich darum bei unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen. Für die Modellierung der UV-Bestrahlungsstärke im städtischen Bereich ist es daher sinnvoll, verschiedene Standardsituationen bereitzustellen, welche den Effekt unterschiedlicher Aerosolkonzentration und Bewölkung auf die anisotrope Verteilung der UV-Strahlung darstellen.

Methodenbewertung

Es wurde eine Bewertung der in der Literatur beschriebenen Modellierungsansätze der UV-Strahlung in urbanen Gebieten vorgenommen. Weiterhin wurden die verfügbaren externen Strahlungstransfermodelle bewertet. Die jeweilige Bewertung erfolgte dabei unter Aspekten der physikalischen Genauigkeit, rechtlichen Gesichtspunkten, der Vereinbarkeit mit PALM's Topographie und Oberflächendarstellung sowie der Anforderung an die Rechnerressourcen. Weiterhin wurde ein Methodenkonzept vorgeschlagen, um alle relevanten physikalischen Aspekte des UV-Strahlungstransfers innerhalb der urbanen Schicht möglichst realistisch abzubilden.

Die Bewertung ergab, dass das gut dokumentierte Modell uvspec (Open-Source-Software mit breiter Entwickler- und Anwender-Community) zur Modellierung des atmosphärischen Strahlungstransfers im UV-Spektralbereich verwendet werden soll. uvspec ist speziell für den UV-Spektralbereich evaluiert und ermöglicht die Ausgabe sowohl von spektralen Bestrahlungsstärken als auch spektralen

Strahldichten. Letzteres ist eine Grundvoraussetzung für die Betrachtung einer richtungsabhängigen Abschattung.

Die Abschattung der UV-Bestrahlungsstärke im urbanen Bereich wird auf Basis des Sky-View Faktors (SVF), der den Anteil des Himmels beschreibt, welcher von einer gegebenen Position aus sichtbar ist und nicht von Objekten verdeckt wird, modelliert werden. Der SVF soll sowohl raumwinkelunabhängig (integral, zusätzlicher Rechenressourcen-Bedarf steigt nur geringfügig) und raumwinkelabhängig (zusätzlicher Rechenressourcen-Bedarf steigt erheblich; Strahldichte-Information der diffusen UV-Strahlung notwendig) betrachtet werden.

Mehrfachreflexionen an Fassaden werden berücksichtigt. Dazu wird das in PALM bereits integrierte Strahlungstransfermodell für Breitbandstrahlung erweitert und angepasst, so dass ein unabhängiger Aufruf für das UV-Spektrum erfolgen kann. Berechnungen der Reflexionen sollen dabei auf Basis spezifisch für das UV-Spektrum vorgegebener Werte des Rückstrahlvermögens (Albedo) erfolgen. Mehrfachreflexionen werden als vollständig diffus angenommen. Die Modellierung von gerichteten Reflexionen an spiegelnden Fassaden ist mit dieser Methodik nicht möglich.

Aufgrund der hohen Absorptionsrate von Blättern wird die Himmelsabschattung durch Bäume äquivalent zu der durch Gebäude oder Sonnenschutzvorrichtungen angenommen. Um den Effekt von kleinen Öffnungen in Baumkronen, welcher aufgrund der Darstellung von Bäumen auf dem numerischen Gitter verloren geht, berücksichtigen zu können, soll eine in der Literatur beschriebene Parametrisierung, basierend auf der Blattflächendichte, implementiert werden.

Um Effekte von Sonnenschutzvorrichtungen, wie z. B. Sonnensegel, abschätzen zu können, deren vertikale Ausdehnung kleiner ist als die für Stadtsimulationen verwendete Gitterweite, soll eine künstliche Ausdehnung auf eine ganze vertikale Gitterweite im Modell erfolgen, um diese Elemente im Modell darstellen zu können.

Planung der Implementierung des UV-Moduls und Umsetzung

Eine Datenschnittstelle zur Übergabe von externen uvspec-Ausgabedaten wurde definiert. Das Format zur Ausgabe der von PALM berechneten Zielgrößen (orts- und zeitabhängige erythemgewichtete UV-Bestrahlungsstärke und UV-Index) wurde definiert. Eine Datenstruktur zur übersichtlichen und effizienten Datenspeicherung wurde entworfen.

Das in PALM implementierte urbane Strahlungstransfermodell wurde für die Modellierung der UV-Strahlung modifiziert, um die Modellierung von Mehrfachreflexionen der UV-Strahlung im mikroskaligen Modell abbilden zu können. Der bereits in PALM implementierte Algorithmus zur Berechnung der Sky-View Faktoren wurde erweitert, um die Ableitung raumwinkelabhängiger Sky-View Faktoren zu ermöglichen.

Ein generelles Konzept zur Benutzung des UV-Modells wurde vorgestellt. Das UV-Modell soll in zwei Modi betrieben werden. Der erste Modus adressiert Anwender, welche ausschließlich an der UV-Strahlung interessiert sind. Das UV-Strahlungsmodell wird zu den vordefinierten Ausgabezeitpunkten aufgerufen und die modellierten Daten werden in eine dafür konzipierte NetCDF-Datei geschrieben. Im Anschluss geht es, je nach Wunsch, entweder mit der Zeitintegration weiter oder PALM wird beendet. Dieser erste Modus ist vergleichsweise wenig rechenintensiv. Ergebnisse sind schnell verfügbar. Der zweite Modus adressiert Anwender, welche an einer umfassenderen Analyse des Stadtklimas interessiert sind. Das UV-Modul wird zu bestimmten Zeitpunkten (Ausgabezeitpunkte) während der Zeitintegration des 3D-Strömungsmodells aufgerufen und die modellierten Daten werden in eine NetCDF-Datei geschrieben. Gleichzeitig können weitere Aspekte des Stadtklimas (thermischer Komfort, Windkomfort, Belüftung, Schadstoffbelastung etc.) berechnet werden.

Bereitstellung ausgewählter UV-Szenarien/Kopplung PALM-4U und externes Strahlungsmodell

Es wurde ein ausgewähltes UV-Szenario definiert, das als Grundlage für die im weiteren Projektverlauf durchzuführenden Entwicklungsarbeiten dient. Das definierte Szenario repräsentiert einen wolkenlosen Strahlungstag („clear sky“-Bedingungen) auf Meereshöhe in den mittleren Breiten. Die Ozonschichtdicke beträgt 300 DU und repräsentiert damit ein Szenario erhöhter UV-Belastung. Der Wert für das räumlich mittlere Rückstrahlvermögen (Albedo) im UV-Spektralbereich wurde auf 0,05 gesetzt. Die Aerosolkonzentration wurde dabei auf einen für urbane Regionen typischen Wert gesetzt.

Die Ausgabe von uvspec wurde den bisherigen Ausführungen entsprechend konfiguriert: Ausgabe der direkten, diffusen und globalen spektralen Bestrahlungsstärke sowie der spektralen Strahldichte für die Wellenlängen $\lambda = 280\text{--}400\text{nm}$, Ausgabe der Strahldichte an diskreten Raumwinkeln mit Standard-Winkelauflösung von 1° entlang des Zenits und 5° entlang des Azimuts.

Es wurde der Präprozessor uv2palm entwickelt, welcher uvspec-Ausgabedateien in ein für PALM lesbares Dateiformat konvertiert.

Sowohl uv2palm als auch die Installationsautomatik werden als externe Pakete in das PALM Modellsystem integriert.

Implementierung des UV-Moduls

Basierend auf dem entwickelten technischen Konzept wurde ein UV-Strahlungsmodell in den PALM-Modell-Code implementiert. Dazu wurden 2022 folgende Arbeiten durchgeführt:

Ein vorab prozessiertes UV-Szenario in Form von spektralen Bestrahlungsstärken und spektralen Strahldichten für verschiedene Sonnenzenitwinkel wird über ein für PALM lesbares Dateiformat bereitgestellt und eingelesen. Mithilfe des bereits in PALM integrierten Strahlungstransfermodells werden für jeden x- und y-Gitterpunkt raumwinkelabhängige sowie -unabhängige Abschattungsinformationen und deren Transmissivität für die UV-Strahlung gespeichert. Aus diesen Informationen wird dann während der PALM-Zeitintegration die lokale UV-Bestrahlungsstärke bestimmt. Dazu wurden zwei Berechnungsmethoden implementiert:

- Methode 1: Die spektrale UV-Bestrahlungsstärke wird aus der extern vorgegebenen UV-Bestrahlungsstärke unter Zuhilfenahme der abgeleiteten raumwinkelunabhängigen Abschattungsinformationen sowie der Abschattung der direkten Strahlung bestimmt.
- Methode 2: Die spektrale UV-Bestrahlungsstärke wird aus der extern vorgegebenen UV-Strahldichte unter Zuhilfenahme der abgeleiteten raumwinkelabhängigen Abschattungsinformationen bestimmt.

Ein Modell für die Transmission von UV-Strahlung an Pflanzenbeständen wurde implementiert, wodurch Sonnenflecken und eine Abhängigkeit der UV-Transmission von der Blattflächendichte explizit berücksichtigt werden.

Die Modellierung multipler Reflexionen von UV-Strahlung an nichttransparenten Oberflächen (Gebäude- sowie Landoberflächen) unter Benutzung einer UV-spezifischen Albedo wurde implementiert.

Eine 2D-Datenausgabe für die nicht gewichtete sowie erythemgewichtete UV-Bestrahlungsstärke wurde implementiert.

Geplante Weiterarbeit

Erste Testanwendungen für realitätsnahe Simulationssetups in urbanen Umgebungen werden durchgeführt. Die mittels der beiden implementierten Berechnungsmethoden simulierten

erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärken werden einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Der entwickelte Präprozessor uv2palm wird optimiert, um insbesondere dessen Ausführungszeit zur Erstellung von sphärisch hochaufgelösten UV-Szenarien zu minimieren. Basierend auf dem entwickelten und in PALM integrierten UV-Strahlungsmodell wird eine Evaluierungsstudie durchgeführt, indem die für einen bestimmten Strahlungstag (clear sky-Bedingungen) und bestimmten Standort modellierten Werte mit an diesem Tag und an diesem Standort gemessenen Werten der UV-Bestrahlungsstärke abgeglichen werden. Die Funktionalität des Modells wird der Auftraggeberin in Präsenz demonstriert. Des Weiteren werden technische Arbeiten vorgenommen, um die Funktionalität des UV-Modells in PALM langfristig zu garantieren.

Themenbereich 02 - Strahlenschutztechnik

Aufbau und Charakterisierung eines Referenzfeldes zur Sicherstellung des Strahlenschutzes an Beschleunigeranlagen in Medizin und Forschung und zur Prüfung und Kalibrierung entsprechender Messgeräte

Forschungskennzeichen 3619S22364	Beginn 01.01.2020	Ende 30.04.2023	Fördermittel 392.375,00 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)			
Projektleitung Dr. H. Zutz	Fachbegleitung BfS R. Schnell	verantwortlich für den Text Dr. H. Zutz Dr. O. Hupe	

Hintergrund

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) verfolgt das Ziel der Aufrechterhaltung, kontinuierlichen Verbesserung und permanenten Anpassung des Strahlenschutzes in Deutschland an den jeweils aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik. In diesem Rahmen ergibt sich die Notwendigkeit, für moderne Beschleunigeranlagen und deren zunehmenden Einsatz in Wissenschaft, Technik und Medizin einen adäquaten Strahlenschutz zu gewährleisten, der den gesetzlichen und normativen Anforderungen der Personendosimetrie in Deutschland entspricht. Dosimetrische Messungen an diesen Anlagen erfolgen momentan mit Ortsdosimetern, deren Eignung für diese hochenergetischen und gepulsten Strahlungsfelder nicht nach dem Stand von Wissenschaft und Technik geprüft werden kann, da entsprechende Referenzfelder fehlen.

Zielsetzung

Ein an der PTB in Braunschweig im Aufbau befindliches Referenzstrahlungsfeld wird es ermöglichen, die Funktionsweise von Orts- und Personendosimetern in gepulsten Strahlungsfeldern mit hohen Energien (über 7 MeV) systematisch zu überprüfen. Nach vollständiger Charakterisierung des Referenzfeldes können Tests für die Entwicklung und die Baumusterprüfung von Strahlenschutzdosimetern rückführbar auf die nationalen Primärnormale durchgeführt werden. Ziel des Vorhabens ist es, mit einer kosteneffektiven Methode ein validiertes, rückgeführtes, beschleunigerbasiertes, hochenergetisches und gepulstes Referenzstrahlungsfeld zu entwickeln.

Methodik

Mit Hilfe von Monte Carlo Simulationen werden für verschiedene Aufbau-Geometrien die Teilchenflussdichten und spektralen Verläufe berechnet. Dabei werden der Ortsdosisleistungsverlauf und die spektrale Zusammensetzung der einzelnen Strahlungskomponenten (Photonen, Elektronen und Neutronen) ermittelt. Die Simulationen werden mit Messungen, die mit dosimetrischen und spektrometrischen Messsystemen durchgeführt werden, verglichen.

Monte Carlo Simulationen

Mit Hilfe einer einfachen Geometrie, welche sich noch nicht auf einen speziellen Messaufbau bezieht, geschieht eine erste Evaluierung von verschiedenen Monte-Carlo-Programmen. Nach Auswahl eines Programms werden Photonen-, Elektronen- und Neutronenspektren sowie Winkelverteilungen und Dosisleistungsverläufe in verschiedenen Geometrien simuliert. Die Monte Carlo Simulationen erfolgen mindestens im Elektronenstrahlenenergiebereich bis 20 MeV.

Messungen

An den Aufbauorten des Referenzfeldes werden, soweit erforderlich, durch getrennte Messungen für die Komponenten (Photonen, Elektronen, Neutronen) des Strahlungsfeldes Dosisleistung und spektrale Verteilung bestimmt. Die verwendeten Methoden ermöglichen eine Rückführung auf die nationalen Normale der PTB zum Beispiel durch Verwendung von Sekundärnormalen zur Messung der Umgebungs-Äquivalentdosis.

Durchführung

Monte Carlo Simulationen

Zunächst wurden mehrere Monte Carlo Simulationsprogramme (GEANT4, MCNP, EGSnrc) auf ihre Eignung untersucht. Nach der Auswahl von GEANT4 und ergänzend MCNP wurden erste Simulationen mit einfachen Geometrien durchgeführt, einschließlich der Untersuchung der Auswirkung von Abschirmungen auf die spektrale Verteilung des einfallenden Strahlungsfeldes. Später wurden diese Geometrien mit Details gemäß der realen Beschleunigerraumgeometrie der PTB ergänzt.

Messungen

Dosisverläufe und Energieverteilungen von Photonen und Neutronen konnten bereits ermittelt werden: Mit Hilfe eines Wenigkanalspektrometers wurde das Photonenspektrum eines Referenzfeldes bei zwei Feldgrößen bestimmt. Die orts- und feldgrößenabhängige Dosisleistungen wurden mit einer $H^*(10)$ Sekundärnormal-Kammer (modifizierte HS01 von Austrian Research Centers Seibersdorf) aufgezeichnet. Insgesamt wurden Messungen von Ortsdosisleistungen an vier möglichen Messorten durchgeführt, welche Messungen hinter einer variablen Abschirmung umfassten. Mit einem Bonner-Kugel Spektrometer wurden mögliche Kontaminationen mit Neutronen in diesen Feldern untersucht.

Ergebnisse

Ein erster Aufbauort für ein Referenzfeld mit Dosisleistungen bis $0,2 \text{ mSv h}^{-1}$ ist identifiziert. Dabei handelt es sich um einen Bestrahlraum einer anderen Beschleunigeranlage, welcher durch eine 2,0 m dicke Wand aus Normalbeton von einem medizinischen Beschleuniger getrennt ist. Der Strahlungskegel des medizinischen Beschleunigers vom Typ Elekta Precise Treatment System kann durch Rotation der Gantry auf 90° direkt und in senkrechtem Einfall auf die Trennwand gerichtet werden. Der Quellabstand zur Wand beträgt 3,0 m, sodass sich auf der Rückseite ein Mindestabstand von 5,0 m zur Quelle ergibt.

Die Messungen mit dem Wenigkanalspektrometer zeigen das erste wichtige Ergebnis: Die spektrale Energieverteilung ändert sich hinter der Wand im Vergleich zum Isozentrum des Beschleunigers kaum. Im weiteren Verlauf des Projektes wurden die Spektren für Photonen, Elektronen und Neutronen mit detaillierten Monte-Carlo-Simulationen berechnet.

Für höhere Dosisleistungen muss ein weiterer Messaufbau in einem der Beschleunigerräume errichtet werden. Erste entsprechende Experimente wurden mit einer variablen Anzahl von Abschirmblöcken an den beiden medizinischen Beschleunigern der PTB durchgeführt. Da sich ein solcher Aufbau im gleichen Raum wie der Beschleuniger befindet, muss der Einfluss von direkter Streustrahlung vom Beschleuniger am Messort dezidiert untersucht werden. Erste Ergebnisse aus Messungen zeigen, dass eine seitliche Abschirmung notwendig ist, um den Streustrahlungsanteil vom Beschleuniger hinreichend abzuschirmen. Eine entsprechende Geometrie für höhere

Ortsdosisleistungen wurde entworfen sowie deren Abschirmwirkung und Streueigenschaften mittels Monte Carlo Simulationen untersucht.

Für einen reproduzierbaren Aufbau von Prüflingen im Referenzfeld wurde eine Verfahrbahn konstruiert und gebaut sowie ein Linienlasersystem beschafft.

Zur Monitorierung der Bestrahlungen wurden verschiedene Optionen untersucht: eigene Geiger-Müller-Zähler im Beschleunigerraum sowie die Verwendung externe Monitorkammern am Beschleunigerkopf bzw. interner Monitorkammer im Beschleunigerkopf. Dabei stellt sich insbesondere die interne Monitorkammer als geeignet dar.

Geplante Weiterarbeit

Abschließende Messungen mit dem finalen Messaufbau in Kombination mit der Ausrichtung des Linienlasersystems zur Prüflingspositionierung sind noch durchzuführen. Bei diesen Messungen wird auch das Monitorsystem geprüft sowie die Eignung des Referenzfeldes für eine Prüflingscharakterisierung demonstriert.

Analyse von Urankonzentraten aus Deutschland mit bekannter Herkunft: Unterstützung der Nuklearen Forensik in Deutschland

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3621R01611	01.04.2021	30.09.2022	99.856,00 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Wismut GmbH			
Projektleitung Frank Dullies	Fachbegleitung BfS Dr. Jens-Tarek Eisheh	verantwortlich für den Text Frank Dullies	

Hintergrund

Das BfS unterstützt die zuständigen Behörden bei der Nachforschung und bei der Analyse aufgefundenen radioaktiver Stoffe. Um die Nukleare Forensik deutscher Uranproben zu ermöglichen, wurden 70 Proben aus den Stoffgruppen Uranerze, Aufbereitungsprodukte, Urankonzentrate, Tailings der Uranerzaufbereitung sowie Rückstände und Immobilisate der Wasserbehandlung der Wismut GmbH analysiert.

Zielsetzung

Ziel des Vorhabens ist die Charakterisierung einer repräsentativen Auswahl historisch in Deutschland erzeugter Uranerzkonzentrate (UOC) und des aus der Sanierung erzeugten Urankonzentrates für die Nukleare Forensik ("Erzeugung eines Fingerabdrucks"). Die Daten sollen anschließend mit den Parametern anderer Erzeuger verglichen werden, um eine Aussage über die Identifizierbarkeit der in Deutschland hergestellten Produkte zu liefern.

Methodik

AP 1: Bestandsaufnahme

Die Bestandsaufnahme hatte zum Ziel die Zusammenhänge der ausgewählten Natururanprodukte: Uranerze aus Lagerstätten mit einer Urangewinnung größer als 1000 t (U_3O_8), Zwischenprodukte der Uranerzaufbereitung sowie Rückstände und Immobilisate der Wasserbehandlung hinsichtlich der Lagerstättentypen, Gewinnungs-, Aufbereitungs- und Behandlungsverfahren zu beschreiben.

Weiterhin sind historische Daten für die Urankonzentrate aus Königstein, den Rückständen und Immobilisaten der Wasserbehandlung sowie den Tailings der Uranerzaufbereitung bereitgestellt worden.

AP 2: Festlegung der Untersuchungsstrategie

Die Untersuchungsstrategie ist die Voraussetzung für die Abfolge der Bearbeitung der einzelnen AP, um die Zielsetzungen zu erreichen. Mit dem Auftraggeber wurde ein Versuchsprogramm abgestimmt, in dem die organisatorische Abfolge der geplanten Arbeiten und die zeitliche Realisierung der einzelnen AP definiert wurden.

AP 3a: Auswahl deutscher Proben

Die Auswahl der deutschen Proben erfolgte nach der Verfügbarkeit und dem zukünftigen Verfügungspotential großer Mengen von uranhaltigen Stoffen. Es wurden insgesamt 70 Proben charakteristischer Natururanprodukte innerhalb von 5 Stoffgruppen ausgewählt:

- 27 Uranerze aus Sachsen und Thüringen, 2 Erzproben aus Bayern und eine aus Baden-Württemberg,
- 10 Zwischenprodukte der Uranerzaufbereitung,
- 3 historische Urankonzentrate (Yellow Cake) sowie 4 Prozessproben der Uranproduktion am Standort Königstein,
- 6 Tailings der Uranerzaufbereitung sowie
- 17 Rückstände und Immobilisate der Wasserbehandlungsanlagen (WBA) der Wismut GmbH.

AP 3b: Beschaffung ausländischer Proben

Eine Beschaffung ausländischer Urankonzentratproben war organisatorisch leider nicht möglich. In Rücksprache mit dem Auftraggeber wurden Uranerzproben aus den USA, Australien, Tschechien sowie Monazitsandproben aus Madagaskar und Australien beschafft.

AP 4: Methodenauswahl und Validierung

Bei der Auswahl der Methoden wurden die Erfahrungen der drei Labore der Wismut GmbH herangezogen, die jährlich ca. 25 000 Proben für die Prozesskontrolle der Wasserbehandlungsanlagen sowie für die Umweltüberwachung bearbeiten. Die Wismut-Labore besitzen für diese Analysenverfahren eine Akkreditierung. An den oben genannten Proben werden:

- Elementanalysen von 55 Parametern mit der Massenspektrometrie mittels induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS),
- Nuklidanalysen der Zerfallsreihen von Uran-238, Uran-235 und Thorium-232 mittels Gammaskpektrometrie sowie
- Matrix-Parameter: Totaler organischer Kohlenstoff (TOC), Totaler anorganischer Kohlenstoff (TIC), Gesamtschwefel, Sulfid-Schwefel, Chloride und die Bestimmung des Glühverlustes durchgeführt.

Methodik

Alle Proben wurden vor der Analyse getrocknet, zerkleinert und homogenisiert. Es wurde für die Elementanalysen und die Gammaskpektrometrie keine Probenteilung vorgenommen, sondern aus der gleichen Grundgesamtheit heraus analysiert. Der Analysendurchlauf startete mit der Gammaskpektrometrie. Für die Elementanalysen sowie die Bestimmung der Matrixparameter wurden spezifische Aufschlüsse hergestellt.

Durchführung

Für die Bestandsaufnahme AP 1 wurden umfangreiche Recherchen im Archiv, in der Chronik der Wismut GmbH und Befragungen von Zeitzeugen durchgeführt. Alle Analysendaten stammen aus der Wismut-Datenbank AL.VIS-W und wurden für die Auswertung in das Excel-Format übertragen.

Die Beschaffung der Proben erfolgte aus der Lagerstättensammlung der Wismut GmbH, der Mineralogischen Sammlung der TU Bergakademie Freiberg, den Archiven der Labore der Wismut GmbH in Form von Referenz- und Rückstellproben von Urankonzentraten, Zwischenprodukten der Uranerzaufbereitung, Tailingsproben aus der bodenmechanischen Untersuchung der industriellen Absetzanlagen, Rückstände und Immobilisate der Wasserbehandlung sowie ausländischer Proben durch die Nutzung beruflicher Kontakte.

Die Proben wurden vor der Verarbeitung zur Analyse mit Normal- und UV-Licht fotografiert und die Ortsdosisleistung (aufgelegt am Detektor der Szintillatorsonde am Automess 6150AD6) bestimmt.

Ergebnisse

Im August 2021 wurde mit der Vorbereitung der Proben zur Analyse begonnen und zum Jahresende 2021 abgeschlossen. Zeitgleich erfolgte fortlaufend die Durchführung der Analysen.

Geplante Weiterarbeit

Bis Februar 2022 waren die Analysen zu 90 % abgeschlossen und wurden im selben Monat durch das Labor validiert. Anschließend erfolgte die statistische Auswertung der Analysendaten. Im letzten Schritt wurde eine Altersbestimmung der Proben unternommen. Der Abschlussbericht wurde im November 2022 vorgelegt.

Themenbereich 03 - Strahlenbiologie - Wirkung von ionisierender und nichtionisierender Strahlung, Strahlenempfindlichkeit

Validierung genetischer Loci, die das Lungenkrebsrisiko in Abhängigkeit von der Radonexposition beeinflussen - Qualitätssicherung und Auswertung

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3620S32271	01.10.2020	31.04.2024	156.668,00 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Universitätsmedizin Göttingen, Institut für Genetische Epidemiologie			
Projektleitung Prof. Dr. Heike Bickeböllner	Fachbegleitung BFS Dr. Maria Gomolka	verantwortlich für den Text Dr. Albert Rosenberger	

Hintergrund

Lungenkrebs ist weltweit ein großes Thema des Gesundheitswesens. Lungenkrebs kann durch das Inhalieren von Tabakrauch oder Feinstaub, aber auch durch ionisierende Strahlung infolge der Inhalation von Radon und Radonfolgeprodukten ausgelöst werden. Ein erhöhtes strahlenbedingtes Lungenkrebsrisiko ist durch mehrere Studien zur Radonexposition in Wohnräumen und bei Uranbergleuten nachgewiesen worden.

Zielsetzung

In Vorgängerprojekten des BFS (3614S10013, 3614S10014 und 3615S32253) konnten genetische Varianten, die im Zusammenhang mit Strahlung zu einem erhöhten Lungenkrebsrisiko beitragen können, identifiziert werden (Rosenberger et al. Int Arch Occup Environ Health. 2018).

Zielsetzung des Projektes 3620S32271 ist die Validierung von Genorten aus Vorgängerprojekten und ggf. aus Ergebnissen anderer Studien zu Radon-Gen-Interaktionen in einer unabhängigen Stichprobe mit alternativen Typisierungsmethoden (PCR-Amplifikation und Sequenzierung). Die zur Verfügung stehenden Proben entstammen dem Pathologiearchiv der SAG/SDAG WISMUT und werden im Projekt 3621S32220 typisiert.

Zum Erreichen des Projektziels sind folgende Leistungen, bezeichnet als Arbeitspakete (AP), vorgesehen:

- AP 1: Konzeption eines Analyseplans unter Berücksichtigung des relevanten Stands von Wissenschaft und Technik
Vorgesehener Durchführungszeitraum: 01.09.2020 – 28.02.2021
- AP 2: Qualitätssicherung der SNP-Typisierung aus Projekt 3621S32220
- AP 3: Statistische Analyse mittels der in AP 1 beschriebenen Modelle unter Berücksichtigung von Strahlenexposition, Tumorsubtyp und anderen das Lungenkrebsrisiko modifizierenden Faktoren

Methodik

Im bisherigen Projektzeitraum wurde AP 1 „Konzeption eines Analyseplans unter Berücksichtigung des relevanten Stands von Wissenschaft und Technik“ vollständig abgeschlossen. AP 2 und AP 3 mussten aufgrund von Verzögerungen im Zwischenprojekt (Projekt 3621S32220: Typisierung, Universität Tübingen) neu terminiert werden.

Auswahl der zu typisierenden genomischen Marker

Kriterien zur Auswahl und Priorisierung von Genen und Markern wurden festgelegt, die Assoziation/Interaktion, mit Lungenkrebs, Funktion und Expression der Gene beinhalten. Eine umfangreiche Literaturrecherche zu Untersuchungen zu Lungenkrebs und natürlicher Radonexposition wurde durchgeführt und durch Zitatnachverfolgung ergänzt.

Auswahl geeigneter Kohorten

Eine Übersicht von Kohorten und anderen Studienpopulationen, die als potentielle Ergänzung für dieses Projekt geeignet wären, wurde zusammengestellt.

Auswahl geeigneter statistischer Modelle

Ebenso wurde damit begonnen, ein statistisches Modell der anstehenden GxE-Analyse zu formulieren und entsprechende Fachliteratur zu sichten.

Durchführung

Kriterien zur Auswahl und Priorisierung von Genen und Markern

Es wurde nach drei Gruppen von Genen gesucht:

- Gruppe A:** Gene mit beobachteter (publizierter) Assoziation zu radon-induziertem LC, mit erklärbarer biologischer Funktion der Gene, mit Bezug zu Strahlung oder Strahlenbiologie (z. B. involviert in DNA-Reparatur) und exprimiert im Lungengewebe
- Gruppe B:** bekannte Marker in bekannten Lungenkrebsrisikogenen
- Gruppe C** therapierelevante Gene bei Lungenkrebs

Eine Liste mit 115 LC-assoziierten Genen wurde aus Literaturrecherchen (*PubMed*) und verschiedenen Datenbanken zusammengestellt (*NHGRI-EBI Catalog of human genome-wide association studies*; Information zur Genexpression wurde der *dbGene* und dem *Human Protein Atlas* entnommen; Information zur Funktion der Gene wurde aus *dbGene* oder *Ensembl* extrahiert und eine Liste mit 756 DNA-Reparaturgenen wurde auf Basis der Liste *Human DNA repair genes* (University of Texas, MD Anderson Cancer Center) zusammengestellt. Das Ranking der Gene basiert auf folgendem Score (vereinfacht dargestellt):

$$Score = b_{Gentyp} b_{Exposition} * (w_1 b_1 * Funktion + w_2 b_2 * Expression + w_3 b_3 * Assoziation)$$

Wobei w_1 - w_3 Gewichte der Bewertungskategorien darstellen ($\sum w_i = 1$), b_1 - b_3 Punktwerte einzelner Kriterien der Bewertungskategorien, $b_{Exposition}$ ein Multiplikator für die Expositionsgruppe (Bergarbeiter, Innenraum-Radonbelastung, Umfeld-Radonbelastung) und b_{Gentyp} ein Multiplikator für den Gentyp ist.

Die Bewertungskategorie Assoziation unterteilt sich dabei in Assoziation zu a) LC, b) anderen Krebsentitäten, c) anderen Phänotypen und d) p-Wert Interaktion im Vorgängerprojekt. Danach wurden bis zu 3 Marker pro ausgewähltem Gen zur Typisierung bestimmt. Die Auswahl beruht dabei auf:

der marker-spezifischen Signifikanz einer Radon x Gen-Interaktion aus dem Vorgängerprojekt, dem Kopplungsungleichgewicht zwischen den Markern ($r^2 < 0,5$), einer Allelhäufigkeit (minor allele frequency MAF) im Bereich zwischen 30% und 50%.

Auswahl geeigneter Kohorten

In *PubMed* wurden Fachpublikationen nach Studien zu Bergarbeitern (speziell Uranbergbau) gesucht, und Informationen zu den jeweiligen Kohorten extrahiert. Ferner wurde nach „Cohort Profiles“, publiziert im *International Journal of Epidemiology* oder *BMC Open*, mit Angaben wie „radon“ oder „uranium miner“ gesucht.

Auswahl geeigneter statistischer Modelle

Die einschlägige Fachliteratur wurde nach Möglichkeiten einer effizienten, statistischen Modellierung zur Evaluation von Gen-Umwelt-Interaktion (GxE) gesichtet. Von Interesse waren dabei der Vergleich von *case-control*- mit *case-only*-Ansätzen, da (wie für die geplante Untersuchung) keine Kontrollen zur Verfügung stehen werden.

Evaluierung einer Typisierungsmethodik in FFPE Material

Das Typisierungsprojekt (Projekt 3621S32220: Amplikon basierte NGS-Typisierung von 28 Markern in den 10 Kandidatengenomen nach vorheriger Etablierung des Panels an 15 Proben mit fragmentierter DNA) wurde vom Institut für Pathologie und Neuropathologie des Universitätsklinikums Tübingen durchgeführt.

Ergebnisse

Auswahl und Priorisierung von Genen und Markern

Folgende 10 topgereihten Gene wurden anhand der Bewertungskategorien für die Typisierung ausgewählt: FTO (score 0,48), UBE2U (0,47), CUBN (0,44), ST8SIA2 (0,35), SOX5 (0,35), TP53 (0,33), CD163L1 (0,32), CDKN2A (0,29), NAV2 (0,27), SIRT1 (0,24).

Zusätzliche geeignete Kohorten

Es wurden zwei Bergarbeiterstudien und drei Innenraumradon-Studien gefunden, die potentiell Biomaterial für eine externe Replikation besitzen könnten. Eine Kontaktaufnahme lohnt sich erst nach Vorliegen von ersten eigenen Ergebnissen, die sich aufgrund der Verzögerungen im Typisierungsprojekt (Projekt 3621S32220) ebenfalls verzögern.

Auswahl geeigneter statistischer Modelle

Für die statistische Analyse, im *Case-Only*-Design (also ohne Kontrollen) wird das Modell der Form:

$$\log \frac{p(E = 1 | G, D = 1)}{p(E = 0 | G, D = 1)} = \beta + \beta_{ge} G$$

an die Projektdaten angepasst, wobei anstelle Erkrankung D nun die Exposition E als Zielgröße herangezogen wird. Für die GxE-Interaktion lässt sich die Hypothese $\beta_{ge} = 0$ mit einem Freiheitsgrad (df=1) prüfen.

Geplante Weiterarbeit

Die Ergebnisse von AP 1 dienen als Grundlage für AP 2 und AP 3. Für die Weiterarbeit sind die Ergebnisse des Zwischenprojekts 3621S32220 notwendig.

Untersuchung biologischer Mechanismen strahlen-induzierter Herz-Kreislauf-Erkrankungen

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3621S32210	01.09.2021	31.08.2024	374.576,74 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung e.V. Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin (ITEM), Kardiovaskuläre Forschung			
Projektleitung Dr. Jan Fiedler	Fachbegleitung BfS Dr. Simone Moertl	verantwortlich für den Text Dr. Jan Fiedler Dr. Simone Moertl	

Hintergrund

Epidemiologische Studien bei Strahlentherapiepatienten zeigen ein erhöhtes Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen durch die Strahlenbelastung. Dies trifft besonders für Langzeitüberlebende zu. Ob auch durch niedrigere Dosen, wie sie bei diagnostischen Verfahren oder nach beruflicher Exposition vorliegen, ein erhöhtes Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen besteht ist noch unklar. Wesentliche Bestandteile des Herzmuskels sind Kardiomyozyten, Fibroblasten und Endothelzellen. Typische Strahlenreaktionen in diesen Zelltypen sind die Induktion von oxidativem Stress, Differenzierung und Veränderungen im Metabolismus. Obwohl erste Daten zu einzelnen Zelltypen bereits vorliegen, ist die Rolle der interzellulären Kommunikation zwischen verschiedenen Zelltypen in der Strahlenreaktion des Herzmuskels noch nicht verstanden.

Zielsetzung

Neben Tumorerkrankungen sind Nicht-Krebserkrankungen, wie Herz-Kreislauf-Erkrankungen, immer mehr im Fokus der durch ionisierende Strahlung verursachten gesundheitlichen Schäden. Die entscheidenden Mechanismen, wie initiierte zur Erkrankung führende Ereignisse, sind hierzu noch nicht bekannt. Es ist das Ziel des geplanten Projektes grundlegende Erkenntnisse zur Rolle der Zellkommunikation bei der strahlen-induzierten Pathogenese von Herzerkrankungen zu liefern. Dieses Wissen zu grundlegenden Mechanismen und Strahlenreaktionen ist essentiell zur Risikoabschätzung für strahleninduzierte Herzerkrankungen. Von besonderem Interesse sind dabei die Auswirkungen geringer Strahlendosen $\leq 0,5$ Gy.

Methodik

Um den Einfluss von Zellkommunikationsprozessen in der Strahlenantwort von Zellen des Herzgewebes besser zu verstehen, sollen diese Prozesse in Zellkulturmodellen charakterisiert werden. Zunächst sind von Zellen freigesetzte Faktoren zu untersuchen, um Daten zu strahleninduzierten Änderungen in der Sekretom-Zusammensetzung zu erhalten. Weiterhin werden Sekretom-induzierte funktionelle Veränderungen auf Zellen verglichen. Dies wird sowohl durch Medium-Transfer als auch durch Ko-Kultivierung analysiert. Dazu ist die Aufgabe in 4 Arbeitspakete (AP) gegliedert. Aufgrund ihrer Häufigkeit wird zunächst die Kommunikation zwischen Endothelzellen und Fibroblasten untersucht.

Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik

AP1 fasst den aktuellen Kenntnisstand der Aufgabenstellung zusammen. Hierfür wird eine intensive Literaturrecherche durchgeführt, die mit der Beschreibung der klinischen Situation beginnt. Weiterführende Forschungsergebnisse mit Bezug auf die Biologie von kardialen Zellen werden zusammengefasst und durch innovative in-silico-Methodiken erweitert. Ergänzend dazu werden neuartige kardiale Modellsysteme vorgestellt, die eine patientennahe Betrachtung der Fragestellung ermöglichen. Molekulare Bewertungsmaßstäbe werden zudem als Werkzeug der kardiovaskulären Risikobewertung vorgestellt.

Charakterisierung von strahleninduzierten Sekretomveränderungen

Die Auswirkung niedrigdosierter Strahlung im Bereich 50-500 mGy auf die Freisetzung von Zytokinen und Chemokinen aus kardiovaskulären Zellen *in-vitro* ist unbekannt. Da das Herz ein multizellulärer Verband ist, fokussieren wir uns in dieser Untersuchung auf humane Endothelzellen und kardiale Fibroblasten als Mediatoren niedrigdosierter Strahlung.

Charakterisierung von funktionellen Veränderung nach Mediumtransfer

Im AP3 werden Endothelzellen mit konditioniertem Medium aus Kontroll- oder bestrahlten Fibroblasten kultiviert. In Analogie wird ein Mediumtransfer für Fibroblasten durchgeführt. Nachfolgend werden verschiedene funktionelle Assays durchgeführt. Zellüberleben und reaktive Sauerstoffspezies werden für beide Zelltypen bestimmt. Für Endothelzellen wird außerdem die Vaskularisierung und das angiogene Verhalten und für Fibroblasten das Migrationsverhalten gemessen.

Analyse der Zellkommunikation unter Ko-Kultivierungsbedingungen

Das Ziel für AP4 ist es, ein bestmögliches physiologisches Modell der Zell-Zell-Kommunikation zu entwickeln. Dazu wird ein Transwell System zur Ko-Kultur von Endothelzellen und humanen Fibroblasten eingesetzt, dass die Kultivierung des einen Zelltypes gemeinsam mit dem vorbehandelten jeweiligen anderen Zelltyp ermöglicht.

Ergebnisse

Bericht – aktueller Stand der Wissenschaft

Ein Bericht zum aktuellen Stand der Wissenschaft auf dem Gebiet strahleninduzierter Herz-Kreislaufkrankungen wurde erstellt. Dieser Bericht gliedert sich in die Schwerpunkte: (1) Kenntnisstand Herzbiologie und strahleninduzierte Veränderungen (2) Ein wissenschaftlicher Ausblick: Neue In-vitro- und Ex-vivo-Modellsysteme (3) Mögliche Bewertungsmaßstäbe für Strahleneffekte auf das Herzkreislaufsystem.

Charakterisierung von strahleninduzierten Sekretomveränderungen

Für die Screeninganalyse sezernierter Faktoren wurde Kulturüberstand nach 72 h und unterschiedlichen Bestrahlungsdosen (0, 50 und 500 mGy) aus Endothelzellen und Fibroblasten isoliert. Die gewonnenen Proben wurden mit Proteome Profiler Array und ELISA analysiert. Die in diesem AP erhobenen Daten zeigen zelltypspezifische Zytokinmuster und Anreicherung in Endothelzellen oder Fibroblasten. Eine differentielle Regulation nach Exposition mit niedrigdosierter ionisierender Strahlung konnten wir nicht beobachten, so dass wir mögliche alternative Zell-Zell-

Kommunikationswege zur weiteren Untersuchung vorschlagen. Besonders die Detektion von vesikulären Strukturen in der interzellulären Kommunikation erscheint uns als ein wichtiger Baustein für die Risikobewertung strahleninduzierter Effekte im kardiovaskulären System.

Geplante Weiterarbeit

Als nächste Schritte werden Mediumtransfer-Experimente und Ko-Kulturansätze zur Untersuchung funktioneller Auswirkungen von Kommunikationsprozessen gemacht.

Validierung genetischer Loci, die das Lungenkrebsrisiko in Abhängigkeit von der Radonexposition beeinflussen - genetische Typisierung

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3621S32220	01.10.2021	28.02.2023	273.483,78 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Institut für Pathologie, Abt. allg. und molekulare Pathologie, Universität Tübingen			
Projektleitung Dr. Irina Bonzheim	Fachbegleitung BfS Dr. Maria Gomolka	verantwortlich für den Text Dr. Irina Bonzheim	

Hintergrund

Das strahleninduzierte Lungenkrebsrisiko ist individuell unterschiedlich und basiert neben umweltbedingten Einflüssen auf genetischen Faktoren, die z. B. die DNA-Reparatur modifizieren. Studien zeigen, dass eine Vielzahl an Suszeptibilitätsloci im Genom einen Einfluss auf die Lungenkrebs-Prädisposition haben. Eine verminderte Reparatur von DNA-Schäden führt zu deren Akkumulation. Eine Strahlenbelastung durch Radon verursacht vor allem in der Lunge DNA-Schäden, die das Lungenkrebsrisiko erhöhen. Besonders Mutationen in Genen, die eine zentrale Rolle in der DNA-Reparatur spielen (AtaxiaTeleangiectasiaMutated, NymegenBreakageSyndrome und BReastCAnce 1/2) zeigen eine Relevanz für die Entwicklung eines Tumors. Zusätzlich zu solchen hochpenetranten monogenen Mutationen scheinen niedrig penetrante Genpolymorphismen das Krebsrisiko zu beeinflussen. In den Vorläuferprojekten wurden in DNA-Proben von Wismut-Bergarbeitern Genregionen identifiziert, die im Zusammenhang mit Radon das Lungenkrebsrisiko beeinflussen.

Zielsetzung

Die Ergebnisse des Vorläuferprojekts 3620S32271 ermöglichten zusammen mit anderen Studien die Eingrenzung auf 10 Kandidatengene, deren Zusammenhang mit dem radoninduzierten Lungenkrebsrisiko validiert werden soll. Dazu werden diese Genregionen mit ausgewählten genetischen Markern (Single Nucleotide Polymorphisms (SNP)) typisiert. Die DNA wurde zuvor aus Normalgewebe von 500-600 Lungenkrebsfällen ehemaliger Wismut-Bergarbeiter gewonnen und wurde von der Wismut Bioprobenbank zur Verfügung gestellt.

Methodik

Es erfolgt eine Amplikon basierte Next Generation Sequencing (NGS)-Typisierung von 28 Markern in den 10 Kandidatengenen nach vorheriger Etablierung des Panels an 15 Proben mit fragmentierter DNA. Zusätzlich wird die kodierende Sequenz des TP53 Gens und die Hotspotregionen des KRAS Gens untersucht, um Kontaminationen durch Tumorgewebe auszuschließen.

Die Genotypisierung der ausgewählten Marker erfolgt mittels NGS-basiertem „Targeted Sequencing“. Die Library-Generierung, -Weiterbearbeitung (inklusive Library-Quantifizierung (LightCycler480)) sowie die Sequenzierung erfolgt teilweise manuell, teilweise automatisiert mit dem Ion Chef sowie dem Ion GeneStudio S5 Prime (AmpliSeq Library Kit v2.0, Ion 510 & Ion 520 & Ion 530 Kit – Chef, Ion 540 Kit – Chef, Ion 520/530 Chip Kit, Ion 540 Chip Kit, Thermo Fisher Scientific). Das Panel wurde speziell für stark degradierte DNA mit Amplikonlängen von maximal 140 Basenpaaren entwickelt. Zur Etablierung des Panels wurden 15 DNA-Proben aus Normalgewebe mit starker DNA-Fragmentierung (100-200 Basenpaare) analysiert, um die Abdeckung der Amplikons zu testen. Im Anschluss erfolgte

die Pilotstudie mit 50 Normalgewebe-Proben aus dem Archiv des Instituts für Pathologie, Universitätsklinikum Tübingen.

Für die Genotypisierung der Wismut-Proben reichen sehr kleine DNA Mengen aus (10-20 ng) sodass davon ausgegangen werden kann, dass primär keine Proben von den Analysen ausgeschlossen werden müssen.

Zur Ermittlung von Verwandtschaftsbeziehungen wird DNA an Eurofins weiter versandt.

Ergebnisse

AP1 Paneldesign

Es wurde ein AmpliSeq Custom Panel designt, das die 28 Marker sowie die Hotspotregionen in TP53 und KRAS abdeckt. Mittels des Panels werden 3,78 kb in 28 Amplikons analysiert.

AP1 Etablierung des AmpliSeq Custom Panels an 15 DNA-Proben aus Normalgewebe mit starker DNA-Fragmentierung

Zur Etablierung des Panels wurden 15 DNA-Proben aus Normalgewebe mit starker DNA-Fragmentierung (100-200 Basenpaare) aus dem Molpath Archiv des Instituts für Pathologie, Universitätsklinikum Tübingen analysiert, um zu testen, ob relevante Qualitätsparameter erfüllt werden.

Die Analysen weisen eine gute mittlere Abdeckung mit annehmbarer gleichförmiger Amplifikation aller Regionen auf, so dass eine genügend hohe Abdeckung der am schwächsten amplifizierten Amplikons erreicht wird. Trotz hoher Fragmentierung zeigt sich ein hoher Prozentsatz an End-to-End Reads.

Die Analyse der 28 Marker zeigt in den meisten Fällen und Positionen eindeutig definierbare Genotypen (um 0, 50 oder 100 % Allelfrequenzen der Variante). Für einzelne Fälle zeigen sich für manche Marker Allelfrequenzen zwischen 10 und 40 % (rote Markierung) und zwischen 60 und 90 % (gelbe Markierung).

AP1 Pilotstudie: Analyse mit 35 DNA-Proben aus Normalgewebe aus dem Archiv des Instituts für Pathologie Tübingen (DNA Isolationsmethode analog zu Wismut-Probenbank-Fällen)

Für die Pilotstudie wurden 35 Pilotfälle aus dem Archiv des Instituts für Pathologie Tübingen zusammengestellt. Es wurde Normalgewebe von Patienten mit Bronchialkarzinom ausgesucht. Die DNA-Isolation erfolgte analog zur Methode, die für die Wismut-Probenbank-Fälle verwendet wurde. Die Analyse der 28 Marker zeigt in den meisten Fällen und Positionen eindeutig definierbare Genotypen (um 0, 50 oder 100 % Allelfrequenzen der Variante). Für einzelne Fälle zeigen sich für manche Marker Allelfrequenzen zwischen 10 und 40 % (rote Markierung) und zwischen 60 und 90 % (gelbe Markierung). Die geprüften Qualitätsparameter zeigen für die 35 Pilotfälle ähnliche Werte (Daten nicht gezeigt). Da die Probenqualität (DNA-Integrität) der Tübinger Fälle generell gut ist, zeigen die Pilotfälle eine etwas bessere Amplifizierbarkeit als die 15 Testfälle. Ob die anscheinend seltener vorliegende Problematik der Abweichung der Allelfrequenzen von 0, 50 und 100% mit der besseren Amplifizierbarkeit zusammenhängt, lässt sich aufgrund der niedrigen Probenzahl schwer abschätzen. Die Daten zeigen, dass das NGS-Panel zur Genotypisierung der 28 Marker geeignet ist.

Geplante Weiterarbeit

Im nächsten Schritt erfolgt die Genotypisierung der Wismut-Probenbank-Fälle.

Themenbereich 04 - Medizinische Strahlenexposition

Erstellung und Überarbeitung von technischen Normen für den Strahlenschutz und die Qualitätssicherung in der medizinischen Radiologie

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3620S42351	01.04.2020	31.03.2023	217.726,00 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer DIN Deutsches Institut für Normung e.V.			
Projektleitung Elisabeth Beck	Fachbegleitung BfS Dr. Helmut Schlattl	verantwortlich für den Text Elisabeth Beck	

Zielsetzung

Im Rahmen der Modernisierung des Strahlenschutzes wurde durch die Richtlinie 2013/59/Euratom neues nationales Strahlenschutzrecht umgesetzt. Ziel dieses Vorhabens ist es, bestehende Normen an den aktuellen Stand der Technik anzupassen und zu konkretisieren, um so die Umsetzung der rechtlichen Vorschriften zur neuen Strahlenschutzverordnung und zum Strahlenschutzgesetz bundeseinheitlich zu gewährleisten. Des Weiteren ist es das Ziel, nationale Normen neu zu erarbeiten, um die Überwachung von Einrichtungen der medizinischen Radiologie hinsichtlich technischer Eigenschaften, Qualität und Strahlenschutz abzudecken.

Es gilt zudem, besonders bedeutsame DIN-Normen zur Einflussnahme in das europäische und internationale Normenwerk zu überführen. In Hinblick auf die Übernahmepflicht von europäischen Normen und zur Wahrung des deutschen Interesses sind wichtige nationale Normen bei den europäischen Normungsorganisationen CEN und CENELEC einzubringen.

Insbesondere die neuen Normungsvorhaben sollen dazu dienen, einen Einfluss auf die europäische und internationale Normung zu nehmen, indem diese Themen frühzeitig bei den entsprechenden Organisationen CEN, CENELEC, ISO bzw. IEC etabliert werden, um die Ziele neuerer europäischer Vorgaben für den Strahlenschutz harmonisiert umsetzen zu können.

Einzelzielsetzung

Es werden folgende Teilgebiete durch das Vorhaben abgedeckt:

- Anpassung bestehender Normen an das neue Strahlenschutzrecht;
- Ergänzung fehlender Anforderungen zu Messunsicherheiten zum Nachweis der Konformität mit den SSK-Empfehlungen sowie den Empfehlungen der „Joint Committees for Guides in Metrology“;
- Bearbeitung neuer Normen im Bereich der Diagnostik für digitale Volumentomografie (DVT), (Lungen-)Tomosynthese-Verfahren und zur Dosiseffizienz von CT-Scannern;
- Erstellung neuer Anforderungen und Prüfungen an Verfahren zur Dosimetrie;
- Erstellen der wesentlichen Verfahren zur Durchführung eines Risikomanagements für den medizinischen Strahlenschutz in der Anwendung;
- Überarbeitung von DIN-Normen zum baulichen Strahlenschutz.

Des Weiteren wird durch DIN die Teilnahme von Experten des Normenausschusses Radiologie (NAR) an europäischen und internationalen Sitzung ermöglicht, um die Implementierung und Verteidigung national wichtiger Themen zur medizinischen Radiologie voranzutreiben und so das erhebliche

Interesse des Bundes an einer Koordinierung der Normenerstellung und frühzeitiger und direkter Mitwirkung bei der internationalen Normerstellung zu gewährleisten.

Methodik

Das Vorhaben gliedert sich in drei Arbeitspakete: In einem ersten Arbeitspaket (AP 1) erfolgte in den Monaten April 2020 bis Juni 2020 eine Aufarbeitung des themenbezogenen Standes der Technik, zur weiteren Berücksichtigung bei der Bearbeitung der Arbeitspakete AP 2 und AP 3. Im Rahmen der Arbeitspakete AP 2 und AP 3 steht beginnend mit Monat Mai 2020 und über die gesamte Projektlaufzeit die Erstellung von Norm-Entwürfen, die Finalisierung bereits in Überarbeitung befindlicher Normen sowie die Aufnahme von Projektarbeiten zur Erstellung der vorgesehenen neuen Normungsinhalte im Fokus.

Der Bearbeitungsprozess der Normen unterliegt dabei den Regeln von DIN, u. a. der Richtlinie für Normenausschüsse des DIN und der Geschäftsordnung des NAR sowie der DIN 820-4 "Geschäftsgang".

Durchführung

Die Durchführung aller Arbeiten erfolgte ausschließlich per E-Mail-Korrespondenz sowie im Rahmen von internetbasierten Telefonkonferenzen, da die durch Covid-19 verursachten Einschränkungen eine physische Zusammenkunft der Experten in 2021 wie schon zuvor in 2020 nicht erlaubten. Dieser Umstand hatte, wie sich im Zuge der Arbeiten herausstellte, keine negative Auswirkung auf die erzielten Ergebnisse.

Der im Rahmen des Arbeitspaketes AP 1 vorgesehene Sachbericht wurde planmäßig erstellt und fristgerecht Ende Juni 2020 an den BfS-Projektbegleiter übergeben. Einzelne, im Rahmen der weiteren Arbeiten noch zu klärende Fachfragen wurden vermerkt und deren Lösung sodann nachgehalten.

Im Rahmen der Arbeitspakete AP 2 sowie AP 3 des Auftrages wurde die Erstellung von Norm-Entwürfen, Finalisierung von bereits in Überarbeitung befindlichen Normen sowie das Starten neuer Projekte zur Erstellung neuer Normungsinhalte gemäß den von den Arbeitsausschüssen des NAR festgelegten Maßnahmen vorangetrieben.

Der dem Auftrag nach vorgesehene Zwischenbericht wurde erstellt und fristgerecht Mitte April 2021 an den BfS-Projektbegleiter übergeben, eine korrigierte Version Anfang Mai 2021 an den BfS-Projektbegleiter übermittelt.

Einhergehend mit der Weiterbearbeitung der einzelnen Teilprojekte wurde im Berichtszeitraum die Prüfung der noch zu klärenden Detailfragen zu neuen Normungsvorhaben in Zusammenarbeit mit dem BfS-Fachbegleiter abgeschlossen. Der BfS-Fachbegleiter nahm an einigen Ausschusssitzungen teil, um finale klärende Aussagen zu noch offenen Fragen zu tätigen.

Anhand der Ergebnisse konnte der dem Projektangebot als Anlage 2 beigegebene schematische Zeitplan weiter konkretisiert werden. Bereits veröffentlichte Entwürfe sowie Normen wie auch die einzelnen Arbeitsstände und, wo zutreffend, neu geplante Zeitrahmen der Projekte wurden gekennzeichnet und dem BfS-Projektbegleiter übergeben.

Des Weiteren wurde Mitte Januar 2022 ein Projektgespräch mit dem BfS-Projektbegleiter sowie den Obleuten der NAR-Arbeitsausschüsse abgehalten. In diesem Rahmen wurden die bisherigen Ergebnisse besprochen und Fragen der Teilnehmer beantwortet, wie auch seitens der NAR-

Geschäftsführung in Zusammenarbeit mit den Obleuten potentielle neue Teilprojekte für einen möglichen Folgevertrag aufgezeigt.

Ergebnisse

Veröffentlichung von Normen und Norm-Entwürfen zu den einzelnen Teilprojekten

Im Berichtszeitraum konnten ein Norm-Entwurf und sieben Normen veröffentlicht werden. Eine Norm wurde zurückgezogen. Belegexemplare dieser nachfolgend aufgeführten Dokumente wurden dem BfS-Fachbegleiter übersandt.

Es handelt sich um folgenden Norm-Entwurf:

- E DIN 6853-2:2021-08, Medizinische ferngesteuerte, automatisch betriebene Afterloading-Anlagen - Teil 2: Strahlenschutzregeln für die Errichtung

Es handelt sich um folgende Normen:

- DIN 6868-159:2021-04, Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben - Teil 159: Abnahme- und Konstanzprüfung in der Teleradiologie
- DIN 6812:2021-06, Medizinische Röntgenanlagen bis 300 kV - Regeln für die Auslegung des baulichen Strahlenschutzes
- DIN 6815:2021-06, Medizinische Röntgenanlagen bis 300 kV - Regeln für die Prüfung des Strahlenschutzes nach Errichtung, Instandsetzung und wesentlicher Änderung
- DIN 6847-2:2021-06, Medizinische Elektronenbeschleuniger-Anlagen - Teil 2: Bautechnische Anforderungen an den Strahlenschutz und Festlegungen zur Prüfung von Genehmigungsvoraussetzungen für den Betrieb
- DIN 6873-1:2021-05, Bestrahlungsplanungssysteme - Teil 1: Inbetriebnahme
- DIN 6868-1:2022-01-06, Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben - Teil 1: Allgemeines
- DIN 6868-157:2022-01, Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben - Teil 157: Abnahme- und Konstanzprüfung an Bildwiedergabesystemen in ihrer Umgebung

Es handelt sich um folgende Zurückziehung:

- DIN 6848-1, Kennzeichnung von Untersuchungsergebnissen in der Radiologie - Teil 1: Patientenorientierung bei bildgebenden Verfahren
→ Diese Norm wurde ersetzt durch DIN 6862-3:2021-06, Identifizierung und Kennzeichnung von Bildaufzeichnungen in der medizinischen Diagnostik - Teil 3: Patientenorientierung bei bildgebenden Verfahren

Ergebnisse zu Neuen Normungsvorhaben

Im Berichtszeitraum konnten die noch offenen Fragen zu den „Neuen Normungsvorhaben“ final geklärt werden, sodass hier teilweise die Arbeiten begonnen haben. Von den avisierten 11 Projekten für „Neue Normvorhaben“ konnte bisher folgendes Ergebnis erzielt werden:

- 2 Projekte wurden abgeschlossen (als DIN 6868-1 und DIN 6868-157 veröffentlicht, siehe 5.1);
- 6 Projekte befinden sich in Erarbeitung;

- 2 Projekte werden durch bereits existierende Normen abgedeckt;
- 1 Projekt kann noch nicht erarbeitet werden, weil zu diesem Thema aktuell noch Ringversuche stattfinden.

Eine detaillierte Auflistung aller Ergebnisse wird im Zwischenbericht 2022 erfolgen.

Geplante Weiterarbeit

Die Weiterarbeit erfolgt in jedem Teilprojekt entsprechend den Grundsätzen der Normungsarbeit.

Arbeiten an noch (weiter) zu bearbeitenden und noch nicht veröffentlichten Projekten werden weiter fortgeführt bzw. teilweise ab Januar 2022 begonnen. Erste Ergebnisse zu den jeweiligen Projekten werden zu den Frühjahrssitzungen erwartet.

Simulation von interventionellen Strahlenanwendungen in virtueller Realität zur Optimierung des Strahlenschutzes von Personal und Patienten

Forschungskennzeichen 3621S42350	Beginn 01.07.2021	Ende 01.07.2023	Fördermittel 201.879,22 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Northdocks GmbH			
Projektleitung Silas Fuchs	Fachbegleitung BfS Dr. Hugo de las Heras Gala	verantwortlich für den Text Dr. Julia Barenthien Felix Höfer	

Zielsetzung

Zielsetzung des Gesamtprojekts ist die Erstellung einer Simulation von interventionellen Strahlenanwendungen in virtueller Realität (VR) zur Optimierung des Strahlenschutzes von Personal und Patienten. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde in Arbeitspaket (AP) 2 eine erste Version des Schulungstools entwickelt, damit essentielle Strahlenschutzmaßnahmen in einer VR-Umgebung trainiert werden können.

Einzelzielsetzung

Ziel des AP 2 ist die Erstellung einer ersten funktionierenden Version des Tools. Dafür waren verschiedene Vorarbeiten notwendig, die im Folgenden beschrieben werden.

Für die Simulationsumgebung soll ein typisches Katheterlabor mit C-Bogen, Tisch und Patienten in VR nachgebildet werden. Des Weiteren sollen typische Schutzmittel (Bleimantel, Schilddrüsenschutz, Bleihaube, Bleibrille, Bleiplatte, Unterbodenschutz) simuliert werden, die von den Trainierenden genutzt werden können. Die erste Version soll darüber hinaus die Möglichkeit bieten, Bleiplatte und Unterbodenschutz so zu platzieren, dass Streustrahlung minimiert wird. Zudem soll der Bildverstärker an den Patienten heranzufahren sein und bei der simulierten Untersuchung soll der Abstand zum C-Bogen zu halten sein.

Für die Erstellung einer ersten Version des Tools ist das Ziel, eine möglichst korrekte Simulation der Nutz- und Streustrahlung zu programmieren. Dafür ist es notwendig, die Nutz- und Streustrahlung separat zu simulieren. Zudem sollen Organdosiswerte und die effektive Dosis berechnet bzw. abgeschätzt werden.

Des Weiteren soll das Schulungstool darüber hinaus folgende Features beinhalten:

- Bei der simulierten Untersuchung sollen die Finger mit und ohne Bleihandschuhe innerhalb der Belichtungsautomatik platziert werden können.
- Die Bildrate (Cine und Fluoro) soll veränderbar sein.
- Es sollen die Low-medium-high Einstellung sowie voll- und semitransparente Blenden verwendet werden können.
- Es sollen „strahlenarme“ Projektionen auswählbar sein.

Methodik

Die Simulationsumgebung (typisches Katheterlabor) und die Schutzmittel in der Simulationsumgebung wurden nach den neuesten Standards des VR-Echtzeitrenderings ihren reellen Vorbildern nachempfunden.

Die Simulation der Nutz- und Streustrahlung basiert auf physikalischen Grundlagen. Sie wurde mit Line Traces und Reflexionen umgesetzt. Die Zahlenwerte stammen aus der Literaturrecherche, den Informationen aus dem Strahlenschutzkurs des UKSH und Material des Bundesamtes für Strahlenschutz. Die Visualisierung trennt Nutz- und Streustrahlung danach, ob die Strahlung am Detektor ankommt oder nicht.

Durchführung

Im Rahmen der Durchführung wurde die Simulationsumgebung erstellt. Dafür wurden zum einen ein Katheterlabor mit C-Bogen, Tisch und Patienten und zum anderen verschiedene Schutzmittel wie beispielsweise Bleischürze, Schilddrüsenschutz, Bleihaube und Bleibrille in VR nachgebildet und in die Simulationsumgebung überführt. Neben der Nachbildung des Katheterlabors und der Schutzmittel wurde auch die Möglichkeit zur Bewegung in der Simulationsumgebung und die Interaktion mit Gegenständen wie dem C-Bogen oder den Schutzmitteln integriert (z. B. Platzierung von Schutzmitteln, um Streustrahlung zu minimieren oder Bildverstärker an Patienten heranfahren). Als letzten Schritt wurde die Simulation der Strahlung (Nutz- und Streustrahlung) programmiert. Diese ermöglicht es, unter anderem die Streustrahlung visuell sichtbar zu machen, Organdosiswerte und die effektive Dosis zu simulieren und die Reduktion dieser Werte durch Schutzmittel anzuzeigen.

Ergebnisse

Ziel des AP 2 war die Entwicklung einer ersten funktionierenden Version des Schulungstools, die im Bundesamt für Strahlenschutz vorgestellt werden soll. Zudem soll eine Bedienungsanleitung für das Schulungstool übermittelt werden.

Vorstellung des Schulungstools

Die erste funktionierende Version des Schulungstools wurde im Bundesamt für Strahlenschutz präsentiert und dort durch die Mitarbeitenden des Bundesamts für Strahlenschutz ausprobiert.

Die erste Version des Tools basiert auf der neu entwickelten Simulation der Nutz- und Streustrahlung, die diese auch visuell in der Simulationsumgebung darstellt. Die Visualisierung trennt Nutz- und Streustrahlung danach, ob die Strahlung am Detektor ankommt oder nicht. Das Tool bietet darüber hinaus die Möglichkeit, die Wirkung von Schutzmitteln (Bleimantel, Schilddrüsenschutz, Bleihaube, Bleibrille, Bleiplatte, Unterbodenschutz) sowie den Umgang mit Schutzmaßnahmen während der Untersuchung zu trainieren.

Features der ersten Version des Schulungstools umfassen:

- Einfluss der Bildrate (Modalitäten Cine und Fluoro) anzeigbar
- Einfluss der Durchleuchtungs- und Cine-Zeit anzeigbar
- Verwendung von vorprogrammierten Modi möglich
- Einfluss des Abstands des Bildverstärkers vom Objekt möglich
- Optimierung der Einblendung
- Verwendung semitransparenter Blenden möglich

- Verhalten bei Verwendung von Bleihandschuhen sichtbar
- Einfluss des Abstands von der Strahlenquelle beim Filmen und bei digitalen Volumentomographie-Aufnahmen anzeigbar
- Auswahl strahlenarmer Projektionen möglich

Des Weiteren kann das Tool Organdosiswerte und die effektive Dosis berechnen bzw. abschätzen.

Bedienungsanleitung für VR-Brillen und das Schulungstool

Zusätzlich zur ersten funktionierenden Version des Tools wurde auch eine Bedienungsanleitung übermittelt. In der Bedienungsanleitung werden sowohl der Umgang mit der VR-Brille und den Controllern (z. B. im Hinblick auf die Bewegung und Orientierung in der Simulationsumgebung mit den Controllern) als auch mit dem Schulungstool (z. B. Einstellen des C-Bogens) erklärt. Zudem existiert für eine genauere Erläuterung des Umgangs mit dem Schulungstool ein Link zu einer Videoanleitung, die als eine Art visuelle Schritt-für-Schritt-Anleitung mit Sprechertext angesehen werden kann.

Geplante Weiterarbeit

Für das weitere Vorgehen sind für die nächsten Arbeitsschritte in AP 3 die Evaluierung des Schulungstools und die Erstellung einer endgültigen Version des Schulungstools geplant. Für die Evaluation wird eine Simulation der Diagnostischen Koronarangiografie sowie eines weiteren Eingriffs simuliert, der im Verlauf von AP 3 noch ermittelt wird. Im Anschluss daran ist die Validierung des Schulungstools mit der entwickelten Version der Software durch Endanwender*innen aus dem Bereich des ärztlichen Personals angedacht, um das Tool zu evaluieren. Auf Basis der Rückmeldungen des ärztlichen Personals und der Mitarbeitenden des Bundesamtes für Strahlenschutz wird die erste Version des Schulungstools überarbeitet und modifiziert, um eine verbesserte Version des Tools zu erarbeiten. Die endgültige Version des Tools wird dann erneut evaluiert und dann im Bundesamt für Strahlenschutz präsentiert.

Themenbereich 05 - Radioökologie

Validierung des atmosphärischen Ausbreitungsmodells ARTM durch experimentelle Untersuchungen

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3618S72591A	01.05.2020	31.03.2024	492.082,85 EUR

Forschungs- / Auftragnehmer

Brenk Systemplanung GmbH
Hochschule Düsseldorf

Projektleitung

Dr. Olaf Nitzsche

Fachbegleitung BfS

Dr. Margit Pattantyús-Ábrahám

verantwortlich für den Text

Dr. Olaf Nitzsche

Hintergrund

Das Langzeitausbreitungsmodell ARTM (Atmosphärisches-Radionuklid-Transport-Modell) wird zur mikro- und mesoskaligen Berechnung der atmosphärischen Dispersion bei Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Fortluft eingesetzt. Im vorliegenden Programmpaket kann ein diagnostisches Windfeldmodell zur Berechnung von Wind- und Turbulenzfeldern im Einfluss von Gebäuden und Geländeunebenheiten vorgeschaltet werden. Im Forschungsvorhaben soll das vorliegende Programmpaket durch experimentelle Untersuchungen im Feldmaßstab validiert werden.

Zielsetzung

Ziel der Validierung ist es, aus dem Vergleich zwischen Modellberechnungen und Immissionsmessungen im Feldmaßstab den Nachweis zu erbringen, dass das Programmpaket ARTM für die Anforderungen der Berechnung der atmosphärischen Dispersion zur Ermittlung von Expositionen durch Ableitungen radioaktiver Stoffe geeignet ist. Im vorliegenden Forschungsvorhaben soll dazu die Situation bei hohen Emissionshöhen betrachtet werden. Es ist zu prüfen, inwieweit Berechnungen und Messungen der Immissionskonzentrationen bei Ableitungen über mehrere Stunden und der dabei beobachteten Abläufe verschiedener Wettersituationen übereinstimmen.

Methodik

Die experimentelle Validierung des Programmpakets soll durch Immissionsmessungen im Feldmaßstab (horizontal im Bereich bis einige 10 km um die Emissionspunkte, vertikal vom Boden bis in ca. 400 m Höhe) erfolgen. Benötigt werden neben Lage und zeitlichen Verlauf der Emission: Geländedaten, Immissionskonzentrationen und meteorologische Daten.

Vorgesehen sind je zwei Messungen in einem Gebiet mit eher flacher Geländestrukturierung (Plan Umgebung östlich/nordnordöstlich von Aachen) und in einem Gebiet mit starker Geländestrukturierung (Plan Eifel).

Emissionen

Als Emissionen sollen Freisetzungen des Tracers Perfluorcarbon (PFC) genutzt werden. Die Emission erfolgt mit Dispersern. Die Disperser werden während der Emission durch unbemannte Fluggeräte (UAS, auch als Drohnen bezeichnet) an einen definierten Punkt in einer üblichen Höhe von Fortluftkaminen der Kernkraftwerke (> 100 m) platziert. Für eine kontinuierliche Emission werden mehrere UAS eingesetzt. Die Emissionsdauer beträgt mehrere Stunden. Die Emissionsrate ist dabei konstant. Die Bestimmung der horizontalen Ortskoordinate der Emission erfolgt mit GPS-Geräten. Die Emissionshöhe wird durch ein GPS-Gerät in den UAS auf den vorgegebenen Wert konstant

gehalten. Die Zeitdauer der Emissionen wird durch am Beginn der Messung kalibrierte Uhren ermittelt.

Immissionsmessungen

Die Immissionsmessungen erfolgen durch Adsorption der Tracersubstanz an ein Sorbent (hier Aktivkohle in Glasröhrchen) und anschließende Ermittlung der sorbierten Tracermenge in einem Labor. Zur Konzentrationsbestimmung wird eine definierte Menge an Luft durch ein Röhrchen geleitet. Nach Beendigung der Beaufschlagung des Röhrchens wird dieses verschlossen. Die Röhrchen sind in einem Messkoffer mit externer Pumpe untergebracht. Beginn und Ende der Luftdurchleitung wird durch einen Operator ausgelöst. Während der Messung werden Orts- und Zeitkoordinaten im Abstand weniger Sekunden durch GPS Signale erfasst und aufgezeichnet.

Die Messkoffer werden in zwei Messflugzeugen und in einem Mess-PKW untergebracht. Die jeweiligen Fahrzeuge bewegen sich auf vorgegebenen Routen durch das Messgebiet. Flughöhen der Flugzeuge sind 300 m bzw. 400 m über Gelände.

Nach Abschluss einer Messung werden die verwendeten Röhrchen in das Labor zur Auswertung gesendet.

Meteorologische Messungen

Messungen meteorologischer Parameter sollen an zwei Stellen vertikal aufgelöst erfolgen. Dazu wird ein Doppler-SODAR stationär während der gesamten Messkampagne und ein Doppler LIDAR in einem Messwagen (stationär während einer Einzelmessung) verwendet. Messhöhen reichen von bodennah bis ca. 200 m über Gelände.

Validierungsberechnungen

Es wird mit den Daten zum Geländeverlauf im jeweiligen Messgebiet ein ARTM-Modell erstellt. Mit den ermittelten meteorologischen Parametern erfolgt die Windfeldberechnung. Dabei werden beide Messorte und die verschiedenen Messhöhen berücksichtigt. Anschließend erfolgen Ausbreitungsberechnungen unter Verwendung der ermittelten Emissionsdaten. Dabei werden verschiedene Grenzschichtmodelle und ein Vergleich der berechneten mit den gemessenen Immissionswerten verwendet.

Ergebnisse

Mit Stand 31.12.2022 wurden folgende Einzelschritte abgearbeitet.

- Auswahl der Messgebiete,
- Festlegung auf den Tracer PFC,
- Bau der Disperser und Anbindung der Disperser an die UAS,
- Bau der Messkoffer.

Abbildung 1 zeigt den für die Emission entwickelten und gebauten Disperser mit den nummerierten Einzelkomponenten:

- (1) Gefäß für Tracerflüssigkeit,
- (2) Schlauchleitung,
- (3) Schlauchpumpe,
- (4) Zerstäuber,
- (5) Steuerung mit Fernsteuerempfänger und
- (6) Akku.

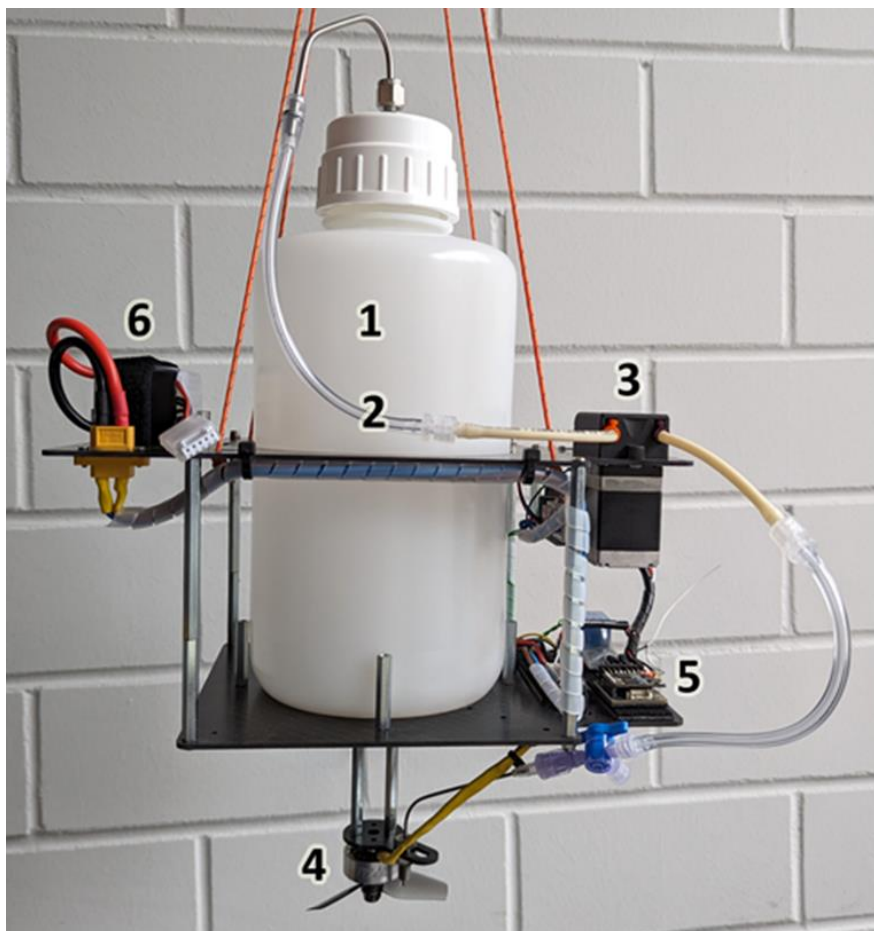


Abbildung 1 *Disperser zur Emission des Tracers PFC*

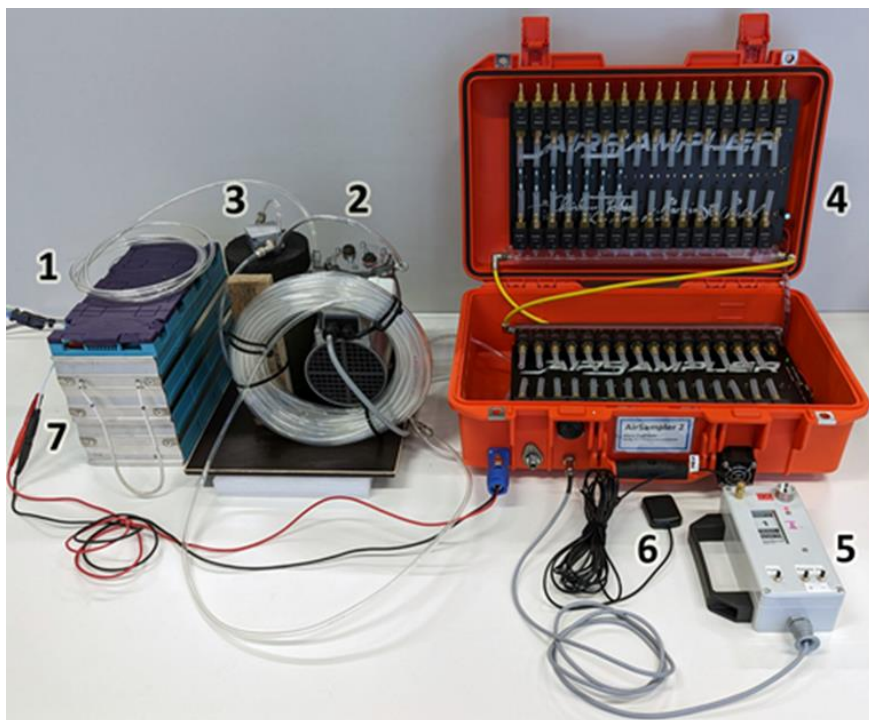


Abbildung 2 **Messkoffer**

Abbildung 2 zeigt den einsatzbereiten Messkoffer mit der zugehörigen Pumpe und Steuerung. Die im Bild nummerierten Einzelkomponenten umfassen:

- (1) Probeneinlassschlauch,
- (2) Pumpe,
- (3) Wasserabscheider,
- (4) Messkoffer,
- (5) Bedienteil und
- (7) Akku.

Geplante Weiterarbeit

Das Forschungsvorhaben wird durch folgende Arbeiten, die 2023 vorgesehen sind, zum Abschluss gebracht:

- Test und Kalibrierung der Disperser,
- Test der Emission mit UAS,
- Auswahl eines Messlabors mit geeignet niedrigen Erkennungs- bzw. Nachweisgrenzen zur PFC-Bestimmung,
- Festlegung von Randbedingungen mit dem für die Flüge zuständigen Unterauftragnehmer,
- Planung der durchzuführenden Messungen mit Festlegung verschiedener Flug- und Fahrtrouten,
- Durchführung der Messungen,
- Durchführung der Validierungsberechnungen,

- Vergleich der Messergebnisse und Berechnungsergebnisse und
- Aufbereitung der ermittelten Daten für eine Veröffentlichung.

Weiterentwicklung des atmosphärischen Radionuklid-Transport-Modells ARTM zur Verarbeitung komplexer und realitätsnaher Wind- und Turbulenzfelder für eine realitätsnähere Modellierung von emittierten radioaktiven Stoffen in die Umwelt

Forschungskennzeichen 3621S52510	Beginn 02.12.2021	Ende 30.09.2024	Fördermittel 358.487,45 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH			
Projektleitung Dr. Cornelia Richter	Fachbegleitung BfS Dr. Margit Pattantyús-Ábrahám	verantwortlich für den Text Dr. C. Richter Dr. M. Pattantyús-Ábrahám	

Hintergrund

Das Ausbreitungsmodell ARTM wird vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) dazu eingesetzt, die atmosphärische Ausbreitung von Radionukliden möglichst realitätsnah zu simulieren. Nur durch diese realitätsnahe Ausbreitungsrechnung können die Vorgaben der EURATOM-Richtlinie 2013/59/Euratom bezüglich einer realistischen Ermittlung der Exposition durch in die Atmosphäre freigesetzte, luftgetragene Radionuklide umgesetzt werden. Um dies dauerhaft zu gewährleisten, ist es fachlich relevant, das Lagrange-Partikelmodell ARTM immer wieder an den fortschreitenden Stand von Wissenschaft und Technik anzupassen, das Modell weiterzuentwickeln und zu validieren. Die Verwendung eines Lagrange-Partikelmodells für die Ermittlung der Exposition der Bevölkerung wurde zudem in der am 31.12.2018 in Kraft getretenen neuen StrlSchV vom 29.11.2018 (Anlage 11 Teil C) festgelegt. Die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten, (AVV Tätigkeiten) vom 08.06.2020 schreibt sowohl für die retrospektive als auch für die prospektive Berechnung der Exposition die Verwendung eines Lagrange-Partikelmodells für die atmosphärische Ausbreitungsrechnung vor.

Zielsetzung

In diesem Forschungsvorhaben wird das Ausbreitungsmodell ARTM weiterentwickelt. Schwerpunktmäßig wird das Modell dahingehend verbessert, dass zeitlich und räumlich höher aufgelöste und bezüglich des Windfeldmodells verbesserte Eingabedaten verwendet werden können. Durch die höhere Auflösung der Eingabedaten, z. B. 2D Niederschlagsverteilungen statt einheitlicher Regenraten im gesamten Simulationsgebiet, und deren Verbesserung können zeitlich und räumlich höher aufgelöste, realitätsnähere Ausgabedaten (Radionuklidkonzentration in der Luft und am Boden sowie die Gammasubmersion) erzeugt und für die weitere Analyse verwendet werden.

Methodik

Das Vorhaben setzt sich insgesamt aus sechs fachlichen Arbeitspaketen zusammen. Neben der Literaturrecherche, um den Stand von Wissenschaft und Technik zu ermitteln, werden dazu Fachkonferenzen besucht. Das Open Source Programm ARTM wird in der Programmiersprache C in 3 Arbeitspaketen weiterentwickelt. Hilfsprogramme und Auswerteroutinen werden in den Programmiersprachen Delphi und Python entwickelt bzw. weiterentwickelt. Validierungen mit Hilfe von durch das BfS zur Verfügung gestellten experimentellen Daten bilden ein weiteres Arbeitspaket.

Anwenderschulungen und Workshops stellen den Austausch mit den Anwenderinnen und Anwendern sicher.

Ergebnisse

Im Jahr 2022 wurde zunächst das Arbeitspaket (AP) 1 „Aufbereitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik“ bearbeitet, um insbesondere die nötigen Grundlagen für die fachlichen AP 3 „Erweiterte Einbindung von MISKAM in ARTM sowie die Verknüpfung von MISKAM und TALdia zur Erzeugung von Wind- und Turbulenzfelder in ARTM“ und 4 „Implementierung von Niederschlagsinformationen“ zu recherchieren und aufzubereiten. Die Arbeiten in AP 3 und 4 wurden ebenso begonnen wie die Arbeiten in AP 2 „Technische Weiterentwicklungen von ARTM und TALdia“. Die im Jahr 2022 erzielten Ergebnisse der AP 1 bis 4 werden im Folgenden noch detaillierter vorgestellt.

Das AP 5 „Validierung von ARTM in Hinblick auf Genehmigungsverfahren (Störfallanalysen) und Langzeitausbreitungsrechnung im urbanen Gebiet“ wird planmäßig erst im Jahr 2024 bearbeitet.

Im Rahmen des AP 6 „Workshops und Fortbildungsveranstaltungen“ wurde vom 15.02. bis 17.02.2022 (jeweils vormittags von 9:00 Uhr bis 13:00 Uhr) eine Online-Schulung mit rund 70 Teilnehmenden durchgeführt. Zudem wurde an der 21. HARMO-Konferenz in Aveiro, Portugal (27.-30.09.2022), deren Fokus bei der atmosphärischen Ausbreitungsrechnung im regulatorischen Kontext liegt, teilgenommen.

Ergebnisse Arbeitspaket 1

Vorbereitend für die Arbeiten in AP 3 wurde eine Literaturrecherche zur Kopplung von Wind- und Turbulenzmodellen durchgeführt. Augenmerk dabei war die Verwendung von unterschiedlichen Modelltypen, die jeweils unterschiedliche Lösungsansätze verwenden. Trotz intensiver Recherche wurden lediglich Kopplungsansätze gefunden, bei denen jeweils beide Modelle (intern) angepasst werden konnten, was im vorliegenden Problemfall der Kopplung von TALdia und MISKAM nicht der Fall ist. Die in der recherchierten Literatur beschriebenen Kopplungen beschränkten sich zudem auf die Richtung vom gröber aufgelösten, äußeren Modell auf das feinere, innere Modell. Die in diesem Vorhaben gewünschte Kopplung von TALdia und MISKAM schließt aber die Rückkopplung von innen nach außen mit ein. In Projektgesprächen per Videokonferenz wurden mögliche Ansätze zu einer kombinierten Nutzung von TALdia und MISKAM diskutiert, da sich, wie die Recherche ergeben hat, eine wirkliche Kopplung nicht meteorologisch/physikalisch sachgerecht, mathematisch sinnvoll, numerisch stabil und gleichzeitig mit vertretbarem Aufwand verwirklichen lässt.

Eine Recherche bezüglich für Deutschland verfügbarer Niederschlagsdaten wurde für die Arbeiten in AP 4 durchgeführt. Insbesondere erwies sich dabei das Climate Data Center (CDC) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) (https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html) als die für das Vorhaben brauchbare Datenquelle für zeitlich (stündlich) und räumlich (über Deutschland in einem Raster von 1 km x 1 km ab verfügbar) aufgelöste Regendaten. Diese RADOLAN Daten, die vom DWD aus Stationsmessungen in Kombination mit Regenradarabgeleitet werden, sind ab Juni 2005 frei verfügbar.

Die Rechercheergebnisse des AP 1 wurden in einem Arbeitspaketbericht dokumentiert.

Ergebnisse Arbeitspaket 2

Im Berichtszeitraum wurde die Umstellung der ARTM-Berechnung auf eine flexible, von den Nutzer*innen frei wählbare Zeitbasis umgesetzt. Eine Linux-Version von ARTM und TALdia wurde erstellt. Die Anpassungen wurden verifiziert und getestet. Um verteiltes Rechnen auch auf Linux

Rechnern zu ermöglichen und dieses unabhängig von der graphischen Benutzeroberfläche GO-ARTM anwenden zu können, wurden plattformunabhängige Python-Skripte erstellt und diese ebenfalls umfangreich getestet und verifiziert.

Ergebnisse Arbeitspaket 3

Zur erweiterten Einbindung von MISKAM in ARTM wurden zunächst Testrechnungen zur thermischen Schichtung und dem Grenzschichtprofil in MISKAM durchgeführt und diese mit den in TALdia angesetzten Profilen entsprechend der VDI Richtlinie 3783 Blatt 8 verglichen. Bedingt durch die unterschiedlichen Modelansätze zeigten sich insbesondere bei stabilen thermischen Schichtungen große Unterschiede in größeren Höhen mit deutlich höheren Geschwindigkeiten bei MISKAM. Lediglich bei neutralen thermischen Schichtungen (labile Schichtungen lassen sich mit MISKAM nicht modellieren) sind die MISKAM Profile ähnlich zu denen von TALdia. Daher wurde entschieden, bei Ausbreitungsrechnungen mit kombinierten MISKAM und TALdia-Eingangsfeldern immer neutrale Schichtung in MISKAM anzunehmen.

Zudem wurden Konzepte entwickelt, wie sich MISKAM und TALdia innerhalb einer ARTM Ausbreitungsrechnung so kombinieren lassen, dass die Vorteile beider Wind- und Turbulenzfeldmodelle gewinnbringend so kombinieren lassen können, dass die Massenerhaltung der Radionuklide beim Übergang von einem Modellgebiet in das andere gewährleistet ist. Verschiedene Konzepte wurden in ARTM implementiert und auf ihre Eignung hin getestet und die Ansätze verifiziert. Einige Konzepte stellten sich dabei als nicht praktikabel für eine routinemäßige Nutzung heraus, da sie mit einem hohen Aufwand an Pre- und Postprozessing von Zwischenergebnissen und mehreren benötigten Modellläufen verbunden wären. Für die Verifikation weiterer Ansätze konnten diese ansonsten nicht weiter verfolgten Methoden im Projekt aber äußerst sinnvoll weitergenutzt werden.

Ein Programm zur Übertragung von AKTerm-Dateien von einem Standort zu einem anderen Standort im strukturierten Gelände eines Simulationsgebietes auf Grundlage von TALdia-Simulationen wurde erstellt, verifiziert und getestet, so dass übertragene Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten als Anströmbedingungen für MISKAM-Simulationen dienen können.

Ergebnisse Arbeitspaket 4

Der Source Code wurde dahingehend analysiert, wo und wie Änderungen vorgenommen werden müssen, um nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich aufgelöste Niederschlagsdaten zu verwenden. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf der in ARTM verwendeten Array-Struktur und der möglichen Verwendung bereits vorhandener Implementierungen des sogenannten Table-Managers. Erste Erweiterungen von ARTM zur Verwendung von räumlich und zeitlich aufgelösten Niederschlagsdaten wurden umgesetzt und getestet.

Das Datenformat der CDC Niederschlagsdaten des deutschen Wetterdienstes wurde analysiert. Insbesondere das Koordinatensystem weicht von den in ARTM verwendeten Gauß-Krüger bzw. UTM Koordinaten ab, so dass vor einer Verwendung der Daten eine Koordinatentransformation benötigt wird. Es wurde daher ein Python-Skript erstellt, verifiziert und getestet, um RADOLAN Daten des Climate Data Center des DWD automatisiert für ARTM-Simulationen aufzubereiten. Dies beinhaltet u. a. den automatischen Download, das Entpacken und Extrahieren der Daten, die Koordinatentransformation auf UTM 32, die Interpolation auf das gewünschte Gitter für eine ARTM-Simulation und das Ausschreiben der Daten in einem für ARTM lesbaren Format.

Geplante Weiterarbeit

Die Arbeiten der AP 2, 3 und 4 werden fortgesetzt. Im Rahmen des AP 6 wird eine weitere Schulung in 2023 durchgeführt werden. AP 5 zur Validierung von ARTM wird, wie bereits einleitend erwähnt, wird erst 2024 starten.

Themenbereich 06 - Notfallschutz

Erweiterung des Anwendungsbereichs der Werkzeuge zur Kombination anlagentechnischer und radiologischer Informationen zur Einschätzung von Freisetzungen

Forschungskennzeichen 3620S62501	Beginn 09.11.2020	Ende 30.06.2023	Fördermittel 535.159,33 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH			
Projektleitung Martin Sogalla	Fachbegleitung BfS Thomas Hamburger	verantwortlich für den Text Martin Sogalla	

Hintergrund

Zur Wahrnehmung seiner Aufgaben im GRS-Notfallzentrum stützt sich das Team S (Strahlenschutz) der GRS im Wesentlichen auf seine Fachkompetenz. Mit dem Ende 2019 abgeschlossenen Forschungsvorhaben 3616S62550 „Ausbau der wissenschaftlichen und technischen Basis für die Aufgaben des Teams ‚Strahlenschutz‘ im Notfallzentrum der GRS“ wurde diese Kompetenz für die Entwicklung und den Ausbau einer schnell und effizient nutzbaren wissenschaftlichen Basis von Informationen und Methoden genutzt.

Das Forschungsvorhaben 3620S62501 baut inhaltlich auf den Ergebnissen des Vorläufervorhabens 3616S62550 auf. Durch das Forschungsvorhaben wird die Wissensbasis für die Arbeit des Notfallzentrums der GRS erweitert und vervollständigt. Dadurch wird die Fähigkeit der GRS gestärkt, die Erstellung des radiologischen Lagebildes auch bei unvorhergesehenen oder bisher in der Planung nicht im Detail berücksichtigten Entwicklungen zeitnah und fundiert zu unterstützen.

Zielsetzung

Die Zielsetzung des Vorhabens besteht darin, die im Vorläufervorhaben 3616S62550 konzipierten Methoden mit dem Schwerpunkt auf Ereignisse in grenznahen und europäischen ausländischen Anlagen sowie im Hinblick auf das gesamte Spektrum potenzieller radiologischer Notfallsituationen weiterzuentwickeln und in einer anwenderfreundlichen Benutzerumgebung zusammenzuführen.

Methodik

Für eine Reihe von im Vorhaben 3616S62550 behandelten Aspekten werden Forschungsarbeiten weitergeführt und wissenschaftliche Methoden weiterentwickelt. Dies betreffen insbesondere die folgenden Themen und Werkzeuge:

- Prüfung der im Vorläufervorhaben erarbeiteten Methodiken zur Bewertung der radiologischen Situation in der Anlage bei schweren Unfallabläufen auf Erweiterungsmöglichkeiten für ausländische kerntechnische Anlagen; Konzeption vereinfachter Bewertungshilfen unter Berücksichtigung von Einschränkungen der Informationsbasis.
- Erweiterung des integrierten Verfahrens zur Quellterm-Rückrechnung um eine Einkopplungsmöglichkeit für externe Ausbreitungsmodelle zu erhalten.
- Ausbau der Datenbasis in Bezug auf globale Anwendbarkeit, insbesondere Integration von online verfügbaren Messdaten.

- Konzeption eines Zusatzmoduls zur Abschätzung des Freisetzungsorts für die Quelltermrückrechnung.
- Erweiterung der Schnittstelle zwischen radiologischen Informationen und anlagenbasierten Quelltermprognosen zu einem Schema für die gemeinsame Bewertung von radiologischen und anlagentechnischen Informationen mit vereinfachten Bewertungsmöglichkeiten für ausländische Anlagen.
- Erweiterung der Quelltermmodellierung um ein Modul zur Abschätzung der Freisetzung von Radionukliden aus kontaminierten Gebieten durch Flur- und Waldbrände.
- Erweiterung der im Vorläufervorhaben entwickelten Methodiken zur Ermittlung notfallschutzrelevanter Freisetzung auf alle Typen nuklearer und radiologischer Notfallsituationen und ihre Integration in ein gemeinsames Verfahren zur szenarienübergreifenden Bewertung.
- Konzeption und Erprobung einer gemeinsamen Benutzeroberfläche und eines gemeinsamen Datenmanagements für alle Verfahren.

Die Methodik zur Erweiterung des Anwendungsbereichs gliedert sich für jeden dieser Aspekte in die folgenden Schritte:

- Der jeweils relevante Kenntnisstand wird recherchiert, zusammengestellt und für das Vorhaben aufbereitet.
- Die Erkenntnisse und Methoden werden im Hinblick auf ihre Nutzungsmöglichkeiten und -grenzen für die Aufgaben des Teams S ausgewertet und ggf. ergänzt.
- Für die Arbeiten des Teams S werden die relevanten Informationen und Methoden in handhabbaren Unterstützungssystemen zusammengefasst. Die erstellten Werkzeuge werden, soweit möglich und zielführend, als Excel-Arbeitsmappen mit unterlegtem VBA-Code realisiert und in eine gemeinsame Benutzeroberfläche mit einem einheitlichen Datenmanagement integriert.
- Um einen effizienten Einsatz der erstellten Arbeitshilfen und Werkzeuge zu ermöglichen, werden Anwendungshilfen und Schulungsunterlagen erstellt. Die Anwendung wird in Schulungen vermittelt.

Durchführung

Das Vorhaben war ursprünglich in die folgenden Arbeitspakete gegliedert:

- AP 1: Aufarbeitung des für das Vorhaben relevanten Standes von Wissenschaft und Technik
- AP 2 Wissenschaftliche Basis zur Bewertung der radiologischen Situation in der Anlage bei schweren Unfallabläufen
 - o AP 2.1 Aussagemöglichkeiten zur radiologischen Situation in ausländischen Anlagen
 - o AP 2.2 Konzeption Bewertungshilfe für ausländische Anlagen
- AP 3 Wissenschaftliche Basis zur Nutzung kombinierter radiologischer und anlagentechnischer Informationen für die Diagnose und Prognose des Unfallablaufs
 - o AP 3.1 Erweiterung des integrierten Verfahrens zur Quelltermrückrechnung
 - o AP 3.2 Erweiterung der radiologischen Datenbasis und der zugehörigen Datenschnittstellen

- o AP 3.3 Ausbau der gemeinsamen Bewertung von radiologischen und anlagentechnischen Informationen für Ereignisse im Ausland
 - o AP 3.4 Modul zur Quelltermabschätzung bei Flächenbränden in kontaminierten Gebieten
- AP 4 Vereinheitlichung der wissenschaftlichen Basis zur Ermittlung relevanter Freisetzungen
 - o AP 4.1 Ergänzung der Wissensbasis für die Referenzszenarien 0 - 9
 - o AP 4.2 Ausbau des generalisierten Verfahrens zur Abschätzung notfallschutzrelevanter Freisetzungen
- AP 5 Integration aller Werkzeuge in eine gemeinsame Benutzeroberfläche
 - o AP 5.1 Gemeinsames Datenmanagement für alle Verfahren
 - o AP 5.2 Zusammenführung aller Verfahren und Ausbau der Benutzeroberfläche
 - o AP 5.3 Erprobung und Schulung
- AP 6 Projektmanagement und Projektcontrolling

Während der Laufzeit des Vorhabens wurden durch zusätzliche aktuelle Fragestellungen Erweiterungen des Arbeitsprogramms erforderlich. Deswegen wurde im November 2022 das zusätzliche Arbeitspaket 7 „Konkretisierung der im Vorhaben erarbeiteten Wissensbasis im Hinblick auf das radiologische Gefahrenpotenzial und die situationsbedingt möglichen Einwirkungen in der Ukraine“ aufgenommen.

- Das AP 7 gliedert sich in die folgenden Unterpunkte:
 - o AP 7.1 Recherche und Aufbereitung relevanter radiologischer Inventardaten
 - o AP 7.2 Analyse potenzieller Einwirkungen in Verbindung mit Kampfhandlungen
 - o AP 7.3 Ableitung eines Screening-Verfahrens zur schnellen Einschätzung potenzieller Freisetzungen bei kriegsbedingten Einwirkungen

Ergebnisse

AP 1: Aufarbeitung des für das Vorhaben relevanten Standes von Wissenschaft und Technik

Im AP 1 wird der für das Vorhaben relevante Stand von Wissenschaft und Technik (W & T) dokumentiert. Die Gliederung des Berichts zum Stand von W & T wurde entsprechend der Aufgabenstruktur und den mittlerweile herausgearbeiteten Aufgabenschwerpunkten revidiert. Dadurch werden die jeweils relevanten Rechercheergebnisse zum Stand von W & T leichter auffindbar und die Darstellung insgesamt kompakter. Die zu den Detailarbeiten in den AP 2-4 sowie dem neu hinzugekommenen AP 7 erhobenen themenspezifischen Rechercheergebnisse wurden in den Bericht eingearbeitet.

AP 2: Wissenschaftliche Basis zur Bewertung der radiologischen Situation in der Anlage bei schweren Unfallabläufen

Im AP 2 wurde die tabellarisch zusammengestellte Wissensbasis zur radiologischen Situation in deutschen Anlagen in Bezug auf ihre Übertragbarkeit auf ausländische Anlagen geprüft. Auf dieser Basis wurde ein vereinfachtes Verfahren zur Skalierung von Quelltermen aus deutschen auf ausländische Anlagen konzipiert. Das Verfahren wurde auf Aussagen zur radiologischen Situation in

der Anlage hin erweitert. Dies wurde auf Aussagegrenzen und Informationslücken überprüft. Konzeptionen für entsprechende Ergänzungsmöglichkeiten auf exemplarische Anwendungsfälle hin wurden konkretisiert.

AP 3: Wissenschaftliche Basis zur Nutzung kombinierter radiologischer und anlagentechnischer Informationen für die Diagnose und Prognose des Unfallablaufs

Im AP 3 wurde die Konzeption eines statistischen Verfahrens zur Abschätzung von Wolkenbereichen ähnlichen Alters als Funktion der Konzentrationsverhältnisse von Nukliden mit unterschiedlichen Zerfallszeiten erarbeitet. Die entsprechenden Modellparameter werden durch Vergleich mit direkt simulierten Wolkenformen aus einem definierten Freisetzungsintervall ermittelt. Als Basis dienen die umfangreichen Vergleichsdatensätze, die mit dem Atmosphärischen Radionuklid-Transportmodell (ARTM) gerechnet wurden.

Zusätzlich wurde ein Verfahren zur Abschätzung eines möglichen Freisetzungsortes aus radiologischen Messdaten erarbeitet. Zu diesem Zweck wird in einem ersten Schritt aufgrund der vorliegenden Messungen der Ortsdosisleistung oder der Luftkonzentration sowie der Windverhältnisse der Raumbereich, aus dem die Freisetzungen stammen können, eingegrenzt. In einem zweiten Schritt wird mittels Ensemblesimulationen der Freisetzungsort ermittelt, für den die rekonstruierten Freisetzungen aus allen radiologischen Messdaten optimal übereinstimmen.

Verarbeitungsmöglichkeiten von Flächendaten der Bodenkontamination oder Ortsdosisleistung zur Erstellung numerischer Gitter wurden ausgebaut. Zudem wurde die Schnittstelle zur Verarbeitung synoptischer Wettermeldungen erstellt, die auf einem ftp-Server der U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) bereitgestellt werden, um weitere Daten (Bedeckungsgrad) erweitert, die zur Schätzung der atmosphärischen Stabilität erforderlich sind.

Ein konzeptioneller Ansatz für ein leitfragenbasiertes Vergleichsschema von anlagentechnischen und radiologischen Befunden wurde entwickelt. Zu diesem Zweck wurden verfügbare Unfallanalysen für deutsche Anlagen in Bezug auf die Verbindung zwischen radiologischen Befunden und anlagentechnischen Abläufen ausgewertet. Das Ergebnis wurde in einer Vergleichsmatrix dargestellt. Übertragungsmöglichkeiten für ausländische Anlagen wurden in diese Matrix eingearbeitet. Für die Abrufung von Schlussfolgerungen wurde eine Benutzeroberfläche mit einem Algorithmus zur Matrixauswertung programmiert.

Das Werkzeug, das auf der Basis von MODIS-Satellitendaten für ein gewähltes Gebiet und einen gewählten Zeitraum auf einem variabel vorgebbaren Flächengitter Verteilungen der Feuerintensität, Brandtemperatur und Überhöhung berechnet, wurde ausgebaut. Um diese Parameter zur Berechnung von Freisetzungen nutzen zu können, wurde ein spezielles raumzeitliches Interpolationsverfahren entwickelt und getestet. Das Verfahren schätzt Geschwindigkeiten von Flammenfronten auf Basis von Wetterdaten ab und berücksichtigt Unsicherheitsbereiche bei der Verlagerung sowie Möglichkeiten der Entstehung neuer Brandherde und des Verlöschens bestehender Brände. Der zugrundeliegende Algorithmus wurde so entwickelt, dass er auch bei der Quelltermrückrechnung zur Abschätzung möglicher Freisetzungsorte eingesetzt werden kann. Das Verfahren wurde für die Brandperiode im April 2020 um das Kernkraftwerk Tschernobyl erfolgreich getestet. Zur Visualisierung wurde die kartenbasierte Benutzeroberfläche mit der Darstellungsmöglichkeit von Bodenkontaminationen zusammengeführt und um Animationsmöglichkeiten erweitert. Das Verfahren wurde für die zusätzliche Nutzung von VIIRS-Satellitendaten erweitert und mittels Literaturdaten für die Brandperiode im April 2020 um das Kernkraftwerk Tschernobyl validiert. Auf Basis der Validierung wurden das Berechnungsverfahren und die Modellparameter weiter ausgebaut und optimiert. Zur Abschätzung der thermisch bedingten

Freisetzungshöhe wurde ein in AP 5 erstelltes Modul zur Berechnung der atmosphärischen Stabilität in das Berechnungsverfahren integriert. Insgesamt können mit dem Berechnungstool nunmehr Freisetzungsraten und -Mengen sowie brandbedingte Freisetzungshöhen berechnet werden. Zur Anwendung wurden die Brandperioden April 2020 und März 2022 verglichen.

AP 4: Vereinheitlichung der wissenschaftlichen Basis zur Ermittlung relevanter Freisetzungen

Im AP 4 wurde die Konzeption des generalisierten Schemas zur Interpretation radiologischer Messdaten fortgeführt und die Erprobung am Beispiel gemessener Luftkonzentrationen im Zusammenhang mit dem Fukushima-Unfall durch Einbeziehung weiterer Daten ausgebaut. Außerdem wurde das Konzept der generalisierten Parameter zur Charakterisierung von Freisetzungsmöglichkeiten systematisch auf alle 14 Referenzszenarien erweitert.

AP 5: Integration aller Werkzeuge in eine gemeinsame Benutzeroberfläche

Im AP 5 wurde die Programmierung der erforderlichen Anpassungen und Schnittstellen zur Erweiterung der bereits erarbeiteten Datenstruktur für die Vorhaltung, Aktualisierung und Weiterverarbeitung von Messdaten für die Integration von Modelldaten fortgeführt. Darin fällt auch die Einbeziehung inhomogen verteilter Messdaten zur Weiterverarbeitung auf numerischen Gittern wie Daten zur Bodenkontamination in der Sperrzone um das KKW Tschernobyl und Messdaten in der Umgebung des KKW Fukushima Daiichi.

Es wurden Verfahren zur Umrechnung von Isotopen- in Elementmassen und zur Skalierung entsprechender Reaktorinventare erstellt, die für die Nutzung und Umrechnung unterschiedlicher verfügbarer Datensätze geeignet sind und umfangreiche Programmierarbeiten zur Realisierung des in AP 3.4 eingesetzten raumzeitlichen Interpolationsverfahrens durchgeführt. Das Verfahren wird dabei so modular angelegt, dass es auch zur Anwendung auf andere Probleme geeignet ist. Die Methodik basiert auf einer Berechnung möglicher Trajektorien von punktuellen Beobachtungen einer ortsveränderlichen Größe, der Abschätzung von Wahrscheinlichkeitsbereichen, in denen sich diese Trajektorien räumlich und zeitlich überlappen, sowie der wahrscheinlichkeitsbasierten Auswahl interpolierter Punkte unter Anwendung integraler Zwangsbedingungen. Es wurde ein Modul zur Abschätzung der atmosphärischen Stabilität auf Basis synoptischer Wettermeldungen (Windstärke, Bedeckungsgrad) und astronomischer Parameter (Sonnenstand) programmiert. Die zugrundeliegende Methode ist in der „Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications“ der U.S. Environmental Protection Agency dokumentiert. Das Modul wird sowohl für die Quelltermrückrechnung (AP 3.3) als auch für die Berechnung waldbrandbedingter Emissionen (AP 3.4) benötigt.

Geplante Weiterarbeit

Die geplante Weiterarbeit konzentriert sich unter anderem auf die Arbeiten im neu aufgenommenen AP 7. Dieses hat zum Ziel, die verfügbaren Informationen über den Bestand radioaktiver Stoffe in der Ukraine systematisch zu einer Wissensbasis auszubauen, um eine zeitschnelle Bewertung möglicher radiologisch relevanter Ereignisse unter den besonderen Randbedingungen kriegerischer Auseinandersetzungen zu ermöglichen.

Des Weiteren werden weitere Arbeiten für den Ausbau und die Fertigstellung der Arbeitshilfen und Werkzeuge, die Integration in die gemeinsame Benutzeroberfläche und die anschließende Schulung der erarbeiteten Verfahren durchgeführt.

Analyse von Gamma-Spektren unter Anwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3620S62594	01.06.2020	30.04.2023	347.544,26 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer ENVINET GmbH			
Projektleitung Dr. H. Breitzkreutz	Fachbegleitung BfS Dr. Martin Bleher	verantwortlich für den Text Dr. H. Breitzkreutz	

Zielsetzung

Zur Bewältigung von radiologischen Notfällen unterhält das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) ein radiologisches Lagezentrum des Bundes (RLZ). Das BfS ist Bestandteil des RLZ und liefert den für die Lagebewertung wichtigen Lagebericht. Dabei ist die sogenannte Messzentrale zuständig für die Zusammenführung von Messdaten der Bundes- und Ländermesssysteme, bestehend aus stationären, mobilen und Labor-Systemen.

Aktuell betreibt das BfS spektroskopische Sonden, die zusätzlich zur Messung der Ortsdosisleistung (ODL) nuklidspezifische Informationen liefern. Verfügbar sind bereits Systeme auf LaBr₃- bzw. auf CdZnTe (CZT)-Basis mit Energieauflösungen von ca. 2,5 bzw. 1,5 Prozent. Installiert sind diese Systeme insbesondere in der Nähe kerntechnischer Anlagen. Damit wird erreicht, dass in der Frühphase eines Unfalls die relevanten Messinformationen zum freigesetzten Nuklidgemisch zeitnah zu Verfügung stehen und somit sichergestellt ist, dass die Beiträge dominanter Radionuklide zur Exposition bereits während der Wolkendurchzugsphase zuverlässig abgeschätzt werden können. Auch in einer frühen Unfallphase, in der mobile Messteams nicht eingesetzt werden sollten, soll die Verfügbarkeit der wesentlichen Information zur optimierten Lagedarstellung und zum frühzeitigen Ergreifen von relevanten Maßnahmen sichergestellt werden.

Die Spektren werden aktuell sowohl mit Hilfe kommerzieller Analysewerkzeuge auch einer operationellen Spektrumauswertenumgebung automatisch analysiert, in die weitere Peak-basierende Verfahren sowie die sogenannte Full-Spektrum-Methode integriert sind.

Obwohl somit im RLZ ein operationelles Verfahren besteht, setzen diese Methoden voraus, dass die Ergebnisse der Spektrenanalyse von Experten individuell auf Korrektheit überprüft werden. Wegen der Vielzahl an Spektren, die von derzeit mehr als 50 stationären und ca. 20 mobilen Messsystemen im Stunden- bzw. 10 Minuten-Takt erzeugt werden, muss sowohl im Routinebetrieb auch bei einer möglichen Freisetzung von Radionukliden in die Umwelt eine Vorauswahl für eine Detailanalyse relevanter Spektren durch Experten getroffen werden. Um diese Experten künftig entlasten zu können, sollen Methoden der künstlichen Intelligenz zur Klassifizierung von Spektren konzipiert und entwickelt werden.

Ein ähnliches Anwendungsgebiet besteht auch bei der Prüfung der Daten von konventionellen ODL-Sonden auf Plausibilität. Hier besteht die tägliche Routineaufgabe darin, die Zeitreihen von ODL-Daten aufgrund bekannter Fehlertypen zu sichten, z. B. technische Einflüsse elektromagnetischer Störungen auf die Messergebnisse zu erkennen und diese Daten als unplausibel zu markieren.

Ein drittes Anwendungsgebiet besteht bei der Erkennung niederschlagsbedingt erhöhter Messwerte durch kurzzeitige Auswaschungsprozesse natürlicher Radionuklide und deren Abgrenzung von

Hinweisen auf künstlich erhöhte Umweltradioaktivität. Ziel ist die Erkennung künstlicher Radioaktivität mit Hilfe des ODL-Messnetzes des BfS zur Sicherstellung der sogenannten Frühwarnfunktion. Nach Auslösung eines Voralarms nimmt die Rufbereitschaft des ODL-Messnetzes den Dienst auf und prüft die Zeitreihen auf natürlich bedingte Effekte. Im Verlauf eines Jahres werden mehr als 100 Voralarme ausgelöst. Die Zeitverläufe und die räumliche Ausdehnung dieser niederschlagsbedingten Ereignisse zeigen charakteristische Merkmale, die von der Rufbereitschaft dazu genutzt werden, um künstliche bedingte Effekte auszuschließen. Auch bei der Prüfung von ODL-Daten auf technische Störungen wie bei der Bearbeitung von Voralarmen besteht die Aufgabe in der Klassifizierung von Zeitverläufen der ODL und folglich handelt es sich um weitere bevorzugte Anwendungsfälle der Methoden der künstlichen Intelligenz.

Für alle drei Anwendungsgebiete soll im Rahmen des Forschungsvorhabens eine Gesamtstrategie bei der Bewältigung von radiologischen Ereignissen unter Anwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz erarbeitet werden.

Einzelzielsetzung

AP 1: Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik

Das erste Arbeitspaket beinhaltet die Sichtung des aktuellen Wissensstands bei der Anwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz auf die quantitative und qualitative Analyse von Gamma-Spektren (Literaturrecherche). Dabei sind sowohl Ergebnisse unter Anwendung von Detektoren mit hoher wie auch mittlerer Energieauflösung zu berücksichtigen. Zu betrachten sind die Methoden, welche Algorithmen mit einer Klasse („one-class classification“) oder mehreren Klassen („multi-class classification“) anwenden. Bei Algorithmen, die auf einer Klasse beruhen, spricht man auch von Anomalitätenerkennung („anomaly detection“). In diesem Fall wird mit Hilfe unterschiedlicher Verfahren die Wahrscheinlichkeit beschrieben, ob ein Zustand als normal bezeichnet werden kann oder nicht. Die Eigenschaften dieser Verfahren ist sind zu betrachten und darzustellen.

AP 2: Voralarmkriterien

Entwicklung eines Klassifizierungssystems für die Erkennung von niederschlagsbedingten Erhöhungen von Messwerten konventioneller ODL-Sonden zur Anwendung bei der Bearbeitung von Voralarmen im ODL-Messnetz.

Als Input-Parameter stehen 10min- und 1min- ODL-Daten von ca. 1800 ODL-Messstellen für die Dauer von mehr als 10 Jahren zur Verfügung. Die in den letzten 10 Jahren aufgetretenen Voralarme sind in der Datenbank enthalten.

Es sind Methoden auszuwählen und zu beschreiben, mit deren Hilfe die Voralarme klassifiziert werden können. Ferner ist ein Vorschlag zu erarbeiten, welche Methoden verwandt werden sollen, um einen entsprechenden Algorithmus softwaretechnisch abzubilden. Und schließlich sind die ausgewählten Algorithmen zu implementieren und anzuwenden.

AP 3: Plausibilität von ODL-Daten

Entwicklung eines Klassifizierungssystems für die Plausibilisierung von Daten konventioneller ODL-Sonden.

Als Input-Parameter stehen 10min- und 1min- ODL-Daten von ca. 1800 ODL-Messstellen für die Dauer von mehr als 10 Jahren zur Verfügung. Die möglicherweise auftretenden technischen Störungen sind z. B. Windeffekt, elektromagnetische Störungen, etc. und sind in den Erläuterungen des Internetauftritts von ODL-Info beschrieben.

Es ist eine Liste sämtlicher technischer Störungen zu erstellen. Diese dient zur „Gruppierung der Störungen“. Ferner sind Methoden auszuwählen und zu beschreiben, mit deren Hilfe Störungen gemäß der „Gruppe der Störungen“ klassifiziert werden können. Schließlich ist ein Vorschlag zu erarbeiten, welche Methoden verwandt werden sollen, um einen entsprechenden Algorithmus softwaretechnisch abzubilden. Die ausgewählten Algorithmen sind zu implementieren und anzuwenden.

AP 4: Energiekalibrierung von LaBr3-Spektren

Entwicklung eines Klassifizierungssystems für die Erkennung von Abweichungen der Energiekalibrierung spektroskopischer ODL-Sonden (Basis LaBr3-Detektoren).

Als Input-Parameter stehen 10min-Spektren von ca. 10 ODL-Messstellen und ca. 40 stationären In-situ-Messstellen für die Dauer von mehr als 2 Jahren zur Verfügung. Zusätzlich sind die Analyseergebnisse der operationellen Auswertumgebung von Spektren in der Datenbank enthalten.

Es sind Methoden auszuwählen und zu beschreiben, mit deren Hilfe eine Kompensation der Drift der Energiekalibrierung der Spektren erreicht werden kann.

AP 5: Niederschlagserkennung von LaBr3-Spektren

Entwicklung eines Klassifizierungssystems für die Erkennung von niederschlags-bedingten Erhöhungen von Messwerten spektroskopischer ODL-Sonden (Basis LaBr3-Detektoren).

Als Input-Parameter stehen 10min-Spektren von ca. 10 ODL-Messstellen und ca. 40 stationären In-situ-Messstellen für die Dauer von mehr als 2 Jahren zur Verfügung. Zusätzlich sind die Analyseergebnisse der operationellen Auswertumgebung von Spektren in der Datenbank enthalten. Darüber hinaus sind die Ergebnisse der Methoden der Driftkompensation der Energiekalibrierung anzuwenden.

Es sind Methoden auszuwählen und zu beschreiben, mit deren Hilfe die Spektren klassifiziert werden können. Ferner ist ein Vorschlag zu erarbeiten, welche Methoden verwandt werden sollen, um einen entsprechenden Algorithmus softwaretechnisch abzubilden. Schließlich sind die ausgewählten Algorithmen sind zu implementieren und anzuwenden.

AP 6: Quantifizierung von Nukliden in Spektren

Entwicklung eines qualitativen Verfahrens zur Detektion von Radionukliden in Spektren von In-situ-Daten und in Spektren spektroskopischer ODL-Sonden (Basis LaBr3-Detektoren).

Als Input-Parameter stehen 10min-Spektren von ca. 10 ODL-Messstellen für die Dauer von mehr als 2 Jahren und die Messergebnisse von In-situ-Messungen des BfS, der Länder und des DWD aus den letzten 10 Jahren zur Verfügung. Zusätzlich sind die Analyseergebnisse der operationellen Auswertumgebung von Spektren in der Datenbank enthalten. Darüber hinaus sind die Ergebnisse der Methoden der Kompensation der Drift der Energiekalibrierung anzuwenden. Zusätzlich sind simulierte Spektren zu erzeugen und in die Analyse mit aufzunehmen. Es sind grundsätzlich alle Radionuklide der Nuklid-Bibliothek als Einzelnuklide bzw. Nuklidgruppen (z. B. typisches Tschernobyl-Spektrum) in der Intensität konfigurierbar und selektierbar einzustellen.

Für die Erzeugung von simulierten Spektren ist eine Monte-Carlo-Anwendung unter Nutzung von Geant4, aufbauend auf einer bereits vom BfS genutzten Anwendung, zu implementieren. Die simulierten Spektren haben HPGe-, LaBr3- und CZT-Detektoren mit den entsprechenden Energieauflösungen und der detektorspezifischen Kristallvolumen-abhängigen Effizienz zu berücksichtigen.

Es sind Methoden auszuwählen und zu beschreiben, mit deren Hilfe Nuklide in den Spektren quantifiziert werden können. Ferner ist ein Vorschlag zu erarbeiten, welche Methoden verwandt werden sollen, um einen entsprechenden Algorithmus softwaretechnisch abzubilden. Schließlich sind die ausgewählten Algorithmen sind zu implementieren und anzuwenden.

Methodik

Generelles Vorgehen

Neben den in den einzelnen AP genannten Methoden finden über den gesamten Projektverlauf hinweg Meetings zwischen Auftraggeber (AG) und -nehmer (AN) statt, um erarbeitetes Wissen zu reflektieren und das weitere Vorgehen zu planen. AP1 bis AP3 sind abgeschlossen. AP4 ist gegenwärtig in Bearbeitung.

Methodenauswahl

Die Auswahl der Methoden erfolgt für jedes AP separat. Dabei wird neben der Literaturrecherche (AP1) insbesondere auf das bereits vorhandene Know-How des Auftragnehmers zurückgegriffen. Eine Kooperation mit der TU München (Lehrstuhl für Nukleartechnik, FRM II) stellt dabei sicher, dass auch neueste Erkenntnisse aus der Wissenschaft einfließen. Bei späteren AP wird jeweils die Erfahrung aus vorangegangenen AP berücksichtigt. Ggf. werden an früheren AP auch noch kleinere Korrekturen vorgenommen.

Die Auswahl der Methoden erfolgt nach Vorschlag des AN in Abstimmung mit dem AG. Je nach AP und Verfügbarkeit von zielführenden Ansätzen werden eine oder mehrere Methoden ausgewählt, implementiert und getestet. Ziel ist dabei immer, bestehende Algorithmen zu verwenden oder so anzupassen, dass diese in einem Produktivsystem zur Anwendung kommen können.

Implementierung

Die Algorithmen werden in der für Machine Learning (ML) und künstliche Intelligenz am besten geeigneten und am weitesten verbreiteten Programmiersprache, Python, implementiert. Sie werden in einer Bibliothek gekapselt. Um die Verwendbarkeit im Produktivsystem sicherzustellen wird die Python-Bibliothek mit einer C-Schnittstelle ausgestattet, mit deren Hilfe die Ein- und Ausgaben zwischen den beiden Sprachen transportiert werden können. Der Rückgriff auf Python stellt sicher, dass auch bei neuen Entwicklungen im Bereich der KI der im Projekt entwickelte Code einfach, schnell und zuverlässig angepasst werden kann.

Test

Der Auftragnehmer testet alle Algorithmen mit Hilfe vom Auftraggeber bereitgestellter Daten. Diese Daten werden vom Auftragnehmer sofern notwendig um zusätzliche Daten erweitert oder modifiziert. Letzteres umfasst beispielsweise die Simulation kerntechnischer Unfälle, um Anomalie-Erkennungen zu testen. Die Ergebnisse werden dem AG vom AN vorgestellt, sobald diese vorliegen. Daraufhin wird nach entsprechender Abstimmung ggf. iterativ verbessert.

Durchführung

Der Auftragnehmer organisiert in Abstimmung mit dem Auftraggeber Projektgespräche. Das erste Projektgespräch findet als Kick-off Meeting zu Beginn des Projekts statt. Weitere Arbeitstreffen finden während der Projektlaufzeit nach Abschluss eines Arbeitspakets statt. Im Verlauf der Durchführung einzelner Arbeitspakete verständigen sich Auftraggeber und Auftragnehmer regelmäßig über den Projektfortschritt und stimmen sich über die weitere Vorgehensweise ab. Die

Projektgespräche finden in der Regel sofern die pandemische Lage dies zulässt am BfS-Standort in Oberschleißheim statt; andernfalls werden Online-Meetings organisiert. Die jeweiligen Software-Module inkl. Dokumentation und die Zwischenberichte sind nach Abschluss der einzelnen Arbeitspakete zu liefern.

Ergebnisse

Bereits inhaltlich vollständig bearbeitet wurden AP1, 2 und 3. AP4 befindet sich gegenwärtig in Bearbeitung.

AP 1: Literaturrecherche

Für die umfangreiche Literaturrecherche wurden über 300 wissenschaftliche Publikationen, Abschlussarbeiten, Patente, Forschungsberichte u.ä. gesichtet und analysiert. Zusammenfassend kann man sagen, dass bisher vergleichsweise wenig Literatur zu ML/KI mit reinen ODL-Sonden existiert. In der Gammaskopie hingegen hat sich insbesondere in den letzten 3-4 Jahren ein sich schnell entwickelndes Forschungsfeld aufgetan, das speziell in den USA - mit Fokus auf Homeland Security - vorangetrieben wird. Auch wenn die Methoden zu weiten Teilen noch in den Kinderschuhen stecken, sind hier in den nächsten Jahren noch bedeutende Fortschritte zu erwarten. Umso wichtiger erscheint vor diesem Hintergrund das vorliegende Projekt, um hier am Ball zu bleiben.

AP 2 und 3: Anomalieerkennung in GDR Zeitreihen

Das Arbeitspaket wurde gegenüber der ursprünglichen Definition in Abstimmung zwischen AN und AG etwas abgewandelt. Dabei läuft es letztlich darauf hinaus, dass Alarme nicht mehr in Form von fixen Schwellwerten definiert werden, sondern als Abweichung des Messsignals von der Erwartung.

Der Algorithmus arbeitet in drei Stufen:

1. Entfernung der durch Niederschlag induzierten ODL-Spitzen
2. Vorhersage der Basis-ODL
3. Erkennung von Anomalien

Jede Stufe verfügt über ein eingebautes Sicherheitsnetz, damit künstliche ODL-Erhöhen nicht versehentlich als natürlich gewertet werden können.

Im ersten, regressionsbasierten Schritt (S1) werden die ODL-Spitzen nach Regenereignissen zuverlässig vom Signal entfernt. Eine Plausibilitätsprüfung der Fit-Parameter stellt dabei sicher, dass sich nicht Spaltprodukte im Regen verstecken. Diese Prüfung basiert auf automatisch aus historischen Daten gelernten Korrelationen und der Mahalanobis-Distanz.

Für den nächsten Schritt (S2), die Vorhersage der Basislinie ohne Regenspitzen, wurden zwei Algorithmen untersucht, ARIMAX und LSTM. ARIMAX ist der wichtigste Vertreter der statistischen Prognosealgorithmen, LSTM (Long short-term memory) ein auf Zeitreihen optimierter Vertreter neuronaler Netze. Das LSTM zeigt im Ergebnisvergleich deutlich zuverlässigere und bessere Ergebnisse als ARIMAX.

Konservativ lässt man als Eingabedaten an das LSTM nur Wetterdaten zu, und trotzdem bewegt sich der Vorhersagefehler im 3h-Intervall üblicherweise unterhalb von lediglich 10 nSv/h, meist sogar noch tiefer. Will man aggressiver vorgehen, kann man in einer Art autoregressivem Ansatz noch vergangene Messwerte als Eingabedaten zufüttern. Die Vorhersage wird dann fast perfekt, die Erkennung von Anomalien allerdings erschwert und unzuverlässiger. Es wurde daher entschieden,

den konservativen Ansatz zu wählen und nur Wetterdaten als Eingabegrößen für das LSTM zuzulassen.

Die Anomalie-Erkennung (S3) erfolgt mit zwei separaten Algorithmen, DSPOT und SST. DSPOT ist eine Implementierung der Extremwerttheorie und besonders geeignet zur Erkennung schneller und kurzfristiger Erhöhungen. Die Theorie arbeitet folgerichtig mit Einzelpunkten. SST hingegen arbeitet mit Repräsentationen von Segmenten der Zeitreihen und verwendet eine Form des hierarchischen Clusters um ungewöhnliche Sequenzen zu erkennen. Der Algorithmus eignet sich damit vor allem zur Erkennung von mittel- und langfristigen Entwicklungen, auch unterhalb der Rauschgrenze von Einzelmessungen.

Verifiziert wurde die Leistungsfähigkeit des Systems mit einer realen Messreihe, die um Daten aus einer JRODOS-Simulation eines KKW-Unfalls angereichert wurde. Die untenstehende Abbildung 1 zeigt, dass SST in diesem Fall eine Erhöhung der ODL um 4 nSv/h in einer sechsjährigen Messreihe ohne Fehlalarm identifizieren konnte.

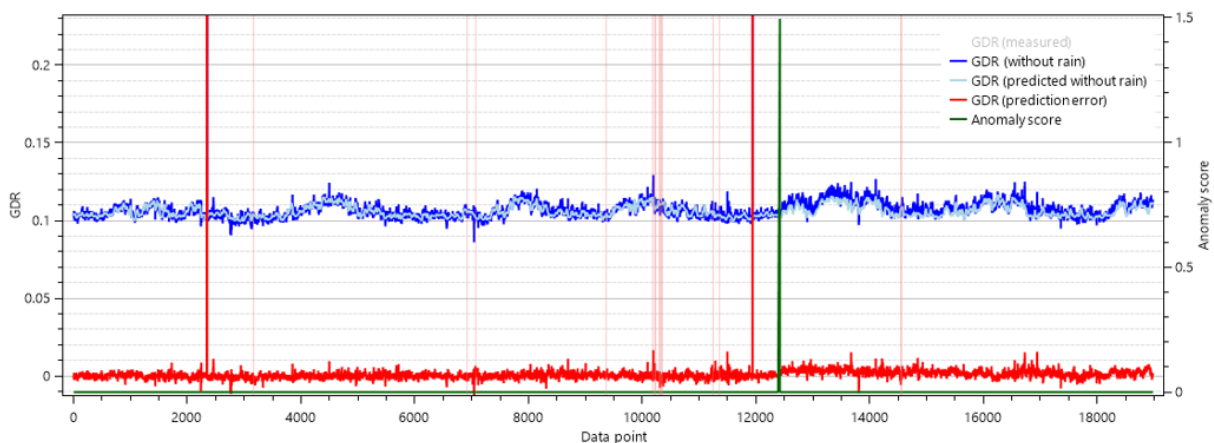


Abbildung 1 Zeitreihe der zu 3-Stundenmittelwerte verdichteten ODL ($\mu\text{Sv/h}$) nach Schritt (S1, blau) und Schritt (S2, hellgrün) sowie Signal der Anomalie-Erkennung (S3, dunkelgrün).

Die Arbeitspakete 2 und 3 wurden damit erfolgreich abgeschlossen.

AP 4 Stabilisierung von LaBr₃-Spektren

Das Arbeitspaket 4 ist das erste von insgesamt drei Paketen, die sich mit spektroskopischen Messungen befassen.

LaBr₃-Szintillatoren zeigen ein temperaturabhängiges Emissionsverhalten, das ein aktives Regelverhalten erfordert, um die Energiekalibrierung des Spektrometers zu erhalten. Gegenwärtig wird dies über einen zweistufigen Algorithmus erreicht, eine im Vielkanalanalysator (MCA) hinterlegte tabellarische Steuerung der Hochspannung (HV) und einer nachgelagerten Peak-Analyse.

Der im Arbeitspaket gewählte Ansatz orientiert sich an der Prognose der ODL aus dem vorangegangenen AP: Ein LSTM sagt basierend auf den Parametern Temperatur und Zählrate die Lage der beiden intrinsischen Peaks des Spektrometers voraus. Dies kann sowohl ohne als auch mit vorgeschalteter Regelung durch den MCA erfolgen. In letztgenanntem Fall wird die HV als zusätzlicher Parameter an das LSTM übergeben. Dieser Fall ist komplexer als die Regelung rein auf Basis von Umgebungsparametern, da das LSTM letztlich lernen muss, die interne Regelung des MCA „rückgängig“ zu machen bzw. deren Fehlverhalten zu kompensieren.

Der Algorithmus ermöglicht sowohl eine Korrektur als auch eine Klassifizierung von Spektren, da er eine zuverlässige Prognose der Kalibrierparameter erstellt. Parameter, die über ein gewisses Maß von der Vorhersage abweichen, zeigen dann eine unzureichende Kalibrierung an.

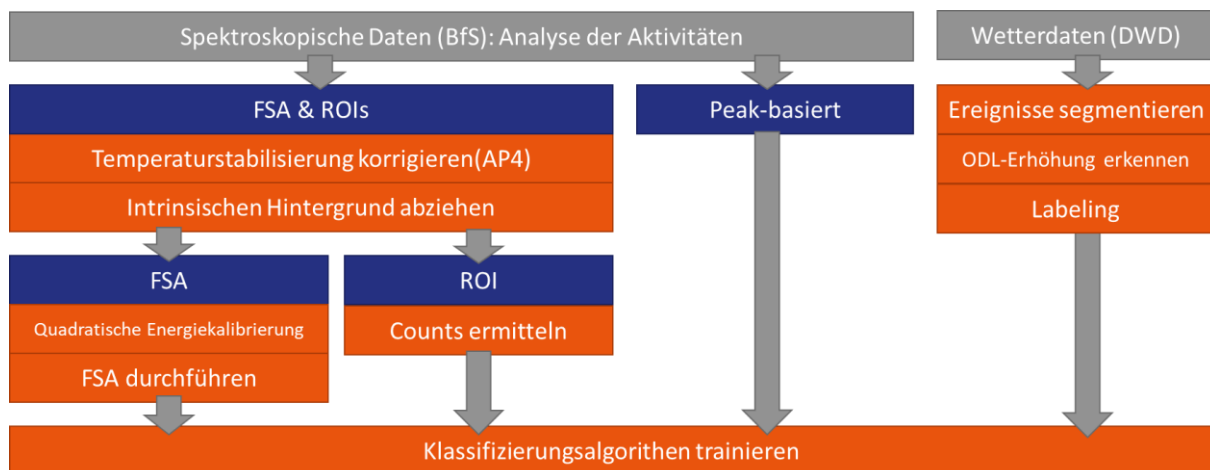
Der Algorithmus sagt die Regelgröße (HV oder Gain) mit hoher Genauigkeit voraus und ist zudem unabhängig vom Vorhandensein eines Referenznuklids. Er stabilisiert den Detektor damit auch zuverlässig, wenn die intrinsische Aktivität oder das Referenznuklid durch andere Nuklide überdeckt werden.

Das Arbeitspaket 4 wurde damit erfolgreich abgeschlossen.

AP 5 Niederschlagserkennung von LaBr_3 -Spektren

Im fünften Arbeitspaket werden Spektren klassifiziert, ob sie von Niederschlag beeinflusst sind oder nicht. Im Gegensatz zum AP3 soll hier der Einfluss der Radonfolgeprodukte direkt aus dem Spektrum heraus bestimmt werden, d. h. ohne Zuhilfenahme einer lokalen Wetterstation. Die Nutzung von Wetterdaten ist damit ausschließlich für die Trainingsphase des Algorithmus zulässig, aber nicht mehr für den eigentlichen Einsatz. Wetterdaten wurden wie zuvor vom DWD bereitgestellt.

Zur Klassifizierung wurden pseudo-ternäre Label verwendet, d. h. es wurden drei Klassen „Kein Regen“, „Egal“ und „Regen“ definiert, die sich durch ihre Erhöhung der ODL über die Grundlinie auszeichnen. Die Klasse „Egal“ findet dabei in der Ergebnisberechnung keine Berücksichtigung. Typischerweise erstreckt sich „Egal“ von der Grundlinie der ODL bis zu einer Erhöhung um einige wenige Prozentpunkte (z. B. 4%). Die Existenz der Klasse „Egal“ rechtfertigt sich aus dem Anwendungsfall der Umweltüberwachung, denn für derart geringfügige Erhöhungen der ODL ist es tatsächlich „egal“ ob der Algorithmus die Spektren richtig klassifiziert – das Ergebnis wird jedoch



deutlich verbessert.

Abbildung 2 Schematisierte Darstellung der untersuchten Auswertemethoden für die Spektren

Die Klassifizierung wurde anhand der Aktivitäten der Nuklide ^{40}K , ^{214}Bi , ^{214}Pb und ^{208}Tl vorgenommen.

Es wurden folgende Kombinationen getestet (vgl. Abbildung 2):

- Label:
 - o Binär
 - o Pseudo-Ternär
- Auswertemethoden (Bestimmung der Nuklidaktivitäten):

- o Peak-Erkennung (Peak-basiert)
- o Region of Interest (ROI)
- o Full spectrum analysis FSA
- Bestimmung der Nuklidaktivitäten:
 - o Peak-basiert
 - o ROIs
 - o FSA
- Einzelspektrenklassifizierung:
 - o Nearest Neighbor
 - o Decision Tree
 - o Feed-forward neuronales Netz
 - o Naive Bayes (Gaussian)
 - o Lineare Support Vector Machine
 - o RBF SVM
 - o Random Forst (basierend auf Decision Trees)
 - o AdaBoost (ebenfalls basierend auf DT)
 - o Quadratic Discriminant Analysis
- Spektrenfolgenklassifizierung:
 - o Alle Einzelspektrenalgorithmen mit jeweils zwei Vorgängerspektren
 - o LSTM
- Optionale zusätzliche Daten:
 - o Zählraten

Für alle Algorithmen wurde eine Hyperparameteroptimierung durchgeführt. Als primäres Bewertungskriterium wurde der F1-Wert herangezogen.

Pseudo-Ternäre Label liefern ein deutlich besseres Ergebnis als binäre. FSA ist etwas besser als ROIs, die wiederum etwas besser sind als Peaks. Für die Einzelspektrenklassifizierung ist AdaBoost mit Decision Trees der beste Algorithmus. Spektrenfolgen lassen sich mit LSTMs am besten klassifizieren.

AP 6 Nuklididentifizierung

Das sechste Arbeitspaket unterscheidet sich von der zu verwendenden Methodik deutlich von der der vorangegangenen Pakete. Hier sind keine Zeitreihen zu betrachten, sondern Spektren müssen individuell klassifiziert werden. Es gibt zudem keine experimentellen Daten, die auch nur annähernd den Anforderungsumfang abbilden würden; diese können auch nicht mit vertretbarem Aufwand gewonnen werden. Es ist daher notwendig, die Daten für das Arbeitspaket zu simulieren.

Der notwendige Einsatz von Simulationswerkzeugen zur Datengewinnung verkompliziert die Analyse erheblich. Aus vergangenen Experimenten und Publikationen u. a. aus den USA ist bekannt, dass die der Simulation inhärenten Ungenauigkeiten, vor allem im Compton-Teil des Gammaspektrums, dazu führen, dass auf Rohspektren trainierte neuronale Netze unter realen Bedingungen nur noch unzureichend funktionieren. Ähnliches gilt folgerichtig für Ansätze, die ROIs als Eingabedaten für ein

neuronales Netz verwenden. Um Zirkelschlüsse zu vermeiden, verbietet sich auch der Einsatz der FSA. Damit verbleibt als letzte Möglichkeit, das Resultat einer klassischen Peak-Analyse zu verwenden. Das bedeutet zwar einen spürbaren Verzicht auf Sensitivität, der Ansatz sollte dafür deutlich robuster gegen die Ungenauigkeiten der Simulationen sein.

Die Simulationen ziehen Zufallskombinationen aus einer vorgegebenen Nuklidbibliothek heran und addieren diese auf reale, gemessene Hintergrundspektren. Da für die Hintergrundspektren keine „Ground Truth“ verfügbar ist, d. h. die Aktivitäten der dort vorhandenen Nuklide nur mittelmäßig genau bekannt sind, wurde beschlossen, im Ergebnis keine natürlichen Radionuklide zu berücksichtigen. Das ist vor dem Hintergrund des Anwendungsfalls vertretbar, bei dem es in erster Linie um die Erkennung künstlicher Radionuklide geht.

Das Arbeitspaket befindet sich derzeit in der Bearbeitung und wird bis Ende März 2023 abgeschlossen.

Geplante Weiterarbeit

Die Abwicklung des Projekts ist derzeit aufgrund der Umstellung und Ausweitung der Arbeitspakete 2 und 3 leicht verzögert. Es soll daher mit der Vorlage des Abschlussberichts nun bis Ende April 2023 abgeschlossen werden.

Interdisziplinäre Lageinformationen zur Optimierung des radiologischen Lagebildes (ILaS RLB)

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3620S62599	01.06.2021	31.05.2023	248.015,61 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer			
Team HF - Human Factors Forschung Beratung Training Hofinger, Künzer & Mähler PartG			
Projektleitung	Fachbegleitung BfS	verantwortlich für den Text	
Dr. G. Hofinger	B. Denstorf	Dr. C. Becker	

Zielsetzung

Das radiologische Lagebild (RLB) im Radiologischen Lagezentrum des Bundes dient als Grundlage für Entscheidungen über gegebenenfalls notwendige Schutzmaßnahmen. Bei der Erstellung des Radiologischen Lagebildes sollen in Zukunft stärker als bisher Ansätze unterschiedlicher fachlicher Disziplinen und politischer Ebenen berücksichtigt werden. Ziel ist es, das Lageverständnis durch den interdisziplinären Austausch aller involvierten staatlichen und ggf. nichtstaatlichen Akteure zu fördern. Dieses gemeinsame Lageverständnis soll die Grundlage für ein konsistentes staatliches Handeln im radiologischen Notfallschutz bilden. Mit diesem Ziel wird in ILaS RLB untersucht, ob und wie Methoden und Formen der Lagebilderstellung anderer Akteure des Krisenmanagements in das RLB integriert werden können. Dabei soll auch die psychologische Human Factors-Perspektive einfließen.

Einzelzielsetzung

Schwerpunkt der Forschungsarbeit im Jahr 2022 war die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von leitfadengestützten Interviews mit verschiedenen Organisationen und Behörden bzw. Bundesämtern. Die dort gewonnenen Erkenntnisse wurden zum einen in Form eines Arbeitsberichts festgehalten, zum anderen während eines Workshops im BfS vorgestellt bzw. weiterbearbeitet.

AP 2 hatte folgende Zielsetzung: Untersuchung des Phänomens ‚fachspezifisches Lageverständnis und fachspezifische Lagebilder‘.

Um Charakteristika organisations- sowie fachspezifischer Lageverständnisse in deutschen Behörden verschiedener Fachressorts sowie in Unternehmen identifizieren zu können, wurden Befragungen in Form von Interviews vorbereitet. Hierzu wurden auf Grundlage des Berichts aus AP 1 sowie im Dialog mit dem begleitenden Fachbereich essenzielle Themen wie Schutzstrategien und -ziele, Informationsdarstellung, Bewertungsmaßstäbe, Aufbereitung von Daten im Lagebild für unterschiedliche Lagen sowie Fragen nach Auswirkungen auf Entscheidungen festgelegt. Die Ergebnisse der Interviews über eine diverse Auswahl von Organisationen hinweg sollen als Grundlage dazu dienen, Vorgehensweisen und Kernthemen bei der Lagebilderstellung des BfS zu vergleichen und ggf. mit Themen und innovativen Prozessen anzureichern.

Methodik

Zur Klärung der Forschungsfragen wurde eine Befragung anhand semistrukturierter, leitfadengestützter Interviews (Brinkmann & Kvale, 2018) durchgeführt. In enger Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden auf Basis bestehender Prozess- und Strukturmerkmale des RLZ geeignete deduktive Kategorien und Kriterien als Grundlage der Befragung und Auswertung festgelegt. Daraus abgeleitet wurde ein modulares Befragungstool entwickelt, das für eine Reihe von verschiedenen

Interviewsituationen flexibel anpassbare Frageblöcke für eine schriftliche und mündliche Befragung enthielt.

Durchführung

Gemeinsam mit dem Forschungsgeber wurde eine einschlägige Stichprobe ausgewählt und gezielt zur Zusammenarbeit im Rahmen eines Interviews angefragt („purposive sampling“, vgl. Etikan, 2016). Die Auswahl der Stichprobe verfolgte damit keinen Anspruch auf Repräsentativität, sondern die Erhebung einschlägiger Expertise mit branchenspezifischen Ausprägungen. Es wurden 30 Organisationen angefragt, wovon 14 einer Beteiligung zustimmten. Die insgesamt 18 Interviews mit 30 Beteiligten wurden in Präsenz (13) bzw. aus Standort- oder Zeitgründen auch virtuell (5) geführt. Die verschriftlichten Interviews wurden durch die Teilnehmenden verifiziert und anschließend ausgewertet. Die Auswertung wurde in Anlehnung an die Qualitative Inhaltsanalyse (Kuckartz & Rädiker, 2020; Mayring, 2016) vorgenommen, indem deduktive Kategorien erfasst und um induktiv gebildete Kategorien ergänzt wurden. Anhand dieser wurden die Ergebnisse im 4-Augen-Prinzip systematisiert und schließlich interpretiert. Wo es sinnvoll erschien, wurden Cluster gebildet.

Ergebnisse

In Bezug auf Krisenbearbeitung wurde festgestellt, dass diese über die verschiedenen Organisationen hinweg sehr komplex und divers ist, selbst innerhalb von Organisationen. Sie wird deshalb jeweils auf Lage und Organisation angepasst. Begrifflichkeiten werden dabei nicht einheitlich verwendet. Selbst bei Begriffen, für die standardisierte Definitionen vorliegen, wie bspw. „Lagebild“, weisen diese in der Praxis große Unterschiede bzgl. Bedeutung und Umsetzung auf. Ebenso gibt es keine einheitlichen Begriffsdefinitionen von z. B. Schutzgütern und Schutzzielen: diese werden meist nur allgemein formuliert oder die Konkretisierung wird als Aufgabe des Krisengremiums angesehen.

Hinsichtlich des Lagebilds ist festzustellen, dass dieses grundsätzlich eine wichtige Grundlage für Entscheidungen im Stab darstellt. Inhalte, Form und Struktur sind in der Regel festgelegt, aber flexibel für die Neuaufnahme / Revision einzelner Themen. Der Digitalisierungsgrad ist insgesamt als hoch einzuschätzen. Es ist zu erwarten, dass die Fülle an Informationen und die Medien bzw. Kanäle, über die Informationen gesammelt werden, zunehmen. Dies erfordert zunehmend Ressourcen, entsprechende Kompetenzen und technische Ausstattung, aber auch Kriterien, anhand derer die Daten gefiltert, aggregiert und bewertet werden. Die Erstellung von Lagebildern findet jeweils in verschiedenen Formaten und ggf. an verschiedenen Orten statt.

Bezüglich zu treffender Entscheidungen wurde festgestellt, dass in einigen der befragten Organisationen die Entscheidungsbefugnisse eher eingeschränkt sind. Auffällig war der Unterschied in Kommunikation und Entscheidungsprozessen bei Stäben, die eine große Nähe zu Entscheiderinnen und Entscheidern aufwiesen: Die Nähe zu Entscheider*innen beeinflusst Kommunikation, die Möglichkeit, ein gemeinsames Lageverständnis aufzubauen, die Analyse von Problemen, Erarbeitung von Lösungsvorschlägen und Entscheidungen selbst. Je größer die Nähe, desto eher wird im Team gearbeitet und auch auf breiter Basis Expertise hinzugezogen, die Kommunikation verläuft bilateral und fließend. Risikoabwägungen oder Priorisierungen finden häufig in beratenden Gremien statt. Letztliche gravierende Entscheidungen werden allerdings meist in der Hierarchie gelöst.

Geplante Weiterarbeit

Die Erkenntnisse aus AP 2 sollen im folgenden AP 3 mit Erkenntnissen bezüglich der Arbeitsprozesse zur Erstellung des Radiologischen Lagebilds im RLZ gegenübergestellt werden. Im abschließenden AP 4 werden Empfehlungen abgeleitet.

Analyse radiologisch signifikanter Gefährdungspotentiale und Ereignisabläufe zur Konkretisierung von Schutzmaßnahmen im Rahmen der Notfallpläne

Forschungskennzeichen 3620S62596	Beginn 15.03.2021	Ende 30.04.2023	Fördermittel 346.751,00 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH			
Projektleitung Ilka Petermann	Fachbegleitung BfS Ulrich Buchner	verantwortlich für den Text Ulrich Buchner Ilka Petermann	

Hintergrund

Zur Erfüllung gesetzlicher Vorgaben müssen die im Allgemeinen Notfallplan des Bundes (ANoPI) festgelegten Referenzszenarien im Hinblick auf mögliche radiologische Gefährdungspotentiale analysiert und bezüglich geeigneter Schutzmaßnahmen im Rahmen der Erarbeitung von Notfallplänen berücksichtigt werden. Hierzu ist es erforderlich, zugrundeliegende Unfallszenarien in ihrer möglichen Bandbreite zu analysieren, sowohl in Bezug auf das Radionuklidinventar als auch auf potenzielle Unfall-abläufe. Für dieses Vorhaben wurden mit einem „Kernkraftwerk im grenznahen Ausland“, „Transportunfall“, „Unfall im Umgang mit hochradioaktiven Quellen“ und „Satellitenabsturz“ vier Referenzszenarien für eine Analyse bestimmt, ergänzt um Betrachtungen zum kerntechnischen Anlagentyp des „Small Modular Reactors (SMR)“.

Zielsetzung

Im Rahmen des Vorhabens sollen für die betrachteten Referenzszenarien und den kerntechnischen Anlagentyp repräsentative bzw. generische Bauten, Einrichtungen und Strukturen bestimmt und im Hinblick auf ihre Sicherheitsarchitekturen, Radionuklidinventare und potenzielle Freisetzungen analysiert werden. Die Analysen umfassen:

- ein Kernkraftwerk osteuropäischer Bauart nahe der deutschen Grenze,
- eine repräsentative Auswahl von Transportbehältern und potenzielle Freisetzungen bei Transportunfällen,
- Analysen zu in Deutschland vorhandenen (hoch-) radioaktiven Quellen, deren standardmäßige Anwendungen und potenzielle und tatsächlich aufgetretene Ereignisse mit HRQs,
- gängige Bauarten von Radionuklidbatterien für Satelliten und Raumfahrzeuge sowie potenzielle und tatsächlich aufgetretene Ereignisse mit diesen.

Zudem sollen technisch fortgeschrittene Projekte zu SMRs und deren Gefährdungspotenziale untersucht werden. Ziel ist die Zusammenstellung von Quelltermen für Unfallszenarien. Es soll dabei auch eine Bandbreitenanalyse durchgeführt werden. Die Bandbreite umfasst dabei eine Abschätzung des jeweiligen Szenarios ausgehend vom denkbar ungünstigsten Fall, dem sogenannten „worst case“, bis hin zu geringeren Abläufen, bei denen die Kriterien für einen Notfall nach ANoPI gerade noch überschritten werden. Ebenfalls abgedeckt werden die wahrscheinlichsten bzw. plausible Fälle, auch wenn diese die Notfallkriterien nach ANoPI nicht überschreiten.

Methodik

Arbeiten zu den einzelnen Referenzszenarien bzw. Anlagentypen wurden jeweils in einem eigenen Arbeitspaket durchgeführt; diese werden im Folgenden kurz umrissen.

Unfall in einem Kernkraftwerk im grenznahen Ausland

Es wurden einzelne exemplarische Unfallabläufe für eine grenznahe osteuropäische Anlage analysiert und ausgewertet. Zur detaillierten Untersuchung zeitlicher Unfallabläufe wurde auf eine spezifische Freisetzungssequenz mit einer zu erwarteten größeren Freisetzung zurückgegriffen.

Transportunfall

Im Zusammenhang mit der Beförderung von radioaktivem Material mit Straßen-, Schienen- oder Luftfahrzeugen wurden Notfälle betrachtet, in deren Folge Schutzmaßnahmen im Bundesgebiet und/oder für deutsche Bürger im Ausland erforderlich werden können. Es wurden verschiedene Transportbehältertypen für radioaktive Stoffe vorgestellt, ergänzt um einen Überblick über mögliche Inventare der einzelnen Behältertypen sowie deren mögliche Freisetzungssanteile im Falle verschiedener Einwirkungen. Um eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit von Transportunfällen vorzunehmen, wurden Transporthäufigkeiten verschiedener Verkehrsträger, auch in Abhängigkeit des transportierten Inventars, untersucht.

Unfall beim Umgang mit hochradioaktiven Quellen

Es wurde das Gefährdungspotenzial von Unfällen im Zusammenhang mit dem Umgang mit hochradioaktiven Strahlenquellen (HRQ) untersucht. Dies umfasste sowohl Fälle, in denen ein Unfall mit den genannten Strahlungsquellen nicht mehr ausgeschlossen werden kann, bzw. bereits eingetreten ist, als auch den Fall einer herrenlosen Strahlungsquelle.

Des Weiteren wurden allgemeine Informationen (insbesondere gesetzliche, nationale sowie internationale Grundlagen und Vorgaben im Umgang mit HRQ) zu hochradioaktiven Quellen in Deutschland zusammengestellt sowie ein Überblick über in Deutschland in Verwendung befindliche HRQ gegeben. Hierbei wurden Schwerpunkte auf Nutzung, Aufbau, Auslegung und Prüfungsanforderungen gelegt.

Satellitenabsturz/Unfall mit Raumfahrzeugen mit Radionuklidinventar

Die Arbeiten umfassten einen Überblick über den Aufbau und die realisierten Varianten von verschiedenen Radionuklidbatterien- und reaktoren in der Raumfahrt. Für die gängigsten Typen wurden detaillierte Informationen zu Aufbau, Funktionsweise und Radionuklidinventar zusammengetragen und ihr Einsatz in bekannten Raumfahrtmissionen beschrieben.

Des Weiteren wurde eine Übersicht über zurzeit im Erdorbit befindliche Satelliten mit Nuklidinventar erarbeitet und dokumentierte Ereignisabläufe dargestellt. Zu letzteren zählen sowohl tatsächliche Unfallabläufe mit radionuklidbetriebenen Satelliten als auch sogenannte „Umweltverträglichkeitsprüfungen“, die präventiv bei Missionen mit Radionuklidinventar durchzuführen sind und die eine große Bandbreite an Quelltermen und Unfallszenarien wissenschaftlich dokumentieren.

Small Modular Reactors

Es wurden verschiedene SMR-Technologien und -Konzepte vorgestellt, sowie allgemeine und spezifische Störfallanforderungen der Reaktortechnologien beschrieben. Für einen ausgewählten Reaktortyp wurden vertiefende Zusammenstellungen und Analysen durchgeführt, wofür dokumentierte Gefährdungspotenziale und planerische Ansätze zur Bestimmung von Notfallplanungszonen ausgewertet wurden.

Ergebnisse

Für die grenznahe osteuropäische Anlage wurden, basierend auf thermohydraulischen Abschätzungen zur Übertragung von Simulationen, die bereits für einen anderen Anlagentyp durchgeführt worden waren, Unfallabläufe untersucht und Zeitskalen der Unfallentwicklung extrahiert.

Aufbauend auf den erarbeiteten Unfallszenarien zu „Transportunfällen“, „Unfällen mit hochradioaktiven Quellen“, „Satellitenabstürzen bzw. Unfällen mit Raumfahrzeugen mit Radionuklidinventar“ wurde eine Bandbreite von Quelltermen zusammengestellt und die jeweiligen Charakteristika diskutiert.

Für den Themenbereich der „Small Modular Reactors“ wurde eine exemplarische Anlage genauer untersucht und ein möglicher Quellterm, unter Zuhilfenahme dokumentierter Inventarangaben, extrahiert und dokumentiert.

Die Ergebnisse der einzelnen Themenkomplexe bzw. Arbeitspakete wurden in internen Teilberichten dokumentiert.

Geplante Weiterarbeit

Die erarbeiteten Unfallabläufe, und damit zusammenhängend die Bandbreite möglicher Quellterme, sind im Verlauf der restlichen Dauer des Vorhabens zu überprüfen und evtl. in Einzelaspekten weiter auszuarbeiten und zu ergänzen. Im noch verbleibenden Zeitraum neu veröffentlichte Publikationen, insbesondere im Bereich der SMRs, werden in die bisher erfolgten Arbeiten integriert.

Die vorliegenden Teilberichte werden in einem Abschlussbericht zusammengefasst.

Ausbau und Bereitstellung von Nutzungsmöglichkeiten ausführlicher Abfallkataster aus radiologischer Sicht für alle im allgemeinen Notfallplan des Bundes beschriebenen Referenzszenarien zur Vorbereitung und Unterstützung bei der Evaluierung des besonderen Notfallplans des Bundes "Abfälle"

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3621S62570	02.12.2021	31.08.2024	386.655,20 EUR

Forschungs- / Auftragnehmer

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH

Projektleitung

Martin Sogalla

Fachbegleitung BfS

Ulrich Buchner

verantwortlich für den Text

Ulrich Buchner

Martin Sogalla

Hintergrund

Als Basis für die Erstellung des Bundesnotfallplans „Abfall“ sowie entsprechend vorzusehende Evaluierungen, wurden im Vorhaben 3618S62575 detaillierte Kataster von notfallbedingt kontaminierten Abfällen, die im öffentlichen Raum anfallen können, erstellt und mit bestehenden Entsorgungsmöglichkeiten verglichen.

Zur Entwicklung von Dekontaminationsstrategien wurde das Verfahren „Das-ABB“ („Dekontaminationsstrategien – Auswahl, Bewertung und Berechnung“) entwickelt. „Das-ABB“ bewertet in Betracht kommende Dekontaminationstechniken nach Durchführbarkeit, Aufwand und Effektivität und berechnet entsprechende Kataster von Dekontaminationsabfällen.

Mit einer auf „Das-ABB“ abgestimmten Methodik, wurden Kataster kontaminierter Siedlungs- und Sekundärabfälle sowie nicht mehr vermarktungsfähiger landwirtschaftlicher Produkte berechnet.

Der Vergleich des zusätzlichen Entsorgungsbedarfs mit verfügbaren Kapazitäten zeigt, dass vor allem die Verbrennung nicht mehr recyclingfähiger Wertstoffe eine Herausforderung an die Kapazitäten der Müllverbrennung darstellen würde.

Die Abschätzungen von Abfallmengen und Abfallaktivitäten sind mit erheblichen Bandbreiten und Unsicherheiten behaftet. Die entwickelten Berechnungsverfahren bieten jedoch die Möglichkeit, zukünftig mit präzisierten Daten und Erkenntnissen genauere Schätzungen zu erzielen.

Zielsetzung

Das Ziel des Vorhabens ist der weitere Ausbau der im Vorläufervorhaben 3618S62575 entwickelten Kataster notfallbedingt kontaminierter Abfälle, für alle im allgemeinen Notfallplan des Bundes beschriebenen Referenzszenarien. Die verwendete Berechnungsmethodik soll entsprechend weiterentwickelt werden. Außerdem sollen die im Vorläufervorhaben erstellten Kataster für den spezifischen Informationsbedarf bei der Erstellung, Fortschreibung und Evaluierung des besonderen Notfallplans "Abfälle" weiterentwickelt werden. Schließlich soll bei der Implementierung der entwickelten Berechnungsverfahren in die Systeme des Radiologischen Lagezentrums des Bundes fachliche Unterstützung geleistet werden. Zur Qualitätssicherung sollen eine Validierung und ein Vergleich mit auf internationaler Ebene genutzten Werkzeugen durchgeführt werden.

Methodik

Das Vorhaben ist in die folgenden Arbeitspunkte gegliedert:

- AP 1: Aufarbeitung des für das Vorhaben relevanten Standes von Wissenschaft und Technik

- AP 2: Fortschreibung der Berechnungsmethodik
 - AP 2.1: Workshop zur Priorisierung der Erweiterungen von Datengrundlage und Berechnungsverfahren
 - AP 2.2: Erweiterung der Datengrundlage
 - AP 2.3: Einbeziehung nichtradiologischer Einflussfaktoren und Bewertungskriterien
 - AP 2.4: Einbeziehung von Messdaten für die Nutzung im Ereignisfall
- AP 3: Ausbau der fachlichen Informationsbasis für Erstellung, Fortschreibung und Evaluierung der besonderen Notfallpläne
 - AP 3.1: Workshop und Bedarfsanalyse zur Priorisierung des Ausbaus der fachlichen Informationsbasis
 - AP 3.2: Fortführung der Soll-Ist-Analysen
 - AP 3.3: Ableitung bedarfsangepasster Informationen und Aussagen
- AP 4: Anpassung der Berechnungsverfahren zur Nutzung im Radiologischen Lagezentrum des Bundes
 - AP 4.1 Zusammenstellung der für das RLZ relevanten Informationen
 - AP 4.2 Fachliche Unterstützung bei der Implementierung der Berechnungsverfahren in die am RLZ genutzten Systeme
- AP 5: Validierung und Vergleich mit auf internationaler Ebene genutzten Werkzeugen
 - AP 5.1: Validierung mit Daten und Informationen aus realen Ereignissen
 - AP 5.2: Vergleich mit auf internationaler Ebene genutzten Werkzeugen
- AP 6: Projektmanagement und Projektcontrolling

Ergebnisse

Neben der Aufbereitung des Standes von Wissenschaft und Technik im AP 1 konzentrierten sich die Arbeiten im Berichtsjahr auf die Arbeitspakete 2 und 3. Die in diesen Arbeitspaketen erzielten Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst.

AP 2: Fortschreibung der Berechnungsmethodik

1 Erweiterung der Basisdatensätze

Seitens der zuständigen Landesämter wurden zu Projektbeginn Informationen zu Abfallmengen an das Bundesamt für Strahlenschutz übermittelt und durch dieses an die GRS weitergeleitet. Die Zusammenstellung wurde durch Destatis koordiniert und bezieht sich auf die "Erhebung der öffentlich-rechtlichen Abfallentsorgung (Angaben über Haushaltsabfälle)," EVAS -Nr. 32121. Die Zusammenstellung bezieht sich auf folgenden angefragten Maximalumfang:

- Abfallklassifikation: Alle verfügbaren Abfallarten nach EAV (Europäisches Abfallverzeichnis), aufgeschlüsselt in sechsstelliger Tiefe.
- Räumliche Aufschlüsselung: Nach Kreisen für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland.
- Zeitliche Aufschlüsselung: Jahresmengen, jeweils für die Jahre 2015 bis 2019.

Die in Abfallgruppen gegliederte Datenbasis aus dem Vorläufervorhaben wurde zur Ergänzung des aktuellen Datensatzes aufbereitet. Die Ergänzungen beziehen sich auf das Erhebungsjahr 2016.

Abfallgruppen, die eindeutig einem Abfallschlüssel nach EAV zuzuordnen sind, wurden für das Bezugsjahr unverändert in die neue Datenbasis übernommen.

Für Abfallgruppen, in denen mehrere Abfallschlüssel nach EAV zusammengefasst sind, wurde das Gruppenaufkommen auf die jeweiligen Abfallsorten nach EAV aufgeteilt. Die Aufteilung folgt der mengenmäßigen Zusammensetzung der Abfälle innerhalb der jeweiligen Gruppe aus Abfallsorten nach EAV im Bundesdurchschnitt für das Jahr 2017. Diese Skalierung liefert naturgemäß nur eine Schätzung der tatsächlichen Abfallmengen für die einzelnen Sorten, bietet aber den Vorteil einer einheitlichen Klassifizierung nach EAV.

Der auf diese Weise ergänzte Datensatz umfasst nunmehr 79 Abfallsorten nach EAV. Davon entstammen 40 Abfallsorten den über Destatis gelieferten Länderdaten, 4 Abfallsorten wurden unverändert aus dem Datensatz des Vorläufervorhabens übernommen und 35 Abfallsorten wurden aus dem gleichen Datensatz durch Skalierung der verfügbaren Abfallgruppen abgeschätzt.

2 *Anpassung und Erweiterung von Berechnungsverfahren*

Die im Vorläufervorhaben entwickelte Methodik zur statistischen Ergänzung und Disaggregation des Aufkommens von Siedlungsabfällen wurde ebenfalls bereits im Vorberichtszeitraum für die Verarbeitung des ergänzten Datensatzes erweitert. Aufgrund des großen Datenumfangs musste die Weiterverarbeitung der Daten zur Berechnung der Mengengerüste kontaminierter Abfälle auf einzelne Untergruppen aufgeteilt werden. Zu diesem Zweck wurde das EDV-gestützte Berechnungsverfahren soweit standardisiert, dass variable Eingangsdatensätze ohne weitere Eingriffe in die Programmstruktur verarbeitet werden können.

Mit den aktualisierten und erweiterten Berechnungsverfahren wurden umfangreiche Vergleichsrechnungen für Siedlungsabfälle durchgeführt.

Zu Vergleichszwecken wurden die Ergebnisse sowohl in der neuen Aufschlüsselung nach 79 Abfallsorten als auch in der Gruppeneinteilung des Vorläufervorhabens zu Mengengerüsten zusammengefasst. Im Ergebnis zeigen sich für Abfälle, die bereits im Vorläufervorhaben als reine Abfallsorten vorlagen (z. B. Hausmüll), erwartungsgemäß nur geringe Unterschiede, während sich für aus vielen Abfallsorten zusammengesetzte Abfallgruppen größere Unterschiede ergeben.

AP 3: Ausbau der fachlichen Informationsbasis für Erstellung, Fortschreibung und Evaluierung der besonderen Notfallpläne

Zur Erweiterung der Abfallberechnungen auf alle Referenzszenarien erfolgt eine zweckmäßige Gruppierung der Szenarien, z. B. nach sehr viel Abfall, wenig Abfall (Kleinstmengenkonzept) und ggf. eine Gruppe zwischen diesen beiden (drei bis vier sinnvolle Gruppen). Als Grundlage hierfür dient der Referenz-Szenarienkatalog. Zur Umsetzung der Aufgabe dient ein Schema, das – differenziert nach den etablierten unterschiedlichen Herkunftsbereichen kontaminierter Abfälle – eine Einteilung nachfolgenden Gesichtspunkten vorsieht:

- Dominanter primärer Kontaminationsmechanismus,
- Potenziell relevante Nuklide (ggf. Auswahl von Repräsentanten, eingeteilt nach Expositionspfaden),
- Grobanalyse von exemplarischen Abfallmengen mit spez. Kontaminationen, die zu einer Überschreitung eines Dosis-Schwellwertes von a) 100 µSv/a, b) 1 mSv/a oder c) 100 mSv/a führen können.

Das Schema wurde um ein Verfahren zur Beurteilung potenziell relevanter Radionuklide erweitert. Dieses beruht auf Schwellwerten der spezifischen Aktivität, bei denen die o.g. Dosisschwellen erreicht werden können, und ist grundsätzlich auf alle Nuklide anwendbar. Zusätzlich zu Cs-137 werden die Nuklide Am-241, Co-60 und I-131 in die Grobanalyse einbezogen. Für diese Nuklide wurden Möglichkeiten zur Abschätzung angepasster Transferfaktoren aus der Umwelt in den Abfall recherchiert.

Geplante Weiterarbeit

Schwerpunkt der geplanten Arbeiten bestehen in der Durchführung der Grobanalyse für alle Referenzszenarien sowie im Ausbau der Berechnungsverfahren für Dekontaminationsabfälle und Sekundärabfälle zur szenarienübergreifenden Nutzung. Darin ist auch die Berechnung beliebiger Nuklide und Nuklidgemische enthalten.

Darüber hinaus stehen die Recherche nach Validierungsmöglichkeiten sowie der Modellvergleich zwischen „Das-ABB“ und dem Programmsystem „WEST“ („Waste Estimation Support Tool“) der U.S. Environmental Protection Agency (EPA) im Fokus der für 2023 geplanten Arbeiten.

Themenbereich 07 - Allgemeine und gesellschaftliche Aspekte des Strahlenschutzes

Erfassung der Schallfelder von frei am Markt erhältlichen Ultraschallquellen: Abschätzung des Schädigungspotentials

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3620S72412	01.09.2020	31.08.2021	158.190,27 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer GAMPT mbH			
Projektleitung Dr. Michael Schultz	Fachbegleitung BfS Dr. Jens Kuhne	verantwortlich für den Text Dr. Jens Kuhne	

Hintergrund

Ultraschall wird in der medizinischen Diagnostik und Therapie seit langer Zeit eingesetzt. In den letzten Jahren ist ein Trend zur vermehrten Nutzung des Ultraschalls in der Kosmetik oder zu anderen nichtmedizinischen Zwecken beobachtbar. Im Internet werden neben bildgebenden Geräten zum Anschluss an das Smartphone für die Beobachtung des ungeborenen Kindes unter anderem auch leistungsfähigere Geräte, die mit der Fähigkeit der Lipolyse von Fettgewebe beworben werden, teils zur Miete und teils zum Erwerb, angeboten. Der Markt ist unübersichtlich und die Leistungsdaten der Geräte sind meist nur unzureichend angegeben. Zum Schutz der Bevölkerung ist es notwendig, herstellerunabhängige Informationen über relevante Ultraschallquellen und deren Risikopotential zu gewinnen. Eine Gefährdung der Bevölkerung kann derzeit nicht ausgeschlossen werden und eine Überprüfung des Schädigungspotentials durch frei erhältliche Ultraschallgeräte ist dringend geboten.

Zielsetzung

Im Forschungsvorhaben soll eine Marktübersicht über die in Deutschland für den Heimgebrauch frei erwerbbar Geräte erstellt, repräsentative Gerätetypen beschafft und im Schallfeldscanner vermessen werden.

Auf Basis der erhobenen Messdaten soll das Schädigungspotential der am Markt existierenden Geräte abgeschätzt werden. Weiterer Forschungsbedarf und normative Lücken sollen anhand offener Fragestellungen identifiziert werden.

Methodik

Das Forschungsvorhaben ist in drei Arbeitspakete unterteilt.

Arbeitspaket 1: Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik, Auswahl der Ultraschallquellen

Im Rahmen einer Marktrecherche wird eine Übersicht über die im für die Allgemeinbevölkerung zugänglichen Handel angebotenen Ultraschallquellen für den Heimbedarf ermittelt und darauf basierend eine Auswahl repräsentativer Gerätetypen getroffen.

Zusätzlich wird eine Literaturrecherche durchgeführt, um den aktuellen Stand zu Richtlinien zum Schutz vor Ultraschall, Ultraschallkennwerten, –Messtechnik, –Exposition und –Dosimetrie zusammenzufassen, der die Grundlage für die Messungen und Auswertungen bilden soll.

Arbeitspaket 2: Schallfeldmessungen und Auswertung

Angelehnt an aktuelle Messnormen wird das Schallfeld der beschafften Geräte im Schallfeldscanner charakterisiert. Dabei werden die in Vorexperimenten bestimmten Betriebsmodi mit dem potentiell größten Schädigungspotential verwendet. Für die Auswertung der Schallfelder werden in AP1 identifizierte Ultraschallkennwerte und/oder Auswertemethoden herangezogen.

Arbeitspaket 3: Abschätzung des Schädigungspotentials, Abschlussbericht

Basierend auf den in der Literaturrecherche ermittelten Grenzwertempfehlungen, Wirkschwellen oder normativen Grenzen und den in AP2 ermittelten Ultraschallkennwerten der Geräte wird das mit einer Anwendung am Menschen verbundene Schädigungspotential der Geräte abgeschätzt und diskutiert. Die Ergebnisse werden in einem Abschlussbericht zusammengefasst und Kenntnis- und Regelungslücken identifiziert.

Ergebnisse

Literaturrecherche

Hinsichtlich Effizienz und Sicherheit von Ultraschallanwendungen zu kosmetischen Zwecken erwies sich die Literatur als wenig belastbar. Die für Messungen an Ultraschallgeräten relevanten Normen sind vorwiegend nur auf bildgebende oder Therapiegeräte anwendbar, eine Übertragung auf die in diesem Forschungsvorhaben relevanten Kosmetikgeräte ist nur sehr eingeschränkt möglich. Die Zugrundelegung von in der Literatur und Normen beschriebenen Auswertemethoden und Kennwerte wird daher nur eine eingeschränkte Aussagekraft für das mit der Anwendung dieser Gerätetypen verbundene Schädigungspotential haben können.

Marktrecherche

Die Marktrecherche ergab, dass eine Vielzahl unterschiedlicher Geräte zur Anwendung am Menschen angeboten werden und die zugrundeliegenden Wirkmechanismen, relevanten Sicherheitsmaßnahmen und Ultraschallparameter in der Vielzahl der Fälle völlig unzureichend angegeben sind. Im etwa sechs Monate umfassenden Recherchezeitraum war der Markt häufigen Angebotsänderungen unterworfen. Insgesamt wurden 16 Geräte beschafft, die Preisspanne dieser Geräte lag zwischen ca. 21 bis 1000 €. Neben einem Fetaldoppler (Gerät zur akustischen Visualisierung der Herztöne des Fötus) und einem Mietgerät zur fetalen Bildgebung wurden vorwiegend Geräte beschafft, für die ein Kosmetik- oder Therapie-Anwendungszweck beworben wird.

Vortests der beschafften Geräte

In Vortests zeigte sich, dass die Qualität der Geräte häufig mangelhaft ist, was die Vermessung im Schallfeldscanner deutlich erschwert. Unter anderem sorgen unzulässig hohe Störaussendungen der Geräte dafür, dass die von den empfindlichen Messhydrofonen empfangenen Ultraschallsignale von elektromagnetischen Störungen überlagert werden, sodass auf unempfindlichere Hydrofone ausgewichen werden musste. Eine für detaillierte Schallfeldmessungen erforderliche in einem realistischen Zeitraum ausreichend häufig reproduzierbar wiederholbare Schallabgabe war nur bei wenigen Geräten möglich, sodass für etliche Geräte nur eingeschränkte Messungen erfolgen können.

Messungen

Um die Probleme der elektromagnetischen Störung zu vermeiden, wurde ein spezielles gekapseltes Hydrophon entwickelt, welches unempfindlich gegenüber Störungen ist. Zusätzlich wurde ein Messplatz speziell für das Projektvorhaben eingerichtet.

Die Untersuchung der Oberflächentemperatur der Ultraschallköpfe (Applikatoren) zeigte für die Hälfte der untersuchten Geräte eine Oberflächentemperatur von über 50 °C. In vielen Fällen lag die gemessene Temperatur weit höher, z. B. bei einem Niederfrequenzgerät zum Fettgewebeabbau bei über 100 °C.

Die Messungen der Schallfelder von allen beschafften Geräten wurden durchgeführt, aufgrund von Instabilitäten in den Ultraschallaussendungen oder starker Erwärmung konnten die Schallfelder einiger Geräte nur mit reduzierter Messpunktzahl aufgenommen werden. Die Spannweite der ausgegebenen Ultraschallleistungen und Schallfeldeigenschaften der Geräte ist erwartungsgemäß groß und für einige Geräte kann auch bereits vor der finalen Auswertung von einem hohen Schädigungspotential ausgegangen werden. Bei einem der Geräte war eine Vermessung des Schallfeldes beispielsweise nicht möglich, weil die Intensität des Schallfeldes die Zerstörung des Hydrofons zur Folge hatte. Um dennoch eine Aussage zum Schädigungspotential in biologischem Gewebe zu erhalten, wurde mit diesem Gerät ein Stück Hähnchenfilet beschallt, welches anschließend deutliche thermische Schädigungen zeigte.

Geplante Weiterarbeit

Die bereits begonnenen für jeden Gerätetyp angepassten Auswertungen werden fortgesetzt, um die Schallfeldeigenschaften und Ultraschallkennwerte der Geräte zu bestimmen. Basierend auf diesen Kennwerten wird anschließend die Abschätzung des Schädigungspotentials erfolgen.

Überarbeitung von technischen Strahlenschutznormen aus dem Bereich des Normenausschuss Materialprüfung (NMP) sowie aus dem Komitee K967 der DKE

Forschungskennzeichen 3621S72340	Beginn 29.03.2021	Ende 31.03.2024	Fördermittel 234.106,92 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer DIN Deutsches Institut e. V.			
Projektleitung J. Winkler	Fachbegleitung BfS U. Häusler		verantwortlich für den Text U. Häusler J. Winkler

Hintergrund

Das Projekt mit der Forschungskennzahl 3621S72340 hat zum Ziel, verschiedene Normen zu überprüfen und sie dem Stand der Technik sowie dem geänderten Regelwerk anzupassen. Dabei sind u. a. die Änderungen des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG), der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) und des kerntechnischen Regelwerks (KTA und DIN) sowie die neue SEWD-Richtlinie des Bundesumweltministeriums zu berücksichtigen.

Zielsetzung

Folgende Normen werden im Rahmen dieses Projektes überprüft und überarbeitet:

- DIN 25404, Kerntechnik; Formelzeichen,
- DIN 25407 (Teile 1, 2 und 3 und Beiblatt), Abschirmwände gegen ionisierende Strahlung,
- DIN 25457 (Teile 1 bis 7 und Beiblatt), Aktivitätsmessverfahren für die Freigabe von radioaktiven Stoffen und kerntechnischen Anlagenteilen,
- DIN 25700, Oberflächenkontaminationsmessungen an Fahrzeugen und deren Ladungen in strahlenschutzrelevanten Ausnahmesituationen,
- DIN 25415, Radioaktiv kontaminierte Oberflächen - Verfahren zur Prüfung und Bewertung der Dekontaminierbarkeit,
- DIN 25466, Radionuklidabzüge - Regeln für die Auslegung und Prüfung.

Gemäß nachträglich bewilligtem Antrag durch den DIN e.V. wird im Rahmen des Projektes zudem DIN 25422 (Aufbewahrung und Lagerung sonstiger radioaktiver Stoffe - Anforderungen an Aufbewahrungseinrichtungen und deren Aufstellungsräume zum Strahlen-, Brand- und Diebstahlschutz) überprüft und überarbeitet.

Zudem soll die frühzeitige und direkte Mitwirkung von deutschen Experten bei der internationalen Normung im Bereich „Strahlenschutz“ sichergestellt werden.

Dieses Vorhaben führt das bisherige Vorhaben 3617S72381 fort.

Methodik

Das Vorhaben wird in folgenden Schritten durchgeführt:

- 1) Die Normen wurden den folgenden Arbeitsausschüssen zugeordnet:

Norm-Nummer	Titel	zuständiger Arbeitsausschuss
DIN 25404	Kerntechnik, Formelzeichen	NA 062-07-61 AA
DIN 25407	Abschirmwände gegen ionisierende Strahlung	NA 062-07-62 AA
DIN 25457	Aktivitätsmessverfahren für die Freigabe von radioaktiven Stoffen und kerntechnischen Anlagenteilen	NA 062-07-46 AA
DIN 25700	Oberflächenkontaminationsmessungen an Fahrzeugen und deren Ladungen in strahlenschutzrelevanten Ausnahmesituationen	NA 062-07-46 AA
DIN 25415	Radioaktiv kontaminierte Oberflächen - Verfahren zur Prüfung und Bewertung der Dekontaminierbarkeit	NA 062-07-63 AA
DIN 25466	Radionuklidabzüge - Regeln für die Auslegung und Prüfung	NA 062-07-63 AA
DIN 25422	Aufbewahrung und Lagerung sonstiger radioaktiver Stoffe - Anforderungen an Aufbewahrungseinrichtungen und deren Aufstellungsräume zum Strahlen-, Brand- und Diebstahlschutz	NA 062-07-62 AA

2) Die Arbeitsausschusssitzungen werden durchgeführt (bis zu 3 Termine pro Jahr) und die vergebenen Aufgaben nachverfolgt. Je nach Beschluss werden Vorlagen für die Überarbeitung erstellt und dann als Manuskript zum Norm-Entwurf verabschiedet. In der Geschäftsstelle des DIN e.V. erfolgt die Drucklegung der Texte und Veröffentlichung als Norm-Entwurf.

3) Nach Ablauf der Einspruchsfrist wird die Einspruchsverhandlung durchgeführt. Sind alle Einsprüche behandelt, wird eine Vorlage zur Norm erstellt und als Manuskript zum Druck als Norm verabschiedet. In der Geschäftsstelle des DIN e.V. erfolgt die Schlussbearbeitung und die Drucklegung bzw. Veröffentlichung als Norm.

4) Auf den Sitzungen der Arbeitsausschüsse werden die internationalen Themen besprochen und in die Normüberarbeitung mit einbezogen.

Ergebnisse

Zur Norm DIN 25404

Der zuständige Ausschuss hatte die Zurückziehung der Norm beschlossen, da sie technisch veraltet war. Die endgültige Zurückziehung erfolgt zum 01.01.2023. Alternativ zur Norm DIN 25404 kann DIN EN ISO 80000-10 und DIN EN ISO 80000-12 angewendet werden.

Zu den Normen der Reihe DIN 25407

Für Teil 1 und Teil 2 der Norm hatte der zuständige Arbeitsausschuss keinen Änderungsbedarf festgestellt, die Normen werden bestätigt. Für Teil 3 hatte der Arbeitsausschuss eine Überarbeitung beschlossen, der überarbeitete Norm-Entwurf ist dann mit Ausgabe November 2022 erschienen. Für das Beiblatt wurde Änderungsbedarf festgestellt, das Beiblatt wurde überarbeitet und ist mit Ausgabe August 2022 erschienen.

Zu den Normen der Reihe DIN 25457

Der zuständige Arbeitsausschuss hatte beschlossen, die Reihe grundsätzlich zu überarbeiten. Zunächst sollen die Grundlagen in Teil 1 zusammengefasst werden, der als Norm-Entwurf Anfang 2023 veröffentlicht werden soll. Die Überarbeitung der weiteren Teile erfolgt sukzessive.

Zur Norm DIN 25700

Der zuständige Ausschuss hatte die Überarbeitung der Norm beschlossen. Der überarbeitete Entwurf ist mit Ausgabe September 2022 erschienen.

Zur Norm DIN 25415

Der zuständige Ausschuss hatte beschlossen, die DIN 25415 durch die ISO 8690 „Dekontamination radioaktiv kontaminierter Oberflächen - Methode zur Prüfung und Bewertung der Dekontaminierbarkeit“ zu ersetzen. Die DIN ISO 8690 wurde schließlich mit Ausgabe Oktober 2022 veröffentlicht, so dass die Norm DIN 25415 ebenfalls im Oktober 2022 zurückgezogen wurde.

Zur Norm DIN 25466

Der zuständige Arbeitsausschuss hatte festgestellt, dass das europäische Normungsprojekt prEN 14175-8 „Abzüge - Teil 8: Abzüge für Arbeiten mit radioaktiven Substanzen“ die DIN 25466 ersetzen kann. Die DIN EN 14175-8 ist dann mit Ausgabe September 2022 erschienen und hat somit DIN 25466 ersetzt.

Zur Norm DIN 25422

Der zuständige Ausschuss hatte die Überarbeitung der Norm beschlossen. In mehreren Ausschusssitzungen wurde ein Manuskript für den Norm-Entwurf erarbeitet, der mit Ausgabe Februar 2023 erscheinen soll.

Geplante Weiterarbeit

Die Arbeiten an DIN 25407, DIN 25457 und DIN 25422 werden fortgesetzt und entsprechende Veröffentlichungen vorbereitet.

Fortschreibung der Untersuchung und Bewertung der tätigkeitsbezogenen Strahlenexposition in Anlagen nach AtG und standortnahen Zwischenlagern für radioaktive Abfälle sowie sonstigen Einrichtungen nach StrlSchG

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3621S72350	03.12.2021	30.09.2024	308.995,00 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer GRS - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH			
Projektleitung Dr. A. Günther	Fachbegleitung BfS M. Dommert	verantwortlich für den Text Dr. A. Günther	

Hintergrund

Ein erheblicher Teil der gesamten beruflichen Exposition in Deutschland entsteht während des Betriebs und bei Revisionsarbeiten in kerntechnischen Anlagen, bei Arbeiten nach endgültiger Einstellung des Leistungsbetriebs und bei Arbeiten zur Stilllegung und dem Rückbau dieser Anlagen. Durch die endgültige Abschaltung von acht Leistungsreaktoren im Jahr 2011, sechs weiteren bis Ende des Jahres 2021 sowie der Abschaltung aller Leistungsreaktoren im Jahr 2023 erhält insbesondere die mit den Stilllegungstätigkeiten einhergehende Strahlenexposition sowie der Betrieb standortnaher Zwischenlager zusätzlich eine aktuelle Bedeutung für den radiologischen Arbeitsschutz in kerntechnischen Anlagen.

Eine optimierte Arbeitsplanung und -durchführung sowie die systematische Auswertung gemachter Erfahrungen kann zu beträchtlichen Doseinsparungen führen. Um entsprechende Methoden hierzu weiterentwickeln zu können, ist eine detaillierte Kenntnis der Ursachen für die Exposition des Personals unabdingbare Voraussetzung. Dazu sind u. a. gezielte Analysen der durchgeführten Tätigkeiten und der damit einhergehenden Exposition erforderlich, die hinsichtlich des erforderlichen Datenmaterials über Daten der amtlichen Personendosimetrie hinausgehen.

Zielsetzung

Im Rahmen dieses Vorhabens werden Untersuchungen zur tätigkeitsbezogenen beruflichen Exposition in kerntechnischen Anlagen unter dem Gesichtspunkt der Optimierung fortgeschrieben. Betrachtet werden deutsche Kernkraftwerke, Anlagen der Ver- und Entsorgung sowie deutsche standortnahe Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente und radioaktive Abfälle. Grundlage der Untersuchungen sind fortlaufend zu sammelnde Daten und Informationen zur beruflichen Exposition in den kerntechnischen Anlagen sowie nationale und internationale Erfahrungen zum beruflichen Strahlenschutz. Auf der Grundlage der Analyse der gesammelten Informationen werden Vorschläge zur Optimierung der Arbeitseinsätze und verwendeten Arbeitsmittel, mit Schwerpunkt auf der Identifizierung von radiologisch relevanten Stilllegungstätigkeiten, erarbeitet. Relevante Vorhabensergebnisse werden in den nationalen und internationalen Erfahrungsaustausch eingebracht.

Methodik und Durchführung

Die übergeordneten Zielsetzungen des Vorhabens werden durch die Bearbeitung der nachstehenden, miteinander verknüpften Einzelziele umgesetzt.

Datenerhebung und Dokumentation

Statusberichte - TB 07 - Allgemeine und Gesellschaftliche Aspekte des Strahlenschutzes

Für kerntechnische Anlagen in Deutschland werden Informationen und Daten, die für die Dokumentation und Auswertung der beruflichen Exposition in den Anlagen von Bedeutung sind, insbesondere unter dem Gesichtspunkt der durchgeführten Tätigkeiten für die Jahre 2020 bis 2022 erhoben, aufbereitet und in jährlichen Berichten dokumentiert. Die zu erhebenden Daten stammen aus der betrieblichen Dosimetrie der Anlagen und weisen einen Detaillierungsgrad auf, der höher ist als derjenige der Daten der amtlichen Strahlenschutzüberwachung.

Datenanalyse

Anhand der Daten werden die Zusammenhänge zwischen der beruflichen Exposition und den sie beeinflussenden Faktoren untersucht und die Möglichkeiten der Reduktion der Exposition dargestellt. Schwerpunkt der Analyse sind die zu verrichtenden Tätigkeiten und die ergriffenen technischen und arbeitsorganisatorischen Strahlenschutzmaßnahmen. Soweit im Hinblick auf Aussagen über Optimierungsmöglichkeiten des Strahlenschutzes oder über Dosisreduzierungen sinnvoll, werden hierbei Teilaspekte von durchgeführten Tätigkeiten in die Analyse einbezogen.

Die zu erfassenden Daten und ihre Auswertungen führen frühere Daten und Auswertungen fort und ermöglichen einen Vergleich auf nationaler und internationaler Ebene (OECD und EU). Deshalb wird bei der Datenerfassung und Aufbereitung – soweit möglich – eine international einheitliche Charakterisierung der Tätigkeiten angewendet. Die internationale Zusammenarbeit und der Informationsaustausch erfolgen insbesondere durch die Mitarbeit im ISOE.

Optimierungsempfehlungen

Auf der Basis der erhobenen Daten und Analyseergebnisse sowie nationaler und internationaler Entwicklungen werden Vorschläge zur Optimierung der Arbeitseinsätze und der Arbeitsmittel erarbeitet. Der Schwerpunkt der Vorschläge liegt hierbei auf der Identifizierung von „good practices“ bei den typischen dosisintensiven Arbeitsvorgängen bei der Stilllegung von Anlagen. Die Szenarien oder Tätigkeitsabfolgen der Stilllegung unterscheiden sich von denen aus dem Betrieb und werfen neue Fragestellungen zum radiologischen Arbeitsschutz auf. Während für Kernkraftwerke in Betrieb und Nachbetrieb die Zusammenhänge zwischen der Exposition des Personals und den die Exposition beeinflussenden Faktoren weitestgehend bekannt sind, wurde eine diesbezügliche detaillierte Untersuchung für Kernkraftwerke in Stilllegung noch nicht durchgeführt. Daher werden insbesondere radiologisch relevante Stilllegungstätigkeiten sowie Szenarien bei typischen Stilllegungstätigkeiten identifiziert, analysiert sowie ggf. Handlungs- bzw. Optimierungsbedarf für die Stilllegung abgeleitet.

Bei der Erarbeitung der Optimierungsempfehlungen werden nationale und internationale Entwicklungen berücksichtigt. Eine regelmäßige Teilnahme am nationalen und internationalen Erfahrungsaustausch wie beispielsweise eine Teilnahme an der Working Group on Radiological Protection Aspects of Decommissioning Activities at Nuclear Power Plants (WGDECOM) von ISOE sowie diesbezügliche Aktivitäten der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) sind vorgesehen.

Methodik zur Untersuchung der beruflichen Strahlenexposition in kerntechnischen Anlagen

Der VGB (European Technical Association for Power and Heat Generation) und damit die deutschen Betreiber von Leistungsreaktoren sind zum 31. März 2016 aus dem ISOE ausgetreten. Die Betreiber der Anlagen in Betrieb und Nachbetrieb sind trotz des Ausstiegs aus ISOE im Rahmen der jährlichen Berichterstattung an die RSK weiterhin verpflichtet, Angaben zur Exposition des Personals gemäß der ISOE-Datenauswertung vorzunehmen, so dass die Detailtiefe der von den Betreibern zur Verfügung

gestellten Daten weiterhin gewährleistet ist. Allerdings hat sich in den Vorläufervorhaben herausgestellt, dass die Sammlung der Expositionsdaten im Vergleich zu den Vorjahren erschwert wird, da die Betreiber ihre Expositionsdaten nicht mehr direkt an ISOE melden und die GRS dadurch teilweise auf andere Quellen angewiesen ist. Daher werden für Teilbereiche die Daten durch ergänzende Anfragen bei den jeweiligen Anlagen angereichert.

Für die Datenerfassung der in Stilllegung befindlichen Anlagen gibt es eine solche standardisierte Datenerfassung nach ISOE nicht. Daher werden, soweit möglich, die Daten von den Anlagen in Berichtsform eingeholt. Allerdings hat sich in dem Vorläufervorhaben herausgestellt, dass die Sammlung der Expositionsdaten im Vergleich zu den Vorjahren erschwert wird, da es insbesondere bei Anlagen, bei denen die Stilllegungsphase begonnen hat, Verzögerungen in der Datenbereitstellung gibt, so dass die GRS auf andere Wege der Datenbeschaffung (Kontaktaufnahme zu den Aufsichtsbehörden oder den Anlagen selbst) angewiesen ist.

Die gesammelten Daten der in Betrieb/Nachbetrieb und in Stilllegung befindlichen Leistungskernkraftwerke werden jeweils auf Konsistenz geprüft und ggf. auf Basis von Berichten der Anlagen angepasst. Um eine zeitliche und sachliche Kontinuität der Datenerfassung zu gewährleisten, umfasst dies auch die Pflege und Ergänzung der bereits vorliegenden Zeitreihen. Für die Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung werden die Daten der Expositionen des Eigen- und Fremdpersonals der Anlagen mit Hilfe eines zielgerichtet vorbereiteten Fragebogens unter Berücksichtigung der Tätigkeitsschwerpunkte gesammelt und aufgearbeitet. Allerdings ist aufgrund der Bandbreite des Anlagenspektrums und der z. T. anders gelagerten Expositions- und Dosimetrie-Verhältnisse in diesen Anlagen der Informationsumfang im Vergleich zu dem der Kernkraftwerke eingeschränkt.

Die Ergebnisse der durchgeführten Analysen werden – unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus mehreren Anlagen als Querschnittsinformation – für die Ableitung von Hinweisen und Vorschlägen zur weiteren Verbesserung des Strahlenschutzes herangezogen. Dabei werden insbesondere auch sog. „good practices“ – also strahlenschutz-technisch gewinnbringende Praktiken – identifiziert und kommuniziert. Falls die Datenanalyse besondere Vorkommnisse – insbesondere eine außergewöhnlich hohe Exposition des Personals – aufzeigt, werden diese tiefergehend untersucht. Dabei werden u. a. die Ursachen für die erhöhte Exposition identifiziert sowie der Umgang in der Anlage und ggf. getroffene Maßnahmen, um zukünftig solche Vorkommnisse zu verhindern, beleuchtet.

Zur Identifizierung und Analyse radiologisch relevanter Stilllegungsmaßnahmen und Szenarien bei typischen Stilllegungstätigkeiten sowie ggf. zur Ableitung von Handlungsempfehlungen bzw. Optimierungsbedarf für die Stilllegung wird zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt, um den relevanten Stand von Wissenschaft und Technik aufzuarbeiten. Darauf aufbauend werden radiologisch relevante Stilllegungstätigkeiten bzw. Szenarien bei typischen Stilllegungstätigkeiten deutscher Anlagen identifiziert (z. B. aus den anlagenspezifischen Berichten der Vorläufervorhaben, Informationen aus den Betriebsberichten der Anlagenbetreiber oder Erfahrungen aus anderen GRS-Vorhaben im Bereich der Stilllegung) und analysiert. Um einen möglichst engen Praxisbezug zu erreichen, wird dabei – wenn möglich – auch der Kontakt zu Anlagen, Gutachtern und ggf. Aufsichtsbehörden hergestellt. Die identifizierten Tätigkeiten und/oder Szenarien und damit einhergehenden Expositionen werden abschließend bezüglich Möglichkeiten der Reduktion der Strahlenexposition im Sinne einer Optimierung untersucht und es werden ggf. Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Die bei der Auswertung und Analyse gewonnenen Ergebnisse werden für die verschiedenen Themenbereiche in Berichten dokumentiert. Die in den Abschnitten 1.2 und 1.3 ebenfalls

angesprochene Zusammenarbeit mit dem Ausland wird schwerpunktmäßig durch Teilnahme an Sitzungen und Veranstaltungen des ISOE als zentrale internationale Einrichtung zum beruflichen Strahlenschutz in Kernkraftwerken wahrgenommen.

Untersuchung der beruflichen Strahlenexposition in kerntechnischen Anlagen

Die Daten der kerntechnischen Anlagen eines Jahres werden schwerpunktmäßig jeweils im zweiten darauffolgenden Jahr in den kerntechnischen Anlagen erhoben. Für die Anlagen der Ver- und Entsorgung werden standardisierte Datenerfassungsbögen genutzt, die im Rahmen der früheren Datenerfassungen mit diesen Anlagen abgestimmt wurden. Darüber hinaus werden ergänzende Daten und Informationen erfasst und die jährlichen Betriebsberichte der Kernkraftwerke in Betrieb und Stilllegung ausgewertet.

Die Ergebnisse der Auswertungen werden für die Ableitung von Hinweisen und Vorschlägen zur weiteren Verbesserung des Strahlenschutzes herangezogen. Falls die Datenanalyse besondere Vorkommnisse – insbesondere eine außergewöhnlich hohe Exposition des Personals – aufzeigt, werden diese tiefergehend untersucht.

Um den Stand von Wissenschaft und Technik bei radiologisch relevanten Stilllegungstätigkeiten zu erarbeiten, wird eine Literaturrecherche durchgeführt. Darauf aufbauend werden radiologisch relevante Stilllegungstätigkeiten bzw. Szenarien bei typischen Stilllegungstätigkeiten deutscher Anlagen identifiziert und analysiert. Die identifizierten Tätigkeiten und/oder Szenarien und damit einhergehenden Expositionen werden abschließend bezüglich Möglichkeiten der Reduktion der Strahlenexposition im Sinne einer Optimierung untersucht und es werden ggf. Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Ergebnisse

Die bislang vorliegenden Ergebnisse des Vorhabens werden nach der Struktur der Einzelzielsetzungen zusammengefasst:

Datenerhebung und Dokumentation

Die Datenerhebung zur Strahlenexposition des Personals in Kernkraftwerken in Betrieb/Nachbetrieb, Stilllegung und den Anlagen der Ver- und Entsorgung für das Berichtsjahr 2020 wurde abgeschlossen und die Daten in Jahresberichten, die mit den Betreibern abgestimmt wurden, dokumentiert. Zu beachten ist, dass die Berichte mit anlagenspezifischen Informationen der Öffentlichkeit nicht zur Verfügung stehen.

Optimierungsmöglichkeiten insbesondere bei besonderen Vorkommnissen und relevanten Stilllegungstätigkeiten

Die Literaturrecherche zur Aufarbeitung des Standes von Wissenschaft und Technik bei radiologisch relevanten Stilllegungstätigkeiten wurde abgeschlossen. Mit den Arbeiten bezüglich der Identifikation der aus radiologischer Sicht für die Stilllegung relevanten Tätigkeiten und den damit verbundenen Expositionen des Personals wurde begonnen.

Nationaler Erfahrungsaustausch

Zur Verfolgung der nationalen Entwicklungen wurde an dem TÜV Süd Seminar „Neue Entwicklungen im Strahlenschutz und ihre Anwendung in der Praxis“ teilgenommen, welches Ende Juni/Anfang Juli 2022 in München stattfand.

Internationaler Erfahrungsaustausch

Es erfolgte eine enge Mitarbeit in den Gremien und Arbeitsgruppen des ISOE, die u. a. die Sitzungen des ISOE Management Boards (MB, Dezember 2022 in Paris, Frankreich) sowie die Sitzung der ISOE WGDECOM (Oktober 2022 in Köln) umfassten. Weiterhin wurde zur Verfolgung der internationalen Entwicklungen an dem „ISOE International Symposium“ teilgenommen, welches im Juni 2022 in Tours, Frankreich, stattfand.

Geplante Weiterarbeit

Für das Jahr 2023 ist die Fortführung der Arbeiten geplant. Diese umfasst insbesondere die im Vorhaben vorgesehene Datensammlung, die Erstellung der jährlichen Berichterstattung zur Exposition in kerntechnischen Anlagen sowie die Arbeiten zu radiologisch relevanten Stilllegungstätigkeiten sowie Szenarien bei typischen Stilllegungstätigkeiten. Ebenso wird die Mitarbeit in den Gremien und Arbeitsgruppen des ISOE fortgesetzt, welche neben dem ISOE MB insbesondere auch die ISOE-Expertengruppe WGDECOM, die sich speziell mit Fragestellungen der Stilllegung von Kernkraftwerken befasst, umfasst, um sowohl deutsche Erfahrungen in den internationalen Erfahrungsaustausch als auch umgekehrt internationale Erfahrungen in den deutschen Erfahrungsaustausch einzubringen. Darüber hinaus ist die Teilnahme am nationalen Erfahrungsaustausch geplant.

Themenbereich 08 - Elektromagnetische Felder

Leukämie im Kindesalter – Einfluss des Immunsystems auf die Entstehung der Erkrankung (experimentelle Studie an einem geeigneten Tiermodell)

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3616S82440	01.12.2016	30.09.2019	851.432,00 EUR

Forschungs- / Auftragnehmer

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.
Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin (ITEM)

Projektleitung

Dr. Annette Bitsch

Fachbegleitung BfS

Dr. Janine Schmidt

verantwortlich für den Text

Dr. Annette Bitsch
Dmitrij Sachno

Hintergrund

Epidemiologische Untersuchungen weisen auf einen Zusammenhang zwischen der Exposition mit extrem niederfrequenten Magnetfeldern (ELF-MF), wie sie beispielsweise bei der Erzeugung, Übertragung, Verteilung und Verwendung von elektrischer Energie (Strom) auftreten, und der Entstehung von Leukämien im Kindesalter hin. Von der IARC (International Agency for Research on Cancer) wurden im Jahr 2002 ELF-MF auf Grund der epidemiologischen Ergebnisse als möglicherweise krebserregend (Klasse 2B) eingestuft. Experimentelle Beweise für diese IARC-Einstufung fehlen aber bis heute. Biophysikalisch betrachtet ist es unwahrscheinlich, dass diese energiearmen extrem niederfrequenten magnetischen Felder stark genug sind, um direkt DNA-schädigend zu wirken, d. h. um beispielsweise B-ALL [akute lymphoblastische (B-Zell-) Leukämie] – die häufigste Leukämie im Kindesalter – unmittelbar zu verursachen.

Allerdings zeigten drei unabhängige Untersuchungen an CD1-Mäusen bzw. bei einem transgenen Mausmodell für prä-B-ALL (das Sca1-ETV6-RUNX1 Mausmodell), in dem die häufige Leukämie-spezifische chromosomale Translokation ETV6-RUNX1 nachgestellt wird, übereinstimmend eine verminderte Zahl an Immunzellen nach bis zu 90-tägiger ELF-MF Exposition im Blutbild der Jungtiere. Auch wenn es bisher keinen Nachweis gibt, dass diese Verminderung der Immunzellzahl beim jungen sich entwickelnden Immunsystem ein zwingend notwendiger Schritt für die Manifestation einer B-ALL ist, soll diesem Hinweis nachgegangen werden. Dafür werden Phänotyp und Funktion von Immunzellen am oben genannten Mausmodell mit und ohne Magnetfeldexposition untersucht.

Zielsetzung

Festlegung des Tiermodells

Die Sca1-ETV6-RUNX1 Mäuse tragen eine spezifische Veränderung im Erbgut, die auch häufig bei Leukämien in Kindern nachgewiesen wird, und scheinen daher als Tiermodell besonders geeignet. Eine Zuchtkolonie des Tiermodells soll am Fraunhofer ITEM etabliert und auf die benötigte Tierzahl expandiert werden (siehe Punkt 3.1 in Statusbericht zum Jahr 2018).

Definition der Expositions-Szenarien und Untersuchungszeitpunkte

Für die tierexperimentelle Überprüfung der epidemiologischen Hinweise auf einen möglichen Einfluss von ELF-MF auf die Entstehung von Leukämien im Kindesalter müssen unterschiedliche elektromagnetische Feldstärken ausgewählt werden. Die ELF-MF Exposition der Nachkommen soll nach Feststellung der Trächtigkeit, d. h. so früh wie möglich – schon im Muttertier – beginnen und nach der Geburt über verschiedene Zeiträume fortgeführt werden.

Festlegung und Untersuchung der immunologischen Untersuchungsschwerpunkte

Die Wirkung der ELF-MF Exposition auf die jungen Mäuse soll anhand von Lymphozyten aus immunologisch relevanten Organen untersucht werden. Basierend auf den Daten der vorausgehenden Studien soll dabei speziell auf die Entwicklung der T-Lymphozyten eingegangen werden.

Methodik

Versuchsdesign

Vier Gruppen weiblicher Mäuse werden nach erfolgreicher Verpaarung ab Tag 1 der Trächtigkeit in drei äußerlich nicht unterscheidbaren Anlagen (d. h. verblindetes Studiendesign) gegenüber 50 Hz ELF-MF und Feldstärken von 0 (Scheinexposition sowie zusätzliche Käfigkontrolle), 10 μ T (mikro-Tesla) und 1 mT (milli-Tesla) exponiert. Die Nachkommen werden im entsprechenden ELF-Feld geboren und fortlaufend bis zu den 3 Untersuchungszeitpunkten (7, 14, 28 Tage) befeldet. Für die Ausprägung der Leukämie-spezifischen Veränderung Sca1-ETV6-RUNX1 in den zu untersuchenden Nachkommen (F1 Generation) besteht eine Wahrscheinlichkeit von 50%. Vorerst werden alle Nachkommen befeldet und nach Abschluss der jeweiligen Aufarbeitungen genotypisiert. Die exakte Aufschlüsselung der Tierzahlen in den jeweiligen Behandlungsgruppen kann dem Punkt 3.1 im Statusbericht zum Jahr 2018 entnommen werden (<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2019102319808>).

Immunologie

Die Wirkung der prä- und postnatalen ELF-MF Exposition an den Jungtieren wird anhand von Blut- und Immunzelluntersuchungen im Vergleich sowohl zu scheinexponierten als auch Käfig-Kontrolltieren überprüft werden. Dabei wird der Fokus auf die Charakterisierung eines möglicherweise geschwächten oder mangelhaft ausgebildeten Immunsystems gelegt. Es werden Untersuchungen zur Immunhistopathologie und zum Immunstatus in immunologisch relevanten Organen wie Blut, Milz, Knochenmark und Thymus durchgeführt.

Ergebnisse

Der tierexperimentelle Teil der Studie ist vollständig abgeschlossen. Die Genotypen wurden den einzelnen Tieren zugeordnet. Eine Auswertung der erhobenen Gewichtsdaten der Tiere in den einzelnen Behandlungsgruppen ist erfolgt und die Auswertung der Differentialblutbild-Analyse ist abgeschlossen. Die durchflusszytometrische Auswertung für Thymus, Knochenmark, Blut und Milz ist abgeschlossen. Weiterhin wurden die Messungen und Auswertung der Zytokinsekretionsdaten mittels MSD Multiplex Kits fertiggestellt.

Von allen relevanten Organen wurden immunhistologische Schnitte angefertigt, gefärbt und digitalisiert. Die Auswertung der immunhistochemischen Multiplexfärbung wurde vollständig etabliert und finalisiert. Die morphologische sowie die immunhistochemische Auswertung der histopathologischen Schnitte ist fertiggestellt.

Im Anschluss an die Finalisierung der Datenauswertung erfolgte die Entblindung der einzelnen Behandlungsgruppen, die ein Zusammenführen der Daten und die finale Interpretation inkl. Statistik ermöglichte. Auch das ist abgeschlossen.

Geplante Weiterarbeit

- Einreichung des Abschlussberichtes
- Vorstellung der Daten in Form einer Abschlusspräsentation

Systematischer Review zum Einfluss elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf die Fruchtbarkeit bei Menschen sowie in Tier- und Laborstudien

Forschungskennzeichen 3620S82475	Beginn 02.03.2020	Ende 01.03.2021	Fördermittel 88.068,35 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin ITEM			
Projektleitung Dr. Annette Bitsch	Fachbegleitung BfS Felix Meyer	verantwortlich für den Text Dr. Annette Bitsch Dmitrij Sachno	

Hintergrund

Zahlreiche Studien, die im Verlauf der letzten Jahrzehnte publiziert wurden, weisen auf einen Zusammenhang zwischen der Exposition gegenüber niedrig- und hochfrequenten elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern und einer möglichen Beeinträchtigung der menschlichen Fruchtbarkeit hin. Dabei wurde speziell eine Verringerung der Anzahl an Spermien, deren Mobilität und das Auftreten von Schädigungen in der DNA bei für die Funktion von Spermatozoen wichtigen Proteinen sowie ein erhöhtes Auftreten reaktiver Sauerstoffspezies im Gewebe der Keimdrüsen und innerhalb der Keimzellen selbst beschrieben.

Insgesamt ist die Datenlage zum Einfluss elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf die humane Reproduktionsfähigkeit überwiegend inkonsistent. Zum einen unterscheiden sich die Studien teilweise deutlich im Versuchsaufbau und den Expositionsbedingungen - es gibt Unterschiede im verwendeten Zelltyp, der Intensität der Felder oder der Expositionsdauer. Zum anderen unterscheiden sich die Studien, u. a. mit Hinblick auf mitgeführte Kontrollen oder eine verblindete Auswertung, auch qualitativ voneinander. Um eine fundierte Bewertung des Einflusses elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf die Reproduktionsfähigkeit des Menschen geben zu können, muss die Literatur systematisch bewertet, zusammengefasst und aufgearbeitet werden.

Zielsetzung

Nach den Richtlinien des Centre for Reviews and Dissemination soll ein Review-Protokoll erstellt werden, wodurch Rahmenbedingungen für die Studie wie Einschlusskriterien, Suchstrategie, Vorgehen bei der Selektion einzuschließender Studien und Extraktion der Daten sowie das Vorgehen für die Beurteilung der Studien festgelegt werden. Um eine bestmögliche Vermeidung von Verzerrungen gewährleisten zu können, erfolgt an dieser Stelle eine PROSPERO-Online-Registrierung der systematischen Literaturstudie. Im Anschluss an die Genehmigung des Review-Protokolls soll die Literatursuche, -auswahl und -aufarbeitung der Daten, unter Beachtung der Richtlinien des Centre for Reviews and Dissemination, als systematisches Review erfolgen.

Methodik

Selektion einzuschließender Studien

Die zuvor festgelegten Datenbanken PubMed, Scopus, Web of Science und EMF-Portal werden anhand der entwickelten Suchstrategie nach potenziell relevanten Artikeln durchsucht. Identifizierte Artikel werden systematisch in der Reference Management Software „Endnote X8“ de-dupliziert und in die Literaturmanagement Software „DistillerSR“ überführt und in zwei Schritten auf ihre Eignung

geprüft. In der ersten Phase der Bewertung werden zunächst die Titel und Zusammenfassungen der identifizierten Artikel von zwei Bearbeitern unabhängig Anhand der Einschlusskriterien evaluiert. In der zweiten Phase wird der vollständige Text für die Abstracts, die die Einschlusskriterien erfüllen, abgerufen und von zwei Bearbeitern unabhängig überprüft. Anschließend erfolgt eine gemeinsame Entscheidung über den Einschluss der Studien.

Extraktion der Daten

Für die Extraktion der Daten, wird vorab ein präzises Extraktionsprotokoll erstellt. Extrahierte Daten enthalten beispielsweise Anzahl der untersuchten Probanden, Tiere oder Zellkulturplatten und Angaben zur Exposition (z. B. Häufigkeit der Befeldung, Feldstärke und Expositionsdauer). Die genauen Endpunkte und Resultate werden ebenfalls extrahiert. Gegebenenfalls werden zusätzlich Anmerkungen zu bestimmten Merkmalen (z. B. Hintergrund der Studie) und besondere Einschränkungen einzelner Studien gemacht. Die Extraktion wird von zwei Bearbeitern unabhängig zueinander durchgeführt und im Anschluss diskutiert.

Bewertung der Daten

Die interne Validität und die Qualität der eingeschlossenen Studien werden mit dem „Risk of Bias“ Tool des „Office of Health Assessment and Translation“ veröffentlichten Protokoll überprüft. Dabei werden Kriterien, wie beispielsweise Verblindung, Qualität der Dosimetrie sowie Vergleichbarkeit der experimentellen Konditionen zwischen den Dosisgruppen betrachtet. Zwei Autoren werden unabhängig voneinander diese Kriterien für alle eingeschlossenen Studien wie folgt evaluieren: „++“ definitiv geringes Verzerrungsrisiko; „+“ wahrscheinlich geringes Verzerrungsrisiko; „-“ wahrscheinlich hohes Verzerrungsrisiko oder „--“ definitiv hohes Verzerrungsrisiko.

Ergebnisse

Das Review-Protokoll wurde bei Prospero eingereicht. Nach der im Review-Protokoll definierten Suchstrategie wurden die Datenbanken PubMed, Scopus, Web of Science und EMF-Portal durchsucht. 18.400 Publikationen wurden nach dem Deduplikationsprozess für das Titel und Abstract Screening bereitgestellt. Im Prozess des Titel- und Abstract-Screenings wurden 1.083 Publikationen eingeschlossen und in das Volltext-Level überführt. In der zweiten Phase, dem Volltext-Screening, wurden die vollständigen Texte für die Abstracts, die die Einschlusskriterien erfüllen, abgerufen und von zwei Bearbeitern unabhängig überprüft.

Geplante Weiterarbeit

In der nächsten Phase des Projektes werden die vollständigen Texte für die Publikationen, die die Einschlusskriterien erfüllen, abgerufen und von zwei Bearbeitern unabhängig überprüft. Es folgt eine gemeinsame Entscheidung über den Einschluss der Studien. Aus den im Volltext Screening eingeschlossenen Publikationen werden nachfolgend die Daten nach extrahiert und bewertet. Anschließend werden die Ergebnisse in Form eines systematischen Reviews zur Publikation zusammengefasst – an dieser Stelle erfolgt eine erneute Aktualisierung der Literatursuche in den jeweiligen Datenbanken.

Bewertende Literaturstudie zum Einfluss elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf oxidative Prozesse bei Menschen sowie in Tier- und Laborstudien

Forschungskennzeichen 3619S82464	Beginn 02.03.2020	Ende 01.03.2021	Fördermittel 59.707,67 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin ITEM			
Projektleitung Dr. Annette Bitsch	Fachbegleitung BfS Felix Meyer	verantwortlich für den Text Dmitrij Sachno	

Hintergrund

Eine Vielzahl wissenschaftlicher Studien beschreibt einen Anstieg der Konzentration freier Radikale als Resultat einer Exposition durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder (EMF). Obwohl Sauerstoffmoleküle für das Überleben vieler Organismen unentbehrlich sind, können sie durch unterschiedliche Stoffwechselvorgänge zu gefährlichen Nebenprodukten führen, die als reaktive Sauerstoffspezies (ROS) bezeichnet werden. Diese reaktiven Sauerstoffspezies können zelluläre Komponenten wie Proteine, Lipide und DNA schädigen. Allerdings ist das Ausmaß der beobachteten Effekte oft nur sehr gering. Insgesamt ist die Datenlage zum Einfluss elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf die Entstehung von oxidativem Stress inkonsistent. Dafür gibt es mehrere Gründe. Zum einen unterscheiden sich die Studien teilweise deutlich im Versuchsaufbau und den Expositionsbedingungen. Es gibt Unterschiede im verwendeten Zelltyp, der Intensität der Felder, der Expositionsdauer oder dem Zeitpunkt der ROS-Messung. Zum anderen unterscheiden sich die Studien, u. a. mit Hinblick auf mitgeführte Kontrollen oder eine verblindete Auswertung, auch qualitativ voneinander. Um eine fundierte Bewertung des Einflusses elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf oxidative Prozesse geben zu können, muss die Literatur systematisch bewertet, zusammengefasst und aufgearbeitet werden.

Zielsetzung

Erstellung eines Review-Protokolls

Nach den Richtlinien des Centre for Reviews and Dissemination soll ein Review-Protokoll erstellt werden, wodurch Rahmenbedingungen für die Studie wie Einschlusskriterien, Suchstrategie, Vorgehen bei der Selektion einzuschließender Studien und Extraktion der Daten sowie das Vorgehen für die Beurteilung der Studien festgelegt werden sollen. Um eine bestmögliche Bias-Vermeidung gewährleisten zu können, soll an dieser Stelle eine PROSPERO-Online-Registrierung der systematischen Literaturstudie erfolgen.

Erstellung eines systematischen Reviews

Im Anschluss an die Genehmigung des Review-Protokolls soll die Literatursuche, -auswahl und -aufarbeitung der Daten, unter Beachtung der Richtlinien des Centre for Reviews and Dissemination, als systematisches Review erfolgen.

Methodik

Selektion einzuschließender Studien

Die zuvor festgelegten Datenbanken PubMed, Scopus, Web of Science und EMF-Portal werden anhand der entwickelten Suchstrategie nach potenziell relevanten Artikeln durchsucht. Identifizierte Artikel werden systematisch in der Reference Management Software „Endnote X8“ de-dupliziert, in die Literaturmanagement Software „DistillerSR“ überführt und in zwei Schritten auf ihre Eignung geprüft. In der ersten Phase der Bewertung werden zunächst die Titel und Zusammenfassungen der identifizierten Artikel von zwei Bearbeiter*innen unabhängig anhand der Einschlusskriterien evaluiert. In der zweiten Phase wird der vollständige Text für die Abstracts, die die Einschlusskriterien erfüllen, abgerufen und von zwei Bearbeiter*innen unabhängig überprüft. Anschließend erfolgt eine gemeinsame Entscheidung über den Einschluss der Studien.

Extraktion der Daten

Für die Extraktion der Daten wird vorab ein präzises Extraktionsprotokoll erstellt. Extrahierte Daten enthalten beispielsweise Anzahl der untersuchten Probanden, Tiere oder Zellkulturplatten und Angaben zur Exposition (z. B. Häufigkeit der Befeldung, Feldstärke und Expositionsdauer). Die genauen Endpunkte und Resultate werden ebenfalls extrahiert. Die Extraktion wird von einem Bearbeiter durchgeführt und von einem zweiten Bearbeiter überprüft.

Beurteilung der Studien

Die interne Validität und die Qualität der eingeschlossenen Studien werden mit dem „Risk of Bias“ Tool des von „Office of Health Assessment and Translation“ veröffentlichten Protokoll überprüft. Dabei werden Kriterien, wie beispielsweise Verblindung, Qualität der Dosimetrie sowie Vergleichbarkeit der experimentellen Konditionen zwischen den Dosisgruppen betrachtet. Zwei Autoren werden unabhängig voneinander diese Kriterien für alle eingeschlossenen Studien wie folgt evaluieren: „++“ definitiv geringes Verzerrungsrisiko; „+“ Wahrscheinlich geringes Verzerrungsrisiko; „-“ wahrscheinlich hohes Verzerrungsrisiko oder „--“ definitiv hohes Verzerrungsrisiko.

Ergebnisse

Das Review-Protokoll wurde erfolgreich finalisiert und die PROSPERO Registrierung abgeschlossen. Nach der im Review-Protokoll definierten Suchstrategie wurden die Datenbanken PubMed, Scopus, Web of Science und EMF-Portal durchsucht. Die Suchstrategie wurde an Hand von 72 sogenannten Goldstandard-Artikeln aus dem Jahresreport der SSM (Swedish Radiation Safety Authority) und eines Reviews (Schuermann et al. 2021) validiert.

In der finalen Suche wurden folgende Trefferzahlen erzielt: 2080 Artikel in PubMed, 5471 Artikel in Scopus, 3400 Artikel in Web of Science und 7294 im EMF Portal (<https://www.emf-portal.org/de>). Nach einer Bereinigung bezüglich der Duplikate blieben 14361 Literaturstellen zum Screening und zur Auswahl relevanter Literatur übrig.

Das Screening- und das Datenextraktionsprotokoll wurde in „DistillerSR“ etabliert und eine Pilotstudie mit 100 zufällig ausgewählten Artikeln durchgeführt. Im Anschluss erfolgte eine Selektion der einzuschließenden Studien anhand des Titels und Abstracts der Artikel nach Punkt 4.1. durch zwei unabhängige Reviewer. Dabei wurden 1007 Artikel als relevant eingestuft, woraufhin die Volltexte der entsprechenden Artikel in „DistillerSR“ hochgeladen wurden. 437 Volltext-Artikel wurden zum aktuellen Stand nach Punkt 4.1 auf ihre Eignung hin überprüft. 19 Studien wurden in den Review eingeschlossen.

Geplante Weiterarbeit

Die Volltexte der übrigen 570 Literaturstellen werden detailliert auf ihre Relevanz geprüft. Aus Studien, die in diesem Prozess eingeschlossen werden, werden die notwendigen Daten nach 4.2. extrahiert und nach 4.3. bewertet. Anschließend werden die Ergebnisse in Form eines systematischen Reviews zur Publikation zusammengefasst – an dieser Stelle erfolgt eine erneute Aktualisierung der Literatursuche in den jeweiligen Datenbanken.

Zusätzlich erfolgt die Erstellung eines umfassenden Abschlussberichts mit detaillierter Beschreibung der Studienbewertung (Risk of Bias) und dem Aufzeigen von Lücken im derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand mit einer Empfehlung für zukünftige Forschungsschwerpunkte.

Beteiligung an einer Folgestudie zur Verifikation oder Falsifikation der Ergebnisse der NTP-Langzeitstudie an Mäusen und Ratten zu Ganzkörperexposition mit Mobilfunkfeldern

Forschungskennzeichen 3620S82474	Beginn 01.12.2020	Ende 31.05.2024	Fördermittel 249.400,00 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Seibersdorf Labor GmbH			
Projektleitung Gernot Schmid	Fachbegleitung BfS Dr. Jens Kuhne	verantwortlich für den Text Gernot Schmid	

Hintergrund

Vorliegende Ergebnisse wissenschaftlicher Tierstudien mit Ratten und Mäusen berichten teilweise von erhöhter Tumorzinzidenz bzw. Tumorpromotion durch Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF). Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf den Menschen ist jedoch schwierig, unter anderem deshalb, weil unter ähnlichen Befeldungsbedingungen die Absorptionsverteilung im Körper der Tiere deutlich unterschiedlich zu jener im menschlichen Körper ist, und bei gleicher spezifischer Ganzkörperabsorptionsrate von deutlich unterschiedlichen Auswirkungen auf den Metabolismus bei den Tieren und Menschen ausgegangen werden muss. Die durch die HF-Absorption den Tieren zugeführte Wärmeenergie könnte somit als Confounder im Rahmen von Studien hinsichtlich möglicher nicht-thermischer Wirkungen von HF-EMF wirken.

Zielsetzung

Ziel des Vorhabens ist daher die Überprüfung der Machbarkeit einer Realisierung thermischer Kontrollgruppen durch Oberflächenabsorption von Millimeterwellen für Tierstudien mit Ratten und Mäusen in denen die thermische Last der HF-Exposition im gegenwärtigen Mobilfunk-Frequenzbereich (< 6 GHz) nachgebildet wird, ohne jedoch gleichzeitig zu einer relevanten Absorption von HF-EMF in den inneren (Ziel-)organen der Tiere zu führen.

Methodik

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgt in mehreren Arbeitspaketen, die im Folgenden beschrieben werden.

Aufarbeitung des relevanten wissenschaftlichen Kenntnisstandes

Aus publizierten experimentellen Studien mit Ratten und Mäusen zur Frage gesundheitlicher Auswirkungen von HF-EMF, werden dosimetrisch relevante Daten (Expositionsprotokolle, Absorptionsverteilung, Körpertemperaturdaten, Details der Expositionsanlagen, Anzahl der Tiere pro Käfig und Positionen der Tiere während der Exposition, Gewebe- und Materialeigenschaften von Käfig, Einstreu, Futter, etc.) erhoben und zusammengefasst. Des Weiteren erfolgen Recherchen bezüglich verfügbarer experimenteller und numerischer dosimetrischer Methoden sowie der technischen Details der eingesetzten Expositionsanlagen.

Zusätzlich werden in der aktuellen wissenschaftlichen Literaturrecherchen bezüglich verfügbarer anatomischer numerischer Körpermodelle von Mäusen und Ratten in unterschiedlichen Entwicklungsstadien und damit ermittelter HF-Absorption und Gewebetemperaturerhöhungen, hinsichtlich der dielektrischen und thermischen Eigenschaften der Körpergewebe und anderer

relevanter Materialien (Futter, Streu, Käfig, etc.), sowie im Hinblick auf Thermoregulation von Ratten und Mäusen durchgeführt.

Identifikation geeigneter HF-EMF-Parameter für thermische Kontrollexperimente

Auf Basis der in den vorangegangenen Recherchen gewonnenen Erkenntnisse werden zunächst geeignete anatomische numerische Körpermodelle von Ratten und Mäusen in unterschiedlichen Entwicklungsstadien ausgewählt und beschafft sowie deren passive thermischen Gewebeeigenschaften auf Basis einer experimentellen Validierung optimiert. Diese Validierung erfolgt durch kontrollierte Expositionen von frischen Ratten- und Mäusekadavern in unterschiedlichen Entwicklungsstadien mittels HF-EMF im Frequenzbereich 450 MHz – 40 GHz, bei gleichzeitiger (faseroptischer) Temperaturmessung in unterschiedlichen Organ- bzw. Gewebebereichen.

Mit den validierten bzw. optimierten Ratten- bzw. Mäusemodellen unterschiedlicher Entwicklungsstadien erfolgen systematische numerische Berechnungen der Absorptions- und Temperaturverteilungen im Frequenzbereich bis 60 GHz mit unterschiedlichen Polarisations- und Einfallsrichtungen der HF-Wellen, um die grundsätzliche Möglichkeit für thermische Kontrollgruppen beurteilen zu können, wobei die Beurteilung der Machbarkeit anhand der folgenden Merkmale erfolgen soll:

- möglichst genaue Nachbildung der Temperaturverläufe (Über die Zeit) und der Temperaturverteilung in den Tieren, wie sie durch die HF-EMF Absorption in den relevanten Studien zur Frage der Kanzerogenität aufgetreten ist,
- minimale HF-EMF Absorption in den relevanten Zielorganen,
- minimale Begleiterscheinungen wie z. B. Erwärmung der Körperoberfläche oder in kleinen resonanten Strukturen.

Aus den durchgeführten Berechnungen werden möglichst optimale Expositionsparameter für Temperaturkontrollgruppen von SD-Ratten und B6C3F1-Mäusen, inklusive deren als noch vertretbar anzusehenden Bereichsgrenzen ermittelt.

Überprüfung der Eignung bestehender Expositionseinrichtungen und Ermittlung notwendiger Anpassungen zur Realisierung von thermischen Kontrollexperimenten

Auf Basis der in den vorangegangenen Arbeitsschritten erhobenen Daten über Expositionsanlagen und der erarbeiteten optimierten Expositionsparameter für Temperaturkontrollgruppen wird untersucht, inwieweit die bestehenden Expositionsanlagen der oben genannten Studien für die Hinzunahme einer solchen Temperaturkontrollgruppe geeignet sind.

Für die als tauglich eingestuften Expositionsanlagen werden auf Basis von numerischen Berechnungen optimierte Expositionsparameter für die thermische Kontrollgruppe erarbeitet und die resultierenden Unsicherheiten in der Exposition der thermischen Kontrollgruppen quantifiziert.

Zusammenfassung der Ergebnisse und Identifikation möglicher oder zu erwartender Probleme

Alle erarbeiteten Ergebnisse des Vorhabens werden kritisch diskutiert, und gemeinsam mit identifizierten offenen Fragen dokumentiert, und es werden aus der Gesamtschau aller vorliegenden Erkenntnisse und Ergebnisse Empfehlungen für experimentelle Tierstudien im Hinblick auf mögliche Effekte von HF-EMF abgeleitet.

Ergebnisse

Die Recherche zur Aufarbeitung des relevanten wissenschaftlichen Kenntnisstandes wurde abgeschlossen und im Zwischenbericht zum ersten Arbeitspaket zusammengefasst.

Die verfügbaren Informationen aus der Literatur zeigen komplexe Zusammenhänge zwischen einfallender (äußerer) Feldstärke bzw. Leistungsflussdichte S_{inc} , SAR und der sich schlussendlich einstellenden HF-induzierten Körpertemperaturerhöhung in den zur Diskussion stehenden Tieren. Die grundsätzlich zu erwartenden frequenzabhängigen Absorptionsverteilungen infolge der von der Frequenz abhängigen Eindringtiefen werden überlagert von Resonanzerscheinungen, aufgrund der Tatsache, dass die Körperdimensionen der Tiere in der Größenordnung der Wellenlängen der Mobilfunkfrequenzen liegen. Dadurch hängen die resultierenden Ganzkörper-Absorptionskoeffizienten SAR_{GK}/S_{inc} von der Frequenz, dem Entwicklungsstadium der Tiere und der Ausrichtung der Tiere, relativ zur Polarisationsrichtung des einfallenden Feldvektors ab. Noch komplexer sind daher die Abhängigkeiten der organspezifischen SAR zu erwarten. Die sich einstellenden Körpertemperaturerhöhungen sind in weiterer Folge ihrerseits vom Ausmaß und der Verteilung der HF-Absorption im Körper, von der Umgebungstemperatur, der Körpergröße, sowie metabolischen und thermoregulatorischen Parametern abhängig. Vor diesem Hintergrund sind die in der Literatur auffindbaren Daten im Hinblick auf das Projektziel als sehr lückenhaft zu bezeichnen.

Bezüglich verfügbarer anatomischer Mäuse- und Rattenmodelle für numerische Berechnungen wurden insgesamt zehn Mäuse- und sechs Rattenmodelle unterschiedlicher Entwicklungsstadien im Hinblick auf Ihre Eignung für das Vorhaben analysiert. Offene Fragen bestehen im Hinblick auf die Absorptionseigenschaften von relevanten Materialien wie Käfig, Einstreu und Futter im Millimeterwellenbereich, für die in der Literatur keine bzw. nur unzureichend zuverlässige Daten gefunden werden konnten. Des Weiteren erscheint die numerische Behandlung des Wärmeüberganges vom Tierkörper (unter Berücksichtigung des Felles der Tiere) zur Umgebung ein noch nicht ausreichend untersuchtes Problem darzustellen (in den Tiermodellen ist keinerlei Körperbehaarung berücksichtigt).

Geplante Weiterarbeit

Im nächsten Schritt werden elektromagnetische und thermische Simulationen mit ausgewählten Maus- und Rattenmodellen durchgeführt und Temperaturmessungen mit frischen Tierkadavern während Exposition gegenübergestellt, um die Validität der numerischen Modelle zu überprüfen bzw. zu verbessern.

Um den Bereich unterschiedlicher Entwicklungsstadien der Tiere und den interessierenden Frequenzbereich bestmöglich im Rahmen des kalkulierten Aufwandes abzudecken, erfolgen diese Messungen bzw. Simulationen mit Tieren unterschiedlicher Körpergewichte und unterschiedlichen Frequenzen.

Zusätzlich zu den oben angeführten Tiergrößen werden Simulationen mit Modellen entsprechend einer neugeborenen Ratte und einer neugeborenen Maus durchgeführt (ggf. mit stark vereinfachten Körpermodellen).

In einem weiteren Schritt wird (gemäß dem Arbeitsprogramm) versucht nähere Erkenntnisse bezüglich der Rolle bzw. Effizienz des (unbehaarten) Schwanzes bei Ratten und Mäusen beim Wärmeaustausch mit der Umgebung zu gewinnen.

Mit den validierten bzw. optimierten Ratten- bzw. Mäusemodellen unterschiedlicher Entwicklungsstadien erfolgen schließlich die im Arbeitsprogramm im Rahmen von Arbeitspaket 2 beschriebenen systematischen numerischen Berechnungen der Absorptions- und Temperaturverteilungen in den betrachteten Tiermodellen.

Bestimmung von Expositionen gegenüber elektromagnetischen Feldern der Elektromobilität

Forschungskennzeichen 3620S82473	Beginn 18.03.2021	Ende 31.05.2024	Fördermittel 449.025,00 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Seibersdorf Labor GmbH			
Projektleitung Gernot Schmid	Fachbegleitung BfS Dirk Geschwentner	verantwortlich für den Text Gernot Schmid	

Hintergrund

Die zunehmende Verbreitung von Fahrzeugen mit elektrischen Antriebssystemen für den Individualverkehr führt zu neuartigen Magnetfeld-Expositionsverhältnissen von Personen, die sich innerhalb / auf bzw. in unmittelbarer Nähe solcher Fahrzeuge befinden. Dabei sind als Magnetfeldquellen nicht nur die Komponenten der Antriebssysteme im Fahrzeug selbst, sondern auch die zugehörige Ladeinfrastruktur anzusehen. Die bisher in nur sehr eingeschränktem Umfang vorliegenden und veröffentlichten Daten zeigen bezüglich räumlicher Verteilung und spektraler Zusammensetzung der Magnetfeldimmissionen sowie der daraus resultierenden Expositionsstärke (in Bezug auf die empfohlenen Grenzwerte) eine große Streubreite und geben möglicherweise kein zuverlässiges Bild der aktuellen Situation.

Zielsetzung

Um einen aktuellen und repräsentativen Überblick über die Magnetfeldexposition der Allgemeinbevölkerung in Deutschland durch Fahrzeuge für den Individualverkehr mit elektrischen Antriebssystemen sowie durch die zugehörige Ladeinfrastruktur zu erlangen, soll im Rahmen dieses Vorhabens zunächst der aktuelle Kenntnisstand aufgearbeitet und zusammengefasst werden, gefolgt von umfangreichen systematischen Messkampagnen an einer repräsentativen und marktrelevanten Stichprobe von Fahrzeugen und Ladepunkten. Immissionsbeiträge anderer (auch in konventionell angetriebenen Fahrzeugen vorkommender) Quellen sollen dabei getrennt erfasst werden. Den gewonnenen Erkenntnissen werden schließlich Daten aus einschlägigen früheren Arbeiten und Immissionsdaten für andere elektrisch betriebene Verkehrsmittel gegenübergestellt, um die Entwicklung der Expositionsverhältnisse aufzuzeigen und ggf. Empfehlungen für die Standardisierung der Expositionsbeurteilung in Zusammenhang mit Magnetfeldern der Elektromobilität geben zu können.

Methodik

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgt in mehreren Arbeitspaketen, die im Folgenden beschrieben werden.

Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik

Zusätzlich zur Recherche bezüglich publizierter Expositionsdaten in Zusammenhang mit elektrischen Antriebssystemen und Ladeinfrastruktur wird der aktuelle Stand einschlägiger Messvorschriften und Normen, sowie hinsichtlich Verfügbarkeit und Eignung entsprechender Magnetfeld-Messtechnik recherchiert. Des Weiteren wird eine Marktübersicht über in Deutschland angebotene Elektro-Kraftfahrzeuge für den Individualverkehr einschließlich aktueller Zulassungszahlen und Abschätzung der Verbreitung der Fahrzeugmodelle in Deutschland (mit Baujahr 2016 und jünger, separat für

zweispurige batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEV) und PlugIn Hybrid-Elektrofahrzeuge (PHEV) sowie für einspurige Elektrofahrzeuge) erstellt. Schließlich werden technische Spezifikationen der unterschiedlichen in Deutschland betriebenen Ladepunkte (sowohl kabelgebunden als auch induktiv) erhoben und zusammengefasst.

Testen und Verfeinern der Messkonzepte

Die bereits im Rahmen der Angebotslegung vorgeschlagenen Messkonzepte werden an einem Elektro-Kraftfahrzeug aus dem ADAC-Fuhrpark und jeweils einer konduktiven Wechselstrom- (AC) und einer Gleichstromladevorrichtung (DC) des ADAC praktisch erprobt. Zusätzlich werden auch mögliche Störbeeinflussungen der Messungen an Fahrzeugen durch Rollenprüfstände bewertet (z. B. verursacht durch Rollenantrieb und/oder durch Wirbelstrombremsung der Rollen). Im Rahmen von Testfahrten erfolgen Optimierungsarbeiten für die Positionierung bzw. Befestigung der Messsonden (unter Berücksichtigung der diesbezüglichen Besonderheiten bei einspurigen Fahrzeugen), sowie die Identifikation und Quantifizierung von Artefakten infolge von unvermeidlichen mechanischen Erschütterungen der Messsonden, da speziell in Magnetfeldern mit starken Feldgradienten geringfügige Bewegungen der Messsonden (z. B. Vibrationen) zu Störsignalen führen können, die dem eigentlichen Immissionssignal überlagert sind (z. B. Störanteil entsprechend mechanischer Vibrationsfrequenz). Darüber hinaus wird die für die Messfahrten vorgesehene Teststrecke (ADAC Testgelände) hinsichtlich potenzieller magnetischer Störquellen begutachtet/analysiert, die während der Testfahrten zu Störfeldern führen könnten. Schließlich werden auf Basis von Testmessungen auf dem Rollenprüfstand und im Zuge von Testfahrten Vorschläge für die zu untersuchenden Betriebszustände der Fahrzeuge (Fahrmanöver) erarbeitet. Ähnliches gilt auch für die Immissionsmessungen an Ladesystemen. D. h. es werden im Zuge von Testmessungen an unterschiedlichen Ladepunkten Erfahrungen im Hinblick auf die zu untersuchenden Messpositionen und der zu untersuchenden Fahrzeugbatteriezustände gesammelt und daraus Vorschläge für die im weiteren Projektverlauf durchzuführenden Messungen abgeleitet.

Ermittlung der Exposition durch elektrisches Fahren

An einer repräsentativen Auswahl von zehn zweispurigen und vier einspurigen Fahrzeugen mit Elektroantrieb werden Messungen der magnetischen Flussdichte in unterschiedlichen Betriebszuständen (gleichmäßiges Fahren bei unterschiedlichen Lastmomenten inkl. Volllast, Beschleunigen und Bremsen) durchgeführt. Ziel dieser Messungen ist die Erfassung der räumlichen Magnetfeldverteilung in Raumbereichen, in denen sich Personen während des Fahrens aufhalten können und der daraus resultierenden typischen maximalen und durchschnittlichen Magnetfeldexpositionen der im bzw. auf dem Fahrzeug befindlichen Personen während des Fahrens. Magnetfeldimmissionen, verursacht durch die Komponenten des Antriebssystems (E-Motoren für Antrieb und Batterieladung¹, HV-Batterie, Umrichter, Bordladegerät, HV-Verkabelung), und Magnetfeldimmissionen, verursacht durch andere Komponenten der Fahrzeuge, werden dabei soweit wie möglich getrennt erfasst und bewertet. Messungen werden für alle Fahrzeuge sowohl auf einem Rollenprüfstand, als auch auf der Teststrecke des ADAC durchgeführt. Im Falle von zweispurigen Fahrzeugen erfolgen zusätzliche Messungen während einer Fahrt im Realverkehr. Alle Messungen erfolgen im Zeitbereich, da dies eine zuverlässige Erfassung transienter Vorgänge, wie sie

1 Beim Laden der Batterie (Rekuperationsbetrieb) arbeitet der Motor als Generator.

beispielsweise beim Beschleunigen und Bremsen erwartet werden können, erlaubt. Zur Steigerung der Effizienz der Messungen kommt ein spezielles Messsystem zum Einsatz, das simultane Messungen an bis zu zehn Positionen in bzw. an den Fahrzeugen ermöglicht.

Für jene vier gemessenen Magnetfeldverteilungen, welche die stärkste Exposition im Sinne der im Körper einer Person auftretenden dosimetrischen Größen erwarten lassen, werden zusätzlich numerische Berechnungen (Computersimulationen) der induzierten Stromdichte und der induzierten elektrischen Feldstärke im Gewebe durchgeführt, um einen Vergleich mit den zum Schutz der Gesundheit empfohlenen Begrenzungen für die intrakorporalen Feldgrößen anstellen zu können.

Schließlich erfolgen Messungen der Magnetfeldimmissionen in öffentlichen Massentransportmitteln mit Elektroantrieb (Fernbahnen, Regionalbahnen, U-Bahnen, Straßenbahnen), um die dabei gewonnenen Daten mit den Immissionen in den untersuchten ein- und zweispurigen Fahrzeugen für den Individualverkehr vergleichen zu können.

Ermittlung der Exposition durch induktives Laden

An einer repräsentativen Auswahl von unterschiedlichen Ladepunkten werden Messungen der magnetischen Flussdichte in und außerhalb von zum Laden angeschlossener Fahrzeuge (mindestens jeweils zwei unterschiedliche Fahrzeuge pro Ladepunkt) durchgeführt, wobei alle relevanten Lademodi und unterschiedliche Batterieladezustände berücksichtigt werden. Es werden mindestens zwei Passagierplätze in den Fahrzeugen und zwei Aufenthaltsbereiche außerhalb der Fahrzeuge ausgewählt, für die die Ladevorgänge detailliert für jeweils zwei unterschiedliche Batterieladeausgangszustände untersucht werden (jeweils Zeitsignalaufzeichnung mit zehn Magnetfeldmesssonden). Die Messungen erfolgen dabei im Zeitintervall von unmittelbar vor dem Anstecken bis unmittelbar nach dem Abziehen des Ladesteckers, um zuverlässig alle auftretenden transienten Vorgänge zu erfassen.

Für jene zwei gemessenen Magnetfeldverteilungen, welche die stärkste Exposition im Sinne der im Körper einer Person auftretenden dosimetrischen Größen erwarten lassen, werden zusätzlich numerische Berechnungen (Computersimulationen) der induzierten Stromdichte und der induzierten elektrischen Feldstärke im Gewebe durchgeführt, um einen Vergleich mit den zum Schutz der Gesundheit empfohlenen Begrenzungen für die intrakorporalen Feldgrößen anstellen zu können.

Ermittlung der Exposition durch induktives Laden

In diesem Arbeitspaket sind Magnetfeldmessungen an fünf serienmäßig verfügbaren induktiven Ladestationen geplant, wobei das Messprozedere grundsätzlich gleich wie im Fall der induktiven Ladepunkte sein soll. Da sich die induktive Ladetechnik deutlich weniger stark entwickelt und am Markt etabliert hat als dies zum Zeitpunkt der Projektplanung den Anschein hatte, ist zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch nicht absehbar, ob im Rahmen der Projektlaufzeit tatsächlich fünf technisch differierende induktive Ladepunkte existieren bzw. für Messungen zugänglich sein werden. Sollte dies nicht der Fall sein, wird in Abstimmung mit dem Auftraggeber eine kostenneutrale Modifikation des Arbeitsprogramms in Erwägung gezogen (z. B. Untersuchung zusätzlicher Fahrzeuge beim Fahren).

Ergebnisse

Aktueller wissenschaftlicher Kenntnisstand

Die Recherche zur Aufarbeitung des relevanten wissenschaftlichen Kenntnisstandes wurde abgeschlossen und in einem fachlichen Zwischenbericht zusammengefasst.

Die Markt- und Technologierecherche bezüglich der in Deutschland zugelassenen BEV und PHEV Fahrzeuge ergab ein breites Spektrum unterschiedlicher Fahrzeugklassen und Antriebsleistungen. Daraus wurden die folgenden Fahrzeuge für die messtechnischen Untersuchungen ausgewählt, wobei als Auswahlkriterium nicht nur der Marktanteil ausschlaggebend war, sondern auch die Absicht einen repräsentativen Querschnitt von Fahrzeugtechnologie und Antriebsleistung zu betrachten.

Zweispurige Fahrzeuge: Acht BEV mit Antriebsleistungen zwischen 100 und 377 kW, davon fünf mit Schrägheck, zwei SUV und ein Coupe, Baujahre von 2019 – 2021). Zwei PHEV (ein Kombi und ein SUV) mit elektrischen Antriebsleistungen von 85 und 100 kW, beide Baujahr 2021.

Einspurige Fahrzeuge: Vier Fahrzeuge mit Antriebsleistungen zwischen 3 und 40 kW, davon zwei Roller, ein Kleinkrafttrad und ein Motorrad.

Auf Grundlage der Markt- und Technologierecherche bezüglich induktiver Ladepunkte wurden folgende Technologien für die Messungen ausgewählt (fünf unterschiedliche Ladepunkte, drei unterschiedliche Lademodi):

Lademodus 2 (einphasiges Laden): ein Ladepunkt mit zwei Fahrzeugen

Lademodus 3 (AC-Laden): zwei Ladepunkte (1 x 22 kW max. und 1 x 11 kW max.) mit jeweils sechs Fahrzeugen

Lademodus 4 (DC-Laden): zwei Ladepunkte (1 x 300 kW max. und 1 x 350 kW max.) mit jeweils zwei Fahrzeugen

Bezüglich der aus der Literatur erhobenen Expositionsdaten in Zusammenhang mit Fahrzeugen mit Elektroantrieb sind die in den einzelnen recherchierten Arbeiten berichteten Messergebnisse sehr heterogen und nur sehr eingeschränkt vergleichbar, da für die jeweilige Erfassung der relevanten Daten nicht nur unterschiedliche Messgeräte mit unterschiedlichen Messfrequenzbereichen bzw. Messbandbreiten und Messzeitintervallen verwendet wurden, sondern die Ergebnisse auch in unterschiedlicher Form (Spitzenwerte, RMS-Werte, Expositionsindizes, räumliche Maximalwerte, räumliche Mittelwerte, etc.) berichtet werden. Zudem variieren auch die betrachteten Fahrzeugzustände und die untersuchten Messpositionen deutlich, und in einigen Fällen ist die Art der Messwertdarstellung (z. B. ob RMS oder Spitzenwert, etc.) nicht eindeutig kommuniziert. Die wesentliche und aus allen verwertbaren Arbeiten übereinstimmend ableitbare Erkenntnis ist, dass die höchsten magnetischen Flussdichten im Bereich der Füße (Fahrersitz, Rücksitze), d. h. in der Nähe des Antriebsstranges (Verkabelung zwischen Batterie und Motor) und der Batterie auftraten und zwar während Beschleunigungs- und/oder Rekuperationsphasen. Die zeitlichen Spitzenwerte dieser lokal begrenzt auftretenden Maxima lagen bei bis zu einigen zehn Prozent der ICNIRP 1998-Referenzwerte und es wurden in der gesichteten Literatur bisher keine Überschreitungen dieser Referenzwerte zufolge der elektrischen Antriebskomponenten berichtet.

Verfeinerte und optimierte Messkonzepte

Auf Grundlage von Testmessungen im ADAC Technikzentrum konnte das Messprozedere optimiert und eine sinnvolle Festlegung bezüglich der zu untersuchenden Fahrzeugzustände am Rollenprüfstand und auf der ADAC-Teststrecke getroffen werden. Ebenso wurde für die Fahrten im Realverkehr mit den zweispurigen Fahrzeugen eine standardisierte Route festgelegt, die mit allen betrachteten Fahrzeugen gefahren werden kann. Ebenso konnte für die Messungen beim induktiven Laden eine effiziente Strategie für aussagekräftige Messungen ermittelt werden.

Messungen beim Fahren und beim induktiven Laden

Bis zum Ende des Berichtszeitraumes wurden die Messungen in bzw. an zehn zweispurigen (acht BEV und zwei PHEV) sowie vier einspurigen BEV abgeschlossen. Ebenso konnten die Messungen an den

zehn induktiven Ladepunkten abgeschlossen werden. Die Auswertung der umfangreichen Messdatensätze wurde gestartet, konnte aber noch nicht abgeschlossen werden.

Geplante Weiterarbeit

Im nächsten Schritt soll die Auswertung der Messungen beim Fahren und induktiven Laden abgeschlossen werden. Basierend auf den Resultaten werden die Szenarien festgelegt, die für weiterführende dosimetrische Bestimmungen der intrakorporalen Feldgrößen mittels numerischer Simulationsverfahren betrachtet werden.

Diese Szenarien werden in einem geeigneten Softwaretool modelliert, berechnet und entsprechend ausgewertet.

Bezüglich der Expositionen beim induktiven Laden wird neuerlich der aktuelle Stand hinsichtlich der Verbreitung und Verfügbarkeit entsprechender Ladevorrichtungen ermittelt und in weiterer Folge entschieden, in welchem Umfang Messungen und darauf aufbauende numerische Analysen durchgeführt werden können.

Wirkungen auf Zellen der Körperoberfläche bei Exposition mit Zenti- und Millimeterwellen (5G Frequenzen)

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3619S82470	01.11.2019	30.09.2022	1.167.818,43 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Constructor University Bremen gGmbH (ehemals Jacobs University Bremen gGmbH)			
Projektleitung Prof. Dr. A. Lerchl	Fachbegleitung BfS Dr. Janine Schmidt	verantwortlich für den Text Prof. Dr. A. Lerchl Dr. Janine Schmidt	

Hintergrund

Aufgrund der ständig steigenden Zahl drahtlos übertragener Daten ist die Entwicklung neuer Übertragungsstandards und die Nutzung höherer Frequenzbänder erforderlich. Die 5. Mobilfunkgeneration (5G) nutzt aktuell Frequenzen, die bereits bei bisherigen Mobilfunkgenerationen zum Einsatz kamen, perspektivisch werden aber auch Frequenzen im 5G New Radio (NR) Frequency range 2 (FR2) Band (24,3-27,5 GHz und 39,5-43,3 GHz) genutzt werden. Elektromagnetische Felder in diesen Frequenzbereichen werden auch als Zenti- oder Millimeterwellen bezeichnet. Die schnell wachsende Nutzung der drahtlosen Kommunikationstechnologien und die Nutzung höherer Frequenzen hat in der Öffentlichkeit Besorgnis über mögliche gesundheitliche Auswirkungen der elektromagnetischen Felder ausgelöst.

Zielsetzung

Menschliche Hautzellen (die Keratinozyten-Zelllinie HaCaT sowie humane dermale Fibroblasten (HDF)) sollten für 2 oder 48 Stunden bei Leistungsflussdichten von 0 (Scheinexposition), 1 oder 10 mW/cm² exponiert und die Auswirkungen auf die Genexpression (die Umsetzung der im Erbgut verschlüsselten Information in eine nutzbare Form) und die DNA-Methylierung (chemische Modifizierung am Erbgut) untersucht werden. Die Wahl der Frequenzen für die Versuche wurde mit 27 GHz und 40,5 GHz an die für 5G geplanten zukünftig genutzten Frequenzen angelehnt. Elektromagnetische Felder in diesen Frequenzbereichen weisen eine sehr geringe Eindringtiefe in biologisches Gewebe auf. Die Energie der Felder wird also sehr nahe an der Körperoberfläche absorbiert. Aus diesem Grund lag das Hauptaugenmerk der Studie auf menschlichen Hautzellen.

Methodik

Vorarbeiten

Nach umfangreicher Aufarbeitung des Stands der Wissenschaft und Technik im Rahmen einer Sichtung, Einordnung und Bewertung der relevanten wissenschaftlichen Literatur (Arbeitspaket 1) wurde der Bau der Expositionsanlage nach Vorgaben des Auftragnehmers beauftragt. Während dieser Zeit erfolgten Vorversuche mit den Zellen, um im eigentlichen Versuchsablauf die besten Voraussetzungen zu schaffen, um einerseits möglichst homogene Zellen und andererseits möglichst hohe Ausbeuten an DNA bzw. RNA zu erhalten, welche für die nachfolgenden Untersuchungen (Arbeitspaket 2) benötigt wurden.

Versuchsdurchführung

Nach der Konzeption und der durchgeführten Dosimetrie erfolgte der Aufbau und das Testen der Expositionsanlage in Bremen.

Für die Untersuchung von Genexpressionsveränderungen wurde eine hocheinsensitive RNASeq-Analyse durchgeführt. Die Vorteile dieser Methode sind unter anderem, dass keine zu untersuchenden Transkripte vorgegeben werden, sondern das gesamte Transkriptom sequenziert wird. Die Analyse wurde in einem externen Labor (IMGM Laboratories) durchgeführt. Die Ergebnisse der Analyse wurden anschließend mit quantitativer Real-Time RT-PCR (qPCR) in den Laboren des Forschungsnehmers validiert.

Für die DNA-Methylierungsanalyse wurde aus den exponierten Zellen und den entsprechenden nichtexponierten Kontrollen genomische DNA isoliert. Die nachfolgende Analyse des Methylierungsstatus erfolgte ebenfalls durch IMGM Laboratories.

Die Analyse der Rohdaten aus der RNASeq-Analyse und der Methylierungsanalyse wird vom Forschungsnehmer selbst durchgeführt. Dabei werden kombinatorische Analysen sowie Netzwerkanalysen vorgenommen. Die Netzwerkanalyse diente der Frage, ob die zwischen exponierten und scheinexponierten Zellen gefundenen differentiell (=unterschiedlich) exprimierten Gene und methylierten Regionen innerhalb von biologischen Netzwerken über ihre Metaboliten oder über Interaktionen miteinander verbunden sind. Die kombinatorische Analyse wird zeigen, ob die Anzahl differentiell exprimierter Gene und methylierter Regionen zwischen exponierten und scheinexponierten Zellen rein zufällig ist oder nicht.

Ergebnisse

Die Unterschiede in der Genexpression und DNA-Methylierung zwischen exponierten und scheinexponierten Hautzellen sind extrem gering. Eine kombinatorische Analyse wird angewendet, bei der alle möglichen Kombinationen der Probenzuordnung auf signifikante Unterschiede getestet werden. Dabei konnte bislang festgestellt werden, dass sich die Anzahl an differentiell exprimierten Genen und differentiell methylierten Regionen der tatsächlichen Probenzuordnung in exponiert und scheinexponiert nicht von den zufällig gefundenen Zahlen abhebt. Die Netzwerkanalyse der wenigen signifikanten Treffer liefert bislang ebenfalls keine Hinweise auf einen Zusammenhang der betroffenen Gene, was den Verdacht erhärtet, dass es sich bei diesen Treffern um stochastische Zufallsfunde handelt. Diese Daten deuten bislang darauf hin, dass elektromagnetische 5G-Felder die Genexpressionsmuster und Methylierungsprofile in keiner erkennbaren Weise verändern. Unsere Ergebnisse liefern zurzeit keine Hinweise oder gar Beweise für expositionsbedingte Schäden an menschlichen Hautzellen. Das experimentelle Design hat sich bewährt und ist veröffentlicht.

Geplante Weiterarbeit

Die Auswertungen der bisherigen Ergebnisse werden mittels bioinformatischer Verfahren fortgesetzt und abgeschlossen. Ein Manuskript zur Veröffentlichung der Daten ist in Arbeit.

Untersuchung zum Auftreten von Leukämie bei prädisponierten, Magnetfeld-exponierten Tiermodellen

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3620S92410	01.08.2020	30.07.2023	1.398.533,87 EUR

Forschungs- / Auftragnehmer

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung e.V.
Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin (ITEM)

Projektleitung

Dr. Annette Bitsch

Fachbegleitung BfS

Dr. Janine Schmidt

verantwortlich für den Text

Dr. Annette Bitsch
Dmitrij Sachno

Hintergrund

Bisherige epidemiologische Untersuchungen zeigten einen statistischen Zusammenhang zwischen der Exposition mit extrem niederfrequenten Magnetfeldern (extremely low frequency magnetic fields, ELF-MF) und der Entstehung von Leukämien im Kindesalter auf. Daher wurden ELF-MF, wie sie bei der Erzeugung, Übertragung, Verteilung und Verwendung von elektrischer Energie (Strom) entstehen, von der Internationalen Agentur für Krebsforschung (IARC) als »möglicherweise krebserregend für den Menschen« eingestuft. Der Zusammenhang zwischen einer länger andauernden MF-Exposition $>0,3 \mu\text{T}$ und einer leicht, aber signifikant erhöhten Inzidenz an Kinderleukämie, insbesondere der akuten lymphatischen Leukämie, stützt sich auf übereinstimmende Ergebnisse aus mehr als 20 epidemiologischen Studien. Daten aus Tier- und Zellversuchen zum (ko-)karzinogenen Potential von ELF-MF im Mikrotresla-Bereich sind hingegen widersprüchlich bzw. unvollständig und bestätigen diese epidemiologischen Beobachtungen nicht.

Das EU-Projekt ARIMMORA (Advanced Research on Interaction Mechanisms of electroMagnetic exposures with Organisms for Risk Assessment), an dem auch das Fraunhofer ITEM beteiligt war, hatte zum Ziel einen möglichen kausalen Zusammenhang zwischen Leukämie im Kindesalter und der ELF-MF Exposition zu klären. Es wurden umfangreiche experimentelle Arbeiten durchgeführt, um Mechanismen auf zellulärer und subzellulärer Ebene aufzudecken. Die Befunde in den Sca1-ETV6-RUNX1 Mäusen stammen von Tieren eines Pilotversuchs zur möglichen ko-karzinogenen Wirkung von ELF-MF im ARIMMORA-Projekt. In einem Pilotversuch wurden Sca1-ETV6-RUNX1 Mäuse *in utero* und nach Geburt bis 90 Tage post partum (p.p.), 7 Tage pro Woche und 20 Stunden pro Tag diskontinuierlich (10 min/5' min An/Aus-Zyklen) gegenüber 50 Hz ELF-MF bei einer magnetischen Flussdichte von 1,5 mT exponiert und anschließend bis zum Alter von 2 Jahren nachbeobachtet. Von 30 Tieren entwickelte eine Sca1-ETV6-RUNX1 Maus mit 14 Monaten eine pB-ALL (precursor-B acute lymphoblastic leukemia), aber keine der insgesamt 65 nicht-exponierten Mäuse. Aufgrund der kleinen Gruppengröße war das Ergebnis nicht signifikant, spiegelte aber die Leukämie-Inzidenz bei Kindern gut wieder. Die Ergebnisse aus dem ARIMMORA-Projekt sollen anhand der vorliegenden Studie überprüft werden.

Zielsetzung

Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik

In einem ersten Arbeitsschritt sollen alle bekannten Informationen zur Leukämieentwicklung nach der Exposition gegenüber ELF-MF in einer Sachstandserfassung zusammengestellt werden. Dazu gehört eine kurze Literaturrecherche mit Aufarbeitung und Auswertung der relevanten Veröffentlichungen, die in den einschlägigen Datenbanken recherchiert werden. Des Weiteren wird

auf bereits durchgeführte Arbeiten des Forschungsnehmenden eingegangen werden. Zusätzlich sollen Untersuchungen und Ergebnisse laufender sowie abgeschlossener Studien, z. B. BfS Forschungsvorhaben, aufgearbeitet und im aktuellen Kontext detailliert betrachtet werden. Berichte und Bewertungen einschlägiger nationaler und internationaler Fachgremien sollen dabei in die aktuelle Auswertung einbezogen werden.

Konzeption und Aufbau der Expositionsanlagen

Für die EMF-Exposition der Mäuse sollen Expositionsanlagen konstruiert werden, die jeweils eine dauerhafte 50 Hz ELF-MF Exposition einer Gruppe von 204 frei beweglichen Mäusen gewährleisten.

Expositionsszenario und Verlaufskontrolle

204 Sca1-ETV6-RUNX1 Mäuse je Gruppe sollen, beginnend in utero, gegenüber ELF-MF einer Frequenz von 50 Hz und einer magnetischen Flussdichte von 1,5 mT, bzw. 0 mT bis zu einem Alter von 3 Monaten exponiert werden. Im Anschluss an die Exposition sollen alle Tiere bis zu einem Alter von 24 Monaten, mit Hinblick auf eine Leukämieentwicklung, diagnostisch begleitet werden. Im Alter von 24 Monaten sollen zusätzlich detaillierte Untersuchungen zu einer möglichen karzinogenen Wirkung von ELF-MF in relevanten hämatopoetischen Organen durchgeführt werden.

Methodik

Versuchsdesign

Zwei Gruppen von je 204 Mäusen werden in zwei äußerlich nicht unterscheidbaren Anlagen gegenüber 50 Hz ELF-MF mit einer magnetischen Flussdichte von jeweils 0 mT (Scheinexposition) und 1,5 mT beginnend in utero bis zu einem Alter von 3 Monaten exponiert. Die Exposition ist mit 20 Stunden pro Tag und einer Pause von 4 Stunden, an 7 Tagen pro Woche vorgesehen. Im Anschluss an die Exposition werden die Mäuse bis zu einem Alter von 2 Jahren auf eine Leukämieentwicklung hin beobachtet. Hierzu verbleiben die Mäuse in demselben Tier-Raum in spezifisch pathogenfreier Umgebung (SPF-Haltung). Die Verblindung der Expositionsgruppen wird weiter aufrechterhalten.

Verlaufskontrolle

Zur Kontrolle einer möglichen Leukämie-Entwicklung wird den Versuchstieren an neun vordefinierten Zeitpunkten Blut abgenommen (3, 6, 12, 15, 18, 20, 22, 23, 24 Monate p.p.). Zu jedem der genannten Zeitpunkte wird je Tier eine Immunphänotypisierung mittels Durchflusszytometrie durchgeführt. Parallel wird der Gesundheitszustand der Tiere regelmäßig überwacht - einmal pro Woche wird das Körpergewicht gemessen und klinische Symptome erfasst.

Finale Untersuchungen

Das finale Untersuchungsspektrum der Tiere umfasst Tests zum Immunstatus und zur Funktionalität der in der Kanzerogenese relevanten Immunzellen wie auch eine begleitende (Histo-)Pathologie. Im Fokus stehen hier die histologischen Untersuchungen präneoplastischer und neoplastischer Veränderungen im hämatopoetischen System zur Erfassung einer möglichen kanzerogenen Wirkung.

Ergebnisse

Die geplante Expositionsphase der regulären Studie ist abgeschlossen. Die exponierten Tiere wurden in konventionelle SPF-Haltung überführt und werden auf die Entwicklung einer Leukämie beobachtet.

Aufgrund unvorhergesehener technischer Störungen an der Expositionsanlage zu Beginn der Expositionsphase wurde, nach detaillierter Auswertung der Expositionsdaten und umfassender

Diskussion mit dem Projektteam, die Entscheidung getroffen einen Teil der in-life Phase zu wiederholen – betroffen sind ca. 50% der exponierten Tiere. Die Änderungsanzeige für die Teilwiederholung wurde bei der entsprechenden Behörde eingereicht und von dieser genehmigt. Die detaillierte Versuchsplanung für die Teilwiederholung ist erfolgt.

Geplante Weiterarbeit

- Verpaarung zusätzlicher transgener F1 Weibchen für die Teilwiederholung der Studie
- Exposition trächtiger F1 Muttertiere
- Erstellung Zwischenbericht zu Arbeitspaket 2
- Fortführung der Verlaufskontrolle

Smart cities: Abschätzung der Gesamtexposition des Menschen durch zusätzliche 5G Mobilfunktechnologien anhand modellierter Zukunftsszenarien

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3620KEMF201	01.04.2021	31.12.2024	448.125,00 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Seibersdorf Labor GmbH			
Projektleitung Gernot Schmid	Fachbegleitung BfS Dr. Jens Kuhne	verantwortlich für den Text Gernot Schmid	

Hintergrund

Die Exposition der Bevölkerung mit den elektromagnetischen Feldern des Mobilfunks unterliegt durch den technologischen Fortschritt einem ständigen Wandel. Die bisherigen Mobilfunknetze und drahtlosen Netzzugangstechnologien werden in Zukunft durch Technologien der fünften Mobilfunkgeneration ergänzt werden. Mit Einführung der fünften Mobilfunkgeneration werden langfristig zahlreiche technische Neuerungen im Bereich der Sende- und Empfangstechnik, sowie neue Anwendungsfelder und damit veränderte Expositionsszenarien erwartet. Es ist davon auszugehen, dass sich zukünftig in den Städten und Gebäuden eine deutlich erhöhte Anzahl von Sendeanlagen mit kleinen Sendeleistungen vergleichsweise nah an der exponierten Allgemeinbevölkerung befinden wird (Smart Cells, IoT, SmartMeters etc.). Zusätzlich wird die dynamische Veränderung der Antennendiagramme („Beam-Forming“), mit der die Sendeleistung in Richtung der Nutzer konzentriert werden kann, eine tragende Rolle spielen. Dies stellt im Vergleich zu konventionellen Basisstationen mit unveränderlichem Antennendiagramm besondere Herausforderungen an die Immissionsbestimmung.

Zielsetzung

In diesem Vorhaben sollen mithilfe eines interdisziplinären Ansatzes aus Zukunftsforschung und Computermodellierung repräsentative Szenarien entwickelt werden, die Eigenschaften der gegenwärtigen Mobilfunknetze (einschließlich drahtloser Netz-Zugangstechnologien, Infrastruktur und Endgeräte), sowie absehbare Eigenschaften der zukünftigen Entwicklung widerspiegeln. Mithilfe geeigneter Berechnungsverfahren werden für unterschiedliche Expositionssituationen dieser Szenarien typische realistische Feldstärkeverteilungen ermittelt. Anhand der Ergebnisse wird die voraussichtliche Entwicklung der Exposition der Allgemeinbevölkerung mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern beschrieben.

Methodik

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgt in mehreren Arbeitspaketen, die im Folgenden beschrieben werden.

Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik

In einem ersten Schritt erfolgen ausführliche Literatur- und Technologierecherchen, sowohl hinsichtlich der expositionsrelevanten Daten und Parameter der gegenwärtigen und absehbaren Mobilfunktechnologie (Antennentechnik, Frequenzbereiche, Modulationsverfahren, Übertragungsprotokolle, Sendeleitungen, regulatorische Randbedingungen, Anwendungen, etc.), als auch bezüglich verfügbarer Softwarepakete für die Feldausbreitungsberechnungen. Insbesondere ist

ein für die Feldausbreitungssimulationen geeignetes Softwarepaket auf Grundlage objektiver Beurteilungskriterien auszuwählen.

Vorhersage und Entwicklung von Modellszenarien

Ausgehend von den Ergebnissen des im vorangegangenen Arbeitspaketes erhobenen relevanten Standes von Wissenschaft und Technik werden in diesem Arbeitspaket zunächst, unter Verwendung von Methoden der Zukunftsforschung, Vorhersagen über zukünftige Entwicklungen getroffen, wobei konkret drei unterschiedliche Entwicklungsszenarien der Mobilfunktechnik ausformuliert werden. Parallel dazu werden auf Grundlage von Kartenmaterial ein für hochauflösende Feldberechnungen geeignetes 3D-Computermodell einer Stadt mit Mobilfunkversorgung entwickelt, wobei möglichst alle die Feldausbreitung beeinflussenden Gegebenheiten (Topologie, Grünanlagen, unterschiedliche Bebauungsdichten- und Höhen, etc.) in diesem Modell abgebildet werden. Insgesamt werden 3D-Computermodelle für zehn unterschiedliche Szenarien (zwei davon Indoor) entwickelt. Für diese zehn Szenarien werden schließlich insgesamt vier Expositionsszenarien modelliert, eines, das den gegenwärtigen Mobilfunkausbau bzw. die gegenwärtige Mobilfunknutzung repräsentiert und drei weitere, entsprechend dem Ergebnis aus der oben beschriebenen Vorhersage.

Entwicklung einer Methodik zur Vorhersage von Feldverteilungsmustern und Expositionen

Aufgrund der Vielfalt der Einflussparameter und deren großer zu erwartender Schwankungsbreite in der Praxis ist es innerhalb eines zeitlich sinnvollen Rahmens nicht möglich, vollständige Feldausbreitungssimulationen für alle möglichen Kombinationen dieser Einflussparameter durchzuführen und auszuwerten. Es werden daher zunächst die (auf die Sendeleistung normierten) Immissionsbeiträge jeder einzelnen Feldquelle im jeweils betrachteten Szenario an jedem interessierenden Raumpunkt separat ermittelt („Feldausbreitungssimulation“). Danach werden, mit dem noch zu entwickelnden numerischen Werkzeug zur „Expositionssimulation“, je nach Expositionsszenario, die einzelnen Immissionsbeiträge aller relevanten Feldquellen in jedem interessierenden Raumpunkt mittels Linearkombination zur resultierenden Gesamtexposition (frequenzselektiv) berechnet. Die Gewichtungsfaktoren der Linearkombination werden auf Basis der vorhergesagten Anwendungsszenarien und entsprechenden Technologieparametern ermittelt.

Bestimmung der Feldverteilungsmuster und Expositionen mittels Computersimulationen

Mittels der im vorangegangenen Arbeitspaket entwickelten Methode werden Feldausbreitungssimulationen und Expositionssimulationen für den gegenwärtigen Stand der Mobilfunktechnik und für die drei unterschiedlichen vorhergesagten zukünftigen Entwicklungen durchgeführt. Es werden jeweils typische und maximale Expositionen im, für die Allgemeinbevölkerung zugänglichen Bereich ermittelt, und die Ergebnisse für die Szenarien entsprechend der drei unterschiedlichen vorhergesagten zukünftigen Entwicklungen untereinander, sowie mit den Ergebnissen für den gegenwärtigen Stand der Mobilfunktechnik verglichen. Die Ergebnisse werden hinsichtlich der zu erwartenden Grenzwertausschöpfung diskutiert, und die Hauptverursacher der Expositionen, sowie Möglichkeiten zur Immissionsminderung werden identifiziert.

Ergebnisse

Technologierecherche

Die durchgeführten Technologierecherchen zeigten, dass die Verfügbarkeit von 5G-Technologie in FR1 seitens der Hersteller grundsätzlich verfügbar ist, deren Verbreitung sich gegenwärtig jedoch noch auf die klassischen Anwendungen beschränkt (Mobiltelefonie, Wireless Broadband Access). Die meisten dem Begriff „Smart Cities“ zuordenbaren Anwendungen existieren derzeit noch in Form von

Pilotprojekten, die in großem Umfang staatlich gefördert wurden bzw. werden. Zudem handelt es sich dabei derzeit in den allermeisten Fällen um Anwendungen, die auch ohne 5G Technik (d. h. mit 2G und/oder 4G) auskommen.

Verwendetes Softwarepaket für die Feldausbreitungssimulationen

Im Zuge der Auswahl des für die Feldverteilungssimulationen zu verwendenden Softwarepaketes stellten sich die Pakete Wireless Insite (Remcom) und WinProp/FEKO (Altair) als grundsätzlich gut geeignet heraus, wobei im Hinblick auf den Import von digitalen Karten WinProp/FEKO deutliche Vorteile zeigt. Die Wahl fiel daher schließlich auf WinProp/FEKO. Bezüglich der betrachteten Stadt wurde Berlin ausgewählt und entsprechendes Kartenmaterial beschafft.

Vorhersage von Entwicklungen

Zur Vorhersage zukünftiger Entwicklungen von Mobilfunkanwendungen wurde eine zweistufige Delfi-Befragung (online) durchgeführt in der die Teilnehmer eine Reihe von potenziellen 5G-Anwendungen bezüglich ihrer zukünftigen Realisierungschancen bewerten mussten. Insgesamt wurden 96 Experten zur Befragung eingeladen, die erste Fragerunde wurde von 24 Experten, die zweite Fragerunde von 20 Experten abgeschlossen.

Die Auswertung attestierte den folgenden zehn Anwendungen die größten Realisierungschancen (in absteigender Reihenfolge):

- Funk-basiertes Smart Metering
- Funk-basierte Sensornetzwerke (Verkehrsaufkommen, Temperatur, ...)
- Car2Car-Kommunikation
- Mobiles Daten- bzw. Videostreaming
- AR/VR für verbesserte Informationsaufarbeitung für Touristen oder Messebesucher
- Intelligente Beleuchtung (feingliedrig lokal begrenzte Beleuchtungsszenarien)
- Mobile telemedizinische Verfahren und Diagnostik
- Verkehrsregelung in Echtzeit
- Intelligente Verkehrssysteme (besonders in Schulinähe zu Stoßzeiten)
- Intelligente Parkraumbewirtschaftung (besonders auch für Großveranstaltungen)

Geplante Weiterarbeit

Im nächsten Schritt sind in Berlin Stadtbereiche auszuwählen, in denen die oben angeführten Anwendungen realistischer Weise umgesetzt werden können. Für diese Stadtbereiche ist die gegenwärtige Mobilfunk-Infrastruktur zu erheben und die relevanten Parameter (Antennenstandorte und -kenngrößen, Sendeleistungen, Frequenzen, abgestrahlte Funkdienste, etc.) in die entsprechenden 3D-Modellszenarien einzupflegen. Darauf aufbauend sind entsprechende Mobilfunkparameter für die betrachteten Zukunftsszenarien zu ermitteln und die Modellszenarien entsprechend zu erweitern. Schließlich werden die entsprechenden Feldausbreitungssimulationen und daran anschließend die Expositionssimulationen durchgeführt, sowie alle Projektergebnisse zusammengefasst, hinsichtlich ihrer Aussagekraft und möglicher Einschränkungen ihrer Gültigkeit kritisch diskutiert, und daraus strahlenschutztechnisch relevante offene Fragen, sowie weiterer Forschungsbedarf identifiziert.

Einfluss der zwischenfrequenten Magnetfelder der induktiven Leistungsübertragung beim Aufladen von Elektrofahrzeugen auf das Verhalten von Labornagern

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3620EMF401	01.04.2021	30.03.2023	1.396.778,00 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer			
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.			
Projektleitung	Fachbegleitung BfS	verantwortlich für den Text	
Dr. G. Bruer	Dr. B Pophof	Dr. G. Bruer D. Sachno	

Hintergrund

Aufgrund der rasch fortschreitenden technologischen Entwicklung, von der drahtlosen Telekommunikation bis hin zum Ausbau des Stromnetzes und einer Vielzahl industrieller Anwendungen, nimmt die Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (EMF) aller Frequenzbereiche stetig zu. Während es eine umfangreiche Sammlung an publizierter Literatur zu biologischen Auswirkungen der Exposition gegenüber extrem niederfrequenten Magnetfeldern (ELF-MF) und hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (RF-EMF) gibt, ist die Anzahl der Studien zu potenziellen Gesundheitsrisiken von Magnetfeldern im Mittelfrequenzbereich (IF-MF) (300 Hz bis 10 MHz) bislang noch sehr begrenzt. Im Gegensatz zur Leistung von Ladestationen für Mobiltelefone, die nur wenige Watt beträgt, bewegt sich die Leistung, die zum drahtlosen Laden von Elektroautos benötigt wird, im zweistelligen Kilowattbereich. Die Frequenz liegt hier in der Regel im Bereich von 20-150 kHz. Selbst wenn die Geometrie der Spulen und die Positionierung des Fahrzeugs, z. B. des Pkw, optimal sind, lassen sich hier magnetische Streufelder nicht vermeiden. Aufgrund der vergleichsweise hohen Leistungsübertragung liegen diese Streufelder sehr dicht an den gesetzlich festgelegten Expositionsgrenzwerten. Es ist deshalb davon auszugehen, dass Personen, die direkt am Aufladen von Fahrzeugen beteiligt sind, verstärkt gegenüber 20 kHz, 85 kHz und 140 kHz IF-EMF von bis zu 6,25 μ T ausgesetzt werden.

Zielsetzung

Da einige Studien Hinweise darauf liefern, dass eine Exposition gegenüber IF-EMF während sensibler Lebensabschnitte eines Organismus, insbesondere während der Entwicklung, negative Auswirkungen auf das sich entwickelnde Gehirn haben könnte und somit zu einer Beeinträchtigung von Lern-, Gedächtnis- und Verhaltensmustern führen kann, soll in dieser Studie einerseits das Verhaltens- und Lernmuster und andererseits eine mögliche (histo)pathologische Organveränderung mit Hinweisen auf eine Tumorentstehung untersucht werden.

Methodik

Literaturzusammenfassung

In einem ersten Arbeitsschritt sollen alle wissenschaftlichen Veröffentlichungen zur Exposition gegenüber magnetischen Feldern im Zwischenfrequenzbereich betrachtet und zusammengefasst werden. Im Einzelnen soll dabei auf bereits durchgeführte Arbeiten des Fraunhofer ITEM, Fraunhofer IZI sowie der Seibersdorf Labor GmbH eingegangen werden, wobei die Methodik, Vorgehensweise, Daten und Ergebnisse dieser Arbeiten detailliert betrachtet werden sollen. Zusätzlich sollen Untersuchungen und Ergebnisse laufender sowie abgeschlossener Studien anderer Stellen, die nach dem Abschluss der 2018 abgeschlossenen Literaturstudie [FKZ: 3616S82437] veröffentlicht wurden

und dort nicht mehr eingeflossen sind, aufgearbeitet und im aktuellen Kontext detailliert betrachtet werden.

In-life Phase und finale Untersuchungen

Zur Prüfung eines möglichen neurotoxischen Effektes (Verhalten, Histopathologie) einer IF-MF Exposition in Mäusen, sollen jeweils 80 Tiere pro Expositionsgruppe dauerhaft gegenüber IF-MF mit Frequenzen von 85 kHz, 140 kHz und entsprechender Scheinexposition exponiert werden. Für die Untersuchung möglicher schädlicher Effekte sind drei etablierte Verhaltenstests zur Beweglichkeit (Rota-Rod), Gedächtnis (8-Arm-Maze) und Orientierung (Open-Field-Test), nach einer Expositionsdauer von 200 Tagen, durchzuführen. Im Anschluss an die erfolgreiche Untersuchung sollen die Tiere für weitere 100 Tage exponiert und auf pathologische Veränderungen oder Tumore untersucht werden.

Durchführung

Literaturstudie

Publizierte Artikel zu verhaltensbezogenen, (neuro)toxischen oder krebserregenden Wirkungen von IF-EMF werden durch eine Suche in der thematisch spezialisierten Literaturlatenbank EMF-Portal identifiziert und mit einer Suche in PubMed und Scopus abgeglichen. Alle identifizierten Artikel werden durch ein sorgfältiges Screening-Verfahren auf ihre Relevanz geprüft, bei vorliegender Eignung in die Literaturzusammenfassung eingeschlossen und entsprechend der Fragestellung ausgewertet.

Konzeption und Aufbau der Expositionsanlagen

Für die EMF-Exposition der Mäuse werden Expositionsanlagen konstruiert, die eine dauerhafte, verblindete Exposition von jeweils 80 frei beweglichen Mäusen bei Frequenzen von 85 kHz und 140 kHz und entsprechender Scheinexposition ermöglichen. Dabei wird auf eine homogene Exposition innerhalb des Expositionsvolumens geachtet.

Studiendesign

An erster Stelle steht die Auswahl eines geeigneten Tiermodells; hier kommen z. B. die C57BL/6J-Mäuse infrage, welche als allgemeines Mehrzweckmodell, unter anderem für Sicherheits- und Wirksamkeitstests in der chemischen und pharmazeutischen Entwicklung eingesetzt werden. Jeweils 80 C57BL/6J-Mäuse pro Gruppe (insgesamt 320 Tiere) werden gegenüber den beiden o.g. Frequenzen bzw. entsprechender Scheinexposition exponiert. Beginnend mit einem Alter von 3 Monaten erfolgt die kontinuierliche, vollständig verblindete, Ganzkörperexposition der Tiere über einen Zeitraum von 300 Tagen, wobei ab Tag 200 die Durchführung der Verhaltenstests stattfindet. Die Exposition wird bis Tag 300 weitergeführt, woraufhin eine histopathologische Untersuchung aller Versuchstiere erfolgt.

Verhaltenstests

Es werden die nachfolgenden drei Verhaltenstests zur Beweglichkeit, Gedächtnis und Orientierung durchgeführt:

1. Rota-Rod
2. 8-Arm-Maze
3. Open-Field

Alle Verhaltenstests sind in der Abteilung Molekulare Wirkstoffbiochemie und Therapieentwicklung des Fraunhofer IZI (Fraunhofer-IZI-MWT) in der täglichen Laborroutine etabliert (inklusive

detaillierter SOPs, GLP- Zertifikat etc.) und werden nach 200 Tagen Exposition durchgeführt. Die Zahl der getesteten Tiere wurde so gewählt, dass in der Statistik eine Power von 80% nicht unterschritten wird. Es ist geplant jedes Tier nur in einem Verhaltenstest zu untersuchen. Die 80 Tiere je Gruppe werden daher entsprechend der mit dem Programm G*Power 3.1.9.4 durchgeführten Power-Analyse in Untergruppen á 22 Tiere aufgeteilt.

Gewebeproben und histologische Untersuchungen

Nach einer Gesamtexpositionsdauer von 300 Tagen werden alle Tiere des Experiments histopathologisch betrachtet. Dazu werden alle relevanten Organe in Anlehnung an die internationale OECD-Richtlinie (OECD guideline 451 - CARCINOGENICITY STUDIES) aufgearbeitet und histologisch auf Anzeichen von Läsionen, pathologischen Veränderungen oder Tumoren untersucht. Werden in den Verhaltenstest Auffälligkeiten in einer Gruppe festgestellt, werden diese Ergebnisse bei der histologischen Aufarbeitung des Gehirns insofern berücksichtigt, dass die zu dieser Veränderung korrespondierenden Gehirnareale zusätzlich zu den standardmäßig zu untersuchenden Gehirnabschnitten untersucht werden.

Ergebnisse

Im Verlauf der Literatursuche wurden 1533 potentiell relevante Artikel identifiziert, von denen 19 in die Literaturzusammenfassung eingeschlossen wurden. Eine Auswertung der eingeschlossenen Literatur wurde in Form eines ersten Arbeitspaket-Berichtes eingereicht. Das Ergebnis der Literaturstudie zeigte keine Hinweise auf eine mögliche karzinogene Wirkung einer IF-EMF Exposition. Trotz spärlicher Datenlage wurden allerdings EMF-induzierte Abweichungen im Verhalten von Mäusen festgesetzt, die mit Bezug auf weitere Untersuchungen erhöhte Aufmerksamkeit bedürfen.

Der Tierversuchsantrag wurde bei der entsprechenden Behörde eingereicht und genehmigt. Es erfolgten Abmessungen und entsprechende Detailplanung durch den Expositionspartner am ITEM. Teile für die Expositionsanlage wurden bestellt und die Konstruktion der Expositionsanlage wurde gestartet.

Geplante Weiterarbeit

Nach erfolgreicher Konstruktion der Expositionsanlage erfolgt die Lieferung und Installation der Vorrichtung in den Tierräumen des ITEM, inklusive mehrwöchigem Testlauf. Ein detaillierter Prüfplan für das Experiment wird erstellt und mit allen beteiligten Projektpartnern abgestimmt. Anschließend werden die Tiere bestellt und die in-life Phase der Studie initiiert.

Entwicklung und Verfeinerung dosimetrischer Modelle für die Expositionsanalyse und -bewertung

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3621SNA201	01.11.2021	31.10.2024	511.647,00 EUR

Forschungs- / Auftragnehmer
Seibersdorf Labor GmbH

Projektleitung
Gernot Schmid

Fachbegleitung BfS
Dr. Andreas Deser

verantwortlich für den Text
Gernot Schmid

Hintergrund

Die in Deutschland geltenden Grenzwerte für niederfrequente elektrische und magnetische Felder (26. BImSchV) richten sich nach international empfohlenen Referenzwerten, die sich aus Basiswerten für die in Geweben des Nervensystems induzierten Feldgrößen ableiten. Letztere sind bis heute nur mit großen Unsicherheiten bestimmt worden, welche sich unmittelbar auf die Referenzwerte übertragen. Die im Gewebe induzierten elektrischen Feldstärken und Stromdichten hängen maßgeblich von den dielektrischen Eigenschaften der Körpergewebe ab. Sowohl das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) als auch die International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) zählen die Messung der dielektrischen Eigenschaften von Gewebe und die Verfeinerung der Modellierung von darin induzierten Feldgrößen mit zu den am dringendsten zu behandelnden Forschungsthemen zu Fragestellung biologisch relevanter Auswirkungen der Exposition von Menschen gegenüber elektromagnetischen Feldern.

Zielsetzung

Ziel dieses Vorhabens ist es, ausgehend vom aktuellen Kenntnisstand, die dielektrischen Eigenschaften insbesondere von Haut-, Muskel- und Fettgewebe mit verbesserten Messmethoden zu bestimmen, da in diese Gewebe Nerven eingebettet sind. Darauf aufbauend sollen weitere dosimetrische Probleme detailliert analysiert und die Induktionsmodelle zur Ableitung der Referenzwerte verbessert bzw. verfeinert werden. Schließlich sollen mit den verbesserten Modellen und Methoden dosimetrische Berechnungen durchgeführt werden, die eine fundierte Aussage im Hinblick auf die Konservativität der Referenzwerte erlauben, insbesondere auch im Hinblick auf Expositionssituationen mit gleichzeitiger magnetischer und elektrischer Befeldung, wie sie etwa in der Umgebung von Freileitungen zur Stromversorgung auftritt.

Methodik

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgt in mehreren Arbeitspaketen, die im Folgenden beschrieben werden.

Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik

Auf Grundlage umfassender Recherchen in der wissenschaftlichen Literatur wird der aktuelle wissenschaftliche Kenntnisstand bezüglich der folgenden Themen erhoben und zusammengefasst:

- Daten zur elektrischen Leitfähigkeit, Permittivität, Massendichte, spezifischer Wärme und Wärmeleitfähigkeit von menschlichen und Säugetiergeweben
- Messmethoden zur Bestimmung der elektrischen Kenngrößen, inklusive Bewertung von deren Stärken und Schwächen und Quantifizierung der Unsicherheiten

- Aufbauprinzip digitaler anatomischer Körpermodelle und deren Eignung für dosimetrische Berechnungen
- Numerische Berechnungsmethoden für den Niederfrequenzbereich (bis 1 MHz), inklusive Bewertung von Vor- und Nachteilen, sowie Grenzen der Einsetzbarkeit
- Artefakte bei numerischen dosimetrischen Berechnungen im Niederfrequenzbereich, inklusive Methoden zur Artefakt-Unterdrückung

Konzeption und Durchführung der Bestimmung der dielektrischen Gewebeeigenschaften

Basierend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Recherchen werden zunächst optimierte Methoden zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit und der dielektrischen Permittivität von Haut-, Muskel- und Fettgewebe im Frequenzbereich bis 1 MHz entwickelt. Dabei werden zwei grundsätzlich unterschiedliche Methoden betrachtet, nämlich einerseits, basierend auf Impedanzmessungen direkt an entnommenen Gewebeproben (in vitro) des Zielgewebes, und andererseits durch Impedanzmessungen an der Körperoberfläche freiwilliger Probanden (in vivo) und nachfolgender numerischer Berechnungen mit einem auf Basis von MRT-Scans gewonnenen Teilkörpermodell der betrachteten Körperregion (inverse Feldproblemlösung).

Anschließend werden unter Einsatz dieser beiden optimierten Methoden Messungen durchgeführt, wobei die in vitro Messungen an möglichst frischen chirurgisch entfernten Amputaten von Haut-, Fett-, und Skelettmuskelgewebe, sowie an möglichst frischen Herz- und Zungenmuskelgewebeproben Frischverstorbenen erfolgen. Auf Basis der in vivo Messungen wird angestrebt, die dielektrischen Eigenschaften von zumindest Haut, Fett- und Skelettmuskel zu bestimmen.

Weiterentwicklung bestehender Körperteilbereichsmodelle

In diesem Arbeitspaket werden die in den vorangegangenen Arbeitspaketen gewonnenen Erkenntnisse genutzt, um verfügbare Körperteilbereichsmodelle zu verbessern, so dass eine Bestimmung des Zusammenhangs zwischen von außen einwirkenden Feldstärken und den in den Körpergeweben induzierten Feldgrößen mit deutlich geringerer Unsicherheit möglich wird als bisher. Insbesondere werden dabei Aspekte bezüglich Artefakte zufolge der räumlichen Diskretisierung der Körpermodelle, sowie unterschiedliche Strategien zu deren Minimierung betrachtet. Weiters werden die Auswirkungen anisotroper Gewebeeigenschaften und anatomisch/dosimetrisch „kritischer“ Strukturen (z. B. dünne Gewebeschichten mit geringer elektrischer Leitfähigkeit angrenzend an Gewebe mit hoher elektrischer Leitfähigkeit) detailliert betrachtet.

Schließlich werden mit den, auf Basis der oben angeführten Aspekte und Überlegungen, verbesserten Modellen und Methoden umfangreiche numerische Berechnungen durchgeführt, um die Konservativität der Referenzwerte zu überprüfen. Insbesondere werden dazu auch Expositionssituationen mit gleichzeitigem Einwirken von elektrischen und magnetischen Feldern betrachtet.

Ergebnisse

Die Recherche zur Aufarbeitung des relevanten wissenschaftlichen Kenntnisstandes wurde abgeschlossen und im Zwischenbericht zum ersten Arbeitspaket zusammengefasst.

Aktueller wissenschaftlicher Kenntnisstand bezüglich Gewebeeigenschaften

Die erhobenen Daten für die elektrische Leitfähigkeit und dielektrische Permittivität zeigen vor allem im Niederfrequenzbereich große Streubreiten und Unsicherheiten, was die Wichtigkeit der Durchführung des gegenständlichen Vorhabens unterstreicht.

Aktueller wissenschaftlicher Kenntnisstand bezüglich Messmethoden

Bezüglich der direkten (in vitro) Messmethoden werden in der Literatur unterschiedliche Ansätze berichtet, von denen jedoch nur die „Vier-Elektroden-Impedanzmessung“ sinnvoll, im Sinne einer Minimierung der Messunsicherheiten (insbesondere zufolge der Elektrodenpolarisation), einsetzbar erscheint. Bildgebende Verfahren zur Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften der Körpergewebe sind zwar ebenfalls in der Literatur beschrieben, erscheinen jedoch als nicht geeignet für das gegenständliche Vorhaben. Der zweite in diesem Vorhaben angewendete Ansatz (Kombination von Impedanzmessungen an der Körperoberfläche und Lösen des inversen Feldproblems mit einem 3D-Teilkörpermodell) ist hingegen neu und vielversprechend.

Aktueller wissenschaftlicher Kenntnisstand bezüglich dosimetrischer Berechnungsmethoden

Grundsätzlich stehen eine ganze Reihe von unterschiedlichen Lösungsansätzen zur numerischen Berechnung elektromagnetischer Feldprobleme zur Verfügung. Berücksichtigt man jedoch Speicherbedarf, Rechenzeiten, erzielbare Genauigkeit und die Implementierung gegenwärtig verfügbarer komplexer anatomischer Körpermodelle, so erweisen sich die Methode der finiten Differenzen des Skalarpotenzials (SPFD) und die Methode der finiten Elemente des Skalarpotenzials mit rechteckigem Gitter (SPFE) als am besten geeignet für dosimetrische Berechnungen im Niederfrequenzbereich.

Aktueller wissenschaftlicher Kenntnisstand bezüglich anatomischer Körpermodelle

Die gegenwärtig in bester Qualität und Auflösung verfügbaren anatomischen Körpermodelle von Menschen für dosimetrische Berechnungen sind jene der Virtual Population (IT'IS, Zürich, Schweiz). Sie basieren auf segmentierten Schnittbildern von Menschen, die mittels medizinischer bildgebender Verfahren gewonnen wurden. Fehler in der Segmentierung (fehlerhafte Abgrenzungen zwischen unterschiedlichen Geweben) können jedoch zu Artefakten führen. Daher erscheinen parallel zur Virtual Population auch generische auf CAD-Daten von Organen beruhende Modelle als interessant. Ein Beispiel dafür ist das Modell Alvar (Aalto Universität, Finnland), das in diesem Vorhaben, neben Modellen der Virtual Population, auch zum Einsatz kommen soll.

Aktueller wissenschaftlicher Kenntnisstand bezüglich numerischer Artefakte

Im Hinblick auf numerische Artefakte stellen Segmentierungsfehler in den Körpermodellen und sogenannte „Staircasing“-Fehler zufolge der kubischen Diskretisierung des Rechenraumes die größten Herausforderungen dar. Insbesondere zur Unterdrückung der „Staircasing“-Fehler wurden bereits unterschiedliche Lösungsansätze berichtet. Die gegenwärtige von ICNIRP empfohlene Vorgehensweise, das 99-Perzentil der induzierten elektrischen Feldstärke für den Vergleich mit dem Basiswert zu verwenden, muss als problematisch bezeichnet werden, da dies zu einer systematischen Unterschätzung der tatsächlich im Gewebe auftretenden Feldstärke führen kann.

Geplante Weiterarbeit

In den nächsten Schritten erfolgt die Optimierung der Messmethoden und daran anschließend die Messungen an den Gewebeproben und den freiwilligen Probanden (positive Ethik-Bescheide liegen bereits vor). Parallel dazu werden vorhandene Körpermodelle im Hinblick auf potenzielle Probleme

analysiert und verbessert. Schließlich werden mit den verbesserten Datensätzen der Gewebeeigenschaften und verbesserten Körpermodellen die beschriebenen Berechnungen durchgeführt.

Wahrnehmungsschwellen und Wirkmechanismen statischer und niederfrequenter elektrischer Felder bei Menschen

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3621SNA401	01.11.2021	31.01.2024	1.229.384,93 EUR

Forschungs- / Auftragnehmer

Uniklinik RWTH Aachen

Forschungszentrum für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit (femu)

Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin

Projektleitung

Dr. Michael Kursawe

Fachbegleitung BfS

Dr. Blanka Pophof

verantwortlich für den Text

Dr. Michael Kursawe

Dr. Kathrin Jankowiak

Hintergrund

Elektrische Felder sind ein fester Bestandteil unseres alltäglichen Umfelds. Dennoch wurde die menschliche Wahrnehmung von elektrischen Feldern bisher in wenigen Studien untersucht. Es konnte jedoch eindeutig gezeigt werden, dass Menschen in der Lage sind, sowohl statische elektrische Felder als auch niederfrequente elektrische Felder bewusst wahrzunehmen.

Wissenschaftler*innen testeten die Wahrnehmbarkeit von Gleichstrom-Feldern (DC; engl. für Direct Current), Wechselstrom-Feldern (AC; engl. für Alternating Current) und der Kombination beider Feldarten (Hybrid-Felder). In einer umfangreichen Studie an 203 Teilnehmenden ergaben sich Wahrnehmungsschwellen für DC von 18,69 kV/m und für AC von 14,16 kV/m. Wenn beide Feldarten kombiniert wurden, sank die Wahrnehmungsschwelle für DC auf 6,76 kV/m, während ein konstantes AC-Feld von 4 kV/m vorhanden war. In der Betrachtung einer kleineren Gruppe von 51 Teilnehmenden mit überdurchschnittlicher Detektionsfähigkeit zeigte sich, dass die AC-Komponente einen signifikanten Einfluss auf die Detektionsleistung elektrischer Hybrid-Felder hat. Die kombinierten Schwellenwerte (AC + DC) sanken mit steigendem AC-Anteil.

Zielsetzung

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Durchführung einer Studie zur menschlichen Wahrnehmung von elektrischen Hybrid-Feldern, in der besonders der Einfluss von Variationen niedriger DC-Felder auf die Wahrnehmungsschwelle untersucht wird. Es wird die Frage geklärt, ob die DC-Komponente ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die kombinierten Wahrnehmungsschwellen hat, wie dies bei der AC-Komponente beobachtet wurde. Im zweiten Teil des Projektes werden biologische Wirkmechanismen an einer möglichst homogenen Probandengruppe untersucht. Dabei stehen vor allem die Wirkungen auf die Haare als möglicher Wirkmechanismus der Wahrnehmung elektrischer Felder im Fokus.

Methodik

In die Studie wurden 49 gesunde weibliche und männliche Proband*innen eingeschlossen. Voraussetzung für die Teilnahme war eine sehr gute Fähigkeit geringe Hybrid-Felder detektieren zu können. Daher wurden anhand der vorherigen Studienergebnisse diejenigen Proband*innen erneut eingeladen, die in Hybrid-Feldern eine sehr gute Erkennungsleistung aufwiesen. Die Proband*innen waren zwischen 24 und 79 Jahren alt (Altersdurchschnitt: 51 Jahre). 19 Proband*innen waren männlich und 30 weiblich. Es wurden unter anderem Personen mit elektronischen Implantaten oder Piercings, Personen, die sich selbst als elektrosensibel bezeichnen würden, sowie Personen mit Hauterkrankungen oder neurologischen Erkrankungen ausgeschlossen. Im Rahmen der ärztlichen Begutachtung vor Studieneinschluss erfolgte eine ausführliche Anamnese, u. a. zu

Substanzmissbrauch (Alkohol, Drogen, Medikamente), gefolgt von einer körperlichen Untersuchung. Die körperliche Untersuchung umfasste Parameter, wie Vitalzeichen (Puls, Blutdruck), Infektionszeichen, Auffälligkeiten an der Haut sowie Sensibilitätsstörungen oder neurologische Auffälligkeiten. Bei weiblichen Probandinnen erfolgte zusätzlich ein hCG-Test, um eine bestehende Schwangerschaft auszuschließen.

Expositionslabor

Alle Untersuchungen zur Wahrnehmung elektrischer Felder fanden im Expositionslabor am Forschungszentrum für Elektromagnetische Umweltverträglichkeit (femu), Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin der Uniklinik RWTH Aachen statt. Das Innenmaß des Expositionslabors beträgt 4×4 Meter mit einer Deckenhöhe von 3 Metern. Die Proband*innen befanden sich sitzend mittig auf dem fest installierten Stuhl im ansonsten leeren Raum. Es können hier DC-Felder bis 50 kV/m in Kombination mit einer Ionenstromdichte von maximal 550 nA/m^2 erzeugt werden, sowie AC-Felder mit einem Effektivwert bis 30 kV/m, die auch mit DC-Feldern kombiniert werden können (Hybrid-Bedingung). Hinsichtlich der Feldstärke kann in Hybrid-Bedingungen die Summe aus beiden Feldarten 50 kV/m nicht überschreiten. Während der Exposition waren Proband*innen über Beinelektroden aus Silikon, über die auch der Ableitstrom aufgezeichnet wurde, geerdet. Darüber hinaus stellt die Konstruktion der Anlage eine doppelblinde Versuchsanordnung sicher. Die Versuchsleitung erhält somit keine Informationen über die aktuell präsentierten Feldstärken, während Proband*innen ebendiese durch Wahrnehmung auf der Körperoberfläche erkennen sollen. Außerdem wird stets ein Rauschsignal über vier Lautsprecher im Expositionsraum eingespielt, das eine Maskierung aller hörbaren Einflüsse sicherstellt.

Methodik

Während der Exposition verschiedener Feldstärkekombinationen unter konstanten Laborbedingungen von 22°C und 50 % Luftfeuchtigkeit saß jeweils ein/e Proband*in in der Mitte des Expositionsraums und folgte den Anweisungen, welche auf die vor ihm/ihr liegende Wand projiziert wurden. Mithilfe einer Antwortbox konnte nach jedem Durchgang der momentane Wahrnehmungseindruck angegeben werden. Es wurden unterschiedliche Kombinationen der AC- und DC-Feldstärken getestet. Dabei ergaben sich vier verschiedene Testbedingungen, bei denen jeweils eine DC-Feldstärke von 1, 2, 3 oder 4 kV/m konstant gehalten wurde, während die AC-Feldstärke innerhalb einer Testbedingung zwischen 1 kV/m und 14 kV/m variierte (siehe Tabelle 1). Diese Versuchsanordnung ermöglicht es den Einfluss der eingestellten DC-Feldstärke auf die Wahrnehmung des Hybrid-Feldes zu ermitteln. Neben den Feldexpositionen, wurde die gleiche Anzahl an Scheinexpositionen präsentiert. Durch das doppelblinde Studiendesign und die zufällige Reihenfolge der Expositionen wusste weder der/die Proband*in noch die Versuchsleitung zu welchem Zeitpunkt ein elektrisches Feld vorhanden war. Dadurch können sowohl eine Erwartungshaltung des/der Proband*in als auch eine Beeinflussung durch die Versuchsleitung ausgeschlossen werden. Insgesamt nahm jede/r Proband*in an acht Sessions mit einer Dauer von jeweils 15 Minuten teil, die in zufälliger Reihenfolge durchgeführt wurden. Dies führte inklusive der prüfärztlichen Untersuchung, der Unterweisung der Proband*innen sowie der Pausen zwischen den Blöcken zu einer ungefähren Gesamttestdauer von 5 Stunden.

Tabelle 1: Testbedingungen

Vier Testbedingungen, die nach folgender Formel berechnet wurden: $E_{\text{RMS}} = \sqrt{E_{\text{DC}}^2 + E_{\text{AC}}^2}$. Jede kombinierte elektrische Feldstärke wurde acht Mal präsentiert und kombiniert mit acht Scheinexpositionen.

	DC Feldstärke (kV/m)	AC Feldstärke (kV/m)	Kombinierte Feldstärke (kV/m)
Testbedingung 1	1	1, 2, 4, 8, 14	1,41, 2,24, 4,12, 8,06, 14,4
Testbedingung 2	2	1, 2, 4, 8, 14	2,24, 2,83, 4,47, 8,25, 14,14
Testbedingung 3	3	1, 2, 4, 8, 14	3,16, 3,61, 5,00, 8,54, 14,32
Testbedingung 4	4	1, 2, 4, 8, 14	4,12, 4,47, 5,66, 8,94, 14,56

Datenauswertung

Für die experimentelle Konzeption sowie die Betrachtung der Ergebnisse wurde in der vorliegenden Untersuchung der Ansatz der Signalentdeckungstheorie (SDT) eingesetzt. Auf diese Weise lässt sich ein Maß für die Empfindlichkeit d' (d prime) bei der Wahrnehmung von Sinnesreizen bestimmen. Bei der Beantwortung der Frage durch den/die Proband*in können vier Antwortkombinationen auftreten: 1.) Feld vorhanden und Feld erkannt („Treffer“), 2.) Feld vorhanden und kein Feld erkannt („verpasst“), 3.) Scheinexposition und Feld erkannt („falscher Alarm“) sowie 4.) Scheinexposition und kein Feld erkannt („richtig abgelehnt“). Die Empfindlichkeit der Proband*innen (d') wird durch eine z-Transformation der relativen Häufigkeit der „Treffer“ und „Falschen Alarme“ und der anschließenden Differenzbildung beider z-Werte ermittelt: $d' = z(\text{Treffer}) - z(\text{falscher Alarm})$. Geringe Erkennungsleistungen für Reize unterhalb der Wahrnehmungsschwelle spiegeln sich in d' -Werten = 0 wider, wohingegen d' -Werte ab 1 auf eine erfolgreiche Wahrnehmung hindeuten. Bei d' -Werten von 1 bis 2 bzw. 3 wird von guten bis sehr guten, bzw. hervorragenden Wahrnehmungsleistungen gesprochen. Für die Bestimmung der individuellen Wahrnehmungsschwellen wurden kombinierte Feldstärken E_{RMS} aus DC und AC berechnet:

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{E_{\text{DC}}^2 + E_{\text{AC}}^2},$$

wobei E_{DC} und E_{AC} die jeweiligen quadratischen Mittelwerte (RMS) der elektrischen Feldstärke sind. Aus diesen kombinierten Feldstärken werden anschließend psychometrische Funktionen für jede Testbedingung (DC: 1, 2, 3, 4 kV/m) bestimmt. Der Punkt, an dem diese Funktion den Wert von 1 erreicht, gilt somit als Schwellenwert hinsichtlich der Feldwahrnehmung.

Ergebnisse

Empfindlichkeit

Die durchschnittlichen d' -Werte für alle getesteten Feldstärkekombinationen lassen sich Abbildung 1 entnehmen. Da ab einem d' -Wert ≥ 1 von einer erfolgreichen Wahrnehmung ausgegangen wird, kann gesagt werden, dass sieben Feldstärkekombinationen im Gruppendurchschnitt erkannt wurden. Dazu gehören 8 kV/m AC kombiniert mit 2, 3 oder 4 kV/m DC und 14 kV/m AC in Kombination mit allen vier DC-Feldstärken (1, 2, 3 und 4 kV/m). Sehr gut zu erkennen ist der Einfluss der DC-Komponente auf die Wahrnehmungsleistung. Mit zunehmender DC-Feldstärke scheint die durchschnittliche Empfindlichkeit zu steigen. Die vorliegenden Daten deuten jedoch darauf hin, dass dieser Effekt erst ab einer ausreichenden AC-Feldstärke um 8 kV/m zu erkennen ist.

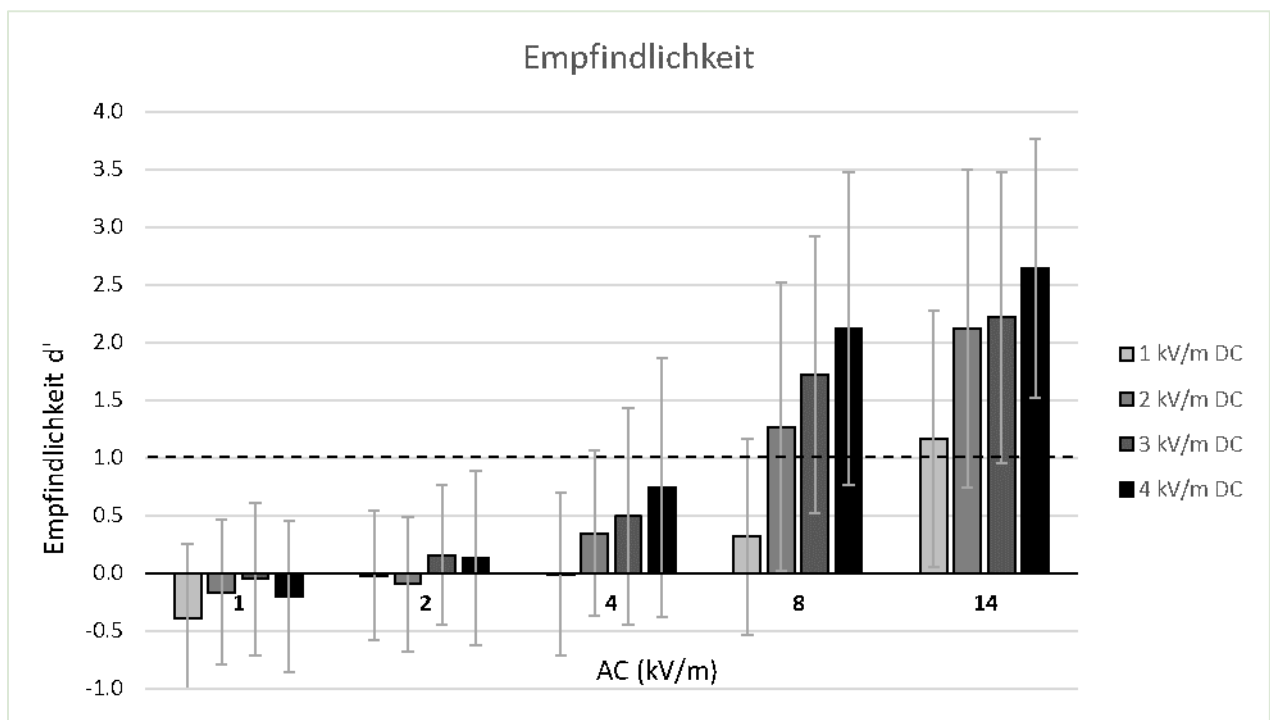


Abbildung 1 Einfluss der DC-Komponente auf die Wahrnehmungsleistung Aufgetragen sind die durchschnittlichen Sensitivitäten d' ($n=49$) für die verschiedenen Feldstärkekombinationen. Die DC-Feldstärken 1, 2, 3 und 4 kV/m wurden in Kombination mit AC-Feldstärken von 1, 2, 4, 8 und 14 kV/m getestet. Die horizontal gestrichelte Linie markiert einen d' -Wert = 1, ab dem von einer erfolgreichen Wahrnehmung ausgegangen wird.

Zusätzlich wurde für jede Feldkombination die Anzahl der Teilnehmenden bestimmt, die eine erfolgreiche Wahrnehmung zeigten. Es zeigte sich, dass sowohl mit zunehmender AC-Feldstärke als auch mit Zunahme der DC-Feldstärke mehr Teilnehmende eine erfolgreiche Wahrnehmung hatten. Die niedrigste getestete Feldkombination konnte von einer Person zuverlässig erkannt werden (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2 Numerische Gesamtverteilung der Teilnehmenden: Anzahl der Teilnehmenden (von $n = 49$), die erfolgreich eine bestimmte elektrische Feldkombination erkannt haben ($d' \geq 1$).

DC (kV/m)	AC (kV/m)				
	1	2	4	8	14
1	1	1	2	8	25
2	1	2	12	25	40
3	2	5	9	34	40
4	1	6	15	38	44

Wahrnehmungsschwellen

In Abbildung 2 sind die durchschnittlichen Wahrnehmungsschwellen dargestellt. Es zeigte sich, dass mit steigendem DC-Anteil die kombinierte Wahrnehmungsschwelle sank. Dieser Effekt ist bei einer DC-Feldstärke von 1, 2 und 3 kV/m sichtbar und setzt sich nicht weiter fort, wenn 4 kV/m DC vorhanden sind.

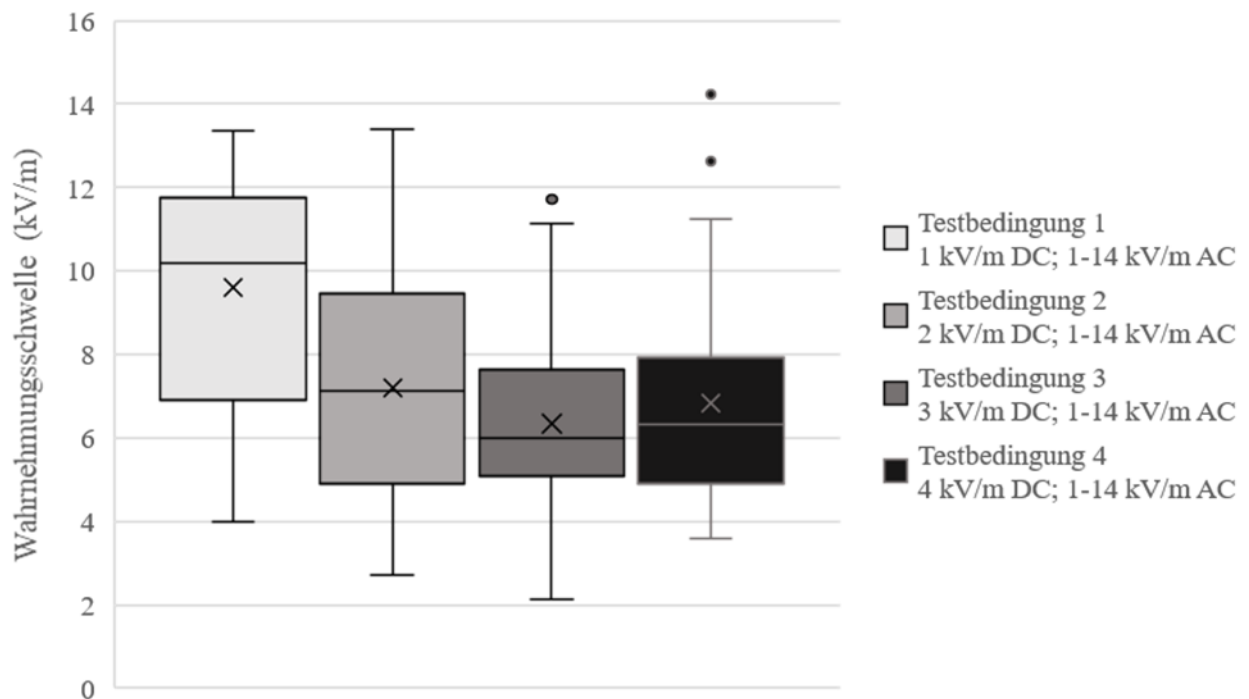


Abbildung 2 Wahrnehmungsschwellen kombinierter elektrischer Felder Durchschnittliche Wahrnehmungsschwelle für alle Testbedingungen. Die AC-Feldstärken pro Bedingung betrugen 1, 2, 4, 8 oder 14 kV/m; DC-Komponente: 1 kV/m in Testbedingung 1, 2 kV/m in Testbedingung 2, 3 kV/m in Testbedingung 3 und 4 kV/m in Testbedingung 4. Die Anzahl der Teilnehmenden betrug 24, 33, 37 und 44 für Testbedingung 1, 2, 3 bzw. 4. Kreuze markieren Mittelwerte. Die Medianwerte sind durch den horizontalen Balken innerhalb der Kästchen angegeben. Minima und Maxima sind durch Whisker gekennzeichnet. Ausreißer sind durch Punkte markiert. Die Zahl der Teilnehmer, bei denen die Wahrnehmungsschwelle über alle Bedingungen geschätzt werden konnte, betrug $n = 14$.

Geplante Weiterarbeit

Im weiteren Verlauf des Projektes ist eine genauere Untersuchung der zugrundeliegenden Wirkmechanismen der menschlichen Wahrnehmung von elektrischen Feldern vorgesehen. Dabei wird vor allem der Einfluss von Kopf- und Körperbehaarung auf die Wahrnehmungsleistung an 30 Proband*innen erforscht, wobei die relative Luftfeuchtigkeit variiert wird. In einem messwiederholten Untersuchungsdesign werden Personen an Tag 1 einer ausführlichen Wahrnehmungstestung mit AC-, DC- und Hybrid-Feldern unterzogen. Nach einer Woche wird der Test wiederholt, allerdings werden vorher alle Haare an Kopf und Armen entfernt. Die Haare werden zusätzlich im Labor auf Marker wie Dicke, Feuchtigkeitsgehalt sowie strukturelle Eigenschaften untersucht. Geplant ist das Aggregieren aller Daten, um zusätzliche Hinweise auf mögliche Wirkmechanismen menschlicher Wahrnehmung elektrischer Felder zu erhalten. Final werden alle Ergebnisse in einem Abschlussbericht bereitgestellt.

Einfluss von niederfrequenten Magnetfeldern auf den Schlaf und Marker der Alzheimer Demenz bei Menschen

Forschungskennzeichen 3621SNA403	Beginn 01.01.2022	Ende 31.12.2024	Fördermittel 1.362.671,88 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Uniklinik RWTH Aachen Forschungszentrum für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit (femu) Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin			
Projektleitung Dr. Michael Kursawe	Fachbegleitung BfS Dr. Blanka Pophof	verantwortlich für den Text Dr. Michael Kursawe Dr. Kathrin Jankowiak	

Hintergrund

Niederfrequente Magnetfelder (NF-MF) von Hochspannungsleitungen und vergleichbaren Quellen führen in Teilen der Bevölkerung zu Sorgen hinsichtlich möglicher negativer gesundheitlicher Folgen. Einige epidemiologische Studien zeigen einen Zusammenhang zwischen einer NF-MF Exposition (insbesondere einer beruflichen) und einem erhöhten Risiko für die Entwicklung neurodegenerativer Erkrankungen, u. a. von Alzheimer Demenz (AD). Die Studien zeichnen sich allerdings durch eine große Heterogenität aus. Ein Wirkmechanismus ist bisher nicht bekannt, der Schlaf könnte dabei eine wichtige Rolle spielen. Neuere Studien haben gezeigt, dass ein gestörter Schlaf zu einer erhöhten Konzentration von Biomarkern (Amyloid-Beta und Tau-Proteine sowie deren Ablagerungen) der AD führt. Es ist daher denkbar, dass eine Störung des Schlafs, hervorgerufen durch externe Faktoren, wie eine NF-MF Exposition, als Auslöser oder Verstärker fungiert. Im vorliegenden Projekt wird eine experimentelle Studie zu möglichen Kurzzeiteffekten von NF-MF auf den Schlaf durchgeführt, die gegebenenfalls Hinweise auf mögliche Wirkmechanismen liefert.

Zielsetzung

Ziel dieser experimentellen Studie ist es, den Einfluss von niederfrequenten Magnetfeldern auf den Schlaf und auf biochemische Marker der AD bei gesunden Frauen und Männern im Alter von 55 bis 75 Jahren zu untersuchen. Als Haupthypothese wird überprüft, ob eine nächtliche Exposition mit niederfrequenten Magnetfeldern einen Einfluss auf den objektiv gemessenen Schlaf und auf biochemische Marker der AD hat. Des Weiteren wird untersucht, ob eine nächtliche Exposition mit niederfrequenten Magnetfeldern die schlafbezogene Gedächtniskonsolidierung sowie die selbst bewertete Schlafqualität und mögliche körperliche Symptome beeinflusst. Es wird analysiert, ob und wie die biochemischen AD-Marker in Abhängigkeit von den objektiven Schlafparametern variieren.

Methodik

Screeningprozess - Überprüfung der Ein- und Ausschlusskriterien

Diese Studie sollen insgesamt 20 Frauen und 20 Männer im Alter von 55 bis 75 Jahren durchlaufen, wenn folgende Kriterien erfüllt sind: Rechtshändigkeit, nicht rauchend, aktuelle körperliche und psychische Gesundheit, Frauen in der Postmenopause (letzte Menstruation vor einem Jahr), keine Einnahme von Hypnotika, keine oder stabile internistische Medikation, kein übermäßiger Konsum von Substanzen, die auf das zentrale Nervensystem wirken (u. a. koffeinhaltige Getränke, Alkohol, Drogen), aktuell keine Schlafstörung nach der International Classification of Sleep Disorders (ICSD 3), kein Nachtdienst (22:00 bis 06:00), Einhalten eines regelmäßigen Schlaf-Wach-Rhythmus (überprüft mit einem 14-tägigen Schlaftagebuch), keine elektronischen oder elektrisch leitfähigen Implantate,

keine Piercings bzw. kein nichtabnehmbarer metallischer Körperschmuck, Deutsch als Muttersprache oder Kompetenzniveau C2 und unauffälliges Ergebnis im Montreal Cognitive Assessment (MoCa).

Sofern die über die Screeningfragebögen definierten Einschlusskriterien erfüllt werden, und keine Ausschlusskriterien vorliegen, erfolgt eine ausführliche ärztliche Anamnese mit einer neurologischen, psychiatrischen und internistischen Untersuchung sowie bei auffälligen Befunden in der Anamnese eine ambulante Registrierung von Atmungsparametern in der Nacht. Sind alle Einschlusskriterien erfüllt, erfolgt eine Adaptations- und Screeningnacht im Labor, um einerseits Schlafstörungen auszuschließen, die anamnestisch nicht zu erkennen waren, und andererseits die Probandin / den Probanden an die Untersuchungsbedingungen zu gewöhnen.

Experimentalnächte im Schlaflabor

Exposition - Kooperation

Die Exposition der Studienteilnehmenden erfolgt mittels einer speziellen im Untersuchungsraum installierten Spulenanordnung, die vom Kooperationspartner Seibersdorf Laboratories GmbH hergestellt wurde (Leitung: Dipl.-Ing. Gernot Schmid) und betreut wird. Aus Sicherheitsgründen (Fluchtmöglichkeit im Notfall) wurden die Feld erzeugenden Spulen so angeordnet, dass das selbstständige Verlassen des Bettes für die Studienteilnehmenden ohne Hilfe und uneingeschränkt möglich ist (keine „Käfigbildung“ durch die Spulen).

Die konkrete Ausführung ermöglicht eine gleichmäßige Befeldung des gesamten Körpers von liegenden (schlafenden) Studienteilnehmenden (maximale Inhomogenität der magnetischen Flussdichte $\pm 20\%$ im Bereich des Körpers) mit einem 50 Hz Magnetfeld. Die Software ermöglicht eine randomisierte, doppelt verblindete Ablaufsteuerung mit drei unterschiedlichen Expositionsstufen (niedrig = $1\ \mu\text{T}$, repräsentativ für eine häusliche Exposition; hoch = $30\ \mu\text{T}$, repräsentativ für eine berufliche Exposition; Scheinexposition). Es erfolgte eine vollständige dosimetrische Charakterisierung der Anlage (inkl. Unsicherheitsabschätzung) auf Basis numerischer Berechnungen unter Verwendung mehrerer moderner anatomischer Körpermodelle (Gewebe- und Hirnregion-spezifische Berechnung der induzierten Stromdichten und elektrischen Feldstärken im Körper).

Objektive Schlafmessung

Werden in der Adaptationsnacht keine Schlafstörungen diagnostiziert, folgen drei Experimentalnächte möglichst im Abstand von je einer Woche, mindestens jedoch in einem Abstand von 72 Stunden. In den Experimentalnächten wird jede Probandin/jeder Proband jeweils einmal mit den Bedingungen „Scheinexposition“ und zwei unterschiedlichen Flussdichten („niedrig“ und „hoch“) kontinuierlich für acht Stunden exponiert. Die Zuordnung der Expositionsbedingungen zu den Probandinnen und Probanden erfolgt randomisiert, doppelblind und in einem cross-over Design. Der Schlaf wird objektiv mit einer Polysomnografie nach internationalem Standard aufgezeichnet und halbautomatisch analysiert, d. h. mit visuell qualitätskontrollierter elektronischer Vorauswertung. Die Auswertung umfasst eine Analyse auf makrostruktureller Ebene (Schlafstadien) sowie eine Analyse auf mikrostruktureller Ebene (Spindeln, Powerspektren).

Selbstbeurteilung der Schlafqualität und der Befindlichkeit

Zu jeder Studiennacht werden Morgen- und Abendprotokolle ausgefüllt, um besondere Ereignisse, die den Schlaf beeinflussen können, zu erfassen. Es werden u. a. auch der Grad der Erschöpfung am Tag sowie die Stimmungslage abends und morgens erhoben. Zur Erfassung der Befindlichkeit vor und nach jeder Testung werden sechs verschiedene visuelle Analogskalen zu Frische, Anspannung, Wachheit, Konzentration, Motivation und Ängstlichkeit verwendet.

Überprüfung der Gedächtniskonsolidierung im Schlaf

Um zu überprüfen, ob die Exposition einen Einfluss auf die nächtliche Gedächtniskonsolidierung hat, werden zwei verschiedene Gedächtnisaufgaben eingesetzt: die Probandinnen und Probanden absolvieren in den Experimentalnächten abends einen Wortpaarassoziationstest (deklaratives Gedächtnis) sowie eine Fingertapping- Aufgabe (prozedurales Gedächtnis). Am nächsten Morgen erfolgt eine erneute Abfrage bzw. Überprüfung der Lernleistung vom Vorabend, um die Veränderung der Gedächtnisleistung über Nacht zu erfassen.

Untersuchung von AD-assoziierten Biomarkern, Melatonin und Cortisol

Die Probengewinnung und Untersuchung der AD-Biomarker und der schlafassoziierten Neurohormone erfolgt unter Leitung von PD Dr. Julian Hellmann (Neurologisches Labor der Charité - Universitätsmedizin Berlin).

Jeweils vor und nach der Adaptationsnacht, sowie jeweils vor und nach jeder Experimentalnacht erfolgt zu festgelegten Zeitpunkten eine Blutentnahme für die Erfassung der Alzheimer-assoziierten Biomarker A β 40/42 und Tau-Proteine im Serum bzw. Plasma.

Die Messung schlafassoziiierter Parameter (zirkadian reguliertes Melatonin und Cortisol) erfolgt im selben Untersuchungsmaterial (Plasma) wie die AD-Biomarker. Melatonin und Cortisol werden mit Hilfe eines zertifizierten und validierten Immunassays im Plasma bestimmt.

Während die AD-assoziierten Biomarker (A β 40/42, Tau-Protein) lediglich vor und nach den Expositions Nächten bestimmt werden, erfolgt die Bestimmung der schlafassoziierten Biomarker (Cortisol und Melatonin) in allen gewonnenen Proben. Zusätzlich wird der Metabolit des Melatonins (6-Hydroxymelatonin) im über die Nacht gesammelten Urin bestimmt. Hierzu wird der Urin ab Beginn der Exposition in einem Sammelgefäß bis zum nächsten Morgen gewonnen und in einem Aliquot dieses Sammelurins wird schließlich die Konzentration des ausgeschiedenen 6-Hydroxymelatonin bestimmt.

Kontrolle Schlaf-Wach-Rhythmus mit Aktigrafie

Für die Dauer der Teilnahme tragen die Probandinnen und Probanden einen Aktigraf. Dabei handelt es sich um eine Art Armbanduhr, die am Handgelenk getragen wird, und die körperliche Aktivität und Bewegung misst. Damit kann der Schlaf-Wach-Rhythmus während der Studienteilnahme kontrolliert werden.

Ergebnisse

In 2022 wurde eine Literaturübersicht im Rahmen des Projekts „Einfluss von niederfrequenten Magnetfeldern auf den Schlaf und Marker der Alzheimer Demenz bei Menschen“ erstellt. Die Studie wurde bei der Ethikkommission der Charité - Universitätsmedizin Berlin (Votum 10.03.22) eingereicht und zusammen mit dem Datenschutzkonzept positiv beschieden. Die Konstruktion der Expositionsanlage war für das 3. Quartal 2022 geplant, konnte aber aufgrund von Lieferengpässen relevanter Bauteile erst im 4. Quartal 2022 fertiggestellt und im Schlaflabor montiert werden. Die Ergebnisse der Kalibrierung führten dazu, dass leichte bauliche Veränderungen an der Anlage notwendig wurden, die eine endgültige Inbetriebnahme erst in 2023 zulassen. Die Lichtverhältnisse in den Laborräumen und im Sanitärraum wurden durch spezielle Filterfolien soweit optimiert, dass eine Analyse von nächtlichem und morgendlichem Melatonin ohne Verfälschung durch künstliches Licht möglich wurde. In 2022 wurden der Wortpaarassoziationstest (deklaratives Gedächtnis) und die Fingertapping- Aufgabe (prozedurales Gedächtnis) für die aktuelle Version der Software E-Prime adaptiert und für eine dreimalige Durchführung wurden vergleichbare Parallelversionen entwickelt. Es erfolgte die Vorbereitung der Studienunterlagen und der Studienprotokolle für das Personal sowie

die Zusammenstellung der Fragebögen für den Screeningprozess und für die nachfolgenden Experimente. Im 3. Quartal 2022 begann die Bewerbung der Studie und das Screening sowie der Einschluss geeigneter Probandinnen und Probanden.

Geplante Weiterarbeit

Der Beginn der Datengewinnung ist für Anfang 2023 angesetzt, das voraussichtliche Ende, mit dem Ziel 20 Männer und 20 Frauen in die Studie eingeschlossen zu haben, Mitte 2024. Die Auswertung des Schlafs, der AD-Biomarker, der Melatonin- und Cortisol-Bestimmung sowie die Ergebnisse aus den Tests zur Überprüfung der Gedächtniskonsolidierung im Schlaf und der Fragebögen erfolgt fortlaufend und parallel zur Datengewinnung. Nach der Entblindung und Zusammenstellung sämtlicher Daten für die statistische Auswertung erfolgt die Überprüfung der aufgestellten Hypothesen. Die Fertigstellung des Abschlussberichts und die Vorbereitung wissenschaftlicher Publikationen ist für das 4. Quartal 2024 geplant.

Wirkung von niederfrequenten magnetischen Feldern auf die Alzheimer-Erkrankung im humanen Zellkultur-Modell

Forschungskennzeichen 3621SNA402	Beginn 01.11.2022	Ende 31.10.2025	Fördermittel 975.209,39 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Charité - Universitätsmedizin Berlin, Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie, Neurobiologisches Labor			
Projektleitung Dr. Julian Hellmann-Regen	Fachbegleitung BfS Felix Meyer	verantwortlich für den Text Laura Zelenka Susanna Gericke	

Hintergrund

Die Alzheimer-Demenz (AD) ist eine Erkrankung mit zunehmender gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Relevanz durch den demographischen Wandel, da ihr Auftreten mit erhöhtem Lebensalter zunimmt. In den letzten Jahrzehnten erschienen zahlreiche wissenschaftliche Studien, in denen der mögliche Einfluss niederfrequenter (NF; engl. *extremely low frequency* = ELF) Magnetfelder (MF; engl. *magnetic fields*), auf die Entwicklung und den Verlauf der AD untersucht wurde. Neben zahlreichen epidemiologischen Studien, die zunächst auf eine negative Wirkung der Exposition gegenüber ELF-MF für den Beginn und den Verlauf der AD hindeuteten, weisen Laborstudien auf eine protektive- oder gar therapeutische Wirkung von ELF-MF bei der AD hin. Daneben konnten weitere Labor- und epidemiologische Studien keine Wirkung von ELF-MF auf die AD nachweisen. Insgesamt ist die Studienlage sehr heterogen und lässt keine eindeutige Beurteilung der Bedeutung von ELF-MF für die AD zu. Darüber hinaus fehlt ein potenzieller Wirkmechanismus, der erklären könnte, wie ELF-MF einen Einfluss auf die Entwicklung neurodegenerativer Erkrankungen haben könnten.

Zielsetzung

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, einen möglichen, sich aus epidemiologischen Hinweisen ergebenden, Zusammenhang zwischen ELF-MF und dem Auftreten der AD auf Ebene etablierter neuronaler Zellkulturmodelle zu untersuchen. Konkret soll auf zellulärer Ebene untersucht werden, ob ELF-MF, wie sie in der Nähe von Stromleitungen auftreten, einen Einfluss auf Prozesse haben, die bei der Entstehung und dem Verlauf der AD eine Rolle spielen. Hierzu soll eine umfassend kontrollierte Untersuchung an humanen neuronalen Zellkulturen (Neurone und Gliazellen), die bei der Entstehung und dem Verlauf der AD eine Rolle spielen, durchgeführt werden.

Methodik

Arbeitspaket 1 (AP 1): Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik sowie geplante Vorgehensweise

Für die Zwecke dieses Vorhabens besteht der erste Schritt in der Erstellung einer systematischen Literaturrecherche. Dies mit dem Ziel, die bisher vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnisse zu möglichen biologischen Effekten und etwaigen Wirkmechanismen einer Exposition mit ELF-MF auf die Entstehung und das Fortschreiten der AD aufzuarbeiten und zu bewerten. Die Aufarbeitung soll einerseits einen Überblick über die relevanten bisherigen Arbeiten bieten und andererseits die geplante Vorgehensweise detailliert darstellen. Die Sicherstellung einer adäquaten Exposition und Dosimetrie bei den *in-vitro*-Experimenten sowie die Methodenwahl und -durchführung zur Untersuchung ausgewählter biologischer Endpunkte soll abschließend detailliert dargestellt werden.

Arbeitspaket 2 (AP 2): Exposition und Dosimetrie

Neben der Entwicklung und Installation der Expositions-kammer, liegt im AP 2 ein besonderes Augenmerk auf der Exposition und Dosimetrie. Bereits bei der Herstellung einer geeigneten Expositions-kammer sollen die für eine Zellkulturstimulation in einem Inkubator erforderlichen Bedingungen berücksichtigt werden. Die Entwicklung und Herstellung der Stimulationseinrichtung erfolgt durch den Kooperationspartner Seibersdorf Laboratories GmbH, welche über umfangreiche Erfahrung entsprechender Expositionsanlagen und Steuer-Software verfügt.

Die Expositionsanlage besteht aus zwei identischen Expositions-kammern zur gleichzeitigen Applizierung von SHAM und VERUM und ist konkret dazu ausgelegt, im Rahmen einer Exposition der Zellkulturen nachfolgende Parameter zu ermöglichen:

- Expositions-kammern magnetisch abgeschirmt ($< 0,01 \mu\text{T}$ bei 50 Hz), mit Belüftung zur Aufrechterhaltung des erforderlichen Umgebungsmilieus
- Alternative Applikation von Magnetfeldvektor (bis max. 6 mT) orthogonal zum Zellschalenboden oder parallel zum Zellschalenboden
- Möglichkeit zur Überlagerung von statischem Magnetfeld bis $50 \mu\text{T}$
- SHAM Bedingung realisiert durch antiparallele Ströme in den felderzeugenden Spulen
- Feldinhomogenität im Bereich der Zellschalen $< \pm 3\%$
- Bedienung der Anlage und automatische, pseudozufällige und verblindete Applizierung von SHAM und VERUM durch Steuer-Software mit bedienungsfreundlichem User-Interface
- Kontinuierliches Monitoring und Aufzeichnung (Aufzeichnungsintervall $< 10\text{s}$) aller relevanten Systemparameter (magnetische Flussdichte, Temperatur, Luftfeuchte, CO_2 im Bereich der Zellschalen)
- Abmessungen innerhalb der Maße die zur Positionierung innerhalb eines handelsüblichen Inkubators erforderlich sind.

Arbeitspaket 3 (AP 3): Zu untersuchende biologische Endpunkte

Als Modell für humane Neurone und Oligodendroglia sollen Zelllinien eingesetzt werden, welche humanen Primärzellen besonders nahe sind. Für Neurone, Astro- und Oligodendroglia sollen humane klonal expandierte, neuronal vordifferenzierte Stammzellen eingesetzt werden; diese sind bereits hervorragend charakterisiert und weisen eine exzellente Reproduzierbarkeit sowie gute Verfügbarkeit und Kultivierbarkeit auf. Bei den ausgewählten Zellen handelt es sich also um vordifferenzierte Primärzellkulturen, welche gegenüber sogenannten induzierten pluripotenten Stammzellen (iPSCs) und gegenüber klassischen (immortalisierten) Zelllinien verschiedene Vorteile aufweisen. Als Modell für humane Mikroglia, welche in der Alzheimer-Pathogenese eine zentrale Rolle spielt soll die exzellent etablierte humane Mikrogliazelllinie HMC3 eingesetzt werden. Die Zelllinie zeichnet sich durch einfaches Handling und kosteneffiziente Zellkultur aus. Sie ist von primärer humaner Mikroglia abgeleitet und eignet sich bei niedriger Kulturdichte und speziellen Kulturbedingungen auch für Langzeitexperimente.

Die Expositionsbedingungen werden sich nach der Leistungsbeschreibung richten. Zur Überprüfung der Zellkulturbedingungen über bis zu 120h werden die Zellkulturen dahingehend optimiert, dass eine Kultivierung ohne äußere Intervention (Medienwechsel oder sonstige Manipulationen) möglich wird. Hierzu wird in Vorversuchen das Verhältnis aus Kulturmedium, Wachstumsfaktoren und Zellzahl jeweils optimiert.

Folgende Endpunkte sind zu untersuchen:

Die Genexpressionsexperimente werden gemäß Leistungsbeschreibung mittels RNA-Sequencing (Messung des Gesamt-Transkriptoms im sog. „Poly-A-Workflow“) durchgeführt werden. Die Probenvorbereitung erfolgt unter Verwendung der erforderlichen Qualitätskontrolle (Nanodrop /Tapestation) zur Quantifizierung der RNA-Integrität und Menge, mit den erforderlichen Reagenzien. Abschließend erfolgen die Validierungen der signifikant unterschiedlich exprimierten Gene mittels klassischer quantitativer (real time) RT-PCR. Hier soll die Untersuchung im sog. Multiplexansatz unter simultaner Amplifikation von Zielgen(en) sowie in der jeweiligen Zelllinie etablierten Housekeeping-Genen erfolgen.

Die proteinbiochemische Analytik soll mit Hilfe zweier äußerst performanter und gleichzeitig kosteneffektiver Arraysysteme (Multiplex, Bead-Basiert) umgesetzt werden. Die Durchführung erfolgt auf einem FACS BD Canto™ Durchflusszytometer. Hier können gleich sämtliche klassische an der Pathogenese der AD beteiligten Targets untersucht werden. Insbesondere werden hier die Abeta-Peptide, Tau-Proteine samt phosphorylierter Tau-Proteine (P181-Tau), neuronale und gliale Markerproteine, insbesondere Neurotrophine, ausgewählte Zytokine und Enzyme analysiert. Konkret werden Amyloid beta 1-42, 1-40, APP, BDNF, YKL-40 (CHI3L1), CNTF, FGF-21, GDNF, GFAP, Kallikrein-6 (KLK6), MIF, NCAM-1, Neurogranin (NRGN), NF-H, NGF beta, S100B, Tau (total), Tau (pT181), TDP-43, UCHL1 untersucht, sowie weiterhin die verschiedenen Isoformen der Apolipoproteine, von welchen mehrere Isoformen Assoziationen mit der AD aufweisen. Konkret werden die Apolipoproteine Apo AI, Apo AII, Apo B100, Apo CII, Apo CIII, Apo D, Apo E gesamt, Apo E4 Protein Isoform, Apo H, Apo J sowie Apo M bestimmt. Weitere Targets sind möglich und können auf Wunsch des Auftraggebers kostenneutral gegen oben aufgeführte Targets getauscht werden.

Die Untersuchungen zur Entstehung oxidativen Stresses nach Exposition mit ELF-MF sollen durch Messung glutathionierter Proteine (GSH/GSSG) sowie ergänzenden Superoxid-Messungen umgesetzt werden.

Geplante Weiterarbeit

Im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens wird der vorliegende Stand von Wissenschaft und Technik für die Zwecke des Vorhabens aufgearbeitet (AP 1). Dies geschieht unter Berücksichtigung der Regeln der guten wissenschaftlichen Praxis sowie der Regeln zur Erstellung systematischer Literaturrecherchen. Anschließend erfolgt die Entwicklung und Installation der Expositionsanlage durch den Kooperationspartner Seibersdorf Laboratories GmbH (AP 2). Nach Aufbau der Expositionsanlage ist durch einen ausführlichen Bericht und ggf. durch Vorversuche nachzuweisen, dass die Anforderungen hinsichtlich Exposition und Dosimetrie erfüllt wurden. Im letzten Arbeitspaket (AP 3) werden die verschiedenen Modellsysteme (Neuronen, Oligodendrozyten, Astrozyten, Mikroglia) etabliert und an die Expositionsbedingungen optimiert. Anschließend werden die Expositionsversuche durchgeführt sowie die biologischen Endpunkte (Genexpression, Proteinbiochemie, oxidativer Stress) untersucht und ausgewertet. Abschließend werden die Ergebnisse hinsichtlich ihrer gesundheitlichen Relevanz für den Menschen eingeordnet und bewertet.

Untersuchung eines möglichen Effekts einer Exposition mit elektromagnetischen Feldern auf das Epigenom und das Transkriptom

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3621EMF405	01.02.2022	30.09.2024	972.752,72 EUR

Forschungs- / Auftragnehmer

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

Projektleitung

Dr. Kai Baaske

Fachbegleitung BfS

Dr. Janine Schmidt

verantwortlich für den Text

Dr. Kai Baaske

Hintergrund

In Wissenschaft und Gesellschaft besteht ein hohes Interesse an der Untersuchung von beeinflussenden bzw. schädigenden Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder (HF EMF) wie auch niederfrequenten magnetischen Feldern (ELF MF). Zwar wurde in der Vergangenheit eine große Anzahl an Studien durchgeführt, allerdings liefern die bisherigen Publikationen nur ein sehr heterogenes Bild hinsichtlich Versuchsbedingungen wie auch bei den Ergebnissen. Gleichzeitig sind viele der Studien von minderer Qualität, sodass Studienergebnisse oft wenig aussagekräftig sind.

Zielsetzung

Ziel ist die Untersuchung eines möglichen Einflusses einer Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (<6 GHz) auf die Genexpression (die Umsetzung der im Erbgut verschlüsselten Information in eine nutzbare Form) und den Methylierungsstatus (chemische Modifizierung am Erbgut) der DNA von menschlichen Hautzellen.

In einer vorausgehenden Literaturrecherche sollen Studien identifiziert und bewertet werden, die den Einfluss einer Exposition mit nieder- und hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf die Genexpression und den DNA-Methylierungsstatus auf verschiedene Zelltypen untersucht haben. Für die sachgemäße Bewertung der Studienergebnisse wird eine Gewichtung der verschiedenen Aspekte einer Studie mit Hilfe eines unabhängigen Scores erfolgen.

Die durch die Literaturrecherche gewonnenen Ergebnisse sollen gleichzeitig als Leitfaden dienen für die Planung des nachfolgenden experimentellen Versuchsaufbaus hinsichtlich verwendeter Frequenzen, SAR-Werte, Befeldungsdauern und eingesetztem Modellorganismus (Zelltyp). Zur Befeldung soll ein transversal-elektromagnetischer (TEM)-Wellenleiter eingesetzt werden, in dem eine Wanderwelle mit ortsfester Amplitude und Phase erzeugt wird.

Methodik

Die Durchführung des Projektes ist in drei Tätigkeitsabschnitte untergliedert. Ausgehend von einer Literaturrecherche stehen im zweiten Abschnitt Entwicklung, Bau und dosimetrische Charakterisierung der Expositionsanlage im Vordergrund. Im dritten Abschnitt werden die vorher festgelegten primären Zelllinien in der Expositionsanlage mit einem hochfrequenten elektromagnetischen Feld beaufschlagt. Es werden für moderne 5G-Kommunikationstechnik typische Frequenzen und Wellenmuster verwendet. Die Proben werden schließlich zur Bewertung der Auswirkung der Befeldung auf das Transkriptom mittels Next Generation Sequencing und anschließender Validierung durch Low Density Array untersucht. Darüber hinaus erfolgt eine Messung der DNA-Methylierung.

Literaturrecherche

Zu Beginn des Projektes wird eine Literaturrecherche durchgeführt, die sowohl den Bereich der niederfrequenten magnetischen Felder als auch den Bereich der hochfrequenten elektromagnetischen Felder bis 100 GHz einschließt. Dazu werden publizierte Studien aus den Jahren 2000 bis Februar 2023 aus dem Bereich Gen-/Protein-Expression berücksichtigt, kategorisiert und anhand ihrer Aussagefähigkeit bewertet. Aktuell ist diese Recherche noch nicht abgeschlossen.

Das allgemeine Vorgehen ist, dass von der zu untersuchenden Studie das Erscheinungsjahr, der Titel und die Autoren erfasst werden. Anschließend wird die Studie in ihre Einzelexperimente unterteilt und weitere Details des jeweiligen Experiments erfasst, bspw. ob dieses Experiment in vitro oder in vivo durchgeführt wurde, ob das Befeldungssignal gepulst oder kontinuierlich gewählt wurde, welche Leistungsflussdichte, Frequenz und welcher SAR-Wert zum Einsatz kamen, welches Versuchsmodell gewählt wurde, wo dieses Modell seinen Ursprung hatte und wie dieses einzugruppieren ist. Des Weiteren wird die Befeldungsdauer, sowie der Zeitraum in dem die Befeldungen akkumuliert stattgefunden hatten, erfasst. Auch Befeldungspausen und die Inkubationszeit, die zwischen Befeldungsende und Analysebeginn der Proben lag, wird erfasst. Darüber hinaus wird notiert, ob die Exposition einen Effekt auf das Einzelexperiment hatte, das heißt, ob mindestens ein Gen oder Protein verändert worden war.

Um das Ergebnis des Einzelexperiments der jeweiligen untersuchten Studie besser einordnen zu können, trotz möglicherweise stark variierender qualitativer Unterschiede, wird die Qualität eines jeden Einzelexperiments mittels eines eigens dafür entwickelten Qualitätsscore bewertet. Hierfür werden verschiedenste technische Parameter untersucht, wie die Art der Berechnung/Modellierung des SAR-Werts, das Monitoring der Proben temperatur oder der zur Verfügung stehende Bewegungsradius während der Befeldung bei einem In-vivo-Experiment. Auch viele unterschiedliche biologische Parameter werden jeweils einzeln bewertet, darunter beispielsweise die Anzahl der verwendeten Replikate, die Eignung des verwendeten Modellorganismus, ob physiologische Umweltbedingungen während der Befeldung herrschten, wie homogen die Modellgruppen gewählt waren hinsichtlich Alter, Gewicht und Geschlecht und inwiefern bei Probengenerierung in Tierversuchen auch zirkadiane Rhythmen berücksichtigt worden sind. Darüber hinaus werden auch Parameter gewichtet, die sich mit der anschließenden Analyse methode und deren Interpretation befassen, wie beispielsweise die Bewertung der Qualität der verwendeten (Schein-)Kontrollen, der eingesetzten Analyse-Methode, der Statistik und der Reproduzierbarkeit von Ergebnissen.

Für jeden einzelnen untersuchten Teilaspekt des untersuchten Einzelexperiments wird eine Punktzahl zwischen 1 und 4 vergeben. Der Gesamtscore des jeweiligen untersuchten Einzelexperiments ergibt sich schließlich aus der Summe aller bewerteten Teilaspekte. Je höher der Gesamtscore, desto besser ist demnach die Qualität des Einzelexperiments der untersuchten Studie.

Wahl des Versuchsmodells

Die Auswahl der zu Verfügung stehenden kommerziell erwerbba ren primären Zelllinien verschiedener biologischer Spender ist begrenzt. Darüber hinaus sollte die Lokalisation der Zelllinie an einem Ort im Körper gelegen sein, wo sie hinsichtlich Gewebe-Permittivität und -Konduktivität durch hochfrequente elektromagnetische Felder exponiert werden kann.

Aufbau der Expositionsanlage

Der zu realisierende Expositions aufbau soll aus drei parallel betriebenen Expositions kammern bestehen. Hierfür sind geschlossene TEM-Wellenleiter, die auf Grund ihrer kleinen Bauform auch als μ TEM-Zellen bezeichnet werden, vorgesehen. In einer solchen Kammer bildet sich im Idealfall nur ein transversal-elektromagnetisches Wanderfeld mit Fernfeldcharakter aus und sie ist für den Betrieb bis

zu einigen GHz geeignet. Die Speisung der Kammern soll mit einem modulierten Hochfrequenzsignal erfolgen, welches von einem Vektor-Signal Generator erzeugt, anschließend mit einem Signalverstärker verstärkt und entsprechend symmetrisch auf die drei Kammern aufgeteilt wird.

Ergebnisse

Literaturrecherche

Zu diesem Zeitpunkt ist die Literaturrecherche noch nicht abgeschlossen, sodass noch keine abschließende Aussage getroffen werden kann. Bisher bestätigt sich nur das Vorliegen einer sehr heterogenen Studienlage. Das Ziel ist durch die oben beschriebene detaillierte Aufschlüsselung und Kategorisierung verborgene Muster sichtbar zu machen und Schlussfolgerungen daraus ableiten zu können.

Wahl des Versuchsmodells

Anhand der in den Methoden beschriebenen Kriterien stellten sich zwei Zelllinien adulter humaner Spender als geeignet heraus, nasale Epithelzellen und epitheliale Keratinozyten. Hierbei kristallisieren sich bisher die Keratinozyten bezüglich ihres Wachstumsverhalten als vielversprechender heraus, wobei abschließende Untersuchungen noch ausstehend sind.

Geplante Weiterarbeit

Im Folgendem Jahr ist der Abschluss der Literaturrecherche sowohl für den hochfrequenten, als auch für den niederfrequenten Bereich geplant, sowie das Festlegen der Versuchszelllinie. Aus der Literaturrecherche sollen Parameter wie Frequenz, SAR-Wert und Expositionsdauer für die ausstehende Versuchsreihe abgeleitet werden. Des Weiteren steht der Bau der Expositionsanlage bevor sowie die Kalibrierung zugehöriger Parameter und Simulation des Befeldungsaufbaus und der Befeldungsparameter.

Begonnene Forschungsvorhaben

2022 begonnene Forschungsvorhaben, zu denen noch keine Ergebnisse vorliegen

Themenbereich 01 - Natürliche Strahlenexposition

Zu diesem Themenbereich liegt für das Jahr 2022 kein Bericht vor.

Themenbereich 02 - Strahlenschutztechnik

Zu diesem Themenbereich liegt für das Jahr 2022 kein Bericht vor.

Themenbereich 03 - Strahlenbiologie - Wirkung von ionisierender und nichtionisierender Strahlung, Strahlenempfindlichkeit

Zu diesem Themenbereich liegt für das Jahr 2022 kein Bericht vor.

Themenbereich 04 - Medizinische Strahlenexposition

Zu diesem Themenbereich liegt für das Jahr 2022 kein Bericht vor.

Themenbereich 05 - Radioökologie

Charakterisierung der Ableitung von radioaktiven Stoffen aus speziellen Arten von Einrichtungen im Bereich Medizin und Industrie mit der Fortluft

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3622S52532	01.11.2022	31.10.2024	377.884,50 EUR

Forschungs- / Auftragnehmer
Dornier Nuclear Services GmbH

Projektleitung	Fachbegleitung BfS	verantwortlich für den Text
Dr. Bettina Grauel	Andrea Heckel Dr. Patrick Woidy	Dr. Bettina Grauel

Hintergrund

Nach dem Wegfall der Kleinemittentenregelung (§ 114 StrlSchV (2001)) müssen sämtliche Einrichtungen, die Radionuklide handhaben, eine Eigenüberwachung ihrer Emissionen durchführen. Dies wird weitestgehend noch nicht umgesetzt, ebenso wenig wie Kontroll- und Vergleichsmessungen. Im vorangegangenen Forschungsvorhaben 3619S52560 (Evaluierung des aktuellen Standes bei der Überwachung von radioaktiven Stoffen mit der Fortluft und dem Abwasser in Medizin und Industrie) wurden Ableitungen aus Einrichtungen abgeschätzt. Es wurden fünf Typen von Einrichtungen identifiziert, von denen drei (Medizin, Isotopenproduktion, Großforschung) Ableitungen im relevanten Bereich aufwiesen (Ausschöpfung der genehmigten Werte von einigen Prozent). Oftmals betrafen die signifikanten Ableitungswerte eher das Abwasser als die Fortluft, wobei Fortluftemissionen von den Betreibern oft messtechnisch nicht erfasst werden.

Zielsetzung

Aufbauend auf dem Forschungsvorhaben 3619S52560 sollen nun für die drei Einrichtungstypen Medizin, Isotopenproduktion und Großforschung Fortluftemissionen gemessen werden. Hierzu sollen drei Einrichtungen in Deutschland zur Mitwirkung am Forschungsvorhaben ausgewählt werden. Die für die Datengewinnung zu nutzende Messtechnik wird vom BfS gestellt und soll von der Forschungsnehmerin ggf. weiterentwickelt werden, um den komplexen messtechnischen Anforderungen (wechselnde Nuklide, starke Unterschiede in den Halbwertszeiten, aus der Kerntechnik unbekannte Nuklide) gerecht zu werden. Die Daten sollen umfangreich ausgewertet und die entwickelte Messmethode kritisch bewertet werden. Es ist zu ermitteln, in welchem Umfang die messtechnische Überwachung der Fortluftemissionen in Einrichtungen umsetzbar und sinnvoll ist.

Themenbereich 06 - Notfallschutz

Detailbewertung ausgewählter Ereignisse aus dem Spektrum des Referenzszenarium S3 "Kernkraftwerk im übrigen Europa" des allgemeinen Notfallplans des Bundes für den Notfallschutz zum Ausbau der Wissensbasis des Team Strahlenschutz für den Einsatz im Notfall

Forschungskennzeichen 3622S62587	Beginn 21.07.2022	Ende 31.12.2024	Fördermittel 268.360,00 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH			
Projektleitung Michael Hage	Fachbegleitung BfS Ulrich Buchner	verantwortlich für den Text Ulrich Buchner Michael Hage	

Hintergrund

Der vom Bundesamt für Strahlenschutz erarbeitete Katalog von Referenzszenarien für die Notfallschutzplanung nach Maßgabe des neuen Strahlenschutzgesetzes deckt ein umfassendes Spektrum radiologischer Notfallsituationen ab. Innerhalb dieses Szenarienspektrums liegen nach gegenwärtigem Stand von Wissenschaft und Technik für die große Anzahl potenziell relevanter Freisetzungsmechanismen und Ereignisse, die zu notfallbedingten Strahlenexpositionen führen können, Analysen mit zum Teil unterschiedlicher Detailtiefe vor. Es hat sich gezeigt, dass ein zusätzlicher Analysebedarf für Detailbetrachtungen von möglichen Ereignissen aus dem breiten Spektrum des Referenzszenarios S3 „Kernkraftwerk im übrigen Europa“, über die bisherigen Forschungstätigkeiten hinaus, nötig ist. Der Umfang der Forschungsarbeiten ergibt sich dabei insbesondere durch die Vielzahl an unterschiedlichen in Betrieb befindlichen Reaktortypen und Baureihen. Darüber hinaus erweitert sich der Umfang durch in Bau befindliche Anlagen.

Zielsetzung

Das Ziel des Forschungsvorhabens besteht darin, aufbauend auf bisherigen Forschungsergebnissen in Bezug auf das Referenzszenario S3 „Kernkraftwerk im übrigen Europa“, die verfügbaren Kenntnisse zu möglichen Ereignisabläufen und Freisetzungspfaden zu vertiefen, durch weiterführende Betrachtungen zu ergänzen und in Bezug auf ihre Relevanz für die Lageeinschätzung zu bewerten. Zum Erreichen dieses Ziels wird in einem ersten Schritt der Kenntnisstand zusammengetragen und dann aufbereitet und ergänzt. Schließlich erfolgt die Relevanzbewertung der identifizierten und analysierten Ereignisabläufe und Freisetzungspfade.

Themenbereich 07 – Allgemeine und gesellschaftliche Aspekte des Strahlenschutzes

Zu diesem Themenbereich liegt für das Jahr 2022 kein Bericht vor.

Themenbereich 08 - Elektromagnetische Felder

5G: Risikokommunikation der Bevölkerung und Möglichkeiten dialogorientierter Wissenschaftskommunikation

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3621EMF109	01.04.2022	30.11.2023	353.897,65 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer			
nexus Institut für Kooperationsmanagement und interdisziplinäre Forschung GmbH Kantar GmbH, Kantar Public Deutschland			
Projektleitung	Fachbegleitung BfS	verantwortlich für den Text	
Ina Metzner	Dr. Corinna Lüthje	Ina Metzner Maria Jacob Dr. Sophia McDonnell Elke Himmelsbach	

Hintergrund

5G ist die sogenannte fünfte Generation (daher 5G) der Netztechnologie in der mobilen Datenkommunikation. Die Sorge vor gefährlichen Auswirkungen elektromagnetischer Wellen durchzieht die gesamte Zeit der Nutzung des Mobilfunks seit dem frühen 20. Jahrhundert, woran die Sorge vor den hochfrequenten 5G-Wellen unmittelbar anschließt. In der öffentlichen Diskussion vermischen sich dabei Informationen unterschiedlicher Qualität, wodurch es für Bürger*innen schwierig sein kann, gesichertes Wissen aus vertrauenswürdigen Quellen zu erhalten. Das BfS informiert die Bevölkerung zum wissenschaftlichen Forschungsstand über den Einfluss von Mobilfunkstrahlung, beispielsweise mit lokalen Informationsveranstaltungen, und möchte in diesem Forschungsvorhaben untersuchen, wie die Sichtweisen der Bevölkerung auf den Mobilfunk im Allgemeinen sowie auf 5G im Speziellen sind, um die Informations- und Dialogangebote des BfS entsprechend anzupassen.

Zielsetzung

Im Rahmen des Ressortforschungsprojekts „5G: Risikowahrnehmung der Bevölkerung und Möglichkeiten dialogorientierter Wissenschaftskommunikation“ verfolgt das Bundesamt für Strahlenschutz zum einen das Ziel, in vier Städten Bürgerwerkstätten mit zufällig ausgewählten Bürger*innen durchzuführen und dort verschiedene Aspekte von Mobilfunk, elektromagnetischen Feldern und individueller Risikobewertung zu vermitteln. Als Ergebnis der Bürgerwerkstätten sollen Vorschläge für die weitere Kommunikationspraxis des BfS zum Thema aus Sicht der Bürger*innen erarbeitet werden. Zum anderen soll anhand des Themas der möglichen Gesundheitsgefährdung durch 5G untersucht werden, in welcher Weise Bürgerbeteiligungsverfahren dazu beitragen können, schwierige und kontroverse Themen zu vermitteln und die Teilnehmenden nachhaltig zu befähigen, individuelle Risikoeinschätzungen auf Basis wissenschaftlicher Informationen vorzunehmen. Die Ausgestaltung und Umsetzung der Dialogveranstaltungen wird daher von einem Evaluationsteam begleitet, um die Wirkweise und die Wirksamkeit der Intervention festzustellen.

Methodik

Die Bürgerwerkstätten wurden am 16. und 17. September und am 23. und 24. September 2022 in Freiburg, Cottbus, Bremen und Jena mit insgesamt 134 Teilnehmenden durchgeführt. Auf den Bürgerwerkstätten selbst gab es jeweils fünf Expertenvorträge zu verschiedenen Aspekten von Mobilfunk und Wissenschaftskommunikation. Diesen Vorträgen folgten Kleingruppendiskussionen, in denen das Gehörte reflektiert und verschiedene Aufgaben bearbeitet wurden. Am Ende der

Bürgerwerkstatt wurden Bürgerbotschafter*innen gewählt, die erneut zu einem Workshop im Januar 2023 zusammenkommen und Empfehlungen zur Kommunikationspraxis des BfS ausarbeiten sollen. Diese Empfehlungen sollen dann im Mai 2023 in einem offiziellen Rahmen an das BfS übergeben werden.

Das befragungsgestützte Evaluationskonzept besteht aus einer telefonischen Eingangsbefragung vor den Veranstaltungen und je einer Ausgangsbefragung zwei Wochen, zwei Monate und vier Monate nach den Veranstaltungen. Außerdem werden mit den bei den Bürgerwerkstätten gewählten Bürgerbotschafter*innen zeitnah nach der Bürgerwerkstatt qualitative Interviews geführt. Das Evaluationsteam ist darüber hinaus auf allen Veranstaltungen anwesend und fertigt Beobachtungsprotokolle an.

Die theoretische Basis der Evaluation bildete ein Logic Model, das zwischen kurzfristigen Ergebnissen zur Bewertung der Bürgerwerkstätten, der Kompetenzentwicklung der Teilnehmenden und längerfristigen Zielen der Risikobewertung und Vertrauensbildung unterscheidet.

Ergebnisse

Insgesamt lässt sich mit Ende des Projektjahres 2022 festhalten, dass zu den Veranstaltungen weniger Teilnehmende erschienen sind als erwartet und sich die Struktur der Teilnehmenden vor allem im Hinblick auf Bildung und Geschlecht von der Allgemeinbevölkerung unterschied. Nichtsdestotrotz wurden die Diskussionen mit reger Anteilnahme geführt und viele Ideen und Vorschläge zur Kommunikationsstrategie des BfS erarbeitet, die als Vorarbeiten für den Workshop der Botschafter*innen dienen.

Nach Auswertung der qualitativen Interviews mit den Bürgerbotschafter*innen lässt sich festhalten, dass die Bürgerwerkstätten aus ihrer Sicht ein Erfolg waren und die angestrebten Ziele des Wissenszuwachs und der veränderten Risikowahrnehmung bei den meisten erreicht wurden.

Die Bürgerwerkstatt selbst wurde auf vielen Achsen als positiv bewertet. Das Format – und hier insbesondere die Diskussion in Kleingruppen – kam sehr gut an und wurde als effektiv empfunden. Die Kleingruppen dienten neben dem Austausch mit anderen Personen für die Teilnehmenden insbesondere dazu, Verständnisprobleme zu klären und sich im Diskurs eine eigene Meinung zu bilden. Dies bildete sozusagen für viele Teilnehmende das „Herzstück“ der Veranstaltung. Auch die Expertenvorträge wurden überwiegend als hilfreich empfunden, auch wenn bei den technischeren Themeneinheiten bei einigen Teilnehmenden Verständnisschwierigkeiten auftraten.

Blickt man auf den Outcome, also die angestrebten Ziele des Projektes, durch die Bürgerwerkstatt das Wissen und die Risikowahrnehmung zu 5G zu verändern, so lässt sich feststellen, dass diese zumindest bei den Bürgerbotschafter*innen erreicht wurden. Die Schlüsselaussagen der Veranstaltung – dass 5G nicht gesundheitsschädlich ist und welche Gründe der Unbedenklichkeit zugrunde liegen – kamen bei fast allen an. Über die bloße Wissensvermittlung hinaus wurden die Teilnehmenden jedoch auch in die Lage versetzt, das Wissen selbst zu nutzen und anzuwenden und erfuhren so auch Selbstwirksamkeit. So sehen sie sich nun befähigt, selbst Grenzwerte nachzuprüfen oder Studien bzw. Informationen auf ihre Glaubwürdigkeit und Seriosität einzuschätzen. Hiermit wurden von vielen Bürgerbotschafter*innen verschiedene Stufen auf Blooms Wissenstaxonomie erreicht, was ein Indikator dafür sein kann, dass dieses Wissen auch effektiv und nachhaltig vermittelt wurde. Trotzdem muss darauf hingewiesen werden, dass sich bei wenigen Teilnehmenden auch nicht-intendierte Gegeneffekte zeigten. So wurde ein Thema, das vorher wenig Relevanz und daher auch wenig gefühltes Risikopotenzial bot, nun auf die persönliche Agenda gebracht. Durch die – eigentlich ja gewünschte – weitere Auseinandersetzung mit dem Thema im Internet oder durch persönliche Gespräche mit entsprechenden Personen veränderte sich die Risikowahrnehmung bei

diesen Personen ins Negative. Diese Gefahr kann wohl nicht vollständig kontrolliert werden und muss bei der Planung und Auswertung solcher Veranstaltungen berücksichtigt werden.

Trotzdem bleibt festzuhalten, dass die Interviews relativ kurz nach den Bürgerwerkstätten durchgeführt wurden. Über die eben erwähnte Nachhaltigkeit lassen sich also noch keine gesicherten Aussagen treffen. Ebenso wurden mit den Bürgerbotschafter*innen nur die engagiertesten der Teilnehmenden befragt. Über den Stand bei allen Teilnehmenden und insbesondere das Vorhalten des neu erworbenen Wissens werden die quantitativ erhobenen Ausgangsbefragungen Auskunft geben. Außerdem wird zu beobachten sein, wie sich die Einstellungen und die Motivation der Bürgerbotschafter*innen auch beim Workshop und der Übergabe der Ratschläge entwickeln und zeigen.

Geplante Weiterarbeit

Die sortierten und erarbeiteten Vorschläge aus den Bürgerwerkstätten werden in einem Botschafter*innen-Workshop im Januar 2023 von den Teilnehmenden ausgearbeitet und zu konkreten Empfehlungen umformuliert. In einer für Mai 2023 geplanten Übergabeveranstaltung werden die Empfehlungen zur Kommunikation dann an das BfS übergeben.

Parallel dazu finden die Durchführung und Auswertung der Ausgangsbefragungen (Welle 2 und 3) statt.

Risiken elektromagnetischer Felder aus Sicht von Allgemeinmediziner*innen und Kinderärzt*innen in Deutschland II

Forschungskennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3621EMF110	02.03.2022	31.08.2023	255.170,70 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Institut und Poliklinik für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin, LMU Klinikum Institut für Kommunikationswissenschaft und Medienforschung, LMU München			
Projektleitung Dr. Tobias Weinmann Dr. Claudia Riesmeyer	Fachbegleitung BfS Lukas Gernand	verantwortlich für den Text Dr. Corinna Lüthje	

Hintergrund

Für den Umgang mit Krankheiten oder gesundheitlichen Beschwerden spielen die Ärzt*innen eine wichtige Rolle. Teil der Bemühungen des BfS, diese verstärkt in die (wissenschaftliche) Diskussion um mögliche Risiken der EMF einzubinden, war die Durchführung einer Untersuchung in den Jahren 2007/08.

Seit der Durchführung dieser Untersuchung sind im deutschsprachigen Raum keine weiteren vergleichbaren oder anschließenden Forschungsarbeiten entstanden. Ziel des vorliegenden Vorhabens ist die Beantwortung der Frage, ob sich der Kenntnisstand der Ärzt*innen sowie der Umgang mit relevanten Beschwerden über die Zeit verändert hat. Dabei soll die Perspektive speziell von Kinderärzt*innen bei dieser Untersuchung besondere Berücksichtigung finden.

Zielsetzung

Ziel des Vorhabens ist es, anhand einer systematischen Erhebung bei Allgemeinmediziner*innen (niedergelassene Ärzt*innen bzw. Hausärzt*innen) und Kinderärzt*innen in Deutschland festzustellen, wie sich das Thema elektromagnetische Felder (EMF) in der Arztpraxis darstellt. Eine Umfrage bei beiden Arztgruppen soll Erkenntnisse über deren Meinungen bezüglich der Rolle elektromagnetischer Felder bei der Suche nach Beschwerdeursachen von Patienten liefern. Dabei sollen der Umgang der Ärzt*innen mit dieser Thematik sowie ihre Informiertheit und eventuell bestehender Informationsbedarf im Bereich EMF festgestellt werden. Darüber hinaus soll festgestellt werden, welche Art von Angebot (Informationen, Weiterbildung, Seminare etc.) die Ärzt*innen unterstützen kann. Da es die zweite Erhebung des BfS zum Thema ist, sollen Vergleiche zur Vorgängerstudie vorgenommen und Erklärungsansätze für eventuelle Veränderungen bzw. Kontinuitäten entwickelt werden.

Umfrage Stellenwert Magnetfelder in der öffentlichen Wahrnehmung des Stromnetzausbaus II

Forschungskennzeichen 3621SNA103	Beginn 13.01.2022	Ende 30.11.2022	Fördermittel 94.443,16 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer aproxima Gesellschaft für Markt- und Sozialforschung Weimar mbH			
Projektleitung Sebastian Götte	Fachbegleitung BfS Lukas Gernand	verantwortlich für den Text Sebastian Götte	

Hintergrund

In Deutschland schreitet der Stromnetzausbau voran. Hervorzuheben ist hierbei die im Jahr 2021 begonnene nächste Phase des Ausbaus sogenannter Hybridleitungen, bei dem bereits bestehende Hochspannungs-Freileitungen für die neuartige gleichzeitige Übertragung von Gleich- und Wechselstrom umgerüstet werden. Diese technologische Neuerung soll im Zuge der Energiewende zur Stromübertragung weit entfernter Offshore-Windkraftparks und Photovoltaikanlagen genutzt werden. Es gibt jedoch zahlreiche Bürgerinitiativen, die sich zum Teil massiv gegen den Leitungsausbau aussprechen. Die Bedenken gegenüber dem Leitungsbau sind in der Bevölkerung äußerst verschieden: Es geht u. a. um die Sinnhaftigkeit des Leitungsbaus, die Gesundheit, den Wertverlust, die Verschandelung der Landschaft u. v. m. Die zum Teil intensive Medienberichterstattung erreicht auch Bevölkerungsgruppen, die nicht direkt vom Leitungsausbau betroffen sind.

Zielsetzung

Diese Umfrage ist die zweite von mehreren geplanten Umfragen zu dem Thema. Sie verfolgt das Ziel, die Stimmungs- und Kenntnislage in der Bevölkerung im Hinblick auf Stromnetze und deren Ausbau zu erfassen und mit der Vorgängerstudie von 2019 zu vergleichen. Um diese Bedenken besser zu verstehen und um ihnen angemessen zu begegnen, braucht es eine geeignete Risikokommunikation seitens des BfS.

Molekulardynamik von Proteinfaltung unter Einfluss von externen magnetischen Feldern

Forschungskennzeichen 3621SNA404	Beginn 01.05.2021	Ende 30.04.2025	Fördermittel 427.623,36 EUR
Forschungs- / Auftragnehmer Constructor University Bremen			
Projektleitung Prof. Dr. Ulrich Kleinekathöfer	Fachbegleitung BfS Dr. Andreas Deser	verantwortlich für den Text Prof. Dr. Ulrich Kleinekathöfer	

Hintergrund

Simulationen sollen helfen, den Effekt von magnetischen Feldern auf der molekularen Ebene besser zu verstehen. Vereinzelt finden sich Berichte über solche Simulationen für einfache Modellsysteme, wobei häufig wegen fehlender Statistik die Aussagekraft dieser Ergebnisse angezweifelt werden muss. Während die Effekte von elektrischen Feldern in Molekulardynamik (MD)-Simulationen besser untersucht sind, ist die Simulation von magnetischen Feldern in häufig benutzten MD-Programmpaketen standardmäßig nicht vorgesehen.

Im Prinzip bieten MD-Simulationen einen attraktiven Ansatz zur Untersuchung der Faltung und Fehlfaltung von Proteinen, da sie Faltungswege und Zwischenstufen in atomistischen Details aufzeigen können. Leider ist die direkte Anwendung von MD-Simulationen zur Untersuchung der Proteinfaltung und -fehlfaltung auf kleine Proteine mit einer Domäne und relativ kurzen Faltungszeiten im Millisekundenbereich beschränkt. Weil schon die Untersuchung von Proteinfaltung mithilfe von MD-Rechnungen ohne äußere Felder ein formidables Problem darstellt, gibt es bisher nur erste Simulationen in Anwesenheit von elektrischen, aber nicht von magnetischen Feldern auf die Faltungsprozesse.

Zielsetzung

Ziel des Projekts ist die molekulare Simulation des Einflusses von externen statischen und niederfrequenten magnetischen Feldern auf biologische Prozesse sowie auf Proteine und insbesondere deren Faltung. Dies soll mithilfe von MD-Rechnungen geschehen. Einige der in der Literatur veröffentlichten Ergebnisse zu einfachen Modellsystemen sollen überprüft werden. Hierbei sind Eigenschaften wie Diffusionskoeffizienten von Wassermolekülen oder die Anzahl der Wasserstoffbrückenbindungen zu überprüfen. Da in biologischen Systemen Ionen und deren Transport eine große Rolle spielen, ist eine detaillierte Untersuchung von Ioneneigenschaften in magnetischen Feldern von großer Bedeutung. Das dadurch erworbene Wissen soll dann auf einfache Faltungsprozesse kleiner Protein(teile) angewandt werden.

Abkürzungen

BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMUV	Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
CT	Computertomographie
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V./ German Institute for Standardisation
EMF	elektromagnetische Felder
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
GSM	Global System Mobile Communication
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICNIRP	International Commission on Non-Ionising Radiation Protection
ICRP	International Commission on Radiological Protection
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
KKW	Kernkraftwerk
MRT/MRI	Magnetresonanztomographie / Magnetic Resonance Imaging
ODL	Ortsdosisleistung
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PCR	Polymerase Chain Reaction
PET-CT	Positronen-Emissions-Tomographie (PET) - Computertomographie
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
RLZ	Radiologisches Lagezentrum des Bundes
RNA	Ribonukleinsäure (Ribonucleic Acid)
RT-PCR	Reverse Transcription-Polymerase Chain Reaction
SAR	spezifische Absorptionsrate
SSK	Strahlenschutzkommission
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
WLAN	Wireless Local Area Network

Kontaktadressen

Fragen nach näheren Informationen über die in diesem Programmreport genannten Projekte können an folgende Stelle gerichtet werden:

Bundesamt für Strahlenschutz

Koordination und administrative Begleitung von Forschungsvorhaben (ZD 2)

Postfach 10 01 49

D-38201 Salzgitter

Tel.: (030) 18333-1526