



Bundesamt  
für Strahlenschutz

Schriften

Strahlenschutzforschung

Programmreport 2020

**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-67/21

**Redaktion:**

Dr. Ulrike Kulka

Dr. Angelika Löbke-Reinl

Dr. Josef Peter

Daniela Merchel

Angela Trugenberger-Schnabel

**Impressum**

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Tel.: +49 30 18333-0

Fax: +49 30 18333-1885

E-Mail: ePost@bfs.de

De-Mail: epost@bfs.de-mail.de

[www.bfs.de](http://www.bfs.de)

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:

urn:nbn:de: 0221-2021121530257

Stand: November 2021

Schriften

# Strahlenschutzforschung

## Programmreport 2020

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

BfS SCHR-67/21

# INHALT

<b>1. ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>1.1 VORBEMERKUNG .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>1.2 EINFÜHRUNG .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>1.3 ZUSAMMENFASSUNG DER FORSCHUNGSERGEBNISSE 2020 .....</b>	<b>XIX</b>
<b>2. ERGEBNISSE (ABSCHLUSSBERICHTE)</b>	
<b>2.1 THEMENBEREICH 01 NATÜRLICHE STRAHLENEXPOSITION</b>	
<b>2.2 THEMENBEREICH 02 STRAHLENSCHUTZTECHNIK</b>	
Studie über die Notwendigkeit, Möglichkeit und Machbarkeit der Ablösung von hochradioaktiven Strahlenquellen durch alternative Technologien in Deutschland ..... 6 3618S22363	
<b>2.3 THEMENBEREICH 03 STRAHLENBIOLOGIE - WIRKUNG VON IONISIERENDER UND NICHTIONISIERENDER STRAHLUNG, STRAHLENEMPFFINDLICHKEIT</b>	
Strahlenresistenzmechanismen in Tumorstammzellen ..... 14 3616S32262	
<b>2.4 THEMENBEREICH 04 MEDIZINISCHE STRAHLENEXPOSITION / RÖNTGENVERORDNUNG</b>	
Erhebung von Häufigkeit und Dosis für nuklearmedizinische Untersuchungsverfahren ..... 22 3617S42443	
Erfassung der Häufigkeit von Strahlentherapien in Deutschland ..... 29 3618S42434	
<b>2.5 THEMENBEREICH 05 RADIOÖKOLOGIE</b>	
Erfassung der aktuellen Kontaminationssituation bei Wildschweinen in Deutschland ..... 38 3617S52531	
Evaluierung des aktuellen Standes bei der Überwachung der Ableitung von radioaktiven Stoffen mit der Fortluft und dem Abwasser in Medizin und Industrie ..... 45 3619S52560	

Freigabekonzepte einer neuen Strahlenschutzverordnung nach EURATOM-Grundnormen 2013 in der Anwendung .....	51
4717E03510	

## **2.6 THEMENBEREICH 06 NOTFALLSCHUTZ**

Ergänzung der Quelltermdatenbank des Entscheidungshilfesystems RODOS für Freisetzen aus dem RDB bei Nichtleistungsbetriebszuständen in Kernkraftwerken .....	58
3617S62560	

Überarbeitung des Maßnahmenkatalogs unter Berücksichtigung von Erfahrungen nach dem Unfall in Fukushima sowie von internationalen Entwicklungen in den letzten Jahren .....	64
3618S62571	

Entwicklung geeigneter Schulungskonzepte für Einsatzszenarien im Radiologischen Lagezentrum zur Optimierung der psychischen und fachlichen Verfasstheit und rollenbezogenen Kompetenzentwicklung .....	70
3618S62572	

Ermittlung der Informations- und Schutzbedürfnisse von Einsatzkräften im Notfallschutz; Ableitung von Empfehlungen zur Verbesserung der Ausbildung, Information und Kommunikation .....	74
3618S62573	

## **2.7 THEMENBEREICH 07 VORHABEN MIT ALLGEMEINER BEDEUTUNG FÜR DEN STRAHLENSCHUTZ**

Weiterentwicklung des atmosphärischen Ausbreitungsmodells ARTM bezüglich weiterer Anwendungsbereiche, Windfeld- und Grenzschichtmodell, Dokumentation .....	82
3616S72575	

Überarbeitung von technischen Strahlenschutznormen aus dem Bereich des Normenausschusses Materialprüfung (NMP) bzw. aus dem K967 des DKE .....	88
3617S72381	

Erweiterung und Aktualisierung von ProZES (Programm zur Berechnung der Zusammenhangswahrscheinlichkeit zwischen einer Erkrankung und einer Strahlenexposition) .....	93
3618S72230	

Machbarkeitsstudie zur mikroskaligen Modellierung von UV-Belastungen in urbanen Umgebungen für verschiedene Bevölkerungsgruppen zur Hautkrebsprävention .....	100
3618S72490	

Möglichkeiten des Zuschnitts von Risikoinformationen im Strahlenschutz auf unterschiedliche Zielgruppen im Internet .....	107
3619S72402	

## **2.8 THEMENBEREICH 08 NICHTIONISIERENDE STRAHLUNG**

### **3. STATUSBERICHTE**

#### **3.1 THEMENBEREICH 01 NATÜRLICHE STRAHLENEXPOSITION**

Fünftes Mortalitäts-Follow-Up (Todesursachen-Recherche) der Kohorte von ca. 60 000 Wismutbeschäftigten zum Stichtag 31.12.2018 ..... 3618S12222	<b>114</b>
Ermittlung der Unsicherheit in der Strahlenexpositionsabschätzung in der Wismut-Kohorte - Teil 2 ..... 3618S12223	<b>117</b>
Ermittlung der aktuellen Verteilung der Radonkonzentration in deutschen Wohnungen ..... 3618S12261	<b>120</b>
Entwicklung von Indikatoren in einem Kriterienkatalog und Durchführung einer Ersterhebung zur Feststellung der Ist-Situation für die Bewertung des nationalen Radonmaßnahmenplans ..... 3619S12272	<b>122</b>
Natürliche Radionuklide in Trinkwasser in der Bundesrepublik Deutschland – Erfassung und Evaluie- rung der im Kontext der Richtlinie 2013/51/Euratom erhobenen TrinkwV Anlage 3a-Daten ..... 3620S12281	<b>125</b>
Wirkung staatlicher Fördermaßnahmen auf die Umsetzung von Radonsanierungsmaßnahmen im Wohnbereich - eine Potenzialanalyse ..... 3620S12282	<b>128</b>

#### **3.2 THEMENBEREICH 02 STRAHLENSCHUTZTECHNIK**

Entwicklung eines kombinierten aero-gammaspektrometrischen Mess- und Beprobungssystems . 3616S22540	<b>132</b>
Aufbau und Charakterisierung eines Referenzfeldes zur Sicherstellung des Strahlenschutzes an Beschleunigeranlagen in Medizin und Forschung und zur Prüfung und Kalibrierung entsprechender Messgeräte ..... 3619S22364	<b>135</b>
Entwicklung eines Ortsdosis- bzw. Ortsdosisleistungsmessgeräts zur Messung der gesetzlichen Messgrößen Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ sowie Richtungs-Äquivalentdosis $H'(0,07)$ im Bereich von 15 keV - 1,3 MeV ..... 3619S22371	<b>138</b>
Bestimmung von Strahlenschutzszenarien als Voraussetzung für eine nachhaltige Gewährleistung des Strahlenschutzes beim Umgang mit Ultrakurzpuls-Lasern (UKP-Laser) u. a. zur Unterstützung eines einheitlichen Vollzugs ..... 3619S2237A	<b>140</b>

### **3.3 THEMENBEREICH 03**

#### **STRAHLENBIOLOGIE - WIRKUNG VON IONISIERENDER UND NICHTIONISIERENDER STRAHLUNG, STRAHLENEMPFFINDLICHKEIT**

Einfluss von Niedrigdosisstrahlung auf die Leukämieentwicklung bei genetischer Prädisposition in einem Mausmodell .....	144
3618S32274	
Bestimmung der Frequenz präleukämischer Translokationen in Nabelschnurblut .....	148
3618S32275	

### **3.4 THEMENBEREICH 04**

#### **MEDIZINISCHE STRAHLENEXPOSITION / RÖNTGENVERORDNUNG**

Evaluation der Brustkrebsmortalität im Deutschen Mammographie-Screening-Programm (Mortalitätsevaluation) - 1. Teil der Hauptstudie .....	154
3617S42402	
Verlängerung der Nachbeobachtungszeit in der REQUITE-Studie zu Nebenwirkungen und Biomarkern für Strahlenempfindlichkeit bei Strahlentherapiepatienten .....	157
3619S42261	
Bestimmung von Mindestanforderungen an Bildqualität und Dosis in der Brusttomosynthese .....	160
3619S42363	
Daten-, Prozess- und Auswertungsaudits im Zuge der Evaluation der Brustkrebsmortalität im Deutschen Mammographie-Screening-Programm (MSP) .....	163
3619S42460	
Konzept zur Umrechnung dosisrelevanter Parameter in der digitalen Volumentomographie .....	166
3619S42462	
Erstellung und Überarbeitung von technischen Normen für den Strahlenschutz und die Qualitätssicherung in der medizinischen Radiologie .....	169
3620S42351	

### **3.5 THEMENBEREICH 05**

#### **RADIOÖKOLOGIE**

Modellierung von Hydrodynamik und Stofftransport bei wassergebundenen Transportprozessen im Strahlenschutz unter Berücksichtigung der Freigabe schwach radioaktiver Stoffe .....	174
3618E03510	
Ermittlung eines generischen Quellterms für die Modellierung der Staubfreisetzung aus NORM mit ARTM unter Berücksichtigung meteorologischer Parameter und relevanter Stoffeigenschaften ....	177
3620S52270	

### **3.6 THEMENBEREICH 06**

#### **NOTFALLSCHUTZ**

Entwicklung ausführlicher Abfallkataster aus radiologischer Sicht für alle im allgemeinen Notfallplan des Bundes beschriebenen Referenzszenarien zur Vorbereitung der Evaluierung des besonderen Notfallplans des Bundes „Abfälle“ .....	182
3618S62575	

Integration des atmosphärischen Ausbreitungsmodells FLEXPART in RODOS zur Erweiterung der Möglichkeiten der inversen Modellierung zur Quellort- und Quelltermbestimmung auf der Grundlage von Messdaten .....	185
3619S62500	
Überprüfung und Weiterentwicklung des radiologischen Lagebildes als Grundlage für Information und Kommunikation im radiologischen Notfallschutz .....	188
3619S62580	
Unterstützung der RLZ-Kopfstelle beim BMU und des Lagezentrums BfS-Neuherberg bei RLZ-Notfallübungen .....	191
3619S62581	
Entwicklung qualitativer und quantitativer Methoden der Analyse von Gamma-Spektren unter Anwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz .....	193
3620S62594	

### **3.7 THEMENBEREICH 07**

#### **VORHABEN MIT ALLGEMEINER BEDEUTUNG FÜR DEN STRAHLENSCHUTZ**

Untersuchungen zur tätigkeitsbezogenen Strahlenexposition bei der mobilen Radiographie .....	202
3617S72382	
Studie zu Aktivitäts- und Partikelgrößenverteilungen im Nano- und Millimeterbereich in der Fortluft kerntechnischer Anlagen mit und ohne Vollfilterung .....	208
3617S72572	
Fortschreibung der Untersuchung und Bewertung der tätigkeitsbezogenen Strahlenexposition in Anlagen nach AtG und standortnahen Zwischenlagern für radioaktive Abfälle .....	211
3618S72392	
Validierung des atmosphärischen Ausbreitungsmodells ARTM durch experimentelle Untersuchungen .....	215
3618S7259A	
Repräsentative Umfrage zur deutschlandweiten Erfassung verhältnispräventiver Maßnahmen zur Vorbeugung UV- bedingter Erkrankungen bei Kindertagesstätten und Schulen .....	218
3619S72401	
Blendattacken und Augenschädigungen durch Laser und andere starke optische Strahlungsquellen .....	221
3620S72410	
Erfassung der Schallfelder von frei am Markt erhältlichen Ultraschallquellen: Abschätzung des Schädigungspotentials .....	224
3620S72412	

### **3.8 THEMENBEREICH 08**

#### **NICHTIONISIERENDE STRAHLUNG**

Leukämie im Kindesalter - Einfluss des Immunsystems auf die Entstehung der Erkrankung (experimentelle Studie an einem geeigneten Tiermodell) .....	228
3616S82440	
Bewertende Literaturstudie zum Auftreten, zur Ausbreitung und zu gesundheitlichen Auswirkungen von ionisierten Schadstoffpartikeln in der Umgebung von Starkstromleitungen .....	231
3618S82453	

Berücksichtigung aktueller Mobilfunkantennentechnik bei der HF-EMF-Expositionsbestimmung .. 3619S82463	234
Bewertende Literaturstudie zum Einfluss elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf oxidative Prozesse bei Menschen sowie in Tier- und Laborstudien .....	237
3619S82464	
Detaillierte vergleichende Analyse der Alters- und Geschlechtsabhängigkeit des Einflusses hochfrequenter elektromagnetischer Felder von Mobilfunk-Endgeräten auf Gehirnaktivität, Schlaf und kognitive Leistungsfähigkeit .....	240
3619S82465	
Machbarkeitsstudie eines auf Smartphone-Apps beruhenden Hochfrequenz-Messnetzwerkes zur Abschätzung der Exposition der Bevölkerung mit elektromagnetischen Feldern des Mobilfunks ...	244
3619S82468	
Wirkungen auf Zellen der Körperoberfläche bei Expositionen mit Zenti- und Millimeterwellen (5G-Frequenzen) .....	247
3619S82470	
Sichtweisen der Bevölkerung auf den 5G-Mobilfunkstandard und dessen kommunikative Darstellung .....	249
3620S82471	
Systematische Review zum Einfluss elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf die Fruchtbarkeit bei Menschen sowie in Tier- und Laborstudien .....	252
3620S82475	

### **3.9 THEMENBEREICH 09**

#### **DEUTSCHES MOBILFUNK FORSCHUNGSPROGRAMM / STROMNETZAUSBAU**

Erprobung, Weiterentwicklung und Validierung von neuartiger Messtechnik für statische und niederfrequente elektrische und magnetische Felder .....	256
3619S92411	
Untersuchung der Möglichkeiten einer Fortbildung von Multiplikatoren in lokalen Behörden (Gesundheitsämter, Amtsärzte und Immissionsschutzämter) für die Risikokommunikation beim Stromnetzausbau .....	259
3619S92412	
Untersuchung zum Auftreten von Leukämie bei prädisponierten, Magnetfeld-exponierten Tiermodellen .....	262
3620S92410	
Nutzung von Mobiltelefonen und Verlauf der Gliom-Inzidenz seit 1979 .....	265
FM 8867	

#### **4. 2020 BEGONNENE FORSCHUNGSVORHABEN, ZU DENEN NOCH KEINE ERGEBNISSE VORLIEGEN**

Ermittlung von charakteristischen Expositionsbedingungen bei Radon an Arbeitsplätzen in Innenräumen .....	270
3620S12380	
Validierung genetischer Loci, die das Lungenkrebsrisiko in Abhängigkeit von der Radonexposition beeinflussen - Qualitätssicherung und Auswertung .....	271
3620S32271	

Erweiterung des Anwendungsbereichs der Werkzeuge zur Kombination anlagentechnischer und radiologischer Informationen zur Einschätzung von Freisetzungen .....	272
3620S62501	
Erfassung des Umgangs der deutschen Bevölkerung mit Radon als Grundlage für Risikokommunikation und Stärkung des Schutzverhaltens .....	273
3620S72211	
Eine vergleichende Evaluation der Online-Krisenkommunikation von Behörden und unabhängigen Expert*innen im Zuge der Covid-19 Pandemie als Grundlage für die Verbesserung der BfS-Krisenkommunikation - Los 1 .....	274
3620S72215	
Eine vergleichende Evaluation der Online-Krisenkommunikation von Behörden und unabhängigen Expert*innen im Zuge der Covid-19 Pandemie als Grundlage für die Verbesserung der BfS-Krisenkommunikation - Los 2 .....	275
3620S72216	
Beteiligung an einer Folgestudie zur Verifikation oder Falsifikation der Ergebnisse der NTP-Langzeitstudie an Mäusen und Ratten zu Ganzkörperexposition mit Mobilfunkfeldern .....	276
3620S82474	
Mobilfunkkonflikte aus der Vergangenheit als Lehrbeispiel für Kommunikationsstrategie 5G? .....	277
3620S82476	
Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen .....	278
Abkürzungen .....	282

# CONTENT

<b>1. SUMMARY .....</b>	<b>XXV</b>
<b>1.1 PREFACE .....</b>	<b>XXV</b>
<b>1.2 INTRODUCTION .....</b>	<b>XXV</b>
<b>1.3 SUMMARY OF RESULTS FROM RESEARCH PROJECTS IN 2020 .....</b>	<b>XXVI</b>
<b>2. RESULTS (FINAL REPORTS)</b>	
<b>2.1 SUBJECT AREA 01 NATURAL RADIATION EXPOSURE</b>	
<b>2.2 SUBJECT AREA 02 RADIATION PROTECTION TECHNIQUES</b>	
<i>Study about the necessity, possibility and feasibility to supplant technologies using high-activity sealed sources with alternative technologies (not using ionising radiation).....</i>	<b>6</b>
3618S22363	
<b>2.3 SUBJECT AREA 03 RADIATION BIOLOGY - EFFECTS OF IONISING AND NON-IONISING RADIATION, RADIOSENSITIVITY</b>	
<i>Mechanisms of radioresistance in cancer stem cells.....</i>	<b>14</b>
3616S32262	
<b>2.4 SUBJECT AREA 04 MEDICAL RADIATION EXPOSURES / X-RAY ORDINANCE</b>	
<i>Survey to determine frequency and radiation dose from nuclear medical diagnostics.....</i>	<b>22</b>
3617S42443	
<i>Recording the frequency of radiotherapy in Germany .....</i>	<b>29</b>
3618S42434	
<b>2.5 SUBJECT AREA 05 RADIOECOLOGY</b>	
<i>Assessment of contamination levels of wild boar (Sus scrofa) in Germany.....</i>	<b>38</b>
3617S52531	
<i>Evaluation of the current status in monitoring the discharge of radioactive substances with the exhaust air and water in medicine and industry.....</i>	<b>45</b>
3619S52560	
<i>Concepts for clearance according to a new radiation protection ordinance based on the Euratom Basic Safety Standards of 2013 in practice.....</i>	<b>51</b>
4717E03510	

**2.6 SUBJECT AREA 06  
EMERGENCY MANAGEMENT**

*Extension of the source term data bank of the decision support system RODOS for the release from the RPV during shutdown modes.....* 58  
3617S62560

*Revision of the Catalog of Protective Measures taking into account experiences after the Fukushima accident and international developments in recent years .....* 64  
3618S62571

*Design of specific training concepts for competence development in the context of operational scenarios in the Federal Radiological Situation Centre.....* 70  
3618S62572

*Identification of information and safety needs among emergency responders; Derivation of recommendations to improve education, information and communication.....* 74  
3618S62573

**2.7 SUBJECT AREA 07  
PROJECTS OF GENERAL IMPORTANCE TO RADIATION PROTECTION**

*Enhancement of the atmospheric dispersion model ARTM considering additional areas of application, wind field and boundary layer models, and documentation .....* 82  
3616S72575

*Revision of technical radiation protection standards in the range of the Materials Testing Standards Committee (NMP) and from the working group K967 of the German Commission on Electrical Engineering .....* 88  
3617S72381

*Extension and update of ProZES (program for assesement of assigned share between cancer and radiation exposure).....* 93  
3618S72230

*Feasibility study for micro-scale modelling of UV exposure in urban environments for skin cancer prevention of different population groups .....* 100  
3618S72490

*Possibilities of tailoring risk information in radiation protection to different target groups on the Internet.....* 107  
3619S72402

## **2.8 SUBJECT AREA 08 NON-IONISING RADIATION**

### **3. STATUS REPORTS**

#### **3.1 SUBJECT AREA 01 NATURAL RADIATION EXPOSURE**

<i>Fifth mortality follow-up of the cohort of approximately 60 000 former Wismut employees with cut-off date December 31st, 2018 .....</i>	<b>114</b>
3618S12222	
<i>Determination of uncertainties of radiation exposure assessment in the Wismut cohort - part 2 ...</i>	<b>117</b>
3618S12223	
<i>Determination of the distribution of indoor radon concentration in Germany .....</i>	<b>120</b>
3618S12261	
<i>Development of indicators in a catalogue of criteria and initial survey of the actual situation of the national radon action plan .....</i>	<b>122</b>
3619S12272	
<i>Natural radionuclides in drinking water in the Federal Republic of Germany - collection and evaluation of the Drinking Water Ordinance Annex 3a Data Collected in the context of Directive 2013/51/Euratom .....</i>	<b>125</b>
3620S12281	
<i>Impact of state subsidies on implementing radon remediation measures in the housing sector - an analysis of potentials .....</i>	<b>128</b>
3620S12282	

#### **3.2 SUBJECT AREA 02 RADIATION PROTECTION TECHNIQUES**

<i>Development of a combined aero-gammaspectrometric system of measurement and sampling....</i>	<b>132</b>
3616S22540	
<i>Establishing a reference field for radiation protection in medical and research applications and calibration of measurement devices.....</i>	<b>135</b>
3619S22364	
<i>Development of a compact device for measuring the local dose and local dose rate to determine the ambient equivalent dose <math>H^*(10)</math> and directional dose equivalent <math>H'(0.07)</math> for an energy range of 15 keV - 1.3 MeV .....</i>	<b>138</b>
3619S22371	
<i>Determination of radiation protection scenarios as a prerequisite for a sustainable guarantee of radiation protection when using ultra-short pulse lasers (UKP lasers), inter alia to support uniform enforcement .....</i>	<b>140</b>
3619S2237A	

### **3.3 SUBJECT AREA 03**

#### **RADIATION BIOLOGY - EFFECTS OF IONISING AND NON-IONISING RADIATION, RADIOSENSITIVITY**

<i>Influence of low-dose radiation on leukemia development in a genetically predisposed mouse model.....</i>	<b>144</b>
3618S32274	
<i>Determination of the frequency of preleukemic translocations in umbilical cord blood.....</i>	<b>148</b>
3618S32275	

### **3.4 SUBJECT AREA 04**

#### **MEDICAL RADIATION EXPOSURES / X-RAY ORDINANCE**

<i>Evaluation of the breast cancer mortality in the German mammography-screening-program.....</i>	<b>154</b>
3617S42402	
<i>Extension of the follow-up in the REQUITE study on side effects and biomarkers for radiation sensitivity in radiotherapy patients .....</i>	<b>157</b>
3619S42261	
<i>Determination of minimum requirements for image quality and dose in breast tomosynthesis.....</i>	<b>160</b>
3619S42363	
<i>Data, process and evaluation audits in the course of the evaluation of breast cancer mortality in the German Mammography Screening Program (MSP).....</i>	<b>163</b>
3619S42460	
<i>Development of a concept to convert dose quantities on cone beam computed tomography scenarios.....</i>	<b>166</b>
3619S42462	
<i>Preparation and revision of technical standards for radiation protection and quality assurance in medical radiology .....</i>	<b>169</b>
3620S42351	

### **3.5 SUBJECT AREA 05**

#### **RADIOECOLOGY**

<i>Modelling of hydrodynamics and mass transport in water-bound transport processes in radiation protection considering clearance of material with negligible activity.....</i>	<b>174</b>
3618E03510	
<i>Evaluation of a generic source term for modelling of dust dispersion from NORM material using ARTM computer code considering meteorological parameter and relevant material properties.....</i>	<b>177</b>
3620S52270	

### **3.6 SUBJECT AREA 06 EMERGENCY MANAGEMENT**

<i>Development of detailed radiological waste registers for all reference scenarios described in the general emergency plan of the Federal Government of Germany for the preparation of the evaluation of the special emergency plan .....</i>	<b>182</b>
3618S62575	
<i>Integration of the atmospheric dispersion model FLEXPART into RODOS to extend the capabilities of inverse modeling for source location and source term determination based on measured data .</i>	<b>185</b>
3619S62500	
<i>Review and further development of the radiological situation report as basis for information and communication in radiological emergency management .....</i>	<b>188</b>
3619S62580	
<i>Support of the RLZ head office at the BMU and the situation centre BfS-Neuherberg during RLZ emergency exercises .....</i>	<b>191</b>
3619S62581	
<i>Machine learning and artificial intelligence: applications in environmental radiation monitoring ..</i>	<b>193</b>
3620S62594	

### **3.7 SUBJECT AREA 07 PROJECTS OF GENERAL IMPORTANCE TO RADIATION PROTECTION**

<i>Survey of activity-related occupational dose exposure during mobile radiography.....</i>	<b>202</b>
3617S72382	
<i>Study on the distribution of activity and particle sizes in the nano- and millimetre range in gaseous effluents from nuclear installations with and without filter .....</i>	<b>208</b>
3617S72572	
<i>Update of the investigation and evaluation of task-related radiation exposure in nuclear facilities and on-site interim storage facilities for radioactive waste .....</i>	<b>211</b>
3618S72392	
<i>Validation of atmospheric dispersion model ARTM by field studies.....</i>	<b>215</b>
3618S7259A	
<i>Representative survey to record structural measures for the prevention of UV-induced diseases in childcare facilities and schools in Germany .....</i>	<b>218</b>
3619S72401	
<i>Dazzle attacks and eye injuries by lasers and other powerful sources of optical radiation.....</i>	<b>221</b>
3620S72410	
<i>Survey of sound fields of publicly available ultrasound sources: Evaluation of the potential hazards.....</i>	<b>224</b>
3620S72412	

### **3.8 SUBJECT AREA 08 NON-IONISING RADIATION**

<i>Childhood leukemia - influence of the immune system on the development of the disease (experimental study in a suitable animal model) .....</i>	<b>228</b>
3616S82440	
<i>Study and evaluation of literature on occurrence, spread and health effects of ionised pollutant particles in the vicinity of power lines.....</i>	<b>231</b>
3618S82453	
<i>Consideration of current mobile radio antenna technology for RF-EMF exposure assessment .....</i>	<b>234</b>
3619S82463	
<i>Assessed literature study on the influence of electric, magnetic and electromagnetic fields on oxidative processes in humans as well as in animal and laboratory studies .....</i>	<b>237</b>
3619S82464	
<i>Detailed comparative analysis of age and sex related effects of radiofrequency electromagnetic fields from mobile telephony devices on brain activity, sleep and cognitive performance .....</i>	<b>240</b>
3619S82465	
<i>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.....</i>	<b>244</b>
3619S82468	
<i>Effects of centi- and millimeter wave exposure (5G frequencies) on cells of the body surface .....</i>	<b>247</b>
3619S82470	
<i>Views of the population on the 5G mobile phone standard and its communicative presentation....</i>	<b>249</b>
3620S82471	
<i>Systematic review on the influence of electric, magnetic and electromagnetic fields on adverse fertility outcomes in humans as well as in animal and laboratory studies.....</i>	<b>252</b>
3620S82475	

### **3.9 SUBJECT AREA 09 GERMAN MOBILE TELECOMMUNICATION RESEARCH PROGRAMME / NATIONAL GRID EXPANSION**

<i>Testing, development and validation of new measurement techniques for static and low-frequency electric and magnetic fields.....</i>	<b>256</b>
3619S92411	
<i>Analysis of the possibilities of an advanced training for multipliers in local authorities (public health departments, public health officers and immission control offices) for risk communication during the expansion of the electricity grid .....</i>	<b>259</b>
3619S92412	
<i>Investigation of leukemia development in predisposed animal models exposed to magnetic fields</i>	<b>262</b>
3620S92410	
<i>The use of mobile phones and the development of glioma incidence since 1979 .....</i>	<b>265</b>
FM 8867	

#### **4. Research projects initiated in 2020 of which results are not available yet**

<i>Determination of characteristic conditions of exposures to radon at indoor workplaces.....</i>	<b>270</b>
3620S12380	
<i>Validation of genetic loci that modify the risk of lung cancer interacting with radon exposure - quality assurance and evaluation.....</i>	<b>271</b>
3620S32271	
<i>Enhancement of the application range for tools which combine plant and radiological information to assess radioactive releases.....</i>	<b>272</b>
3620S62501	
<i>Survey of the German population's dealing with radon as a basis for risk communication and strengthening of protective behavior.....</i>	<b>273</b>
3620S72211	
<i>A comparative evaluation of the online crisis communication of authorities and independent experts in the course of the Covid 19 pandemic as a basis for improving BfS crisis communication - Lot 1..</i>	<b>274</b>
3620S72215	
<i>A comparative evaluation of the online crisis communication of authorities and independent experts in the course of the Covid 19 pandemic as a basis for improving BfS crisis communication - Lot 2..</i>	<b>275</b>
3620S72216	
<i>Participation in a follow-up study for verification or falsification of the results of the NTP-longterm study concerning whole body exposure of mice and rats in mobile communications radio frequency fields.....</i>	<b>276</b>
3620S82474	
<i>Media-historical conflicts of mobile communication as a learning exercise of communication about the 5th generation (5G) of mobile networks.....</i>	<b>277</b>
3620S82476	
Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen .....	<b>278</b>
Abbreviations .....	<b>282</b>

# 1. ZUSAMMENFASSUNG

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) vergibt im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 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 Bundesamtes für Strahlenschutz. Der vorliegende Bericht informiert über Ergebnisse (in Form von Abschlussberichten) bzw. Zwischenergebnisse (in Form von Statusberichten) von Strahlenschutzvorhaben des BMU-Ressortforschungsplans, die im Jahr 2020 erzielt wurden.

## 1.1 Vorbemerkung

Der Schutz von Mensch und Umwelt vor den Gefahren der ionisierenden und nichtionisierenden Strahlung ist eine zentrale Aufgabe des BMU und des Bundesamtes für Strahlenschutz. 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 ist 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).

## 1.2 Einführung

Im Folgenden werden alle **Themenbereiche** (TB) der Strahlenschutzforschung näher erläutert, auch wenn 2020 keine Vorhaben in einem Bereich durchgeführt wurden.

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, damit frühzeitig mit geeigneten Maßnahmen einer Gefährdung von Mensch und Umwelt entgegengewirkt werden kann.

Eine Voraussetzung für viele Untersuchungen, aber auch für den Nachweis der Einhaltung der Dosisgrenzwerte, ist die Verfügbarkeit entsprechender Messtechniken und Verfahren zur Dosismittlung. 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 BMU-Umweltforschungsplan. 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 ist die Ermittlung und Optimierung von Vorsorgemaßnahmen zur Vermeidung von Störfällen und Unfällen eine ständige Aufgabe 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.

Darüber hinaus werden in einer Reihe von Vorhaben Fragen von **allgemeiner Bedeutung für den Strahlenschutz** (TB 07) untersucht.

In den letzten Jahrzehnten haben Änderungen im Freizeitverhalten und neue Modetrends dazu geführt, dass sich immer größere Teile der Bevölkerung immer länger der Sonne aussetzen sowie künstlich erzeugte UV-Strahlung in Solarien nutzen. Dieser Wandel macht neue Konzepte und Forschungsvorhaben im Bereich des Schutzes vor UV-Strahlung erforderlich.

Die Umgebung des Menschen ist in zunehmendem Maße geprägt durch die Gegenwart und den Einsatz elektrischer Geräte sowie durch die rasante Entwicklung bei den elektronischen Medien und der drahtlosen Kommunikation. Diese sich noch ausweitende Entwicklung hat zu neuen Aufgaben im Bereich des Schutzes vor der Wirkung **nichtionisierender Strahlung** (TB 08) geführt.

Im **Deutschen Mobilfunk-Forschungsprogramm (DMF)** (TB 09) wurden in systematischen Untersuchungen Wirkungen der verschiedenen Anwendungen nichtionisierender Strahlung auf den Menschen weiter erforscht. Die Untersuchungsvorhaben des DMF lagen schwerpunktmäßig in den Bereichen Biologie, Epidemiologie, Dosimetrie und Risikokommunikation. Die Vorhaben, die sowohl vom Bundesumweltministerium als auch den Betreibern der Mobilfunknetze in Deutschland finanziert wurden, wurden allein vom BfS vergeben und fachlich betreut, so dass interessensgesteuerte Einflüsse ausgeschlossen waren. Ein ähnliches Programm wurde für den **Stromnetzausbau** initiiert.

### 1.3 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse 2020

Im Folgenden wird über Ergebnisse im Jahr 2020 abgeschlossener Forschungsvorhaben berichtet.

#### THEMENBEREICH 01 - NATÜRLICHE STRAHLENEXPOSITION

2020 wurde in diesem Themenbereich kein Vorhaben abgeschlossen.

#### THEMENBEREICH 02 - STRAHLENSCHUTZTECHNIK

Hochradioaktive Strahlenquellen (HRQ) werden in Deutschland auf Grund der nutzbringenden Eigenschaften der damit verbundenen Anwendungen auch zukünftig verwendet werden. Ein differenzierter Blick der „**Studie über die Notwendigkeit, Möglichkeit und Machbarkeit der Ablösung von hochradioaktiven Strahlenquellen durch alternative Technologien in Deutschland**“ (3618S22363) auf die zahlreichen Anwendungsbereiche offenbart jedoch das Potential, einen Teil der HRQ durch alternative Technologien zu ersetzen. Die Bewertungen der Alternativtechnologien resultieren aus Umfragen unter Anwendern von HRQ. Dadurch ergibt sich ein subjektiver, anwendungsorientierter Einblick in ihre Motivation und Bedürfnisse, die entscheidend dafür sind, wie eine erfolgreiche Strategie zur Vermeidung von HRQ aussehen kann. Insbesondere wird dadurch deutlich, welche Anreize erfolversprechend sein können.

### **THEMENBEREICH 03 - STRAHLENBIOLOGIE - WIRKUNG VON IONISIERENDER UND NICHTIONISIERENDER STRAHLUNG, STRAHLENEMPFLINDLICHKEIT**

Im Forschungsvorhaben „**Strahlenresistenzmechanismen in Tumorstammzellen**“ (3616S32262) wurde die Wirkung von Röntgenstrahlung und von beschleunigten Kohlenstoffionen auf drei Gliom-/Glioblastomstammzelllinien (GSZ) untersucht, um Strahlenresistenzmechanismen zu identifizieren. Die GSZ zeigten zahlreiche strukturelle und numerische Chromosomenaberrationen, innerhalb jeder Zelllinie wurden mehrere Subpopulationen identifiziert. Im Tumorsphärenassay ließ ein abflachender Verlauf der Dosis-Wirkungs-Kurve bei hohen Dosen auf eine strahlenresistente Subpopulation schließen. Die Analyse der Reparatur von DNA-Doppelstrangbrüchen mittels eines gamma-H2AX-Foci-Assays zeigte einen typischen biphasischen Verlauf, die Zellzyklusanalysen einen lang anhaltenden Arrest nach Bestrahlung. Insgesamt unterschieden sich die analysierten Endpunkte nur wenig zwischen Kohlenstoff- und Röntgenbestrahlung. Auf Grundlage von Transkriptomanalysen wurden die Gene FoxM1, Parp3 oder AurkB für Knockdown-Experimente ausgewählt. Durch Knockdown jeweils eines Gens erhöhte sich die Strahlenempfindlichkeit mindestens einer der GSZ signifikant.

### **THEMENBEREICH 04 - MEDIZINISCHE STRAHLENEXPOSITION / RÖNTGENVERORDNUNG**

Neun Jahre nach der letzten bundesweiten Erfassung von Daten zu nuklearmedizinischen Untersuchungen in Deutschland wurde erneut eine umfassende „**Erhebung von Häufigkeit und Dosis für nuklearmedizinische Untersuchungsverfahren**“ (3617S42443) für die Jahre 2016-2017 durchgeführt. Die Zusammensetzung an Untersuchungen hat sich zwischen den beiden Erhebungszeiträumen relevant geändert. Insbesondere der Anteil der PET-Bildgebung ist relevant angestiegen. Die applizierten Aktivitäten zeigen bei Untersuchungen, für die diagnostische Referenzwerte vorliegen, vielfach eine Konvergenz zu diesen Werten. Dennoch wurden weiterhin zahlreiche Einrichtungen beobachtet, bei denen applizierte Aktivitäten zum Teil relevant oberhalb der DRW liegen. Bei Untersuchungen, für die keine DRW existieren, liegen die lokal im Mittel applizierten Aktivitäten teilweise wesentlich auseinander. Die mit nuklearmedizinischen Untersuchungen einhergehende effektive Dosis berechnet sich im Mittel um mehr als 25% niedriger als in der davorliegenden Erhebung. Die Änderung ist im Wesentlichen auf Änderungen der ICRP-Dosiskoeffizienten zurückzuführen. Darüber hinaus wurden erstmalig in Deutschland systematisch Daten zur Strahlenexposition durch computertomographische Untersuchungen im Rahmen der Hybridbildgebung erhoben. Es zeigt sich, dass die Verteilungen der Dosiswerte der diagnostischen Untersuchungen und solcher zur Schwächungskorrektur und anatomischen Koregistrierung deutlich überlappen. Dieses legt nahe, dass hier diagnostische Referenzwerte zur Steuerung der Strahlenanwendung sinnvoll sind.

Datengrundlage des Vorhabens „**Erfassung der Häufigkeit von Strahlentherapien in Deutschland**“ (3618S42434) waren die verfügbaren Statistiken zu Einheitlichem Bewertungsmaßstab (EBM), Gebührenordnung für Ärzte (GOÄ) und Operationen- und Prozedurenschlüssel (OPS). Diese sind sehr heterogen, so dass sie sich nur näherungsweise über eine Mappingtabelle zusammenführen lassen. Um Datenlücken zu schließen (z. B. zum Behandlungsanlass) und um die Modalitäten bei der technischen Umsetzung von Strahlentherapien sowie der vorgelagerten Bestrahlungsplanungen zu eruieren, wurden gesonderte Erhebungen durchgeführt. Die Gesamtanzahl der Strahlentherapien in Deutschland im Jahr 2016 wurde auf 469 000 (+/- 12 %) geschätzt. Mindestens 20 % der Strahlentherapien malignen Tumoren erfolgten stationär. Für die Fortführung des Projektes in Eigenregie durch das BfS wird eine vereinfachte mengengerüstgestützte Analyse empfohlen. In bestimmten Zeitabständen (z. B. alle drei bis fünf Jahre) sollte diese durch eine differenzierte Analyse auf Basis von Einzeldatensätzen ergänzt werden.

## THEMENBEREICH 05 - RADIOÖKOLOGIE

Im Forschungsvorhaben „**Erfassung der aktuellen Kontaminationssituation bei Wildschweinen in Deutschland**“ (3617S52531) wurde die Cs-137-Kontaminationssituation von Wildschweinen in 3 Untersuchungsgebieten von 2017 bis 2020 exemplarisch evaluiert. Das Vorhaben war in 3 Arbeitspakete (AP) unterteilt. Im ersten Arbeitspaket wurde die Verteilung der Körpergewichte der Wildschweine auf Grund von recherchierten Erlegungsdaten aus den 3 Untersuchungsgebieten modelliert. Die in AP 2 durchgeführte Bestimmung der Biomasse der Fruchtkörper von Hirschtrüffeln ergab, je nach Untersuchungsgebiet, durchschnittlich 82 g bis 320 g pro 4 Quadratmeter Waldbodenfläche. Die Cs-137-Messwerte von 45 Hirschtrüffeln reichten von 226 Bq/kg (Untersuchungsgebiet Dahn) bis 16 908 Bq/kg (Untersuchungsgebiet Zusmarshausen). Insgesamt wurden in AP 3 Proben von 451 Wildschweinen auf Cs-137-Aktivität gemessen. In jedem Untersuchungsgebiet variierte die Cs-137-Aktivität um 3 Größenordnungen. Die Spannweite aller Messwerte reichte von 2 Bq/kg aus Dahn bis 17 326 Bq/kg aus Bodenmais/Bayerisch Eisenstein. Die saisonalen Schwankungen der Messwerte sind wesentlich vom Nahrungsangebot und der Jagdstrategie beeinflusst.

Im Rahmen des Vorhabens „**Evaluierung des aktuellen Standes bei der Überwachung der Ableitung von radioaktiven Stoffen mit der Fortluft und dem Abwasser in Medizin und Industrie**“ (3619S52560) wurden die betreffenden Emittentengruppen ermittelt. Nur bei einem kleinen Teil der Genehmigungsinhaber können im Normalbetrieb Ableitungen von radioaktiven Stoffen mit der Fortluft oder dem Abwasser oberhalb der in der Anlage 11 der Strahlenschutzverordnung aufgeführten Aktivitätskonzentrationen auftreten. In allen solchen Fällen wird nach stichprobenartiger Untersuchung eine Überwachung der Ableitungen samt Bilanzierung vorgenommen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „**Freigabekonzepte einer neuen Strahlenschutzverordnung nach EURATOM-Grundnormen 2013 in der Anwendung**“ (4717E03510) wurden den in der Strahlenschutzverordnung von 2017 (im Folgenden kurz StrlSchV (2017)) aufgeführten Freigabepfaden zugrunde liegende radiologische Modelle aus den entsprechenden Forschungsberichten und Stellungnahmen recherchiert, extrahiert und aufbereitet, wobei im ersten Schritt die eigentlichen Forschungsberichte mit den für die Berechnung der Freigabewerte zugrunde liegenden Parametern und Gleichungen recherchiert wurden. Es konnte gezeigt werden, dass die in der StrlSchV (2017) angegebenen Freigabewerte weitestgehend konsistent mit jenen in der recherchierten Literatur sind. Des Weiteren wurden die Randbedingungen der Modelle für die Berechnung der Freigabewerte in der StrlSchV (2017) identifiziert, deren Herkunft recherchiert und beschrieben. Es hat sich gezeigt, dass die Angaben hinsichtlich der Modell-Randbedingungen weitestgehend plausibel und inhaltlich konsistent sind. Aufbauend auf den vorgenannten Erkenntnissen wurden die wesentlichen Modellparameter der radiologischen Modelle zur Berechnung der Freigabewerte identifiziert und deren Variationsbandbreite diskutiert. Den in der aktuellen Strahlenschutzverordnung festgelegten Freigabewerten für die uneingeschränkte Freigabe liegen „generalisierte“ Expositionsszenarien zugrunde, welche die große Bandbreite an Expositionssituationen darstellen. Für eine Auswahl an Nukliden wurde neben der üblichen deterministischen Berechnung aus den gegebenen (realistischen und unwahrscheinlichen) Parameterwerten auch ein probabilistischer Ansatz beruhend auf Parameterwertverteilungen untersucht. Für ausgewählte Freigabepfade wurden die Berechnungen von Freigabewerten mit frei erhältlichen Rechencodes durchgeführt. Die Plausibilität der Ergebnisse wurde durch Vergleichsrechnungen anderer Organisationen überprüft (Benchmarking). Im Szenario Ingestion wurden mit dem Programmsystem Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell (ARTM) bei zwei Nukliden deutlich niedrigere Freigabewerte berechnet als in der Literatur. Auch Vergleichsrechnungen kamen zu einem ähnlichen Ergebnis.

## THEMENBEREICH 06 - NOTFALLSCHUTZ

Die Prognosefähigkeit der von Unfällen kerntechnischer Anlagen ausgehenden Gefährdung während des Nichtleistungsbetriebes (NLB) ist mit dem Vorhaben „**Ergänzung der Quelltermdatenbank des Entscheidungshilfesystems RODOS für Freisetzungen aus dem RDB bei Nichtleistungsbetriebszuständen in Kernkraftwerken**“ (3617S62560) auf den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik (WuT) gebracht worden. Die vorliegende Aktualisierung umfasste die Revision von Vorarbeiten zum Nichtleistungsbetrieb (AP 1), wobei das identifizierte Spektrum an Unfallsequenzen als abdeckend angesehen und somit für Unfallsimulationen herangezogen worden ist. Die hierfür verwendeten Modelle (physikalisch und auf Seiten des Anlagenmodells) sind ebenfalls auf dem aktuellen Stand von WuT (AP 2) gewesen. Die Umwandlung der resultierenden Freisetzungen aus den Sequenzen in die Form von freigesetzten Aktivitäten relevanter Radionuklide in einem RODOS-kompatiblen Format ist im Zuge der Entwicklung einer NLB-Version des GRS-Quellterm(QT)-Prognosewerkzeuges FaSTPro durchgeführt worden (AP 3), welche ebenfalls auf Vorarbeiten basiert. Mittels des BBN (Bayesian Belief Network) ist das Programm in der Lage, QT-Prognosen anzustellen und auch auf den zugehörigen aktuellen Anlagenstatus zu schließen. Für die Übung der Benutzung dieses Werkzeuges ist eine vereinfachte Notfallübung als Präsentation abgehalten worden, in der die Besonderheiten des Nichtleistungsbetriebes anhand von Unterlagen dargestellt worden sind (AP 5). Diese Unterlagen basieren auf dem MELCOR-Rechenfall NLB-B und sind mit einer plausiblen Rahmenhandlung versehen worden, so dass ein Übungsdrehbuch für eine Notfallübung entstehen konnte (AP 4). Mit den hier dargestellten Arbeiten konnte somit die Fähigkeit zur Lagebeurteilung radiologischer Gefährdungen verbessert werden.

Das Vorhaben „**Überarbeitung des Maßnahmenkatalogs unter Berücksichtigung von Erfahrungen nach dem Unfall in Fukushima sowie von internationalen Entwicklungen in den letzten Jahren**“ (3618S62571) diente dazu, den Überarbeitungsbedarf für den von der Strahlenschutzkommission ausgearbeiteten Maßnahmenkatalog zu ermitteln und mit der Umsetzung der Überarbeitung zu beginnen. Im Vorhaben wurden Einschätzungen zur weiteren Verwendung bzw. zum Anpassungsbedarf von Maßnahmen gegeben. Die Einschätzungen bezogen sich dabei auf die Praktikabilität, zeitgemäße Verwendung und zukünftige Anwendbarkeit der Maßnahmen, wobei insbesondere Erfahrungen aus dem Reaktorunfall in Fukushima berücksichtigt wurden. Darüber hinaus umfasste das Vorhaben weitere Ergänzungsmöglichkeiten hinsichtlich bisher im Maßnahmenkatalog nicht aufgeführter Maßnahmen. Insgesamt wurden 255 Maßnahmen aufgezeigt.

Im Forschungsprojekt „**Entwicklung geeigneter Schulungskonzepte für Einsatzszenarien im Radiologischen Lagezentrum zur Optimierung der psychischen und fachlichen Verfasstheit und rollenbezogenen Kompetenzentwicklung**“ (3618S62572) sollte ein Trainingskonzept entwickelt werden, durch welches die notfallbezogenen Kompetenzen des Personals der am Radiologischen Lagezentrum (RLZ) beteiligten Organisationen weiterentwickelt werden können. Der Fokus liegt auf der Besonderen Aufbauorganisation des BfS im RLZ (RLZ/BfS-BAO). Besonders relevant hierbei waren Themen wie Sicherheits- und Fehlerkultur, individuelle und teambezogene Faktoren, organisationsbezogene Einflussfaktoren auf das Handeln in Krisenlagen sowie Aspekte der Mensch-Technik-Interaktion. In einem ersten Arbeitspaket wurden zum einen anhand der Auswertung von Übungs-Beobachtungen und Befragungen in Form von Fragebögen und Interviews Handlungsempfehlungen für eine Optimierung der RLZ/BfS-BAO formuliert. Zum anderen stellten die Ergebnisse auch den Ist-Eingang in eine Soll-Ist-Analyse dar. Die Soll-Seite wurde einerseits bestimmt von den Ergebnissen einer ausführlichen Literaturrecherche des nationalen und internationalen Entwicklungsstandes und andererseits durch die Auswertung von Good-Practice-Beispielen anderer Einrichtungen im Rahmen des zweiten Arbeitspakets. Die Soll-Ist-Analyse wiederum ging ein in die Ermittlung von Bedarfen der Weiterentwicklung von rollen- und lagebezogenen Kompetenzen von Mitarbeitenden der RLZ/BfS-BAO. In Bezug auf Aufgabfelder und charakteristische Tätigkeiten innerhalb der RLZ/BfS-BAO wurden fünf Rollencluster identifiziert, deren Anforderungsprofile auf zwei Ausprägungsstufen hin modelliert wurden. Im weiteren Ver-

lauf des Projekts wurden diese Profile in konkrete Wissens- bzw. Kompetenzziele umgesetzt. Im Rahmen des dritten Arbeitspakets wurde schließlich auf Basis der herausgearbeiteten Kompetenzprofile in Verbindung mit einer didaktischen Gestaltungsstrategie und einem Evaluationskonzept ein Trainingskonzept entwickelt, welches auch die spezifischen Aspekte des Lernens Erwachsener sowie die in Beobachtungen und Befragungen ermittelte Organisationskultur der RLZ/BfS-BAO berücksichtigt.

Das Projekt „**Ermittlung der Informations- und Schutzbedürfnisse von Einsatzkräften im Notfallschutz; Ableitung von Empfehlungen zur Verbesserung der Ausbildung, Information und Kommunikation**“ (3618S62573) untersuchte Informations- und Schutzbedürfnisse von Einsatzkräften im radiologischen Notfallschutz. Auf der Grundlage einer Literaturanalyse wurden in leitfadengestützten Interviews, unter Einbezug aller relevanten Einsatzkräfte-Organisationen, die Informations- und Schutzbedürfnisse der Einsatzkräfte erhoben. Die identifizierten Bedürfnisse wurden dann mit Vertreter\*innen aus unterschiedlichen Einsatzorganisationen, der Forschung sowie dem BfS im Rahmen eines Workshops verifiziert, präzisiert, gewichtet und ergänzt. Weiter wurden erste Ansätze und Maßnahmen entwickelt, um diese Bedürfnisse zu adressieren. Daraus leitete das Projektteam Empfehlungen in den Bereichen Ausbildung, Information und Kommunikation ab, die Einsatzkräfte mit Fokus radiologischer Notfallschutz im Umgang mit psychosozialen Belastungen unterstützen sollen.

## **THEMENBEREICH 07 - VORHABEN MIT ALLGEMEINER BEDEUTUNG FÜR DEN STRAHLENSCHUTZ**

Das Vorhaben „**Weiterentwicklung des atmosphärischen Ausbreitungsmodells ARTM bezüglich weiterer Anwendungsbereiche, Windfeld- und Grenzschichtmodell, Dokumentation**“ (3616S72575) diente der Weiterentwicklung des atmosphärischen Radionuklid-Transportmodells ARTM insbesondere in Bezug auf das Grenzschichtmodell sowie der Verwendung eines prognostischen Windfeldmodells. Die Entwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik wurde recherchiert und gegebenenfalls, zum Beispiel bedingt durch die Aktualisierung relevanter VDI-Richtlinien und durch die Veröffentlichung der Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu §§ 100 und 101 der Strahlenschutzverordnung, in das Programm implementiert. Zudem wurden, neben zahlreichen kleineren Verbesserungen, die Benutzerfreundlichkeit erhöht und der Programmablauf beschleunigt.

Das Projekt „**Überarbeitung von technischen Strahlenschutznormen aus dem Bereich des Normenausschusses Materialprüfung (NMP) bzw. aus dem K967 des DKE**“ (3617S72381) hatte zum Ziel, verschiedene Normen zu überprüfen und dem Stand der Technik sowie dem Regelwerk anzupassen. Dies bedeutete u. a. das neue Strahlenschutzgesetz (StrlSchG), die Änderungen der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV), des kerntechnischen Regelwerks (KTA und DIN) und die Änderungen der internationalen Normung (insbesondere ISO 11929 und ISO 7503) zu berücksichtigen. Die Überarbeitung konnte in fast allen Fällen erfolgreich im vorgegebenen Zeitraum abgeschlossen werden, jedoch werden noch Arbeiten im Rahmen des Veröffentlichungsprozesses bei DIN weitergeführt. Diese werden zeitnah mit der Herausgabe der betroffenen Norm beendet.

Das Programm ProZES schätzt die Wahrscheinlichkeit ab, mit der eine vorangegangene Strahlenexposition bei einer bestimmten Person zu einer Krebserkrankung geführt hat (Zusammenhangswahrscheinlichkeit Z). Diese Wahrscheinlichkeit spielt eine wichtige Rolle bei Verfahren zur Anerkennung strahlenbedingter Berufskrankheiten. Aufbauend auf zwei früheren Vorhaben, in denen die ProZES-Software entwickelt wurde, wurde im Vorhaben „**Erweiterung und Aktualisierung von ProZES (Programm zur Berechnung der Zusammenhangswahrscheinlichkeit zwischen einer Erkrankung und einer Strahlenexposition)**“ (3618S72230) die Software um neue Risikomodelle ergänzt. Eine Qualitätssicherung der Modelle und der Software wurde vorgenommen. Die Benutzeroberfläche wurde überarbeitet und die Dokumentation erweitert. Die aktuelle Software-Version soll als wissenschaftliche

Grundlage für die Anerkennung strahlenbedingter Berufskrankheiten in Deutschland freigegeben werden.

Das Ziel des Projekts „**Machbarkeitsstudie zur mikroskaligen Modellierung von UV-Belastungen in urbanen Umgebungen für verschiedene Bevölkerungsgruppen zur Hautkrebsprävention**“ (3618S72490) war zu prüfen, ob eine Modellierung der erythemwirksamen UV-Bestrahlungsstärke im mikroskaligen Raum möglich ist und welche Parameter hierbei zu berücksichtigen sind. Die Untersuchung ergab, dass eine Modellierung auch mit GIS-basierten Datensätzen möglich ist, wobei jedoch einige Vereinfachungen vorgenommen werden sollten. Damit die Rechenzeit in einem realistischen Rahmen bleibt, sollten vor allem Strahldichte-Outputs des libRadtran-UVSPEC-Modells verwendet werden und es sollten diese in Lookup-Tabellen (LUTs) für verschiedene Makroskalenbedingungen gespeichert werden. Danach können die Ergebnisse für verschiedene Mikroskalen-Szenarien verwendet werden. Es verbleiben dann noch zwei Herausforderungen: Modellierung unter Baumschatten und Berücksichtigung der bidirektionalen Reflexionsfunktion. Beide können zwar auf vereinfachte Weise in der Modellierung berücksichtigt werden, aber für bestimmte Situationen könnten Fehler auftreten. Es wird vorgeschlagen mit einem vereinfachten Modell zu beginnen, dieses experimentell zu überprüfen und später zusätzliche genauere Pakete sowohl für die Baumtransmission als auch für die Spiegelreflexion zu entwickeln.

Mit dem Projekt „**Möglichkeiten des Zuschnitts von Risikoinformationen im Strahlenschutz auf unterschiedliche Zielgruppen im Internet**“ (3619S72402) wurden auf verschiedene Rezipient\*innen „zugeschnittene“ Formen der Risikokommunikation empirisch erprobt, um so zu prüfen, ob die Effektivität der Risikokommunikation verbessert werden kann. Thematisch befasste sich das Projekt mit dem Risikothema Radon. Vorbereitend zur empirischen Untersuchung wurden eine Literatur- sowie eine Praxisbeispielrecherche durchgeführt. Daraus wurde ein 2x2-Between-Subjects-Experiment abgeleitet. Die zwei Untersuchungsfaktoren – die Betroffenheit und das Eigentums- bzw. Mietverhältnis – gliedern sich jeweils in zwei Stufen. Diese resultieren in vier Zielgruppen, die jeweils von auf sie „zugeschnittenen“ Informationsseiten adressiert wurden. Die Ergebnisse wurden mit den Angaben einer Kontrollgruppe verglichen, die keine „zugeschnittene“ Informationsinhalte angezeigt bekamen. Die statistische Auswertung der Ergebnisse ergab, dass sich der Effekt der „zugeschnittenen“ Informationsseiten auf die entsprechenden Zielgruppen nicht vom Effekt der zielgruppenunspezifischen Informationsseiten unterscheidet. Der einzig statistisch relevante Effekt bestand darin, dass Eigentümer\*innen im Vergleich zu Mieter\*innen handlungsbereiter sind. Eine explorative Analyse der Faktoren, die die Rezeption der Inhalte beeinflussen, zeigte, dass Vorkenntnisse zum Thema sowie die Wohnperspektive einen Effekt auf die Rezeption der Inhalte haben.

## **THEMENBEREICH 08 - NICHTIONISIERENDE STRAHLUNG**

2020 wurde in diesem Themenbereich kein Vorhaben abgeschlossen.

# 1. Summary

On behalf of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) 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 Federal Office for Radiation Protection 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 results, i. e. preliminary (in the form of status reports) and, where applicable, final results of radiation protection projects within the BMU's Environmental Research Plan for the year 2020.

## 1.1 Preface

Protecting man and the environment from the risk of ionising and non-ionising radiation is a central responsibility assigned to the BMU and to the Federal Office for Radiation Protection (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 Programme).

## 1.2 Introduction

The **subject areas** (TB) of the radiation protection research will be explained in detail in the following, although there are no projects in this area in 2020.

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 so that appropriate measures can be taken to counteract any danger to man and the environment.

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 BMU Environmental Research Plan (Umweltforschungsplan). 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.

Apart from that, a number of projects deals with issues of **general importance for radiation protection** (TB 07).

Over the last few decades, changes in leisure activities and new fashion trends have led to ever increasing numbers of the population staying longer in the sun and using artificial UV radiation in sunbeds. This trend necessitates new concepts and research measures in the field of protection from UV radiation.

On top of this, man's environment is increasingly influenced by the presence and the use of electrical devices as well as by the acceleration in the development of electronic media and wireless communication. This ever expanding trend has given rise to new tasks in the field of protection from the effects of **non-ionising radiation** (TB 08).

In the **German Mobile Telecommunication Research Programme (DMF)** (TB 09) effects of different uses of non-ionising radiation on man were studied systematically. The main emphasis of these research projects was in the fields of biology, epidemiology, dosimetry and risk communication. The projects were funded by BMU as well as by the operators of the German mobile phone network. In order to exclude possible conflicts of interest, the projects were assigned and scientifically overseen solely by the BfS. A similar programme was initiated for the **national grid expansion**.

### 1.3 Summary of results from research projects in 2020

In the following results of research projects concluded in 2020 will be reported.

#### **SUBJECT AREA 01 - NATURAL RADIATION EXPOSURE**

There is no finalised project in this subject area in 2020.

#### **SUBJECT AREA 02 - RADIATION PROTECTION TECHNIQUES**

High-activity sealed sources (HASS) will still be used in Germany in the future. However, a detailed view at the numerous areas of application in the "**Study about the necessity, possibility and feasibility to supplant technologies using high-activity sealed sources with alternative technologies (not using ionising radiation)**" (3618S22363) reveals the potential to replace some HASS by using alternative technologies not using ionising radiation. The evaluation of these alternative technologies is based on surveys among users of HASS, which results in a subjective insight from a practical point of view into the user's motivation. This point of view is decisive for the question how a successful strategy for avoiding HASS might look like. In particular, it makes it easier to find promising incentives.

#### **SUBJECT AREA 03 - RADIATION BIOLOGY - EFFECTS OF IONISING AND NON-IONISING RADIATION, RADIOSENSITIVITY**

The project "**Mechanisms of radioresistance in cancer stem cells**" (3616S32262) investigated the effect of X-rays and accelerated C-ions on three glioma/glioblastoma stem-like cell (GSC) lines focusing on the identification of radioresistance mechanisms. The GSC had many structural and numerical chromosomal aberrations, within each cell line several subpopulations were identified. In the tumorsphere formation assay, a flattening of the dose-response curve indicated a radioresistant subpopulation. Gamma-H2AX foci assays to determine DNA double-strand break repair kinetics revealed the typical biphasic course. The cell cycle analysis revealed a long cell cycle arrest after irradiation. Altogether, there

were only minor differences between X-ray and C-ion irradiation. Based on transcriptome analysis data, the genes FoxM1, Parp3 and AurkB were chosen for knockdown experiments. Knockdown of each of these three genes increased the radiosensitivity significantly in at least one of the three GSC lines.

#### **SUBJECT AREA 04 - MEDICAL RADIATION EXPOSURES / X-RAY ORDINANCE**

Nine years after the previous national survey on frequency and radiation exposure from nuclear medicine diagnostics the study was conducted, the study “**Survey to determine frequency and radiation dose from nuclear medical diagnostics**” (3617S42443) has been repeated. Relative frequency of different types of investigations changed remarkably, in particular PET studies are by far more frequent nowadays. Investigations for which diagnostic reference levels (DRL) already exist showed a tendency of applied activities reflect the respective DRL, although in some cases activities well above the DRL are administered. Where DRL are missing, activities applied on average differ clearly between different centers. Effective doses from nuclear medicine examinations were calculated to be more than 25% lower than last time. This, however, resulted at most from changes in ICRP dose conversion factors. Also exposure parameters for computed tomography imaging were assessed. It turned out that the distribution of doses from diagnostic scans strongly overlap with doses from scans, intended for attenuation correction and image coregistration. Implementation of DRL to guide users seem reasonable for these studies.

Data basis of the project “**Recording the frequency of radiotherapy in Germany**” (3618S42434) were available statistics of compensation (EBM, GOÄ) and procedure codes (OPS). These are very heterogeneous and can only be combined using a mapping table instrument. Separate surveys were conducted to eliminate data gaps (e.g. on the indication for treatment) and to assess the modalities in the technical implementation of radiation therapies as well as upstream radiation planning. The total number of radiation therapies in Germany in 2016 was estimated at 469 000 (+/- 12 %). At least 20 % of radiation treatments for malignant diseases were carried out for inpatients. For the continuation of the project by BfS on its own, a simplified quantity-based analysis is recommended. This is to be supplemented at certain time intervals (e.g. every three to five years) by a differentiated analysis based on individual data sets.

#### **SUBJECT AREA 05 - RADIOECOLOGY**

In the research project “**Assessment of contamination levels of wild boar (Sus scrofa) in Germany**” (3617S52531), the Cs-137 contamination situation of wild boars in 3 study areas from 2017 - 2020 was evaluated as an example. The project was divided into 3 work packages (WP 1, WP 2 and WP 3). In the first work package, the distribution of the body weights of the wild boar was modeled on the basis of researched kill data from the 3 study areas. Determination of deer truffle fruiting body biomass conducted in WP 2 resulted in average masses ranging from 82 g to 320 g per 4 square meters of forest floor area, depending on the study area. The Cs-137 measured values of 45 deer truffles ranged from 226 Bq/kg<sup>-1</sup> (Dahn) to 16 908 Bq/kg<sup>-1</sup> (Zusmarshausen). From the 3 study areas, samples from 451 wild boars were measured for Cs-137 activity in WP 3. In each study area, the Cs-137 activity varied by 3 orders of magnitude. The range of all measured values ranged from 2 Bq/kg<sup>-1</sup> (Dahn) to 17 326 Bq/kg<sup>-1</sup> (Bodenmais/Bayerisch Eisenstein). The seasonal fluctuations in the measured values are significantly influenced by the food supply and the hunting strategy.

As part of the project “**Evaluation of the current status in monitoring the discharge of radioactive substances with the exhaust air and water in medicine and industry**” (3619S52560) the relevant emitter groups were determined. Only a small number of the license holders can discharge radioactive substances with the exhaust air or water in normal operation above the activity concentrations listed in Annex 11 of the Radiation Protection Ordinance. In all such cases, after a random examination, a monitoring of the discharge including a detailed assessment is carried out.

Within the framework of the research project “**Concepts for clearance according to a new radiation protection ordinance based on the Euratom Basic Safety Standards of 2013 in practice**” (4717E03510),

a compilation of all radiological models on which the clearance in the Radiation Protection Ordinance is based, their scenarios, exposure pathways and parameters was performed. It was shown that the clearance values given in the Radiation Protection Ordinance StrlSchV (2017) are mostly consistent with those in the researched literature. The boundary conditions of the models for the calculation of the clearance values in the StrlSchV (2017) were identified; their origin was researched and described. It turned out that the information regarding the model boundary conditions is plausible to a great extent and that the data is consistent. Based on these findings, the essential model parameters of the radiological models were identified, and their range of variation was discussed. The clearance values specified in the current Radiation Protection Ordinance StrlSchV are based on "generalised" exposure scenarios that represent a wide range of exposure situations. For a number of radionuclides, a probabilistic approach based on parameter distributions was examined in addition to the usual deterministic calculation for a given set of parameter values. For selected scenarios, further calculations of clearance values were performed using freely available computer codes. The plausibility of the results was checked by comparative calculations of other organisations (benchmarking). In the "ingestion" scenario, significantly lower clearance values for two radionuclides were calculated with the program system Atmospheric Radionuclide Transport Model (ARTM) compared to those that can be found in the literature. The benchmark calculations resulted in a similar conclusion.

## **SUBJECT AREA 06 - EMERGENCY MANAGEMENT**

The ability to prognose the threat by nuclear facilities during shut-down modes has been risen to the state of the art in the project **“Extension of the source term data bank of the decision support system RODOS for the release from the RPV during shutdown modes” (3617S62560)**. This update comprises the revision of former work concerning shut-down modes (WP 1), whereby the spectrum of accident sequences already identified has been assessed as being already state of the art so that they are used here. The models used (physics and plant model) were state of the art, too (WP 2). The transformation of the resulting radionuclide release into a form implying the release of activity of relevant nuclides in a RODOS-compatible format has been performed while updating the shut-down version of the GRS source term (ST) prognosis tool FaSTPro (WP 3), which is also based on former work. By means of the BBN (Bayesian Belief Network) the program is capable of performing ST prognoses and can estimate the plant state. In order to train the use of this tool, a simplified emergency exercise has been performed in form of a presentation whereby the specifics of the shut-down modes have been depicted by means of emergency documents (WP 5). These documents are based on the accident sequence denoted as ‘NLB-B’ and are framed by a feasible plot so that a script for the exercise could be created (WP 4). By means of the work performed in this project the ability to assess the state of radiological threads could be improved.

The project **“Revision of the Compendium of Measures considering experiences after the accident in Fukushima as well as international developments in recent years” (3618S62571)** served to determine the need for revision of the Compendium of Measures developed by the Commission on Radiological Protection and to start implementing the revision. In the project, assessments were made on the further use or the need for adaptation of measures. The assessments referred to the practicability, contemporary use, and future applicability of the measures, whereby in particular experiences from the reactor accident in Fukushima were considered. In addition, the project included further supplementary options regarding measures not previously listed in the Compendium of Measures. A total of 255 measures are listed.

The objective of the research project **“Design of specific training concepts for competence development in the context of operational scenarios in the Federal Radiological Situation Centre” (3618S62572)** was the design of specific training concepts for competence development in the context of operational scenarios in the Federal Radiological Situation Center (FRSC). In focus were Human Factors topics like safety culture and error-culture, individual and team-related factors, organisational influence on crisis management and aspects of human-technology-interaction. In a first work package recommendations for the further progression of the Federal Radiological Situation Centre were developed through the analysis of observation of two exercises and interviews. The outcome also constitut-

ed one part of a target-performance comparison. The other part of that target-performance comparison – in the second work package – was derived from the results of a state-of-the-art literature review and the analysis of four good practice command-and-control centers including expert interviews. The findings were then used for defining competence requirements in context of working in crisis management in the FRSC. With respect to tasks and characteristic functions within the FRSC five role-clusters could be identified, the know-how requirements of which were specified into the two levels, “basic” and “expert”. These profiles were then transformed into tangible competence objectives. In a third and final work package a training concept was developed that included the implementation of educational activities, a didactic strategy and an evaluation concept also considering specific needs with regards to the learning of adults and the organisational culture of the FRSC.

The project **“Identification of information and safety needs among emergency responders; Derivation of recommendations to improve education, information and communication“ (3618S62573)** investigated the information and safety needs among emergency responders. On the basis of a literature analysis, the information and protection needs of the emergency services were surveyed in guideline-based interviews involving all relevant emergency services organisations. The identified needs were then verified, specified, weighted and supplemented in a workshop with representatives from various emergency organisations, research and the BfS. Furthermore, initial approaches and measures were developed to address these needs. From this, the project team derived recommendations in the areas of training, information and communication, which are to support emergency services with a focus on radiological emergency protection in dealing with psychosocial stress.

## **SUBJECT AREA 07 - PROJECTS OF GENERAL IMPORTANCE TO RADIATION PROTECTION**

The project **“Enhancement of the atmospheric dispersion model ARTM considering additional areas of application, wind field and boundary layer models, and documentation“ (3616S72575)** served to further develop the atmospheric radionuclide transport model ARTM, especially with regard to the boundary layer model and the use of a prognostic wind field model. The development of the state of the art in science and technology was researched and, if necessary, implemented in the program, for example due to the updating of relevant VDI guidelines and regulations. In addition, besides numerous smaller improvements, the user- friendliness was increased and the program flow accelerated.

The project **“Revision of technical radiation protection standards in the range of the Materials Testing Standards Committee (NMP) and from the working group K967 of the German Commission on Electrical Engineering“ (3617S72381)** aimed at revising several standards in order to adapt them to the state of science and technology and the current regulations. This meant among other things to consider the new Radiation Protection Act (StrlSchG), the changes of the German Radiation Protection Ordinance (StrlSchV), the standards of the Nuclear Safety Standards Commission and other German standards concerning nuclear safety (KTA and DIN) and the concerning international standards (particularly ISO 11929 and ISO 7503). The revision was successfully completed in almost all cases within the specified timeframe, but work is still continuing as part of the publication process at DIN and will be completed promptly with the publication of the standards concerned.

The computer program ProZES estimates the probability that a previous radiation exposure for a specific person has resulted in cancer (assigned share Z). The assigned share plays an important role in decision making on compensation claims due to cancer following occupational exposure to radiation. Based on two previous projects in which the ProZES software was developed, in the project **“Extension and update of ProZES (program for assessment of assigned share between cancer and radiation exposure)” (3618S72230)** several new risk models were added. Quality assurance of the models and software was performed. The user interface was reworked and the documentation expanded. The current software version is planned to become the scientific basis for decision making on compensation claims in Germany.

The main objective of the project **“Feasibility study for micro-scale modelling of UV exposure in urban for skin cancer prevention of different population group” (3618S72490)** was to conduct a feasibility study on the methods and the parameters to be considered when modelling erythema effective UV ir-

radiance in microscale partially shaded areas. After analysing all relevant parameters, it was concluded that it is possible to model it, even using GIS based datasets. In order to keep the computational time within reasonable limits, the proposed method shall use radiance outputs from the libRadtran UVSPEC model and store them into Look-Up-Tables (LUTs) for different macroscale conditions. After that, the results can be used for different microscale scenarios. However, this requires some simplifications, which are: modelling under tree shade and bidirectional reflection functions. Both can be modeled in simplified ways; however, errors still can occur for specific situations. The proposed idea is to begin with a simplified model and then to develop extra packages for both tree and bidirectional reflectance.

With the project “**Possibilities of tailoring risk information in radiation protection to different target groups on the Internet**“ (3619S72402), forms of risk communication "tailored" to different recipients were empirically tested in order to examine whether the effectiveness of risk communication can be improved. Thematically, the project dealt with the risk topic radon. In preparation for the empirical study, literature analyses and a research of practical examples on the Internet were conducted. From this, a 2x2-between-subjects experiment was designed. The two key factors of research - the degree to which a person is affected and the ownership or tenancy relationship - are each divided into two categories. These result in four target groups, each of which was addressed by information pages "tailored" to them. The results were compared with the data of a control group, which did not receive "tailored" information content. The statistical evaluation of the results showed that the effect of the "tailored" information pages on the corresponding target groups did not differ from the effect of the non-target group specific information pages. The only statistically relevant effect was that owners are more ready to act compared to tenants. An explorative analysis of the factors, which affect the reception of contents, showed that previous knowledge to the topic as well as the housing perspective have an effect on the reception of contents.

#### **SUBJECT AREA 08 - NON-IONISING RADIATION**

There is no finalised project in this subject area in 2020.

## **2. ERGEBNISSE (ABSCHLUSSBERICHTE)**

**der vom BfS begleiteten Strahlenschutz-Forschungsvorhaben des  
BMU 2020**

## **2. *RESULTS (FINAL REPORTS)***

***of BfS supported BMU radiation protection research projects in 2020***



## **2.1 Themenbereich 01** **Natürliche Strahlenexposition**

### **2.1 *Subject area 01*** ***Natural Radiation Exposure***



**2.2 Themenbereich 02**  
**Strahlenschutztechnik**

**2.2 *Subject area 02***  
***Radiation protection techniques***

**Thema**

Studie über die Notwendigkeit, Möglichkeit und Machbarkeit der Ablösung von hochradioaktiven Strahlenquellen durch alternative Technologien in Deutschland

**Subject**

*Study about the necessity, possibility and feasibility to supplant technologies using high-activity sealed sources with alternative technologies (not using ionising radiation)*

<b>Kennzeichen</b> 3618S22363	<b>Beginn</b> 01.11.2018	<b>Ende</b> 30.06.2020	<b>Fördermittel</b> EUR 160.934,-
----------------------------------	-----------------------------	---------------------------	--------------------------------------

**Forschungs- / Auftragnehmer**  
TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG, Hannover

<b>Projektleitung</b> O. Mende	<b>Fachbetreuung BfS</b> U. Häusler / MB 6	<b>verantwortlich für den Text</b> O. Mende, U. Häusler
-----------------------------------	---	--

## 1. ZIELSETZUNG

Die Verwendung von hochradioaktiven Strahlenquellen (HRQ) birgt eine ernstzunehmende radiologische Gefahr, die möglicherweise durch alternative Technologien ohne die Verwendung radioaktiver Strahlenquellen signifikant verringert werden kann. Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, die Notwendigkeit, die Möglichkeit und die Machbarkeit der Ablösung von hochradioaktiven Strahlenquellen durch alternative Technologien in Deutschland zu prüfen.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Es wurden sowohl die aktuellen Anwendungsbereiche von HRQ als auch die technisch möglichen und verfügbaren Alternativtechnologien ermittelt und dargestellt. Abschließend wurde je Anwendungsbereich ein Vergleich zwischen der HRQ-Technologie und den entsprechenden Alternativtechnologien im Hinblick auf deren jeweilige Vor- und Nachteile durchgeführt. Dabei wurden insbesondere die grundsätzliche Ersetzbarkeit, die praktische Einsatzfähigkeit, mögliche Mängel sowie die Kosten und Einsatzbedingungen beider Technologien berücksichtigt.

### 2.1 ERSTELLUNG EINER ÜBERSICHT ÜBER DIE ANWENDUNGSBEREICHE VON HRQ

Im Rahmen des Arbeitspakets 1 wurden die Anwendungsbereiche von HRQ, deren Einsatzbedingungen und die dabei verwendeten Radionuklide und Aktivitäten samt der chemischen und physikalischen Form des eingesetzten radioaktiven Materials dargestellt. Dabei wurde auch eine grobe Risikoabschätzung in Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen vorgenommen.

### 2.2 ERSTELLUNG EINER ÜBERSICHT ÜBER MÖGLICHE ALTERNATIVE TECHNOLOGIEN

Die Ermittlung von möglichen und verfügbaren Alternativtechnologien erfolgte im Arbeitspaket 2. Dabei wurde je HRQ-Anwendungsbereich untersucht, welche Alternativtechnologien ohne den Einsatz von radioaktiven Stoffen oder durch den Einsatz radioaktiver Stoffe mit geringerem radiologischen Risiko verfügbar und technisch umsetzbar sind.

### 2.3 VERGLEICH DER KONVENTIONELLEN RADIOAKTIVEN TECHNOLOGIEN MIT DEN ALTERNATIVEN NICHT-RADIOAKTIVEN TECHNOLOGIEN

Im abschließenden Arbeitspaket 3 wurden je Anwendungsbereich die Alternativtechnologien mit der konventionellen HRQ-Technologie verglichen. Dabei lag der Fokus auf der technischen Umsetzbarkeit, der Gleichwertigkeit und den Kosten für die Verwender der HRQ.

### 3. METHODIK

Die Untersuchung basiert im Allgemeinen auf Literatur- und Datenbankrecherchen sowie auf Befragungen von Herstellern, Anwendern und Verbänden.

Zur Ermittlung der in Deutschland relevanten Anwendungsbereiche von HRQ wurden die (zuvor anonymisierten) Erstmeldungen von HRQ im HRQ-Register des Bundesamts für Strahlenschutz analysiert. Zusätzlich wurden bereits veröffentlichte nationale und internationale Untersuchungen zur Verwendung von HRQ herangezogen.

Zur Ermittlung der physikalischen und chemischen Form der verwendeten HRQ wurden Unterlagen von Quellenherstellern (insbesondere Quellenzertifikate) sowie die entsprechenden Einträge im o. g. HRQ-Register und im International Catalogue of Sealed Radioactive Sources and Devices (ICSRS) der IAEA gesichtet.

Die konkreten Anwendungsbedingungen von HRQ wurden durch Befragungen von Anwendern sowie im Rahmen eigener Begehungen an den Einsatzorten ermittelt.

Die Ermittlung von Alternativtechnologien erfolgte durch eine Recherche bei möglichen Herstellern von diesen Technologien und bei Industrieverbänden wie z. B. der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung. Dabei wurden auch nationale Normen sowie internationale Studien zu möglichen Alternativtechnologien herangezogen. Andererseits wurden Anwender von HRQ gezielt hinsichtlich schon genutzter oder eventuell geplanter Ersatztechnologien befragt.

### 4. DURCHFÜHRUNG

Im Berichtszeitraum wurden die Arbeitspakete 1 und 2 gemäß der unter Abschnitt 3 beschriebenen Methodik bearbeitet. Die Ergebnisse wurden durch jeweils einen Zwischenbericht dokumentiert.

### 5. ERGEBNISSE

#### 5.1 ANWENDUNGSBEREICHE VON HRQ IN DEUTSCHLAND

**Tabelle 1: Anteil der HRQ in Deutschland (Stand: 26.02.2019)**

Anwendungsbereich	Anteil der HRQ in Deutschland
Großkammerbestrahlung	50,9 %
Teletherapie	22,0 %
Prozessüberwachung	10,4 %
Gammaradiographie	10,2 %
Brachytherapie	2,5 %
Forschung	1,3 %
Kleinkammerbestrahlung	1,2 %
sonstige	1,0 %
Bohrlochuntersuchungen	0,4 %
Kerntechnik	0,1 %

**Tabelle 2: Anwendungsgebiete und typische Eigenschaften von HRQ**

Anwendungsbereich	typische Nuklide	typische Aktivitäten je Quelle in GBq	typischer Verwendungszweck
Großkammerbestrahlung	Co-60	370 000	Sterilisation, Vernetzung
Teletherapie	Co-60	1 000	Strahlentherapie
Prozessüberwachung	Cs-137	185 bis 1 850	Messungen von Füllstand, Dicke, Feuchtigkeit oder Durchfluss
	Am-241	111 bis 185	
Gammarradiographie	Se-75	3 000 bis 7 400	zerstörungsfreie Werkstoffprüfung
	Ir-192	1 500 bis 5 000	
Brachytherapie	Ir-192	370	Strahlentherapie
Forschung	Co-60	50 bis 15 000	Forschung
	Sr-90	2 000	
	Cs-137	200 bis 50 000	
Kleinkammerbestrahlung	Cs-137	30 000 bis 120 000	Sterilisation
Bohrlochuntersuchungen	Am-241 / Be	185	Untersuchung von Lagerstätten

## 5.2 MÖGLICHE ALTERNATIVE TECHNOLOGIEN UND DEREN VERGLEICH MIT DEN KONVENTIONELLEN HRQ-TECHNOLOGIEN

Die Bewertung der einzelnen Alternativtechnologien erfolgte je Anwendungsbereich anhand gewichteter Bewertungskriterien (essentiell, wichtig, nachgeordnet). Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

### Großkammerbestrahlung (Sterilisation)

Die essentiellen Bewertungskriterien sind Dosishomogenität, Produktkompatibilität und Produktbeeinträchtigungen.

Eine vollständige Ablösung der HRQ-Technologie in diesem Bereich ist allenfalls langfristig realistisch. Solange für einen Großteil der bisher bestrahlten Produkte keine vergleichbaren Alternativen zur Verfügung stehen, werden die Betreiber von Sterilisationsanlagen die Bestrahlung mit HRQ in ihrem Dienstleistungsportfolio behalten.

### Teletherapie

Das essentielle Bewertungskriterium ist die medizinische Effektivität.

Da die klassische Teletherapie mit Kobaltkanonen in Deutschland praktisch vollkommen durch den Einsatz von Linearbeschleunigern ersetzt ist, wird zurzeit nur noch die Stereotaxie im Kopf-Hals-Bereich als Anwendung von HRQ im Bereich der Teletherapie betrieben. Der Ersatz von HRQ in dieser perkutanen, stereotaktischen Strahlentherapie durch Beschleunigeranlagen ist technisch machbar. Bei den Protonenbeschleunigern sind jedoch einschränkend die zurzeit noch nicht flächendeckende Verfügbarkeit und die vergleichsweise hohen Kosten zu berücksichtigen. Daher ist zu erwarten, dass Protonenbeschleuniger nur langfristig HRQ-Geräte ersetzen können. Eine mittelfristige Ersetzung durch Elektronenbeschleuniger innerhalb der nächsten 10 Jahre ist technisch möglich. Allerdings bedarf es dazu noch weiterer technologischer Fortschritte bei den Elektronenbeschleunigern im Bereich der kleinen Zielvolumina. Zudem müssen laufend die vergleichenden Studien zur medizinischen Effektivität berücksichtigt werden, da in der Medizin der Therapieerfolg besonders hoch zu bewerten ist.

Neben der Förderung der medizinischen Forschung und der Beschleunigertechnologie sind Anreize bei der Vernetzung der verschiedenen medizinischen Fachrichtungen vielversprechend. Bei einer engeren Zusammenarbeit zwischen den Fachrichtungen Neurochirurgie und Strahlentherapie ist es denkbar, dass als Alternative zum invasiven chirurgischen Eingriff anstatt der HRQ-Technologie häufiger die Bestrahlung mit Beschleunigeranlagen gewählt wird.

**Prozessüberwachung** (Füllstandsmessung, Flächengewichtsmessung)

Die essentiellen Bewertungskriterien sind Messgenauigkeit, Messgutbedingungen und äußere Bedingungen.

Der Ersatz der HRQ in der Prozessüberwachung kann je nach Messaufgabe technisch realisierbar sein. Für die Anwendungen, bei denen die Messgutbedingungen und die äußeren Bedingungen kein einschränkendes Kriterium darstellen, ist ein mittelfristiger Ersatz der HRQ technisch und wirtschaftlich machbar. Es bleibt allerdings nach den Befragungsergebnissen festzuhalten, dass viele Anwender die Vermeidung von HRQ nicht als dringlich einstufen, da sie häufig im Umgang mit Gefahrstoffen geübt sind. Die Dringlichkeit des Ersatzes von HRQ im Bereich der Prozessüberwachung muss daher im Einzelfall geprüft werden, um die speziellen Umstände der konkreten Messaufgabe zu berücksichtigen.

**Gammaradiographie**

Die essentiellen Bewertungskriterien sind die Umgebungsbedingungen und die Abhängigkeit der Technologie vom Prüfobjekt selbst.

Die oben genannten Alternativtechnologien können die Durchstrahlungsprüfung mittels Gammaradiographie unter der Verwendung von HRQ kurzfristig nicht vollständig und mittelfristig auch nur in bestimmten Teilbereichen ersetzen. Bedingt durch die unterschiedlichen Prüfobjekte und die daraus entstehenden Einschränkungen kann aber die kombinierte Anwendung mehrerer Alternativtechnologien die HRQ langfristig vollständig ersetzen. Es werden jedoch voraussichtlich immer Einzelfälle und spezielle Aufgabenstellungen existieren, bei denen die Anwendung von HRQ alternativlos ist.

**Brachytherapie**

Wie bei der Teletherapie ist auch bei der High-Dose-Rate-Brachytherapie (HDR-Brachytherapie) das essentielle Bewertungskriterium die medizinische Effektivität.

Die Eignung der Alternativtechnologien hängt zu einem wesentlichen Teil von der sich kontinuierlich ändernden medizinischen Lehrmeinung ab. Aus physikalisch-technischer Sicht ist die HDR-Brachytherapie mit Co-60-Quellen die vielversprechendste Alternative zur HDR-Brachytherapie mit Ir-192-Quellen, die kurzfristig verfügbar ist. Auf Grund der Ähnlichkeit der Therapieform – es handelt sich nur um den Wechsel von einem kurzlebigen zu einem langlebigeren Nuklid – kann dies nicht überraschen. Der Gewinn bei einem derartigen Wechsel liegt allerdings nicht in der Vermeidung von HRQ, sondern in der Vermeidung von Quellenwechseln und Quellentransporten.

Von den übrigen Alternativtechnologien sind die Low-Dose-Rate-Brachytherapie (LDR-Brachytherapie) und die e-Brachytherapie prinzipiell noch am ehesten kurzfristig als Alternativen denkbar. Bei der Intra-Operativen-Röntgen-Therapie (IORT) und der Röntgen-Teletherapie ist eine seriöse Prognose zum Zeithorizont nicht möglich, da diese Techniken auf Grund der zum Teil schlechteren Zugänglichkeit zum Zielvolumen jeweils für sich genommen keine umfassende Alternative zur Brachytherapie mit HRQ darstellen. Gleichwohl ist es denkbar, dass eine Kombination aus allen HRQ-freien Alternativtechnologien die Verwendung von HRQ in der Brachytherapie mittelfristig ersetzen kann.

**Kleinkammerbestrahlung** (Blutprodukte)

Das essentielle Bewertungskriterium ist die Dosishomogenität.

Bezüglich dieses Kriteriums sind Röntgenanlagen gleichwertig, in Bezug auf die laufenden Kosten und die Ausfallzeiten sind sie allerdings zurzeit noch nicht ganz konkurrenzfähig, da Wartung und Service der häufig aus dem Ausland kommenden Techniker zeit- und kostenintensiv sind. Bei einem flächendeckenden Einsatz von Röntgen-Blutbestrahlungsanlagen würde sich dies jedoch ändern, so dass sowohl die Kosten für den laufenden Betrieb als auch die Ausfallzeiten spürbar sinken könnten. Daher ist trotz der zurzeit noch nicht vollkommenen Gleichwertigkeit beider Technologien bezüglich der vorgenannten Aspekte ein kurzfristiger Ersatz der HRQ in diesem Bereich technisch und wirtschaftlich machbar.

**Kleinkammerbestrahlung** (Forschungsgegenstände)

Die essentiellen Bewertungskriterien sind die Dosishomogenität und die Vergleichbarkeit zwischen Bestrahlungen mit HRQ und mit alternativen Bestrahlungsquellen.

Bezüglich der Kriterien sind Röntgenanlagen im Prinzip gleichwertig, allerdings sind weitere gezielte Vergleichsstudien erforderlich, um die Akzeptanz durch die Forschenden im Hinblick auf die Vergleichbarkeit, die bislang noch nicht eindeutig nachgewiesen ist, zu erhöhen. Wenn diese Studien Methoden ermitteln, um von der zellulären Ebene bis zum makroskopischen Mausmodell Dosis-Wirkungsbezie-

hungen von Röntgenstrahlung und Cs-137-Strahlung quantitativ zu vergleichen, dann ist ein Verzicht auf HRQ in diesem Anwendungsbereich langfristig denkbar.

### Bohrlochuntersuchungen

Das essentielle Bewertungskriterium ist die Vergleichbarkeit zwischen HRQ-Systemen und alternativen Messsystemen.

Die in Tabelle 3 genannten Alternativtechnologien können nur in Kombination die Verwendung von HRQ in den nächsten 10 Jahren vollständig ersetzen. Geeignete Anreize wären neben der finanziellen Förderung des Verzichts auf HRQ die Unterstützung bei der Forschung und Entwicklung von miniaturisierten Röntgenanlagen und von Algorithmen zur Umrechnung der unterschiedlich gesammelten Rohdaten untereinander.

**Tabelle 3: Alternativtechnologien, die Machbarkeit der Technologieumstellung und der dafür geschätzte Zeithorizont**

Anwendungsbereich	Alternativtechnologie	Machbarkeit	Zeithorizont
Großkammerbestrahlung (Sterilisation)	Gassterilisation (mit EO)	nicht machbar	nicht abschätzbar
	Beschleunigeranlagen (Elektronen)	nicht machbar	nicht abschätzbar
	Beschleunigeranlagen (Photonen)	ggf. machbar	> 10 Jahre
Teletherapie	Protonenbeschleuniger	ggf. machbar	> 10 Jahre
	Elektronenbeschleuniger	machbar	< 5 Jahre
Prozessüberwachung (Füllstandsmessung)	Schwimmer	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Radar/Mikrowellenrückstreuung	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Induktive Messung	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Kapazitive Messung	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Hydrostatische Messung	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
Prozessüberwachung (Flächengewichtsmessung)	Röntgenanlagen	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Laserrückstreuung	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Induktive Messung	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Kapazitive Messung	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
Gammadiagnostik	Röntgenanlagen	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Beschleuniger	nicht machbar	nicht abschätzbar
	aktive Thermographie	nicht machbar	nicht abschätzbar
	klass. Ultraschall	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Phased-Array Ultraschall	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	TOFD Ultraschall	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	EMAT (elektromagn. Ultraschall)	nicht machbar	nicht abschätzbar
Brachytherapie	LDR-Brachytherapie	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	IORT (Röntgen/Beschleuniger)	nicht machbar	nicht abschätzbar
	e-Brachytherapie	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Teletherapie (Beschleuniger)	nicht machbar	> 10 Jahre
	Teletherapie (Röntgen)	nicht machbar	nicht abschätzbar
	Co-60-HDR-Brachytherapie	machbar	< 5 Jahre
Kleinkammerbestrahlung (Blutprodukte)	Röntgenanlagen	ggf. machbar	5 bis 10 Jahre
	Beschleuniger	nicht machbar	nicht abschätzbar
Kleinkammerbestrahlung (Forschungsgegenstände)	Röntgenanlagen	ggf. machbar	> 10 Jahre
	Beschleuniger	nicht machbar	nicht abschätzbar
Bohrlochmessungen	Neutronengenerator	machbar	< 5 Jahre
	NMR	nicht machbar	> 10 Jahre
	Ultraschall	nicht machbar	> 10 Jahre
	EM	nicht machbar	> 10 Jahre

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Die durchgeführte Studie gibt einen sehr guten Überblick über die Anwendungsbereiche von HRQ und die in diesen Bereichen möglicherweise zukünftig erwarteten Wechsel zu Technologien mit keinem oder einem geringeren radiologischen Risiko. Die Ergebnisse der Studie sind ein wichtiger Beitrag

- zur Umsetzung der gemäß § 8 StrlSchG gebotenen Dosisreduzierung (die u. a. im Rahmen der Genehmigungs- und Aufsichtstätigkeit durch Länderbehörden relevant ist)
- zur Beurteilung der Nutzung von radioaktiven Stoffen im Rahmen der Rechtfertigungsprüfung nach § 7 und § 38 StrlSchG
- zur Planung der Weiterentwicklung des HRQ-Registers
- zur generellen, strategischen Entwicklung des Strahlenschutzes bei medizinischen und industriellen Anwendungen in Deutschland.

Kurzfristig und unmittelbar sind keine Auswirkungen auf das deutsche Regelwerk im Strahlenschutz zu erwarten. Die weitere Beobachtung der Entwicklung alternativer Technologien ist jedoch notwendig, da dies die Entwicklung des Regelwerks in Zukunft strategisch (insbes. im Hinblick auf die Liste der nicht gerechtfertigten Tätigkeitsarten) beeinflussen kann.

In dieser Studie wurden alternative Technologien für HRQ untersucht, da von diesen eine besondere Gefährdung ausgeht. Da aber auch von Strahlenquellen, die keine HRQ sind, eine nicht zu vernachlässigende Gefährdung ausgehen kann, wird die Durchführung einer weiteren Studie zur Untersuchung alternativer Technologien bei der Nutzung von Strahlenquellen unterhalb der HRQ-Grenze als sinnvoll angesehen.



### **2.3 Themenbereich 03**

**Strahlenbiologie - Wirkung von ionisierender und nichtionisierender Strahlung, Strahlenempfindlichkeit**

### **2.3 *Subject area 03***

***Radiation Biology - Effects of ionising and non-ionising radiation, radiosensitivity***

**Thema**

Strahlenresistenzmechanismen in Tumorstammzellen

**Subject***Mechanisms of radioresistance in cancer stem cells***Kennzeichen**

3616S32262

**Beginn**

01.01.2017

**Ende**

31.08.2019

**Fördermittel**

EUR 393.886,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt

**Projektleitung**

Dr. C. Hartel

**Fachbetreuung BfS**

Dr. S. Hornhardt / WR 1

**verantwortlich für den Text**

Dr. C. Hartel

## 1. ZIELSETZUNG

Resistenz des Tumorgewebes stellt ein großes Problem bei der Krebstherapie durch Strahlung dar. Insbesondere Tumorstammzellen können sehr strahlenresistent sein und dadurch zum Auftreten von Rezidiven führen. Im Forschungsvorhaben wurden die Strahlenresistenzmechanismen in Gliom-/Glioblastomstammzellen (GSZ) untersucht. Dabei sollte die Wirkung von Röntgenstrahlung (dünn ionisierend) mit der von beschleunigten Kohlenstoffionen (dicht ionisierend) verglichen werden. Da Kohlenstoffionen insbesondere bei strahlenresistenten Zelltypen eine hohe relative biologische Wirksamkeit (RBW) verglichen mit Röntgenstrahlung zeigen, könnten sie geeignet sein, die intrinsische Strahlenresistenz von GSZ zu überwinden. Im Forschungsvorhaben wurden verschiedene In-vitro-Experimente mit humanen GSZ durchgeführt, um die Strahlenwirkung auf zell- und molekularbiologischer Ebene zu untersuchen. Die Zellen wurden bestrahlt und es wurde mittels Tumorsphärenassay überprüft, ob eine Resistenz gleichermaßen gegenüber dicht und dünn ionisierender Strahlung besteht. Weiterhin sollten geeignete Tumorstammzellmarker identifiziert und deren Expression nach Bestrahlung analysiert werden sowie die Zellzyklusverteilung, DNA-Reparatur, Zytogenetik und Genexpression der GSZ näher untersucht werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das Projekt beinhaltet verschiedene Arbeitspakete. Diese wurden teilweise parallel, teilweise aufeinander aufbauend, bearbeitet. Die Einzelzielsetzungen der Arbeitspakete werden im Folgenden erläutert.

### 2.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

In einem ersten Bearbeitungsschritt sollte der vorliegende relevante Stand von Wissenschaft und Technik für die Zwecke des Vorhabens aufgearbeitet werden. Ein wichtiger Aspekt war, eine Übersicht über potenziell geeignete Marker zur Identifizierung von GSZ sowie über bereits publizierte Ergebnisse zur Strahlenresistenz von GSZ zu gewinnen.

### 2.2 BESTRAHLUNGSEXPERIMENTE

Einheitliche Bestrahlungsbedingungen gewährleisten die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen. Dieses Arbeitspaket sollte sich über fast die gesamte Projektlaufzeit erstrecken und die einheitliche Durchführung aller Bestrahlungsexperimente für die anderen Arbeitspakete sicherstellen.

### 2.3 REPOPULATION VON TUMORSTAMMZELLEN NACH BESTRAHLUNG

Um die Strahlenresistenzmechanismen in Tumorstammzellen zu charakterisieren, sollten Dosis-Effekt-Kurven für die Repopulation nach Bestrahlung mit dünn ionisierender Röntgenstrahlung und dicht ionisierenden Kohlenstoffionen-Strahlen erstellt werden.

### 2.4 EINFLUSS DER BESTRAHLUNG AUF DIE ZELLYKLUSVERTEILUNG

Als Folge einer strahlenbedingten DNA-Schädigung kann die Signalkaskade eines Kontrollpunktes ausgelöst werden, so dass es zu einem Zellzyklusarrest kommt. Es sollte daher untersucht werden, ob eine Strahlungsexposition in den drei GSZ zu Veränderungen in der Zellzyklusverteilung führt. Weiterhin sollte untersucht werden, ob sich die Zellzyklusveränderungen nach Bestrahlung mit Röntgenstrahlung und Kohlenstoffionen unterscheiden.

### 2.5 EINFLUSS DER BESTRAHLUNG AUF DIE DNA-REPARATUR

Dicht ionisierende Kohlenstoffionen-Strahlung führt zu komplexeren DNA-Schäden als Röntgenstrahlung. Es sollte daher überprüft werden, ob sich die Reparatur von DNA-Doppelstrangbrüchen induziert durch Kohlenstoffionen von der Reparatur von DNA-Doppelstrangbrüchen induziert durch Röntgenstrahlung unterscheidet.

### 2.6 ZYTOGENETISCHE CHARAKTERISIERUNG UND STABILITÄT DER ZELLEN

Tumorzellen enthalten meist zahlreiche Chromosomenaberrationen. Dabei treten bestimmte Aberrationen bei einer Tumorart gehäuft auf, bei Glioblastomen z. B. eine Amplifikation von Chromosom 7 und eine Deletion von Chromosom 10. Die In-vitro-Kultur von Zelllinien kann zur Ansammlung zusätzlicher Chromosomenaberrationen führen. Die drei verwendeten GSZ sollten zytogenetisch charakterisiert sowie das Ausmaß strahleninduzierter Chromosomenveränderungen untersucht werden.

### 2.7 IDENTIFIZIERUNG VON STAMMZELLMARKERN

Die Expression von bestimmten Markern wird als geeignetes Kriterium zum Nachweis von Tumorstammzellen diskutiert, ein allgemeingültiger Marker wurde bisher allerdings nicht identifiziert. Daher sollte, basierend auf einer Literaturrecherche, die Expression verschiedener Oberflächen- und intrazellulärer Marker für GSZ in den verwendeten Zelllinien untersucht werden und anschließend getestet werden, ob sich die Expression der Marker nach Bestrahlung mit dünn ionisierender Röntgenstrahlung bzw. dicht ionisierenden beschleunigten Kohlenstoffionen verändert.

### 2.8 GENEXPRESSIONSANALYSEN

Tumorstammzellen sind definitionsgemäß Tumorzellen mit Stammzeleigenschaften. Das Genexpressionsmuster der GSZ-Linien sollte untersucht und mit dem Muster neuraler Stammzellen verglichen werden, um Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten zwischen Tumor- und Normalgewebstammzellen herauszuarbeiten. Weiterhin sollte der Einfluss der Bestrahlung auf die Genexpression überprüft werden. Mindestens ein Gen sollte daraufhin ausgewählt und dessen Expression unterdrückt werden, um seinen Einfluss auf die Stammzeleigenschaften zu überprüfen.

## 3. METHODIK

Drei humane GSZ-Linien wurden unter serumfreien Stammzellbedingungen als Tumorsphären kultiviert. Die Bestrahlung wurde mit Röntgenstrahlung sowie mit beschleunigten Kohlenstoffionen durchgeführt. Zur Erstellung von Dosis-Wirkungs-Kurven wurden 6 Dosen im Bereich von 0-12 Gy verwendet. Für die Zellzyklus-, Stammzellmarker- und Chromosomenaberrationsanalysen sowie die DNA-Reparaturkinetiken wurde eine Dosis von 8 Gy gewählt. Die Zellzyklusanalysen wurden über einen Zeitraum von 0-72 h, die DNA-Reparaturkinetiken innerhalb 0-24 h nach Bestrahlung durchgeführt. Die Repopulation von GSZ nach Bestrahlung wurde mittels Tumorsphärenassay in serumfreiem Suspensions-Kulturmedium überprüft. Dazu wurden bestrahlte Einzelzellen in geringer Dichte in Zellkulturflaschen ausgesät und für zwei Wochen inkubiert. Die Anzahl der gebildeten Tumorsphären pro Kulturflasche wurde bestimmt. Die Zellzyklusanalysen wurden mittels DNA-Färbung, sowie für ausgewählte Experimente

in Kombination mit EdU<sup>1)</sup>-Einbau per Durchflusszytometrie durchgeführt. Die Analyse der DNA-Reparaturkinetiken erfolgte durch gamma-H2AX-Färbung ebenfalls per Durchflusszytometrie. Die Chromosomenanalysen erfolgten in unbestrahlten Proben sowie zu verschiedenen Zeitpunkten innerhalb 8 Wochen nach Bestrahlung. Es wurde multiplex-Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung (M-FISH) sowie 2 Farben-Fluoreszenz In-situ-Hybridisierung (2-color-FISH) verwendet. Die Stammzellmarkerexpression wurde mittels Antikörperfärbung per Durchflusszytometrie bestimmt. Transkriptom (RNA-Seq)-Analysen sollten Unterschiede innerhalb der GSZ-Linien als auch zu neuronalen Stammzellen aufzeigen. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden drei Gene ausgewählt und deren Einfluss auf die Strahlenresistenz der GSZ geprüft. Dazu wurde jeweils eines der Gene mittels siRNA<sup>2)</sup>-vermitteltem Knockdown herunterreguliert, die Zellen anschließend bestrahlt und die Repopulation nach Bestrahlung per Tumorsphärenassay geprüft.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Es wurde eine Online-Literaturrecherche durchgeführt. Relevante Literatur wurde überprüft und wichtige Ergebnisse in einem Bericht zusammengestellt.

### 4.2 BESTRAHLUNGSEXPERIMENTE

Die Zellen wurden mit Röntgenstrahlen oder beschleunigten Kohlenstoffionen bestrahlt. Für alle Arbeitspakete wurden die gleichen Bestrahlungsbedingungen (250 kV Röntgenstrahlung sowie *Extended Bragg-Peak*- Kohlenstoffionen mit einem linearen Energietransfer von 60-95 keV/μm) und einem Dosisbereich von 0-12 Gy verwendet. Die Zellen wurden vor Bestrahlung vereinzelt und nach Bestrahlung in Zellkulturflaschen ausgesät und vermehrt.

### 4.3 REPOPULATION VON TUMORSTAMMZELLEN NACH BESTRAHLUNG

Drei GSZ wurden dauerhaft unter Bedingungen kultiviert, die das Wachstum von Stammzellen fördern (serumfreies Zellkulturmedium, Wachstum als Tumorsphären). Die Zellen wurden mit Röntgenstrahlung bzw. beschleunigten Kohlenstoffionen bestrahlt (Dosisbereich 0-12 Gy) und die Repopulation nach Bestrahlung untersucht. Dazu wurden die bestrahlten Einzelzellen in geringer Dichte ausgesät und nach 2 Wochen wurde die Anzahl der gebildeten Tumorsphären mit Hilfe eines Bild-Aufnahmesystems und anschließender Bildanalyse bestimmt. Alle Experimente wurden mindestens 3-fach durchgeführt.

### 4.4 EINFLUSS DER BESTRAHLUNG AUF DIE ZELLYKLUSVERTEILUNG

Von unbestrahlten Zellen sowie mit 8 Gy Röntgenstrahlung bzw. Kohlenstoffionen bestrahlten Zellen wurden zu mehreren Zeitpunkten von 1 Stunde bis 3 Tage nach Bestrahlung Proben genommen. Durch Färbung der DNA und anschließende Analyse im Durchflusszytometer wurde die Zellzyklusverteilung bestimmt. Für eine der verwendeten GSZ wurden zusätzlich EdU-Einbau-Experimente zur Markierung der S-Phase durchgeführt.

### 4.5 EINFLUSS DER BESTRAHLUNG AUF DIE DNA-REPARATUR

Zur Erstellung von Reparaturkinetiken wurden die mit Kohlenstoffionen oder Röntgenstrahlung bestrahlten GSZ zu verschiedenen Zeitpunkten fixiert und eine Antikörperfärbung gegen gamma-H2AX, ein DNA-Doppelstrangbruch-Marker, durchgeführt. Die gefärbten Zellen wurden im Durchflusszytometer analysiert.

### 4.6 ZYTOGENETISCHE CHARAKTERISIERUNG UND STABILITÄT DER ZELLEN

Es wurden Chromosomenpräparate hergestellt und mit M-FISH-Methode gefärbt und analysiert. Nach Bestrahlung wurde sowohl die M-FISH-Methode als auch die 2-color-FISH-Methode verwendet.

<sup>1)</sup> Ethinyldesoxyuridin

<sup>2)</sup> small interfering RNA

#### **4.7 IDENTIFIZIERUNG VON STAMMZELLMARKERN**

Zur Identifizierung von Stammzellmarkern wurden unbestrahlte Tumorsphären enzymatisch vereinzelt und die Einzelzellen mit verschiedenen Antikörpern gefärbt. Insgesamt wurden 13 Marker getestet. Dies beinhaltete Oberflächenmarker wie CD15, CD44, CD133 und NG2 sowie intrazelluläre Marker wie Nestin, SOX2, Nanog und GFAP. Zum Vergleich wurden neurale Stammzellen verwendet. Die Analyse erfolgte im Durchflusszytometer. Anschließend wurde die Markerexpression nach Röntgen- bzw. Kohlenstoffionenbestrahlung analysiert. Dazu wurden Einzelzellen bestrahlt (8 Gy und unbestrahlte Kontrollen), für 2 Wochen zur Tumorsphärenbildung kultiviert, die Sphären enzymatisch vereinzelt, gefärbt und im Durchflusszytometer analysiert.

#### **4.8 GENEXPRESSIONSANALYSEN**

Transkriptom-Analysen wurden mit GSZ und neuronalen Stammzellen durchgeführt. Aus den Ergebnissen der Analysen wurden vielversprechende Gene ausgewählt und deren Expression durch einen siRNA-vermittelten Knockdown herunterreguliert und die Auswirkung auf Wachstum und Bestrahlungsreaktion untersucht.

### **5. ERGEBNISSE**

#### **5.1 AURARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK**

Die Ergebnisse der Literaturrecherche wurden in einem Bericht zusammengefasst. Die Literaturrecherche ergab Hinweise auf potenziell geeignete Marker von Tumorstammzellen in Glioblastomen, deren Vorhandensein in einem weiteren Arbeitspaket in unbestrahlten und bestrahlten Zellen untersucht werden sollte.

#### **5.2 BESTRAHLUNGSEXPERIMENTE**

Die Bestrahlungsexperimente wurden erfolgreich durchgeführt und bildeten die Grundlage für die anderen Arbeitspakete, in denen der Einfluss von Strahlung auf verschiedene Eigenschaften der GSZ untersucht wurde.

#### **5.3 REPOPULATION VON TUMORSTAMMZELLEN NACH BESTRAHLUNG**

Um die Tumorsphärenbildungsfähigkeit von der GSZ zu untersuchen, wurden Dosis-Effekt-Kurven mit Röntgenstrahlen und beschleunigten Kohlenstoffionen erstellt. Es zeigten sich nur geringe Unterschiede zwischen den beiden verwendeten Strahlenarten. Eine wesentlich erhöhte relative biologische Wirksamkeit (RBW) der Kohlenstoffbestrahlung wurde im Tumorsphärenbildungstest nicht festgestellt. Allerdings ließ der abflachende Verlauf der Dosis-Effekt-Kurve auf das Vorhandensein einer strahlenresistenten Subpopulation schließen (s. Abbildung 1).

#### **5.4 EINFLUSS DER BESTRAHLUNG AUF DIE ZELLYKLUSVERTEILUNG**

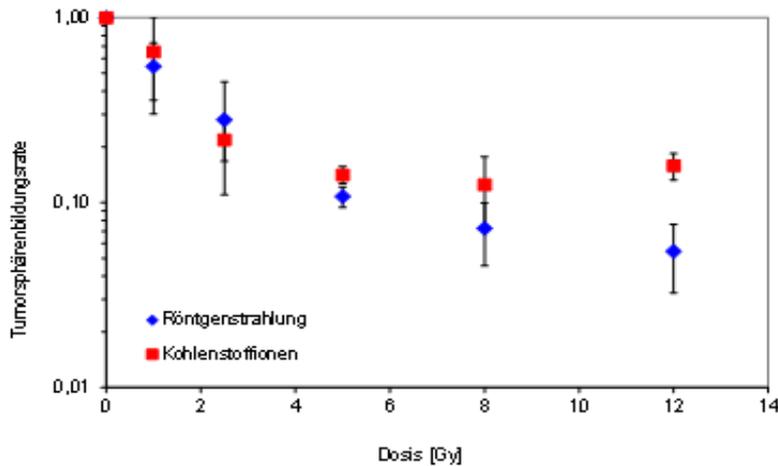
Alle drei verwendeten Zelllinien zeigten nach Bestrahlung einen (unterschiedlich stark ausgeprägten) Arrest in der G2/M-Phase, verbunden mit einem verringerten Anteil von Zellen in S-Phase. Die strahlenempfindlichste Zelllinie zeigte die deutlichsten Zellzyklusveränderungen nach Bestrahlung. Röntgenstrahlung und Kohlenstoffionen hatten ähnliche Auswirkungen.

#### **5.5 EINFLUSS DER BESTRAHLUNG AUF DIE DNA-REPARATUR**

Wenige Stunden nach Bestrahlung war das gamma-H2AX-Signal sowohl nach Röntgen- als auch nach Kohlenstoffionenstrahlung stark erhöht und fiel bis ca. 12 Stunden nach Bestrahlung steil, danach mit flacherem Verlauf ab. Der Verlauf der Reparaturkinetiken nach Kohlenstoffionen- und Röntgenbestrahlung war ähnlich.

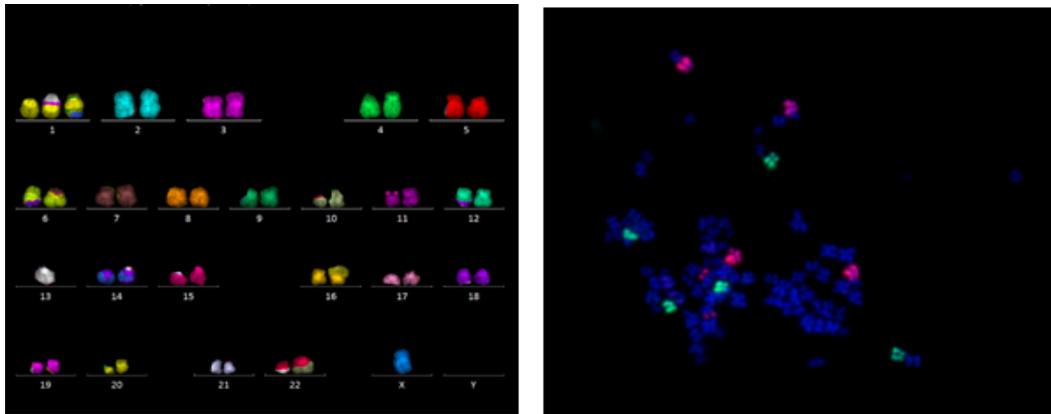
#### **5.6 ZYTOGENETISCHE CHARAKTERISIERUNG UND STABILITÄT DER ZELLEN**

Die Chromosomenanalyse zeigte, dass alle drei verwendeten GSZ-Linien zahlreiche strukturelle und numerische Chromosomenaberrationen trugen. Es wurden innerhalb jeder Zelllinie mehrere Subpopula-



**Abbildung 1:** Beispiel zweier Dosis-Effekt-Kurven der GSZ nach Bestrahlung mit beschleunigten Kohlenstoffionen und Röntgenstrahlen. Es wurden technische 4-fach-Bestimmungen verwendet und mindestens drei unabhängige Experimente durchgeführt.

tionen (d. h. Zellen mit gleichem Aberrationsmuster) identifiziert, darüber hinaus auch spontan auftretende Aberrationen (d. h. zusätzliche Aberrationen, die nur in einzelnen Zellen vorkamen). In zwei der drei verwendeten Zelllinien traten spontane Aberrationen in weniger als 10 % der Zellen auf, bei der dritten Zelllinie enthielten über 80 % der Zellen spontane Aberrationen. Für diese Zelllinie wurde zur Analyse der Strahleneffekte die robustere 2-color-FISH-Technik anstelle der M-FISH-Färbung verwendet (Beispiele siehe Abbildung 2). In allen drei Zelllinien stieg die Aberrationsrate durch Bestrahlung mit Röntgen- und Kohlenstoffionenstrahlung stark an und sank innerhalb von zwei Wochen leicht ab. Acht Wochen nach Bestrahlung enthielten die Zellen noch immer zahlreiche Aberrationen zusätzlich zum Grundmuster.



**Abbildung 2:** Links: Beispiel einer M-FISH-Färbung (U87-Zellen). Jedes Chromosomenpaar wird in einer anderen Falschfarbe, basierend auf verschiedenen Fluoreszenzfarbstoff-Kombinationen, dargestellt. Das Beispiel zeigt ein hypo-diploides Karyogramm mit mehreren Chromosomenaberrationen (u. a. 1'-13; 20-1'-14; 6'-7; 6'-12; 12'-6; 16'-1). Rechts: 2-color-FISH (U87-Zellen) nach Bestrahlung, Chromosom #5 rot und Chromosom #8 grün gefärbt. Polyloide Metaphase mit strukturellen Aberrationen in Chromosom #5.

## 5.7 IDENTIFIZIERUNG VON STAMMZELLMARKERN

Es wurde das Expressionsmuster von 13 potenziell geeigneten Markern in den drei GSZ sowie zum Vergleich in NSZ<sup>1)</sup> erstellt. Dabei zeigte sich, dass einige Marker, wie CD44, Nestin und GFAP, von allen untersuchten GSZ und von neuronalen Stammzellen exprimiert wurden, die Expression anderer Marker dagegen zelllinienspezifisch war. So wurde CD15-Expression nur in einer der verwendeten GSZ gefunden. Zwei Wochen nach Bestrahlung mit 8 Gy Röntgenstrahlung bzw. beschleunigten Kohlenstoffionen ging die Expression von CD15 verglichen mit der unbestrahlten Kontrolle zurück. Bei den anderen untersuchten Markern zeigten sich keine Veränderungen durch Bestrahlung.

## 5.8 GENEXPRESSIONSANALYSEN

Die Genexpressionsanalysen zeigten, dass sich die drei untersuchten GSZ bei jeweils paarweisem Vergleich 1,3-17 % statistisch signifikant voneinander unterschieden. Bei einem paarweisen Vergleich der GSZ mit neuronalen Stammzellen lag der Unterschied bei 13-21 %.

Es wurden drei Gene, FoxM1, Parp3 und AurkB für siRNA-vermittelte Knockdown-Experimente ausgewählt. Die Expression der Gene konnte durch Knockdown auf 39-85 % des Ausgangswertes herunterreguliert werden. Dieser Knockdown von FoxM1, Parp3 oder AurkB erhöhte die Strahlenempfindlichkeit mindestens einer der GSZ signifikant.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

In dem Vorhaben wurden die Reaktionen von unterschiedlich strahlenempfindlichen Tumorstammzellen (Glioblastom) auf die Bestrahlung mit verschiedenen Strahlenqualitäten – dicht ionisierende Strahlung beschleunigter Kohlenstoffionen und dünn ionisierende Röntgenstrahlung – verglichen. Da Kohlenstoffionen insbesondere bei strahlenresistenten Zelltypen eine hohe relative biologische Wirksamkeit (RBW) zeigen, könnten sie geeignet sein, die intrinsische Strahlenresistenz von Tumorstammzellen insbesondere beim Glioblastom zu überwinden. Die Ergebnisse zeigten keine wesentlichen Unterschiede in der Wirkung der Strahlenarten bei diesem Zelltyp. Diese wichtigen Ergebnisse tragen dazu bei, Wissenslücken in der Strahlenbiologie, eine Grundlage für den Strahlenschutz, zu schließen und adressieren so das förderpolitische Ziel, ein besseres Verständnis der Wirkung ionisierender Strahlung auf biologischer, zellulärer und molekularer Ebene zu erlangen. Die Ergebnisse sind darüber hinaus für den Bereich der medizinischen Strahlenexposition relevant. Die Prognose bei Glioblastomen ist nach wie vor schlecht und erfordert weitere Forschung.

---

<sup>1)</sup> Neurale Stammzellen



**2.4 Themenbereich 04**  
**Medizinische Strahlenexposition / Röntgenverordnung**

**2.4 *Subject area 04***  
***Medical radiation exposures / X-ray Ordinance***

<b>Thema</b> Erhebung von Häufigkeit und Dosis für nuklearmedizinische Untersuchungsverfahren			
<b>Subject</b> <i>Survey to determine frequency and radiation dose from nuclear medical diagnostics</i>			
<b>Kennzeichen</b> 3617S42443	<b>Beginn</b> 01.11.2017	<b>Ende</b> 31.10.2019	<b>Fördermittel</b> EUR 133.399,-
<b>Forschungs- / Auftragnehmer</b> Städtisches Klinikum Braunschweig gGmbH			
<b>Projektleitung</b> Dr. M. Borowski	<b>Fachbetreuung BfS</b> Dr. A. Kamp / MB 3, Dr. A. Giussani / MB 3		<b>verantwortlich für den Text</b> Dr. M. Borowski, Dr. A. Giussani

## 1. ZIELSETZUNG

Die regelmäßige Ermittlung der medizinischen Strahlenexposition der Bevölkerung und ausgewählter Bevölkerungsgruppen sowie die Erstellung von diagnostischen Referenzwerten (DRW) für nuklearmedizinische Untersuchungen gehören zu den Aufgaben des Bundesamtes für Strahlenschutz. Für die Berichterstattung sowie die Aktualisierung der in der StrlSchV geforderten DRW ist es notwendig, aktuelle Daten zur Häufigkeit nuklearmedizinischer Untersuchungsverfahren, der verwendeten Radiopharmaka, applizierten Aktivitäten sowie der Alters- und Geschlechtsverteilung der Patienten zu erheben. Im Rahmen des Vorhabens sollten die genannten Daten in einer repräsentativen Erhebung zusammengetragen und ausgewertet werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Im Vorhaben waren Daten zur Häufigkeit nuklearmedizinischer Untersuchungsverfahren in Abhängigkeit von der Art, dem Alter der Patienten zum Zeitpunkt der Untersuchung sowie deren Geschlecht, den applizierten Radiopharmaka und Aktivitäten und möglichst auch der Versicherungsstatus der Patienten möglichst lückenlos für die Kalenderjahre 2016 und 2017 zu erheben. Für Hybriduntersuchungen sollten ergänzend die CT-Dosisparameter erfasst werden.

### 2.1 REKRUTIERUNG EINER HINREICHEND GROßEN ANZAHL AN KLINIKEN UND PRAXEN

Es waren mindestens 50 Einrichtungen aus der ambulanten und stationären Versorgung zu berücksichtigen. Im Kollektiv sollten neben Praxen in ausreichendem Umfang akademische und nicht-akademische Krankenhäuser vertreten sein. Der städtische und ländliche Raum waren zu berücksichtigen.

### 2.2 DATENERHEBUNG

Daten zur Häufigkeit und Strahlenexposition nuklearmedizinischer Verfahren bei Patienten in Deutschland waren über einen Zeitraum von zwei kompletten Kalenderjahren (2016 und 2017) in den nach Abschnitt 2.1 rekrutierten Kliniken und Praxen zu erheben.

Der Datensatz musste wesentliche Informationen, z. B. Geschlecht und Alter der Patienten, das untersuchte Organsystem sowie die applizierte Aktivität enthalten. Bei Hybridmodalitäten waren Dosisparameter der CT-Komponente zu erheben.

### 2.3 AUSWERTUNG DER DATEN UND BERECHNUNG DER EFFEKTIVEN DOSIS FÜR DIE EINZELNEN UNTERSUCHUNGEN

Die nach Abschnitt 2.2 erhobenen Daten waren auszuwerten. Die effektive Dosis für die einzelnen Untersuchungen war zu berechnen. Die Daten waren zumindest für jedes Jahr aufzubereiten. Für jedes

Organsystem waren zusätzlich statistische Größen zur Vorbereitung der Überarbeitung der diagnostischen Referenzwerte zu berechnen.

### **3. METHODIK**

#### **3.1 REKRUTIERUNG EINER HINREICHEND GROßEN ANZAHL AN KLINIKEN UND PRAXEN**

Kliniken und Praxen wurden durch die folgenden Aktionen angesprochen und zur Mitarbeit motiviert:

- Persönliche Ansprache der Teilnehmer aus der vorangehenden Erhebung von Daten zu nuklearmedizinischen Untersuchungen sowie weiteren persönlich bekannten Einrichtungen
- Vorstellung des Projektes beim zentralem Erfahrungsaustausch der ärztlichen Stellen sowie direkte Anfrage bei sämtlichen ärztlichen Stellen und Bitte um Information der Einrichtungen im zugeordneten Bereich
- Unterstützung und Verteilung von Informationsmaterialien über den Bund Deutscher Nuklearmediziner (BDN)
- Kontaktaufnahme mit einigen Sachverständigenorganisationen sowie freien Medizinphysikexperten und Bitte um Werbung für die Erhebung
- Anfrage um Unterstützung bei der Deutschen Gesellschaft für Nuklearmedizin (DGN). Die DGN hat entschieden, die Erhebung nicht zu unterstützen.
- Information über den bundesweit verfügbaren Newsletter der ärztlichen Stelle Hessen.

Zur Information wurden Materialien erstellt und über die oben benannten Kanäle verteilt.

#### **3.2 DATENERHEBUNG**

Daten zur Häufigkeit nuklearmedizinischer Untersuchungen konnten vielfach aus dem Dokumentationssystem der Einrichtungen entnommen werden. In einigen Fällen ließen sich die Daten vergleichsweise gut von dem klinischen oder Assistenzpersonal exportieren. In den meisten Fällen war für den Export die Unterstützung der vor Ort betreuenden IT oder der Herstellerfirma des Dokumentationssystems erforderlich. In einigen Fällen lagen zumindest Teile der Dokumentation, z. B. zu den verabreichten Aktivitäten, nicht elektronisch vor. In diesen Fällen wurden die Daten vollständig oder in Abstimmung mit dem BfS im Rahmen einer Stichprobe ergänzt.

#### **3.3 AUSWERTUNG DER DATEN UND BERECHNUNG DER EFFEKTIVEN DOSIS FÜR DIE EINZELNEN UNTERSUCHUNGEN**

Die Verteilungsmuster durchgeführter Untersuchungen in unterschiedlichen Patientengruppen und Einrichtungstypen wurden ermittelt und im Vergleich zu den Verteilungen der Vorläuferstudie zu Daten der Jahre 2007-2008 bewertet.

### **4. DURCHFÜHRUNG**

#### **4.1 REKRUTIERUNG EINER HINREICHEND GROßEN ANZAHL AN KLINIKEN UND PRAXEN**

In Summe konnten 71 Einrichtungen, und damit deutlich mehr als in der Leistungsbeschreibung gefordert, zur Mitwirkung an dem Projekt gewonnen werden. Ursprünglich war die Anzahl an Einrichtungen, die eine Mitwirkung vorgesehen hatten noch höher. Im Verlauf des Projektes haben jedoch einige Einrichtungen die Mitarbeit aufgekündigt. Als Hauptgründe wurden benannt:

- zu hoher Arbeitsaufwand
- Datenschutzbedenken
- keine Einsicht in die Notwendigkeit und Sinnhaftigkeit einer Erhebung von Daten im Sinne der Leistungsbeschreibung.

Um den in den Einrichtungen entstehenden Aufwand zu kompensieren, wurde allen mitwirkenden Einrichtungen eine Übernahme der Aufwendungen aus Projektmitteln zugesagt. Dieses war gleichwohl nicht immer ausreichend.

Um Datenschutzbedenken zu begegnen, wurde ein Datenschutzgutachten eingeholt. Dieses wurde jedoch nicht in allen Fällen als ausreichend angesehen.

Im Fall fehlender Einsicht in die Sinnhaftigkeit wurde mit den Einrichtungen eingehend gesprochen. Dieses war jedoch nicht in allen Fällen ausreichend.

## **4.2 DATENERHEBUNG**

Daten zu der bei der Hybridbildgebung ergänzend auftretenden Strahlenexposition durch die CT-Komponente waren in fast allen Fällen nicht elektronisch verfügbar. Die Erhebung dieser Daten stellt für die Betreiber einen wesentlichen Aufwand dar. Eine Erhebung war daher nur im Rahmen überschaubarer Stichproben möglich.

Die Aktivimeter, mit denen die zu applizierenden Aktivitäten bestimmt werden, sind in fast allen Fällen nicht elektronisch mit dem Dokumentationssystem verbunden. Es ergeben sich in der Übertragung der Daten somit ganz natürlich Übertragungsfehler. Offensichtliche Fehler wurden nach Möglichkeit in den Daten vor der Analyse behoben. Inkonsistente Einträge, die sich nicht auflösen ließen, wurden entfernt. Um zu verhindern, dass Übertragungsfehler, die im Rahmen der Datenbereinigung nicht aufgefallen sind, zu Fehlern in den Analysen führen, wurden die 5 % höchsten und niedrigsten Werte in jeder Analysegruppe von der jeweiligen Auswertung unberücksichtigt gelassen.

Die von Einrichtungen dokumentierte Aktivität entspricht nicht immer der real applizierten Aktivität. In einigen Einrichtungen wird die real applizierte Aktivität unter Einbeziehung einer Rückmessung der in der Spritze verbleibenden Restaktivität dokumentiert. In anderen Einrichtungen unterbleibt die Rückmessung oder es wird ausschließlich die zum Zeitpunkt der Präparation gemessene Aktivität dokumentiert. Der Einfluss der unterschiedlichen Vorgehensweisen auf die bei gleicher applizierter Aktivität dokumentierten Werte wurde anhand exemplarischer Studien in vier Einrichtungen ermittelt.

## **4.3 AUSWERTUNG DER DATEN UND BERECHNUNG DER EFFEKTIVEN DOSIS FÜR DIE EINZELNEN UNTERSUCHUNGEN**

Für die bei unterschiedlichen klinischen Fragestellungen applizierten Aktivitäten wurden statistische Größen berechnet und so aufbereitet, dass sich hieraus Empfehlungen für Novellierungen von diagnostischen Referenzwerten ableiten lassen.

Die mit Untersuchungen einhergehenden effektiven Dosiswerte wurden auf der Basis von Dosiskoeffizienten abgeschätzt, die auf den aktuellen ICRP-Phantomen basieren.

Die Dosisgrößen für computertomographische Untersuchungen wurden für diagnostische Untersuchungen und solche zur anatomischen Koregistrierung und Schwächungskorrektur separat ausgewertet. Statistische Größen wurden berechnet und so aufbereitet, dass sich hieraus Empfehlungen für Novellierungen von diagnostischen Referenzwerten ableiten lassen.

# **5. ERGEBNISSE**

## **5.1 REKRUTIERUNG EINER HINREICHEND GROßEN ANZAHL AN KLINIKEN UND PRAXEN**

Die Rekrutierung durch direkte Ansprache von Einrichtungen war aufwändig aber vergleichsweise erfolgreich. Da keine Verpflichtung zur Mitarbeit besteht, wurden die Daten von Einrichtungen in etlichen Fällen nur mit wesentlicher Verzögerung zur Verfügung gestellt. Letzte Daten trafen trotz wiederholter Nachfragen bei den Einrichtungen erst Anfang 2020 ein.

## **5.2 DATENERHEBUNG**

Im Zeitraum zwischen der vorangehenden und dieser Erhebung scheint der Ausbau der Dokumentation in den nuklearmedizinischen Einrichtungen nicht relevant vorangeschritten zu sein. In einigen Einrichtungen sind Daten ohne relevanten Aufwand und in guter Qualität verfügbar. Es verblieben allerdings

weiterhin etliche Einrichtungen mit zumindest teilweise papierbasierter Dokumentation. Insbesondere im CT-Bereich ist es in den meisten Einrichtungen nicht möglich, Daten automatisch zu exportieren.

### 5.3 BASISVERTEILUNGEN

71 Einrichtungen der ambulanten und stationären Versorgung stellten Daten für die Auswertung zur Verfügung. Die Einrichtungen decken, mit der Ausnahme von Mecklenburg-Vorpommern, das gesamte Bundesgebiet ab. 72 % der Einrichtungen stammen aus dem großstädtischen Bereich, d. h. Regionen mit mehr als 100 000 Einwohnern, 28 % aus dem ländlichen Bereich. Etwa 50 % der mitwirkenden Einrichtungen sind Praxen, etwa jeweils 20 % universitäre sowie nicht-universitäre Krankenhäuser und Kliniken sowie etwa 10 % Medizinische Versorgungszentren (MVZ), die an ein Krankenhaus angeschlossen sind. Dadurch, dass Einrichtungen in unterschiedlichem Umfang Leistungen erbracht haben, ist die Zusammensetzung der Untersuchungszahlen innerhalb des Gesamtkollektivs abweichend von der relativen Verteilung der Einrichtungen. Etwa 50 % der Untersuchungen, also proportional zur Anzahl der Einrichtungen, stammen aus Praxen. Etwa 30 % der Untersuchungen und damit deutlich überproportional zur Einrichtungsanzahl, stammen aus Universitätskliniken. Unterproportional tragen mit 12 % nicht-universitäre Krankenhäuser und mit 5 % MVZ zu den Leistungen bei.

Das Geschlechterverhältnis sowie die Verteilung der Untersuchungen zwischen dem ambulanten und stationären Bereich haben sich gegenüber der davor liegenden Erhebung nur unwesentlich geändert. Es sind mit 20 % der Untersuchungen im aktuellen Datensatz jedoch deutlich mehr privat versicherte Patienten enthalten. Dieses ist wahrscheinlich auf den beobachteten Anstieg der PET-Diagnostik zurückzuführen, die aus Vergütungsgründen immer noch vornehmlich bei privat versicherten Patienten Anwendung findet. Die Altersstruktur der Patienten hat sich im Vergleich zur vorangehenden Untersuchung zu älteren Patienten hin verschoben. Anlass hierfür sind vornehmlich Änderungen der Untersuchungszusammensetzung. Die Verschiebung der bundesweiten Alterspyramide hat nur einen untergeordneten Effekt.

### 5.4 UNTERSUCHUNGSHÄUFIGKEITEN

In Abbildung 1 sind die relativen Häufigkeiten, mit denen Untersuchungen unterschiedlicher Organsysteme erfolgen, für die aktuelle Erhebung sowie die Vorgängerstudie gegenübergestellt.



**Abbildung 1: Verteilung der relativen Häufigkeiten, mit der Untersuchungen unterschiedlicher Organsysteme durchgeführt werden**

**links: aktuelle Erhebung; rechts: Daten aus der Erhebung 2007-2008**

Es ist ein Rückgang von Untersuchungen der Schilddrüse sowie des Skeletts um mehr als 20 % zu erkennen. Dem gegenüber hat sich die relative Häufigkeit von Untersuchungen des Ganzkörpers, im Wesentlichen onkologische PET-Untersuchungen, mehr als verdoppelt.

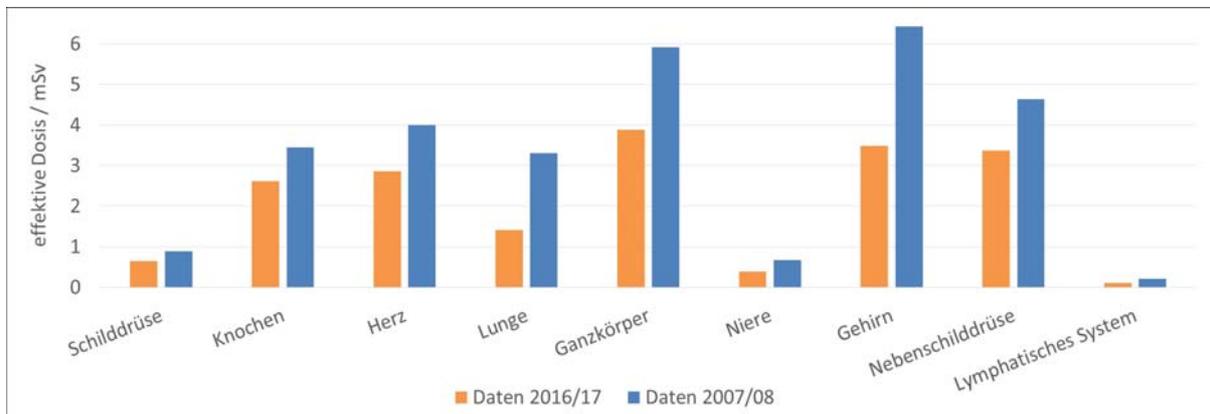
Es zeigt sich im Geschlechterverhältnis, dass bei einzelnen Untersuchungstypen deutliche Abweichungen von einer Gleichverteilung bestehen. So werden Untersuchungen der Schilddrüse und Nebenschilddrüse um einen Faktor drei häufiger bei Frauen als bei Männern durchgeführt. Ebenso bei Unter-

suchungen des Skeletts liegen Frauen um einen Faktor 1,5 vorne. Dem gegenüber werden etwa ein Drittel häufiger Herz- und Gehirnuntersuchungen bei Männern festgestellt sowie sogar um einen Faktor 1,5 häufiger Ganzkörperuntersuchungen.

Hinsichtlich moderner Gerätschaften und innovativer Radiopharmaka wurden im Datensatz etwa 24 % der Untersuchungen mit Hybridbildgebung, PET/CT oder SPECT<sup>1)</sup>/CT, durchgeführt. 19 % der Untersuchungen werden mit PET-Nukliden durchgeführt, etwa 14,5 % mit auf F-18 und etwa 3,5 % mit auf Ga-68 basierenden Radiopharmaka.

## 5.5 NUKLEARMEDIZINISCHE DOSISDATEN

In Abbildung 2 sind Werte für die mittlere effektive Dosis aufgetragen, mit der Untersuchungen der am häufigsten untersuchten Körperbereiche einhergehen. Den aktuellen Daten sind diejenigen der Vorgängerstudie gegenübergestellt. Es ist in allen Körperbereichen ein Rückgang der Dosis von mindestens etwa 25 % festzustellen. Der Rückgang ist dabei in vielen Fällen nur untergeordnet auf einen Rückgang in der applizierten Aktivität zurückzuführen. Der Haupteinfluss der beobachteten Änderung ist eine Änderung der Dosiskoeffizienten, die für viele Untersuchungen um etwa 25 % kleiner angenommen werden als zurzeitzeit der Vorgängerstudie.

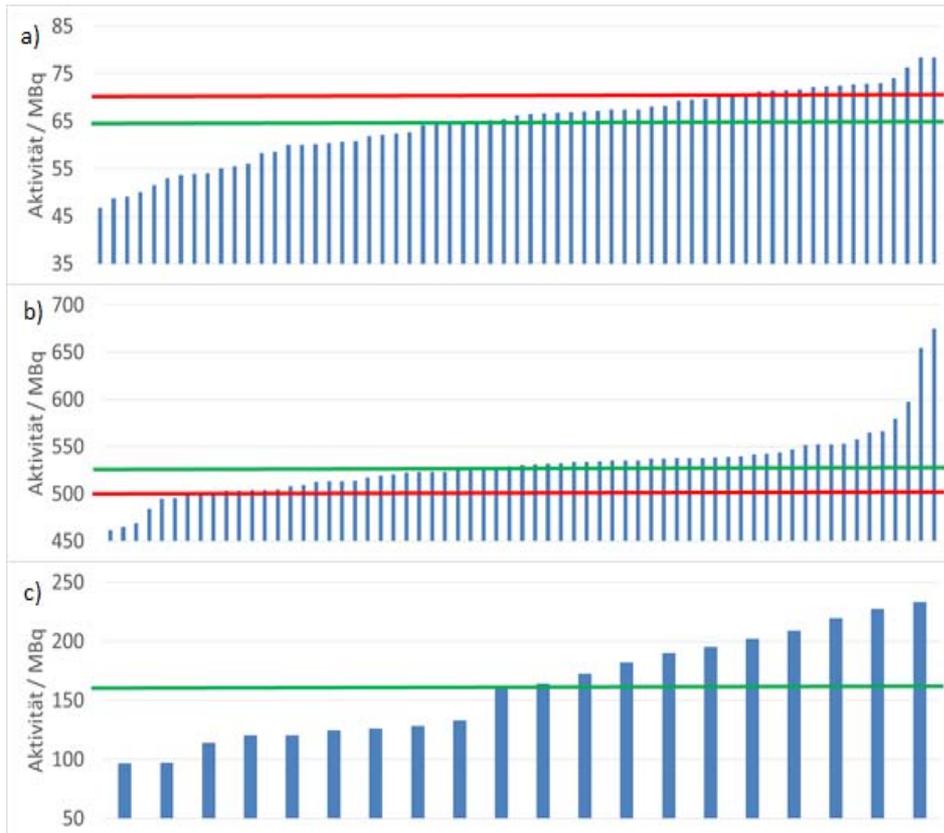


**Abbildung 2:** mittlere effektive Dosis durch die Applikation von Radiopharmaka bei der Untersuchung unterschiedlicher Körperbereiche. Den Daten der aktuellen Erhebung wurden Daten der Vorläuferstudie gegenübergestellt.

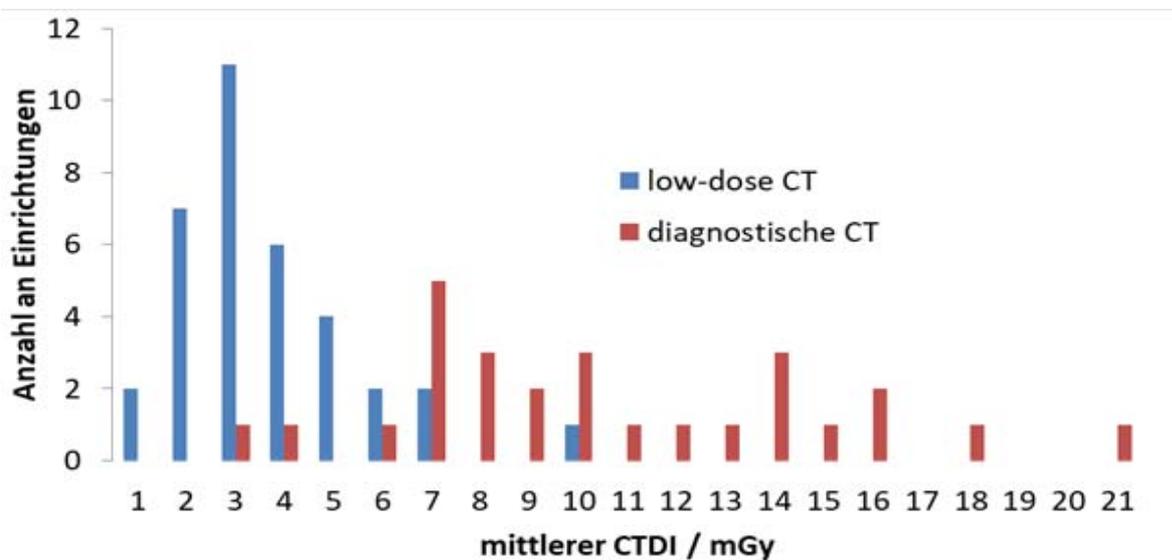
In Abbildung 3 sind für drei repräsentative Untersuchungen die im Mittel in Einrichtungen applizierten Aktivitäten dargestellt. Als grüne Linie ist der Mittelwert über sämtliche Einträge und als rote Linie ein ggf. für die Körperregion spezifizierter diagnostischer Referenzwert aufgetragen. Abbildung 3a zeigt Daten für Schilddrüsenszintigraphien mit Tc-99m. Die ausgeprägte Schulter in der Verteilung weist auf eine Konvergenz der applizierten Aktivitäten zu dem spezifizierten DRW hin. Darüber hinaus ist ein moderater Rückgang in den applizierten Aktivitäten bei der Untersuchung festzustellen. Abbildung 3b zeigt entsprechende Daten für die Untersuchung benigner Prozesse mit Tc-99m-Phosphaten. Hier ist gleichermaßen eine Konvergenz der applizierten Aktivitäten festzustellen. Im Unterschied zu Abbildung 3a liegt diese jedoch oberhalb des aktuell gültigen DRW. Zudem ist zu erkennen, dass bei etlichen Einrichtungen im Mittel eine deutlich oberhalb des DRW liegende Aktivität appliziert wurde. Abbildung 3c zeigt die Verteilung applizierter Aktivitäten für Ganzkörper PET-CT-Untersuchungen unter Verwendung von Ga-68-PSMA. Hierbei handelt es sich um eine neue Untersuchung, für die bislang kein DRW festgelegt wurde. Im Unterschied zu den beiden anderen Verteilungen ist hier keine Konvergenz applizierter Aktivitäten zu beobachten.

In etwa 24 % der Untersuchungen der Erhebung kamen Hybridmodalitäten zum Einsatz. Während PET-MRT- Untersuchungen mit etwa 0,6 % nicht nennenswert zum Gesamtumfang beitragen, machen PET-CT und SPECT-CT in der Summe etwa 24 % der Untersuchungen aus. Bei diesen Untersuchungen ist neben der nuklearmedizinischen auch die CT-Komponente im Hinblick auf die Strahlenexposition zu

<sup>1)</sup> Single Photon Emission Computed Tomography



**Abbildung 3:** mittlere in Einrichtungen applizierte Aktivität bei Untersuchungen der Schilddrüse mit Tc-99m Pertechnetat (a), des Skeletts wegen eines benignen Prozesses mit Tc-99m-Phosphaten (b) sowie des Ganzkörpers mit Ga-68-PSMA (c); die rote Linie entspricht dem aktuellen DRW, die grüne dem Mittelwert über die Mittelwerte der Einrichtungen



**Abbildung 4:** Verteilung der in Einrichtungen bei CT-Untersuchungen bei PET-CT verwendeten Dosis im Fall einer diagnostischen Untersuchung sowie bei low-dose Untersuchungen zur Schwächungskorrektur und anatomischen Koregistrierung. Als Dosisgröße wurde der Volumen-CT-Dosisindex  $CTDI_{vol}$  verwendet.

beachten. CT-Untersuchungen können dabei als low-dose CT zur Schwächungskorrektur und anatomischen Koregistrierung oder mit höherer Dosis als diagnostische Untersuchung durchgeführt werden, wobei diagnostische Untersuchungen nur im Fall von PET-CT-Untersuchungen im relevanten Umfang auftreten. Abbildung 4 zeigt die Verteilung der in unterschiedlichen Einrichtungen bei den beiden Fragestellungen verwendeten Dosiswerte für PET-CT-Untersuchungen. Die deutliche Überschneidung beider Verteilungen ist offensichtlich. Dieses weist daraufhin, dass aktuell die Zuordnung einer Untersuchung zu einer der beiden Gruppen in Einrichtungen nicht in allen Fällen einheitlich erfolgt.

Bei aller Unterschiedlichkeit der applizierten Dosiswerte in den Einrichtungen liegen die Mittelwerte für low-dose-Untersuchungen am Körperstamm bei PET-CT- sowie SPECT-CT-Untersuchungen recht einheitlich zwischen 2 mGy und 3 mGy und bei etwa 15 mGy für Untersuchungen des Hirnschädels. Eine Festlegung von DRW für diese Untersuchungen zur Steuerung des Vorgehens erscheint sinnvoll.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Die erfassten Daten bilden, zusammen mit den Meldungen der ärztlichen Stellen, die Grundlage für die Aktualisierung der diagnostischen Referenzwerte in der Nuklearmedizin und fließen auch in die Abschätzung der medizinischen Exposition der Bevölkerung und ausgewählter Bevölkerungsgruppen ein. Basierend darauf hat das BfS in Herbst 2020 einen Vorschlag zur Aktualisierung bestehender Referenzwerte bzw. zur Festlegung von diagnostischen Referenzwerten für neue Untersuchungen verbreitet und die Vorschläge des BfS wurden in einem Fachgespräch mit Vertretern von Fachgesellschaften diskutiert. Die Bekanntmachung der neuen diagnostischen Referenzwerte ist im ersten Quartal 2021 geplant.

<b>Thema</b> Erfassung der Häufigkeit von Strahlentherapien in Deutschland			
<b>Subject</b> <i>Recording the frequency of radiotherapy in Germany</i>			
<b>Kennzeichen</b> 3618S42434	<b>Beginn</b> 01.08.2018	<b>Ende</b> 31.03.2020	<b>Fördermittel</b> EUR 175.890,-
<b>Forschungs- / Auftragnehmer</b> Deutsche Gesellschaft für Radioonkologie (DEGRO) e.V., Berlin			
<b>Projektleitung</b> Prof. Dr. N. Willich	<b>Fachbetreuung BfS</b> Dr. E. Schüler / MB 1		<b>verantwortlich für den Text</b> Prof. Dr. N. Willich

## 1. ZIELSETZUNG

Gemäß § 125 Absatz 3 Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) ermittelt das BfS mindestens alle zwei Jahre die medizinische Strahlenexposition der Bevölkerung und ausgewählter Bevölkerungsgruppen. Die ermittelten Daten finden in der Berichterstattung an das Parlament sowie an die Vereinten Nationen (UNSCEAR<sup>1)</sup>- Bericht) Verwendung. Sie dienen als Grundlage für Entscheidungen zur Reduzierung der Strahlenexposition durch medizinische Maßnahmen.

Für das Forschungsvorhaben waren für Deutschland repräsentative Daten zur Häufigkeit von durchgeführten Strahlentherapien einschließlich der Bestrahlungsplanung sowie weiterer begleitender Maßnahmen insgesamt sowie getrennt nach stationärem und ambulantem Bereich bzw. gesetzlicher und privater Krankenversicherung zu erheben. Die Ergebnisse sollten auf die deutsche Gesamtbevölkerung hochgerechnet werden.

Da sich nicht alle interessierenden Fragestellungen aus den Abrechnungsdaten entsprechend der geltenden Gebührenordnungspositionen und Kodiersysteme beantworten ließen, wurden Lücken, welche durch Abrechnungsdaten offen gelassen wurden, durch eine entsprechende paneltaugliche Begleiterhebung geschlossen, um einen möglichst aussagekräftigen Gesamtdatenkörper zu den Häufigkeiten von Strahlentherapien entwickeln zu können.

Die erhobenen Daten waren gemäß Aufgabenstellung in Bezug auf die medizinische Indikationsstellung, Therapieverfahren, Bestrahlungsmodalitäten und -techniken sowie auf die bildgebenden Verfahren der Planung, Simulation und Verifikation zu stratifizieren, soweit das die Statistiken und Erhebungsergebnisse erlaubten.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK, REKRUTIERUNG DER DATENQUELLEN (AP 1)

Auf Basis der vom BfS aufgeführten Fragestellungen war der Konzeptvorschlag zur Erfassung von für Deutschland repräsentativen Daten zur Häufigkeit von Strahlentherapien für mindestens ein möglichst aktuelles Kalenderjahr (2016 oder 2015) innerhalb des kalkulierten Mengengerüsts zu konkretisieren.

In Bezug auf zusätzliche Kriterien bei der Abbildung von Stand von Wissenschaft und Technik in der Strahlentherapie schlug die DEGRO keine weiteren Erhebungsgegenstände vor.

<sup>1)</sup> United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

## 2.2 DATENGEWINNUNG (AP 2)

Bei Arbeitspaket (AP) 2 waren die erforderlichen Daten in anonymisierter Form bei den Datenhaltern - entsprechend der in AP 1 unterbreiteten Vorschläge - zu beziehen und beim Auftragnehmer zu speichern. Die Rohdaten waren auf Konsistenz zu prüfen und - sofern erforderlich - aufzubereiten, damit diese für das BfS am Projektende direkt nutzbar waren. Der gewonnene Datensatz war hinsichtlich aller im Konzept aufgeführten Fragestellungen ausreichend detailliert auszuwerten und gemäß dem in AP 1 aufgezeigten Ansatz auf die deutsche Gesamtbevölkerung hochzurechnen. Methodik und Ergebnisse der Auswertungen waren im Rahmen einer Abschlusspräsentation vorzustellen sowie im Abschlussbericht nachvollziehbar darzulegen.

## 2.3 AKTUALISIERUNG DES DATENBESTANDES (AP 3)

In AP 3 war schließlich ein Vorschlag zu erarbeiten, auf welche Weise das BfS in Zukunft selbständig den gewonnenen Datenbestand aktualisieren kann. Besonderes Augenmerk war hierbei auf eine kosteneffiziente - im Idealfall kostenneutrale - Herangehensweise zu legen.

# 3. METHODIK

## 3.1 METHODISCHER GESAMTRAHMEN

Der methodische Gesamtrahmen bei AP 1 und AP 2 bestand aus der Verknüpfung einer Sekundär- mit einer Primäranalyse.

Das Konzept zur Datengenerierung lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Im Zentrum standen geeignet aufbereitete Daten aus den Leistungs- bzw. Mengestatistiken zu EBM (Einheitlicher Bewertungsmaßstab, Vergütungssystem der vertragsärztlichen Versorgung), GOÄ (Gebührenordnung für Ärzte, Abrechnung außerhalb der vertragsärztlichen Versorgung) und OPS (Operationen- und Prozedurenschlüssel, Grundlage für Leistungsabrechnung der Krankenhäuser), welche im Regelfall jährlich zur Verfügung stehen. Im Laufe des Projektes wurde dazu übergegangen, die Daten aus einfachen Mengengerüsten durch aus Einzeldatensätzen generierte Leistungsdaten zu ersetzen (beim EBM zu Patienten bzw. Behandlungsfällen; bei der GOÄ zu Patienten; beim OPS zu Krankenhausaufenthalten).
- Flankierend wurde eine paneltaugliche Begleiterhebung durchgeführt, die
  - bezüglich der Anzahl der teilnehmenden Einrichtungen auf repräsentativer Stichprobe aufbaute sowie
  - in Zukunft bedarfsweise in mehrjährigem Rhythmus vorgenommen werden könnte.

Die Begleiterhebung sollte primär die aus Abrechnungsdaten gewonnenen Informationen zu EBM, GOÄ und OPS ergänzen.

Drei Ebenen der Datenhierarchie wurden unterschieden:

1. Patient
2. Therapie
3. Bestrahlung.

Die zweite Ebene „Behandlungsfall/Behandlungszyklus/Bestrahlungsserie (Therapie)“ lieferte die entscheidende Betrachtung. „Patient“ und „Bestrahlung“ (als Einzelereignis) traten dagegen in den Hintergrund und wurden nicht eingehender analysiert.

Entsprechend der übergeordneten Mappingtabelle als Instrument der Konsolidierung wurden die Daten aus den verschiedenen Abrechnungsstatistiken zu EBM, GOÄ und OPS auf folgenden Ebenen zusammengeführt:

- Bestrahlungsarten/-verfahren (unterteilt nach Teletherapie, Brachytherapie)
- Planungsverfahren

- Simulationsverfahren
- Verifikationsverfahren (hierzu konnten keine Positionen der Leistungserfassung bzw. Abrechnung in den Statistiken identifiziert werden)

Die Datenaufbereitung wurde nach zwei Auswertungs- bzw. Differenzierungsgraden unterschieden:

- einfache Mengengerüste nach Gebührenordnungen/Kodiersystemen
- nach Bestrahlungsverfahren, demographischen und geographischen Merkmalen sowie Diagnosen differenzierbaren Einzeldatensätze.

Während zu EBM und OPS Daten zu den Grundgesamtheiten der Strahlentherapien in Deutschland vorlagen, musste in Bezug auf die GOÄ eine Hochrechnung zu den ambulant durchgeführten Strahlentherapien in der Privaten Krankenversicherung vorgenommen werden.

Ergänzend zu den Auswertungen von Leistungs- und Abrechnungsstatistiken wurde eine Begleiterhebung seitens DEGRO durchgeführt, mit der es jene Informationslücken zu schließen galt, welche durch die Analysen zu EBM, GOÄ sowie OPS offen gelassen wurden. Das gewonnene Datenmaterial wurde zur Ergänzung des Datensatzes zur radioonkologischen Versorgung in Deutschland herangezogen und hinsichtlich der zentralen Fragestellungen datentechnisch ausdifferenziert.

### 3.2 BEURTEILUNG DER AUSSAGEKRAFT DES DATENMODELLS

Zusammenfassend lässt sich die Aussagekraft der mit dem Datenmodell gewonnenen Therapieanzahl wie folgt bewerten:

- Während beim EBM mit Hilfe der Datensätze der Kassenärztlichen Bundesvereinigung (KBV) recht eindeutig auf Patienten und Therapien geschlossen werden konnte, war dies beim OPS nicht möglich. Hier bestand die Gefahr einer Mehrfachzählung von Therapien dadurch, dass Angaben von Seiten des Forschungsdatenzentrums (FDZ) des Statistischen Bundesamtes nur zu „Krankenhausaufenthalten“ erhältlich waren. Mit flankierenden Hilfsrechnungen war eine auf „Therapie“ fokussierte Betrachtung - in Form einer Zusammenfassung von Krankenhausaufenthalten zu Therapien, angelehnt an eine als „wahrscheinlich“ anzunehmende „Therapieerlichkeit“ - möglich. Dieser Weg war bei der GOÄ grundsätzlich versperrt. Es gab zwar Häufigkeitsstatistiken zu Leistungen der Strahlentherapie, welche auf die Grundgesamtheit der ambulanten Fälle nach GOÄ in Deutschland durch den Datenhalter PKV-Verband hochgerechnet wurden, es konnte jedoch nur eine relativ kleine, als begrenzt repräsentativ anzusehende Stichprobe des Bundesverbandes Verrechnungsstellen (BVVG) in Form patientenbezogener Angaben herangezogen werden. Inwieweit die Datensätze des BVVG auf Patientenebene als lückenlos zusammenhängend angesehen werden können, konnte nicht abschließend beurteilt werden. Gerade bei der GOÄ schien es unumgänglich, aus mehreren als jeweils unzulänglich zu qualifizierenden Quellen auf eine in Umrissen erkennbare Grundgesamtheit zu schließen.
- Die mangelnde Deckungsgleichheit von EBM, GOÄ und OPS bzw. die strukturellen Unterschiede hinsichtlich der Leistungsdefinitionen lassen ein nur hinreichend genaues Mapping zu, das mit zunehmender Eindringtiefe bzw. Leistungsdifferenzierung unschärfer werden musste. Eine valide Konsolidierung war damit nur auf einer übergeordneten Ebene, nicht jedoch auf Ebene einzelner Gebührenordnungspositionen, Ziffern bzw. OPS-Kodes möglich. Dies betraf in erster Linie die Bestrahlungstechniken sowie die technischen Modalitäten der Bestrahlung und Planung. Zu Diagnosen, demographischen und geographischen Merkmalen war hiervon unabhängig eine Aussage im Kontext von Strahlentherapien möglich.
- Teilweise wies der Aufbau der Statistiken der Datenhalter zu bestimmten Auswertungsgegenständen unterschiedliche Definitionen und Strukturen auf (u. a. Altersgruppen, Untergliederung des Datenmaterials nach geografischen Merkmalen). Dies machte eine Annäherung der Strukturen mit Hilfe von Nebenrechnungen erforderlich.

Das Ziel bestand letztlich darin, einen Gesamtdatenkörper aus den wesentlichen Komponenten zu entwickeln, die sich in Bezug auf den strukturellen Aufbau gegenseitig abstützten und Gesamtergebnisse auf Ebene der Bundesrepublik Deutschland erlaubten.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 BESCHAFFUNG DES STATISTISCHEN DATENMATERIALS

Die Abklärungen von Datenlieferungen wurden unmittelbar nach Projektbeginn aufgenommen und dauerten bis 2020 an. Zunächst wurden die Entscheidungsträger auf Ebene der Spitzenverbände von KBV, PKV-Verband und BVVG sowie einzelner Kassenärztlicher Vereinigungen (u. a. Kassenärztliche Vereinigung (KV) Nordrhein, KV Bayerns, KV Hamburg) schriftlich und fernmündlich kontaktiert, um die grundsätzliche Bereitschaft einer Kooperation auszuloten.

Danach wurden Gespräche bzw. Telefonkonferenzen geführt, in denen das Projekt genauer vorgestellt sowie die Möglichkeiten einer Belieferung mit geeigneten Daten erörtert wurden.

Im Anschluss wurde während AP 1 eine datentechnische Machbarkeitsprüfung vorgenommen, welche neben der Analyse der Datensatzbeschreibungen zu den Datenlieferungen insbesondere bereits vorliegende und als verwertbar angesehene Statistiken zu EBM, GOÄ und OPS zum Gegenstand hatte.

In den Jahren 2019 und 2020 wurden während AP 2 die avisierten Datenmaterialien zur Verfügung gestellt, diese Daten entsprechend der Fragestellungen sowie der Struktur der Mappingtabelle aufbereitet sowie das aufbereitete Datenmaterial ausgewertet.

Als zentrales Erhebungsjahr wurde 2016 gewählt. Eine durchgängige Auswertung von Daten zu 2017 oder später (auf Basis von Einzeldatensätzen oder anderen Statistiken) war während der Arbeiten an diesem Bericht auf Grund der zeitlichen Abgrenzungsproblematik von Strahlentherapien nicht möglich. Das Problem lag und wird auch weiterhin darin liegen, dass lediglich unter Einschluss eines Vor- und eines Folgejahres erkennbar wird, wann Therapien begonnen bzw. abgeschlossen wurden und welchem Jahr die Therapien zuzuordnen sind. Entscheidend war das Kriterium „Therapiebeginn“. Je nachdem, in welches Kalenderjahr der Therapiebeginn fällt, ist die gesamte Therapie diesem Jahr zuzuweisen - ein Vorgehen, das beim vorliegenden Datenmaterial nur in Bezug auf den EBM (als „Schlüsselgebührenordnung“) auswertungstechnisch möglich war.

### 4.2 VORBEREITUNG UND DURCHFÜHRUNG DER BEGLEITERHEBUNG

Die Begleiterhebung wurde so angelegt, dass sie als Panel bei Bedarf weitergeführt werden kann. An der Erhebung, welche zwischen November 2019 und April 2020 in drei Staffeln durchgeführt wurde, nahmen insgesamt 99 Einrichtungen, davon 32 Praxen und 59 Medizinische Versorgungszentren (MVZ) (Praxen und MVZ im Bereich der niedergelassenen Ärzte sowie an Krankenhäuser bzw. Universitätskliniken angegliederte Praxen und MVZ) sowie drei Krankenhäuser und zwei Universitätskliniken (jeweils ohne angegliederte Praxis bzw. MVZ) teil.

Für die Überprüfung der Repräsentativität wurden Mehrfachangaben von Einrichtungen mit sowohl ambulanter wie auch stationärer Einheit berücksichtigt und 142 ambulante und stationäre Einheiten festgestellt, welche durch 99 Teilnehmer an der Erhebung betrieben wurden. Der mit der Stichprobe erreichte Erfassungsgrad betrug damit 31 % der Grundgesamtheit von 455 strahlentherapeutischen Einrichtungen, die im Jahr 2016 durch die DEGRO registriert wurden. Diese Anzahl kam auf die identische Zählweise der Ermittlung der Einheiten zustande, indem ambulante sowie stationäre Einheiten ein und desselben Krankenhauses bzw. ein und derselben Universitätsklinik doppelt gezählt wurden. Der Stichprobenanteil wurde damit valide berechnet und entsprach der kongruenten Berechnung bei der Ermittlung der Grundgesamtheit.

An dem zuvor stattgefundenen Pretest hatten sich zehn Einrichtungen beteiligt.

Die Ergebnisse dieser Begleiterhebung wurden - soweit sich diese direkt für die Fragestellungen als relevant erwiesen - im Abschlussbericht wiedergegeben.

## 5. ERGEBNISSE

Die Gesamtanzahl der Strahlentherapien in Deutschland im Jahr 2016 als zentralem Bezugsjahr wurde abschließend auf ca. 469 000 geschätzt. Die Aufteilung nach Gebührenordnungen/Kodiersystemen geht aus Tabelle 1 hervor.

**Tabelle 1: Anzahl der Strahlentherapien in Deutschland 2015 bis 2017 (nach Gebührenordnungen/Kodiersystemen)**

Jahr	2015		2016		2017	
	absolut	%-Anteil	absolut	%-Anteil	absolut	%-Anteil
EBM (ambulant; GKV)	361.379	78%	368.279	79%	360.869	78%
GOÄ (ambulant; PKV bzw. Nicht-GKV)*	56.163	12%	53.251	11%	50.147	11%
OPS (stationär; GKV/PKV)**	48.472	10%	47.446	10%	50.000	11%
<b>GESAMT</b>	<b>466.014</b>	<b>100%</b>	<b>468.976</b>	<b>100%</b>	<b>461.016</b>	<b>100%</b>

\* über Faktor aus GKV-Wert (EBM) abgeleitet  
 \*\* OPS zu 2017: vorläufige Annahme mit gerundetem Wert (Daten zum Abgabetermin des Abschlussberichtes nicht vorliegend)

Zur Ermittlung des Unsicherheitsbereiches wurde eine Bandbreitenbetrachtung vorgenommen. Das Grundprinzip hierbei war, sich der systematischen Grundannahmen beim Aufbau des Gesamt-Datenkörpers zu bedienen, um die ermittelte Spannbreite methodisch aus der Vorgehensweise bei AP 2 nachvollziehbar zu machen. Insgesamt wurde mit dem Verfahren eine Bandbreite von 410 000 bis 520 000 Strahlentherapien in Deutschland beschrieben und für realistisch angesehen, woraus sich ein Mittelwert von 465 000 Therapien ergibt, der unwesentlich entfernt von der Größe von 469 000 Strahlentherapien angesiedelt ist. Die Bandbreite nach oben und unten ist damit in einer Größenordnung von ca. 12 % vom Mittelwert aus zu taxieren.

Die zentralen Ergebnisse zu den Fragestellungen gehen aus Tabelle 2 hervor.

**Tabelle 2: Zusammenfassende Tabelle zu den Projektergebnissen bei AP 2**

zentrale Fragestellungen des BfS	Statistik zu EBM, GOÄ und OPS 2016		DEGRO-Begleiterhebung 2018		Hochrechnung**	
	absolut	%-Anteil	absolut	%-Anteil	absolut	%-Anteil
<b>Indikationsstellung/Diagnose</b>						
Benigne entzündliche Erkrankungen oder Tumoren	258.946	55%				
Maligne solide Tumoren	201.615	43%				
Maligne Lymphome	4.943	1%				
andere maligne Erkrankungen	3.472	1%				
<b>Gesamt</b>	<b>468.976</b>	<b>100%</b>				
<b>Behandlungsanlass**</b>						
palliativ intendierte Behandlung			41.869	23%	106.292	23%
kurativ intendierte Behandlung			142.865	77%	362.684	77%
<b>Gesamt</b>			<b>184.734</b>	<b>100%</b>	<b>468.976</b>	<b>100%</b>
<b>Therapieverfahren</b>						
mit Teletherapie erbrachte Strahlentherapien	461.365	98%				
mit Brachytherapie erbrachte Strahlentherapien	7.611	2%				
unbekannt	346	0%				
<b>Gesamt</b>	<b>468.976</b>	<b>100%</b>				
<b>Bestrahlungsmodalität*:</b>						
Röntgenstrahlung	141.660	30%				
Megavoltstrahlentherapie (ultraharte Röntgenstrahlung)	309.737	66%				
Gammastrahlung	6.162	1%				
Elektronen	2.505	1%				
Protonen / Schwerionen	1.495	0%				
nicht eindeutig ermittelbar (Kombinationstherapien)	7.070	2%				
unbekannt	346	0%				
<b>Gesamt</b>	<b>468.976</b>	<b>100%</b>				
<b>Techniken:</b>						
Konventionelle Radiotherapie	139.806	30%				
3D-konformale Radiotherapie	166.053	35%				
Intensitätsmodulierte Radiotherapie**			68.424	94%	135.624	94%
Stereotaktische Radiotherapie (Gamma-Knife, CyberKnife)**			4.066	6%	8.059	6%
Hochpräzisionstechnik	143.683	31%	72.490	100%	143.683	100%
Interstitielle Brachytherapie	2.360	1%				
übrige Techniken	16.726	4%				
unbekannt	346	0%				
<b>Gesamt</b>	<b>468.976</b>	<b>100%</b>				

\* Die Positionen in EBM, GOÄ und OPS lassen sich nur grob den Modalitäten zuordnen (Unschärfen unvermeidlich).  
 \*\* über DEGRO-Begleiterhebung näherungsweise Hochrechnung auf Grundgesamtheit der Strahlentherapien; %-Anteil mit Bezug auf Gesamt

Die Aufteilung der Strahlentherapien in der ermittelten Größenordnung von 469 000 entsprechend der Stratifizierung der Fragestellungen ist wie folgt zu beurteilen:

- Bei den Indikationsstellungen überwiegen benigne entzündliche Erkrankungen/Tumoren mit 258 946 Therapien gegenüber malignen soliden Tumoren mit 201 615 Behandlungen.
- 77 % der Therapien waren kurativ intendiert.
- 98 % der Behandlungen waren Teletherapien, 2 % Brachytherapien.
- Bei den Bestrahlungsmodalitäten überwog die Megavoltstrahlentherapie (mit ultraharter Röntgenstrahlung) mit 66 % gegenüber der Röntgenstrahlung mit 30 %.
- Bei den Techniken lag die 3D-konformale Radiotherapie (35 %) vor der Hochpräzisionstechnik (31 %) und der konventionellen Radiotherapie (30 %).

Besonders hervorzuheben ist, dass mit einer Anzahl von 43 011 mindestens 20 % der Strahlentherapien in Zusammenhang mit der Behandlung von Tumoren bzw. bösartigen Erkrankungen bei einer Gesamtanzahl von 216 653 (entspricht 46 % der 468 976 Therapien insgesamt) stationär erfolgen (siehe Tabelle 3).

**Tabelle 3: Anzahl der ambulant und stationär erbrachten Strahlentherapien nach Diagnose-Gruppen 2016 (Tumoren und maligne Erkrankungen)**

Diagnose		EBM/GOÄ (ambulant)			OPS (stationär)			GESAMT 2016 (konsolidiertes Ergebnis)		
		Anzahl Therapien	in % (Diagnose)	in % (Sektor)	Anzahl Therapien	in % (Diagnose)	in % (Sektor)	Anzahl Therapien	in % (Diagnose)	in % (Sektor)
1	Benigne Tumoren	6.272	4%	95%	352	1%	5%	6.624	3%	100%
2	Maligne solide Tumoren	160.736	93%	80%	40.879	95%	20%	201.615	93%	100%
3	Maligne Lymphome	4.322	2%	87%	621	1%	13%	4.943	2%	100%
4	andere maligne Erkrankungen	2.312	1%	67%	1.160	3%	33%	3.472	2%	100%
<b>Gesamt</b>		<b>173.642</b>	<b>100%</b>	<b>80%</b>	<b>43.011</b>	<b>100%</b>	<b>20%</b>	<b>216.653</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Insgesamt ließ sich mit den statistischen Verfahren zu EBM, GOÄ und OPS (auf Basis von Einzeldatensätzen) sowie der DEGRO-Begleiterhebung ein für die Fragestellung sehr gut geeigneter Gesamt-Datenkörper aufbauen. Der Datenkörper weist an verschiedenen gekennzeichneten bzw. hervorgehobenen Stellen angesichts der hohen Komplexität der Aufgabe methodisch bedingte Unschärfen auf, die sich weder beseitigen noch in tieferen Schichten des Datenkörpers genauer quantifizieren lassen.

Nur mit Hilfe der Begleiterhebung war es möglich, Lücken im statistischen Datenmaterial zu überbrücken. Es galt hierbei abzuwägen, inwieweit ein zunehmender Grad an Unsicherheit (durch die Ergänzung statistischer Materialien aus verschiedenen Quellen mit empirisch gewonnenen Daten) durch Erkenntnisgewinne in Bezug auf die Fragestellungen im Sinne einer gelungenen Projektanordnung kompensiert werden konnten. Hierbei konnten neben „härteren“ Auswertungsergebnissen zielführende Arbeitshypothesen entwickelt werden, die sich mit weiter verfeinerten Statistiken in Zukunft verifizieren lassen, zum Abgabezeitpunkt des Berichts jedoch zumindest signifikante und begründbare Tendenzen zu Strahlentherapien in Deutschland in der Verknüpfung von

- Krankheitsbildern
  - Verfahren der Tele- und der Brachytherapie
  - Techniken der konventionellen und der Hochpräzisionsbestrahlung
  - ambulanter und stationärer strahlentherapeutischer Versorgung
- aufzeigen.

Die Empfehlungen zu AP 3 sollten einen Weg aufzeigen, wie die Erfahrungen aus dem Initialprojekt zur Strahlentherapie für das BfS dauerhaft nutzbar gemacht werden können.

Bereits eine vereinfachte mengengerüstgestützte Analyse (entsprechend AP 1) würde dem BfS eine Kontinuität beim Monitoring der Strahlenbelastung der deutschen Bevölkerung in Folge von Strah-

lentherapie mit ausreichender Genauigkeit im Rahmen eines kosteneffizienten Vorgehens ermöglichen.

Mit erfolgter Einführung eines reformierten EBM oder einer novellierten GOÄ würde der Zeitpunkt nach etwa drei Jahren als gekommen erscheinen, das Projekt eines Monitorings mit dem Differenzierungsgrad, welcher bei AP 2 erreicht wurde, zeitpunktbezogen zu vertiefen, um im Anschluss erneut in den Modus einer mengengerüstgestützten Analyse zu wechseln.

## **6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE**

Die Ergebnisse werden in die Parlamentsberichte sowie Jahresberichte von BMU und BfS aufgenommen. Damit werden neben detaillierten Zahlen zu diagnostischen Strahlenanwendungen zukünftig auch detailliertere Informationen zu (strahlen-)therapeutischen Anwendungen präsentiert werden können. Die gewonnenen Daten sind zudem geeignet, um auch detaillierteren internationalen Berichtspflichten nachzukommen (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR).



**2.5 Themenbereich 05**  
**Radioökologie**

**2.5 *Subject area 05***  
***Radioecology***

<b>Thema</b>			
Erfassung der aktuellen Kontaminationssituation bei Wildschweinen in Deutschland			
<b>Subject</b>			
<i>Assessment of contamination levels of wild boar (Sus scrofa) in Germany</i>			
<b>Kennzeichen</b>	<b>Beginn</b>	<b>Ende</b>	<b>Fördermittel</b>
3617S52531	01.10.2017	30.09.2020	EUR 258.248,-
<b>Forschungs- / Auftragnehmer</b>			
Dr. Fielitz Umweltanalysen, Hambühren			
<b>Projektleitung</b>	<b>Fachbetreuung BfS</b>	<b>verantwortlich für den Text</b>	
Dr. U. Fielitz	Dr. P. Hartmann / UR 6	Dr. U. Fielitz	

## 1. ZIELSETZUNG

*Sus Scrofa* (Wildschwein) ist die einzige als Lebensmittel genutzte Tierart, die auch 30 Jahre nach dem Tschernobyl-Fallout in einigen Gebieten der Bundesrepublik noch deutlich erhöhte Cs-137-Kontaminationen aufweist. Dabei ist die Variabilität der Cs-137 Messwerte sowohl innerhalb einer als auch zwischen verschiedenen Populationen groß. Die wesentliche Kontaminationsquelle sind Hirschtrüffel.

In diesem Forschungsvorhaben soll die Kontaminationssituation von Wildschweinen anhand aktueller Daten aus 3 Untersuchungsgebieten (Bodenmais/Bayerisch Eisenstein, Dahn und Zusmarshausen) über 3 Jahre evaluiert werden.

Das Vorhaben ist in 3 Arbeitspakete (AP) unterteilt:

- Erhebung von Informationen zu Jagdstrecke und Abschussgewichten (AP 1)
- Probenentnahme und Messung von Hirschtrüffeln in den Untersuchungsgebieten (AP 2)
- Probenentnahme und Messungen an Muskelfleischproben von Wildschweinen (AP 3).

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 BESCHAFFUNG JAGDRELEVANTER DATEN (AP 1)

Im ersten Arbeitspaket wurden in den 3 Untersuchungsgebieten Daten zur Erlegung von Wildschweinen retrospektiv erfasst und daraus die Verteilung der Körpergewichte sowie der Abschüsse im Jahresverlauf analysiert. Die Fragestellungen waren:

- Welchen Einfluss haben gesetzliche Vorgaben, jagdliche Strategien und Umweltfaktoren auf die Abschusszahlen und die Erlegungsgewichte von Wildschweinen?
- Können aus diesen Informationen allgemeingültige Prognoseverfahren zur Gewichtsverteilung abgeleitet werden?

### 2.2 HIRSCHTRÜFFELSUCHE AN RASTERPUNKTEN (AP 2)

Im zweiten Arbeitspaket wurde die Cs-137-Aktivität von Hirschtrüffeln sowie deren Biomasse exemplarisch in den 3 Untersuchungsgebieten bestimmt. Die Inventarbestimmung der Hirschtrüffel ermöglicht erstmals eine Abschätzung der für Wildschweine potenziell verfügbaren Fruchtkörpermasse. Dazu wurden die in einem definierten Waldbodenvolumen vorhandenen Fruchtkörper erfasst.

### **2.3 BESCHAFFUNG VON WILDSCHWEINPROBEN (AP 3)**

Ziel von Arbeitspaket 3 ist die Dokumentation und Evaluierung der Cs-137-Kontamination von Wildschweinen in den Untersuchungsgebieten, wo auch Hirschtrüffeln untersucht werden. Dazu wurden pro Jahr ca. 50 Wildschweinproben aus jedem Gebiet gammaspektrometrisch gemessen.

Zu jeder Probe wurden folgende Daten dokumentiert:

- Untersuchungsgebiet
- Datum des Abschusses
- Erlegungsgewicht des beprobten Tieres
- Geschlecht
- jagdliche Klassifizierung
- Jagdumstände (Einzelansitz, Drückjagd)
- spezifische Aktivität von Cs-137.

Zusätzlich wurden aus den Untersuchungsgebieten über die Dauer von 30 Monaten die Gewichte von allen erlegten Wildschweinen beschafft.

## **3. METHODIK**

### **3.1 BESCHAFFUNG JAGDRELEVANTER DATEN**

Von den Forstbetrieben Bodenmais, Dahn und Zusmarshausen wurden jagdrelevante Daten über Wildschweine recherchiert:

- Abschussdatum
- Aufbruchgewicht
- Geschlecht
- Altersklasse.

Zusätzlich wurden Daten zum Abschussplan, den jagdlichen Gepflogenheiten, z. B. Jagdart, und die Freigabe bei Gesellschaftsjagden erfasst. Insgesamt standen 1 916 Datensätze zur Verfügung, wobei 1 750 Angaben zu Gewichten enthielten. Die Klassifizierung ist:

- Frischling
- Überläufer
- Bache
- Keiler.

Zusätzlich wurden Informationen zum Thema „Einflussfaktoren auf die Gewichte von Wildschweinen“ durch eine Literaturrecherche erhoben.

### **3.2 HIRSCHTRÜFFELSUCHE AN RASTERPUNKTEN**

Die Untersuchung der Hirschtrüffeln erfolgte in jedem Untersuchungsgebiet an 15 Rasterpunkten, die das Gebiet weitgehend gleichmäßig abdecken. Von jedem Rasterpunkt aus wurde die Suche nach Hirschtrüffeln gestartet. Die Fruchtkörper wurden anhand von speziellen Standortfaktoren sowie an Wühlstellen von Wildschweinen gefunden.

### **3.3 BESCHAFFUNG VON WILDSCHWEINPROBEN**

Wildschweine haben sich in den letzten Jahrzehnten in Deutschland stark vermehrt. Der überwiegende Teil der jährlichen Erlegungen erfolgt in vielen Gebieten von Oktober bis Mitte Februar auf großen Gesellschaftsjagden. Dies trifft auch für die beprobten Untersuchungsgebiete zu. In Bodenmais werden Wildschweine auf Grund des steilen Geländes auch ganzjährig durch Einzelansitz erlegt.

Da die Beschaffung der Proben erfahrungsgemäß schwierig ist, wurde schon am 01.09.2017 intensiv mit dem AP 3 begonnen, um Fleischproben bei den Gesellschaftsjagden im Herbst entnehmen zu können.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 SUCHE VON HIRSCHTRÜFFELN-FRUCHTKÖRPER

Der oberste Auflagehorizont des Waldbodens wurde auf einer Fläche von 2 m x 2 m nach Fruchtkörpern abgesucht, das Bodenmaterial horizontweise bzw. in 2 cm Schichtfolgen abgetragen und in einem Laubsack gelagert. Diese Prozedur wurde bis in 25 cm Bodentiefe wiederholt und dabei gefundene Fruchtkörper entnommen.

Die Trüffel wurden mit anhaftenden Wurzelhüllen und Bodenpartikeln in Polyethylen-Beutel verpackt, um die Wasserverdunstung möglichst gering zu halten. Da die Arbeiten in den Wäldern jedes Mal mehrere Tage dauerten, wurden die Hirschtrüffel bis zur Rückfahrt in einem Kühlschrank zwischengelagert.

### 4.2 Cs-137-AKTIVITÄTSBESTIMMUNG VON HIRSCHTRÜFFELN

Die genaue mykologische Bestimmung der Trüffel erfolgte im Labor anhand der Morphologie des Fruchtkörpers, speziell der Warzen und der Peridie. Im Labor wurden an den Trüffeln anhaftende Boden- und Wurzelpartikel manuell entfernt und mit einer weichen Wurzelbürste gesäubert. Für jeden Rasterpunkt wurde das Gesamtgewicht der Hirschtrüffel ermittelt.

Die Fruchtkörper wurden zerkleinert und bei 55 °C in einem Umlufttrockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Vor der Einwaage in die Messbecher wurden die Proben in einer Mühle pulverisiert.

Da für die Aktivitätsbestimmung nur eine Kalibrierung von minimal 25 ml vorlag, wurden die Hirschtrüffelproben für die Messung auf dem Reinstgermaniumdetektor mit getrockneter Aktivkohle auf 25 ml aufgefüllt.

### 4.3 WILDSCHWEINE - PROBENAUFARBEITUNG UND CS-137-AKTIVITÄTSBESTIMMUNG

Den Forstdienststellen wurde Verpackungsmaterial für den Versand der Wildschweinproben zur Verfügung gestellt.

Die Muskelfleischproben wurden tiefgefroren und per Post an das Labor für Radionuklide (LARI) der Universität Göttingen angeliefert. Das aufgetaute Muskelfleisch wurde homogenisiert und in 120 ml Messgefäße eingewogen. Die Messung der Proben erfolgte an Reinstgermaniumdetektoren. Die Messzeiten betragen, je nach Aktivität der Probe, 6 bis 24 Stunden.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 LITERATURSTUDIE: VERHÄLTNIS VON AUFBRUCHGEWICHT ZU LEBENDGEWICHT

Die Analyse von 10 Veröffentlichungen ergab, dass bei Wildschweinen das Aufbruchgewicht durchschnittlich 80 % des Lebendgewichts beträgt.

### 5.2 MODELL DER GEWICHTSVERTEILUNG FÜR EIN MUSTERJAGDREVIER

Generell ist die Gewichtsverteilung von Wildschweinen von vielen Parametern abhängig, die zusätzlich zeitabhängig und quantitativ unbekannt sind. Daher wurden für die Verteilung in einem Musterrevier vorzugsweise die Ergebnisse aus der Praxis herangezogen: In der Abbildung 1 sind die Mittelwerte aus den Häufigkeitsverteilungen der 3 Untersuchungsgebiete als beste Schätzung dargestellt.

Die aus den erhobenen Daten abgeleitete Verteilung der Erlegungsgewichte kann als praxisrelevantes Ziel für eine moderne Jagdstrategie angesehen werden. Junge, gestreifte Frischlinge werden traditionell weniger stark bejagt als ältere, weshalb die Klasse 0 – 10 kg nur einen Anteil von 9,1 % hat. Mit

27,5 %, stellt die Klasse 10 – 20 kg den größten Anteil an den Erlegungen. Danach nimmt die Häufigkeit mit jeder Gewichtsklasse kontinuierlich ab.

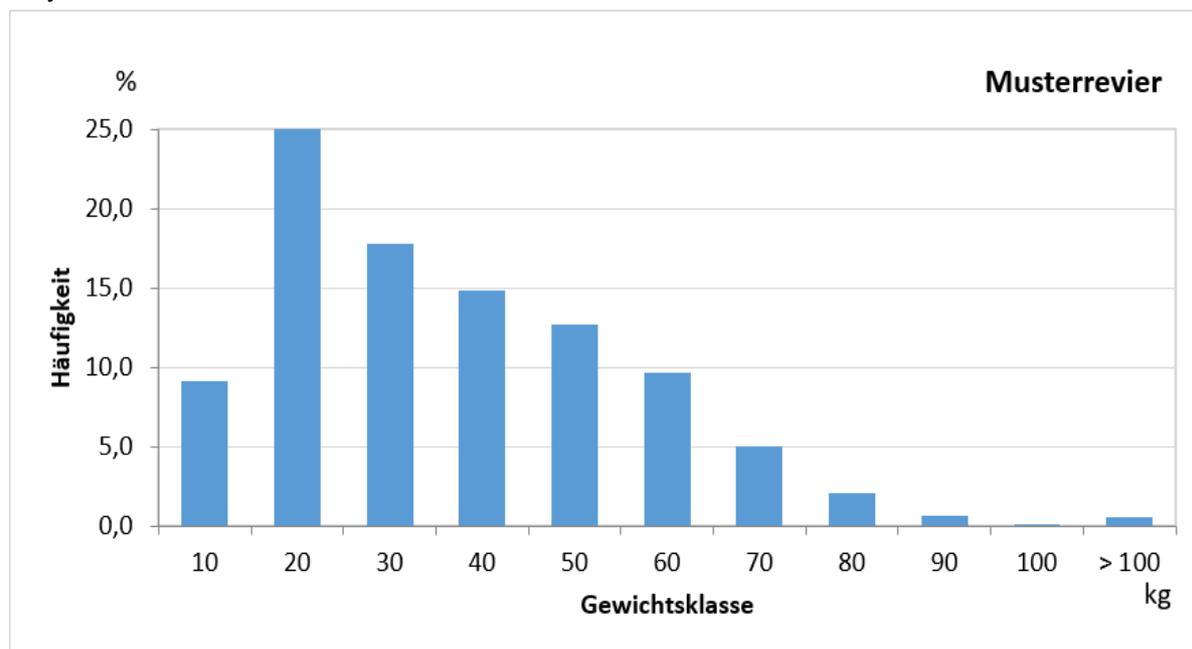


Abbildung 1: Prognose für die Gewichtsverteilung von Wildschweinen für ein Musterrevier

### 5.3 BIOMASSENVORKOMMEN VON HIRSCHTRÜFFELN (AP 2)

Die Ergebnisse der Hirschtrüffel-Inventur sind in der Tabelle 1, bezogen auf Frischgewichte, dargestellt. Die gesamte Fruchtkörperbiomasse war im Untersuchungsgebiet Bodenmais mit 4 799 g fast viermal so hoch wie in Dahn mit 1 234 g. Die Verteilung der Messwerte war in Bodenmais und Zusmarshausen rechtsschief, mit Ausreißern zu hohen Werten. In Bodenmais wurden an 2 Rasterpunkten mit 936 g und 1027 g deutlich höhere Gesamtfrischgewichte ermittelt als an den übrigen Rasterpunkten.

Der Median der Biomassen ist mit 205 g in Bodenmais deutlich höher als in Zusmarshausen mit 96 g und Dahn mit 71 g.

Tabelle 1: Statistische Daten der Gesamtfrischgewichte von Hirschtrüffeln an je 15 Rasterpunkten pro Untersuchungsgebiet (Boden-Suchvolumen jeweils 2 x 2 x 0,25 m)

Gesamtfrischmasse	Bodenmais	Zusmarshausen	Dahn
Summe	4 799 g	2 763 g	1 234 g
Mittelwert	320 g	184 g	82 g
Median	205 g	96 g	71 g

Die größeren Hirschtrüffeln wurden ausnahmsweise einzeln gewogen. Das höchste Gewicht war 22,3 g aus Bodenmais, die Maximalgewichte aus Zusmarshausen waren 17,6 g und aus Dahn 10,1 g.

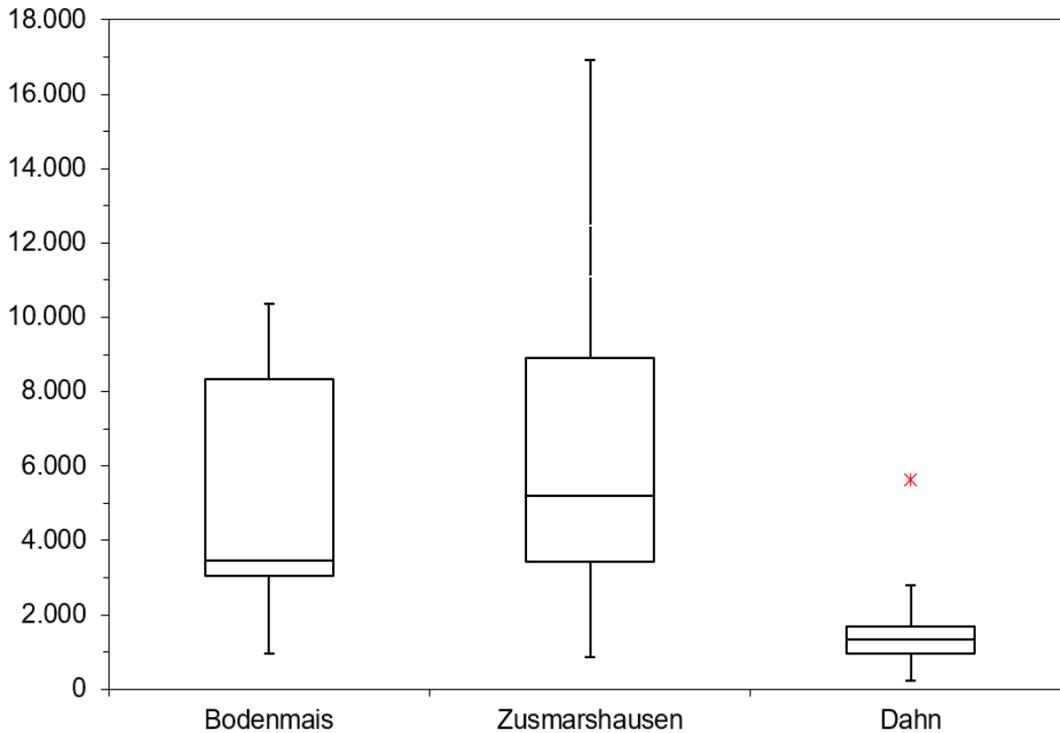
Die mittlere Bodentiefe der Fundstellen betrug in allen 3 Untersuchungsgebieten 8 -12 cm (mit einer Abweichung von je 1 cm). In diesem Bodenbereich treffen an vielen Standorten Auflagehumus und Ah-Horizont aufeinander. Hier befindet sich in vielen Waldgebieten auch Jahrzehnte nach dem Tschernobyl-Fallout der Peak der Cs-137-Aktivität.

### 5.4 CS-137-AKTIVITÄT VON HIRSCHTRÜFFELN (AP 2)

Aus jedem Untersuchungsgebiet wurde die Cs-137-Aktivität einer Hirschtrüffel pro Rasterpunkt bestimmt. Die Messwerte reichten von 226 Bq/kg FS (Frischsubstanz) in Dahn bis 16 908 Bq/kg FS in Zusmarshausen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2 als Box-Plots abgebildet. Der höchste Medianwert

der Cs-137-Aktivität wurde für Hirschtrüffel aus Zusmarshausen mit 5 208 Bq/kg FS ermittelt, gefolgt von Bodenmais 3 460 Bq/kg FS und Dahn 1 345 Bq/kg FS.

Cs-137-[Bq/kg·FS]



**Abbildung 2:** Box-Plots der Cs-137-Aktivität von je 15 Hirschtrüffeln aus 3 Untersuchungsgebieten. Probenentnahme April - September 2018. Der Maximalwert für den Standort Dahn ist mit einem roten Stern markiert.

Die Cs-137-Aktivität von Hirschtrüffeln variierte innerhalb eines Untersuchungsgebietes deutlich, wie es auch von anderen Pilzarten bekannt ist (Tabelle 2). Die Unterschiede sind vermutlich auf variierende Cs-137-Bodenkontaminationen und kleinräumige Änderungen der Standortbedingungen zurückzuführen.

Die Spannweite der Messwerte reichte in Dahn von 226 Bq/kg FS bis 5 638 Bq/kg FS, in Bodenmais von 941 Bq/kg FS bis 10 370 Bq/kg FS. In Zusmarshausen lagen die Werte zwischen 851 Bq/kg FS und 16 908 Bq/kg FS am weitesten auseinander.

**Tabelle 2:** Statistische Daten zur Cs-137-Aktivität von Hirschtrüffeln bezogen auf Frischsubstanz

	Bodenmais	Zusmarshausen	Dahn
	Bq/kg FS	Bq/kg FS	Bq/kg FS
Mittelwert	5 408	6 388	1 877
Median	3 460	5 208	1 345
Minimalwert	941	851	226
Maximalwert	10 370	16 908	5 638

### 5.5 CS-137-KONTAMINATION VON WILDSCHWEINEN (AP 3)

Insgesamt wurde vom 1. Oktober 2017 bis zum 31. Januar 2021 die Cs-137-Aktivität von 451 Wildschweinproben gemessen (Bodenmais/Bayerisch Eisenstein 161, Dahn 150 und Zusmarshausen 140).

Die Cs-137-Kontamination der Wildschweine schwankte sowohl innerhalb eines Untersuchungsgebietes als auch zwischen den Untersuchungsgebieten erheblich.

Die geringste bei Wildschweinen gemessene Cs-137-Aktivität stammte mit 2 Bq/kg aus Dahn, die höchste mit 17 326 Bq/kg aus Bodenmais/Bayerisch Eisenstein. Insbesondere in Dahn und Zusmarshausen weisen die deutlichen Unterschiede zwischen Mittelwerten und Medianen auf unsymmetrische Verteilungen der Messwerte hin (Tabelle 3).

**Tabelle 3: Statistische Daten der Cs-137-Messdaten von Wildschweinen. Angaben in Bq/kg**

	Mittelwert	Median	95. Perzentil	Min.	Max.	n
Bodenmais	3230	2716	8282	11	17 326	161
Zusmarshausen	599	32	1694	3	10 290	140
Dahn	240	86	719	2	2 297	150

In Mastjahren waren Wildschweine deutlich geringer kontaminiert als in mastfreien Jahren.

Im Herbst 2018 kam es in allen Untersuchungsgebieten zu einer Vollmast bei Buche und Eiche. Wildschweine lassen für diese energiereichen Früchte sogar Hirschtrüffel „links liegen“. Die Cs-137-Aktivität von Bucheckern ist sehr gering und liegt selbst im Untersuchungsgebiet Bodenmais/Bayerisch Eisenstein unter 10 Bq/kg (Frischsubstanz). Entsprechend enthält Wildschweinfleisch während solcher Mastperioden nur wenig Cs-137-Aktivität. Im Untersuchungsgebiet Zusmarshausen war der Rückgang besonders stark, wie aus der Tabelle 4 ersichtlich ist.

**Tabelle 4: Mittelwerte der Cs-137-Aktivität von Wildschweinen aus Zusmarshausen, ausgewertet nach Erlegungszeiten, unter Berücksichtigung der Frucht-Mast-Phase 2018/2019**

Erlegungsdatum	Mittelwert	Median	95. Perzentil
		Cs-137 Bq/kg	
Januar – März 2018	5 094	6 869	9 516
Mastzeitraum Oktober 2018 – April 2019	18	16	45
Oktober – Dezember 2019	1 135	1 234	1 873

2018 waren Wildschweine in Zusmarshausen, von Januar bis März, mit durchschnittlich 5 094 Bq/kg (n=10) relativ hoch kontaminiert. Aus dem Sommer 2018 liegen nur 2 Proben vor. Während der Mastphase nimmt die Kontamination der Wildschweine auf durchschnittlich 18 Bq/kg (n=41) ab, keiner der Messwerte liegt über 55 Bq/kg. Während der Hauptjagdzeit von Oktober bis Dezember 2019 steigt die mittlere Kontamination auf 1 135 Bq/kg (n=13).

Im Untersuchungsgebiet Bodenmais/Bayerisch Eisenstein haben Wildschweine in den höheren Bergregionen keinen Zugang zu landwirtschaftlichen Nutzflächen, was eingeschränkt auch für Dahn zutrifft. Dagegen können Wildschweine aus Zusmarshausen regelmäßig auch Nahrung wie Mais etc. auf Feldern aufnehmen, die nur sehr geringe Cs-137-Aktivität enthält.

Die Variabilität der Einflussfaktoren auf die ermittelte Cs-137-Kontamination von Wildschweinen zeigt die Komplexität des Gesamtsystems. Bei Wildschweinen hat die zeitliche Verteilung der Proben im Jahresverlauf deutliche Auswirkungen auf die durchschnittliche Cs-137-Kontamination, insbesondere in Mastjahren.

## 5.6 DATEN SÄMTLICHER IN DEN UNTERSUCHUNGSGEBIETEN ERLEGTEN WILDSCHWEINE

Über einen Zeitraum von 30 Monaten wurden Daten zu allen in den Untersuchungsgebieten erlegten Wildschweinen beschafft. Erfasst wurden:

- Erlegungsdatum
- Erlegungsgewicht
- jagdliche Klasse

- Geschlecht
- wenn möglich die Jagdart.

Die Daten wurden dem BfS als Excel Tabelle übermittelt. Insgesamt liegen 2 538 Datensätze vor:

- Bodenmais/Bayerisch Eisenstein: 485
- Dahn: 777
- Zusmarshausen: 1 276.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Aufgrund der speziellen Eigenschaften des Waldökosystems ist zu erwarten, dass Überschreitungen des Grenzwerts für Cs-137 bei Wildschweinfleisch aus den stark vom Reaktorunfall in Tschernobyl betroffenen Gebieten noch viele Jahre ein relevantes Thema bleiben.

Die erlangten Erkenntnisse ermöglichen es, das am BfS entwickelte Prognosemodell für die Wildschweinkontamination zu überprüfen und zu verbessern. Insbesondere die fundierte Analyse der Populationsdynamik im Wildbestand und die erstmalige Inventarisierung der Hirschtrüffelvorkommen sind für die verbesserte Modellprognose äußerst wertvoll. Durch das Prognosemodell soll die potentielle Strahlenexposition der Bevölkerung durch den Verzehr kontaminierten Wildbrets bundesweit abgeschätzt werden.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens ermöglichen es, gemäß den Anforderungen des Umweltinformationsgesetzes (UIG) die Öffentlichkeit in angemessenem Umfang aktiv und systematisch über die Umwelt zu unterrichten (§ 10 UIG). Ferner sind die erhobenen Daten Grundlage für die Entwicklung von Konzepten und Maßnahmen zur Überwachung von Höchstwerten der Radioaktivität in Lebensmitteln. Die Ergebnisse dienen unter anderem dazu, die künftigen Kosten durch kontaminationsbedingt nicht vermarktbare Wildbret abzuschätzen.

<b>Thema</b>			
Evaluierung des aktuellen Standes bei der Überwachung der Ableitung von radioaktiven Stoffen mit der Fortluft und dem Abwasser in Medizin und Industrie			
<b>Subject</b>			
<i>Evaluation of the current status in monitoring the discharge of radioactive substances with the exhaust air and water in medicine and industry</i>			
<b>Kennzeichen</b> 3619S52560	<b>Beginn</b> 01.07.2019	<b>Ende</b> 30.06.2020	<b>Fördermittel</b> EUR 67.429,-
<b>Forschungs- / Auftragnehmer</b> TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG, Hamburg			
<b>Projektleitung</b> O. Mende	<b>Fachbetreuung BfS</b> A. Heckel / UR 3		<b>verantwortlich für den Text</b> A. Heckel, O. Mende

## 1. ZIELSETZUNG

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) ist verpflichtet, der Europäischen Kommission jährlich über die Aktivitätsableitungen von kerntechnischen Anlagen mit der Fortluft und dem Abwasser Bericht zu erstatten. Die Daten fließen auch in die Ermittlung der Exposition der Bevölkerung ein, über die der Öffentlichkeit berichtet wird. Darüber hinaus bestehen Berichtspflichten des BMU auf Grund von OSPAR<sup>1)</sup>. Durch das Vorhaben, das die Bereiche bzw. Einrichtungen mit möglichen Ableitungen radioaktiver Stoffe sowie die bereits stattfindende Überwachung und Bilanzierung der Ableitungen eruieren sollte, sollte eine Grundlage für eine Entscheidung geschaffen werden, ob eine Emissionsüberwachung analog zur derzeit durchgeführten Überwachung der kerntechnischen Einrichtungen auch für nicht-kerntechnische Einrichtungen in den Bereichen Forschung, Medizin und Industrie durchgeführt werden sollte.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

In der Studie sollten nicht-kerntechnische Einrichtungen in Deutschland betrachtet werden. Ableitungen aus dem NORM/TNORM<sup>2)</sup>-Bereich und aus genehmigungsfreien Tätigkeiten sowie Störfall- oder Unfallszenarien sollten dabei außer Acht gelassen werden. Die Studie teilte sich in die drei im Folgenden dargestellten Arbeitspakete (AP).

### 2.1 ERMITTLUNG VON POTENZIELLEN EMITTENTEN RADIOAKTIVER STOFFE MIT DER FORTLUFT UND DEM ABWASSER AUS DEN BEREICHEN FORSCHUNG, MEDIZIN UND INDUSTRIE (AP 1)

Es sollte erfasst werden, welche Einrichtungen in den Bereichen Forschung, Medizin und Industrie potenzielle Emittenten von radioaktiven Stoffen darstellen. Hierbei wurde abgeschätzt, welche radioaktiven Stoffe in welcher Höhe kontinuierlich bzw. diskontinuierlich von den ermittelten Emittenten mit der Fortluft und mit dem Abwasser in die Umwelt abgeleitet werden.

### 2.2 EMISSIONSÜBERWACHUNG (AP 2)

Für die potenziellen Emittenten sollte ermittelt werden, auf welchen gesetzlichen Grundlagen eine Emissionsüberwachung fußt und welche weiteren Rahmenbedingungen für die Emittenten gelten. Ferner sollte ermittelt werden, ob die Emissionsüberwachung kontinuierlich erfolgt, ob die abgeleiteten Aktivitäten durch Direktmessungen oder Labormessungen ermittelt werden, welche Messgeräte ein-

<sup>1)</sup> Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordost-Atlantiks (Oslo-Paris Konvention)

<sup>2)</sup> naturally occurring radioactive material / technologically enhanced naturally occurring radioactive material

gesetzt werden, wie die Probenentnahme erfolgt, welche Verfahren bei der Ermittlung der Aktivitätsableitungen eingesetzt werden und welche Nachweisgrenzen gefordert bzw. erreicht werden.

### 2.3 BILANZIERUNG (AP 3)

Hinsichtlich der Bilanzierung sollte ermittelt werden, auf welcher rechtlichen Grundlage und auf welche Weise die Bilanzierung erfolgt, ob aus der jeweiligen Aktivitätsableitung die zusätzliche Strahlenbelastung von Einzelpersonen der Bevölkerung berechnet wird, in welcher Relation diese zusätzliche Strahlenbelastung zur Exposition aus den Ableitungen kerntechnischer Anlagen steht und welche Berechnungsverfahren angewandt werden.

## 3. METHODIK

Zur Evaluierung der möglichen Emittenten radioaktiver Stoffe sowie der zugehörigen Emissionsüberwachung und Bilanzierung samt Ermittlung der Expositionen von Einzelpersonen der Bevölkerung dienten zunächst die einschlägige, öffentlich zugängliche Literatur. Dabei wurden Anwendungsbereiche mit offenen radioaktiven Stoffen oberhalb der Freigrenzen, Bereiche, in denen mit Abfallgebinden mit flüchtigen gasförmigen radioaktiven Stoffen umgegangen wird, sowie Bereiche mit ionisierender Strahlung, bei der durch Aktivierung hervorgerufene Ableitungen möglich sind, ermittelt. Die so gewonnenen Informationen wurden anhand

- eigener Erfahrungen in dem Tätigkeitsfeld für Behörden und Betreiber
- von Lieferprogrammen/Referenzen einschlägiger Lieferanten radioaktiver Stoffe und messtechnischer Überwachungseinrichtungen
- zusätzlicher Befragungen der Lieferanten zu Kundenbereichen
- der Befragung von einschlägigen Gremien/Arbeitskreisen wie beispielsweise dem Arbeitskreis Umweltüberwachung des Fachverbandes für Strahlenschutz
- der Prüfung der Ergebnisse vergleichbarer Studien in Europa
- anonymisierter Befragungen von Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden

ergänzt. Die Befragungen erfolgten dabei stichprobenartig mit standardisierten Fragen.

Hinsichtlich der Notwendigkeit zur Überwachung und Bilanzierung wurde das geltende nationale und europäische Recht herangezogen und dabei auch betrachtet, welche Entscheidungsbasis als Grundlage von entsprechenden Festlegungen in Genehmigungsbescheiden herangezogen wird.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Mit der vorgenannten Methodik wurden die einzelnen Anwendungsbereiche offener radioaktiver Stoffe ermittelt. Parallel wurde dabei erfasst bzw. alternativ bei fehlenden bzw. unzureichenden Informationen abgeschätzt, in welcher Größenordnung und welcher Nuklidzusammensetzung radioaktive Stoffe abgeleitet werden. Diese Abschätzungen stellen dabei nur Orientierungswerte dar, da die tatsächlichen Ableitungen in den Einzelfällen von vielen Faktoren, wie Art und Qualität der Fortluftfilterung oder Abwasserbehandlung abhängen.

Zur Betrachtung der Emissionsüberwachung wurden zunächst die gesetzlichen und untergesetzlichen Vorgaben für die Notwendigkeit der Durchführung einer Emissionsüberwachung bei den ermittelten Emittenten zusammengestellt. Nachfolgend wurde mit der vorgenannten Methodik – hier besonders auch durch Befragungen von Messgeräteherstellern – zusammengetragen, welche Messmethoden in der Praxis angewandt werden, welche Messgeräte hierbei eingesetzt werden, wie die Probenentnahme erfolgt und welche Nachweisgrenzen behördlicherseits gefordert werden sowie welche Nachweisgrenzen tatsächlich erreicht werden.

Für die Ermittlung des Standes bei der Bilanzierung und bei der Ermittlung von Expositionen für Einzelpersonen der Bevölkerung wurden zunächst die rechtlichen Grundlagen zusammengestellt und anschließend mit der dargestellten Methodik zusammengetragen, ob eine Bilanzierung bei den einzelnen

ermittelten Emittenten erfolgt und ob bzw. wie eine Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung bestimmt wird. Bei Einrichtungen, bei denen üblicherweise keine Berechnungen der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung vorgenommen werden, wurden Abschätzungen vorgenommen.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 ERMITTLUNG VON POTENZIELLEN EMITTENTEN RADIOAKTIVER STOFFE MIT DER FORTLUFT UND DEM ABWASSER AUS DEN BEREICHEN FORSCHUNG, MEDIZIN UND INDUSTRIE

Bei der Ermittlung potenzieller Emittenten radioaktiver Stoffe mit der Fortluft und dem Abwasser aus den Bereichen Forschung, Medizin und Industrie wurden Einrichtungen, bei denen in Deutschland eine Ableitung denkbar ist, zusammengestellt. Soweit wie möglich wurden Größenordnungen der zu erwartenden Ableitungen ermittelt oder alternativ die möglichen Ableitungen abdeckend abgeschätzt.

Als die Bereiche mit den höchsten Aktivitäten bei den Ableitungen wurden die medizinische Diagnostik inklusive der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) und die ambulante Therapie, die Großforschungseinrichtungen sowie die Hersteller radioaktiver Stoffe identifiziert. Im Bereich der Entsorgung und Konditionierung radioaktiver Stoffe kommen ebenfalls hohe Aktivitäten bei den genehmigten Ableitungswerten vor. Allerdings werden diese real deutlich unterschritten, wobei dies insbesondere bei Konditionierungseinrichtungen von den jeweils aktuell zu verarbeitenden Stoffen abhängt.

Im medizinischen Bereich überwiegen die Ableitungen mit dem Abwasser, wobei hier im Wesentlichen die Radionuklide C-11, F-18, Ga-68, Tc-99m, In-111, I-123 und I-131 zu nennen sind. Hierbei werden die höheren Aktivitäten während der Betriebszeiten kontinuierlich abgeleitet.

Bei Großforschungseinrichtungen werden tendenziell mehr Aktivitäten mit der Fortluft als mit dem Abwasser abgeleitet, die Ausnahme hierbei ist die Ableitung von Tritium. Bei den Ableitungen mit der Fortluft treten z. B. C-11, N-13, F-18, Ar-41 oder Kr-85 auf. Die Ableitung mit der Fortluft erfolgt kontinuierlich in Abhängigkeit der Betriebszustände und die Ableitung mit dem Abwasser erfolgt üblicherweise diskontinuierlich über Abwassertanks.

Bei den Herstellern radioaktiver Stoffe ist keine klare Dominanz eines Ableitungspfades festzumachen. Für den Fortluftpfad sind als mögliche Radionuklide z. B. Tritium, Kr-85, I-125, I-131 und Rn-222 zu nennen und für den Abwasserpfad z. B. Tritium, C-14, S-35, Sr-90, I-125, I-131, Cs-137, Gd-135 oder Am-241. Bei der Herstellung von Radiopharmaka für den Bereich der PET treten vor allem Ableitungen mit der Fortluft und F-18 auf. Die Ableitung mit der Fortluft erfolgt in diesem Bereich kontinuierlich in Abhängigkeit der Betriebszustände und die Ableitung mit dem Abwasser erfolgt üblicherweise diskontinuierlich über Abwassertanks.

### 5.2 EMISSIONSÜBERWACHUNG

Die gesetzlichen Grundlagen zur Emissionsüberwachung finden sich in den Regelungen der StrlSchV. Diese basieren inhaltlich auf der Richtlinie 2013/59/Euratom. Neben den gesetzlichen Regelungen existiert eine Reihe von Festlegungen in untergesetzlichen Unterlagen, die sich inhaltlich mit der Emissionsüberwachung radioaktiver Stoffe mit der Fortluft oder mit dem Abwasser befassen.

Für die einzelnen ermittelten potenziellen Emittenten wurde untersucht, ob in den Genehmigungen explizit Ableitungswerte festgelegt werden und ob nur bei solchen Festlegungen messtechnische Maßnahmen zur Emissionsüberwachung umgesetzt werden. Eine messtechnische Überwachung findet vielfach bei der Fortluft nur statt, wenn in der Genehmigung Ableitungswerte explizit festgelegt sind, wie dies z. B. bei Großforschungseinrichtungen oder bei Herstellern/Lieferanten radioaktiver Stoffe festzustellen ist. Bei Abwasserableitungen erfolgt nach unseren Ergebnissen im Zuge der Abwassereinleitungen mit sammelnden Abwasseranlagen stets eine messtechnische Überwachung.

Die tatsächlichen Ausschöpfungsgrade der jeweils einzuhaltenden Ableitungswerte bewegen sich bei allen betrachteten Einrichtungen für die meisten Radionuklide maximal im Prozentbereich. Lediglich für flüchtige Gase und H-3 in Abwässern liegen die Ausschöpfungsgrade mit bis zu einigen 10 % bei einigen Einrichtungen etwas höher.

### 5.3 BILANZIERUNG DER ABGELEITETEN RADIOAKTIVEN STOFFE

Aus den Regelungen der StrlSchV geht für die Betreiber von Einrichtungen eine Mitteilungspflicht über die Ableitungen – und damit die Notwendigkeit einer Bilanzierung – hervor, sofern die zuständige Behörde den Betreiber von der Mitteilungspflicht nicht befreit hat. Eine Ermittlung der für die Einzelpersonen der Bevölkerung zu erwartenden Expositionen hat – wenn überhaupt erforderlich – seitens des Strahlenschutzverantwortlichen einmalig im Rahmen des Genehmigungsverfahrens zu erfolgen. Eine Ermittlung der von einer repräsentativen Einzelperson der Bevölkerung im Kalenderjahr erhaltenen Exposition hat die zuständige Behörde in bestimmten Fällen vorzunehmen.

Nach den Ergebnissen der Recherchen und stichprobenartigen Befragungen werden die Ableitungen in der Regel bilanziert, wenn eine messtechnische Überwachung der Ableitungen erfolgt. Hinsichtlich der Bestimmung von Expositionen von Einzelpersonen der Bevölkerung lässt sich zusammenfassen, dass diese überwiegend anhand der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 vorgenommen wird. Vereinzelt wird auch ein vereinfachtes Verfahren verwendet, bei dem die Exposition durch die Fortluft direkt am Luftauslass bestimmt wird. Die ermittelten effektiven Expositionen liegen teilweise etwas oberhalb der tatsächlichen Expositionen aus kerntechnischen Anlagen. Für den Großteil der Einrichtungen liegen die Expositionen für die effektive Dosis aber in einem Bereich von 1 µSv im Kalenderjahr und somit auf einem ähnlich niedrigen Niveau wie diejenigen bei kerntechnischen Anlagen.

Für die den Großteil aller Genehmigungsinhaber ausmachenden Einrichtungen, die keine explizit genehmigten Ableitungswerte haben, sondern die Werte nach Anlage 11 einhalten, ist ein Vergleich mit den kerntechnischen Anlagen nicht zielführend, da sowohl das Modell als auch die Abschätzung der Ableitung konservativ sind und die in der Regel messtechnisch nicht erfassten realen Expositionen erheblich niedriger ausfallen dürften, wie stichprobenartige Abschätzungen auf Basis von Umgangsaktivitäten und Freisetzungsgraden gezeigt haben.

**Tabelle 1: Übersicht über Emittenten radioaktiver Stoffe**

<b>Medizin Radiotherapie</b>	
Kurzbeschreibung des Umgangs	stationäre Behandlung von Patienten, Verabreichung radioaktiver Stoffe
Ableitungspotential	unter den Konzentrationswerten nach Anlage 11 der StrlSchV
messtechnische Überwachung des Abwassers	vorhanden
messtechnische Überwachung der Fortluft	in Einzelfällen
Bilanzierung	üblicherweise keine Bilanzierung
<b>Medizin Diagnostik, ambulante Therapie und PET</b>	
Kurzbeschreibung des Umgangs	ambulante Behandlung und Diagnostik von Patienten, Verabreichung radioaktiver Stoffe
Ableitungspotential	deutlich unter den Konzentrationswerten nach Anlage 11 der StrlSchV
messtechnische Überwachung des Abwassers	üblicherweise keine Überwachung
messtechnische Überwachung der Fortluft	üblicherweise keine Überwachung
Bilanzierung	keine Bilanzierung
<b>Medizin Strahlentherapie</b>	
Kurzbeschreibung des Umgangs	äußere Anwendung ionisierender Strahlung am Patienten
Ableitungspotential	deutlich unter den Konzentrationswerten nach Anlage 11 der StrlSchV

<b>Medizin Radiotherapie</b>	
messtechnische Überwachung des Abwassers	üblicherweise keine Ableitung auf dem Abwasserpfad
messtechnische Überwachung der Fortluft	üblicherweise keine Überwachung
Bilanzierung	keine Bilanzierung
<b>Forschung/Labore Großforschungseinrichtungen</b>	
Kurzbeschreibung des Umgangs	diverse Anwendungen in der Forschung
Ableitungspotential	ggf. oberhalb der Konzentrationswerte nach Anlage 11 der StrlSchV
messtechnische Überwachung des Abwassers	vorhanden
messtechnische Überwachung der Fortluft	vorhanden
Bilanzierung	Bilanzierung erfolgt
<b>Forschung/Labore ECD/IMS</b>	
Kurzbeschreibung des Umgangs	Analyse mit Hilfe radioaktiver Stoffe
Ableitungspotential	sehr gering gegenüber den Konzentrationswerten nach Anlage 11 der StrlSchV
messtechnische Überwachung des Abwassers	keine Ableitung mit dem Abwasser
messtechnische Überwachung der Fortluft	keine Überwachung
Bilanzierung	keine Bilanzierung
<b>Forschung/Labore sonstige Labore</b>	
Kurzbeschreibung des Umgangs	diverse Anwendungen
Ableitungspotential	meist unter den Konzentrationswerten nach Anlage 11 der StrlSchV, in Einzelfällen höher
messtechnische Überwachung des Abwassers	nur in Einzelfällen
messtechnische Überwachung der Fortluft	nur in Einzelfällen
Bilanzierung	Bilanzierung, wenn gefordert
<b>Hersteller/Lieferanten radioaktiver Stoffe samt Radiopharmaka</b>	
Kurzbeschreibung des Umgangs	Herstellung und Verarbeitung radioaktiver Stoffe
Ableitungspotential	oberhalb der Konzentrationswerte nach Anlage 11 der StrlSchV
messtechnische Überwachung des Abwassers	vorhanden
messtechnische Überwachung der Fortluft	vorhanden
Bilanzierung	Bilanzierung, wenn gefordert
<b>Entsorgung und Konditionierung Umgang in verpackter Form (Lagerung)</b>	
Kurzbeschreibung des Umgangs	Lagerung verpackter radioaktiver Stoffe und Reststoffe
Ableitungspotential	unterhalb der Konzentrationswerte nach Anlage 11 der StrlSchV
messtechnische Überwachung des Abwassers	üblicherweise keine Ableitung mit dem Abwasser

<b>Medizin Radiotherapie</b>	
messtechnische Überwachung der Fortluft	üblicherweise keine Überwachung
Bilanzierung	keine Bilanzierung
<b>Entsorgung und Konditionierung offener Umgang (Konditionierung)</b>	
Kurzbeschreibung des Umgangs	Konditionierung radioaktiver Stoffe und Reststoffe
Ableitungspotential	oberhalb der Konzentrationswerte nach Anlage 11 der StrlSchV
messtechnische Überwachung des Abwassers	vorhanden
messtechnische Überwachung der Fortluft	vorhanden
Bilanzierung	Bilanzierung erfolgt
<b>sonstige Industrie Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen</b>	
Kurzbeschreibung des Umgangs	diverse Anwendungen
Ableitungspotential	in der Regel unterhalb der Konzentrationswerte nach Anlage 11 der StrlSchV
messtechnische Überwachung des Abwassers	nur in Einzelfällen
messtechnische Überwachung der Fortluft	nur in Einzelfällen
Bilanzierung	üblicherweise keine Bilanzierung
<b>sonstige Industrie Einsatz von Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung</b>	
Kurzbeschreibung des Umgangs	diverse Anwendungen
Ableitungspotential	in der Regel kein Ableitungspotential
messtechnische Überwachung des Abwassers	keine Ableitung mit dem Abwasser
messtechnische Überwachung der Fortluft	üblicherweise keine Ableitung mit der Fortluft
Bilanzierung	keine Bilanzierung

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens liefern erste Erkenntnisse, welche potenziellen Emittenten aus den Bereichen Forschung, Medizin und Industrie für ein noch zu entwickelndes Kontrollmessprogramm der Eigenüberwachung von Einrichtungen in Frage kommen könnten sowie im Rahmen der AVV Tätigkeiten bei der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung betrachtet werden sollten.

<b>Thema</b>			
Freigabekonzepte einer neuen Strahlenschutzverordnung nach EURATOM-Grundnormen 2013 in der Anwendung			
<b>Subject</b>			
<i>Concepts for clearance according to a new radiation protection ordinance based on the Euratom Basic Safety Standards of 2013 in practice</i>			
<b>Kennzeichen</b>	<b>Beginn</b>	<b>Ende</b>	<b>Fördermittel</b>
4717E03510	22.09.2017	31.08.2020	EUR 456.928,-
<b>Forschungs- / Auftragnehmer</b>			
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln			
<b>Projektleitung</b>	<b>Fachbetreuung BfS</b>	<b>verantwortlich für den Text</b>	
Dr. A. Artmann	Dr. R. Merk / UR 6	Dr. A. Artmann	

## 1. ZIELSETZUNG

Nicht bzw. leicht kontaminierte Materialien fallen bei der Stilllegung und dem Abbau von kerntechnischen Anlagen, in Medizin, Forschung oder dem Betrieb kerntechnischer Anlagen an. Diese Massen werden nach Durchlaufen eines in der Strahlenschutzverordnung geregelten, behördlich genehmigten Freigabe- bzw. Herausgabeverfahrens zur Wieder- bzw. Weiterverwertung dem Stoffkreislauf zugeführt bzw. fachgerecht beseitigt.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde eine generische Bestandsaufnahme und Bewertung der Praxis vorgenommen, inwieweit die den Regelungen der neuen Verordnung zugrundeliegenden Freigabekonzepte in der Anwendung zum Ausdruck kommen (Erfahrungsrückfluss). Für ausgewählte Freigabepfade wurden die in der GRS vorhandenen fortschrittlichen Rechencodes eingesetzt, um Berechnungen von nuklidspezifischen Freigabewerten, wie sie in der Strahlenschutzverordnung angegeben sind, durchzuführen. Die Plausibilität der Ergebnisse wurde durch Vergleichsrechnungen anderer Organisationen verifiziert. Für die GRS ergibt sich als Sachverständigenorganisation des Bundes die Notwendigkeit, ihre Kompetenz auf einer weiterentwickelten Rechtsgrundlage und Praxis auszubauen/weiterzuentwickeln und zu erhalten.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

In dem Forschungsvorhaben wurden folgende Einzelziele definiert:

- Recherche zum Stand von Wissenschaft und Technik zur deutschen Freigabepaxis
- Recherche zu den Stoff- und Materialströmen bei der Freigabe der anfallenden Abfälle
- Kriterien zur Bewertung radiologischer Expositionsszenarien bei der Freigabe
- Bestimmung von Freigabewerten anhand rechnerbasierter Methoden.

## 3. METHODIK

Die Arbeiten im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden in den folgenden Arbeitspaketen (AP) durchgeführt:

- Bestandsaufnahme und Bewertung der deutschen Freigabepaxis (AP 1)
  - Bestandsaufnahme aller der Freigabe in der Strahlenschutzverordnung (StrSchV) zugrunde liegenden radiologischen Modelle, ihrer Szenarien, Expositionspfade und Parameter (AP 1.1)
  - Identifizierung und Bewertung von Randbedingungen (AP 1.2)

- Gegenüberstellung der Szenarien aus der EURATOM-Richtlinie 2013/59 mit denen aus der StrSchV (AP 1.3)
- Abgleich von Stoff- und Massenströmen mit Freigabepfaden und Modellannahmen (AP 2)
- Entwicklung und Auswahl von standardisierten Kriterien zur Bewertung radiologischer Expositionsszenarien für allgemeine, generische Zwecke (AP 3)
- Anwendung von rechnerbasierten Methoden zur Berechnung von Freigabewerten (AP 4).

## 4. DURCHFÜHRUNG

Im AP 1.1 wurden für die der

- uneingeschränkten Freigabe von
  - festen und flüssigen Stoffen (StrlSchV von 2001)
  - Bauschutt und Bodenaushub
  - Bodenflächen
  - Gebäuden zur Wieder- und Weiterverwendung sowie der
- spezifischen Freigabe von
  - festen Stoffen bis zu 100 Mg/a zur Beseitigung auf Deponien
  - festen und flüssigen Stoffen bis zu 100 Mg/a zur Beseitigung in Verbrennungsanlagen
  - festen Stoffen bis zu 1 000 Mg/a zur Beseitigung auf Deponien
  - festen und flüssigen Stoffe bis zu 1 000 Mg/a zur Beseitigung in Verbrennungsanlagen
  - Gebäuden zum Abriss und von
  - Metallschrott zur Rezyklierung

zugrunde liegenden radiologischen Modelle aus den entsprechenden Forschungsberichten und Stellungnahmen recherchiert, extrahiert und aufbereitet. Für jeden Freigabepfad wurden die zugehörigen Expositionsszenarien, deren zugehörige Rechenvorschriften und zu benutzende Parameter zusammengestellt. Die Ergebnisse der Bestandsaufnahme wurden mit Vertretern des Öko-Institutes e. V., die im Rahmen ihres Unterauftrages ebenfalls eine Bestandsaufnahme durchgeführt haben, diskutiert und abgeglichen.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurden im AP 1.2 auch die Randbedingungen identifiziert und deren Herkunft recherchiert.

Hieran anschließend wurden im AP 1.3 die generalisierten Einzelszenarien aus der EURATOM-Richtlinie denjenigen aus den radiologischen Modellen der StrlSchV gegenübergestellt. Dazu wurden die sich entsprechenden Szenarien, Parameter und Randbedingungen verglichen. Die aufgefundenen Unterschiede, aber auch die Gemeinsamkeiten, wurden auf ihre Relevanz, z. B. Herkunft aus einem anderen Regelwerk, hin überprüft und bewertet.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurden im AP 2 die wesentlichen Modellparameter der radiologischen Modelle zur Berechnung der Freigabewerte der StrlSchV (2017 bzw. 2018) identifiziert und deren Variationsbandbreite diskutiert. Die verwendeten Daten resultieren aus einer Literaturrecherche. Hinsichtlich gewisser Parameter wie  $K_d^{1)}$ -Werte sind recht häufig Literaturquellen anzutreffen. Andere Parameter, wie beispielsweise Dosiskoeffizienten, sind nur in wenigen Literaturquellen genannt.

Im AP 3 wurden standardisierte Kriterien entwickelt und ausgewählt, um radiologische Expositionsszenarien für allgemeine generische Zwecke zu bewerten.

---

<sup>1)</sup> Dissoziationskonstante

Den in der aktuellen StrlSchV festgelegten Freigabewerten für die uneingeschränkte Freigabe liegen die in der Empfehlung SR 44 der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEA) entwickelten „generalisierten“ Expositionsszenarien zugrunde, welche die große Bandbreite an Expositionssituationen in den Mitgliedsstaaten darstellen. In jedem Szenario tragen verschiedene Expositionspfade bei, und es wird auf eine größere Anzahl an Parametern als in den bisher für die uneingeschränkte Freigabe entwickelten „abdeckenden“ Szenarien zurückgegriffen. Zudem werden jeweils realistische und unwahrscheinliche Parameterwerte angegeben. Für eine Auswahl an Nukliden wurde die Eignung dieses neuen Ansatzes zur Beschreibung allgemeiner Expositionssituationen untersucht.

Im AP 4 wurden für die beiden Freigabepfade:

- Freigabe von festen Stoffen zur Beseitigung auf einer Deponie und
- Freigabe von Stoffen zur Beseitigung in einer Müllverbrennungsanlage

die Berechnungen von Freigabewerten mit frei erhältlichen Rechencodes durchgeführt. Neben der eigentlichen Berechnung von Freigabewerten wurde besonders auf eine ausführliche und nachvollziehbare Dokumentation der durchgeführten Rechenschritte geachtet. Die GRS verwendete dabei ausgewählte frei erhältliche Rechencodes wie Geant4, ARTM, PHREEQC und SPRING. Die Plausibilität der Ergebnisse wurde durch Vergleichsrechnungen anderer Organisationen überprüft (Benchmarking). Für die Durchführung der Vergleichsrechnungen wurden Brenk Systemplanung GmbH und das Öko-Institut e. V. als Unterauftragnehmer ausgewählt.

## 5. ERGEBNISSE

Im Rahmen des AP 1 konnte über Konsistenzprüfungen gezeigt werden, dass die in der StrlSchV zur spezifischen Freigabe angegebenen Freigabewerte weitestgehend konsistent mit jenen in der recherchierten Literatur sind.

Bezüglich der Freigabewerte zu „Freigabe von Gebäuden zur Wieder- und Weiterverwendung“ sind zunächst Abweichungen zwischen den Literaturwerten und jenen in der StrlSchV gefunden worden. Die Ergebnisse wurden zusätzlich durch das Öko-Institut e. V. überprüft. Hierbei konnten für einen Großteil der Abweichungen Begründungen gefunden werden. Meist sind zusätzliche Begrenzungen vorgenommen worden, die in der Literatur aber nicht explizit dargestellt werden. In einigen Fällen jedoch war die Herkunft eines von der Literatur abweichenden Freigabewerts nicht aufklärbar und es wären weitere Untersuchungen nötig.

Des Weiteren wurden die Randbedingungen der Modelle für die Berechnung der Freigabewerte identifiziert, deren Herkunft recherchiert und beschrieben. Diese Randbedingungen wurden im nächsten Schritt anhand der Bewertungskriterien „Plausibilität“ und „Konsistenz“ bewertet. Es hat sich gezeigt, dass die Angaben hinsichtlich der Modell-Randbedingungen weitestgehend plausibel sind und eine inhaltliche Konsistenz besteht.

Den in der aktuellen Strahlenschutzverordnung festgelegten Freigabewerten für die uneingeschränkte Freigabe liegen die in SR 44 entwickelten „generalisierten“ Expositionsszenarien zugrunde. Der Szenario- und Parametervergleich mit den Freigabepfaden der aktuellen Strahlenschutzverordnung zeigte, dass diese Expositionsszenarien tatsächlich alle möglichen Szenarien in „generalisierter“ Form abdecken.

In AP 2 wurden die in den genannten radiologischen Modellen verwendeten Parameter Ausschöpfungsgrad, Vermischungsfaktor, Dosiskoeffizient, Aufenthaltszeiten, Kd-Werte und Inhalationsraten näher betrachtet. Insbesondere der Kd-Wert hat eine hohe Variationsbandbreite, da dieser von diversen Einflüssen, wie beispielsweise geochemischen Bedingungen und Nuklideigenschaften abhängt. Die den Freigabewerten zugrunde liegenden Literaturquellen geben in diesem Zusammenhang oftmals keine vollständigen Informationen an, so wird zum Beispiel nicht genannt, für welche geochemischen Bedingungen die Kd-Werte gelten.

Für eine Auswahl an Nukliden wurde im AP 3 neben der üblichen deterministischen Berechnung aus den gegebenen Parameterwerten auch ein probabilistischer Ansatz beruhend auf Parameterverteilungen untersucht. Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde mithilfe der Programmiersprache Python ein Tool zur Durchführung von Monte-Carlo-Simulationen zur Bestimmung von Dosiskonversionsfaktoren

entwickelt. Eine Analyse der resultierenden Verteilungsparameter für die Verteilung der Konversionsfaktoren könnte bei der Entwicklung von standardisierten Kriterien wertvolle Hinweise geben.

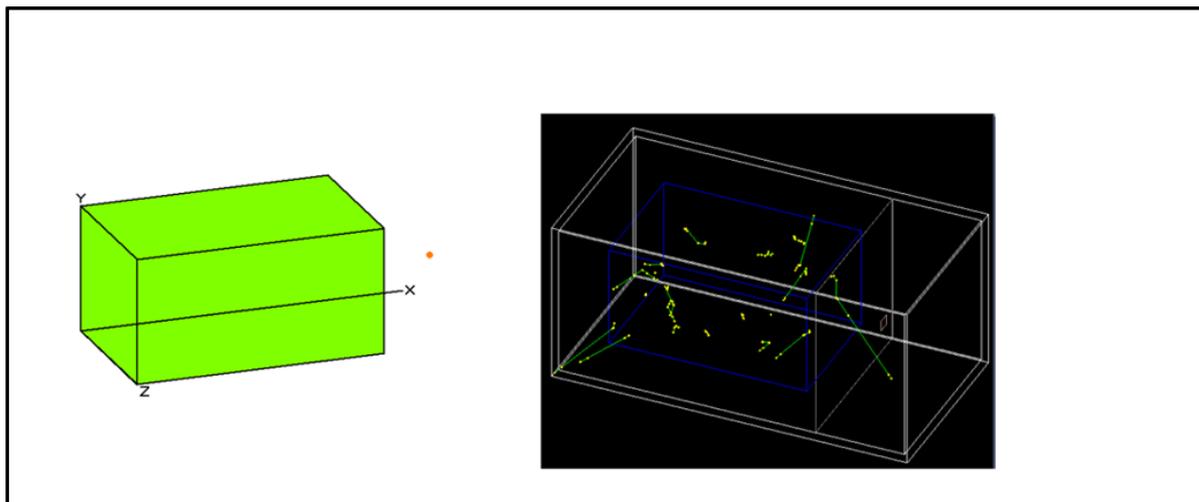
Im AP 4 wurde für die beiden Freigabepfade:

- Freigabe von festen Stoffen zur Beseitigung auf einer Deponie und
- Freigabe von Stoffen zur Beseitigung in einer Müllverbrennungsanlage

die Berechnung von Freigabewerten mit frei erhältlichen Rechencodes durchgeführt. Die Szenarien und die den zur Berechnung der Strahlenexposition zugrunde liegenden Rechenvorschriften und alle Eingabeparameter wurden ausführlich beschrieben und die Ergebnisse dargestellt. Durch die ausführliche Dokumentation wie auch die Verwendung der frei erhältlichen Rechencodes ist eine vollständige Nachvollziehbarkeit der durchgeführten Rechenschritte und aller Zwischen- und Endergebnisse möglich.

Die Plausibilität der Ergebnisse wurde durch Vergleichsrechnungen anderer Organisationen überprüft (Benchmarking). Für die Durchführung der Vergleichsrechnungen wurden das Öko-Institut e. V. und Brenk Systemplanung GmbH gewonnen, die in diesem Themenbereich ebenfalls über große Erfahrungen verfügen.

Es wurde gezeigt, dass mit den in der GRS eingesetzten Programmen MicroShield® Version 10 und Geant4 (s. Abb. 1) die Dosiskoeffizienten für die Berechnung der äußeren Strahlenexposition bestimmt werden können. Während sich mit MicroShield® einfachere Geometrien schnell modellieren lassen, können mit dem Monte-Carlo-Code Geant4 komplexere Geometrien oder andere Strahlungsarten (beispielsweise  $\beta$ - oder Neutronen-Strahlung) bei der Bestimmung eines Dosiskoeffizienten für die äußere Strahlenexposition berücksichtigt werden.



**Abbildung 1:** Darstellung der Geometrie für das Szenario T in MicroShield (links) und Geant 4 (rechts)

Für die Modellierung der Wasserausbreitung aus einer Deponie wurde das Programm SPRING (s. Abb. 2) unter Verwendung des Programmpakets XTRA eingesetzt. Die im Rahmen der Expositionsszenarien zur Freigabe berechneten Werte für die Aktivitäten im Sickerwasser der Deponie und im Grundwasser unterhalb der Deponie zeigen für die meisten Nuklide eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Vergleichsrechnungen.

Die berechneten Dosen für die Szenarien mit Oberflächenwasser und Brunnenwassernutzung zeigen ebenfalls gute Übereinstimmungen mit den berechneten Dosen aus den Vergleichsrechnungen. Für die Berechnung des Verbleibs von Radionukliden bzw. einer Partitionierung aus den abgeführten Sickerwässern einer Deponie im Klärschlamm wurde der geochemische Code PHREEQC eingesetzt.

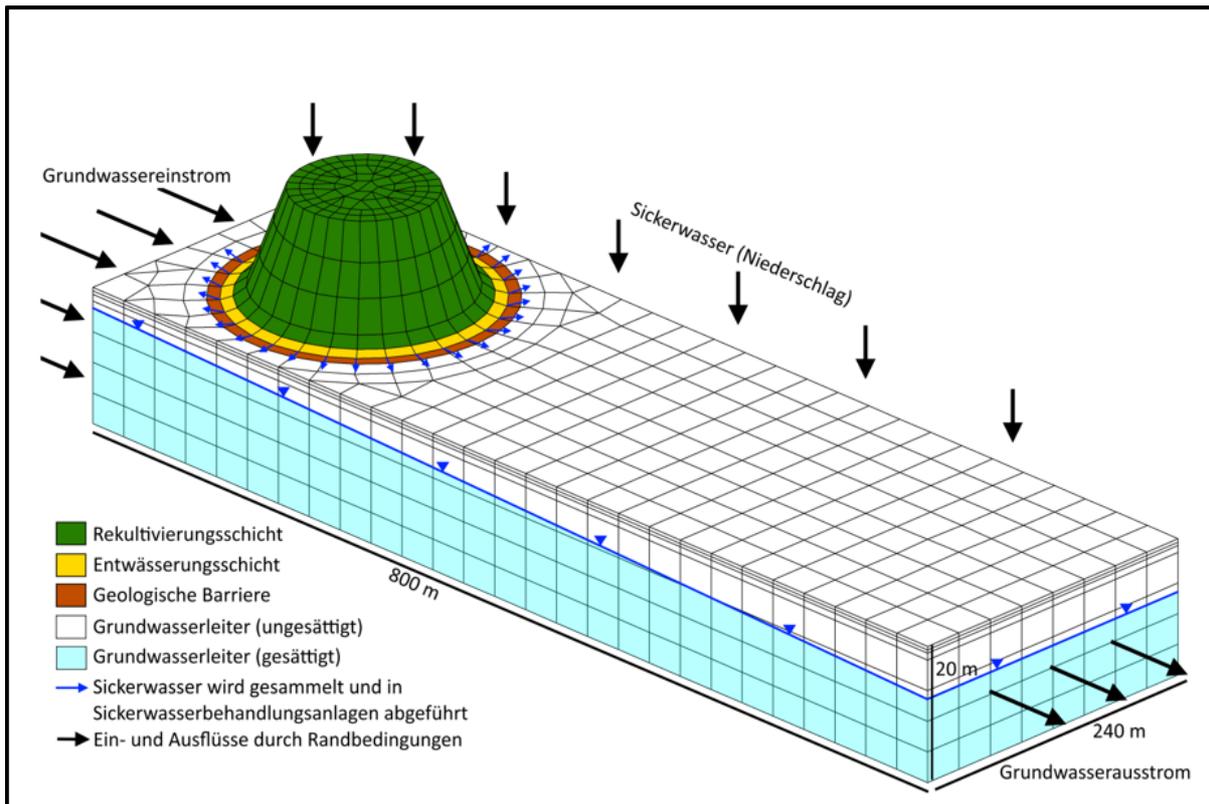


Abbildung 2: Schematischer Aufbau des SPRING-Gittermodells

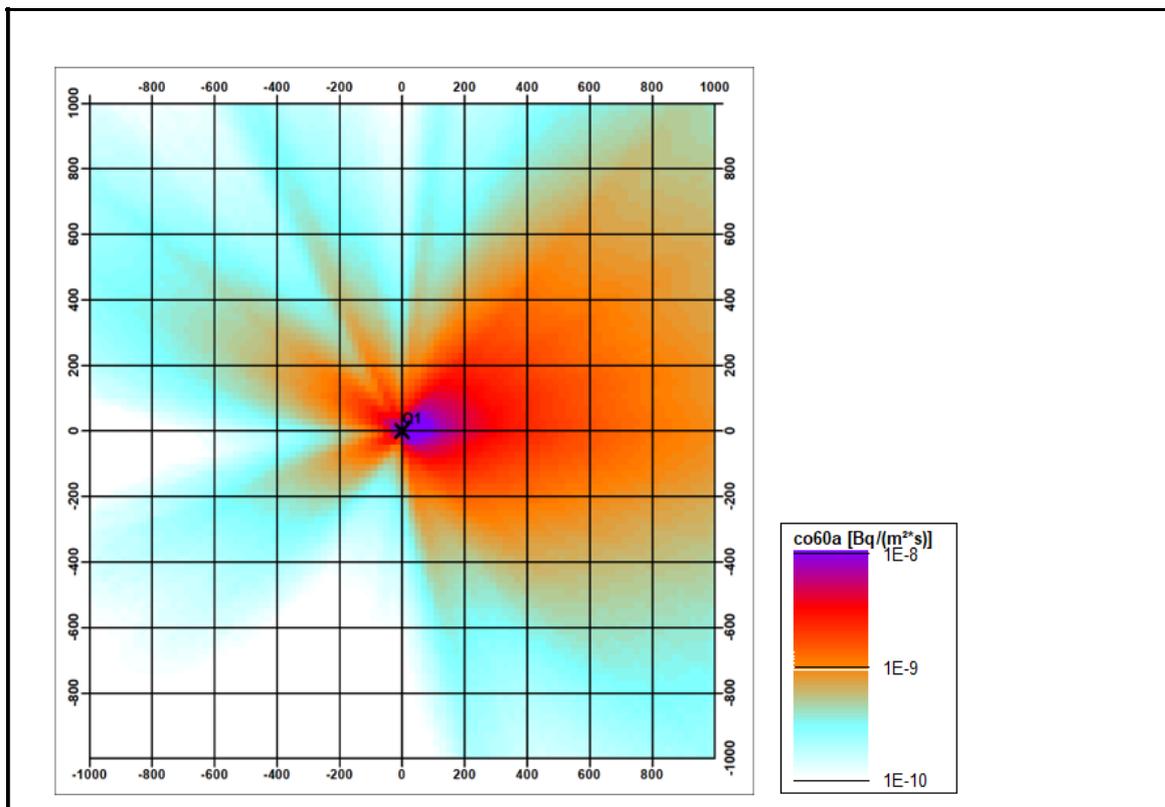


Abbildung 3: Horizontale Verteilung der nassen Deposition von Co-60 in Bq/(m<sup>2</sup>) bei einer Emissionsrate von 1 Bq/s

Das auf der TA<sup>1)</sup> Luft und dem Programmpaket AUSTAL2000 aufbauende Programmsystem Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell (ARTM) zur Berechnung der Ausbreitung und der Deposition freigesetzter luftgetragener radioaktiver Stoffe, das zurzeit den Stand von Wissenschaft und Technik repräsentiert, wurde erstmals für die Berechnung von Freigabewerten eingesetzt.

In den Rechnungen mit ARTM und dem GRS-Dosismodell zur AVV wurde die nasse Deposition berücksichtigt (s. Abb. 3) und zusätzlich von einer Aufenthaltszeit von 8 760 h/a ausgegangen. Demzufolge sind die Ergebnisse mittels ARTM deutlich restriktiver.

Im Szenario Ingestion wurden mit ARTM deutlich niedrigere Freigabewerte bei den Nukliden H-3 und C-14 berechnet als in der StrlSchV (2017) angegeben. Auch die Vergleichsrechnung durch das Öko-Institut e. V. kommt zu einem ähnlichen Ergebnis. Die großen Unterschiede in den Berechnungen konnten mit Brenk Systemplanung GmbH aufgeklärt werden. Es zeigte sich, dass bei der Ableitung der Freigabewerte für die Ingestion kontaminierter Lebensmittel ein Fehler gemacht worden ist. Dieser Fehler führte dazu, dass die korrekt berechneten Freigabewerte für das Szenario deutlich restriktiver werden und die Abweichungen somit erklärbar sind.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Eine konkrete Umsetzung der Ergebnisse wird gegenwärtig noch diskutiert. Ein wesentlicher Modernisierungsschritt innerhalb der Rechnungen zu Expositionsszenarien bei der Freigabe war innerhalb des vorliegenden Vorhabens die umfangreiche Anwendung komplexer numerischer Rechenwerkzeuge. Ein Beispiel ist die Verwendung der hydrologischen Software SPRING zum Wasserpfad. Es könnte daher etwa untersucht werden, wo der Einsatz detaillierterer numerischer Rechentools bei Szenarienberechnungen zum Wasserpfad (Differentialgleichungen) oder zur Gamma-Direktstrahlung, eventuell auch zur Betastrahlung (Monte-Carlo-Simulationen) zielführend ist bzw. weswegen die Grundlagengutachten zur Freigabe aus den 1990er und den frühen 2000er-Jahren weitgehend ohne solche Simulationen auskommen konnten. Das GRS-Vorhaben zeigt bereits, dass vereinfachte Berechnungen der Strahlenexposition durch Direktstrahlung bei den hier untersuchten Freigabeszenarien offenbar nur eine minimale bis akzeptable Abweichung von den moderneren Monte Carlo Simulationen der GRS aufweisen.

---

<sup>1)</sup> Technische Anleitung

**2.6 Themenbereich 06**  
**Notfallschutz**

**2.6 *Subject area 06***  
***Emergency management***

**Thema**

Ergänzung der Quelltermdatenbank des Entscheidungshilfesystems RODOS für Freisetzungen aus dem RDB bei Nichtleistungsbetriebszuständen in Kernkraftwerken

**Subject**

*Extension of the source term data bank of the decision support system RODOS for the release from the RPV during shutdown modes*

<b>Kennzeichen</b> 3617S62560	<b>Beginn</b> 28.05.2018	<b>Ende</b> 15.05.2020	<b>Fördermittel</b> EUR 221.434,-
----------------------------------	-----------------------------	---------------------------	--------------------------------------

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln

<b>Projektleitung</b> M. Kowalik	<b>Fachbetreuung BfS</b> N. Zander / RN 2	<b>verantwortlich für den Text</b> M. Kowalik
-------------------------------------	--	--

## 1. ZIELSETZUNG

Dieses Vorhaben diente der Abschätzung von Quelltermen bei einem schweren Störfall in einem Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor (DWR) während des Nichtleistungsbetriebs (NLB). Auf der Basis einer Quelltermbibliothek können unter Verwendung von dem GRS-eigenen Programm FaSTPro (**F**ast **S**ource **T**erm **P**rognosis) Prognosen für Quellterme erzeugt werden. Solche Prognosen können als Grundlage für Schutzmaßnahmen im Falle einer Krisensituation verwendet werden. Die von FaSTPro prognostizierten Quellterme sind derart gestaltet, dass sie mit dem vom BfS verwendeten Entscheidungshilfesystem RODOS (**R**ealtime **O**nline **D**ecision **S**upport **S**ystem) kompatibel sind und können als Eingabe für entsprechende Rechnungen zur Ausbreitung von Radionukliden verwendet werden.

Die Quellterme sind das Ergebnis von Simulationen, die in diesem Vorhaben mit dem Integralcode MELCOR erstellt wurden. Solche Simulationen sind in den Vorhaben 3612R01361 (Freisetzung aus dem RDB<sup>1)</sup>) und 3614560033 (Freisetzung aus Brennelementlagerbecken) für den NLB durchgeführt worden. Die Bestimmung von Quelltermen ist nach dem damaligen Stand von Wissenschaft und Technik geschehen. Dieser Status unterliegt einem stetigen Wandel, sowohl in Hinsicht auf die physikalische Modellierung im Rechenprogramm selbst als auch in Bezug auf die Anlagenmodellierung, die im Verantwortungsbereich des Anwenders zu verorten ist. Im ersten Fall manifestiert sich der Status physikalischer Modellierungen in neuen MELCOR- Versionen, die z. B. neue Modelle für die Oxidation der Hüllrohre mit Wasserdampf oder Luftsauerstoff aufweisen. In Hinsicht auf die Anlagenmodelle sei beispielsweise die Modellierung der Reaktorgrube für die Schmelze-Beton-Wechselwirkung genannt.

Somit war es Ziel, neue Quellterme aus dem NLB (Brennelemente vollständig im RDB) zu erzeugen, die dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Einer der aktualisierten Quellterme sollte mit dem entsprechenden Szenario als Grundlage für eine Notfallübung dienen.

Ferner sollten die Arbeiten für eine NLB-Version von FaSTPro weitergeführt werden, wobei Entwicklungsarbeiten aus dem Vorhaben RS1539 („Weiterentwicklung eines Analysewerkzeugs zur Quelltermprognose“, GRS-455) genutzt werden sollten.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Im Folgenden werden die einzelnen Zielsetzungen des Projektes kurz erläutert:

<sup>1)</sup> Reaktordruckbehälter

## **2.1 IDENTIFIZIERUNG DER RANDBEDINGUNGEN BEI UNFÄLLEN IM NICHTLEISTUNGSBETRIEB**

Für die weiteren unten genannten Zielsetzungen waren MELCOR-Simulationen für die Quelltermbestimmung durchzuführen. Hierfür waren Unfallablaufsequenzen mit zugehörigen auslösenden Ereignissen zu identifizieren, die signifikante radiologische Folgen für die Umgebung erwarten lassen. Diese Identifikation geschah unter Beachtung von spezifischen NLB-Anlagenzuständen. Die Anzahl der Sequenzen war zu begrenzen, da eine Simulation einen erheblichen Aufwand bei der Einstellung in den Eingabedatensätzen und der Pflege der Rechnungen bedeutet.

## **2.2 BERECHNUNG DER EREIGNISVERLÄUFE IM NICHTLEISTUNGSBETRIEB MIT DEM INTEGRALCODE MELCOR**

Anhand der ausgewählten, zu berechnenden Unfallablaufsequenzen wurden die Anfangs- und Randbedingungen für die MELCOR-Simulationen definiert und in die Eingabedatensätze eingetragen. Auf Basis der Ergebnisse dieser Simulationen wurde die zusammenfassende Erarbeitung eines Satzes von Quelltermen zur Eingabe in die RODOS-Quelltermbibliothek für typische Unfallabläufe im NLB in DWR/Konvoi-Blöcken unter Beachtung von Ergebnissen der genannten Vorarbeiten vorgenommen.

## **2.3 ENTWICKLUNG EINER AKTUALISIERTEN FASTPRO-VERSION FÜR DIE NICHTLEISTUNGSBETRIEB-SZUSTÄNDE**

Mit Hilfe der aus Zielsetzung in 2.2 stammenden Quellterme wurde eine aktualisierte Version von FaST-Pro für den NLB erstellt. Hiermit wird die Prognosesicherheit für Quellterme aus dem NLB verbessert, da die zugrunde liegenden Quellterme dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen werden.

## **2.4 ERSTELLUNG VON AUF DEN GEWONNENEN ERKENNTNISSEN BASIERENDEN ÜBUNGSUNTERLAGEN FÜR NOTFALLÜBUNGEN**

Für die Durchführung einer Notfallübung für das Radiologische Lagezentrum des Bundes waren für Unfälle beim NLB entsprechende Übungsunterlagen zu erstellen. Hierfür war zunächst eine geeignete Unfallsequenz aus dem Spektrum der Unfallsequenzen auszuwählen, die mit MELCOR simuliert worden waren. Dies geschah in Absprache mit dem Auftraggeber. Für die Unterlagen waren Meldungen zum Anlagenzustand auf der Basis möglicher anlagentechnischer Ereignis- und zeitabhängiger Parameterverläufe schriftlich niederzulegen, die das Kraftwerk in einem Krisenfall übergeben würde.

## **2.5 DURCHFÜHRUNG EINER NOTFALLÜBUNG**

Mit Hilfe der aus Zielsetzung 2.4 stammenden Notfallunterlagen war ein Übungsdrehbuch zu erstellen und eine Notfallübung für das Radiologische Lagezentrum des Bundes vorzubereiten, durchzuführen und auszuwerten. Dies geschah anhand der ebenfalls mit der aus Zielsetzung 2.4 stammenden Wahl der Unfallsequenz in einer kerntechnischen Anlage. Hierbei sollte das Zusammenspiel verschiedener Behörden im Radiologischen Lagezentrum des Bundes für einen solchen Unfall eingeübt werden.

In Absprache mit dem Auftraggeber konzentrierte sich dabei die Zielsetzung darauf, dass den Zuhörern eine Darstellung einer Notfallübung mit den Besonderheiten des NLB im Rahmen eines Projektgespräches vermittelt werden sollte.

# **3. METHODIK**

Im Folgenden soll kurz die Methodik der einzelnen Zielsetzungen beschrieben werden, die eine Durchführung der entsprechenden Arbeiten ermöglichen.

## **3.1 IDENTIFIZIERUNG DER RANDBEDINGUNGEN, MIT DENEN BEI DER ANALYSE VON UNFÄLLEN IM NICHTLEISTUNGSBETRIEB ZU RECHNEN IST**

Für die Identifizierung der Anfangs- und Randbedingungen von Unfallabläufen ist die Relevanz der einzelnen Unfallsequenzen zu berücksichtigen, welche sich einerseits aus der Häufigkeit der Sequenz (PSA<sup>1</sup>) Stufe 1) und andererseits aus der Schwere der Folgen ergibt. Somit können auch solche Sequen-

zen berücksichtigt werden, die probabilistisch gesehen relativ selten sind, sich jedoch durch eine besondere Schwere auszeichnen oder besondere Phänomene hervorbringen.

### **3.2 BERECHNUNG DER EREIGNISVERLÄUFE IM NICHTLEISTUNGSBETRIEB MIT DEM INTEGRALCODE MELCOR**

Die festgelegten Anfangs- und Randbedingungen werden für eine Berechnung der identifizierten Sequenzen in die entsprechenden MELCOR-Eingabedatensätze umgesetzt. Dies geschieht mittels der von MELCOR zur Verfügung gestellten Modellierungsgegenstände, welche in Kontrollvolumen, Strömungspfaden, Wärmestrukturen und Kontrollfunktionen bestehen.

Eigenarten des NLB bestehen dabei z. B. in einem entfernten Deckel des Reaktordruckbehälters (RDB), dessen Kontrollvolumen im Modell entsprechend mit einem Volumen des SHB<sup>1)</sup> mittels eines Strömungspfades zu verbinden ist. Andere technische Einstellungen wie Füllstandsabsenkungen oder die Nachkühlung werden mittels einer Massensenke und einer Steuerung durchgeführt, die durch geeignete Kontrollfunktionen realisiert werden.

### **3.3 ENTWICKLUNG EINER AKTUALISIERTEN FASTPRO-VERSION FÜR DIE NICHTLEISTUNGSBETRIEBSZUSTÄNDE**

Zur Aktualisierung der NLB-Version des Prognoseprogramms FaSTPro ist zunächst eine Bearbeitung und Erprobung des BBN (Bayesian Belief Network) notwendig. Weiterhin sind die an den Anwender gestellten Fragen zu programmieren, die den aktuellen Anlagenzustand definieren. Ferner ist die spezifische FaSTPro-interne Quelltermberechnung für den NLB einzubringen. Hierzu gehört auch die Anpassung der Zeitabläufe der Ereignissequenz der Unfallszenarien.

### **3.4 ERSTELLUNG VON AUF DEN GEWONNENEN ERKENNTNISSEN BASIERENDEN ÜBUNGSUNTERLAGEN FÜR NOTFALLÜBUNGEN**

Für die Erstellung der Notfallunterlagen ist eine geeignete, mit MELCOR simulierte NLB-Unfallsequenz auszuwählen. Dann sind die entsprechenden Anlagenparameter zu definieren, die in den Meldungen der Anlage an das Radiologische Lagezentrum gesendet würden. Diese Parameter können physikalische wie Druck, Temperatur oder Ortsdosisleistung oder auch technische sein wie die Stellung von Ventilen oder die Verfügbarkeit von Systemen. Die entsprechenden Parameter sind der Simulation zu entnehmen, wobei der grobe Anlagenzustand relativ unabhängig von der Feinheit des Modells ist, so dass eine präzise Auswahl wie etwa von Messstellen unnötig ist.

### **3.5 DURCHFÜHRUNG EINER DARAUF AUFBAUENDEN NOTFALLÜBUNG**

Die Durchführung wird mit Behördenvertretern als Präsentation im Rahmen eines Projektgesprächs dargestellt, wobei auf die Besonderheiten des NLB eingegangen wird.

## **4. DURCHFÜHRUNG**

Alle Arbeiten sind abgeschlossen und detailliert im fachlichen Abschlussbericht GRS-A-3998 dokumentiert, auf den hiermit für eine genauere Darstellung verwiesen sei.

### **4.1 IDENTIFIZIERUNG DER RANDBEDINGUNGEN, MIT DENEN BEI DER ANALYSE VON UNFÄLLEN IM NICHTLEISTUNGSBETRIEB ZU RECHNEN IST (AP 1)**

Eine detaillierte Auswertung der PSA der Stufe 1 wurde bereits im Vorhaben 3612R01361 durchgeführt, welche in der Auswahl von fünf Rechenfällen mündete. Eine Revision dieser Rechenfälle hat zu einem Ausschluss des Falles DWR-NLB-C geführt, da dieser noch wesentliche Eigenarten des Leistungsbetriebes aufwies. Entsprechend sind die Fälle DWR-NLB-A/B/D und E als relevante Fälle für dieses Projekt ausgewählt worden. Ferner sind diese in MELCOR-Eingabedatensätzen unter Berücksichtigung der aktuellen Anlagenmodellierungen eingestellt worden.

<sup>1)</sup> probabilistische Sicherheitsanalyse

<sup>1)</sup> Sicherheitsbehälter

## **4.2 BERECHNUNG DER EREIGNISVERLÄUFE IM NICHTLEISTUNGSBETRIEB MIT DEM INTEGRALCODE MELCOR (AP 2)**

Die im vorgelagerten Schritt eingestellten Rechenfälle sind mittels der neuesten MELCOR-Version 2.2\_11932 vollständig berechnet worden. Auf Grund von Instabilitäten dieser MELCOR-Version sind häufige Eingriffe des Anwenders notwendig gewesen, um die Rechnungen vorantreiben zu können. Weiterhin sind bei der jeweiligen Analyse zahlreiche Verbesserungsmöglichkeiten in den Eingabedatensätzen aufgefallen. So hat z. B. die Modellierung des Einsatzes der Ringraumstörfallabsaugung nicht das gesamte Spektrum der Szenarien abgebildet. Weiterhin ist die Druckspeichereinspeisung mittels der bereits modelliert gewesenen Druckspeicher bewerkstelligt worden, wobei für NLB-B etwa eine langsamere Einspeisung im Sinne des Tippbetriebes berücksichtigt worden ist. In NLB-A ist weiterhin das Abschalten des Zusatzboriersystems mitberücksichtigt worden. Diese Auffälligkeiten haben zu mehreren Berechnungen der Sequenzen geführt, die erfolgreich abgeschlossen werden konnten, wie auch die entsprechende Analyse mit Dokumentation, die neben einer kurzen Unfallablaufbeschreibung eine präzise Auflistung der Mengen der radioaktiven Elementklassen beinhaltet.

Für die entwickelte Rahmenhandlung für die Notfallübung in AP 4 ist das zugrunde liegende Szenario derart modifiziert, so dass das Schließen der Schleuse nach einer Reparatur verzögert stattfindet. Hierzu ist eine Variation zum Fall NLB-B in AP 2 mit dieser Randbedingung neu simuliert worden.

## **4.3 ENTWICKLUNG EINER AKTUALISIERTEN FASTPRO-VERSION FÜR DIE NICHTLEISTUNGSBETRIEBSZUSTÄNDE (AP 3)**

Auf Basis der Arbeiten im Vorhaben RS 1539 ist eine erweiterte und aktualisierte NLB-Version des Quelltermprognosewerkzeuges FaSTPro erstellt worden. Hierfür sind die Analysen der Unfallabläufe aus den vorherigen APs ausgewertet worden und in eine für die Software geeignete Form (Bayesian Belief Network und Quelltermbibliothek) gebracht worden. Die Wahrscheinlichkeiten der Quellterme und die darin eingehenden Aspekte wurden plausibel abgeschätzt, wobei die Vorarbeiten aus den Vorhaben 3612R01361 „Unfallanalyse nach EVA und im NLB“, GRS-393, GRS-A-3858 und RS 1539 („Weiterentwicklung eines Analysewerkzeugs zur Quelltermprognose“, GRS-455) genutzt werden. Ferner werden die bei einem Unfall in der Anlage verfügbaren Informationen berücksichtigt, um die Radionuklidfreisetzung in die Umwelt bei einem schweren Unfall abzuschätzen. Die Arbeiten umfassten die Bestimmung des Kerninventars, die Bestimmung der Freisetzungsmengen und -zeitpunkte der einzelnen Freisetzungskategorien und die Darstellung der Quellterme, welche im RODOS-kompatiblen „.xml“-Format vorliegen.

## **4.4 ERSTELLUNG VON AUF DEN GEWONNENEN ERKENNTNISSEN BASIERENDEN ÜBUNGSUNTERLAGEN FÜR NOTFALLÜBUNGEN (AP 4)**

Für eine fiktive Notfallübung ist der NLB-B-Fall ausgewählt worden, da dieser mit einem offenen PKL<sup>1)</sup> typische Merkmale des Nichtleistungsbetriebes in sich trägt.

Für die Erstellung von Notfallunterlagen sind aus der zugehörigen MELCOR-Simulation Anlagenparameter bei wesentlichen verfahrenstechnischen Eckpunkten mit den zugehörigen Eintrittszeitpunkten entnommen und in einen chronologischen tabellarischen Ablaufplan eingetragen worden. Abweichend vom Simulationsszenario, in dem die Schleuse direkt zu Ereignisbeginn geschlossen wird, steht diese in dieser Art der Beschreibung zunächst offen bis das Anlagenpersonal in der Lage ist, diese zu schließen. Da bis zu diesem Zeitpunkt in der Simulation kein substantieller Druckanstieg zu verzeichnen ist, ist diese Variation mit der Simulation kompatibel.

Auf Basis von Informationen über den Anlagenzustand, die dem Anlagenpersonal in einem Unfallszenario zugänglich sind, ist ein möglicher Handlungsablauf beschrieben worden. Dieser umfasst z. B. die Durchführung von Handmaßnahmen oder von Reparaturmaßnahmen, die letztlich jedoch keinen stabilen Anlagenzustand zur Folge haben. Insbesondere sind dabei die Regelungen des Betriebshandbuchs und der Notfallunterlagen berücksichtigt worden, in denen z. B. die Einberufung der kraftwerksinternen Notfallorganisation und die Kriterien für Katastrophenvoralarm und Katastrophenalarm anhand von Eintrittskriterien geregelt sind.

<sup>1)</sup> Primärkreislauf

Ferner ist die Kommunikation zwischen Anlage und Aufsichtsbehörde in Form telefonischer Sofortinformation, schriftlicher Erstinformation und zyklischer Lageberichte inklusive der radiologischen Lageberichte erstellt und in den Ablaufplan eingepflegt worden.

#### **4.5 DURCHFÜHRUNG EINER NOTFALLÜBUNG (AP 5)**

Für die Durchführung von Table-Top-Notfallübungen des Radiologischen Lagezentrums des Bundes wurden die unter Kapitel 4 erstellten Unterlagen verwendet. In Absprache mit dem Auftraggeber ist die Notfallübung in reduzierter Form im Zuge des Abschlussgesprächs durchgeführt worden. Hierbei sind im Wesentlichen die Notfallunterlagen präsentiert worden, die auf dem Unfallablauf NLB-B basieren. Die Rahmenhandlung ist dabei derart dargestellt worden, dass auch die Abläufe und die Kommunikation zwischen den typischen Institutionen deutlich wurden.

## **5. ERGEBNISSE**

Alle Ergebnisse der abgeschlossenen Arbeiten sind detailliert im fachlichen Abschlussbericht GRS-A-3998 dokumentiert, auf den hiermit für eine genauere Darstellung verwiesen sei.

### **5.1 IDENTIFIZIERUNG DER RANDBEDINGUNGEN, MIT DENEN BEI DER ANALYSE VON UNFÄLLEN IM NICHTLEISTUNGSBETRIEB ZU RECHNEN IST (AP 1)**

Als Ergebnis der Auswertung der PSA der Stufe 1 aus dem Vorhaben 3612R01361 steht eine Auswahl der Rechenfälle DWR-NLB-A/B/D und E. Ferner sind im Zuge dessen MELCOR-Eingabedatensätze unter Berücksichtigung der aktuellen Anlagenmodellierungen mit den fallspezifischen Anfangs- und Randbedingungen erstellt worden, welche in AP 2 verwendet worden sind.

### **5.2 BERECHNUNG DER EREIGNISVERLÄUFE IM NICHTLEISTUNGSBETRIEB MIT DEM INTEGRALCODE MELCOR (AP 2)**

Das Ergebnis dieses Arbeitspaketes besteht in den durchgeführten MELCOR-Simulationen und deren Auswertung. Letztere besteht wiederum aus einer kurzen Beschreibung der Phänomenologie des Unfallablaufes und einer Darstellung der Freisetzungen. Die Phänomenologie unterscheidet sich nicht wesentlich von jener aus dem Vorhaben 3612R01361. Die Freisetzungen sind in Tabellen gegeben, welche dem fachlichen Abschlussbericht zu entnehmen sind.

### **5.3 ENTWICKLUNG EINER AKTUALISIERTEN FASTPRO-VERSION FÜR DIE NICHTLEISTUNGSBETRIEBSZUSTÄNDE (AP 3)**

Das Ergebnis dieses Arbeitspaketes besteht in einer erweiterten und aktualisierten NLB-Version des Quelltermprognosewerkzeuges FaSTPro. FaSTPro basiert im Wesentlichen auf bedingten Wahrscheinlichkeiten (Satz von Bayes) für nicht beobachtbare Anlagenzustände und für Freisetzungskategorien. Ferner basiert FaSTPro auf den Ergebnissen von Unfallsimulationen, mit denen die Quellterme für bestimmte Ereignisabläufe berechnet werden. FaSTPro erhält diese Quellterme als Basisdaten und passt sie an die vom Nutzer eingegebenen Beobachtungen neu an. Eine solche Anpassung ist notwendig, da nicht für jeden denkbaren Ereignisablauf eine Unfallsimulation mit Quellterm (siehe AP 2) vorhanden ist, auch wenn das Simulationsspektrum abdeckend zu sein hat.

Als ein Ergebnis dieses APs ist das Kerninventar bestimmt worden, das für die Bestimmung der Quellterme im Sinne einer Freisetzung von Aktivitäten relevant ist. Die Unfallsimulationen liefern lediglich freigesetzte Massen bzw. Kernanteile.

Als weiteres Ergebnis der Arbeiten in diesem Arbeitspaket sind die Freisetzungskategorien aktualisiert worden, deren Konzept ein Ordnungsschema für verschiedene Freisetzungen in die Umgebung darstellt.

## **5.4 ERSTELLUNG VON AUF DEN GEWONNENEN ERKENNTNISSEN BASIERENDEN ÜBUNGSUNTERLAGEN FÜR NOTFALLÜBUNGEN (AP 4)**

Wie weiter oben beschrieben, ist für eine fiktive Notfallübung der NLB-B-Fall ausgewählt worden, da dieser mit einem offenen PKL typische Merkmale des Nichtleistungsbetriebes wie ein abgesenkter Füllstand im Primärkreis sowie ein geöffneter RDB in sich trägt. Zu diesem Zweck werden die im AP 2 durchgeführten MELCOR-Analysen so ausgewertet, dass sich daraus die in der Anlage während des Ablaufes zu erwartenden Messwerte und Meldungen ableiten lassen. Für die Verwendung in einer Notfallübung ist der Verlauf einer kürzenden Modifikation unterzogen worden, da der simulierte Verlauf lange Karennzeiten impliziert, ohne jedoch das Szenario unplausibel werden zu lassen. Für die entwickelte Rahmenhandlung ist das zugrunde liegende Szenario derart modifiziert, so dass das Schließen der Schleuse nach einer Reparatur verzögert stattfindet. Hierzu ist eine NLB-B in AP 2 mit dieser Randbedingung neu simuliert worden. Die Rahmenhandlung impliziert dabei weitere Reparaturmaßnahmen zur Wiederherstellung der Nachkühlung, die jedoch zunächst scheitern. Um wiederum einen Abschluss der Übung zu ermöglichen wird vom Simulationsablauf abgewichen und es gelingt im weiteren Verlauf der Übung den Kernschmelzunfall zu vermeiden, indem eine rechtzeitige Reparatur in einem der Nachkühlstränge mit Erfolg abgeschlossen werden kann.

Das Ergebnis dieses Arbeitspaketes besteht in den Notfallunterlagen, welche wiederum im Wesentlichen aus dem chronologischen Ablauf und den Lageberichten bestehen. Neben dem physikalischen Verlauf, der sich aus der Unfall-Simulation ergibt, wurden dabei auch verfahrenstechnische Eckpunkte aus der Rechnung und der Warteninstrumentierung notiert sowie die in der Anlage durchgeführten Maßnahmen in jeweiligen Spalten aufgeführt. Die Lageberichte inklusive der radiologischen mit Quelltermprognosen sind mit dem fachlichen Abschlussbericht versendet worden.

## **5.5 DURCHFÜHRUNG EINER NOTFALLÜBUNG (AP 5)**

Die Durchführung der Notfallübung ist in Absprache mit dem Auftraggeber als Präsentation für das Abschlussgespräch gestaltet worden. In diesem Rahmen wurden insbesondere die Besonderheiten des Nichtleistungsbetriebes hervorgehoben, die sich z. B. in langen Karennzeiten zeigen. Somit sind die Mitarbeiter des BfS zu dem Nichtleistungsbetrieb unterrichtet worden.

# **6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE**

Die Zielstellung des Vorhabens war, die Besonderheiten des Nichtleistungsbetriebs (NLB) im Hinblick auf Ereignisverläufe mit möglichen Freisetzungspotentialen auszuloten. Dafür wurden auf der Basis von Ergebnissen aus den Vorläufervorhaben relevante Szenarien ausgewählt und mit Hilfe vom Integralcode MELCOR berechnet und ausgewertet.

Die wesentlichen Erkenntnisse des Vorhabens bestehen in dem besseren Verständnis von NLB-Zuständen im Hinblick auf die Entwicklung von schweren Störfällen mit möglicher Freisetzung in die Umgebung entsprechend dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik.

Nach der im Rahmen des Vorhabens vorgenommenen Anpassung des GRS-Tools FaSTPro zur Abschätzung von NLB-Quelltermen ist die Bereitstellung von Freisetzungsdaten als Eingabe in das Entscheidungshilfesystem RODOS zwecks radiologischer Lagebewertung auch für NLB-Zustände möglich.

Die im Ergebnis des Vorhabens ermittelten NLB-Quellterme wurden nach dem erfolgreichen Test in die RODOS-Quellterm-Datenbank eingepflegt.

Die im Rahmen des Vorhabens erarbeiteten Unterlagen, um sich den Umgang mit den NLB-Abläufen und den entsprechenden Quelltermen anzueignen, sind für die entsprechenden Trainingsmaßnahmen gut geeignet.

## Thema

Überarbeitung des Maßnahmenkatalogs unter Berücksichtigung von Erfahrungen nach dem Unfall in Fukushima sowie von internationalen Entwicklungen in den letzten Jahren

## Subject

*Revision of the Catalog of Protective Measures taking into account experiences after the Fukushima accident and international developments in recent years*

## Kennzeichen

3618S62571

## Beginn

01.12.2018

## Ende

31.10.2020

## Fördermittel

EUR 189.580,-

## Forschungs- / Auftragnehmer

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln

## Projektleitung

Dr. F. Drever

## Fachbetreuung BfS

M. Werner / RN 2

## verantwortlich für den Text

Dr. F. Drever, M. Werner

## 1. ZIELSETZUNG

In diesem Vorhaben war der Maßnahmenkatalog, eine umfassende Zusammenstellung von Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor ionisierender Strahlung, zu überarbeiten und auf den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu bringen. Ziel war es, ein übersichtliches und effizient nutzbares Dokument als Grundlage für die Entscheidungsfindung über die Einleitung von Maßnahmen basierend auf radiologischen Kriterien sowie Hinweisen zu der Wirksamkeit der Maßnahmen und möglicher Probleme bei ihrer Durchführung zu schaffen.

Der aktuelle Maßnahmenkatalog der Strahlenschutzkommission (SSK) stammt aus dem Jahre 2008 und enthält bereits ausführliche Informationen zur Entscheidungsfindung. Die aufgeführten Maßnahmen sollen insbesondere die radiologischen Auswirkungen vermindern, die zum Beispiel bei einem schweren Stör- oder Unfall in einer in- oder ausländischen kerntechnischen Anlage oder Einrichtung oder bei Zwischenfällen mit radiologisch wirksamen Stoffen auftreten können. Die aufgeführten Maßnahmen werden von den jeweils zuständigen Behörden bewertet, empfohlen oder vollzogen. Für sie dient der Maßnahmenkatalog als Nachschlagewerk.

Neue Erkenntnisse nach dem Reaktorunfall in Fukushima im Jahr 2011 und seither verabschiedete neue gesetzliche Grundlagen erforderten die Überarbeitung der bisherigen Ausführungen im Maßnahmenkatalog.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Die Zielsetzung des Vorhabens wurde durch die Bearbeitung der nachstehenden Einzelziele umgesetzt.

### 2.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Der relevante Stand von Wissenschaft und Technik war aufzubereiten und als eigenständiger Bericht darzustellen. Dabei waren die Maßnahmen des bisherigen Maßnahmenkatalogs und ihre zukünftige Verwendbarkeit zu bewerten. Zudem war eine Darstellung des Sachstandes aus nationalen und internationalen Veröffentlichungen und Beratungsergebnissen aus Gremien einschließlich der Erkenntnisse aus dem Reaktorunfall in Japan gewünscht sowie eine Diskussion der Praktikabilität und zeitgemäßen Verwendung vorzunehmen.

### 2.2 ZUORDNUNG DER MAßNAHMEN ZU REFERENZSZENARIEN, UNFALLPHASEN, EXPOSITIONSPFADEN

Ein Entwurf eines überarbeiteten Maßnahmenkatalogs war zu erstellen. Dabei waren zu berücksichtigen:

- eine einfache, intuitive, klare und unmittelbar erschließbare Benutzerführung
- frühe Schutzmaßnahmen des Katastrophenschutzes und Maßnahmen des mittel- und langfristigen Notfallmanagements
- nach dem Reaktorunfall in Fukushima neu formulierte Maßnahmen
- die Planungsgebiete für frühe Schutzmaßnahmen
- alle bisherigen Maßnahmen des Maßnahmenkatalogs
- der Schutz von Einsatzkräften
- nicht-radiologische Auswirkungen
- Textbausteine für ein mögliches radiologisches Lagebild
- Maßnahmen für Bundesbürger im Ausland
- Maßnahmen zum Umgang und zum Vorgehen hinsichtlich der Behandlung von Oberflächenkontaminationen von Fahrzeugen
- Angaben für messwertbezogene radiologische Kriterien
- eine Priorisierung von Maßnahmen.

### **2.3 ABSTIMMUNG DER MAßNAHMEN MIT VERSCHIEDENEN BUNDESRESSORTS**

Die Maßnahmen des Entwurfs waren mit zuständigen Behörden und der Strahlenschutzkommission abzustimmen.

### **2.4 VORBEREITUNG DER MAßNAHMEN FÜR DEN RADIOLOGISCHEN LAGEBERICHT DES BUNDES UND FÜR EINE WEBBASIERTE OBERFLÄCHE**

Die Maßnahmen waren für eine Verwendung im radiologischen Lagebild und einer webbasierten Oberfläche vorzubereiten, die für Entscheidungsträger verständlich sind. Innerhalb des Dokumentes waren Verlinkungen vorzusehen, die eine schnelle Orientierung innerhalb des Dokuments ermöglichen.

## **3. METHODIK**

### **3.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK**

Die verwendete Methodik zur Aufbereitung des Standes von Wissenschaft und Technik war ein analytischer Vergleich zwischen den Aussagen im Maßnahmenkatalog mit Angaben in neuer (nach dem Jahr 2008 erschienenen) Literatur sowie eine Darstellung der bislang nicht aufgeführten Erkenntnisse dieser Literaturrecherche. Die Ergebnisse wurden präsentiert und einem Diskussionsprozess zugeführt.

### **3.2 ZUORDNUNG DER MAßNAHMEN ZU REFERENZSZENARIEN, UNFALLPHASEN, EXPOSITIONSPFADEN**

Basierend auf der Darstellung von Maßnahmen auf europäischer Ebene und im grenznahen Ausland in Form von Maßnahmenblättern wurde ein ähnliches Konzept für die deutsche Darstellung der Maßnahmen ausgewählt. Umfang und Umsetzung wurden einem Diskussionsprozess zugeführt.

Basierend auf der Analyse über die Literaturrecherchen (siehe 3.1) wurden Entwürfe ausgefüllter Maßnahmenblätter erstellt.

### **3.3 ABSTIMMUNG DER MAßNAHMEN MIT VERSCHIEDENEN BUNDESRESSORTS**

Die Konzeption des Entwurfs eines Maßnahmenkatalogs wurde auf Veranstaltungen vorgestellt. Über Fragebögen konnten Rückmeldungen zum Konzept und Inhalt des Entwurfs eines Maßnahmenkatalogs gegeben werden.

### **3.4 VORBEREITUNG DER MAßNAHMEN FÜR DEN RADIOLOGISCHEN LAGEBERICHT DES BUNDES UND FÜR EINE WEBBASIERTE OBERFLÄCHE**

Basierend auf der Analyse eines vom Bundesamt für Strahlenschutz zur Verfügung gestellten radiologischen Lageberichts wurden Anpassungsvorschläge für dort bereits aufgeführte Maßnahmandarstellungen und Vorschläge für Erweiterungsmöglichkeiten basierend auf den Analysen aus der Literaturrecherche (siehe 3.1 und 3.2) erarbeitet.

## **4. DURCHFÜHRUNG**

### **4.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK**

Die Literaturrecherche wurde fachgebietsabhängig von verschiedenen Mitarbeitern des Auftragnehmers durchgeführt, in Koordinierungsgesprächen abgestimmt und zu einem Bericht zusammengeführt. Der Bericht zum relevanten Stand von Wissenschaft und Technik wurde auf Wunsch der Fachbegleitung an den Ausschuss Notfallschutz (A5) der Strahlenschutzkommission versendet. Die Ergebnisse wurden am 17.09.2019 auf der Sitzung des A5 mit einer Präsentation im Beisein der Fachbegleitung vorgestellt. Zusätzlich fand eine Präsentation der Ergebnisse beim Bundesamt für Strahlenschutz in Neuherberg statt.

Die Ergebnisse des Abstimmungsprozesses der Maßnahmen mit verschiedenen Bundesressorts wurden zum Projektende in den Bericht zum relevanten Stand von Wissenschaft und Technik integriert und dieser als Abschlussbericht zur Verfügung gestellt.

### **4.2 ZUORDNUNG DER MAßNAHMEN ZU REFERENZSZENARIEN, UNFALLPHASEN, EXPOSITIONSPFADEN**

Nach ersten Ideen und Abstimmungen in einem ersten Koordinierungsgespräch (Kick-Off-Meeting) wurde ein erstes Konzept zu den Arbeiten am Entwurf eines Maßnahmenkatalogs übersendet. In dieser Version wurden die Maßnahmen für die Maßnahmenblätter identifiziert und die Struktur der Maßnahmenblätter vorgestellt sowie eine Einteilung nach Fachgebieten vorgenommen. Im April 2020 wurde eine weitere Version des Entwurfs an den Auftraggeber versendet. Dieser Entwurf enthielt eine Reihe von inhaltlich ausgearbeiteten Maßnahmenblättern. Alle Maßnahmen des Maßnahmenkatalogs der Strahlenschutzkommission waren in dieser Version bereits integriert. Das Dokument wurde von der Fachbegleitung begutachtet. Der Entwurf wurde daraufhin in drei Teile für die Arbeiten zur Abstimmung der Maßnahmen mit verschiedenen Bundesressorts aufgeteilt (siehe 4.3). Eine vollständige Version des Entwurfs wurde an die Strahlenschutzkommission und an das Referat, das federführend für die Erstellung des besonderen Notfallplans „kontaminierte Gebiete“ ist, versendet. Eine Teilversion mit den Maßnahmen im Bereich Abfall und Abwasser wurde an das Gremium versendet, das den besonderen Notfallplan „Abfall“ entwickelt. Eine weitere Teilversion mit den Maßnahmen des Bereichs Landwirtschaft wurde an das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft versendet. Zum Projektende wurde der Entwurf am 10.09.2020 der Strahlenschutzkommission und der Fachbegleitung in einer Präsentation vorgestellt. Die digitale Version des Entwurfs wurde einem Abschlussbericht auf einer CD beigelegt.

### **4.3 ABSTIMMUNG DER MAßNAHMEN MIT VERSCHIEDENEN BUNDESRESSORTS**

Es fand zu Beginn des Vorhabens ein Kick-off-Meeting statt, bei dem neben der Fachbetreuung auch Vertreter aus dem Bereich Landwirtschaft sowie des A5 der Strahlenschutzkommission zugegen waren.

Teile der frühen Koordinierung erfolgten bei der A5-Sitzung der Strahlenschutzkommission am 28.03.2019. Am 17.09.2019 (siehe 4.1) und 10.09.2020 (siehe 4.2) erfolgten weitere Diskussionen mit dem A5 der Strahlenschutzkommission als Teil der Koordinierung mit Gremien.

Im März 2020 wurde der Entwurf des Maßnahmenkatalogs auf einer Sitzung zum Allgemeinen Notfallplan des Bundes vorgestellt. Für jede dieser Veranstaltungen wurde durch den Auftragnehmer eine Präsentation im Rahmen dieses Vorhabens erarbeitet.

Im Juni 2020 wurden verschiedene Versionen des Entwurfs an jene Stellen versendet, die durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit festgelegt wurden. Da die Koor-

dinierung auf Grund der Pandemiesituation durch persönliche Treffen nicht möglich war, erfolgte sie durch einen mit der Auftraggeberin abgestimmten und im Rahmen des Vorhabens erstellten Fragebogen. Dieser Fragebogen wurde an die jeweiligen Adressaten angepasst. Auch wurden Anschreiben vorbereitet, die durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit versendet wurden. Die Rückmeldungen gingen im Juli 2020 sowohl bei der Fachbetreuung als auch beim Auftragnehmer ein. Die Rückmeldungen wurden ausgewertet und als Ergebnis des Koordinierungsprozesses in den Bericht zum relevanten Stand von Wissenschaft und Technik integriert. Einzelne Änderungswünsche wurden direkt in den Entwurf eines Maßnahmenkatalogs eingearbeitet.

#### **4.4 VORBEREITUNG DER MAßNAHMEN FÜR DEN RADIOLOGISCHEN LAGEBERICHT DES BUNDES UND FÜR EINE WEBBASIERTER OBERFLÄCHE**

In dem ersten Entwurf eines Maßnahmenkatalogs waren Vorschläge für die Art der Textbausteine enthalten. Darin war eine Unterscheidung zwischen Textbausteinen vorgesehen, die in das radiologische Lagebild übernommen werden könnten, und Textbausteinen, die als Presstext direkt an die Bevölkerung gerichtet werden. In der in 4.1 bereits erwähnten Sitzung wurde festgehalten, dass die Texte für die Information der Öffentlichkeit erst in einem weiteren Schritt nach Abschluss des Vorhabens „Übersetzung des Lagebildes in Kommunikation mit der Öffentlichkeitsarbeit“ in den Entwurf eines Maßnahmenkatalogs übernommen werden sollen. Der Auftragnehmer sollte vorerst nur Textbausteine für das radiologische Lagebild erstellen. Hierfür wurden auf bereits abgestimmte Inhalte des radiologischen Lagebilds zurückgegriffen. Aus einem radiologischen Lagebild einer Übung aus dem Jahr 2019 wurden die bestehenden Textbausteine analysiert und Änderungspotential inklusive textlichen Änderungsvorschlägen in Form eines eigenständigen Berichtes an die Auftraggeberin übersendet. Eine direkte Integration in den Entwurf eines Maßnahmenkatalogs erfolgte nicht, da die Textbausteine ganze Maßnahmengruppen mit gleichen Textbausteinen vorsehen, bei denen jeweils nur die Bezeichnung einer Maßnahme geändert wird. Die Verteilung der gleichen Texte auf viele Maßnahmenblätter (insgesamt ca. 250) hätte den Aufwand für die Erarbeitung und fachliche Prüfung in unangemessener Weise erhöht. Änderungsvorschläge für den Bericht wurden in den Bericht eingearbeitet. Dieser Bericht wurde dem Abschlussbericht beigelegt.

## **5. ERGEBNISSE**

### **5.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK**

Ein Ergebnis der Analyse ist der im Abschlussbericht ausgewiesene Bedarf an Maßnahmen, die in der Version des Maßnahmenkatalogs der Strahlenschutzkommission nicht oder nicht detailliert berücksichtigt wurden. So finden sich gerade im Bereich der Trinkwassergewinnung und -versorgung bislang keine Maßnahmen im Maßnahmenkatalog. Der Bereich der Entsorgung bezieht sich bislang nur auf Maßnahmen im landwirtschaftlichen Bereich und sollte auf andere Abfallarten erweitert werden. Damit einher geht auch die Anpassung von Modellansätzen für diesen Bereich. Hier wurden in der Vergangenheit im Zusammenhang mit dem Rückbau von Kernkraftwerken und der Freigabe von Abfällen aus diesem Bereich Modellannahmen geprüft und aktualisiert. Das entsprechende Vorgehen kann auf kontaminierte Abfälle übertragen werden.

Einige Maßnahmen sind bislang in anderen Dokumenten der Strahlenschutzkommission aufgeführt worden und können bei der Überarbeitung des Maßnahmenkatalogs in diesen integriert werden. Hierzu zählen Maßnahmen des Katastrophenschutzes, personenbezogene Maßnahmen und Maßnahmen zum Schutz von Einsatzkräften.

Der Maßnahmenkomplex der „Maßnahmen zur Verringerung der radiologischen Gefährdung“ sollte neu hinzugenommen werden, da diese Maßnahmen vorwiegend bei lokalen Notfällen eine Rolle spielen. Der bisherige Maßnahmenkatalog der Strahlenschutzkommission sah vorwiegend Maßnahmen für großflächige Ereignisse vor. Mit den rechtlichen Änderungen der Notfallplanung werden jedoch auch lokale Notfälle berücksichtigt, so dass Maßnahmen der nuklearen Gefahrenabwehr nun ebenfalls berücksichtigt und aufgeführt werden sollten.

Die Maßnahme „Ernten mit größerer Schnitthöhe und Verwerfen der oberen Pflanzenteile“ ist nach Meinung des Auftragnehmers nicht widerspruchsfrei dargestellt. Statt die oberen Pflanzenteile zu ver-

werfen, liegen Hinweise vor, gerade diese zu nutzen. Entsprechende Angaben sollten demnach nochmals überprüft oder im Maßnahmenkatalog deutlicher dargestellt werden.

Im Maßnahmenkatalog werden unter dem Punkt „Informationen zum Kostenaufwand bei der Dekontamination urbaner Flächen“ die Faktoren Kosten, benötigtes technisches Gerät, Arbeitsaufwand, anfallende Abfallmengen und Gefahren für das Einsatzpersonal aufgeführt. Diese Faktoren sind nicht nur für Maßnahmen zur Dekontamination heranzuziehen, sondern könnten zukünftig bei allen Maßnahmen aufgeführt werden.

## **5.2 ZUORDNUNG DER MAßNAHMEN ZU REFERENZSZENARIEN, UNFALLPHASEN, EXPOSITIONSPFADEN**

Der Entwurf eines Maßnahmenkatalogs wurde so aufgebaut, dass Maßnahmen thematisch in Kapiteln gegliedert werden. Diese thematische Gliederung bezieht sich auf den Anwendungsbereich und die Wirkung der Maßnahmen. Die Aufteilung der Maßnahmen orientierte sich dabei an Vorgaben aus der Leistungsbeschreibung, Angaben aus dem 2. Diskussionsentwurf des Allgemeinen Notfallplans des Bundes und § 99 Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) und wurde mit der Fachbetreuung und dem Ausschuss Notfallschutz der Strahlenschutzkommission abgestimmt.

Neben den Beschreibungen der Maßnahmen finden sich zudem weitere Abschnitte im Entwurf, die ergänzende Informationen enthalten. So werden Hintergrundinformationen für Einzelmaßnahmen aufgeführt, Angaben über Expositionsmodelle oder Referenzszenarien und Nachschlagewerke für Größen in den Expositionsmodellen in weiteren Kapiteln des Entwurfs vorgesehen.

Eine Priorisierung von Maßnahmen ist derzeit nicht vollständig vorgenommen worden. Einschätzungen der Strahlenschutzkommission wurden in Form der „Empfehlbarkeit“ einer Maßnahme dargestellt. Dies kann als Teil einer Priorisierung angesehen werden. In Kapitel 18 des Entwurfs wurden zudem Tabellen erstellt, in denen am Beispiel der Bedrohungsphase Maßnahmen zusammengestellt wurden, die in dieser Phase relevant sein könnten, sofern die radiologischen Kriterien für die Angemessenheit einer Maßnahme erfüllt sind. Für eine Priorisierung wurden Angaben für verschiedene Aspekte einer Maßnahme vorgesehen, die in einen Priorisierungsprozess einfließen können. Neben der radiologischen Größe „Dosisreduktion“ können Größen wie Zeit-, Personal- und Kostenaufwand, Abfallaufkommen, Akzeptanz und sonstige Konsequenzen in eine Priorisierung von Maßnahmen einfließen. Inwieweit einer Größe mehr oder weniger Bedeutung zugemessen wird, ist situationsabhängig zu bewerten. Eine entsprechende Priorisierung von Maßnahmen sollte im Rahmen der weiteren Abstimmung mit den besonderen Notfallplänen und den dort enthaltenen Erweiterungen der Schutzstrategien des Allgemeinen Notfallplans des Bundes erfolgen.

## **5.3 ABSTIMMUNG DER MAßNAHMEN MIT VERSCHIEDENEN BUNDESRESSORTS**

Als Konsequenz aus den Rückmeldungen auf die Fragebögen wurde die Nummerierung des Maßnahmenkatalogs angepasst, die für einen Priorisierungsprozess wichtigen Aspekte wurden um „sonstige Konsequenzen“ erweitert. Einzelne Maßnahmen wurden ergänzend aufgenommen, während andere Maßnahmen zusammengefasst wurden. Für eine bessere Übersicht wurden zudem einzelne Maßnahmen untergliedert. Die grundsätzliche Verwendung von Maßnahmenblättern wurde begrüßt. Einzelne Inhalte auf den Maßnahmenblättern müssen jedoch noch mit den Fachbehörden und Gremien, insbesondere der Strahlenschutzkommission, im Detail geklärt werden. Diese Arbeiten sind auch als Teil des Erarbeitungsprozesses der besonderen Notfallpläne zu verstehen. Es wurde zudem klar gefordert, die neuen Maßnahmen genauer zu bewerten. Diese Bewertungsmöglichkeiten müssen auch mit dem Bewertungswerkzeug RODOS<sup>1)</sup> in Einklang gebracht werden.

## **5.4 VORBEREITUNG DER MAßNAHMEN FÜR DEN RADIOLOGISCHEN LAGEBERICHT DES BUNDES UND FÜR EINE WEBBASIERTER OBERFLÄCHE**

Für jedes der Kapitel im radiologischen Lagebild wurden separate Vorschläge und Ergänzungsmöglichkeiten unterbreitet. Es wurde vorgeschlagen, ein Extrakapitel für Verhaltensempfehlungen vorzusehen. Es wurde festgestellt, dass Inhalte bezüglich Maßnahmen im Bereich der Kommunikation nicht im radiologischen Lagebild aufgeführt werden. Gleiches gilt für die Bereiche „Schutz der Einsatzkräfte“,

<sup>1)</sup> Realtime Online Decision Support System

„personenbezogene Maßnahmen“, „Maßnahmen zur Verringerung der radiologischen Gefährdung“, „Maßnahmen für sonstige Produkte, Gegenstände und Stoffe“, „Maßnahmen für Arzneimittel und deren Ausgangsstoffe sowie für Medizinprodukte“, „Maßnahmen für die Beförderung von Gütern“, „Maßnahmen für den grenzüberschreitenden Verkehr von Personen, Fahrzeugen, Gütern und Gepäck“, „Maßnahmen für kontaminierte Gebiete“ und „Maßnahmen für die Entsorgung von Abfällen und für die Beseitigung von Abwasser“.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Das Vorhaben hatte das Ziel, die SSK Publikation Heft 60 (2010) „Übersicht über Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenexposition nach Ereignissen mit nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen“ (Maßnahmenkatalog) auf Grund der Ereignisse von Fukushima und der aktuellen Gesetzgebung zu überarbeiten und an den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik anzupassen.

Die SSK-Publikation Heft 60 (Maßnahmenkatalog) gilt bis zur Fertigstellung der Besonderen Notfallpläne des Bundes (BNoPI) nach § 99 Strahlenschutzgesetz als vorläufiger Notfallplan des Bundes (Anlage 4 Nr. 5 Strahlenschutzgesetz).

Mit den Abschlussberichten dieses Vorhabens liegt ein aktueller überarbeiteter Entwurf zum Maßnahmenkatalog vor.

Die in diesem Forschungsvorhaben zum Maßnahmenkatalog beschriebenen Maßnahmen sind die Basis für die Anwendungsbereiche der BNoPI nach § 99 Strahlenschutzgesetz.

Im Folgevorhaben 3621S62520 „Überarbeitung des Maßnahmenkatalogs, Integration Aktualisierung bisher unberücksichtigter Maßnahmen auf Basis der Erstellung §§ 98,99 StrSchG Allgemeiner Notfallplan, Besondere Notfallpläne des Bundes“ wird dieses Vorhaben weitergeführt, indem unter anderem die etwa 250 Maßnahmenblätter (100 Maßnahmen sind bisher detailliert beschrieben) noch weiter erarbeitet und die bisherigen Maßnahmen zum Teil inhaltlich ergänzt werden. Dazu sind für die radiologisch-fachliche Zuarbeit zu den Maßnahmen Absprachen zwischen GRS, BMU, Länder-, Bundes-Behörden und Gremien im Hinblick auf die BNoPI zu koordinieren und auszuwerten. Diese Abstimmungen sind eng mit den Abläufen und Terminvorgaben für die BNoPI zu verzahnen, so dass diese voraussichtlich im Herbst 2022 als Allgemeine Verwaltungsvorschriften vom Bund bestätigt werden können.

Im neuen Vorhaben soll die Überarbeitung des Maßnahmenkatalogs (SSK-Publikation Heft 60) unter anderem als Basis für die Besonderen Notfallpläne des Bundes fertiggestellt werden.

**Thema**

Entwicklung geeigneter Schulungskonzepte für Einsatzszenarien im Radiologischen Lagezentrum zur Optimierung der psychischen und fachlichen Verfasstheit und rollenbezogenen Kompetenzentwicklung

**Subject**

*Design of specific training concepts for competence development in the context of operational scenarios in the Federal Radiological Situation Centre*

**Kennzeichen**

3618S62572

**Beginn**

01.10.2018

**Ende**

31.07.2020

**Fördermittel**

EUR 207.410,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Team HF - Human Factors Forschung Beratung Training  
Hofinger, Künzer / Mähler PartG Ludwigsburg

**Projektleitung**

Dr. G. Hofinger

**Fachbetreuung BfS**

A. Berkmann / RN 3

**verantwortlich für den Text**

Dr. C. Becker

## 1. ZIELSETZUNG

Mit Schwerpunkt auf Human Factors sollte ein Trainingskonzept entwickelt werden, durch welches die nicht-technischen fachlichen Kompetenzen des am Radiologischen Lagezentrum (RLZ) beteiligten Personals weiterentwickelt werden können. Besonders relevant hierbei waren die rollenbezogene Aus- und Weiterbildung bezüglich des Handelns in Krisenlagen in einer Besonderen Aufbauorganisation (BAO) des BfS und der Stabsarbeit. Einbezogen wurden u. a. individuelle und teambezogene Faktoren sowie organisationsbezogene Einflussfaktoren wie Sicherheits- und Fehlerkultur. Auf Basis einer empirischen Anforderungsanalyse des RLZ sowie einer Literaturanalyse bezüglich der für die Stabsarbeit benötigten Kompetenzen wurde ein Trainingskonzept entwickelt. Dieses wurde ergänzt durch eine Bewertungsmatrix und ein Evaluationskonzept.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Die Entwicklung eines entsprechenden Trainingskonzepts erfolgte in drei miteinander verzahnten Arbeitspaketen.

### 2.1 SOLL-IST-ANALYSE DER RLZ/BFS-BAO

Der Ist-Zustand der RLZ-Aufbauorganisation des BfS (RLZ/BfS-BAO) wurde anhand von Übungsbeobachtungen und Befragungen ermittelt.

### 2.2 INTERNATIONALER ENTWICKLUNGSSTAND UND GOOD-PRACTICE-BEISPIELE

Auf Grundlage einer umfassenden Literaturrecherche des nationalen und internationalen Entwicklungsstands sowie der Erhebung von Good-Practice-Beispielen von vier exemplarischen Lagezentren inklusive Expertenbefragung sollte ein Stand der Forschung bestimmt werden, der es erlaubt, qualifizierte Merkmale zur Bewertung bestehender Strukturen und Prozesse zu erarbeiten.

### 2.3 ENTWICKLUNG DIDAKTISCHER GESTALTUNGSSTRATEGIE UND EVALUATIONSKONZEPT

Anhand der Ergebnisse der zwei ersten Arbeitspakete, zusätzlicher Recherche und weiterer Expertengespräche sollte eine didaktische Gestaltungsstrategie entwickelt werden, die die Erstellung eines RLZ/BfS-BAO-spezifischen Trainings- bzw. Evaluationskonzepts erlaubt, welches zum einen den nachhaltigen Lernerfolg der Teilnehmenden ermöglichen soll und zum anderen die systematische Bewertung und Weiterentwicklung der Organisation als solche gestattet.

## 3. METHODIK

Die zur Bearbeitung der gestellten Ziele eingesetzten Methoden sind im Wesentlichen Beobachtung, Befragungen in Form von Expertengesprächen, leitfadengestützten Interviews und Fragebögen sowie Literaturanalyse.

### 3.1 BEOBACHTUNGEN

Die Beobachtung während der zwei Übungen CORE 2019 im Februar 2019 und GNU im November 2019 erfolgte durch entsprechend geschulte Mitarbeitende an vier bzw. drei Standorten der RLZ/BfS-BAO anhand teilstandardisierter Beobachtungsleitfäden. Zur Auswertung wurden weitere Quellen (Chat-Verlauf, Einsatztagebuch, ELAN-Einträge, Struktur- und Rollenbeschreibungen des BfS) mit verwendet.

### 3.2 BEFRAGUNGEN

Für die Befragungen wurde zum einen ein modularer Fragebogen mit insgesamt 32 Items erstellt, der durch die Behörde, den Datenschutzbeauftragten sowie den Personalrat überprüft wurde. Ausfüllen und Rücksendung erfolgten anonym. Die Fragebögen wurden qualitativ ausgewertet. Die leitfadengestützten Interviews erfolgten in persona oder per Telefon durch geschulte Mitarbeitende von Team HF. Die durch die Interviewten selbst auf Wunsch überprüften Interview-Transkripte wurden anonymisiert qualitativ ausgewertet. Die Interviews umfassten neben organisationsinternen auch Gespräche mit Experten weiterer Behörden (GMLZ<sup>1</sup>, GRS<sup>2</sup>, BMU).

Die Befragung von Mitarbeitenden der vorzustellenden Lagezentren wurden ebenfalls leitfadengestützt während der Begehung bzw. Besichtigung der Lagezentren durchgeführt.

Die Datenerhebung für das AP 3 erfolgte durch teilnehmende Beobachtung und Interviews sowie Fragebögen. Die Befragung wurde durch das Team Human Factors in Kombination mit der Datenerhebung für AP 1 zur Erhebung der Ist-Situation von Trainingsangeboten und Trainingsevaluation durchgeführt. Eine geplante Befragung der Mitarbeitenden der Abteilung Z mit Schwerpunkt zum Personalentwicklungskonzept und dessen Umsetzung fand auf Wunsch der Projektverantwortlichen des BfS nicht statt.

### 3.3 LITERATURANALYSE

Es wurde deutsch- und englischsprachige Literatur zu Handeln, Rahmenbedingungen und Human Factors-orientierten Kompetenzen und Trainingsformen für Krisenstabsarbeit recherchiert und zusammengefasst. Wo der Forschungsstand keine Literatur anbot, wurden wichtige Punkte aus den in Forschungsprojekten und der Beratungstätigkeit der Autor\*innen erworbenen Erfahrungsbeständen ergänzt.

Des Weiteren wurden deutsch- und englischsprachige Literatur zu Erwachsenenbildung und Lernforschung, didaktischen Gestaltungsstrategien sowie Programmevaluation genutzt, um die Empfehlungen des Trainingskonzepts und des Evaluationskonzeptes mit dem wissenschaftlichen Stand der Forschung sowie Best-Practice Erkenntnissen zu hinterlegen.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 SOLL-IST-ANALYSE DER RLZ/BFS-BAO

Basierend auf den zwei Übungsbeobachtungen im Februar und November 2019 sowie auf den Befragungen der Mitarbeitenden der RLZ/BfS-BAO mittels spezifisch entwickelter Fragebögen und leitfadengestützter Interviews wurde der Ist-Zustand der RLZ/BfS-BAO ermittelt. Dabei wurden die Ergebnisse jeweils in Berichtsform und im Rahmen eines Workshops zur Verfügung gestellt bzw. vorgestellt.

---

<sup>1</sup>) Gemeinsame Melde- und Lagezentrum von Bund und Ländern

<sup>2</sup>) Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit

## 4.2 INTERNATIONALER ENTWICKLUNGSSTAND UND GOOD PRACTICE

Auf der Grundlage wissenschaftlicher Recherchen wurde der Status Quo des aktuellen und relevanten Wissenstands zu Krisenstäben und Lagezentren im deutschen und internationalen Kontext ermittelt. Es wurden vor allem die Anforderungen komplexer Krisenlagen, Prozesse und Rollen der Stabsarbeit, besondere psychologische Anforderungen an Stabsmitglieder, Organisationsprozesse, Gestaltung und Ausstattung von Stabsräumen/ Lagezentren, Kompetenzfelder und Trainingskonzepte untersucht. Zusammen mit den „Good Practice“-Beispielen von Lagezentren, die durch Begehung und Expertengespräche erhoben wurden, wurde einerseits ein Soll-Status identifiziert und andererseits wurden in einer Bewertungsmatrix qualifizierte Merkmale zur Bewertung bestehender Strukturen und Prozesse der RLZ/BfS-BAO erarbeitet. Auch diese Ergebnisse wurden jeweils in einem Bericht dargestellt.

## 4.3 ENTWICKLUNG DIDAKTISCHE GESTALTUNGSSTRATEGIE UND EVALUATIONSKONZEPT

Auf Grundlage der Soll-Ist-Analyse wurden im Berichtszeitraum rollenclusterspezifische Anforderungen an und Kompetenzprofile von Mitarbeitenden innerhalb der RLZ/BfS-BAO abgeleitet mit den zwei Wissens-/Fertigkeiten-/Kompetenzausprägungen „Basis“ und „Experte“ verknüpft.

Die rollenclusterspezifischen Anforderungs- bzw. Kompetenzprofile wurden in Verbindung mit verschiedenen Wissensarten und den Ausprägungsstufen als Kompetenzziele konkretisiert und mit didaktischen Umsetzungsvorschlägen sowie Evaluationsempfehlungen und benötigten Ressourcen hinterlegt. Diese Konkretisierung bildete die Grundlage für die auf das RLZ/BfS-BAO eigens angepasste didaktische Gestaltungsstrategie, die nachhaltiges und erfolgreiches Lernen ermöglichen soll und in ein spezifisches Trainingskonzept für Mitarbeitende in der RLZ/BfS-BAO mündete. Ergänzt wurde das Trainingskonzept schließlich um ein Evaluationskonzept, welches die Nachhaltigkeit der entsprechenden Maßnahmen zum einen im Sinne der Qualitätssicherung und zum anderen im Sinne der Qualitätsentwicklung sicherstellt.

## 5. ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Übungsbeobachtungen und der Befragungen im ersten Arbeitspaket wurden mit Bezug auf die inhaltlichen Themenbereiche

- organisationsbezogene Einflussfaktoren auf sicheres Handeln
- Rollen RLZ/BfS-BAO
- Interaktion Mensch-Technik
- Prozesse der Stabsarbeit
- Führung
- Informationssteuerung und Dokumentation
- Teams
- virtuelle Zusammenarbeit
- individuelle Kompetenzen/Notfallkompetenzen
- Aus- und Weiterbildung

zum einen dazu genutzt, Hinweise zur Gestaltung der Interaktion Mensch-Technik-Organisation zu geben. Zum anderen wurden die Bedarfe der Weiterentwicklung von rollen- und lagebezogenen Kompetenzen von Mitarbeitenden der RLZ/BfS-BAO aufgezeigt. In Bezug auf Aufgabenfelder und charakteristische Tätigkeiten innerhalb der RLZ/BfS-BAO wurden fünf Rollencluster identifiziert, deren unterschiedliche Anforderungs- bzw. Kompetenzprofile auf die zwei Ausprägungsstufen „Basis“ und „Experte“ hin modelliert wurden.

Hierzu wurden sowohl die Resultate einer Literaturrecherche zum Stand der Forschung bezüglich der Anforderungen und benötigten Kompetenzen in RLZ/BfS-BAO respektive bei der Stabsarbeit sowie bei der Organisation von Lagezentren als auch die Auswertungen von Good-Practice-Beispielen vier exemplarischer Lagezentren aus AP 2 mit verwendet.

In AP 3 schließlich bildet das für die RLZ/BfS-BAO spezifisch entwickelte Trainingskonzept unter Bezugnahme auf die Rollencluster und Kompetenzprofile ab, welche Inhalte hinter den einzelnen Themenbereichen stehen, wie diese didaktisch gestaltet und evaluiert werden können sowie welche personell-organisatorischen und technisch-infrastrukturellen Ressourcen dabei bedacht werden müssen. Didaktische Methoden zum Erzielen von Lernerfolgen in den Bereichen grundlegende Methoden, webbasierte und computer-basierte Methoden, von Mitarbeitenden zu Mitarbeitenden, Veranstaltungen und Übungen wurden bezüglich ihrer Vor- und Nachteile dargelegt. Exemplarisch wurde anhand einer Rolle der RLZ/BfS-BAO aufgezeigt, wie die entsprechenden spezifischen Kompetenzziele durch Verknüpfung inhaltlich ähnlicher Themen und in Kombination verschiedener didaktischer Bausteine zu einem konkreten, modularen Weiterbildungsangebot zusammengefügt werden können.

Das Evaluationskonzept beleuchtet schließlich das Verhältnis und die Rollenverteilung zwischen dem RLZ-Mitglied im BfS, der Führungskraft in der Allgemeinen Aufbauorganisation (AAO) und der Führungskraft in der Besonderen Aufbauorganisation (BAO), eingebettet in die Organisationskultur des BfS, als zentrale Ecksteine der Evaluation.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Die enge Verzahnung der drei Arbeitspakete erlaubte zum einen die Berücksichtigung aktueller Veränderungen innerhalb der RLZ/BfS-BAO, d. h. beispielsweise Entwicklungsprozesse zwischen den Übungen durch Rückmeldung von Ergebnissen und Bearbeiten der Themen in Workshops. Zum anderen konnten aktuelle Forschungsstände unmittelbar in den laufenden Veränderungsprozess einfließen und direkt mitbedacht werden. Überdies war es möglich, Anforderungs- und Kompetenzprofile so zu erheben und zu definieren, dass diese durch das Einfließen der Ergebnisse vorheriger Arbeitspakete sehr konkret und spezifisch auf die Bedürfnisse der RLZ/BfS-BAO angepasst werden konnten. Durch die Einbettung des Trainings- und Evaluationskonzepts in die bestehende Organisationskultur konnte die Voraussetzung dafür geschaffen werden, dass bevorstehende Maßnahmen umsichtig angegangen, erfolgreich umgesetzt und gut angenommen werden können.

Die in dieser Form erarbeiteten Ergebnisse zeichnen sich aus durch die erfolgreiche Verknüpfung der Analyse bestehender Prozesse und Strukturen mit der Berücksichtigung konkreter Bedarfe, der Integration aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse sowie der Antizipation anstehender Maßnahmen und deren Erfordernisse in Bezug auf die RLZ/BfS-BAO.

**Thema**

Ermittlung der Informations- und Schutzbedürfnisse von Einsatzkräften im Notfallschutz; Ableitung von Empfehlungen zur Verbesserung der Ausbildung, Information und Kommunikation

**Subject**

*Identification of information and safety needs among emergency responders; Derivation of recommendations to improve education, information and communication*

**Kennzeichen**

3618S62573

**Beginn**

01.11.2018

**Ende**

30.04.2020

**Fördermittel**

EUR 163.625,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Stiftung Risiko-Dialog, Zürich / Schweiz

**Projektleitung**

M. Holenstein

**Fachbetreuung BfS**

C. Pözl-Viol / St-RK

**verantwortlich für den Text**

M. Holenstein

## 1. ZIELSETZUNG

Das vorliegende Projekt befasste sich mit den Informations- und Schutzbedürfnissen von Einsatzkräften im Notfallschutz. Der Fokus lag dabei auf Einsatzkräften (EK), die in radiologischen Notfällen eingesetzt werden. Das Projekt verfolgte das Ziel, Empfehlungen für Schulungs-, Informations-, und Kommunikationskonzepte, Übungen und Kommunikationsplattformen zu erarbeiten und dabei die unterschiedlichen Voraussetzungen der einzelnen Einsatzkräfte-Gruppen und damit verbundene Informations- und Schutzbedürfnisse zu berücksichtigen. Die Empfehlungen erfolgten in erster Linie auf einer konzeptionellen Ebene. Das Projektteam strebte im Rahmen der Möglichkeiten an, bereits möglichst konkrete und gruppenspezifische Maßnahmen zu formulieren, deren Umsetzung losgelöst vom vorliegenden Projekt zu vertiefen ist.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das Projekt war aufgeteilt in vier Arbeitspakete (AP). Ziel von AP 1 war es, den aktuellen, relevanten Stand von Wissenschaft und Technik für die Zwecke des Vorhabens aufzuarbeiten und in Form eines Berichts dem Auftraggeber zur Verfügung zu stellen.

Ziel von AP 2 war es, mit Interviews die Informations- und Schutzbedürfnisse von Einsatzkräften bei einem radiologischen Notfall zu ermitteln. Das AP 2 knüpfte dabei an die Ergebnisse von AP 1 an, insbesondere die Erkenntnisse zu den psychosozialen Belastungen im Rahmen von radiologischen Einsatzlagen. In die Erhebung wurden die relevanten Einsatzkräfte-Organisationen einbezogen und die unterschiedlichen Perspektiven auf einen möglichen Einsatz in einem radiologischen Kontext berücksichtigt, um eine möglichst umfassende Identifikation der Bedürfnisse zu erreichen.

Ziel von AP 3 war es, im Rahmen eines Workshops, die in den Interviews in AP 2 identifizierten Bedürfnisse von Einsatzkräften in einer interaktiven Diskussion zu verifizieren, präzisieren, gewichten und zu ergänzen. Anschließend sollten gemeinsam Ansätze und Maßnahmen entwickelt werden, um die überarbeiteten Bedürfnisse zu adressieren.

Ziel von AP 4 war es, aus den Ergebnissen des Workshops in AP 3 Empfehlungen zur Weiterentwicklung der Ausbildung, Information und Kommunikation mit Einsatzkräften abzuleiten, um diese im Umgang mit psychischen Belastung zu unterstützen. Anschließend wurden alle Ergebnisse in einem Schlussbericht zusammengefasst.

### 3. METHODIK

Für die Literaturanalyse in AP 1 wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Neben wissenschaftlicher Literatur wurden auch Positionspapiere und Leitfäden im Bereich der grauen Literatur analysiert. Neben der Desk- und Onlinerecherche basierte das Projektteam seine Arbeit in AP 1 auch auf dem Fachwissen und den Erfahrungen nationaler und internationaler Praxis-Experten. Dies sind Personen, die in ihrem beruflichen Kontext sehr praxisnah am Thema sind, wie z. B. die Leiter\*innen unterschiedlicher Einsatzkräfte, welche für radiologische Ereignisse vorgesehen sind. Das Wissen dieser Personen wurde im Rahmen von selektiven Experteninterviews in die Recherche integriert.

In AP 2 wurde für die Ermittlung der Informations- und Schutzbedürfnisse von Einsatzkräften bei einer radiologischen Einsatzlage ein qualitatives methodisches Vorgehen mit explorativem Ansatz gewählt. Die Informations- und Schutzbedürfnisse der Einsatzkräfte wurden in qualitativen, leitfadengestützten, problemzentrierten Interviews erhoben.

In AP 3 wurden mit einem zweitägigen Workshop die erfassten Bedürfnisse weiter vertieft und mögliche Maßnahmen entwickelt. Als Grundlage für den Workshop dienten drei, nach Einsatzphasen gegliederte Bedürfnisse-Tabellen mit den zuvor in AP 2 identifizierten Bedürfnissen. Aufgabe der Teilnehmenden war es in einem ersten Schritt die Inhalte zu verifizieren, präzisieren (mit Beispielen), gewichten und zu ergänzen. In einer zweiten Phase wurden Maßnahmen entwickelt, um die überarbeiteten Bedürfnisse zu adressieren. Die Strukturierung der im Workshop entwickelten Maßnahmen erfolgte ebenfalls anhand der drei Einsatzphasen (einsatzvorbereitende, einsatzbegleitende und einsatznachsorgende Maßnahmen).

Im darauffolgenden AP 4 wurden aus den Erkenntnissen des Workshops (AP 3), der Interviews mit Einsatzkräften (AP 2) sowie des Literaturreviews zu psychosozialen Belastungen und Vorsorge (AP 1) durch das Projektteam Empfehlungen abgeleitet. Die Empfehlungen wurden anhand der drei Einsatzphasen strukturiert und priorisiert. Weiter wurde, wo möglich, die Rolle des BfS beschrieben. Die Empfehlungen wurden in einem BfS-internen Workshops reflektiert. Dabei ging es primär darum, die Empfehlungen nach Praxisrelevanz, inhaltlicher Richtigkeit, korrekter Darstellung der BfS-Rolle, fehlender Inhalte und richtiger Priorisierung zu prüfen.

Alle Erkenntnisse aus dem gesamten Projekt wurden in einem Schlussbericht zusammengefasst und auf DORIS in barrierefreier Form veröffentlicht (<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2020101923624>).

### 4. DURCHFÜHRUNG

Für die Literaturrecherche (AP 1) wurde in einschlägigen, interdisziplinären Literaturdatenbanken (u. a. Google Scholar) eine Schlagwortsuche durchgeführt, die unter anderem auf den Schlagworten „PS-NV<sup>1)</sup>“, „nuclear crisis“ und „emergency workers“ (sowie alternativen englischen Begriffen wie z. B. „emergency responders“) und den deutschen Äquivalenten basierte. Die so identifizierte Literatur wurde gesichtet und nach thematischer Relevanz selektiert. Etwa 30 Quellen flossen in die Erarbeitung des Berichts ein. Die Experteninterviews in AP 1 wurden anhand eines Gesprächsleitfadens geführt und stichwortartig festgehalten. Es konnten 5 Gespräche mit Experten aus dem radiologischen Notfallschutz durchgeführt werden. Die zentralen Aussagen aus den Gesprächen wurden in die Berichterstattung zu AP 1 integriert.

Für die leitfadengestützten Interviews in AP 2 vermittelte das BfS eigene Messkräfte sowie Vertreterinnen und Vertreter der Polizei, Feuerwehr, THW, verschiedener Hilfsorganisationen, Kliniken und Krankenhäuser sowie der Bundeswehr. Interviewanfragen wurden vor allem an Standorte der Organisationen gesendet, die sich in Nähe zu einem AKW<sup>2)</sup> befinden, um eine möglichst große Nähe zu dem Befragungsthema sicherzustellen und die Empathielücke zu reduzieren. Es konnten insgesamt 19 Interviews mit insgesamt 44 Einsatzkräften durchgeführt werden.

---

<sup>1)</sup> Psychosoziale Notfallversorgung

<sup>2)</sup> Atomkraftwerk

Der Workshop (AP 3) fand zwischen dem 11. Februar 2020 mittags bis zum 12. Februar 2020 mittags beim BfS in der Dienststelle München (Neuherberg) statt. Der Teilnehmerkreis bestand aus Vertreter\*innen aus unterschiedlichen Einsatzorganisationen, Forschung sowie dem BfS selbst.

Die Erkenntnisse aus dem Workshop (AP 3) wurden in AP 4, zusammen mit den Inhalten aus den Interviews mit Einsatzkräften (AP 2) sowie den Befunden aus dem Literaturreview zu psychosozialen Belastungen und Vorsorge (AP 1) durch das Projektteam, zu Empfehlungen konsolidiert. Im Rahmen eines BfS-internen Workshops mit 11 Mitarbeitenden des BfS wurden die Empfehlungen anhand Praxisrelevanz, inhaltlicher Richtigkeit, korrekter Darstellung der BfS-Rolle, fehlender Inhalte und richtiger Priorisierung diskutiert. Die Feedbacks wurden anschließend eingearbeitet und die überarbeiteten Empfehlungen zusammen mit den restlichen Erkenntnissen aus dem Projekt in einem Schlussbericht zusammengefasst.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 AUFARBEITUNG DES AKTUELLEN, RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK (AP 1)

Die erarbeiteten Resultate von AP 1 wurden in einem zusammenfassenden Bericht dem Auftraggeber zur Verfügung gestellt. Daraus geht hervor, dass im spezifischen Szenario einer radiologischen Großkatastrophe zu beachten ist, dass sich die präventiven Maßnahmen stark zwischen einzelnen Einsatzkräften unterscheiden können. So macht es beispielsweise nur bedingt Sinn, medizinisches Pflegepersonal in der Ausbildung ausführlich über die Wirkung radioaktiver Strahlen und Schutzmaßnahmen aufzuklären, hingegen ist es bei Spezialisten wie bei einer Analytical Task Force ein grundlegender Bestandteil der Ausbildung. Auch muss die Kommunikation und Information an das Vorwissen, aber auch an die «Sprache» der Einsatzkräfte angepasst werden. Wie in den Experteninterviews hingewiesen wurde, unterscheidet sich die Sprache in der Wissenschaft stark von der Sprache in der Praxis, was in der zielgruppenspezifischen Kommunikation berücksichtigt werden muss. In den Experteninterviews wurde die Empathielücke als mögliches methodisches Problem für AP 2 angesprochen.

### 5.2 ERMITTLUNG DER INFORMATIONS- UND SCHUTZBEDÜRFNISSE VON EINSATZKRÄFTEN (AP 2)

Als Ergebnis von AP 2 entstand ein Zwischenbericht, der einen Überblick über das Vorgehen/die Methode der Erhebung und Analyse vermittelt sowie eine Typologie der unterschiedlichen Einsatzkräfte und eine Übersicht über die jeweiligen Informations- und Schutzbedürfnisse enthält. Wichtige Befunde daraus sind:

- Informationsbedürfnisse zeichnen sich durch hohe Anwendungsnähe auf. Gewünscht werden immer wieder konkrete, nutzbare, verständliche Informationen, die im Kern Handlungsanweisungen oder -empfehlungen implizieren. Immer wieder genannt wird die Frage, wo der Gefahrenbereich verläuft, wie lange und unter der Voraussetzung welcher Schutzmaßnahmen der Gefahrenbereich betreten werden kann. Messwerte werden nur selten gewünscht, gelten häufig als schwierig verständlich und interpretierbar. Gewünscht werden vielmehr Interpretationen und Implikationen der Messwerte.
- Neben Routine, die insbesondere durch regelmäßige Übungen etabliert werden kann, ist Vertrauen der zentrale Mechanismus, Einsatzbereitschaft und -fähigkeit unter den Bedingungen von Unsicherheit und persönlicher Gefährdung zu gewährleisten. Dabei spielt das Vertrauen horizontal zu Kolleginnen und Kollegen sowie Kooperationspartnern, vertikal zu Vorgesetzten bzw. zur Einsatzleitung sowie auch zur Infrastruktur und Ausstattung eine entscheidende Rolle. Als besonders vertrauensfördernd ist der Aufbau persönlicher Kontakte bzw. persönlicher Erfahrungen durch gemeinsame Übungen einzustufen.
- Der Umgang mit der Zivilbevölkerung ist bei den Einsatzkräften weitgehend eine Unbekannte und bereitet durchaus Unsicherheiten. Die Integration dieses Einsatzaspekts in Schulungen und Übungen kann dabei helfen, den Einsatzkräften diese Unsicherheiten im Einsatz zu nehmen. Dazu kann eine psychosoziale Schulung zählen, die den Umgang mit verunsicherten Personen behandelt, aber

auch die Bereitstellung von Empfehlungen zur Informationsweitergabe an die Zivilbevölkerung im persönlichen Austausch. Dadurch kann insbesondere auch das Verständnis der Einsatzkräfte als Multiplikatoren gestärkt werden.

### 5.3 WORKSHOP (AP 3)

Die Ergebnisse aus dem Workshop in AP 3 wurden in ausführlichen Tabellen zu Bedürfnissen von Einsatzkräften und möglichen Maßnahmen, um diese zu adressieren, zusammengefasst. Die Tabellen bildeten eine wichtige Grundlage für die Entwicklung von Empfehlungen in AP 4.

### 5.4 ABLEITUNG VON EMPFEHLUNGEN (AP 4)

Grundsätzlich gilt die primäre Empfehlung, Systeme zum Umgang mit psychosozialen Einsatzbelastungen in den beteiligten Organisationen des radiologischen Notfallschutzes aufzubauen respektive entlang der bestehenden PSNV-Konzepte weiter zu entwickeln. Dabei bestehen, wie in AP 1 gezeigt werden konnte, etablierte Grundlagen. Zusätzlich können Praxis-Erfahrungen genutzt werden. So zeigt sich beispielsweise, dass Peer-Support dann Wirkung zeigt, wenn diese auch regelmäßig beansprucht werden. Es ist daher denkbar, für Organisationen, die in einem ähnlichen Kontext agieren, ein organisationsübergreifendes System (beispielsweise für ein Peer-System) anzubieten.

Spezifisch wurden im Rahmen des Projekts folgende Empfehlungen in den Bereichen Ausbildung, Information und Kommunikation formuliert, um Einsatzkräfte mit Fokus „radiologischer Notfallschutz“ im Umgang mit psychosozialen Belastungen zu unterstützen. In der Folge sind beispielhaft einige der Empfehlungen aufgeführt. Bei der Strukturierung wurden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Die Empfehlungen unterteilen sich in Ausbildung, Information und Kommunikation von Einsatzkräften (EK) im radiologischen Notfallschutz.
- Die Ansatzpunkte der Empfehlungen orientieren sich an den drei Phasen der Psychosozialen Notfallversorgung PSNV (primär, sekundär, tertiär) und sind gekennzeichnet mit den Kürzeln «EV» (einsatzvorbereitend), «EB» (einsatzbegleitend), «EN» (einsatznachsendend).
- Wann immer dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) eine spezifische Rolle in der Umsetzung einer Empfehlung zukommt, ist diese gekennzeichnet mit dem Kürzel «BfS» und erläutert.

#### 5.4.1 Ausbildung: Schulungen und Übungen

Schulungen und Übungen sind verstärkt auf einsatzrelevante Handlungen zu fokussieren, um die empfundene Sicherheit darin zu erhöhen (EV, BfS).

- In einem ersten Schritt müssen konkrete Handlungen (z. B. Anziehen der Schutzausrüstung, Messen von Proben etc.) spezifisch für einzelne EK-Typen analysiert werden, bei denen mögliche Unsicherheiten bestehen.
- Auf dieser Basis können Schulungsangebote und Übungskonzepte (weiter) entwickelt werden, um eine gewisse Verschiebung von Grundlageninformationen zum Umgang mit Strahlung hin zu praxisrelevanten Handlungen zu ermöglichen.

*Rolle BfS:* Konzeptionelle Unterstützung bei der Überarbeitung der Schulungsangebote (Einbringen Fachwissen) und Übungen – ggf. auch in Kooperation, da das BfS nicht überall direkt involviert sein kann.

#### 5.4.2 Information

Gerade während des Einsatzes sind radiologische Informationen einfach und mit klaren radiologischen Bewertungen darzustellen, da die Aufnahmefähigkeit in Einsatzsituationen reduziert ist (EB, BfS).

- Es ist gerade im Einsatz zentral, dass wichtige radiologische Information klare Ja-Nein-Aussagen beinhalten und von EK verstanden werden. Information zur aktuellen radiologischen Gefährdung bzw. vor allem auch zu den unterschiedlichen Gefährdungsbereichen sollen daher durch einfache Aussage (beispielsweise mit Ampelsystem rot/gelb/grün) sichergestellt werden.
- Dies gilt ebenso für konkrete Aussagen zum Eigenschutz der EK. Dabei kann auch das Buddy-System

helfen, um sich gegenseitig zu kontrollieren.

- Informationen (bzw. Darstellung der Informationen) müssen auf ihre Verständlichkeit auch bei EK geprüft werden. Beispielsweise ließe sich das Informationsmaterial im Rahmen von Übungen evaluieren, in denen die EK bewerten, was sie wirklich verwenden und wie nützlich/verständlich sie es finden. Darauf aufbauend kann das Informationsmaterial weiterentwickelt werden.

*Rolle BfS:* Entwickeln bzw. Überprüfen der Informationsprodukte im Hinblick auf die Verständlichkeit durch EK.

### 5.4.3 Kommunikation

Eine niederschwellige Unterstützung im Umgang mit (psychischen) Belastungen ist während des Einsatzes sicherzustellen, um die Einsatzfähigkeit aufrechtzuerhalten und langfristigen Belastungen entgegenzuwirken (EB/EN, BfS).

- Für die Einsatzgruppen der einzelnen EK sind niederschwellige Ansprechpersonen zu definieren, die über die nötigen psychologischen Kenntnisse verfügen und im Falle von übermäßigen, schwierig zu bewältigenden Belastungen herangezogen werden können. Dabei ist es sinnvoll, z. B. im Sinne eines Peer-Systems, Vertrauenspersonen mit dieser Aufgabe zu betrauen, um die Hemmschwelle, Hilfe zu ersuchen, für die EK hinabzusetzen.
- Es braucht Konzepte für psychosoziale Fortbildungsmöglichkeiten von EK, um Peers auszubilden und ein Peer-System im Einsatz bzw. niederschwellige Nachsorge-Angebote zu etablieren. Ggf. ist auch ein Zusammenlegen von Peer-Systemen über die Organisationen und den spezifischen radiologischen Einsatz hinaus zu prüfen, um ausreichend Erfahrung sicherzustellen.
- Zudem braucht es daneben auch psychologische Fachkräfte, um bei schweren Belastungen zu unterstützen (siehe dazu Fachkonzepte PSNV).
- Weiter ist zu empfehlen, das Angebot der Einsatzbetreuung und -nachsorge nicht nur auf EK „an der Front“ zu beschränken, sondern auch auf Personen mit anderen, möglicherweise belastenden Arbeiten (wie beispielsweise Bürgertelefon) sowie auf Angehörige auszuweiten.

*Rolle BfS:* Gerade im BfS, das wenig allgemeine Erfahrungen mit Notfalleinsätzen hat, muss ein solches System intern geprüft und ggf. umgesetzt werden.

Bevor auf Grundlage der Empfehlungen konkrete Schritte im Thema unternommen werden, sind gewisse strategische Fragen zu klären. Bei welchen Zielgruppen (z. B. Einsatzorganisationen) möchte man welche Wirkung erzielen? Welche Ressourcen stehen zur Verfügung? Wo liegen die Prioritäten? Wer ist alles zu involvieren?

Auf Basis der entwickelten Grundlagen und unter Berücksichtigung obiger Empfehlungen können danach konkrete Maßnahmen entwickelt und umgesetzt werden. Die einzelnen Maßnahmen sind zuerst für spezifische Zielgruppen und Zielsetzungen zu testen und später kontinuierlich in Hinsicht auf Wirksamkeit zu evaluieren.

Viele der vorgeschlagenen Empfehlungen setzen Kooperationen zwischen Bundesämtern, Einsatzorganisationen, öffentlichen Diensten aber auch mit privatwirtschaftlichen Partnern oder der Zivilgesellschaft voraus. Die Umsetzung ist somit mit diesen zu koordinieren. Schließlich dient jede umgesetzte Maßnahme der einzelnen Einsatzkraft und den Teams als auch der Einsatzbereitschaft und somit dem gesamten Schutz der Bevölkerung und Umwelt.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Einsatzkräfte sind ein wichtiges Standbein des nuklearen Notfallmanagements. Um die Einsatzbereitschaft von Einsatzkräften im nuklearen Notfall nachhaltig sicher zu stellen und um die gesundheitlichen und psychosozialen Folgen des Einsatzes für die Einsatzkräfte und Einsatzhelfer so gering wie möglich zu halten, ist entsprechende Vorbereitung und Begleitung in Form von Information und Kommunikationsmöglichkeiten erforderlich. Einsatzkräfte dienen nicht nur der Bewältigung des radiologischen Er-

eignisses, sondern sie sind auch wichtige Stützen und Multiplikatoren für die Gesellschaft - sowohl durch Informationsweitergabe als auch durch ihr eigenes Verhalten.

Das Projekt bietet gute Ansatzpunkte dafür, wie die Aus- und Fortbildung als Vorbereitung von Einsatzkräften auf einen radiologischen Notfall verbessert werden kann, aber auch dafür, was während eines Notfalls getan werden kann, um Einsatzkräften mit verschiedenen Einsatzaufgaben die notwendige Unterstützung zu geben, die sie benötigen, um keine zu große Verunsicherung durch die radiologische Ausnahmesituation zu erleben.

Die Ergebnisse des FV fließen in die Planungen des Notfallmanagements ein. Die Ergebnisse des FV tragen dazu bei, den Schutz von Einsatzkräften (siehe auch § 114 „Schutz der Einsatzkräfte“, StrlSchG) sicherzustellen und liefern damit einen Beitrag zum Schutz der Bevölkerung in radiologischen Notfallsituationen.



## **2.7 Themenbereich 07**

**Vorhaben mit allgemeiner Bedeutung für den Strahlenschutz**

## **2.7 *Subject area 07***

***Projects of general importance to radiation protection***

**Thema**

Weiterentwicklung des atmosphärischen Ausbreitungsmodells ARTM bezüglich weiterer Anwendungsbereiche, Windfeld- und Grenzschichtmodell, Dokumentation

**Subject**

*Enhancement of the atmospheric dispersion model ARTM considering additional areas of application, wind field and boundary layer models, and documentation*

**Kennzeichen**

3616S72575

**Beginn**

01.12.2016

**Ende**

30.09.2019

**Fördermittel**

EUR 318.437,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln

**Projektleitung**

Dr. C. Richter

**Fachbetreuung BfS**

Dr. M. Pattantyús-Ábrahám / UR 3

**verantwortlich für den Text**

Dr. C. Richter,  
Dr. M. Pattantyús-Ábrahám

## 1. ZIELSETZUNG

Die EU BSS<sup>1)</sup> (Richtlinie 2013/59/EURATOM) fordert in Kapitel VIII „Expositionen der Bevölkerung“ unter anderem, dass die Mitgliedstaaten die Tätigkeiten bestimmen sollen, für die eine realistische Ermittlung der Dosen für Einzelpersonen durchgeführt werden muss. Ableitungsgenehmigungen haben demnach auf der Grundlage international anerkannter wissenschaftlicher Empfehlungen zu erfolgen.

Für eine Ermittlung der Dosen für Einzelpersonen und/oder allgemeinen Untersuchungen zum Nachweis der Grenzwerteinhaltung sind Ausbreitungsrechnungen nötig, da die Radionuklidkonzentrationen in der Luft oder am Boden in der Umgebung von Anlagen, die eine Ableitungsgenehmigung haben, meist unter den Nachweisgrenzen von entsprechenden Messgeräten liegen bzw. im Rahmen von Genehmigungsverfahren noch gar keine Ableitungen stattfinden. Um eine, wie in den EU BSS geforderte, realistische Ermittlung der Dosen zu gewährleisten, sollte also auch die Ausbreitungsrechnung möglichst realitätsnah sein. Auch wenn es keine international harmonisierte (wissenschaftlich/technische) Empfehlung für die Ausbreitungsrechnung im Rahmen von behördlichen Aufsichts- und Genehmigungsaufgaben gibt, sollte zumindest national ein einheitlicher Stand von Wissenschaft und Technik (W&T) angestrebt werden, was momentan noch nicht der Fall ist.

Bei der Ausbreitungsrechnung für konventionelle Luftschadstoffe schreibt die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) schon seit 2002 die Verwendung eines Lagrange'schen Partikelmodells nach VDI<sup>2)</sup>- Richtlinie 3945 Blatt 3 vor, das nach wie vor dem gegenwärtigen Stand von W&T entspricht. Demgegenüber fand bei der atmosphärischen Ausbreitung von Radionukliden in der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung (AVV) bis Juni 2020 und nach wie vor in den Störfallberechnungsgrundlagen (SBG) noch das Gauß-Fahnenmodell Anwendung. Mit Inkrafttreten der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten (AVV Tätigkeiten) ist bei Ableitungen mit der Luft für die prospektive und retrospektive Ermittlung der Strahlenexposition für die atmosphärische Ausbreitungsrechnung die Verwendung eines Lagrange'sches Partikelmodells vorgeschrieben.

Im Rahmen von bisher drei Eigenforschungsvorhaben wurde auf Basis des Referenzprogramms AUSTAL2000 für die Ausbreitungsrechnung nach TA Luft das atmosphärische Radionuklid-Transport-Modell ARTM entwickelt, weiterentwickelt und in zahlreichen Aspekten verifiziert und validiert. Seit der ersten Implementierung von ARTM bzw. AUSTAL2000 hat sich der Stand von W&T weiterentwickelt. Beispielsweise wird die TA Luft überarbeitet und die VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8, auf deren Vorgaben die Berechnung der Wind- und Turbulenzprofile von ARTM basiert, hat 2017 eine Aktualisierung erfah-

<sup>1)</sup> Basic Safety Standards

<sup>2)</sup> Verein Deutscher Ingenieure

ren. Um weiterhin zu ermöglichen, dass die Ausbreitungsrechnung für Radionuklide dem Stand von W&T entsprechend und den Vorgaben der AVV Tätigkeiten folgend durchgeführt werden kann, war daher eine Aktualisierung von ARTM unabdingbar und stellte ein Hauptziel dieses Vorhabens dar.

Neben den durch die Überarbeitung der Vorschriften und Richtlinien notwendigen Anpassungen des Programms ergab sich auch aus den Ergebnissen des Vorläufervorhabens weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf. So wurde durch die Validierungsbestrebungen deutlich, dass der in AUSTAL2000 und ARTM bisher ausschließlich praktizierte Modellierungsansatz für die Grenzschicht über standardisierte Wind- und Turbulenzprofile für die Betrachtung kürzerer Zeiträume als Jahresmittelwerte zu wenig realitätsnahen Ausbreitungsrandbedingungen führen kann. Zudem unterliegt das in AUSTAL2000 und ARTM verwendete diagnostische Windfeldmodell zusammen mit dem Modellierungskonzept der Vorberechnung einer Wind- und Turbulenzfeldbibliothek diversen Beschränkungen, wodurch ARTM in seiner Anwendbarkeit deutlich eingeschränkt wird. Ein weiteres Hauptziel des Vorhabens bestand darin, diese Beschränkungen durch die Implementierung einer geeigneten Schnittstelle zu einem fortschrittlicheren prognostischen Windfeldmodell zu beseitigen. Zudem sollte eine weitere neue Schnittstelle ermöglichen, komplette (gemessene, zeitabhängige) Grenzschichtprofile zu verwenden, wodurch lokale Gegebenheiten und Besonderheiten (weltweit) besser im Modell abgebildet werden können. Dadurch kann ARTM auch unabhängig von den Standardprofilen der VDI 3783 Blatt 8, die für Deutschland optimiert sind, betrieben werden.

Für die Analyse von Einzelsituationen sollte darüber hinaus die Möglichkeit einer zeitlich aufgelösten Ausgabe der Ergebnisdateien fest in ARTM implementiert werden.

Der intensive (Erfahrungs-)Austausch mit Fachkollegen und Anwendern auf zwei Workshops und die Recherche des sich weiter entwickelnden Standes von W&T waren übergeordnete Ziele dieses Forschungsvorhabens.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Ziele des Vorhabens waren die Einbindung eines verbesserten realitätsnahen Wind- und Turbulenzfeldmodells in ARTM und die Anpassung des Grenzschichtmodells. Darüber hinaus waren Verbesserungen in der Programmtechnik, unter anderem die teilweise Parallelisierung des Programmcodes zur Reduzierung der Rechenzeit, geplant. Außerdem beinhaltete der Projektumfang Workshops mit den Anwendern von ARTM.

Das Arbeitsprogramm gliederte sich in 6 Arbeitspakete. Die Einzelzielsetzungen dieser Arbeitspakete werden im Folgenden genauer beschrieben.

### 2.1 AUFARBEITUNG DES FÜR DAS VORHABEN RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK (AP 1)

Der für die Bearbeitung des Vorhabens relevante Stand von Wissenschaft und Technik wurde systematisch aufbereitet und um die im Projekt gewonnenen Ergebnisse, Erfahrungen und Entwicklungen ergänzt.

### 2.2 EINBINDUNG EINES PROGNOTISCHEN WINDFELD- UND TURBULENZFELDMODELLS IN ARTM UND KONZEPTE ZUR REDUZIERUNG VON PROGRAMMABBRÜCHEN (AP 2)

Das Ziel des AP 2 war die Auswahl und die programmtechnische Einbindung (ggf. über Schnittstelle) eines zusätzlichen prognostischen Windfeld- und Turbulenzfeldmodells in ARTM, welches eine realitätsnähere Simulation des Windfeldes und der Turbulenz im Vergleich zum aktuell verwendeten diagnostischen Modell TALdia ermöglicht. Dazu wurden mehrere prognostische Modelle untersucht. Als am besten geeignetes Modell stellte sich MISKAM<sup>1)</sup> heraus. Die Schnittstellen zwischen MISKAM und ARTM wurden implementiert. Durch die Möglichkeit, auf ein prognostisches Windfeldmodell zurückgreifen zu können, können Programmabbrüche, die durch das bisher ausschließlich verwendbare diagnostische Windfeldmodell bedingt sind, umgangen werden.

<sup>1)</sup> Mikroskaliges Klima- und Ausbreitungsmodell

### 2.3 GRENZSCHICHTMODELL (AP 3)

Die Änderungen der im Jahr 2017 aktualisierten VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8 sowie die geplanten Änderungen der TA Luft wurden analysiert und gegebenenfalls notwendige Anpassungen im Grenzschichtmodell von ARTM und TALdia implementiert. Zudem wurde eine neue Schnittstelle implementiert, um gemessene Zeitreihen von Grenzschichtprofilen (nicht nur wie bisher Zeitreihen an einem einzigen Punkt im Simulationsgebiet) als meteorologische Randbedingung für die Ausbreitungsrechnung verwenden zu können.

### 2.4 WELTWEITE NUTZUNG VON ARTM (AP 4)

Um ARTM für Ausbreitungsrechnungen weltweit nutzen zu können, wurde eine Anpassung des Grenzschichtmodells an lokale Gegebenheiten ermöglicht. Eine an die lokalen Verhältnisse angepasste Berücksichtigung von Vegetationsperioden wurde ebenfalls im Ausbreitungsmodell eingebaut.

### 2.5 TECHNISCHE PROGRAMMVERBESSERUNGEN, ROBUSTHEIT (AP 5)

In diesem Arbeitspaket waren zahlreiche Arbeiten zur Programmverbesserung zusammengefasst, z. B. die Überarbeitung der Fehlerausgaben, die Bedienfreundlichkeit für die Erstellung von Emissionszeitreihen, die Berücksichtigung einer vorgegebenen Mischungsschichthöhe, das automatische Durchführen von Ensemblerechnungen, die Parallelisierung von TALdia und die Ausgabe von zeitabhängigen Konzentrationsfeldern. Zudem wurden die verschiedenen Programmdokumentationen aktualisiert und erweitert sowie zu einem Handbuch zusammengefasst.

### 2.6 WORKSHOPS (AP 6)

Dem Austausch zwischen Anwendern und Entwicklung diente das sechste Arbeitspaket zur Durchführung von ARTM-Workshops zusammen mit der Fachbetreuung.

## 3. METHODIK

Die angewendeten Methodiken richteten sich nach den Zielen der einzelnen Arbeitspakete. Um den für das Vorhaben relevanten aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu recherchieren, wurde Literaturrecherche betrieben sowie der direkte Kontakt zu Fachkollegen und die Teilnahme an Fachkonferenzen zum Erfahrungsaustausch genutzt. Zahlreiche Projektgespräche dienten der Abstimmung der Arbeitsschritte mit der Fachbetreuung.

Das Programm ARTM selbst ist in der Programmiersprache C implementiert. Es wird der Intel C Compiler und die Entwicklungsumgebung Visual Studio verwendet. Die graphische Benutzeroberfläche GO-ARTM ist in der Programmiersprache Delphi implementiert. Als Entwicklungsumgebung wird Embarcadero RAD Studio verwendet. Die im Rahmen des Vorhabens neu entwickelten Zusatzprogramme wurden ebenfalls in Delphi entwickelt.

Für die Versionskontrolle bei der Entwicklung wird ein GIT Repository gepflegt.

Zur Programmentwicklung und Implementierung gehörten jeweils Programmtests sowie die Dokumentation der Änderungen in einer History-Datei und im Programmhandbuch. Diese Test- und Dokumentationsschritte sind im folgenden Abschnitt bei den AP 2 bis AP 5 nicht mehr explizit erwähnt.

Für den Workshop und die Schulung wurden zahlreiche Vorträge erstellt und diese präsentiert.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Die Durchführung richtete sich nach der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Methodik.

Im AP 1 wurde demnach hauptsächlich Literaturrecherche betrieben und die Konferenzen HARMO<sup>1)</sup> 18 und HARMO 19 besucht. Insgesamt 3 Projektgespräche, davon eins als Videokonferenz, wurden durchgeführt.

---

<sup>1)</sup> Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes

Für die Einbindung eines prognostischen Windfeldmodells im Rahmen des AP 2 wurden zunächst verschiedene prognostische Windfeldmodelle verglichen und auf ihre Eignung hin untersucht, ob sie sich mit vertretbarem Aufwand mit ARTM koppeln lassen. In Abstimmung mit der Fachbetreuung wurde das prognostische Windfeldmodell MISKAM ausgewählt. Die Schnittstelle in ARTM wurde implementiert und Pre- und Postprozessingschritte für die Steuerung bzw. Verarbeitung der In- und Outputdaten des prognostischen Windfeldmodells erstellt.

Für die Überarbeitung des Grenzschichtmodells wurde die Arbeit des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) zu relevanten VDI-Richtlinien, die Überarbeitung der TA Luft und die Entwicklung der AVV Tätigkeiten verfolgt. Die im Jahr 2017 aktualisierte Version der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8 wurde in ARTM als zusätzlich verfügbares Grenzschichtmodell implementiert, sich abzeichnende Änderungen in der TA Luft wurden ebenfalls vorbereitend (optional verwendbar) in das Programm implementiert, die Vorgaben der AVV Tätigkeiten wurden als neue Standard-Einstellung für ARTM-Läufe umgesetzt. Das Datenformat für eine Grenzschichtprofil-Zeitreihe Datei wurde festgelegt und eine neue Schnittstelle in ARTM eingebaut.

Im Rahmen des AP 4 wurde das Hilfsprogramm METIMEX.exe entwickelt, das einen einfachen Im- und Export der meteorologischen Eingabedaten in das MS Excel© Format ermöglicht. Die meteorologischen Zeitreihen lassen sich damit leichter editieren und insbesondere zeitabhängige sonstige Simulationsrandbedingungen nutzerfreundlich vorgeben.

Zudem wurden in ARTM zwei neue Eingabeparameter eingeführt, durch die der Start und das Ende der Vegetationsperiode vorgegeben werden können. Eine separate Simulation der Vegetationsperiode wird damit überflüssig, da die für eine anschließende Dosisberechnung benötigten Simulationsergebnisse für die Vegetationsperiode direkt aus der Ganzjahressimulation extrahiert werden können.

Zur Anpassung des Grenzschichtmodells an lokale Gegebenheiten kann die im AP 3 etablierte Schnittstelle für eine Grenzschichtprofil-Zeitreihe-Datei verwendet werden.

Das AP 5 umfasste die Parallelisierung des diagnostischen Windfeldmodells TALdia und verschiedene Verbesserungen und Weiterentwicklungen des Ausbreitungsprogramms ARTM. Die ursprüngliche Planung zur Parallelisierung des diagnostischen Windfeldmodells TALdia sah die Verwendung von OpenMP vor. Eine Analyse dieser Vorgehensweise im Vergleich zu einer Umsetzung über eine äußere (Präprozessing) Hilfsfunktion bei vergleichbarem Nutzen (bis nahezu 6fach schnellere Berechnung der Windfeldbibliothek) führte dazu, dass abweichend von der ursprünglichen Planung keine programminterne Parallelisierung mittels OpenMP umgesetzt wurde, sondern mittels einer Erweiterung in der Benutzeroberfläche GO-ARTM.exe ein automatisiertes verteiltes Rechnen sowohl von TALdia als auch von ARTM ermöglicht wird.

Bei der Verbesserung der Fehlerangaben wurde zusätzlich zu Präzisionen im ARTM-Quellcode das Hilfsprogramm PR\_CHECK.exe erstellt, das es erlaubt, vor dem Start einer Ausbreitungsrechnung sämtliche Eingabedateien zu überprüfen.

Für eine automatisierte Durchführung von Ensemblerechnungen wurde das Hilfsprogramm VARM.exe entwickelt.

Für die nachträgliche Berechnung von Zeitreihen an Monitorpunkten wurde in ARTM eine neue NONSTANDARD-Option ETS für die zeitlich aufgelöste Ausgabe der dreidimensionalen Konzentrations- und zweidimensionalen Depositions-Ergebnisfelder implementiert, auf deren Grundlage Zeitreihen für beliebige Punkte im Simulationsgebiet nachträglich erstellt werden können.

Das Einlesen der Mischungsschichthöhe und deren Verwendung in den Simulationsrechnungen wurden ermöglicht.

Die bisherigen Dokumente „ARTM Modellbeschreibung“ und „ARTM Programmbeschreibung“ wurden aktualisiert und in ein einziges Dokument „ARTM Handbuch“ zusammengeführt.

Im Rahmen des AP 6 waren zwei eintägige Informationsveranstaltungen für Anwender des Programms geplant. In Absprache mit der Fachbetreuung wurde statt der zwei eintägigen Veranstaltungen ein anderthalbtägiger Workshop zusammen mit einer eintägigen Schulung für neue Anwender von ARTM am Vortag beim BfS in Neuherrberg durchgeführt.

## 5. ERGEBNISSE

Im Rahmen des AP 1 wurde der Stand von W&T zusammengetragen und in einem Bericht zu AP 1 dokumentiert. Insbesondere wurden dabei die geplanten Änderungen der TA Luft sowie die Neuerungen innerhalb der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8 erläutert. Dazu gehörte auch, die Auswirkungen dieser Änderungen auf das Ausbreitungsmodell ARTM zu erläutern. Zudem wurden die relevanten Erkenntnisse aus den Konferenzbesuchen HARMO 18 und HARMO 19 im AP 1 Abschlussbericht zusammengestellt.

Als Ergebnis der Arbeitspakete 2 bis 5 wurden neue Programmversionen von ARTM.exe und TALdia.exe erstellt, die, wie in Abschnitt 4 beschrieben, zahlreiche neue Funktionalitäten, Weiterentwicklungen und Verbesserungen für den Programmablauf beinhalten. Die neue ARTM-Programmversion stellt den aktuellen Stand von W&T dar.

Zudem wurden die Zusatzprogramme METIMEX.exe, PR\_CHECK.exe und VARM.exe entwickelt und die Benutzeroberfläche GO-ARTM.exe zur Ansteuerung verteilter Rechnungen erweitert.

Für jedes der vier Arbeitspakete 2 bis 5 wurde neben der Dokumentation der Anpassungen und Änderungen im programmeigenen Handbuch und der History-Datei ein separater Abschlussbericht erstellt. Abschließend wurden die Abschlussberichte der einzelnen Arbeitspakete in einen Gesamt-Abschlussbericht zusammengefasst.

Ein ARTM-Workshop mit rund 40 und eine Schulung mit rund 20 Teilnehmerinnen und Teilnehmern wurden zusammen mit der Fachbetreuung vom 21.-23.11.2018 beim BfS in Neuherberg durchgeführt. Die Schulungs- und Vortragsunterlagen wurden den Teilnehmerinnen und Teilnehmern zur Verfügung gestellt.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Die AVV Tätigkeiten schreibt für die atmosphärische Ausbreitungsrechnung von Radionukliden die Verwendung eines Lagrange-Partikelmodells vor. Das Forschungsvorhaben diente dazu, ARTM auf den Stand der Wissenschaft und Technik zu bringen. Des Weiteren war der wichtigste Aspekt, das Programm zu einem geeigneten Tool für die Umsetzung der AVV Tätigkeiten weiterzuentwickeln. Diese Ziele wurden mit der ARTM Version 3.0.0 erreicht:

- Das Grenzschichtmodell im ARTM entspricht den diesbezüglichen Vorgaben der VDI Richtlinie 3783 Blatt 8 und damit auch den Vorgaben der AVV Tätigkeiten.
- Die in der AVV Tätigkeiten festgelegten Parameter sind ins ARTM eingebaut.
- Eine Schnittstelle zu einem prognostischen Windfeldmodell (MISKAM) wurde implementiert.
- Die Parallelisierung führt dazu, dass die Berechnungen 3fach schneller geworden sind.
- Die Mitberechnung der atmosphärischen Ausbreitung von Radionukliden während der Vegetationsperiode macht zusätzliche Simulationen der Vegetationsperiode überflüssig, wenn Jahresrechnungen durchgeführt werden.
- Programmrobustheit und Nutzerfreundlichkeit wurde verbessert.

Diese Ergebnisse dienen dazu, dass ARTM für die Berechnung der Expositionen der Einzelpersonen (Fortluft) in der Nähe von kerntechnischen Anlagen ein geeignetes Tool ist, das auch von Dritten verwendet werden könnte. Die Bereitstellung eines solchen Modells an Dritte wurde von BMU bei der Veröffentlichung der AVV Tätigkeiten versprochen.

ARTM wurde mit mehreren wichtigen Funktionalitäten erweitert. Die Angabe von Grenzschichtprofilen erlaubt eine realitätsnähere Ausbreitungsrechnung. Die zeitaufgelöste Ergebnisausgabe ermöglicht die detaillierten Untersuchungen auf kürzerer Zeitskala. Diese Funktionen sind bei z. B. Validierungsarbeiten oder Modellvergleichsexperimenten unerlässlich.

Die neue ARTM-Version (3.0.0) wird auch für die durch BfS betreute Doktorarbeit intensiv verwendet.

## **Offene Forschungsfragen**

Im Gegensatz zur Berechnung der Exposition der Bevölkerung schreibt die Störfallberechnungsgrundlage (SBG) nach wie vor die Nutzung eines Gauß-Fahnenmodells vor. ARTM könnte zurzeit die Voraussetzungen der SBG nicht erfüllen, da es für Langzeitausbreitungsrechnungen konzipiert ist. Zeitgemäß wäre, wenn die SBG, die Berechnungen - wie bei Langzeitausbreitungsrechnungen sowie Kurzeitausbreitungsrechnungen für konventionelle Stoffe - auch die Nutzung eines Lagrange-Partikelmodells vorschriebe. Dazu müsste aber auch ein Tool zur Verfügung gestellt werden; ARTM sollte mit kleineren Zeitschritten als einer Stunde arbeiten können.

In ARTM werden die Niederschlags- und Bodenbeschaffenheitsdaten für das ganze Berechnungsgebiet als ein konstanter Wert angegeben. Ein weiterer Schritt zur realitätsnäheren Berechnung wäre, die unterschiedlichen Bodenbeschaffenheiten sowie die räumliche Verteilung der Niederschlagsintensitätswerte zu berücksichtigen.

<b>Thema</b>			
Überarbeitung von technischen Strahlenschutznormen aus dem Bereich des Normenausschusses Materialprüfung (NMP) bzw. aus dem K967 des DKE			
<b>Subject</b>			
<i>Revision of technical radiation protection standards in the range of the Materials Testing Standards Committee (NMP) and from the working group K967 of the German Commission on Electrical Engineering</i>			
<b>Kennzeichen</b> 3617S72381	<b>Beginn</b> 01.11.2017	<b>Ende</b> 31.12.2020	<b>Fördermittel</b> EUR 173.605,-
<b>Forschungs- / Auftragnehmer</b> DIN Deutsches Institut e.V., Berlin			
<b>Projektleitung</b> V. Seibicke	<b>Fachbetreuung BfS</b> U. Häusler / MB 6	<b>verantwortlich für den Text</b> M. Treige	

## 1. ZIELSETZUNG

Ziel dieses Vorhabens war die Überarbeitung sowie Anpassung mehrerer Normen an den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Im Rahmen dieses Vorhabens sollten die folgenden Normen den geltenden Rechtsvorschriften und dem Stand von Wissenschaft und Technik angepasst werden:

- DIN 25422: 2013-06  
Aufbewahrung und Lagerung radioaktiver Stoffe - Anforderungen an Aufbewahrungseinrichtungen und deren Aufstellungsräume zum Strahlen-, Brand- und Diebstahlschutz
- Normen der Reihe DIN 25425  
Radionuklidlaboratorien (4 Teile, 3 Beiblätter)
- Normen der Reihe DIN 54115  
Zerstörungsfreie Prüfung - Strahlenschutzregeln für die technische Anwendung umschlossener radioaktiver Stoffe (6 Teile, 1 Beiblatt)

Zudem sollte die frühzeitige und direkte Mitwirkung von deutschen Experten bei der internationalen Normung im Bereich „Strahlenschutz“ sichergestellt werden.

## 3. METHODIK

Die zu prüfenden Normen wurden existierenden Arbeitsausschüssen des DIN-Normenausschusses Materialprüfung (NMP) zugeordnet. Die Mitarbeiter der Arbeitsausschüsse überprüfen unter der Leitung des DIN-Bearbeiters die Normtexte hinsichtlich Stand von Wissenschaft und Technik und fassen entsprechende Beschlüsse zur Norm (Überarbeitung, Zurückziehung, Bestätigung). Im Fall der Überarbeitung werden vom jeweiligen Arbeitsausschuss Manuskripte erstellt, die vom Ausschuss nach ausführlicher Diskussion zur Veröffentlichung als Norm-Entwurf verabschiedet werden.

Die jeweiligen Norm-Entwürfe werden mit einer Einspruchsfrist von 2 Monaten veröffentlicht. Die in dieser Zeit eingegangenen Stellungnahmen werden in den Arbeitsausschüssen mit den Einsprechern diskutiert, danach werden im Konsensverfahren überarbeitete Manuskripte erstellt. Diese werden nach Verabschiedung durch den zuständigen Arbeitsausschuss bei DIN eingereicht und als Norm veröffentlicht.

Um die Mitarbeit von deutschen Experten in internationalen Normungsgremien (IEC, ISO) und den entsprechenden Arbeitsausschüssen sicherzustellen, werden von DIN e. V. die dazu erforderlichen Spiegelgremien eingerichtet, in denen die Dokumente der ISO/IEC verteilt, entsprechende Stellungnahmen erarbeitet und an ISO/IEC weitergeleitet werden.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Das Vorhaben wurde in folgenden Schritten durchgeführt:

- Die Normen wurden den folgenden Arbeitsausschüssen zugeordnet:
  - DIN 25422  
NA<sup>1)</sup> 062-07-62 AA<sup>2)</sup> "Strahlenschutzvorrichtungen"
  - Normen der Reihe DIN 25425  
NA 062-07-63 AA "Radionuklidlaboratorien"
  - Normen der Reihe DIN 54115  
NA 062-07-47 AA "Zerstörungsfreie Prüfung in der Kerntechnik"
- Die Arbeitsausschusssitzungen wurden durchgeführt (bis zu 4 Termine pro Jahr) und die vergebenen Aufgaben nachverfolgt. Je nach Beschluss wurden Vorlagen für die Überarbeitung erstellt und dann als Manuskript zum Norm-Entwurf verabschiedet. In der Geschäftsstelle erfolgte dann die Drucklegung der Texte und Veröffentlichung als Norm-Entwurf.
- Nach Ablauf der Einspruchsfrist wurde die Einspruchsverhandlung durchgeführt. Nach Behandlung aller Einsprüche wurde eine Vorlage zur Norm erstellt und als Manuskript zum Druck als Norm verabschiedet. In der Geschäftsstelle erfolgte die Schlussbearbeitung und Drucklegung bzw. Veröffentlichung als Norm.
- Auf den Sitzungen der Arbeitsausschüsse wurden die internationalen Themen besprochen und in die Normüberarbeitung mit einbezogen.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 ZU DIN 25422 "AUFBEWAHRUNG UND LAGERUNG RADIOAKTIVER STOFFE - ANFORDERUNGEN AN AUFBEWAHRUNGSEINRICHTUNGEN UND DEREN AUFSTELLUNGSRÄUME ZUM STRAHLEN-, BRAND- UND DIEBSTAHLSCHUTZ"

Der Arbeitsausschuss hatte auf seiner Sitzung Ende des Jahres 2018 beschlossen, die Überarbeitung der Norm wieder aufzunehmen, sobald den Beteiligten Zugriff auf die SEWD<sup>3)</sup>-Richtlinie gegeben ist. Nach Klärung mit dem BMU bekamen im Januar 2019 alle relevanten Mitarbeiter Einsichtsrechte, so dass die Überarbeitung von DIN 25422 dann zeitnah aufgenommen werden konnte. Es wurden dazu mehrere Arbeitsgruppen (AG)-Treffen durchgeführt. Die endgültige Verabschiedung zum Entwurf wurde auf der Sitzung am 07.11.2019 beschlossen. Das Manuskript wurde entsprechend aufbereitet und wegen der Brisanz des Themas noch einmal zur abschließenden Kontrolle im Arbeitsausschuss verteilt. Danach wurde das Manuskript zum Druck als Entwurf eingereicht. Der Entwurf erschien mit Ausgabe 2020-05. Es gab fast 200 Einsprüche. Diese wurden in 2 Treffen der AG DIN 25422 vorbewertet. Das Ergebnis der Bewertung wurde an die Einsprecher verteilt. Es mussten trotz der Vorbereitung zwei 1-tägige Einspruchsverhandlungen durchgeführt werden. Das abschließende Manuskript wurde erstellt und auf der Sitzung am 01.12.2020 endgültig für die Veröffentlichung als Norm freigegeben. Das Manuskript wurde fertiggestellt und zum Druck eingereicht. Die Arbeiten sind somit abgeschlossen. Die Norm wird mit Ausgabe März 2021 erscheinen.

---

<sup>1)</sup> Normenausschuss

<sup>2)</sup> Arbeitsausschuss

<sup>3)</sup> Richtlinie für den Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter

## 5.2 ZU DER NORMENREIHE DIN 25425 "RADIONUKLIDLABORATORIEN"

Der Arbeitsausschuss traf sich zu seiner ersten Sitzung zu diesem Thema am 01.03.2018. Auf dieser Sitzung wurde das weitere Vorgehen zur Überarbeitung der Normen (Zeitplan, Projektpaten, zu erledigende Aufgaben der Experten und der Geschäftsstelle) festgelegt.

Zur Überarbeitung von DIN 25425-3 und DIN 25425-4 wurden mehrere Webkonferenzen der Arbeitsgruppe durchgeführt. Auf der Sitzung am 18.10.2018 wurden beide Manuskripte fertiggestellt, so dass nach Rücksprachen mit den Obleuten und Projektpaten die Umfrage zur Freigabe zur Veröffentlichung als Entwurf durch den Arbeitsausschuss gestartet werden konnte. Die Umfrage endete am 02.01.2019. Die Rückmeldungen der Experten wurden eingearbeitet und die Manuskripte zur Veröffentlichung eingereicht. Die Entwürfe sind mit Ausgabe März 2019 erschienen. Die Einspruchsfristen endeten Mitte April bzw. Anfang Mai 2019. Auf der Ausschusssitzung am 16.07.2019 wurden die Einspruchsverhandlungen durchgeführt und die Manuskripte zur Norm verabschiedet. Die fertigen Manuskripte wurden zum Druck eingereicht. Die Veröffentlichung erfolgte wie geplant mit Ausgabe Dezember 2019. Die Überarbeitung für die Teile 3 und 4 ist damit abgeschlossen.

Die Überarbeitung von DIN 25425-1 wurde am 18.10.2018 begonnen. Es wurde eine Arbeitsgruppe bestimmt. In mehreren Sitzungen hat die Arbeitsgruppe ein Manuskript für den Norm-Entwurf entwickelt, das per Umfrage im Ausschuss zur Freigabe zum Entwurf freigegeben wurde. Das Manuskript musste auf Grund der Rückfragen noch einmal angepasst werden und wurde dann zum Druck als Entwurf eingereicht. Der Entwurf erschien am 24.04.2020. Auf Grund der vielen Einsprüche (etwa 180) war es nicht möglich, die Einspruchsverhandlung auf einer Sitzung durchzuführen. Daher wurde am 12.08.2020 eine zweite Einspruchsverhandlung durchgeführt. Das abschließende Manuskript wurde auf der Sitzung am 17.11.2020 vom Ausschuss zur Veröffentlichung als Norm freigegeben. Das Manuskript wurde fertiggestellt und zum Druck eingereicht. Die Arbeiten sind somit abgeschlossen. Die Norm wird mit Ausgabe März 2021 erscheinen.

Für die Überarbeitung von DIN 25425-4 Beiblatt 2 wurde eine AG gegründet, die ein entsprechendes Manuskript erstellt hat, das auf der Sitzung am 17.11.2020 zur Veröffentlichung freigegeben wurde. Das Beiblatt wird ohne Entwurf veröffentlicht. Das abschließende Manuskript wird aufbereitet und dann zur Veröffentlichung eingereicht.

Für DIN 25425-5 sind weiterhin keine inhaltlichen Änderungen erforderlich. Dieser Teil wurde bestätigt.

## 5.3 ZU DEN NORMEN DER REIHE DIN 54115 "ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG - STRAHLENSCHUTZ-REGELN FÜR DIE TECHNISCHE ANWENDUNG UMSCHLOSSENER RADIOAKTIVER STOFFE"

Der Arbeitsausschuss hatte die Überarbeitung der Normenreihe beschlossen und dabei folgendes Vorgehen vereinbart:

- Der Arbeitsausschuss beschließt die beiden Normenteile 1 und 3 zu DIN 54115 Teil 1 zusammenzufassen.
- Der Arbeitsausschuss beschließt das Beiblatt 1 zu DIN 54115-1 zurückzuziehen und die Informationen als Anhang in den Teil 5 zu DIN 54115 aufzunehmen.
- Der Arbeitsausschuss beschließt ein Normungsvorhaben zu DIN 54115 Teile 1, 4, 5 und 6 zu starten.
- Der Arbeitsausschuss schlägt dem NA 062-07-62 AA vor, die Inhalte von DIN 54115-7 mit in die DIN 25422 aufzunehmen.

Für DIN 54115-1 und DIN 54115-3 wurde die Überarbeitung beschlossen. Der Teil 3 wurde in den Teil 1 integriert. Die neue DIN 54115-1 erschien als Entwurf mit Ausgabe 2019-12. Die Einspruchsfrist endete am 08.01.2020. Die Einsprüche wurden auf der Sitzung am 17.02.2020 besprochen und das Manuskript zur Norm verabschiedet. Die Veröffentlichung als Norm ist im Juni 2020 erfolgt. Die Arbeiten sind damit abgeschlossen.

Die Sichtung von DIN 54115-4 ergab eine große Übereinstimmung mit ISO 3999, daher wurde diskutiert, ob nicht eine Übernahme der ISO-Norm mit Modifizierungen der bessere Weg sei. ISO 3999 fällt aber in den Zuständigkeitsbereich der DKE<sup>1)</sup> und der entsprechende Ausschuss, der über eine Übertra-

gung der Zuständigkeit auf den NMP<sup>1)</sup> entscheiden konnte, tagte im Mai 2019. Nachdem die DKE die Trägerschaft von ISO 3999 an den NMP übertragen hat, konnte die ISO-Norm übersetzt werden und als Ersatz für Teil 4 zu DIN 54115 als Norm-Entwurf vorbereitet werden. Es wurde versucht mit der BAM<sup>2)</sup> eine Klärung herbeizuführen, inwieweit eine Übernahme der ISO-Norm Auswirkungen auf die Zuständigkeit der BAM hat. Parallel dazu wurde das BMU befragt, ob eine Durchführung der Prüfung durch die BAM laut Norm gewünscht ist. Da keine zeitnahe Lösung gefunden werden konnte, hat der Ausschuss beschlossen, das Manuskript mit einer offenen Formulierung an dieser Stelle als Entwurf zu verabschieden, wobei eine Änderung nach Einspruch möglich wäre. Der Entwurf erschien mit Ausgabe August 2020. Die Einspruchsberatung fand am 23.09.2020 statt, bei der alle Kommentare abschließend beraten wurden. Nach der Freigabe durch den Ausschuss und anschließend durch den Obmann wurde das Manuskript zum Druck als Norm eingereicht. Die Arbeiten sind damit abgeschlossen. Die Veröffentlichung erfolgt mit Ausgabe März 2021.

Der Arbeitsausschuss hat auf seiner letzten Sitzung festgestellt, dass die Überarbeitung von Teil 5 zwar technisch notwendig ist, allerdings auf Grund fehlender Zuarbeit nicht möglich ist. Da der Teil 5 der Normenreihe technisch veraltet ist und nicht überarbeitet werden konnte, sollte Teil 5 ohne Ersatz zurückgezogen werden. Die Ankündigung zur Zurückziehung mit Einspruchsfrist erfolgte im Dezember 2019. Eine abschließende Diskussion mit endgültiger Zurückziehung erfolgte auf der Sitzung des Ausschusses am 27.08.2020. Die Norm wurde im November 2020 ohne Ersatz zurückgezogen. Die Arbeiten sind damit abgeschlossen.

Weiterhin hatte der Arbeitsausschuss die Bearbeitung von DIN 54115-6 beschlossen. Es musste abgeklärt werden, ob die relevanten Firmen sich an einer Überarbeitung inhaltlich kurzfristig beteiligen konnten, anderenfalls hätte auch dieser Normenteil zurückgezogen werden müssen, da er technisch veraltet ist. Die Zuarbeit der relevanten Firmen ist erfolgt. Der Norm-Entwurf zu Teil 6 erschien mit Ausgabe April 2020, die Einspruchsfrist endete am 20.05.2020. Die Einspruchssitzung dazu fand auf der Sitzung des Ausschusses am 27.08.2020 statt, bei der alle Kommentare abschließend beraten wurden. Nach der Freigabe durch den Ausschuss und anschließend durch den Obmann wurde das Manuskript zum Druck als Norm eingereicht. Die Arbeiten sind damit abgeschlossen. Die Veröffentlichung erfolgte mit Ausgabe Dezember 2020.

DIN 54115-7 wurde bei der Überarbeitung von DIN 25422 berücksichtigt. Auf seiner Sitzung am 23.09.2020 hat der Ausschuss erneut geprüft, ob ggf. eine Restnorm notwendig sei und beschlossen, dass die komplette Zurückziehung mit Ersatz durch DIN 25422 korrekt ist. Die Arbeiten sind damit abgeschlossen.

Da DIN 54115-5 zurückgezogen wurde, musste die Bearbeitung von DIN 54115-1 Beiblatt 1 diskutiert werden. Die Überarbeitung von DIN 54115-1 Beiblatt 1 wurde auf der Sitzung des Ausschusses am 27.08.2020 beschlossen, wobei die Überarbeitung ohne Entwurf erfolgte. Die Freigabe des Manuskriptes erfolgte im Herbst 2020 schriftlich. Das Manuskript wurde bei DIN zum Druck eingereicht. Die Arbeiten sind damit abgeschlossen. Die Veröffentlichung des Beiblattes erfolgt im März 2021.

Des Weiteren wurden folgende Aktionen durchgeführt:

- Spiegelung von ISO/TC 85/SC 2 inkl. Dokumentenmanagements über Livelink mit DKE, NAR<sup>3)</sup> und NMP; Durchführung von Systematic reviews und Abstimmungen
- Spiegelung ISO/TC 85/SC 6 und aktive Einbringung von mehreren Dokumenten als neue ISO-Projekte
- Spiegelung von ISO/TC 85 (als P-Member) inkl. Dokumentenmanagements über Livelink mit DKE, NAR und NMP; Durchführung von Systematic reviews und Abstimmungen
- Spiegelung des CEN/TC 430, Erstellung der Umfragen zu Normungsaktivitäten (Übernahme verschiedener ISO-Normen als EN ISO-Normen); des Weiteren Klärung des deutschen Abstimmungsverhaltens zu Fragen der Terminologie und anderen Normungsprojekten mit DKE und NAR, die in den

---

<sup>1)</sup> Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik

<sup>2)</sup> Normenausschuss Materialprüfung

<sup>3)</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

<sup>3)</sup> Normenausschuss Radiologie

Anwendungs- bereich dieses Projektes fallen

- Nachhaltung der in Ausschüssen und Arbeitsgruppen vergebenen Aufgaben soweit möglich
- Beteiligung am KTA<sup>1)</sup> Unterausschuss Strahlenschutz und Grundsatzfragen.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Im Verlauf des Forschungsvorhabens 3617S72381 wurden mehrere für den Strahlenschutz bedeutsame Normen überarbeitet und erneut veröffentlicht. Normen haben sowohl für Anwender als auch für Behörden bei der Umsetzung des Strahlenschutzes in der Praxis der Genehmigung und der Aufsicht eine große Bedeutung. Mit dem Forschungsvorhaben wurde daher ein wesentlicher Beitrag zur Gewährleistung des Standes von Wissenschaft und Technik bei der Nutzung von Vorrichtungen, die den Anforderungen des Strahlenschutzgesetzes und der Strahlenschutzverordnung genügen müssen, geleistet. Aus der Überarbeitung der im Forschungsvorhaben behandelten Normen hat sich keine Notwendigkeit für eine Anpassung der gesetzlichen Grundlagen ergeben.

Da noch weitere den Strahlenschutz betreffende Normen überarbeitet werden müssen, wird die Thematik im Forschungsvorhaben 3621S72340 fortgeführt.

---

<sup>1)</sup> Kerntechnischer Ausschuss

<b>Thema</b>			
Erweiterung und Aktualisierung von ProZES (Programm zur Berechnung der Zusammenhangswahrscheinlichkeit zwischen einer Erkrankung und einer Strahlenexposition)			
<b>Subject</b>			
<i>Extension and update of ProZES (program for assesement of assigned share between cancer and radiation exposure)</i>			
<b>Kennzeichen</b>	<b>Beginn</b>	<b>Ende</b>	<b>Fördermittel</b>
3618S72230	01.09.2018	31.08.2019	EUR 157.000,-
<b>Forschungs- / Auftragnehmer</b>			
Helmholtz Zentrum München, Institut für Strahlenschutz, Neuherberg			
<b>Projektleitung</b>	<b>Fachbetreuung BfS</b>	<b>verantwortlich für den Text</b>	
Dr. M. Eidemüller	Dr. F. Heinzl / WR 3	Dr. M. Eidemüller	

## 1. ZIELSETZUNG

In dem Forschungsvorhaben sollte das Software-Paket ProZES weiterentwickelt werden. In zwei früheren vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) geförderten Forschungsvorhaben wurde die ProZES-Software entwickelt. Diese berechnet die Zusammenhangswahrscheinlichkeit zwischen einer Krebserkrankung und vorangegangener Strahlenexposition und wurde mit neuen strahlenepidemiologischen Daten und aktuellen Modellen zum Strahlenrisiko entwickelt. Dabei wurden für die häufigsten Krebserkrankungen eigens entwickelte Modelle verwendet; für die anderen Krebsarten wurden gruppierte Modelle, bei denen mehrere Krebsarten zusammengefasst wurden, entwickelt. Auf Basis der gesammelten Erfahrungen wurden in einem Fachgespräch Vorschläge zur Erweiterung, Aktualisierung und Verbesserung der Software erarbeitet. Diese sollten in dem Forschungsvorhaben umgesetzt werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das Projekt gliederte sich in 3 Arbeitspakete mit unterschiedlichen Einzelzielsetzungen.

### 2.1 ERGÄNZEN FEHLENDER BERECHNUNGSMÖGLICHKEITEN (AP 1)

- Die frühere Version von ProZES enthielt kein Risikomodell für Multiples Myelom. Auf Basis der Daten der Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki (LSS<sup>1</sup>-Kohorte) sollte ein Risikomodell entwickelt werden. (AP 1.1)
- Die frühere Version von ProZES enthielt keine Möglichkeit, die Zusammenhangswahrscheinlichkeit bei Erkrankungen an mehreren Primärtumoren zu berechnen. Eine solche Methode sollte entwickelt und in die Software implementiert werden. (AP 1.2)

### 2.2 ÜBERARBEITEN DER BERECHNUNGSMÖGLICHKEITEN MIT VERBESSERUNGSBEDARF (AP 2)

- Die Leukämie-Modelle sollten mit dem LSS-Datensatz neu analysiert werden. Dabei sollte ein besonderer Schwerpunkt auf die Robustheit der Modelle gelegt werden. Für verschiedene mögliche Expositionsszenarien sollten die Risikowerte evaluiert werden. (AP 2.1)
- Das Berechnungsverfahren für die Zusammenhangswahrscheinlichkeit von Lungenkrebs durch Hoch-LET-Strahlung im Bergbau sollte überarbeitet werden. Das Modell sollte in Abstimmung mit der BfS-Fachbetreuung auf der Wismut-Kohorte basieren. (AP 2.2)
- Das derzeitige Berechnungsverfahren für die Zusammenhangswahrscheinlichkeit von Lungenkrebs

<sup>1</sup>) Life Span Study

durch Radon und Radonfolgeprodukte in Wohnräumen sollte hinsichtlich seiner Eignung für den Arbeitsplatz überprüft und gegebenenfalls durch ein modifiziertes Verfahren ersetzt werden. (AP 2.3)

### 2.3 VERBESSERN DER BENUTZERFREUNDLICHKEIT DES PROGRAMMS (AP 3)

Es sollten folgende Aspekte der ProZES-Software verbessert und implementiert werden:

- Tutorial und Benutzerfreundlichkeit (AP 3.1):
  - Erstellung eines Tutorials mit Beispielrechnungen
  - Überarbeitung der Hilfe-Datei des geänderten Programms
  - Überprüfung von Möglichkeiten geeigneter Pop-up-Hilfen und deren Implementierung
  - Überprüfung der Wertebereiche der verschiedenen Eingabeparameter.
- Modellimplementation und Qualitätssicherung (AP 3.2):
  - Die Möglichkeit der Eingabe der Daten über ein Excel-Formular sollte überprüft werden und gegebenenfalls implementiert werden.
  - Die Implementation der finalen Risikomodelle und Erweiterungen sollte abgeschlossen werden.
  - Eine Qualitätssicherung und Tests der implementierten Risikomodelle sollte vorgenommen werden.

## 3. METHODIK

Die Zusammenhangswahrscheinlichkeit ( $Z$ ) stellt die Wahrscheinlichkeit dar, mit der ein diagnostizierter Krebs durch eine vorhergehende Strahlenexposition verursacht wurde. Sie kann ausgedrückt werden als Anteil der zusätzlichen strahleninduzierten Rate  $h$  zu der totalen Inzidenzrate  $(h+h_0)$ , wobei  $h_0$  die Hintergrund-Inzidenzrate der Zielbevölkerung darstellt:

$$Z = h / (h + h_0).$$

Die zusätzliche Rate  $h$  wird beschrieben durch deskriptive Risikomodelle des zusätzlichen relativen und absoluten Risikos (ERR- und EAR-Modelle). Die Herleitung dieser Modelle basiert auf der Analyse verschiedener epidemiologischer Studien, z. B. von der Kohorte der Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki (LSS-Kohorte), der gepoolten Studie von acht Kohorten bei Brustkrebs oder der Wismut-Kohorte für Radonexposition bei Bergarbeitern. Typischerweise hängt das Risiko von Geschlecht, erreichtem Alter, Alter bei Exposition oder anderen Faktoren wie z. B. dem Rauchverhalten bei Lungenkrebs ab. Zusätzlich zu den besten Fit-Parametern für diese Abhängigkeiten wird auch die Kovarianz-Matrix der Parameterschätzer berücksichtigt, so dass stochastische Verteilungen mit angemessenen Unsicherheitsintervallen bestimmt werden können.

Weitere methodische Aspekte beinhalten die Berücksichtigung einer Latenzzeit zwischen Strahlenexposition und Krebs, Dosisrateneffekte und die Berücksichtigung von Modellunsicherheiten durch die Methode der Multi-Modell-Inferenz. Die Strahlenrisiken müssen von den strahlenepidemiologischen Kohorten, wie z. B. der japanischen LSS-Kohorte, auf eine aktuelle deutsche Bevölkerung übertragen werden. Dazu werden Deutschland-spezifische demographische Daten und Daten für die Krebsinzidenz benutzt.

Auch die im aktuellen Vorhaben neu entwickelten Risikomodelle wurden auf Basis der in ProZES implementierten Methodik hergeleitet. Ein Risikomodell für Multiples Myelom wurde anhand der LSS-Daten neu entwickelt. Die Risikomodelle für die Leukämie-Subtypen von ALL<sup>1)</sup>, AML<sup>2)</sup>, CML<sup>3)</sup> und Lymphome

---

1) akute lymphatische Leukämie

2) akute myeloische Leukämie

3) chronische myeloische Leukämie

inklusive CLL<sup>1)</sup> wurden neu analysiert und insbesondere im Hinblick auf die Robustheit ihrer Risikovorhersagen überprüft.

Es wurden neue Modelle zu Lungenkrebs nach Radonexposition im Bergbau auf Grundlage der Wismut-Kohorte für verschiedene Expositionsszenarien überprüft. Das Modell zu Lungenkrebs nach Radonexposition in Innenräumen wurde mittels einer Literaturrecherche neu evaluiert.

Es wurde ein mathematisches Verfahren hergeleitet, mit dem die Wahrscheinlichkeit  $Z_{total}$  bestimmt wird, dass bei gleichzeitiger Betrachtung aller Primärtumoren mindestens einer strahleninduziert ist. Das Verfahren zeigt, wie die Perzentile der Wahrscheinlichkeitsverteilung von  $Z_{total}$  bestimmt werden können.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Für Multiples Myelom wurde der Datensatz der LSS-Kohorte auf Basis des Follow-ups von Hsu et al. (Radiat. Res. 2013, 179:361-382) analysiert. Es existieren 136 Fälle des Multiplen Myeloms. Es wurde eine parametrische Baseline angepasst, die von Alter, Geschlecht und Geburtsjahr abhängig ist, sowie das zusätzlich relative Risiko (ERR) bestimmt.

Die Risikomodelle für die Leukämiesubtypen ALL, AML, CML und Lymphome inklusive CLL wurden anhand der LSS-Daten von Hsu et al. neu analysiert und überarbeitet. Die Modelle wurden insbesondere robuster im Hinblick auf verschiedene mögliche Expositionsszenarien und Altersabhängigkeiten gemacht.

Die Modelle für ProZES zu Lungenkrebs durch Radon und Radonfolgeprodukte im Bergbau beruhen auf den Ergebnissen der Wismut-Kohorte, der weltweit größten Kohorte zu Lungenkrebs nach Radonexposition von Minenarbeitern. Zwei potenziell mögliche neue Modelle, die Zeit- und Altersabhängigkeiten des Risikos berücksichtigen, wurden vom BfS zur Verfügung gestellt. Diese wurden mittels Expositionsszenarien überprüft.

Das bisherige Berechnungsverfahren für die Zusammenhangswahrscheinlichkeit von Lungenkrebs durch Radon und Radonfolgeprodukte in Innenräumen wurde hinsichtlich seiner Eignung für den Arbeitsplatz überprüft. Dazu wurde eine Literaturrecherche und -auswertung zu weiteren möglichen Effektmodifikatoren vorgenommen.

Für Personen mit mehreren Primärtumoren nach Strahlenexposition wurde ein Berechnungsverfahren zur Ableitung der Zusammenhangswahrscheinlichkeit hergeleitet und mit der in IREP<sup>2)</sup> implementierten Formel verglichen. Dabei wird von einer unabhängigen Entstehung der Primärtumoren und von perfekt korrelierten Zusammenhangswahrscheinlichkeiten ausgegangen. Es wurde untersucht, inwieweit die Resultate von der zugrunde liegenden Annahme der Korrelation abhängig sind.

Die neuen Risikomodelle wurden in die Software implementiert und getestet. Die Benutzeroberfläche des Programms wurde in Absprache mit der Fachbetreuung des BfS überarbeitet. Ein Tutorial wurde neu erstellt und die Hilfe überarbeitet.

## 5. ERGEBNISSE

Für Multiples Myelom ist das Hintergrundrisiko vom Geschlecht abhängig und größer für Männer als für Frauen. Der Anstieg mit dem Alter ist dabei für beide Geschlechter ähnlich. Das Strahlenrisiko war positiv und in einer ähnlichen Größenordnung wie für alle soliden Tumoren mit  $ERR=0,41\pm0,38$  (SE); es ist dabei nicht signifikant auf dem 95 %-Konfidenzintervall.

Die Risikomodelle für Multiples Myelom, ALL, AML, CML und Lymphome inklusive CLL wurden neu erstellt bzw. überarbeitet und in die Software implementiert. In die bisherigen Leukämie-Modelle ging die Information ein, ob sich eine Person während der Detonation in Hiroshima bzw. Nagasaki oder in deren Umland aufhielt. Die Re-Analyse ergab, dass Merkmale mit dieser Information zum Teil nicht sta-

<sup>1)</sup> chronische lymphatische Leukämie

<sup>2)</sup> Interactive RadioEpidemiological Program

tistisch signifikant waren. Sie wurden deshalb aus den neuen Modellen entfernt. In die Berechnung des Hintergrundrisikos ging ein Term ein, der sich quadratisch mit dem Geburtsjahr  $b$  verhält,  $\sim (b-1915)^2$ . Dieser Term ist für eine große Schwankung des verbundenen Risikos innerhalb weniger Jahrzehnte verantwortlich, die nicht realistisch erscheint. Der Term wurde aus den Risikomodellen entfernt. Für das Strahlenrisiko ergaben sich insbesondere bei CML deutliche Änderungen in der Beschreibung der Altersabhängigkeiten.

Die zwei vom BfS entwickelten Lungenkrebsmodelle der Wismut-Kohorte enthalten eine Abhängigkeit des Strahlenrisikos vom Alter bei medianer Exposition und der Zeit seit medianer Exposition, unterscheiden sich dabei aber in der Berücksichtigung der Expositionsrate. Das Modell mit Expositionsrate wurde anhand aller Personen in der Wismut-Kohorte, die zwischen 1946 und 1989 bei der Wismut beschäftigt waren, abgeschätzt und deckt damit alle Expositionsszenarien der Wismut-Kohorte ab. Das Modell ohne Expositionsrate diente der Untersuchung von niedrig Radonexponierten, unterhalb von 100 WLM<sup>1)</sup>. Die Analysen waren deshalb auf Personenjahre unter Risiko <100 WLM beschränkt. Während des Forschungsvorhabens hat sich herausgestellt, dass die Architektur von ProZES es nicht zulässt, diese Modelle ihrer Struktur entsprechend in ProZES zu implementieren. Die Abweichungen, die sich durch die Vorgehensweise in ProZES ergeben, sind bei dem Modell mit Expositionsrate sehr groß und bei dem Modell ohne Expositionsrate relativ gering. Es wurde daher in ProZES das Modell ohne Expositionsrate implementiert. Dieses Modell wurde auf Basis von Expositionen bis 100 WLM geschätzt und kann deshalb nur für solche Expositionen verwendet werden.

Das ProZES-Modell für Lungenkrebs in Innenräumen basiert weiterhin auf den Ergebnissen der Studie von Darby et al. mit einem Risikowert von  $ERR=0,16$  (95 %CI: 0,05; 0,31) pro 100 Bq/m<sup>-3</sup>. Da es aktuell keinen quantitativ belastbaren Zusammenhang des Risikos mit weiteren möglichen Effektmodifikatoren gibt, entspricht das neue ProZES-Modell für Radon-Exposition in Innenräumen dem alten Modell mit einer linearen Abhängigkeit von Radonkonzentration und Aufenthaltszeit, erweitert um den Effekt einer veränderten Atemrate,

$$ERR = \beta \cdot f_{AR} \cdot q \cdot T.$$

Hierbei ist  $f_{AR}$  die relative Atemrate einer beruflich exponierten Person im Vergleich zu einer Person im Wohnhaus. Für eine überwiegend sitzende berufliche Tätigkeit ist  $f_{AR}=1,04$ , für eine stärker körperliche Tätigkeit gilt  $f_{AR}=1,45$ . Der Wert  $q$  ist die vom Anwender eingegebene Radon-Konzentration in Innenräumen in Bq/m<sup>-3</sup> und  $T$  ist die gesamte Aufenthaltsdauer in Stunden.

Eine Liste aller in ProZES implementierten Risikomodelle findet sich in Tabelle 1.

Im Fall von 2 unabhängigen Primärtumoren und unter der Annahme einer vollständigen Korrelation der Zusammenhangswahrscheinlichkeiten  $Z_1$  und  $Z_2$  bestimmt sich das Perzentil der Zusammenhangswahrscheinlichkeit, dass mindestens ein Primärtumor strahleninduziert ist, gemäß

$$Z_{total}^{(p)} = 1 - (1 - Z_1^{(p)})(1 - Z_2^{(p)}).$$

Unter der Annahme von unkorrelierten oder nicht vollständig korrelierten  $Z_1$  und  $Z_2$  können sich Abweichungen ergeben.

Die Oberfläche der Software wurde überarbeitet. Dabei wurden auch Icons implementiert, um dem Benutzer eine optische Hilfestellung für die Anzeige von Hilfstexten zu geben. Ein Tutorial wurde erstellt und die Hilfedatei überarbeitet. Abbildung 1 und 2 zeigen die Software mit einem Output in grafischer Form und in Berichtsform.

<sup>1)</sup> working level months

**Tabelle 1: In ProZES implementierte Risikomodelle**

Art	Model	Organ oder Organgruppe	Code	ICD10-code(s)
Solide Krebsarten	<b>STOMACH</b>	Magen	16	C16
	<b>COLON</b>	Dickdarm	18	C18
	<b>LUNG</b>	Lungen (inkl.Trachea)	34	C33,C34
	<b>BREAST</b>	Brust	50	C50
	<b>THYROID</b>	Schilddrüse	73	C73
	<b>DIG</b>	Mundhöhle Speiseröhre Dünndarm Mastdarm Leber Gallenblase etc. Bauchspeicheldrüse Sonstige und ungenau bezeichnete Verdauungs-organe, Retroperitoneum und Peritoneum	101	C00,C14 C15 C17 C19-C21 C22 C23,C24 C25 C26,C48
	<b>REM</b>	Nasenhöhlen und Mittelohr, Nasennebenhöhle Kehlkopf Thymusdrüse Herz oder andere intrathorakale Organe Knochen Malignes Melanom Bindegewebe Hoden Nebennieren Sonstige unspezifizierte endokrine Drüsen	102	C30,C31 C32 C37 C38,C39 C40,C41 C43 C47,C49 C62 C74 C75,C76
	<b>GNF1</b>	Gebärmutterhalskrebs	1031	C53
	<b>GNF2</b>	Gebärmutterkörperkrebs Sonstige nicht näher bezeichneten Teile des Uterus Eierstockkrebs Krebs in anderen weiblichen Geschlechtsorganen	1032	C54 C55 C56 C51,C52,C57,C58
	<b>GNM</b>	Prostata Andere männliche Geschlechtsorgane	104	C61 C60,C63
	<b>URI</b>	Niere Nierenbecken und Harnleiter Harnblase Sonstige nicht näher bezeichnete Harnorgane	105	C64 C65,C66 C67 C68
	<b>BCNS</b>	Auge Hirnhäute, Gehirn, Rückenmark, Hirnnerven oder sonstiges zentrales Nervensystem	106	C69 C70-C72
	<b>SKIN</b>	Nicht-melanotischer Hautkrebs	107	C44
Krebsarten des blutbildenden Systems	<b>HEM1</b>	Akute lymphatische Leukämie (ALL) Prolymphozytäre Leukämie vom B-Zell-Typ Lymphatische Leukämie, nicht näher bezeichnet	201	C91.0 C91.3 C91.9
	<b>HEM2</b>	Hodgkin Lymphom Non-Hodgkin Lymphom Peripheres und kutanes T-Zell-Lymphom Bösartige immunoproliferive Krankheiten Chronische lymphatische Leukämie vom B-Zell-Typ Haarzellenleukämie	202	C81 C82, C83,C85 C84 C88 C91.1 C91.4
	<b>HEM3</b>	Akute myeloische Leukämie (AML) Atypische chronische myeloische Leukämie Myelose Sarkom Akute Promyelozyten-Leukämie Akute myelomonozytäre Leukämie Monozytenleukämie Sonstige Leukämie bezeichneten Zelltyps Leukämie nicht näher bezeichneten Zelltyps Sonstige oder nicht-näher bezeichnete bösartige Neubildungen des lymphatischen, blutbildenden und verwandten Gewebes	203	C92.0 C92.2 C92.3 C92.4 C92.5 C93 C94 C95 C96
	<b>HEM4</b>	Chronische myeloische Leukämie (CML)	204	C92.1
	<b>MM</b>	Multiplres Myelom	205	C90

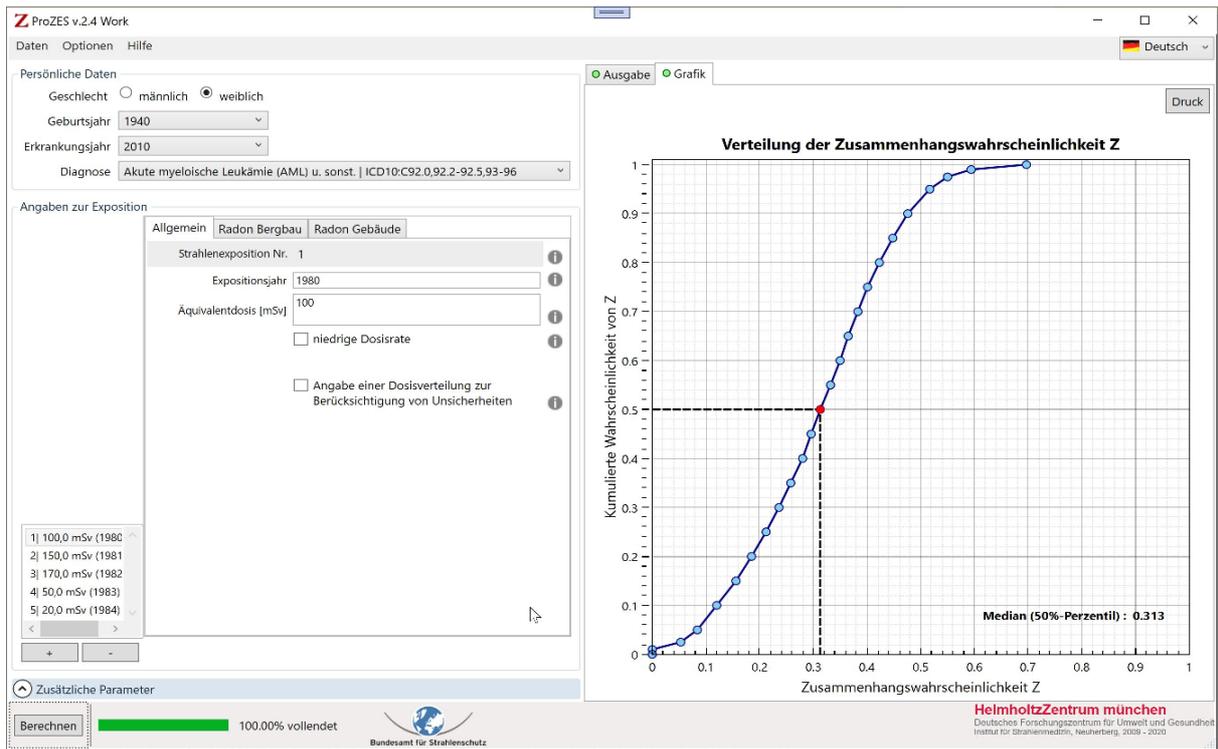


Abbildung 1: Oberfläche von ProZES mit Ausgabe in grafischer Form.

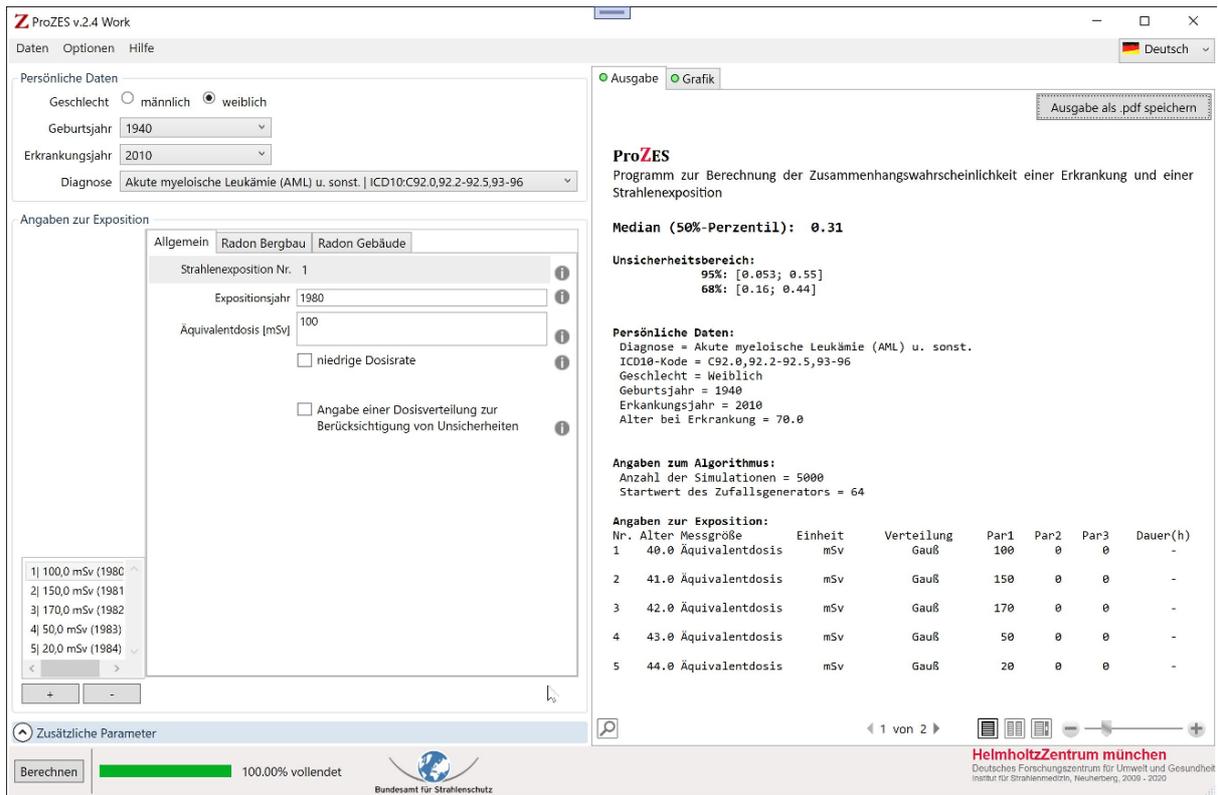


Abbildung 2: Oberfläche von ProZES mit Ausgabe in Berichtsform

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Durch die Überarbeitung und Qualitätssicherung der ProZES-Software in diesem Ressortforschungsprojekt hat die Software einen Zustand erreicht, dass sie veröffentlicht werden kann. Die Software kann somit bei Verfahren zur Anerkennung strahlenbedingter Berufskrankheiten als Unterstützungsinstrument dienen. Damit sie diese Aufgabe langfristig erfüllen kann ist die Pflege (z. B. durch Aktualisierung von Inzidenz- und Populationsdaten) und Weiterentwicklung (z. B. durch Berücksichtigung neuer Forschungserkenntnisse) notwendig.

<b>Thema</b>			
Machbarkeitsstudie zur mikroskaligen Modellierung von UV-Belastungen in urbanen Umgebungen für verschiedene Bevölkerungsgruppen zur Hautkrebsprävention			
<b>Subject</b>			
<i>Feasibility study for micro-scale modelling of UV exposure in urban environments for skin cancer prevention of different population groups</i>			
<b>Kennzeichen</b> 3618S72490	<b>Beginn</b> 01.09.2019	<b>Ende</b> 31.08.2020	<b>Fördermittel</b> EUR 120.666,-
<b>Forschungs- / Auftragnehmer</b>			
Leibniz Universität Hannover, Institut für Meteorologie und Klimatologie, Hannover			
<b>Projektleitung</b> Prof. Dr. G. Seckmeyer	<b>Fachbetreuung BfS</b> Dr. C. Baldermann / WR 4		<b>verantwortlich für den Text</b> Dr. E. Weide Luiz, Prof. Dr. G. Seckmeyer

## 1. ZIELSETZUNG

Das Hauptziel dieses Projektes war es, eine Machbarkeitsstudie über die Methoden und die zu berücksichtigenden Parameter bei der Modellierung der erythemwirksamen UV-Bestrahlungsstärke in mikroskaligen Bereichen durchzuführen, um Aussagen über die UV-Bestrahlungsstärke und über deren Veränderung in Abhängigkeit von äußeren Strukturen treffen zu können.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

- Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik
- Erstellen eines Parameterkatalogs
- allgemeine Bewertung der Parameter
- Bewertung der Parameter hinsichtlich GIS<sup>1)</sup>-basierter Modellierungsprogramme und Berichtslegung.

## 3. METHODIK

Um die Machbarkeit einer mikroskaligen Modellierung von UV-Belastungen in urbanen Umgebungen für verschiedene Bevölkerungsgruppen zur Hautkrebsprävention zu untersuchen wurde die wissenschaftliche Literatur eingehend untersucht. Zur Charakterisierung der Strahlung, die den Boden erreicht, wurden die physikalischen Größen Strahldichte und Bestrahlungsstärke verwendet. Für die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Sensitivitätsstudien wurde das Strahlungstransfermodellpaket libratran verwendet.

<sup>1)</sup> Geographische Informationssysteme

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

#### 4.1.1 GIS-basierte Modelle

Es gibt einige GIS-basierte Modelle, die sich mit der Strahlungsmodellierung auf einer bestimmten Ebene befassen. Eine ihrer Haupteinschränkungen ist jedoch die Verwendung einfacherer Methoden als Kompromiss zwischen Genauigkeit und angemessener Rechenzeit. Weitere Herausforderungen ergeben sich aus der korrekten Darstellung von Oberflächen und Vegetation. Die Modelle RADIANCE, Day-sim und SOLENE gehören zu den besten Softwareprogrammen, die eine detaillierte Simulation der Anisotropie der Himmelsstrahlung im sichtbaren Spektralbereich (mit Bewertung der Tageshellempfindlichkeit des menschlichen Auges), jedoch nicht deren spektraler Abhängigkeit, sowie der Inter- und Multireflexionen durchführen können. Darüber hinaus ist SkyHelios ein Mikroskalenmodell zur Berechnung mikro-meteorologischer Bedingungen in komplexen städtischen Umgebungen. Es wurde mit Laufzeit-Effizienz unter Verwendung von 3D-Grafik-Hardware zur Lösung der komplexen Berechnungen entwickelt und erlaubt die Berechnung von meteorologischen und anderen Hilfsparametern. Die Haupteinschränkungen des Modells liegen in der Verwendung einer vereinfachten - und damit für den UV-Bereich ungeeigneten - nichtspektralen Strahlungsmodellierung und impliziter isotroper Annahmen zur Berechnung der reflektierten Strahlung.

#### 4.1.2 Parameterkatalog

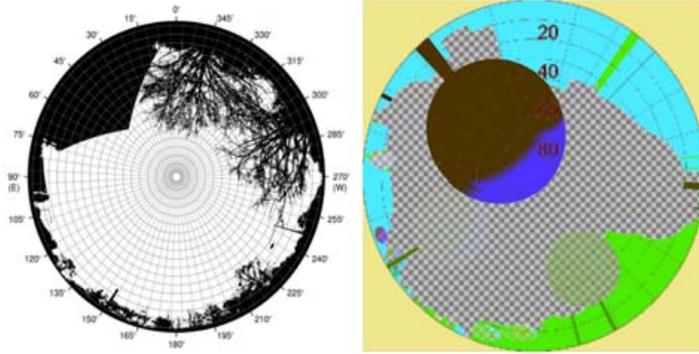
Im Folgenden werden die wichtigsten Parameter zur Berechnung der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke auf die Makroskala erläutert.

**Aerosol-Eigenschaften:** Das Ignorieren der lokalen Variationen im Aerosol durch Annahme typischer Werte für die optische Dicke des Aerosols kann zu Fehlern von etwa 10 % im UV-Index (UVI) führen. Bei stark verschmutzter Luft wie in einigen Ballungsgebieten in China oder Indien treten noch deutlich größere Abweichungen auf.

**Gesamt-Ozon und Ozonprofil:** In den mittleren Breiten zeigt die Gesamt-Ozonverteilung eine erhebliche Variabilität von Tag zu Tag. Sowohl Beobachtungen als auch modernste Ozonvorhersagen führen zu einer Unsicherheit von 3 % bei der säulenintegrierten Ozonmenge, was zu Fehlern von 4 % bei UVI-Schätzungen führt. Außerdem zeigen Modellsimulationen, dass die berechneten UVI-Werte um 8 % steigen, wenn ein Ozonprofil in mittleren Breiten durch ein tropisches Profil ersetzt wird, während die Gesamtmenge des Ozons konstant bleibt.

**Albedo:** Die Albedo im UV-Spektralbereich ist für die meisten Oberflächen sehr gering, so dass der Einfluss der Albedo auf den UVI minimal ist. Schneebedeckte Oberflächen können jedoch eine sehr hohe UV-Albedo aufweisen, mit Werten bis zu 1. Es wurde ein UVB-Anstieg von 50 % gegenüber einer Schneedecke bei klarem Himmel berichtet und noch höhere Werte sind bei teilweiser Bewölkung für große solare Zenitwinkel möglich.

**Wolken:** Wolken sind der wichtigste, aber auch der am schwierigsten zu schätzende Parameter, der die UV-Bestrahlungsstärke bestimmt, die den Boden erreicht. Nach Literaturangaben führt das Fehlen von Wolkendaten bei der Abschätzung der UV-Exposition zu einer Überschätzung von 20 % in schattigen Gebieten. Selbst unter Baumschatten war die tatsächliche Bestrahlungsstärke in teilweise bewölkten Gebieten höher, wahrscheinlich auf Grund von Streueffekten an den Wolkenrändern. Diese Verstärkungseffekte von Wolken treten häufig nur in kurzen Zeiträumen auf, obwohl auch gezeigt wurde, dass bestimmte meteorologische Bedingungen auch zu einer länger anhaltenden Erhöhung der Strahlung durch Wolken führen. Ein vollständig bedeckter Himmel reduziert den UVI um 50 bis 60 %, es sind aber auch schon Reduktionen von 99,5 % gemessen worden. Dies und die Tatsache, dass bewölkte Situationen schwer zu parametrisieren sind, führt dazu, dass in der Regel UVI-Modelle nur für klaren oder vollständig bedeckten Himmel erstellt werden. Für Szenarien mit durchbrochenen Wolken ist eine komplexe 3D-Modellierung erforderlich, die jedoch sehr zeitaufwändig und sehr spezifisch für jede Situation ist. Für mittlere Bedingungen, die innerhalb der vorgeschlagenen Methode verwendet werden sollten, sind einige Methoden entwickelt worden, die Wolken langfristig als halbtransparente Hindernisse betrachten.



**Abbildung 1:** Beispiele von Himmelsprofilen, die mit Fischaugen-Kamerasystemen und mit morphologischen 3D-Daten mit Bäumen und Gebäuden vom SkyHelios-Modell im Produktionsmodus erzeugt wurden. Die Farben und die Opazität entsprechen unterschiedlichen kurzwelligen Albedo, langwelligen Emissionsgraden und Direktstrahlungsfaktor der Oberflächen.

**Himmelsprofil und Horizontüberhöhung (Sky View Factor (SVF)):** SVF ist ein dimensionsloser Parameter, der den sichtbaren Anteil des Himmels auf einer Halbkugel darstellt, welcher zentriert über dem analysierten Ort liegt und mit zwei Hauptmethoden erhalten werden kann: Fischaugenbilder (Abbildung 1 (links)) und mit numerischen Modellen unter Verwendung von (GSI) 3D-Daten (Abbildung 1 (rechts)). Das Hauptproblem bei der Verwendung der Fotografie ist die Reflexionsanalyse, außer es werden photogrammetrische Messungen mit mehr als einer Kamera verwendet. Komplexe Reflexionsanalysen sind in der Regel zu zeitaufwendig, weshalb viele GSI-Modelle sie vollständig ignorieren oder vereinfachte Methoden verwenden (z. B. SkyHelios). Im Falle von SkyHelios erlaubt die Vereinfachung eine gewisse Reflexionsanalyse mit Hilfe der Fotografie, d. h. die Objekte auf der der Sonne gegenüberliegenden Seite reflektieren die Bestrahlungsstärke isotrop. Es sollte aber nicht vergessen werden, dass diese Analysen für den sichtbaren Spektralbereich gelten, im UV-Bereich ist die Verteilung der Himmelsstrahlung sowie die Reflektionseigenschaften von Oberflächen ganz anders als im sichtbaren Spektralbereich.

**Durchlässigkeit von Objekten:** Beschattungsflächen wie Wartehallen und sogar Bäume können im UV-Spektralbereich halbtransparent sein. Aus diesem Grund ist die Information über die Transmission dieser Objekte erforderlich.

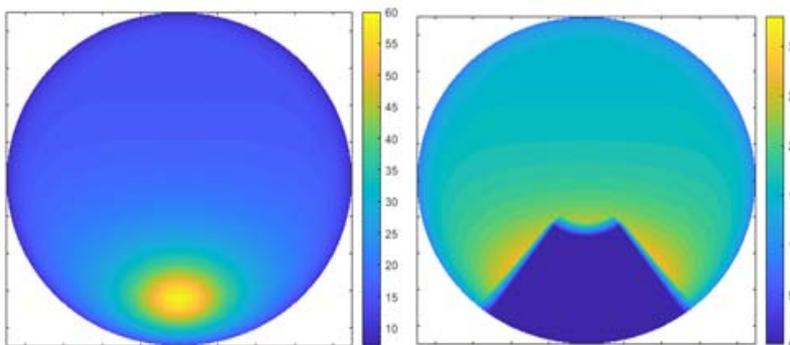
**Reflexion an Objekten:** Die reflektierte Bestrahlungsstärke und die reflektierte Strahldichte hängen stark von der Gebäudegeometrie, den Materialeigenschaften und dem Sonnenstand ab. Um Mehrfachreflexionen zu modellieren, ist ein genaues 3D-Modell der bebauten Umgebung erforderlich. Zu diesem Zweck wurden viele Modelle entwickelt, die jedoch sehr rechenintensiv sind. Die Reflexivität der meisten Oberflächen im UV-Bereich ist gering, so dass diese als sehr dunkle isotrope Reflektoren angenähert werden können. Die Reflexion bei einigen Oberflächen wie Metall und Glas kann aber durchaus winkelabhängig hoch sein (spiegelnde Oberflächen). Bei 300 nm z. B. beträgt die Reflexion von Glas deutlich weniger als 10 % bei Einfallswinkeln bis zu etwa 70 °, wohingegen sie bei nahezu streifendem Einfall sehr schnell auf fast 100 % Reflexionsvermögen ansteigt. Dennoch sind solche hohen Einfallswinkel auf Grund des hohen Breitengrades Deutschlands selten und treten nur unter ganz bestimmten Bedingungen auf. Außerdem gibt es viele verschiedene Studien für den UV-Bereich, die feststellten, dass diese nicht immer leicht an 3D-Mikroskala-Umgebungen angepasst werden können oder sogar widersprüchlich sind. In vielen Modellen werden die Auswirkungen der Reflexion vernachlässigt bzw. vollständig ignoriert. Außerdem wurden in der vorhandenen Literatur über UV verschiedene Oberflächentypen nur für die UV-Albedo und nicht für die Reflexion (die vom Einfallswinkel und vom Beobachtungswinkel abhängt) vermessen. Dies gilt sowohl für Breitband- als auch für spektrale Messungen.

**Bäume:** Die Blätter eines Baumes sind für UV-Strahlung teildurchlässig. Verschiedenen Studien zufolge werden unabhängig von der Baumart etwa 90-95 % der UV-Strahlung absorbiert, 5-9 % reflektiert und <0,1 % durch die Blätter transmittiert. Das Durchdringen des Blattes erfordert die Penetration durch die (adaxiale) Kutikula, die Epidermis, das Mesophyll, eine zweite (abaxiale) Epidermis und eine zweite Kutikula. Es wurden verschiedene Modelle erstellt, um die Sonneneinstrahlung unter Baumschatten zu modellieren. Die meisten dieser Methoden verwenden jedoch Vereinfachungen im Zusammenhang

mit der Strahldichtemodellierung mit weniger Richtungsinformationen. Eines der Hauptprobleme von Baumdarstellungen ist die Änderung des Baumes im Laufe des Jahres. Eine einfachere Art der Modellierung der UV-Bestrahlungsstärke unter Baumschatten besteht darin, sie einfach als halbtransparente Hindernisse zu betrachten. Ein ähnlicher Ansatz wird bei SkyHelios verwendet (z. B. Abbildung 1). Die Verwendung von Fotos kann nur für bestehende Standorte und für eine bestimmte Zeit erfolgen. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von Standardbäumen für verschiedene Jahreszeiten.

#### 4.2 MIKROSKALIGE AUSWIRKUNGEN AUF DIE MODELLIERTE STRAHLDICHTE

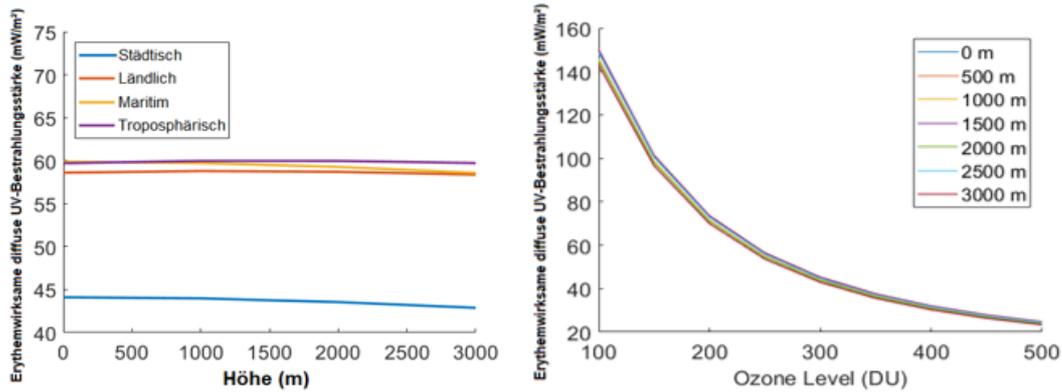
Anhand der Strahldichtedaten für die Makroskala wurden die Effekte auf der Mikroskala analysiert, um zu verstehen, welche Parameter in den LUT<sup>1)</sup>s enthalten sein müssen und welche interpoliert oder extrapoliert werden können. Die Modellierung in diesem Kapitel wurde mit libRadtran UVSPEC durchgeführt. Abbildung 2 zeigt auf der linken Seite die allgemeine erythemwirksame diffuse Strahldichteverteilung (in  $\text{mW}/\text{m}^2\text{sr}$ ) bei wolkenlosem Himmel für städtische atmosphärische Bedingungen und auf der rechten Seite die gleiche Strahldichte unter dem Schatten eines künstlichen Gebäudes. Unter Verwendung der gleichen Bedingungen aus Abbildung 2 wurden die Auswirkungen der verschiedenen Aerosoltypen auf die erythemwirksame UV-Bestrahlungsstärke untersucht. Bei den teilweise abgeschatteten Bedingungen ist die Zunahme mit dem Höhenwinkel der Sonne (Elevation) geringer als bei Bedingungen ohne Abschattung und sie kann sogar etwas abnehmen (Abbildung 3 (links)). Diese Tatsache unterstreicht, dass der größte Teil der Variation in Abhängigkeit des solaren Elevationswinkels durch die Sonnenrichtung verursacht wird, selbst wenn man nur den diffusen Anteil analysiert. Dies ist ein erwartetes Verhalten, da bei größeren Höhen der Weg durch die Atmosphäre für die Strahlung kleiner ist, was zu weniger Streuung führt. Dies führt zu einer Zunahme des direkten Anteils sowie zu einer Abnahme des diffusen Anteils. Aus dieser Analyse lässt sich auch schließen, dass die Bedingungen für Land, See und Standard Troposphäre von LibRadtran ähnlich sind und nur eine oder zwei von ihnen als Optionen für die Lookup-Tabellen notwendig sein werden.



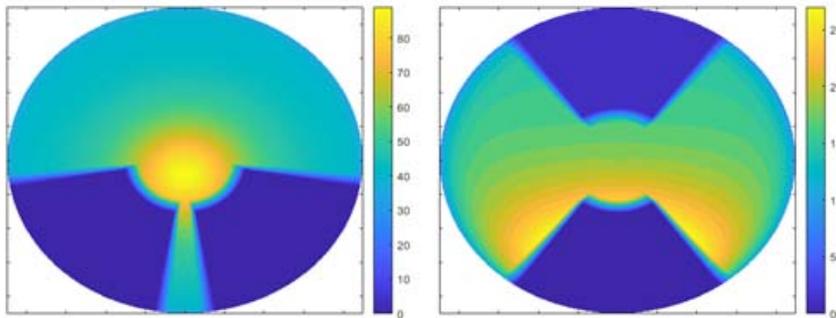
**Abbildung 2:** Erythemwirksame diffuse Strahldichte (in  $\text{mW}/\text{m}^2\text{sr}$ ) mit städtischen atmosphärischen Bedingungen bei wolkenlosem Himmel (links) und unter dem Schatten eines künstlichen Gebäudes (rechts). Die Werte der globalen Bestrahlungsstärke betragen  $89,12 \text{ mW}/\text{m}^2$  bzw.  $49,39 \text{ mW}/\text{m}^2$ .

Abbildung 3 (rechts) zeigt, wie sich die erythemwirksame diffuse UV-Bestrahlungsstärke unter teilweise abgeschatteten Bedingungen für verschiedene Ozonwerte in verschiedenen Höhenlagen verändert. Auch hier kann man erkennen, dass die UV-Bestrahlungsstärke unter teilweise abgeschatteten Bedingungen vor allem von der Ozonsäule und weniger von der Meereshöhe beeinflusst wird - ähnlich wie bei der globalen Bestrahlungsstärke ohne Verschattung. Darüber hinaus wurden unter Verwendung der gleichen teilweise abgeschatteten Bedingungen wie in Abbildung 2 (rechts) die Auswirkungen der Albedo auf die Modellierung der erythemgewichteten diffusen UV-Bestrahlungsstärke analysiert. Auch hier tritt der erwartete Effekt der Zunahme der Bestrahlungsstärke mit der Höhe nur für die nicht abgeschatteten Bedingungen auf. Wie bereits erwähnt, kann die Albedo einen großen Einfluss auf die UV-Bestrahlungsstärke haben, jedoch ist die Albedo im UV-Bereich normalerweise sehr gering ( $\sim 2\%$ ), mit Ausnahme von schneebedeckten Oberflächen (40-100 %). In den modellierten Beispielen stieg die diffuse Bestrahlungsstärke bei einer relativen Albedo-Veränderung von 5 auf 80 % für die schattenlosen und die teilweise abgeschatteten Bedingungen jeweils um  $\sim 36\%$  bzw.  $\sim 40\%$ .

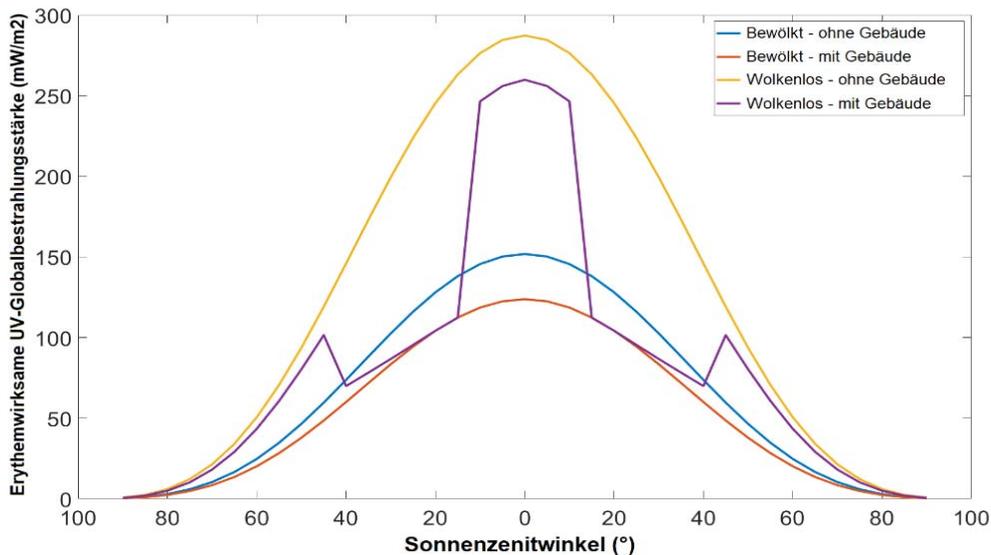
<sup>1)</sup> Lookup-Tabelle



**Abbildung 3:** Variabilität der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke für abgeschattete Bedingungen mit der Höhe und für verschiedene Aerosoleigenschaften (links) sowie Ozonsäulendichten (rechts).



**Abbildung 4:** Erythemwirksame diffuse Strahldichte (in  $mW/m^2sr$ ) mit städtischen atmosphärischen Bedingungen für zwei Konfigurationen von künstlichen Gebäuden. Die linke Modellierung wurde für die tägliche Variation und die rechte Modellierung für die Reflexionsanalyse verwendet.



**Abbildung 5:** Tagesvariabilität der erythemgewichteten Globalbestrahlungsstärke bei bewölktem und wolkenlosem Himmel unter unverschatteten Bedingungen (kein Gebäude) und teilverschatteten Bedingungen. Die Modellierung wurde mit dem DISORT RTE, städtischen Aerosolbedingungen, Ozonwerten von 300 DU (Dobson-Einheit) und einer Albedo von 5 % durchgeführt.

Um die tägliche Variation der erythemgewichteten diffusen UV-Bestrahlungsstärke abzuschätzen, wurde die Gebäudekonfiguration aus Abbildung 4 (links) verwendet. Abbildung 5 zeigt die tägliche Variation der globalen Bestrahlungsstärke für verschiedene Zenit- und Azimutwinkel bei wolkenlosem Himmel und bei vollständiger Bedeckung. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass der Einfluss des Direktanteils hoch ist und dass, wenn er nicht einbezogen wird (im Schatten), die Werte der Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel näher an die Werte bei Bewölkung heranreichen können.

Schließlich wurden die Auswirkungen von Reflexionen an Gebäuden mit Hilfe einer vereinfachten isotropen Reflexionsmodellierung getestet. Abbildung 4 (rechts) zeigt die verwendete Gebäudekonfiguration, wobei ein Gebäude die direkte Sonne abschattet und ein anderes sie reflektiert. Zum Vergleich wurde zunächst die Modellierung ohne das reflektierende Gebäude durchgeführt, in dem die modellierte erythemwirksame diffuse UV-Bestrahlungsstärke  $44,11 \text{ W/m}^2$  betrug. In einem zweiten Schritt wurde die Modellierung unter Verwendung von 3 verschiedenen Werten des Reflexionsvermögens durchgeführt: 0, 0,05 und 0,30, wobei die modellierten Bestrahlungsstärken jeweils  $35,16$ ,  $35,31$  und  $36,06 \text{ W/m}^2$  betragen.

## 5. ERGEBNISSE

Im Rahmen des Projektes wurde eine allgemeine Analyse des Standes der Technik und eine Machbarkeitsstudie zur Modellierung erythemwirksamer Bestrahlungsstärken unter teilverschatteten (mikroskaliger Bereich) Bedingungen durchgeführt. Verschiedene Aspekte und Parameter wurden zunächst anhand von Ergebnissen aus der wissenschaftlichen Literatur und später mit eigenen Modellrechnungen analysiert, darunter atmosphärische Variablen (z. B. Wolken, Ozon und Aerosole), Darstellungen von Schatteneffekten und GIS-Modellen. Das Vorgehen für die mikroskalige Modellierung kann in 4 Schritte eingeteilt werden:

- Makroskalige Parameter, die nur einen eher geringen Einfluss auf die erythemwirksame Bestrahlungsstärke haben, wie die Temperatur, verschiedene Spurengase in der Troposphäre und der Sonnen-Erde Abstand. Hier können einfach die Standardwerte des Strahlungstransfermodells verwendet werden.
- Makroskalige Parameter, die einen großen Einfluss auf die erythemwirksame Bestrahlungsstärke haben, wie Sonnenzenitwinkel, Gesamt Ozon, Wolken, Aerosole und Albedo. Für diese Parameter sollte eine Modellierung durchgeführt und die Werte sollten in LUTs abgespeichert werden, die dann bei der mikroskaligen Modellierung verwendet werden.
- Berücksichtigung „einfacher“ mikroskaliger Parameter, wie die Position von Gebäuden im Raum.
- Komplexe mikroskalige Parameter, die eine zusätzliche Berechnung erfordern, wie Bäume oder stark reflektierende Objekte.

Was die atmosphärischen Variablen betrifft, so können die meisten von ihnen in frühere Strahldichtemodellierungen mit Strahlungstransportmodellen (RTMS), wie libRadtran UVSPEC, für die Makroskala einbezogen und dann in Lookup-Tabellen für eine spätere Einbeziehung in die mikroskalige Modellierung gespeichert werden. Mit diesem Ansatz lassen sich lange Rechenzeiten vermeiden, da die Strahldichte- und Bestrahlungsstärkewerte bereits gespeichert sind. Für die Mikroskala kann dann auf diese Daten je nach den verschiedenen atmosphärischen Bedingungen zugegriffen werden. Die Modellierung kann für verschiedene Aerosol-, Ozon- und Wolkenbedingungen und auch für verschiedene Zenitwinkel vorgenommen werden. Andere Variablen wie Höhe und Albedo können ebenfalls gespeichert, interpoliert oder extrapoliert werden. Bei einer solchen Softwareentwicklung müssen zur Erzielung genauer Ergebnisse zwei Herausforderungen bewältigt werden: die Modellierung unter Baumschatten und die Analyse der Reflexion von vertikalen Objekten.

Die abschließende Schlussfolgerung aus diesem Bericht ist, dass es möglich ist, die erythemgewichtete Bestrahlungsstärke unter mikroskaligen teilverschatteten Bedingungen zu modellieren, wenn folgende Bedingungen berücksichtigt werden:

- Modellierung der spektralen Strahldichte
- Vorabmodellierung wichtiger atmosphärischer Parameter (Szenarien)

- Verwendung von Lookup-Tabellen zur Begrenzung der Rechenzeit
- 3-D-Eingangsdaten von Gebäuden und Bäumen
- Parametrisierung von Baumschatten
- sinnvolle Annahmen zu den Reflexionseigenschaften von nicht horizontal stehenden Objekten im Strahlengang.

Es ist wichtig zu betonen, dass auf Grund des sehr hohen Anteils der UV-Bestrahlungsstärke, der aus diffuser Himmelsstrahlung stammt, die Modellierung der Strahldichte in Abhängigkeit von Einfallswinkel- und Azimutwinkeln entscheidend ist, um größere Fehler bei der Bestimmung der Bestrahlungsstärke unter diesen Bedingungen zu vermeiden. Diese Tatsache bringt die Notwendigkeit mit sich, eine neue Software zu entwickeln, da die meisten der aktuellen GIS-Programme bei Weitem zu vereinfachte Darstellungen der Strahlungsverhältnisse verwenden. Für die Beschreibung einiger mikroskaliger Parameter wie Reflexion, Albedo und Solar View Factor kann unter Umständen jedoch auf bereits entwickelte Software (z. B. SkyHelios) zurückgegriffen werden.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Die im Rahmen dieser Studie erarbeiteten Ergebnisse zeigen, dass die mikroskalige Modellierung von UV-Belastungen in urbanen Umgebungen für verschiedene Bevölkerungsgruppen zur Hautkrebsprävention machbar ist und dass dies auch mit Abstrichen im Rahmen von GIS-Softwaresystemen möglich ist. Auf Basis dieser Machbarkeitsstudie kann die Entwicklung einer GIS-basierten Software zur mikroskaligen Modellierung der UV-Strahlungsbelastung in Auftrag gegeben werden.

<b>Thema</b>			
Möglichkeiten des Zuschnitts von Risikoinformationen im Strahlenschutz auf unterschiedliche Zielgruppen im Internet			
<b>Subject</b>			
<i>Possibilities of tailoring risk information in radiation protection to different target groups on the Internet</i>			
<b>Kennzeichen</b>	<b>Beginn</b>	<b>Ende</b>	<b>Fördermittel</b>
3619S72402	01.12.2019	30.11.2020	EUR 96.893,-
<b>Forschungs- / Auftragnehmer</b>			
IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH			
<b>Projektleitung</b>	<b>Fachbetreuung BfS</b>	<b>verantwortlich für den Text</b>	
B. Oertel, D. Dametto	Dr. C. Böhmert / ST-RK	D. Dametto, Dr. C. Böhmert	

## 1. ZIELSETZUNG

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat u. a. die Aufgabe, die Bevölkerung interessensneutral und wissenschaftsbasiert über strahlenschutzbezogene Risiken zu informieren. Bürgerinnen und Bürger sollen durch die Risikokommunikation des BfS in die Lage versetzt werden, eigenständig und fundiert Risiken einzuschätzen und sich je nach Risiko angemessen verhalten zu können. Mit dem Projekt „Möglichkeiten des Zuschnitts von Risikoinformationen im Strahlenschutz auf unterschiedliche Zielgruppen im Internet“ untersuchte das IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH im Auftrag des BfS, wie sich spezifische Kommunikationsstrategien und -formate auf unterschiedliche Zielgruppen auswirken. Der thematische Fokus lag auf Informationen im Internet zum radioaktiven Edelgas Radon. Die Inhalation von Radon gilt nach der Inhalation von Tabakrauch als eine der wichtigsten Ursachen für Lungenkrebs in Deutschland. Es wurde ein sozialwissenschaftliches Experiment durchgeführt und Empfehlungen für die Risikokommunikationspraxis des BfS erarbeitet.

Das Projekt baute auf wissenschaftlichen Erkenntnissen von Risikokommunikationsstudien zu verschiedenen Gesundheitsverhaltensweisen auf. Diese ergaben, dass bei der Risikokommunikation sogenannte Interaktionseffekte auftreten: Die Rezipient\*innen verstehen beispielsweise je nach Vorwissen oder Prädisposition die Botschaft eines Textes unterschiedlich. Vor diesem Hintergrund war es die Aufgabe des Projektes, diese Interaktionseffekte am Beispiel des Strahlenschutzes zu analysieren, um so dazu beizutragen, Wissen so gut wie möglich zu vermitteln, um das Gesundheitsverhalten der Rezipient\*innen zu initiieren bzw. zu befördern.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das Vorhaben gliederte sich in 4 Arbeitspakete (AP):

- Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik (AP 1)
- Entwicklung von Untersuchungsdesign und - material (AP 2)
- Durchführung, Auswertung und Interpretation (AP 3)
- Erarbeitung von Empfehlungen (AP 4).

## 3. METHODIK

Vorbereitend zur empirischen Untersuchung wurden eine Literaturrecherche in wissenschaftlichen Datenbanken sowie eine Recherche von Praxisbeispielen im Internet durchgeführt. Das Ziel bestand darin, einen Überblick über wissenschaftliche Veröffentlichungen zur zugeschnittenen Risikokommunikation mit Bezug zum Strahlenschutz bzw. zu Umweltrisiken zu geben und unterschiedliche Strategien

der auf Zielgruppen zugeschnittenen Kommunikation aufzuzeigen. Darauf aufbauend wurde ein 2x2-Between-Subjects-Experiment konzipiert. Für das Experiment benötigte Untersuchungsmaterialien wurden ad hoc entwickelt. Diese umfassen insbesondere Erläuterungen zu Radon, zum Radonrisiko für die Gesundheit und zu möglichen Schutzmaßnahmen wie Lüften, Abdichten, Sanieren.

Die zwei Untersuchungsfaktoren des Experiments – die geografische Betroffenheit und das Eigentums- bzw. Mietverhältnis – gliedern sich jeweils in zwei Stufen und identifizieren so vier Zielgruppen, die dann mit „zugeschnittenen“ Informationsseiten adressiert wurden.

- **Geografische Betroffenheit**  
Zum einen müssen Bewohner\*innen der Gebiete, in denen die Radonbodenkonzentration durchschnittlich über dem Referenzwert von 100 kBq/m<sup>3</sup> liegt, spezifisch adressiert und über vorsorgliche Maßnahmen sowie über den Messvorgang aufgeklärt werden. Zum anderen weisen auch Bewohner\*innen, die in Gebieten wohnen, die angrenzend zu Gebieten mit hohen Konzentrationen liegen, in denen aber keine hohen Radonkonzentrationen – durchschnittlich unter dem Referenzwert von 100 kBq/m<sup>3</sup> – gemessen werden, zielgruppenspezifische Informationsbedarfe auf. In diesem zweiten Fall sollte die Bedeutung des Messvorgangs genau erläutert werden, damit die geografische Variabilität der Messdaten innerhalb dieser Gebiete die Bewohner\*innen nicht zu falschen Schlussfolgerungen verleitet.
- **Wohnungseigentum oder Mietverhältnis**  
Der zweite Faktor bezieht sich auf das Eigentums-/Mietverhältnis. Die Proband\*innen wurden danach differenziert, ob sie im eigenen Haus bzw. in der eigenen Wohnung oder zur Miete wohnen. Die Unterscheidung weist auf zwei zu unterscheidende Kommunikationslagen hin. Einerseits haben Hausbesitzer\*innen in der Regel eine langfristige Wohn- und Investitionsperspektive: Ihre Gesundheit ist folglich für einen längeren Zeithorizont mit der Immobilie verbunden. Auch tragen investive Maßnahmen zum Wert der Immobilie bei. Im Gegensatz hierzu ist die durchschnittliche Wohndauer von Mieter\*innen kürzer. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass das Entscheidungsverhalten der Mieter\*innen eher von einer kürzeren Wohnperspektive sowie einem unsicheren Investitionshorizont geprägt ist. Investive Maßnahmen werden in der Regel nicht im Rahmen von Mietverhältnissen durchgeführt. Für beide Gruppen gilt, dass Verhaltensanpassungen beispielsweise hinsichtlich des Lüftens zu einer Verringerung der Radoninnenluftbelastung beitragen.

Die Zielgruppen des Experimentdesigns sind in Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1: Experimentdesign**

angewandte Methoden	Faktor 2 – Ausprägung 1 Eigentümer*innen	Faktor 2 – Ausprägung 2 Mieter*innen
Faktor 1 – Ausprägung 1 Wohnort in Radon-Gebieten	Eigentümer*innen in Radon-Gebieten	Mieter*innen in Radon-Gebieten
Faktor 1 – Ausprägung 2 Wohnort angrenzend zu Radon-Gebieten	Eigentümer*innen angrenzend zu Radon-Gebieten	Mieter*innen angrenzend zu Radon-Gebieten

Im Rahmen des Experiments wurden zunächst mittels eines Vorher-Fragebogens die Einstellungen der Teilnehmenden vor der experimentellen Intervention gemessen. So sollten explorativ Einflussfaktoren identifiziert werden, die einen Effekt auf abhängige Variable erwarten lassen. Ebenfalls erfolgte mittels der Antworten auf die Fragen des Vorher-Fragebogens die Zuordnung der Proband\*innen zu einer der vier Zielgruppen. Anschließend wurden die Proband\*innen nach dem Zufallsprinzip der Untersuchungs- oder der Kontrollgruppe zugewiesen. Im ersten Fall setzten sich die Teilnehmenden im weiteren Verlauf des Experimentes mit den auf die jeweilige Zielgruppe zugeschnittenen Inhalten auseinander; im zweiten Fall befassten sie sich mit zielgruppenunspezifischen Informationen.

Schließlich wurde durch einen Nachher-Fragebogen der Effekt der „zugeschnittenen“ Informationsseiten hinsichtlich fünf relevanter Dimensionen der Risikokommunikation bzw. -wahrnehmung evaluiert. Dies sind:

- Informationsverständnis
- Risikowahrnehmung
- Handlungsbereitschaft
- Bewältigungsstrategie (bzw. Coping)
- Unsicherheit.

Da diese Dimensionen als Konstrukte bzw. als latente Variablen zu betrachten sind, die nicht durch ein einziges Item zu erschließen sind, wurden die jeweils zugehörigen Items in fünf den obigen Dimensionen zugehörigen Summenscores aggregiert.

Bei der Auswertung wurden die Ergebnisse der Untersuchungsgruppe, die eine auf sie zugeschnittene Informationsseite angezeigt bekamen, mit den Angaben der Kontrollgruppe verglichen, die keine zugeschnittenen Informationsseiten betrachteten (siehe Abbildung 1).

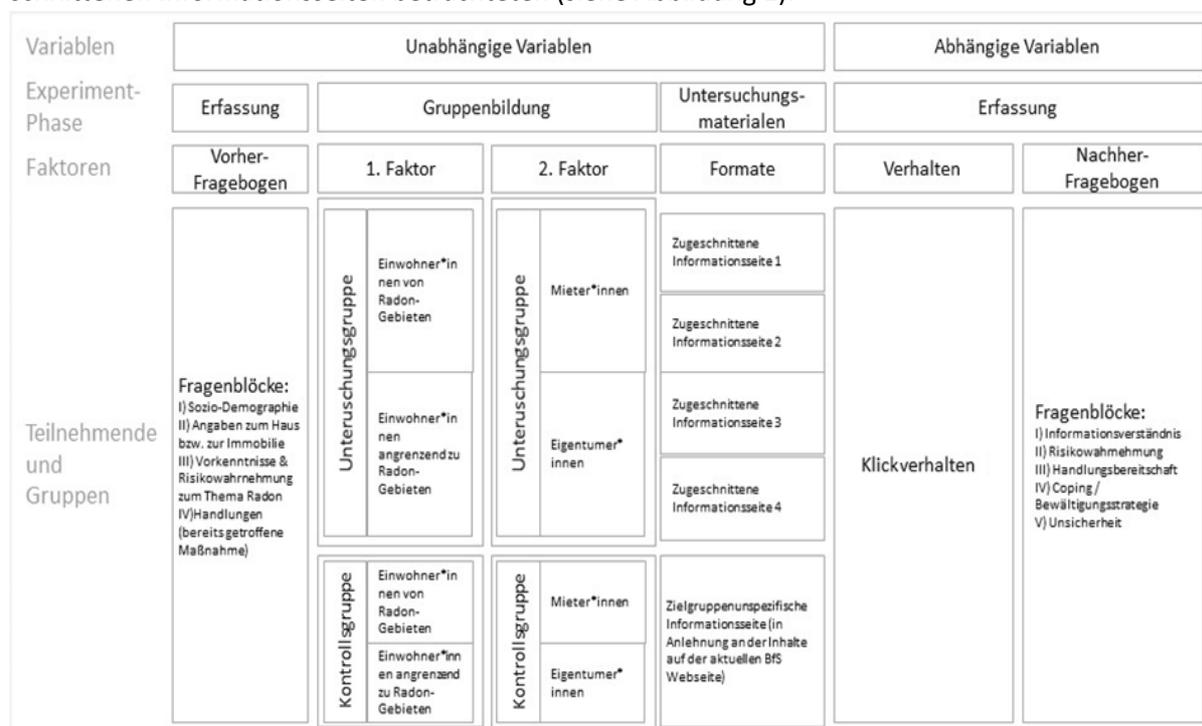


Abbildung 1: Untersuchungsdesign

#### 4. DURCHFÜHRUNG

Das Experiment wurde im Zeitraum vom 28. Juli bis 17. August 2020 online durchgeführt. Die Entscheidung zugunsten des Online-Formats begründet sich aus dem Bezug des Projektes auf die Informationsdarstellung im Internet. Für das Experiment wurden die Angaben von 293 Proband\*innen ausgewertet, davon wurden 193 der Untersuchungsgruppe und 100 der Kontrollgruppe zugewiesen. Durchschnittlich benötigten die Proband\*innen in beiden Gruppen jeweils gut 13 Minuten bis zum Abschluss. Dies kann als Indiz für eine gute Vergleichbarkeit von Untersuchungs- und Kontrollgruppe angesehen werden.

## 5. ERGEBNISSE

Die Analyse der Ergebnisse wurde von der Hypothese geleitet, dass zielgruppengerechte Risikoinformationen zu einem besseren Informationsverständnis sowie zu einer erhöhten Risikowahrnehmung und Handlungsbereitschaft führen können und dass sie die Bewältigungsfähigkeit stärken und Unsicherheiten mildern.

Die teststatistische Auswertung der Ergebnisse zeigte, dass sich der Effekt der „zugeschnittenen“ Informationsseiten auf die entsprechenden Zielgruppen nicht vom Effekt der zielgruppenunspezifischen Informationsseiten unterscheidet. Der einzig statistisch relevante Effekt besteht darin, dass Eigentümer\*innen im Vergleich zu Mieter\*innen handlungsbereiter sind.

Eine mögliche Erklärung der fehlenden Differenzierung im Antwortverhalten der Proband\*innen könnte darin bestehen, dass die Untersuchungsmaterialien sich weder grafisch noch auf struktureller Ebene sondern nur textlich voneinander unterscheiden. Dank dieses Experimentdesigns konnte zwar eine hohe Vergleichbarkeit gewährleistet werden, die jedoch ggf. zu keinem ausreichend trennscharfen Zuschnitt der Informationsseiten führte. Vor diesem Hintergrund ist eine Präzisierung der gewonnenen Erkenntnisse wie folgt erforderlich: Zugeschnittene Risikoinformationen in textlicher Form werden im Vergleich zu entsprechenden zielgruppenunspezifischen Texten von den Adressaten nicht „besser“ rezipiert.

Aus der explorativen Analyse konnten jedoch vier relevante Erkenntnisse gewonnen werden. Erstens trägt die Tatsache, dass Proband\*innen schon etwas über das Thema Radon sowie über den Informationsanbieter – das BfS – gehört hatten, positiv zum Informationsverständnis und zur Handlungsbereitschaft sowie zum Coping-Verhalten bei. Zweitens besteht unabhängig von den betrachteten Untersuchungsmaterialien ein Unterschied in der Handlungsbereitschaft zwischen Eigentümer\*innen und Mieter\*innen. Letztere sind weniger handlungsbereit und sehen sich, so auch aus den Freitextkommentaren ersichtlich, oft nicht in der Verantwortung, die Kosten für investive Maßnahmen zum Schutz vor Radon zu tragen. Drittens spielt auch die Wohnperspektive eine entscheidende Rolle: Proband\*innen mit einer längeren Wohnperspektive (länger als 10 Jahre) sind weniger unsicher und betrachten das Radonrisiko nach der Durchführung von Schutzmaßnahmen als geringer im Vergleich zu Proband\*innen mit einer mittleren Wohnperspektive (von 6 bis 10 Jahren). Diese letzte Gruppe erscheint auch im Vergleich zu den Proband\*innen mit einer kürzeren Wohnperspektive (bis 5 Jahren) unsicherer und schätzt das Radonrisiko tendenziell höher ein. Letztlich besteht ein negatives Verhältnis zwischen der Entstehung der Unsicherheit und dem Bildungsniveau: Proband\*innen mit einem höheren Bildungsabschluss stimmen tendenziell seltener Aussagen zu, die auf Unsicherheiten hinweisen.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Studie zeigen zunächst, dass der Zuschnitt von Risikoinformationen auf die vier spezifizierten Zielgruppen beim Risikothema „Radon“ keinen messbaren Effekt hatte. Daraus ergibt sich, dass zumindest beim Thema Radon kein Bedarf an einer entsprechenden Umgestaltung der Kommunikation des BfS besteht. Die Einschränkung der Autor\*innen, dass dies nur für den Zuschnitt auf Textebene gilt, ist für den Internetauftritt des BfS vermutlich nicht von Bedeutung, da ein kompletter Zuschnitt auch der Bildsprache auf einzelne Zielgruppen den Rahmen des Machbaren wohl sprengen würde.

In den explorativen Analysen konnte die Unterschiedlichkeit zwischen Mieter\*innen und Eigentümer\*innen insbesondere in Bezug auf ihre Handlungsbereitschaft herausgearbeitet werden. Hier ist zu überlegen, ob und wie auf die Dyade Mieter\*innen/Eigentümer\*innen eingewirkt werden könnte, so dass insgesamt mehr Schutzverhalten gezeigt wird. Eine Incentivierung von Schutzverhalten (insbesondere des Messens der Radonkonzentration) wäre hier eine Möglichkeit. Ob der Zuschnitt von Risikoinformationen auf Zielgruppen bei anderen Strahlenschutzthemen erfolgversprechend sein könnte, lässt sich aus dem vorliegenden Projekt mit seinen Spezifika nicht ableiten und wäre ggf. getrennt zu untersuchen.

**2.8 Themenbereich 08**  
**Nichtionisierende Strahlung**

**2.8 *Subject area 08***  
***Non-ionising radiation***



### **3. STATUSBERICHTE**

der vom BfS begleiteten Strahlenschutz-Forschungsvorhaben des BMU

### **3. STATUS REPORTS**

*of BfS supported BMU radiation protection research projects*

#### **3.1 Themenbereich 01 Natürliche Strahlenexposition**

#### **3.1 Subject area 01 Natural radiation exposure**

**Thema**

Fünftes Mortalitäts-Follow-Up (Todesursachen-Recherche) der Kohorte von ca. 60 000 Wismutbeschäftigten zum Stichtag 31.12.2018

**Subject**

*Fifth mortality follow-up of the cohort of approximately 60 000 former Wismut employees with cut-off date December 31st, 2018*

<b>Kennzeichen</b>	<b>Beginn</b>	<b>Ende</b>	<b>Fördermittel</b>
3618S12222	01.03.2019	31.05.2021	EUR 319.061,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**  
Kantar Health GmbH, München

<b>Projektleitung</b> Dr. C. Cholmakow-Bodechtel	<b>Fachbetreuung BfS</b> Dr. V. Deffner / WR 3	<b>verantwortlich für den Text</b> Dr. C. Cholmakow-Bodechtel, S. Mayer, T. Schieferstein, Dr. V. Deffner
---	---	--

## 1. ZIELSETZUNG

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) führt eine Kohortenstudie mit ca. 60 000 ehemaligen Beschäftigten der Firma Wismut durch. Ziel ist die Abschätzung des Gesundheitsrisikos durch ionisierende Strahlung, Staub und andere Noxen. Im Abstand von fünf Jahren werden die Daten der Kohortenmitglieder (Vitalstatus und ggf. Todesursache) aktualisiert. Im Rahmen des Ressortforschungsplans wurden bereits vier Mortalitäts-Follow-ups zu den Stichtagen 31.12.1998, 31.12.2003, 31.12.2008 und 31.12.2013 durchgeführt. Im vorliegenden Vorhaben wird in einem fünften Mortalitäts-Follow-up für den Zeitraum 1.1.2014 - 31.12.2018 der Vitalstatus von ca. 29 000 Kohortenmitgliedern der Wismut-Kohortenstudie zum Stichtag 31.12.2018 über Einwohnermeldeämter (EMA) oder Kreisarchive ermittelt. Für die im genannten Zeitraum verstorbenen Kohortenmitglieder wird zudem über Gesundheitsämter (GA) und Zentralarchive die Todesursache ermittelt. Dieses fünfte Mortalitäts-Follow-up verlängert den Beobachtungszeitraum der Kohortenstudie um weitere 5 Jahre.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das fünfte Follow-up der Wismut-Kohorte wird durchgeführt. Die Datenerhebung erfolgt gemäß der Vorgehensweise in den vier vorausgegangenen Follow-ups ohne Personenkontakte und wurde vom BfS datenschutzrechtlich abgestimmt. Alle benötigten Informationen werden über die jeweiligen offiziellen Stellen (EMA, Kreisarchive, GA und Zentralarchive) erhoben und in eine bereits bestehende Access-Datenbank eingearbeitet.

### 2.1 ERHEBUNG DES VITALSTATUS

Der Vitalstatus (d. h. die Information, ob Kohortenmitglieder noch leben oder seit dem 1.1.2014 verstorben sind) wird für 28 638 Personen ermittelt.

### 2.2 ERHEBUNG DER TODESURSACHE FÜR VERSTORBENE PERSONEN

Für alle verstorbenen Personen der Kohorte sollen Todeszeitpunkt und Todesursache ermittelt werden. Die Todesursache wird nach ICD<sup>1)</sup>-10 verschlüsselt.

<sup>1)</sup> Internationale statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme

### 3. METHODIK

Für 28 638 Kohortenmitglieder, die im vierten Follow-up als lebend ermittelt wurden, werden Auskünfte über ihren Vitalstatus bei den zuständigen EMA der letzten bekannten Adresse zum Stichtag 31.12.2018 eingeholt. Die Rückmeldungen werden wie nachfolgend beschrieben weiterbearbeitet. Ist die angefragte Person wie angegeben oder mit einer Umzugsadresse in der Gemeinde gemeldet, gilt die Person als lebend ermittelt und die Recherche für die betreffende Person in diesem Follow-up ist abgeschlossen. Ist eine Person verstorben, werden Sterbedatum und Sterbeort dokumentiert. Bei Rückmeldung des Verzugs in eine andere Gemeinde wird eine Folgeanfrage an das für den neuen Wohnort zuständige EMA gestellt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die Person als lebend oder verstorben ermittelt oder als Lost-to-Follow-up (unbekannt verzogen/von Amts wegen abgemeldet, ins Ausland verzogen oder im Melderegister nicht zu ermitteln) vom EMA gemeldet wird. Die Ergebnisse der Recherche werden in der Datenbank dokumentiert.

Für alle als verstorben gemeldeten Personen wird in einem nächsten Schritt die Todesursache ermittelt. Auf Basis der Angaben der EMA (insbesondere der Angaben zu Sterbedatum und Sterbeort) werden die zuständigen GA gebeten, Kopien der Todesbescheinigungen zuzusenden. Aus Gründen des Datenschutzes ersetzen die GA die Namen auf den Kopien der Todesbescheinigungen durch die Stichprobennummer und versenden diese direkt an das BfS. Der Eingang der Todesbescheinigungen wird in der Datenbank dokumentiert. Die Todesursachen werden anhand der Todesbescheinigung unter Berücksichtigung von Datenschutz und Datensicherheit nach ICD-10 verschlüsselt.

### 4. DURCHFÜHRUNG

Die folgende Beschreibung der Durchführung bezieht sich auf das Berichtsjahr 2020.

Bei Eingang der Rückmeldungen der EMA wurden diese in der Datenbank erfasst. Standen Rückmeldungen der EMA längere Zeit aus, wurde schriftlich und telefonisch erinnert. Für alle Personen, die als „verzogen“ zurückgemeldet wurden, erfolgte der Versand einer Folgeanfrage.

Ab Februar 2020 wurden die Anfragen an die GA eingereicht mit Bitte um Zusendung einer Kopie der Todesbescheinigungen direkt an das BfS. Um den Eingang der Kopien der Todesbescheinigungen zu kontrollieren und eventuell nötige Erinnerungsschreiben an die GA zu versenden, übermittelte das BfS Kantar monatlich eine Übersicht über alle eingegangenen Kopien der Todesbescheinigungen. Die Prüfung der korrekten Zuordnung der Todesbescheinigungen zu den Kohortenmitgliedern führte Kantar an bis dato acht Terminen in den Räumen des BfS durch. Parallel erfolgt die Kodierung der Todesursachen nach dem ICD-10-Schlüssel.

### 5. ERGEBNISSE

Folgende Ergebnisse beziehen sich auf den Stand zum 10.02.2021.

Mit dem Vermerk „als lebend ermittelt“ ist die EMA-Recherche für 23 663 Personen (82,6 % der im fünften Follow-up zu recherchierenden Personen) abgeschlossen. „Als lebend ermittelt“ gelten alle Personen, die unter der bekannten Adresse gemeldet oder nach Umzug (innerhalb der Gemeinde) bzw. Verzug (in eine andere Gemeinde) ermittelt worden sind. Noch nicht abgeschlossen ist die EMA-Recherche bei 365 (1,3 %) Kohortenmitgliedern. Davon entfallen 346 Auskünfte auf das EMA Berlin und 19 Auskünfte auf andere Ämter mit weiterhin als „verzogen“ gemeldeten Personen. 4 507 (15,7 %) Personen wurden als „verstorben“ gemeldet. Ein Anteil von 0,4 % der im fünften Follow-up zu recherchierenden Personen konnte nicht nachverfolgt werden, da sie im Melderegister nicht zu ermitteln waren, ins Ausland verzogen oder unbekannt verzogen sind.

Zur Ermittlung der Todesursache der verstorbenen Kohortenmitglieder wurden 316 GA angeschrieben. Das BfS meldete zum 22.12.2020 den Eingang von 3 647 Rückmeldungen (Kopien von Todesbescheinigungen und andere Bescheide). Damit sind 80,9 % Rückmeldungen zu den angefragten Todesbescheinigungen eingetroffen. 3 249 Todesursachen sind nach ICD-10 verschlüsselt worden. Für 3 594 Todesbescheinigungen wurde geprüft, ob sie korrekt dem jeweiligen verstorbenen Kohortenmitglied zuge-

ordnet wurden. 3 580 Todesbescheinigungen wurden erfolgreich verifiziert. Zu 16 Verstorbenen ist kein Totenschein erhältlich (beim GA nicht auffindbar oder nicht mehr archiviert).

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Für den Abschluss der EMA-Recherche fehlen nach wie vor die Melderegisterauskünfte des EMA Berlin. Da bisherige Anfragen erfolglos waren, sollen diese Auskünfte nun gebührenpflichtig über einen externen Dienstleister eingeholt werden. Dazu werden aktuell die Rahmenbedingungen und datenschutzrechtlichen Auflagen vereinbart. Bei Vertragsabschluss werden die Anfragen zu den noch ausstehenden Personen umgehend eingereicht.

Unter dem Einfluss von personellen Engpässen bei den GA auf Grund der Corona-Pandemie können die Anfragen an die GA teilweise nicht bearbeitet werden und die Rückläufe der Todesbescheinigungen gehen nur zögerlich ein.

Die Erfassung der eingehenden Todesbescheinigungen in der Datenbank, deren Verifizierung und die Kodierung nach ICD-10 erfolgen fortlaufend. Bei den Verstorbenen, die auf Grund von Unstimmigkeiten nicht erfolgreich verifiziert werden konnten, werden Rückfragen sowohl bei EMA als auch GA durchgeführt.

**Thema**

Ermittlung der Unsicherheit in der Strahlenexpositionsabschätzung in der Wismut-Kohorte - Teil 2

**Subject***Determination of uncertainties of radiation exposure assessment in the Wismut cohort - part 2***Kennzeichen**

3618S12223

**Beginn**

01.01.2019

**Ende**

30.04.2021

**Fördermittel**

EUR 320.869,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Ludwig-Maximilians-Universität München, Institut für Medizinische Informationsverarbeitung, Biometrie und Epidemiologie

**Projektleitung**

Dr. S. Hoffmann

**Fachbetreuung BfS**

Dr. V. Deffner / WR 3

**verantwortlich für den Text**

Dr. S. Hoffmann, Dr. V. Deffner

## 1. ZIELSETZUNG

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die in der Wismut-Kohorte auftretenden Unsicherheiten in der Expositionsabschätzung durch Radon und seine Folgeprodukte zu quantifizieren und in der Risikoschätzung für Lungenkrebs durch Radon sowohl für die gesamte Kohorte als auch für die Teilkohorte mit Beschäftigungsbeginn ab 1960 zu berücksichtigen. Dabei sollen die Auswirkungen der verschiedenen auftretenden Unsicherheiten bzw. Messfehler auf die Risikoschätzer beschrieben und nachvollzogen werden. Zusätzlich soll durch die Berücksichtigung der Unsicherheiten die Belastbarkeit der bisherigen Schätzer für das Lungenkrebsrisiko durch Radon in der Wismut-Kohorte beurteilt werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Die folgende Beschreibung der Einzelzielsetzung bezieht sich auf das Berichtsjahr 2020.

### 2.1 ENTWICKLUNG EINER STATISTISCHEN METHODE ZUR BERÜCKSICHTIGUNG DER RELEVANTEN UNSICHERHEITEN IN DER RISIKOMODELLIERUNG (AP 2)

In AP 2 werden die methodischen Grundlagen für die Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der statistischen Risikomodellierung mit Proportional-Hazard-Modellen für die Wismut-Kohorte erarbeitet. Um die komplexe Struktur der Expositionsunsicherheiten in der Wismut-Kohorte abzubilden und zu berücksichtigen, müssen aktuell existierende statistische Methoden erweitert werden. Insbesondere wird ein Messfehlermodell speziell für die Wismut-Kohorte hergeleitet. Außerdem werden die Ziele, das Design und der datengenerierende Prozess der Simulationsstudie beschrieben, die in AP 3 durchgeführt wird.

### 2.2 SIMULATIONSSTUDIE ZUR SYSTEMATISCHEN UNTERSUCHUNG DER STATISTISCHEN METHODE (AP 3)

Die in AP 2 entwickelte Methode zur Berücksichtigung von Expositionsunsicherheiten in der Risikomodellierung wird in AP 3 implementiert und anhand einer Simulationsstudie untersucht. Die Simulationsstudie orientiert sich an Daten der Wismut-Kohorte und zielt darauf ab, die neu entwickelte Methode mit der naiven Risikoschätzung und mit anderen Verfahren zu vergleichen. Zudem werden die Anwendbarkeit und die praktische Relevanz der entwickelten Methode für die Daten der Wismut-Kohorte überprüft. Außerdem wird in der Simulationsstudie untersucht, inwiefern sich falsche Annahmen sowie Unsicherheiten mit verschieden komplexer Messfehlerstruktur auf die Risikoschätzer in einem Proportional-Hazard-Modell auswirken.

## 2.3 ANWENDUNG DES ENTWICKELTEN VERFAHRENS AUF DIE DATEN DER WISMUT-KOHORTE (AP 4)

In AP 4 soll die entwickelte Methode zur Berücksichtigung von Unsicherheiten für verschiedene Risiko-Modelle auf die Daten der Wismut-Kohorte (gesamte Kohorte, Teilkohorte mit Beschäftigungsbeginn ab 1960) angewandt werden. Die berechneten Risikoschätzer für das Lungenkrebsrisiko durch Radon sollen mit den Ergebnissen aus früheren Berechnungen ohne Berücksichtigung von Expositionsunsicherheiten verglichen werden. Abschließend soll die entwickelte Methode hinsichtlich ihrer Eignung für die Wismut-Kohorte sowie ihrer allgemeinen Anwendbarkeit beurteilt werden.

## 3. METHODIK

Das vorliegende Forschungsvorhaben baut auf dem Forschungsvorhaben „Ermittlung der Unsicherheiten in der Strahlenexpositionsabschätzung in der Wismut-Kohorte – Teil 1“ (3616S12223) auf. In diesem Vorhaben wurde 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 werden Erkenntnisse aus Arbeiten für die französische Uranbergarbeiter-Kohortenstudie genutzt, für die vergleichbare Analysen durchgeführt wurden.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Die folgende Beschreibung der Durchführung bezieht sich auf das Berichtsjahr 2020.

### 4.1 ENTWICKLUNG EINER STATISTISCHEN METHODE ZUR BERÜCKSICHTIGUNG DER RELEVANTEN UNSICHERHEITEN IN DER RISIKOMODELLIERUNG

Die statistische Methode zur Berücksichtigung der in der Wismut-Kohorte relevanten Expositionsunsicherheiten bei der Risikoanalyse für Lungenkrebs durch Radon soll geeignet sein, die spezielle Struktur der Unsicherheiten als eine Mischung unterschiedlicher Fehlertypen und -größen zu berücksichtigen. Dazu werden schrittweise komplexer werdende Messfehlermodelle entwickelt, die in einem hierarchischen Ansatz mit einem Risikomodell und einem Expositionsmodell kombiniert werden. Die Risikoschätzer und Vertrauensintervalle dieses hierarchischen Modells werden durch Bayes-Inferenz mit Hilfe eines MCMC<sup>1)</sup>-Algorithmus bestimmt.

### 4.2 SIMULATIONSSTUDIE ZUR SYSTEMATISCHEN UNTERSUCHUNG DER STATISTISCHEN METHODE

Die Daten für die Simulationsstudie werden auf der Basis eines vom BfS zur Verfügung gestellten, fiktiven Datensatzes generiert, der sich an den individuellen Daten der Wismut-Kohortenstudie orientiert. Dabei wird die Exposition durch Radon und seine Folgeprodukte als zeitvariierende Variable betrachtet. Der in AP 2 entwickelte bayesianische Ansatz zur Berücksichtigung von Messfehlern wird durch die Simulationsstudie mit klassischen Ansätzen wie „*Regression Calibration*“ oder „*Simulation Extrapolation*“ verglichen. Datensituation und Messfehlermodell werden dabei schrittweise komplexer gestaltet.

## 5. ERGEBNISSE

In AP 2 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, Messungen der Radonfolgeprodukte) und Arbeitsbereiche der Wismut-Beschäftigten (unter Tage, Aufbereitung, Tagebau). Außerdem wurden Messfehlermodelle unterschiedlicher Komplexität beschrieben. Ein bayesianischer hierarchischer Ansatz wurde zur Be-

<sup>1)</sup> Markow-Chain-Monte-Carlo

rücksichtigung von Unsicherheiten in der Expositionsabschätzung in der Wismut Kohorte entwickelt und implementiert. Mit diesem Ansatz können Risikoschätzer und die zugehörigen Vertrauensintervalle unter der Berücksichtigung der Expositionsunsicherheiten berechnet werden. Zudem beschreibt der Zwischenbericht zu AP 2 das Design und den datengenerierenden Prozess der Simulationsstudie, die in AP 3 durchgeführt wird. Die Szenarien der Simulationsstudie umfassen Daten mit Messfehlern von zunehmender Komplexität, statistische Modelle zur Berücksichtigung von Messfehlern von unterschiedlicher Komplexität und verschiedene statistische Verfahren zur Berücksichtigung von Messfehlern (bayesianischer hierarchischer Ansatz, *Regression Calibration*, *Simulation Extrapolation*).

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

AP 3 ist entsprechend der unter 4.2 formulierten Arbeitsschritte in Bearbeitung. Die rechenintensiven Simulationen werden durchgeführt. Danach werden die Ergebnisse aufbereitet. Zudem wird die Antwort des BfDI<sup>1)</sup> auf einen Antrag des BfS auf Nutzung der erweiterten individuellen Daten der Wismut-Kohorte erwartet. Bei positiver Antwort wird die Datenübergabe für AP 4 vorbereitet, in dem das entwickelte Verfahren auf die Daten der Wismut-Kohorte angewandt wird.

---

<sup>1)</sup> Bundesbeauftragter für den Datenschutz und die Informationsfreiheit

**Thema**

Ermittlung der aktuellen Verteilung der Radonkonzentration in deutschen Wohnungen

**Subject***Determination of the distribution of indoor radon concentration in Germany***Kennzeichen**

3618S12261

**Beginn**

01.11.2018

**Ende**

30.09.2021

**Fördermittel**

EUR 670.327,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Sachverständigenbüro Dr. Joachim Kemski

**Projektleitung**

Dr. J. Kemski

**Fachbetreuung BfS**

Dr. B. Hoffmann / UR 2

**verantwortlich für den Text**

Dr. J. Kemski

## 1. ZIELSETZUNG

Im Zuge der Umsetzung des neuen Strahlenschutzgesetzes sollen u. a. Regelungen zum Schutz der Bevölkerung vor Radon in Innenräumen getroffen werden. Hierbei ist zunächst eine Bewertung des Ist-Zustandes der Radonexposition der Bevölkerung notwendig. Ziel des Vorhabens ist die Durchführung einer bevölkerungsrepräsentativen Erhebungsmessung zur Radonkonzentration in Aufenthaltsräumen. Diese soll in 6 000 Wohnungen mit jeweils einer Radonmessung im Wohn- und Schlafzimmer stattfinden. Es sollen Jahresmessungen mit Langzeitexposimetern nach DIN ISO 11665-4 durchgeführt werden. Ergänzend sollen Daten zur Bauweise und Nutzung erhoben werden, ebenso wie Informationen, mit deren Hilfe im Nachgang die Repräsentativität der Erhebung bewertet werden kann. Für alle Phasen der Projektabwicklung ist im Vorfeld ein Datenschutzkonzept zu entwickeln.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Folgende Einzelziele sollten im Zuge des Vorhabens als getrennte Arbeitspakete bearbeitet werden:

- Recherche zum Design bevölkerungsrepräsentativer Studien inkl. Überlegungen zur Teilnehmerauswahl
- Erstellung eines Datenschutzkonzeptes
- Planung, Organisation und Durchführung der eigentlichen Messungen inkl. abschließender Bewertung und Berichtserstellung.

## 3. METHODIK

Im Vorfeld der eigentlichen Messungen soll eine Recherche zur Durchführung repräsentativer Messungen - im besten Fall natürlich zu Radon in der Raumluft - durchgeführt werden. Die Recherche soll als Basis dienen, die eigene geplante Vorgehensweise zu optimieren. Ein wichtiger Punkt hierbei ist die Frage, wie die Repräsentativität der ausgewählten Haushalte/Teilnehmer beurteilt werden kann.

Die Planung, Organisation und Durchführung der Messungen selbst muss schrittweise erfolgen. Bei der praktischen Umsetzung müssen die datenschutzrechtlichen Aspekte berücksichtigt werden.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Die Recherche zu repräsentativen (Innenraum-) Messungen wurde durchgeführt. Ebenso wurde das Datenschutzkonzept erstellt und vom Auftraggeber als geeignet bewertet. Die beiden Arbeitspakete sind vollständig abgeschlossen.

Die Teilnehmersuche wurde in der geplanten Art und Weise durchgeführt und nach Erreichen der gewünschten Teilnehmerzahl Ende Februar 2020 beendet.

## 5. ERGEBNISSE

Die Organisation und Durchführung der Messungen sowie die Auswertung der Radonmessungen erfolgte in mehreren Schritten. Die Messungen selbst sind für die Teilnehmer kostenlos.

Mittels eines Mailings wurden zunächst Haushalte angeschrieben, die zufällig aus einer kommerziellen Datenbank ausgewählt wurden. Einschränkende Vorgaben hinsichtlich Region, Gebäude, Bauweise oder Nutzung wurden ausdrücklich nicht gemacht. Grundlage für die Verteilung der 6 000 Haushalte war die Verwaltungsstruktur der Kreise bzw. kreisfreien Städte in Deutschland (ca. 400 Stück). Da auf diese Weise die gewünschte Anzahl von Teilnehmern nicht erreicht wurde, wurde anschließend zusätzlich über Aufrufe im Internet und in der überregionalen Presse u. ä. nach Teilnehmern gesucht. In deutlich unterrepräsentierten Gebieten wurden auch gezielte lokale Presseaufrufe geschaltet.

Nach Vorliegen der Anmeldungen potenzieller Teilnehmer wurden die Exposimeter per Post zugeschickt. Die Messungen selbst sollten in Aufenthaltsräumen stattfinden; weitere Vorgaben (z. B. Etage) wurden nicht gemacht. Die Versendung startete im Juli 2019, die letzten Messgeräte wurden Ende Februar 2020 verschickt.

Die Teilnehmer wurden gebeten, über die Internetseite des Auftragnehmers Informationen zum Gebäude und den Messräumen zu geben, die später für die Bewertung der Messergebnisse sowie die statistische Auswertung der Datensätze genutzt werden sollen.

Im Zuge dieser Datenerfassung wurde u. a. der Messbeginn erfasst. Entsprechend dieses Datums wurden die Teilnehmer 1 Jahr später an die Rücksendung der Exposimeter erinnert. Dementsprechend gelangten im Juli 2020 die ersten Messgeräte zur Laborauswertung zurück. Die sukzessive Rücksendung läuft noch bis Ende Februar/Anfang März 2021.

Bei Teilnehmern, die nach der Versendung keine Daten auf der Internetseite eingegeben hatten, wurde ca. 4 bis 6 Wochen später nachgefragt, ob sie mit den Messungen begonnen haben. In derselben Weise wurde bei der Rücksendung verfahren. Auch hier wurde wenige Wochen nach der Erinnerung nachgefragt, wenn die Exposimeter nicht zur Auswertung zurückgeschickt wurden.

Zudem wurde versucht, unvollständige Daten der Teilnehmer durch gezielte Nachfragen (z. B. per Mail und/oder Telefon) zu vervollständigen.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Rücksendung der Messgeräte soll im Februar/März 2021 beendet werden. Es ist davon auszugehen, dass im April 2021 alle bis dahin zurückgesendeten Exposimeter ausgewertet worden sind.

Anschließend werden die Daten zusammengestellt, aufbereitet und statistisch ausgewertet. Hierbei wird u. a. auch die Repräsentativität der teilnehmenden Haushalte über einen Vergleich mit Daten des letzten bundesdeutschen Zensus bewertet.

**Thema**

Entwicklung von Indikatoren in einem Kriterienkatalog und Durchführung einer Ersterhebung zur Feststellung der Ist-Situation für die Bewertung des nationalen Radonmaßnahmenplans

**Subject**

*Development of indicators in a catalogue of criteria and initial survey of the actual situation of the national radon action plan*

<b>Kennzeichen</b>	<b>Beginn</b>	<b>Ende</b>	<b>Fördermittel</b>
3619S12272	01.08.2019	07.01.2022	EUR 160.158,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**  
Öko-Institut e.V., Büro Darmstadt

**Projektleitung**  
C. Küppers

**Fachbetreuung BfS**  
J. Kaschubowski / UR 2

**verantwortlich für den Text**  
C. Küppers, V. Ustohalova

## 1. ZIELSETZUNG

Der vom Bundesumweltministerium veröffentlichte Radonmaßnahmenplan enthält die Maßnahmen und Ziele für den Prozess der Reduzierung der Exposition durch Radon. Der Radonmaßnahmenplan soll evaluiert und regelmäßig aktualisiert werden. Das Forschungsvorhaben dient dem Zweck, die Grundlagen zu erstellen, damit die Evaluierung nach objektivierte Maßstäben vorbereitet und durchgeführt werden kann.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Die Gesamtzielsetzung gliedert sich in insgesamt drei Einzelzielsetzungen.

### 2.1 ENTWICKLUNG VON INDIKATOREN FÜR DIE EVALUATION DES RADONMAßNAHMENPLANS

Es sollen Indikatoren entwickelt werden, anhand derer der Erfolg der Umsetzung der einzelnen Maßnahmen des Radonmaßnahmenplans zukünftig bewertet werden kann.

### 2.2 ERMITTLUNG DES STATUS QUO DER ZUSTÄNDIGEN BEHÖRDEN

Durch das Strahlenschutzgesetz werden bestimmte Aufgaben des Radonschutzes in die Verantwortlichkeit „zuständiger Behörden“ gelegt. Um einen Vergleichsmaßstab für den zukünftig erreichten Stand der Umsetzung der geplanten Maßnahmen zu erhalten soll der Status Quo dieser Behörden in Bezug auf ihre Aufgaben ermittelt werden.

### 2.3 ERMITTLUNG DES STATUS QUO IN DER BEVÖLKERUNG

Die Sensibilisierung der Bevölkerung für das Thema Radonschutz und die entsprechende Kenntnisvermittlung sind wichtige Bestandteile des Radonmaßnahmenplans. Um den Umfang erzielter Fortschritte bewerten zu können soll diesbezüglich der Status Quo ermittelt werden.

## 3. METHODIK

### 3.1 AUFBAU VON INDIKATORENSÄTZEN

Es werden drei Sätze von Indikatoren für die Evaluation des Radonmaßnahmenplans entwickelt. Die Indikatoren sind dabei objektiv feststellbare Größen. Die Indikatorensätze unterscheiden sich insbesondere je nach Zeitpunkt, wann eine Abfrage erfolgt und ein Ziel erreicht sein soll, sowie je nach Ausmaß des erzielten Fortschritts, was als Voraussetzung einer erfolgreichen Umsetzung des Plans gelten soll.

Die drei Indikatorensätze stellen insgesamt unterschiedlich hohe Anforderungen. Einer dieser Sätze kann für die Evaluation ausgewählt werden.

### **3.2 BEFRAGUNG AUSGEWÄHLTER PERSONEN ZUSTÄNDIGER BEHÖRDEN**

Auf Basis des Stands der ermittelten Radonsituation (Karten des Radonpotenzials und der Radon-Konzentration im Boden in Deutschland) werden Bundesländer mit einer großflächigen und hohen sowie mit vereinzelt kleineren Flächen mittlerer und höherer Radonbelastung identifiziert. Es wird eine Recherche zur Struktur und Zuständigkeiten einzelner Landesbehörden durchgeführt. Die zu befragenden Bundesländer werden so ausgewählt, dass ein repräsentativer und ausgewogener Gesamtüberblick über die Radonsituation und die zuständigen Behördenstrukturen in Deutschland gegeben werden kann. Vorab wird den befragten Personen ein Fragebogen zur Verfügung gestellt, dessen Fragen bei Interviews von maximal 2 bis 3 Stunden Dauer besprochen werden.

### **3.3 REPRÄSENTATIVE UMFRAGE IN RADONVORSORGE GEBIETEN**

Der Status Quo bezogen auf die Bevölkerung wird durch eine repräsentative Umfrage in Radongebieten ermittelt. Ein Fragebogen wird entwickelt und mit Hilfe eines Pre-Tests auf Verständlichkeit geprüft und ggf. angepasst. Die Befragung findet als Telefonumfrage statt. Die Telefonstichprobe erfolgt über das sogenannte RDD (Random-Digit-Dialing)-Verfahren, in welchem die Telefonnummern zufällig erzeugt und mit gültigen Telefonnummern validiert werden.

## **4. DURCHFÜHRUNG**

### **4.1 ABLEITUNG UND DARSTELLUNG DER INDIKATOREN**

Der Radonmaßnahmenplan wurde im Hinblick auf die Interdependenzen der einzelnen Maßnahmen, auf die Akteure und Zielgruppen der Einzelmaßnahmen sowie auf die zeitliche Abfolge bei seiner Abarbeitung analysiert. Daraus wurden Indikatoren zur Evaluation des Radonmaßnahmenplans entwickelt und in tabellarischer Form mit folgenden Angaben dargestellt: anhand welcher Größe die Bewertung im Rahmen der Evaluation erfolgt (Indikator), Methode zur Ermittlung des Indikators (z. B. Befragung oder Messungen), auf welche Maßnahme sich der Indikator bezieht und das Jahr oder die Jahre der Anwendung des Indikators. Die Indikatoren wurden dann im Hinblick auf die Anforderungen auf die Zielvorgaben jeweils in drei Indikatorensätzen - mit niedrigen, mittleren und hohen Anforderungen - tabellarisch abgebildet.

### **4.2 BEFRAGUNG ZUSTÄNDIGER BEHÖRDEN**

Für die Befragung wurden Behörden und Institutionen aus Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Nordrhein-Westfalen und Sachsen ausgewählt. Ursprünglich waren persönliche Interviews geplant, auf Grund der Covid-19-Pandemie fanden drei Interviews von insgesamt fünf online statt. Nach der Durchführung der Interviews mit den Bundesländern wurden die Antworten ausgewertet und nach einer Synthese der Status Quo in einer vergleichenden Darstellung in einem Zwischenbericht beschrieben.

## **5. ERGEBNISSE**

### **5.1 KRITERIENKATALOG**

Ein Kriterienkatalog für die Evaluation wurde in Form von 28 Indikatoren hergeleitet. Von diesen Indikatoren sollten 23 einmalig angewendet werden, insbesondere für eine Zwischenevaluation oder im Jahr 2030 vor einer Aktualisierung des Radonmaßnahmenplans. Vier der Indikatoren sollten für beide genannten Zwecke eingesetzt werden. Ein Indikator dient der Erfassung einer Datenentwicklung und sollte bis 2030 jährlich angewandt werden.

## 5.2 BEFRAGUNG ZUSTÄNDIGER BEHÖRDEN

Die Untersuchungsergebnisse umfassen die Kooperation mit den Bundesbehörden und Austausch unter den Ländern, den Stand der Entwicklung der Strategien zur Informiertheit der Bevölkerung, die Etablierung der Bildungsmaßnahmen im Bereich Radonschutz sowie gute Beispiele der institutionellen Strukturen als auch den Einfluss negativer Faktoren wie der Covid-19-Pandemie. Ein weiterer wichtiger Punkt war die Entwicklung der Radonprognose und die Ausweisung der Radonvorsorgegebiete.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Im Rahmen der dritten Einzelzielsetzung erfolgt 2021 eine repräsentative Bevölkerungsumfrage in drei ausgewiesenen Radonvorsorgegebieten. Nach der Umsetzung der Befragung erfolgt die Auswertung der Fragebögen inklusive einer statistischen Analyse und die Synthese in einem Bericht.

**Thema**

Natürliche Radionuklide in Trinkwasser in der Bundesrepublik Deutschland – Erfassung und Evaluierung der im Kontext der Richtlinie 2013/51/Euratom erhobenen TrinkwV Anlage 3a-Daten

**Subject**

*Natural radionuclides in drinking water in the Federal Republic of Germany - collection and evaluation of the Drinking Water Ordinance Annex 3a Data Collected in the context of Directive 2013/51/Euratom*

Kennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3620S12281	01.08.2020	31.07.2022	EUR 366.512,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln

**Projektleitung**

Dr. A. Artmann

**Fachbetreuung BfS**

Dr. P. Hofmann / UR 4

**verantwortlich für den Text**

Dr. A. Artmann

## 1. ZIELSETZUNG

Im Rahmen dieses Vorhabens sind die Daten von ca. 15 000 Wasserversorgungsanlagen hinsichtlich des Vorkommens natürlicher Radionuklide im Trinkwasser (TrinkwV Anlage 2, Anlage 3a) abzufragen. Die Datenabfrage hat bei den ca. 4 200 öffentlichen Wasserversorgungsunternehmen zu erfolgen. Ergänzt werden die Daten durch Informationen zur Geologie des Grundwasserleiters, zur Herkunft des genutzten Trinkwassers, zur Wasseraufbereitung im Wasserwerk und zu den zeitgleich erhobenen chemischen Parametern (TrinkwV Anlage 2, Anlage 3 Teil I). Im Mittelpunkt dieses Vorhabens steht die Zusammenführung und Validierung der Daten in einer Datenbank.

Die zentrale Erfassung der Daten ermöglicht einen umfänglichen räumlichen und zeitlichen Überblick über die Radionuklidgehalte natürlichen Ursprungs im Trinkwasser in Deutschland. Mit Hilfe der Daten kann dann der Einfluss auf die Strahlenexposition der Bevölkerung detaillierter bewertet und hieraus erforderlichenfalls Schutzkonzepte abgeleitet werden. Weiterhin könnten dezidierte Empfehlungen für Inhaber/Betreiber von Wasserversorgungsanlagen sowie der zuständigen Gesundheitsämter ausgesprochen werden, die Bevölkerung spezifischer informiert und Gremienarbeit (z. B. WHO, IAEA) effektiver begleitet werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Folgende technische Einzelziele sind für einen erfolgreichem Abschluss des Vorhabens relevant:

- Recherche und Zusammenstellung der Wasserversorgungsunternehmen in Deutschland
- Entwicklung eines Fragebogens
- Entwicklung eines Datenbankkonzeptes
- Erstellung der Datenbank
- Durchführung der Datenerhebung
- Validierung und Auswertung der erhobenen Daten
- Veröffentlichung der Vorhabensergebnisse

## 3. METHODIK

Die Arbeiten im Rahmen des Forschungsvorhabens werden in den folgenden Arbeitspaketen (AP) durchgeführt:

- Strategie zur Datenabfrage und Datenbankkonzept (AP 1)

- Bestandsaufnahme über die Anzahl und Lokalität der öffentlichen Wasserversorgungsanlagen in Deutschland (AP 1.1)
- Erstellung eines Konzeptes für eine Oracle Datenbank (AP 1.2)
- Erstellung eines Kurzberichtes über die Ergebnisse des AP 1 (AP 1.3)
- Erstellung des Fragebogens und der Datenbank (AP 2)
  - Erstellung des Fragebogens (AP 2.1)
  - Erstellung der Datenbank mit Oracle Application Express (APEX) (AP 2.2)
  - Erstellung der elektronischen Version des Fragebogens (AP 2.3)
- Durchführung der Abfrage (AP 3)
- Bewertung und Auswertung der Daten (AP 4)
- Ergebnisdarstellung und Abschlussbericht (AP 5).

## 4. DURCHFÜHRUNG

Im AP 1.1 wurden die geographischen Grundlagen recherchiert. Aus der Regionaldatenbank Deutschland wurde die Tabelle 32271-01-01-5, Stichtag 01.01.2019 heruntergeladen. Insgesamt enthielt die Tabelle 13 385 Datensätze zu Bundesland, Länderschlüssel, Gemeindegemeinschaft und Name der Gemeinde in Deutschland.

Zur Bestandsaufnahme der kommunalen Wasserversorgung in Deutschland wurden Kontakte zum Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW) sowie zum DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.) aufgenommen. Bei weiteren Recherchen wurde der Abschlussbericht und der Anlagenband des Berichtes des „Bundesministeriums für Gesundheit und des Umweltbundesamtes an die Verbraucherinnen und Verbraucher über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasser) in Deutschland 2014 – 2016“ aufgefunden und ausgewertet. Zu ca. 2 500 Wasserversorgungsgebieten in Deutschland wurden dem Anlagenband die folgenden Informationen entnommen und datentechnisch aufbereitet:

- Name des Wasserversorgungsgebietes
- Code des Wasserversorgungsgebietes
- versorgte Gemeinden
- versorgte Bevölkerung
- abgegebenes Wasservolumen pro Tag (m<sup>3</sup>/d).

Die bisher zusammengestellten Informationen wurden um Informationen zu Kontaktmöglichkeiten wie Postanschrift, E-Mail-Adressen und Telefonnummern relevanter Ansprechpartner von Wasserversorgungsunternehmen (WVU) komplettiert.

Im Berichtszeitraum wurde der Datenbestand durch weitere Recherchen so aufgestockt, dass für jedes Bundesland mindestens 20 % aller Wasserversorgungsunternehmen und ihrer Kontaktmöglichkeiten vorliegen. Die Aufstockung des Datenbestandes wird fortgeführt.

Im AP 1.2 wurde das Konzept für eine Oracle-Datenbank, das u. a. die vorgesehene Datenstruktur, die Anforderungen an die Bedienoberfläche und den Datenzugriff vorsieht, erstellt und dem Auftraggeber vorgestellt.

Die Ergebnisse der Arbeiten in den AP 1.1 und AP 1.2 wurden im Rahmen des AP 1.3 in einem Kurzbericht dokumentiert.

Im Arbeitspaket 2.1 wurde ausgehend von der Vorlage der Fachbegleitung und den Ergebnissen aus dem AP 1 das für den AP 2.2 notwendige Fragebogenformat entwickelt und erstellt. Folgende Abschnitte hat der Fragebogen grundsätzlich zu beinhalten:

- allgemeine Informationen zu der Wasserversorgungsanlage, etwa zum Standort inklusive geographischer Koordinaten (Originaldaten und Umrechnung aller Daten falls erforderlich in das geographische

Koordinatensystem (WGS 84) im Dezimalformat), der mittleren jährlichen Fördermenge, Anzahl der versorgten Personen und zu den entsprechend beauftragten Analyselaboren (Anlage 2, 3, 3a TrinkwV)

- Angaben zur Herkunft und Aufbereitung des Wassers inklusive der geologischen Angaben zum Aquifer/Untergrund/Untergrundgestein
- Ergebnisse nach Anlage 3a TrinkwV, aufgeschlüsselt nach den einzelnen Quartalsmessungen für Radon und den Messgrößen, die zur Bewertung der Richtdosis herangezogen wurden
- chemische Parameter und Indikatorparameter aus Teil I und II der Anlage 2 und aus Teil I der Anlage 3 TrinkwV, welche für die Betrachtung und Charakterisierung der in Abschnitt 3 generierten Daten relevant sein könnten.

Im AP 2.2 wurde begonnen, unter Berücksichtigung der Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge des Auftraggebers und der Angaben im IT-Erstellungsschein einen Prototyp der Datenbank mit APEX zu entwickeln. Das Frontend des Datenbanksystems wird unter Windows 10 als Webapplikation lauffähig sein. Als Browser wird dabei der Firefox (ESR) unterstützt.

Im AP 2.3 wurde im Berichtszeitraum begonnen, die elektronische Version des Fragebogens zu erstellen. Diese wird dann nach ausführlichen Tests dem Auftraggeber vorgestellt

Arbeiten zu den AP 3, 4 und 5 wurden planmäßig noch nicht begonnen.

## 5. ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Arbeiten in den AP 1.1 und AP 1.2 wurden im Rahmen des AP 1.3 in einem Kurzbericht dokumentiert.

Der Datenbestand wurde durch weitere Recherchen so aufgestockt, dass für jedes Bundesland mindestens 20 % aller Wasserversorgungsunternehmen und ihrer Kontaktmöglichkeiten vorliegen. Die Aufstockung des Datenbestandes wird fortgeführt.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Arbeitspakete werden entsprechend ihrer Fragestellungen weiterbearbeitet.

**Thema**

Wirkung staatlicher Fördermaßnahmen auf die Umsetzung von Radonsanierungsmaßnahmen im Wohnbereich - eine Potenzialanalyse

**Subject**

*Impact of state subsidies on implementing radon remediation measures in the housing sector - an analysis of potentials*

**Kennzeichen**

3620S12282

**Beginn**

01.09.2020

**Ende**

31.05.2021

**Fördermittel**

EUR 118.079,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH, Berlin

**Projektleitung**

Dr. L. Illge

**Fachbetreuung BfS**

C. Pözl-Viol / St-RK

**verantwortlich für den Text**

Dr. L. Illge

## 1. ZIELSETZUNG

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Möglichkeiten und Notwendigkeiten für Förderprogramme zur Sanierung von Wohngebäuden mit erhöhten Radonaktivitätskonzentrationen in der Innenraumluft, insbesondere in Radonvorsorgegebieten, zu prüfen. Dabei soll auch geprüft werden, ob Synergieeffekte mit anderen Förderprogrammen erreicht werden können. Es soll eine konkrete Aussage darüber getroffen werden, in welcher Form ein staatliches Förderprogramm zur Sanierung von Wohngebäuden (Art und Höhe der Förderung, Adressat der Förderung) zu zusätzlichen Sanierungen von Gebäuden mit erhöhten Radonaktivitätskonzentrationen in der Innenraumluft führen würde.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das Forschungsvorhaben verfolgt drei Einzelziele:

- Aufarbeitung des bisherigen Kenntnisstandes zur Wirkung und Inanspruchnahme staatlicher Fördermaßnahmen
- Durchführung von Interviews mit Eigentümer\*innen von Wohngebäuden
- Durchführung eines Fachgesprächs mit Expert\*innen aus den relevanten angrenzenden Bereichen.

## 3. METHODIK

Es werden folgende Methoden eingesetzt:

- Literaturrecherche (Literaturdatenbanken, Internet)
- Experteninterviews
- leitfadengestützte Interviews (mit Eigentümer\*innen von Wohngebäuden)
- Fachgespräch mit Expert\*innen

## 4. DURCHFÜHRUNG

Das Forschungsvorhaben gliedert sich in drei Arbeitspakete (AP):

#### **4.1 AUFARBEITUNG DER AKTUELLEN ERKENNTNISSE ZUR WIRKUNG STAATLICHER FÖRDERMAßNAHMEN (AP 1)**

Im ersten Arbeitspaket wurde der vorliegende Stand der bisherigen Erkenntnisse zur Wirkung von Fördermaßnahmen allgemein und im speziellen im Bereich Radon, auch international, aufgearbeitet. Die Literaturrecherche wurde anhand der einschlägigen Literaturdatenbanken und Recherchemöglichkeiten durchgeführt. Interviews mit einschlägigen Expert\*innen aus relevanten Themenbereichen rundeten die Literaturrecherche ab und stellten die Aktualität, Relevanz und Korrektheit der gefundenen Ergebnisse sicher. Der ermittelte Sachstand wurde in einem Zwischenbericht dokumentiert.

#### **4.2 INTERVIEWS MIT EIGENTÜMER\*INNEN VON WOHNGEBÄUDEN (AP 2)**

Im zweiten Arbeitspaket werden insgesamt 40 leitfadengestützte Interviews mit Eigentümer\*innen von Wohngebäuden geführt (per Video-Übertragung). Die zu interviewenden Personen werden zur Hälfte aus Regionen in Deutschland mit erhöhten Radonkonzentrationen und zur Hälfte aus Regionen mit geringen Radonkonzentrationen rekrutiert. Mit den Interviews wird die Bedeutung einer staatlichen Fördermaßnahme für die Entscheidung, das Wohngebäude zu sanieren, untersucht. Die Ergebnisse der Interviews sowie die Methodik der Interviewdurchführung und -auswertung werden in einem Zwischenbericht zusammengefasst.

#### **4.3 FACHGESPRÄCH MIT EXPERT\*INNEN UND ABSCHLUSSBERICHT (AP 3)**

Es wird ein 1-tägiges Fachgespräch durchgeführt, in dem die Ergebnisse aus AP 1 und AP 2 und die daraus vorläufig abgeleiteten Erkenntnisse vorgestellt und mit den eingeladenen Expert\*innen diskutiert und fachlich bewertet werden. Als Teilnehmer des Fachgesprächs sind ausgewiesene Expert\*innen für die Wirkung staatlicher Förderprogramme vorgesehen:

- Vertreter staatlicher Förderprogramme
- Radon-Expert\*innen
- Expert\*innen aus dem Bereich Public Health
- ausgewählte Vertreter\*innen des BFS und des BMU.

Mit dem Fachgespräch wird ein weiterführender, durch breite und verschiedenartige Expertise getragener Erkenntnisgewinn der zentralen Fragestellung des Forschungsvorhabens generiert. Das Fachgespräch wird als Web-Konferenz stattfinden.

## **5. ERGEBNISSE**

Die bisherigen zentralen Ergebnisse des Forschungsvorhabens (AP 1) umfassen:

### **5.1 ZIELGRUPPENANSPRACHE**

Eine wirksame Zielgruppenansprache kann gelingen durch miteinander verzahnte Optionen (vor allem, aber nicht ausschließlich, in Radonvorsorgegebieten):

- Option 1: Fokus auf Wohngebäudeeigentümer\*innen, die Sanierungsarbeiten ohnehin planen, z. B. Personen, die Fördermittel für energetische Sanierungen beantragt haben. Hier können Informationsmaterialien und kostenlose Radon-Tests angeboten werden.
- Option 2: zahlreiche kostenlose Radontests.

### **5.2 RAHMENBEDINGUNGEN**

Ein erfolgreiches Radon-Förderprogramm benötigt als unterstützende Rahmenbedingungen:

- an den psychologischen Erkenntnissen zur Radon-Risikowahrnehmung ansetzende Verbraucherinformation und -kommunikation in Form einer kontinuierlich durchgeführten und hinreichend finanziell ausgestatteten Informationskampagne
- Kommunikation durch die lokalen Behörden vor Ort und mittels lokaler Medien anhand greifbarer

Beispiele aus der gelebten Praxis

- unkomplizierten Zugriff auf Testgeräte
- individuelle Beratung (nach den Tests) sowie ggf. ein webbasiertes, interaktives Tool, um individuell zugeschnittene Informationen zu erhalten
- eine einfache, zeitnahe und transparente Umsetzung des Förderprogramms.

### **5.3 ANREIZWIRKUNGEN, AKZEPTANZ UND QUALITÄTSSICHERUNG**

Hohe Anreizwirkungen können erreicht werden durch Zuwendungen mit unterschiedlichen Förderquoten je nach Höhe der Radon-Belastung und einem Deckelbetrag je nach eingesetzter Sanierungsmethode/-technologie.

Eine hohe Akzeptanz des Förderprogramms und Qualität der Radon-Sanierungen kann erzielt werden durch:

- glaubwürdige, unabhängige Berater und Dienstleister sowie eine Qualitätssicherung der Radonsanierungen
- eine initiale Prüfung auf eine Radonbelastung durch Akteure, die das Vertrauen der Eigenheimbesitzer\*innen genießen und von ihnen als neutrale, unabhängige Akteure ohne eigenes wirtschaftliches Interesse angesehen werden
- die abschließende Prüfung der Wirksamkeit der Radonsanierung durch eine staatliche Stelle/Behörde
- zertifizierte Anbieter von Dienstleistungen.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Es ist geplant, die Interviews mit den Eigentümer\*innen von Wohngebäuden in der abgestimmten Vorgehensweise zeitnah durchzuführen und auszuwerten. Außerdem ist vorgesehen, das Fachgespräch mit Expert\*innen wie geplant parallel vorzubereiten, um es zum geplanten Zeitpunkt durchzuführen und auf dieser Basis den Abschlussbericht termingerecht zu erstellen.

**3.2 Themenbereich 02**  
**Strahlenschutztechnik**

**3.2 *Subject area 02***  
***Radiation protection techniques***

**Thema**

Entwicklung eines kombinierten aero-gammaspektrometrischen Mess- und Beprobungssystems

**Subject**

*Development of a combined aero-gammaspectrometric system of measurement and sampling*

**Kennzeichen**  
3616S22540

**Beginn**  
01.09.2016

**Ende**  
30.09.2021 (verlängert)

**Fördermittel**  
EUR 359.999,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Brenk Systemplanung GmbH, Aachen  
Plejades GmbH Independent Experts, Griesheim

**Projektleitung**  
Dr. S. Thierfeldt

**Fachbetreuung BfS**  
A. Helbig / UR 3

**verantwortlich für den Text**  
Dr. S. Thierfeldt

## 1. ZIELSETZUNG

Das BfS verfügt über Gammaskpektrometer, die in Helikoptern montiert werden können und für Überwachungsaufgaben sowie bei Störfällen oder Unfällen in kerntechnischen Anlagen mit Freisetzungen die am Boden abgelagerte Aktivität ermitteln können (Aero-Gammaskpektrometrie). Diese Geräte können allerdings nicht wirksam zwischen der tatsächlich am Boden abgelagerten Aktivität und der in der darüber befindlichen Luftsäule unterscheiden.

Dieses Forschungsvorhaben dient der Planung und Konstruktion eines Gerätes, das in der Lage ist, die Strahlungsbeiträge von radioaktiven Partikeln im Luftvolumen zu messen. Erst durch die Kenntnis dieses Beitrags zur gesamten Strahlung kann bei aero-gammaspektrometrischen Messungen die korrekte Aufteilung in die Einzelbeiträge des Messsignals erfolgen, das durch die Kontamination des Bodens (Bodenstrahlung) und die radioaktiven Partikel in der darüber befindlichen Luftsäule hervorgerufen wird. Dies stellt insbesondere nach einem kerntechnischen Unfall mit erheblichen Strahlungsbeiträgen aus dem Luftvolumen (bzw. in Fällen, wo solche Beiträge vermutet werden müssen) eine wichtige zusätzliche Information dar.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 PLANUNG UND KONZEPTIONIERUNG DES PROBENENTNAHMESYSTEMS (AP 1)

AP 1 dient der Zusammenstellung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik für die Zwecke des Vorhabens, sowohl im Hinblick auf bereits vorliegende ähnliche Messgeräte als auch im Hinblick auf theoretische Grundlagen.

### 2.2 ENTWURF UND AUSARBEITUNG DES KONZIPIERTEN PROBENENTNAHMESYSTEMS (AP 2)

AP 2 dient der Ausarbeitung eines auf den Ergebnissen von AP 1 basierenden Entwurfs des Probenentnahmesystems und der Messgeräte. Hierbei werden insbesondere der Aerosoleinlass (zur repräsentativen Probenentnahme, Erfassung der Partikel im Bereich von 0,1 bis 20  $\mu\text{m}$ ), die Methodik der Abscheidung der Aerosole und die zu verwendenden Detektoren ausgelegt.

### 2.3 KONSTRUKTION DES GESAMTSYSTEMS (AP 3)

AP 3 umfasst den Bau eines Prototyps des Probenentnahmesystems und des Messgeräts. Ferner werden die Details der Zulassung und Integration des Systems in einen Hubschrauber des Typs EC 135 der Bundespolizei geklärt und durchgeführt.

### 2.4 KALIBRIERUNG DES SYSTEMS (AP 4)

AP 4 umfasst die Kalibrierung des Prototyps für das Probenentnahmesystem.

## 3. METHODIK

### 3.1 PLANUNG UND KONZEPTIONIERUNG DES PROBENENTNAHMESYSTEMS (AP 1)

Die Planung und Konzeptionierung des Probenentnahmesystems basiert auf einer Recherche der Fachliteratur zur Darstellung des aktuellen Stands der Methoden zur Aero-Gammaspektrometrie und sonstiger Messungen der Aktivität von Luftfahrzeugen zur Entnahme von Luftproben sowie zur Kombination beider Verfahren. Daneben erfolgt auch ein Erfahrungsaustausch mit anderen Forschungsinstitutionen. Durch eine Marktanalyse wird ermittelt, welche Baugruppen verfügbar sind, die unmittelbar für die Konstruktion des Geräts eingesetzt werden könnten.

### 3.2 ENTWURF UND AUSARBEITUNG DES KONZIPIERTEN PROBENENTNAHMESYSTEMS (AP 2)

Das System beruht auf folgendem Prinzip: Über eine Düse wird Umgebungsluft außerhalb des Helikopters eingesaugt und über ein Filterband geleitet, auf dem die Aerosole für festgelegte Zeiträume abgeschieden werden. Das Filterband wird im Zeittakt weitergefahren, so dass die abgeschiedenen Aerosole gammaspektrometrisch und bezüglich Beta- und Alpha-Gesamtaktivität gemessen werden können. Zusätzlich wird das durchströmende Gas hinter dem Filter bez. gasförmiger radioaktiver Stoffe gemessen (die Aerosole sind zuvor weitestgehend auf dem Filterband abgeschieden).

### 3.3 KONSTRUKTION DES SYSTEMS (AP 3)

Die Konstruktion des Gerätes erfolgt auf Basis der Ergebnisse von AP 2 unter Einbeziehung einer Fachfirma für den Gerätebau sowie einer Beratungsfirma, die die Einhaltung der luftfahrttechnischen Anforderungen sicherstellt.

### 3.4 KALIBRIERUNG (AP 4)

Die Kalibrierung des Messsystems erfolgt während Helikopterflügen durch Messung von Radionukliden, die natürlicherweise in der Atmosphäre vorkommen. Ergänzende Kalibrierungen können durch Zufuhr von mit radioaktiven Aerosolen angereicherten Messgasen durchgeführt werden.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 ENTWURF UND AUSARBEITUNG DES KONZIPIERTEN PROBENENTNAHMESYSTEMS

Im Rahmen von AP 2 wird das Gesamtmesssystem ausgelegt. Hierzu zählen neben der Auslegung des Probenentnahmesystems auch die Festlegung der Messstrategie und der daraus resultierende verfahrenstechnische Aufbau der Messeinrichtung sowie die Auswahl der jeweiligen Komponenten. Die erzielten Ergebnisse werden in einem Bericht detailliert dargestellt. Zur Auslegung des Probenentnahmesystems erfolgt die Berechnung des Druckverlustes, der durch eine Ansaugvorrichtung ausgeglichen wird. Bei der Auslegung der am Helikopter anzubringenden Probenentnahmevorrichtung werden die aus der luftfahrttechnischen Zulassung resultierenden Anforderungen berücksichtigt. Die benötigte Ansprechempfindlichkeit der Detektoren wird aus der Abschätzung der auf dem Filtermedium abgeschiedenen luftgetragenen Aktivität und der für die Messungen zur Verfügung stehenden Zeit berechnet. Die Daten werden insgesamt zur vollständigen Auslegung des Gerätes zusammengeführt.

Die Ausarbeitung des Probenentnahmesystems samt Details der Steuerung und Anforderungen an die Detektoren usw. ist abgeschlossen.

### 4.2 KONSTRUKTION DES GESAMTSYSTEMS

Insgesamt besteht das Messsystem aus den Modulen Probenentnahme, Verbindungsleitung, Messeinrichtung (einschl. Filtereinrichtung zur Abscheidung der Aerosole) und Unterdruckerzeugung. Der Aufbau aller Teile mit Ausnahme der Messeinrichtung konnte im Berichtszeitraum abgeschlossen werden. Auf Grund der Corona-Pandemie ist allerdings die Fertigung der Detektoreinheiten und deren elektronische Ansteuerung als Bestandteil der Messeinrichtung erheblich verzögert und konnte im Berichtszeitraum nicht abgeschlossen werden (vgl. Abschnitt 6). Auf dem kritischen Zeitpfad liegen insbesondere die speziell gefertigten Halbleiterkristalle, die in einer hohen Qualität als Einzelstücke gefertigt

und jeweils einzeln geprüft und freigegeben werden müssen, bevor sie in die Detektoren integriert werden können. Dementsprechend konnte auch die Charakterisierung der Detektoren durch den Hersteller noch nicht abgeschlossen werden. Da es sich bei den Detektoren hinsichtlich Empfindlichkeit und Energieauflösung um Spezialanfertigungen handelt, ist eine Verwendung alternativer Bauteile nicht möglich. Das Controllersystem und die Treibersoftware für die Detektoren wurden parallel entwickelt und so weit wie möglich funktional getestet. Ein Gesamttest ist allerdings erst möglich, wenn die fertiggestellten und geprüften Halbleiterkristalle eingebaut sein werden.

## 5. ERGEBNISSE

Das Konzept der Vakuumerzeugung zur Aufrechterhaltung eines steuerbaren Durchflusses zwecks isokinetischer Probenentnahme aus der Umgebungsluft während des Flugs einschließlich der Einbindung aller Sensoren (Unterdruck, Durchflussmenge, Temperatur und Feuchte) wurde bereits im vergangenen Berichtszeitraum technisch umgesetzt. Diese Arbeiten wurden im aktuellen Berichtszeitraum abgeschlossen.

Die Fertigung der Probenentnahmevorrichtung, die aus Faserverbundwerkstoffen aus Carbon hergestellt werden soll, wurde vorbereitet, aber noch nicht ausgeführt.

Die Programmierung der Datenstruktur und –erfassung sowie der Datenaufbereitung wurde soweit abgeschlossen, dass nur noch die Datenübernahme aus den Detektoren nach deren Fertigstellung einbezogen werden muss.

Alle Komponenten einschließlich der elektrischen und elektronischen Steuerung (mit Ausnahme der Detektoren) wurden in einem Versuchsaufbau zusammengefügt und getestet.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Weiterarbeit ist aktuell wegen der Nichtverfügbarkeit der Detektorsysteme erheblich verzögert. Die Fertigung der Detektorsysteme hat im Verlauf des Jahres 2020 weitgehend geruht wegen Schutzmaßnahmen gegen die Corona-Pandemie, da das betreffende Institut personell erheblich betroffen war. Gegen Jahresende 2020 wurden die Arbeiten teilweise fortgeführt, und es wird damit gerechnet, dass die Detektoren im Frühjahr 2021 verfügbar sein werden.

Nach Verfügbarkeit der Detektoren werden diese in die Gesamtkonstruktion eingepasst und der vollständige Probeaufbau wird abgeschlossen. Die Steuerungssoftware wird dann um die noch fehlende Ansteuerung der Detektoren und der Filtereinheit ergänzt.

**Thema**

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

**Subject**

*Establishing a reference field for radiation protection in medical and research applications and calibration of measurement devices*

**Kennzeichen**

3619S22364

**Beginn**

01.01.2020

**Ende**

30.09.2022

**Fördermittel**

EUR 392.375,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

**Projektleitung**

Dr. H. Zutz

**Fachbetreuung BfS**

R. Schnell / UR 5

**verantwortlich für den Text**

Dr. H. Zutz, Dr. O. Hupe,  
Dr. J. Busse

## 1. ZIELSETZUNG

Das BMU verfolgt das Ziel der Aufrechterhaltung, kontinuierlichen Verbesserung und permanenten Anpassung des Strahlenschutzes in Deutschland an den jeweils aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik. Dem BMU obliegt überdies die Bundesaufsicht nach Art. 85 GG über den Vollzug des Strahlenschutzrechts durch die Länder. 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. Daher ist der Aufbau von Referenzstrahlungsfeldern notwendig, welche Messungen rückführbar auf die nationalen Normale ermöglichen und Tests für die Entwicklung und Überprüfung von Dosimetern erlauben.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Ein an der PTB in Braunschweig im Aufbau befindliches Referenzstrahlungsfeld soll es ermöglichen, die Funktionsweise von Orts- und Personendosimetern bei hohen Energien in einem gepulsten Betrieb 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.

### 2.1 REFERENZFELDQUELLE

An der PTB vorhandene, kommerzielle, medizinische Linearbeschleuniger werden genutzt, um Strahlungsfelder mit Photonenenergien bis zu 20 MeV zu erzeugen. Daneben steht der Forschungsbeschleuniger der PTB zur Verfügung, welcher im Vergleich zu den medizinischen Beschleunigern erweiterte Parameterbereiche (Energie, Pulsstruktur, Dosisleistung) bietet.

### 2.2 REFERENZFELD UND CHARAKTERISIERUNG

Hinter einer Abschirmung aus Beton, die z. B. den Bedingungen an realen Beschleunigeranlagen im Bereich schwacher Abschirmung entspricht, wird die auftretende Strahlungsdosis und Energieverteilung sowohl mit empfindlichen Dosismessgeräten als auch mit computergestützten Rechenverfahren (Mon-

te-Carlo-Simulationen) untersucht. In Verbindung mit einem Monitoringsystem wird nach Abschluss der Charakterisierung die Rückführbarkeit auf nationale Normale langfristig sichergestellt.

### 2.3 MOBILITÄT / FLEXIBILITÄT

Da das Referenzfeld an den vorhandenen Beschleuniger-Anlagen der PTB realisiert werden soll, müssen die dafür notwendigen Modifikationen sehr flexibel und schnell auf- und abbaubar sein. Der Aufbau soll zusätzlich eine Variation von Abstand und/oder Abschirmdicke ermöglichen.

## 3. METHODIK

Mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen werden für verschiedene Aufbau-Geometrien die Teilchenflussdichten und spektralen Verläufe berechnet. Die Simulationen werden durch den Einsatz von dosimetrischen und spektralen Messsystemen hinter einfachen Abschirmungen an den Beschleunigeranlagen überprüft. Dazu werden der Ortsdosisleistungsverlauf und die spektrale Zusammensetzung der einzelnen Strahlungskomponenten (Photonen, Elektronen und Neutronen) ermittelt.

### 3.1 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 Photon-, Elektronen- und Neutronenspektren sowie Winkelverteilungen und Dosisleistungsverläufe in verschiedenen Geometrien simuliert. Die Monte-Carlo-Simulationen erfolgen mindestens im Elektronenstrahlenenergiebereich bis 20 MeV.

### 3.2 MESSUNGEN

An den Aufbauorten des Referenzfeldes werden, wenn möglich, 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.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 MONTE-CARLO-SIMULATIONEN

Zunächst wurden mehrere Monte-Carlo-Simulationsprogramme (GEANT4, MCNP, EGSnrc) auf ihre Eignung untersucht. Nach der Auswahl von GEANT4 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 Beschleunigeranraumgeometrie der PTB ergänzt.

### 4.2 MESSUNGEN

Mit Hilfe eines Wenigkanalspektrometers [Behrens<sup>1)</sup>] wurde das Photonenspektrum eines Referenzfeldes bei zwei Feldgrößen bestimmt. Mit einem Bonner-Kugel-Spektrometer wurden mögliche Kontaminationen mit Neutronen in diesen Feldern untersucht. Mit Hilfe einer H\*(10)-Sekundärnormal-Kammer (modifizierte HS01 von Austrian Research Centers Seibersdorf [Ankerhold<sup>2)</sup>]) wurden orts- und feldgrößenabhängige Dosisleistungen aufgezeichnet. Insgesamt wurden bereits Messungen von Ortsdosisleistungen an vier Messorten durchgeführt, welches auch Messungen hinter einer variablen Abschirmung umfasst.

---

<sup>1)</sup> JINST P03027, 2009

<sup>2)</sup> Rad. Prot. Dosim., **118**,1,16–21, 2006

## 5. 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  $90^\circ$  direkt und in senkrechtem Einfall auf die Trennwand gerichtet werden. Der Quellabstand zur Wand beträgt 3,0 m, so dass 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. Dies ist für den Aufbau des Referenzfeldes eine wichtige Erkenntnis.

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.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Untersuchungen am ersten vorhandenen Aufbauort für ein Referenzfeld sollen fortgesetzt und abgeschlossen werden. Für einen mobilen Aufbau an einem der Beschleuniger sind weitere Simulationen und Messungen mit verschiedenen Aufbauten erforderlich. Einzelne Messreihen sollen im Jahr 2021 ggf. vervollständigt werden, auch um Daten für die Monte-Carlo-Simulationen zu liefern. Zusätzlich sollen Messungen am Forschungsbeschleuniger durchgeführt werden, um zu prüfen, ob dieser Messplatz (besser) geeignet ist – insbesondere den Einfluss der Streustrahlung betreffend. Hier ist der Beschleuniger in einem gesonderten Raum und es kann erwartet werden, dass der Einfluss von Streustrahlung deutlicher geringer ist.

**Thema**

Entwicklung eines Ortsdosis- bzw. Ortsdosisleistungsmessgeräts zur Messung der gesetzlichen Messgrößen Umgebungs-Äquivalentdosis  $H^*(10)$  sowie Richtungs-Äquivalentdosis  $H'(0,07)$  im Bereich von 15 keV - 1,3 MeV

**Subject**

*Development of a compact device for measuring the local dose and local dose rate to determine the ambient equivalent dose  $H^*(10)$  and directional dose equivalent  $H'(0.07)$  for an energy range of 15 keV - 1.3 MeV*

**Kennzeichen**  
3619S22371

**Beginn**  
01.04.2020

**Ende**  
31.03.2022

**Fördermittel**  
EUR 311.982,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**  
Technische Universität Dresden, Dresden

**Projektleitung**  
Dr. T. Kormoll

**Fachbetreuung BfS**  
S. Trinkl / MB 3

**verantwortlich für den Text**  
Dr. T. Werner

## 1. ZIELSETZUNG

Die in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) verankerten gesetzlichen Messgrößen für die Ortsdosis bzw. Ortsdosisleistung sind durch die Umgebungsäquivalentdosis  $H^*(10)$  sowie die Richtungsäquivalentdosis  $H'(0,07)$  festgelegt. Die Bestimmung dieser Messgrößen mit Hilfe konventioneller Dosimetriesysteme, insbesondere in gepulsten Photonenfeldern, welche unter anderem in der medizinischen Diagnostik, der Tumortherapie sowie in der Materialprüfung verwendet werden, kann derzeit nicht mit geeigneten konformitätsbewerteten Geräten gewährleistet werden.

Zur uneingeschränkten Umsetzung der in § 90 StrlSchV geforderten Anforderungen soll im Zuge des Forschungsvorhabens deswegen ein geeignetes Detektorsystem zur Messung der gesetzlichen Größen  $H^*(10)$  und  $H'(0,07)$  sowie der entsprechenden Dosisleistungen in einem Energiebereich von 15 keV bis 1,3 MeV für gepulste Photonenfelder entwickelt werden. Der zu entwickelnde Prototyp muss den Anforderungen des Mess- und Eichrechts und des Konformitätsbewertungsverfahrens der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) genügen.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Die Einzelzielsetzungen gliedern sich entsprechend der Arbeitspakete (AP) aus der Leistungsbeschreibung.

### 2.1 ERMITTLUNG DER ANFORDERUNGEN AN GEPULSTE PHOTONENFELDERN (AP 1)

Die gesetzlichen Anforderungen an ein Ortsdosimeter und Ortsdosisleistungsmeter für die Messgrößen  $H^*(10)$  sowie  $H'(0,07)$  für gepulste Photonenfelder als auch die in realen Anwendungsfällen in der Radiologie und Materialprüfung auftretenden Parameterbereiche sind zusammenzustellen und in Berichtsform dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) zur Verfügung zu stellen. Auf Basis dieses Berichts werden die für das Dosisleistungsmessgerät zugrunde liegenden Anforderungen festgelegt.

### 2.2 KONZEPTION UND ENTWICKLUNG VON DOSIMETERPROTOTYPEN ZUR MESSUNG VON $H^*(10)$ SOWIE $H'(0,07)$ (AP 2)

Ein Konzept für ein Ortsdosis- und Ortsdosisleistungsmessgerät für die Messgrößen  $H^*(10)$  sowie  $H'(0,07)$  möglichst auf Basis schon bestehender Vorarbeiten oder bereits existierender (rudimentärer) Prototypen ist zu entwickeln und in Form mehrerer (mindestens zwei) ausgereifter Prototypen umzusetzen. Die Bauform des Dosisleistungsmessgeräts soll ein handliches Arbeiten unterstützen und muss die im ersten Arbeitspaket festgelegten Anforderungen erfüllen.

### 2.3 VORBEREITUNG DES KONFORMITÄTSBEWERTUNGSVERFAHRENS (AP 3)

Alle Unterlagen für ein Konformitätsbewertungsverfahren sind in elektronischer, editierbarer Form dem BfS zur Verfügung zu stellen.

## 3. METHODIK

Die Parameterbereiche von gepulsten Photonenfeldern in der Medizin und der Materialprüfung und die gesetzlichen Anforderungen an handgehaltene Dosismessgeräte werden durch ausführliche Literaturrecherche zusammengestellt und in einem Bericht zur Verfügung gestellt.

Das geplante Messsystem basiert auf einer Kombination aus einem organischen und somit gewebeäquivalenten Szintillatormaterial sowie einer digitalen Ausleseeinheit. Dieses Konzept bietet das Potenzial die Dosis(-leistung) auch in zeitlich stark modulierten Feldern dosistreu abzubilden.

Zusätzlich zu den bereits während des AP 2 erstellten technischen Unterlagen für das Dosismessgerät werden die Unterlagen für das Konformitätsbewertungsverfahren nach Abschluss von AP 2 erstellt und dem BfS zur Verfügung gestellt.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 ERMITTLUNG DER ANFORDERUNGEN AN GEPULSTE PHOTONENFELDERN (AP 1)

Die mittels Literaturrecherche zusammengestellten Parameterbereiche von gepulsten Photonenfeldern zusammen mit den gesetzlichen Anforderungen, insbesondere den Anforderungen des Mess- und Eichrechts, für handgehaltene Dosismessgeräte wurden in einem Bericht zu AP 1 dem BfS zur Verfügung gestellt.

### 4.2 KONZEPTION UND ENTWICKLUNG VON DOSIMETERPROTOTYPEN ZUR MESSUNG VON $H^*$ (10) SOWIE $H'(0,07)$ (AP 2)

In einem Projektgespräch wurde das für den Prototyp entwickelte Softwarekonzept dem BfS vorgestellt und mit Vertretern der PTB diskutiert. Dieses wurde bereits teilweise für die Aufnahme der Messdaten und in Form von Analyseprogrammen umgesetzt. Außerdem wurde ein Gehäuse gefertigt, in welches die einzelnen Elektronikkomponenten zur Messdatenauswertung, Anzeige und Stromversorgung sowie die benötigten Detektoren eingebaut wurden.

## 5. ERGEBNISSE

Das grundlegende Konzept zur Entwicklung eines Messgeräts zur Bestimmung der Ortsdosis bzw. Ortsdosisleistung wurde in einem vorläufigen Prototyp umgesetzt. Dafür wurden alle notwendigen Elektronikkomponenten gefertigt und mit den entsprechenden Detektoren in einem Gehäuse zusammengeführt. Das entwickelte Softwarekonzept konnte bereits teilweise für Datenaufnahme und Auswertung umgesetzt werden.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Simulationen zur Optimierung der Detektorgeometrie werden durchgeführt. Außerdem wird der vorläufige Prototyp zunächst unter Laborbedingungen mit radioaktiven Nukliden getestet und die einzelnen Komponenten des Messsystems somit aufeinander abgestimmt. Des Weiteren sind Experimente in gepulsten Strahlungsfeldern geplant. Für die Datenaufnahme, -übertragung und -anzeige werden entsprechende Programme entwickelt, welche die geforderten Richtlinien aus der PTB-A 23.3 unter anderem zur Manipulationssicherheit gewährleisten.

**Thema**

Bestimmung von Strahlenschutzszenarien als Voraussetzung für eine nachhaltige Gewährleistung des Strahlenschutzes beim Umgang mit Ultrakurzpuls-Lasern (UKP-Laser) u. a. zur Unterstützung eines einheitlichen Vollzugs

**Subject**

*Determination of radiation protection scenarios as a prerequisite for a sustainable guarantee of radiation protection when using ultra-short pulse lasers (UKP lasers), inter alia to support uniform enforcement*

**Kennzeichen**

3619S2237A

**Beginn**

01.01.2020

**Ende**

31.08.2021

**Fördermittel**

EUR 251.211,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin  
 Projektpartner: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

**Projektleitung**

Dr. J. Krüger (BAM),  
 B. Pullner (PTB)

**Fachbetreuung BfS**

M. Baier / MB 6

**verantwortlich für den Text**

Dr. J. Krüger (BAM)

## 1. ZIELSETZUNG

Bei der Materialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen kann in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen ionisierende Strahlung entstehen, die unter bestimmten Voraussetzungen eine effektive Dosis von 1 mSv/a in einem strahlenschutzrelevanten Bereich deutlich überschreiten kann. Um die in der Lasermaterialbearbeitung unerwünscht entstehende ionisierende Strahlung im Strahlenschutz angemessen berücksichtigen zu können, ist die genaue Kenntnis des radiologischen Gefährdungspotentials der verschiedenen Bauarten von Ultrakurzpuls-Lasersystemen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Betriebsszenarien erforderlich. Wichtig ist dabei, dass bei dieser Beurteilung auf eine wissenschaftlich fundierte Datengrundlage zurückgegriffen werden kann. Diese Datengrundlage soll in dem Forschungsvorhaben erarbeitet werden. Der Fachbereich 6.2 der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, bearbeitet dieses Projekt gemeinsam mit dem Fachbereich 6.3 der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), Braunschweig.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Dabei war es zunächst notwendig, den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik bezüglich des Auftretens ionisierender Strahlung beim Betrieb von UKP-Lasern verschiedenster Bauarten zu ermitteln (AP 1). Im nächsten Schritt wurde begonnen, konservative und realistische Szenarien beim Betrieb von UKP-Lasern zu erarbeiten, wobei sowohl Arbeitsabläufe beim Routinebetrieb als auch mögliche Unfallszenarien zu berücksichtigen waren (AP 2).

## 3. METHODIK

### 3.1 ERMITTLUNG DES AKTUELLEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Der Einfluss der Laser-, Material- und Prozessparameter auf das Auftreten von Röntgenstrahlung bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung wurde durch Literaturstudien, eigene Messungen und theoretische Abschätzungen ermittelt.

### 3.2 ERARBEITUNG KONSERVATIVER WIE AUCH REALISTISCHER SZENARIEN

Um konservative wie auch realistische Umgangsszenarien beim Betrieb von UKP-Lasern evaluieren zu können, wurde eine Datenerhebung in Form einer Onlineumfrage vorgenommen, die abgeschlossen

ist. Die Angaben der beteiligten Anwender und Hersteller decken ein breites Spektrum der im Markt befindlichen Lasermaschinen ab.

## **4. DURCHFÜHRUNG**

### **4.1 ERMITTLUNG DES AKTUELLEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK**

Der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik bezüglich des Auftretens ionisierender Strahlung beim Betrieb von UKP-Lasern verschiedener Bauarten wurde ermittelt und in einem Zwischenbericht an das BfS übermittelt.

### **4.2 ERARBEITUNG KONSERVATIVER WIE AUCH REALISTISCHER SZENARIEN**

Die Untersuchungen zu konservativen und realistischen Umgangsszenarien beim Betrieb von UKP-Lasern sollen gemäß Arbeitsplan am 28.02.2021 abgeschlossen werden. Die Ergebnisse der internetbasierten Datenerhebung wurden dem BfS im Rahmen eines Online-Projektgespräches präsentiert. Es ist in der Arbeitsplanung vorgesehen, alle relevanten Eigenschaften des Laserbetriebs zu erfassen und in das entsprechende Szenario einzuordnen. Sofern Daten fehlen, sollten diese vor Ort, d. h. beim Anwender oder Laserhersteller, ermittelt werden. Die in diesem Zusammenhang im Dezember 2020 und Januar/Februar 2021 geplanten Messungen/Begehungen, die bereits mit den Anwendern/Laserherstellern abgestimmt waren, mussten pandemiebedingt verschoben werden.

## **5. ERGEBNISSE**

### **5.1 ERMITTLUNG DES AKTUELLEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK BEZÜGLICH DES AUFTRETENS IONISIERENDER STRALUNG BEIM BETRIEB VON UKP-LASERN VERSCHIEDENER BAUARTEN**

Die Erzeugung ionisierender Strahlung in der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung ist von mehreren Parameterfeldern (Laser-, Material- und Prozessparameter) abhängig. Die emittierte Röntgendosisleistung kann um mehrere Größenordnungen variieren. Zu den Laserparametern zählen die Pulsdauer, die Wellenlänge, die Pulsenergie, die Pulsfrequenz (Burstmodus als Spezialfall), die Polarisation sowie die Fokussierungsbedingungen, aus denen der Fokusedurchmesser des Laserstrahls auf dem Werkstück und folgend die Laserfluenz (Pulsenergie/Fläche) und Intensität (Fluenz/Pulsdauer) resultieren. Zu den Materialparametern gehören die Elementzusammensetzung des Werkstücks und die Oberflächenbeschaffenheit. Prozesseitig kann auf verschiedene Weise eine Relativbewegung zwischen Werkstück und Laserstrahl realisiert werden. Für eine flächige Oberflächenmodifizierung werden häufig Scanner eingesetzt. Das Zusammenspiel von Scangeschwindigkeit und Pulsfrequenz führt zu variierenden geometrischen Pulsabständen. Während der Laserbearbeitung ändert sich durch den Materialabtrag lokal der Einfallswinkel.

Eigene experimentelle Untersuchungen zeigten, dass die im Bremsstrahlungsspektrum enthaltene Photonenenergie quadratisch mit der Laserpulsenergie (bzw. Laserfluenz) bei der scannenden Bearbeitung von (unbearbeitetem) Aluminium skaliert. Besonders hohe Dosisleistungswerte für die emittierte Röntgenstrahlung wurden beim Laserdrehen an (unbearbeitetem) Stahl im Burstmodus festgestellt. Weitere experimentelle Daten Dritter weisen darauf hin, dass die Röntgendosisleistung linear mit der Fokusfläche ansteigt.

Die aktuellen lasertechnologischen Entwicklungen lassen erwarten, dass in naher Zukunft durch die Nutzung von Pulsfrequenzen im MHz- bis GHz-Bereich und Einzelpulsenergien im mJ-Bereich Laserleistungen im kW-Regime in der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung Einzug halten werden. Diese Leistungen sind um mehr als eine Größenordnung höher als die in den bisherigen Publikationen zur unerwünschten Röntgenemission genutzten Leistungen.

## 5.2 ERARBEITUNG KONSERVATIVER WIE AUCH REALISTISCHER SZENARIEN BEIM BETRIEB VON UKP-LASERN

Durch die internetbasierte Umfrage konnten die Rahmenbedingungen der Szenarien ausgearbeitet werden. Dabei zeichnen sich drei konservative und vier realistische Szenarien ab. Die Details müssen vor Ort, d. h. beim Anwender oder Laserhersteller, ggf. durch eigene Messungen, die auf die nationalen Normale rückgeführt werden, ermittelt werden. Hierbei ist es im Dezember 2020 und Januar/Februar 2021 zu pandemiebedingten Verzögerungen gekommen.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Weiterarbeit soll entsprechend des Arbeitsplanes erfolgen. Die mit drei Firmen für Begehungen/ Messungen für Dezember 2020 bis März 2021 vereinbarten Termine müssen (nach derzeitigem Stand) alle verschoben werden. Nachdem die konservativen und realistischen Szenarien mit Unterstützung der Vor-Ort-Termine ausgearbeitet sind, sollen in AP 3 auf dieser Basis Berechnungen der Expositionen  $H_p(10)$  und  $H_p(0.07)$  für die erarbeiteten Umgangsszenarien erfolgen.

### **3.3 Themenbereich 03**

**Strahlenbiologie - Wirkung von ionisierender und nichtionisierender Strahlung, Strahlenempfindlichkeit**

### ***3.3 Subject area 03***

***Radiation Biology - Effects of ionising and non-ionising radiation, radiosensitivity***

**Thema**

Einfluss von Niedrigdosisstrahlung auf die Leukämieentwicklung bei genetischer Prädisposition in einem Mausmodell

**Subject**

*Influence of low-dose radiation on leukemia development in a genetically predisposed mouse model*

**Kennzeichen**  
3618S32274

**Beginn**  
01.01.2019

**Ende**  
30.09.2021

**Fördermittel**  
EUR 542.142,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Universitätsklinikum Düsseldorf, Heinrich-Heine-Universität, Düsseldorf

**Projektleitung**

Prof. Dr. A. Borkhardt,  
Dr. U. Fischer, Dr. D. Hein

**Fachbetreuung BfS**

Dr. S. Hornhardt / WR 1

**verantwortlich für den Text**

Prof. Dr. A. Borkhardt,  
Dr. U. Fischer, Dr. D. Hein

## 1. ZIELSETZUNG

Ionisierende Strahlung ist ein akzeptierter Risikofaktor für die Leukämie-Entstehung im Kindesalter. Allerdings ist die Bedeutung schwacher ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich noch unklar. Das Deutsche Kinderkrebsregister in Mainz führte im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz von 2003 bis 2007 die Studie „Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken“ (KIKK-Studie) durch und konnte eine Korrelation zwischen der Nähe des Wohnortes zu einem Atomkraftwerk und dem Risiko eine Leukämie zu entwickeln aufzeigen. Dies lässt sich jedoch mit dem derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand über Strahlenwirkungen nicht erklären. Ziel des Forschungsvorhabens ist es, experimentell im Mausmodell zu prüfen, ob genetische Faktoren die Empfindlichkeit für den schädlichen Einfluss ionisierender Strahlung beeinflussen.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK SOWIE DARSTELLUNG DER VORGEHENSWEISE

In einem ersten Bearbeitungsschritt sollte der vorliegende Stand von Wissenschaft und Technik für die Zwecke des Vorhabens aufgearbeitet, die relevanten bisherigen Arbeiten zusammengefasst und maßgebliche Unterlagen und Veröffentlichungen identifiziert werden.

### 2.2 EXPOSITION DER MÄUSE UND BEOBACHTUNG DER LEUKÄMIEENTWICKLUNG

In diesem Projekt sollte das Sca1-ETV6-RUNX1-Mausmodell, das die häufigste bei Kindern anzutreffende präleukämische Gentranslokation ETV6-RUNX1 trägt, eingesetzt werden, um zu testen, ob die Exposition mit Niedrigdosisstrahlung onkogene Mutationen (als sogenannten zweiten "Hit") verursachen kann. Die Leukämieentwicklung nach Bestrahlung sollte beobachtet und die sich entwickelnden Leukämien phänotypisch charakterisiert werden.

### 2.3 CHARAKTERISIERUNG DER STRAHLENINDUZIERTEN TUMORZELLEN

Die genetischen Veränderungen in den auftretenden, strahlungsinduzierten Leukämien der Mäuse sollten erfasst, verglichen und auf strahlungsbedingte Mutationsmuster hin untersucht werden. Die Ergebnisse sollten mit publizierten, sekundären Alterationen der murinen und der humanen ETV6-RUNX1-positiven-prä-B-ALL<sup>1)</sup> verglichen werden, um ein umfassendes Bild von spezifischen,

<sup>1)</sup> eine Untergruppe der Akuten Lymphatischen Leukämie

ETV6-RUNX1-assoziierten, sekundären genomischen Veränderungen als Folge von niedrigdosierter Bestrahlung zu liefern.

### 3. METHODIK

Zunächst wurden Online-Literaturrecherchen (Pubmed-Datenbank) zum aktuellen Stand der Wissenschaft durchgeführt und die geplante experimentelle Vorgehensweise geprüft.

Dann wurden genetisch prädisponierte Sca1-ETV6-RUNX1-Mäuse (jeweils n=30 pro Behandlung) einmalig mit definierten geringen Dosen bis in den Niedrigdosisbereich (2 Gy, 0,5 Gy, 50 mGy) bestrahlt bzw. scheinbestrahlt. Das Auftreten von Leukämien wird bis zu einem Alter der Tiere von 2 Jahren kontrolliert und auftretende Tumore phänotypisch und genotypisch untersucht.

### 4. DURCHFÜHRUNG

#### 4.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK SOWIE DARSTELLUNG DER VORGEHENSWEISE

Wissenschaftliche Veröffentlichungen zur Frage der Effekte einer Niedrigdosisbestrahlung auf den Menschen sowie beobachtete Effekte in Tiermodellen wurden recherchiert und analysiert. Der aktuelle Wissensstand zu sekundären genetischen Alterationen in kindlichen Leukämien sowie die für das Projekt gewählte Vorgehensweise wurden aufgearbeitet und in einem Bericht zusammengefasst.

#### 4.2 EXPOSITION DER MÄUSE UND BEOBACHTUNG DER LEUKÄMIEENTWICKLUNG

Kohorten von jeweils 30 Sca1-ETV6-RUNX1-Mäusen werden einmalig mit exakten Dosen (2 Gy, 0,5 Gy und 50 mGy) aus einer geschlossenen, kalibrierten Gammastrahlenquelle (Cs-137, Gammacell 1000 Elite, nominale Aktivität 12,8 TBq) bestrahlt bzw. zur Kontrolle scheinbestrahlt (0 Gy). Die Tiere werden bis zu einem Alter von zwei Jahren regelmäßig durch Blutkontrollen auf das Vorliegen von Leukämien untersucht. Tiere, die Merkmale einer Leukämie aufweisen, werden getötet und den üblichen Nekropsieverfahren unterzogen. Makroskopisch, histologisch, durchflusszytometrisch und molekularbiologisch werden Gewebeeinfiltration, Tumor-Zellzahl und Tumor-Klonalität in hämatopoetischen Organen untersucht. Makroskopisch werden die Größe der Milz, Tumordinfiltrationen und die Zellzahlen in hämatopoetischen Organen untersucht. Milz und Knochenmark werden nach Hämatoxylin-Eosin-Färbung auch histologisch untersucht. Blutzellen aus den hämatopoetischen Organen werden durchflusszytometrisch untersucht. Dazu werden die kernhaltigen Zellen aus dem Knochenmark, dem peripheren Blut, dem Thymus, der Milz und den Lymphknoten gewonnen. Kontaminierende Erythrozyten werden lysiert, die restlichen Zellen mit spezifischen Antikörpern und Propidiumiodid (zum Ausschluss toter Zellen) gefärbt und mit Hilfe eines AccuriC6-Durchflusszytometers (BD Biosciences) gemessen und mit FlowJo-Software (LLC) analysiert. Für jede Analyse werden insgesamt mindestens 50 000 vitale (PI<sup>1</sup>-negative) Zellen bewertet. Dabei werden die B-Zell-Entwicklungsstadien wie folgt definiert:

- Pro-B-Zellen (CD19<sup>+</sup>, c-Kit<sup>+</sup>)
- Prä-B-Zellen (B220<sup>+</sup>, CD25<sup>+</sup>, IgM<sup>-</sup>)
- unreife B-Zellen (B220<sup>+</sup>, IgM<sup>Hi</sup>, IgD<sup>-</sup>)
- rezirkulierende B-Zellen (B220<sup>+</sup>, IgD<sup>Hi</sup>)
- periphere Übergangs-B-Zellen (B220<sup>+</sup>, IgM<sup>Hi</sup>, IgD<sup>Hi</sup>)
- periphere reife B-Zellen (B220<sup>+</sup>, IgM<sup>Lo</sup>, IgD<sup>Hi</sup>)
- Randzonen-B-Zellen (B220<sup>+</sup>, CD21<sup>Hi</sup>, CD23<sup>Lo</sup>)
- folliculäre B-Zellen (B220<sup>+</sup>, CD21<sup>int</sup>, CD23<sup>Hi</sup>).

<sup>1</sup>) Propidiumiodid

Zur molekularbiologischen Analyse der Klonalität der Tumorzellen wird genomische DNA aus Tumorzellen sowie aus CD19<sup>+</sup>-sortierten Wildtyp-Splenozyten als positiver Kontrolle isoliert. Immunglobulin-Rearrangements werden dann mit Hilfe einer PCR mit spezifischen Primern und anschließender Gelelektrophorese analysiert. Die Selbsterneuerungskapazität der Leukämiezellen wird mittels Transplantation in bestrahlte Wildtyp-Mäuse bestimmt. Dazu werden leukämische Pro-B-Zellen durch magnetische Zellsortierung (B220<sup>+</sup>) aus dem Knochenmark erkrankter Mäuse isoliert und auf mit Mitomycin C behandelten ST2-Zellen in Iscoves modifiziertem Dulbecco Medium (IMDM, 50 µM β-Mercaptoethanol, 1 mM L-Glutamin, 2 % hitzeinaktiviertes fötales Kälberserum, 1 mM Penicillin-Streptomycin und 0,03 % (w/v<sup>1</sup>) Primaton RL) kultiviert. Tumor-Pro-B-Zellen wachsen IL-7<sup>2</sup>-unabhängig. Die leukämischen Sca1-ETV6-RUNX1-Pro-B-Zellen werden intravenös in subletal bestrahlte (4 Gy) Empfänger (12 Wochen alte männliche syngene Mäuse, C57BL/6 x CBA) injiziert. Die Krankheitsentstehung bei den Empfängermäusen wird durch eine regelmäßige periphere Blutanalyse überwacht, bis leukämische Blasten detektiert werden. Die Tiere werden dann getötet und die Leukämie-Entwicklung untersucht. Nach Abschluss der Versuchsreihe werden Latenz- und Überlebenskurven der Mauskohorten nach Kaplan-Meier erstellt. Wenn Tiere frühzeitig versterben, wird die Todesursache untersucht und entsprechend dokumentiert.

### 4.3 CHARAKTERISIERUNG DER STRAHLENINDUZIERTEN TUMORZELLEN

Von allen Tieren, die eine Leukämie entwickelt haben, werden Leukämiezellen asserviert. Diese Tumorzellen werden einer Ganz-Exom-Sequenzierung unterzogen, um die strahlungsbedingten, genetischen Veränderungen in der Leukämie zu bestimmen und im Vergleich zu nicht exponierten Zellen und zum Zeitpunkt vor der Exposition zu erfassen.

DNA wird mittels des AllPrep DNA/RNA Mini Kits (Qiagen) aufgereinigt und die Maus-Exom-Bibliotheken mit dem Agilent SureSelectXT Mouse All Exon Kit hergestellt. Die Sequenzierung wird mittels 2x100 bp Paired- End-Sequenzierung, 6 bp Index-Reads und des TruSeq SBS Kit (v3) auf der HiSeq 2500-Plattform (Illumina) durchgeführt.

Fastq-Dateien werden mit BcltoFastq 1.8.4 (Illumina) erzeugt. Die BWA-Version 0.7.4. wird verwendet, um die erhaltenen Sequenzdaten an das Mausreferenzgenom (GRCm38.71) zu alignieren. Konvertierungsschritte werden mit Samtools durchgeführt, gefolgt von der Entfernung von PCR-Duplikaten mittels Picard. Die lokale Alignierung bei Indels, das SNP-Calling, die Annotierung und die Rekalibrierung werden mit Hilfe von GATK 2.4.9 durchgeführt. Maus dbSNP138 und dbSNP für die verwendeten Mausstämme werden als Trainingsdatensätze für die Rekalibrierung verwendet. Die resultierenden Variationscalls werden mit dem Variant Effect Predictor unter Verwendung der Ensembl-Datenbank (v70) annotiert und in eine interne MySQL-Datenbank importiert, um automatische und manuelle Annotationen sowie Abgleich und Datenanalyse durch komplexe Datenbankabfragen zu ermöglichen. Scores, die einen Funktionsverlust der betroffenen Gene/Proteine vorhersagen, werden mittels PolyPhen2 und SIFT aus Ensembl extrahiert. Gene mit einer Relevanz für Tumore werden bestimmt, indem der Cancer Gene Consensus aus COSMIC mit ENSEMBLs Biomart translatiert wird. Gefundene Mutationen werden anschließend durch Sanger-Sequenzierung validiert.

Bei der zusammenfassenden Auswertung werden alle expositionsbedingten Veränderungen der Sca1-ETV6-RUNX1-Mäuse erfasst, verglichen und auf strahlungsbedingte Mutationsmuster hin untersucht. Die Ergebnisse werden außerdem mit publizierten sekundären Alterationen in der murinen und der humanen (t(12;21)) Prä-B-ALL verglichen.

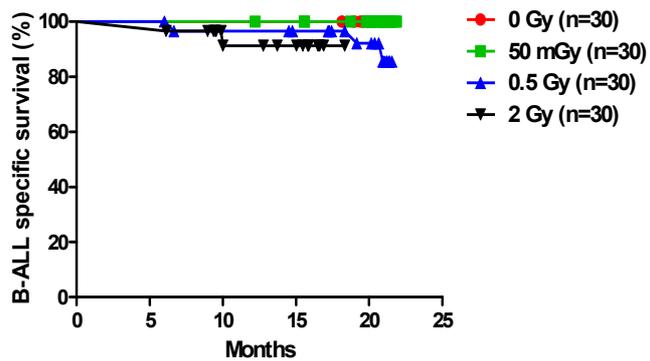
## 5. ERGEBNISSE

Von den bisher im Alter von einem Monat einmalig bestrahlten/scheinbestrahlten Sca1-ETV6-RUNX1-Mäusen mit 2 Gy (n=30), 0,5 Gy (n=30), 50 mGy (n=30), 0 Gy (n=30)) erkrankten bisher 5 Mäuse an einer Leukämie (Tabelle 1). Diese wurden mit 0,5 Gy (3 Mäuse) bzw. 2 Gy (2 Mäuse) behandelt und erkrankten im Alter von 6,6, 19 und 21 Monaten (0,5 Gy) bzw. 6 und 10 Monaten (2 Gy) an einer B-Zell-Leukämie (Abbildung 1). Durchflusszytometrische Untersuchungen zeigten, dass die Leukämien

<sup>1</sup>) Massenprozent/Volumenprozent

<sup>2</sup>) Interleukin 7

zum Zeitpunkt der Leukämie Milz und Lymphknoten infiltriert hatten. Die leukämischen Zellen werden derzeit weiter phänotypisiert und mittels Ganz-Exom-Sequenzierung genetisch charakterisiert.



**Abbildung 1:** B-ALL-spezifische Überlebenskurven der Sca1-ETV6-RUNX1-Mäuse, die im Alter von einem Monat mit einer einzelnen Dosis Gammastrahlung bestrahlt wurden (0 Gy: Sham Kontrollgruppe, bzw. 0,05-2 Gy). In den Gruppen 0 Gy, 0,5 Gy und 2 Gy befinden sich noch Tiere in der Nachverfolgung (vgl. Tabelle 1). Log-rank (Mantel-Cox) test p-value=0,0568.

**Tabelle 1:** Mauskohorten

Bestrahlungsdosis (Gy)	Mäuse je Gruppe (n)	vitale Mäuse in der Nachverfolgung (n)	Mäuse mit B-ALL (n)
0	30	13	0 (0 %)
0,05	30	0	0 (0 %)
0,5	30	12	3 (10 %)
2	30	27	2 (6,66 %)

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Bestrahlung der Tiere wurde abgeschlossen (n=30 je Behandlung). Alle Tiere werden bis zum Alter von zwei Jahren täglich auf das Auftreten von Leukämien hin untersucht. Nach Abschluss der Phänotyp- und Genotyp-Untersuchungen aller auftretenden Leukämien werden die Ergebnisse in Hinblick auf die Fragestellung analysiert.

**Thema**

Bestimmung der Frequenz präleukämischer Translokationen in Nabelschnurblut

**Subject***Determination of the frequency of preleukemic translocations in umbilical cord blood***Kennzeichen**

3618S32275

**Beginn**

07.11.2018

**Ende**

30.09.2021

**Fördermittel**

EUR 307.403,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Universitätsklinikum Düsseldorf, Heinrich-Heine-Universität, Düsseldorf

**Projektleitung**Prof. Dr. A. Borkhardt,  
Dr. U. Fischer, Dr. D. Hein**Fachbetreuung BfS**

Dr. S. Hornhardt / WR 1

**verantwortlich für den Text**Prof. Dr. A. Borkhardt,  
Dr. U. Fischer, Dr. D. Hein

## 1. ZIELSETZUNG

Die pädiatrische akute lymphatische Leukämie (ALL) ist gekennzeichnet durch präleukämische chromosomale Translokationen, die bereits vor der Geburt auftreten können. Am häufigsten ist die Translokation t(12;21), die zur Bildung des chimären Transkriptionsfaktors *ETV6-RUNX1* führt. Die Häufigkeit *ETV6-RUNX1*-positiver präleukämischer Zellen bei Neugeborenen ist unklar. Erste Ergebnisse zeigten, dass *ETV6-RUNX1*-Translokationen 100x häufiger bei Neugeborenen auftreten, als tatsächlich Kinder an *ETV6-RUNX1*-positiver Leukämie erkranken. Nachfolgende Studien ergaben jedoch widersprüchliche Ergebnisse. In einem Pilotprojekt des BMU/BfS wurde deshalb von Prof. Robert Slany (Institut für Genetik, Universität Erlangen-Nürnberg) und der Projektleitung eine auf stabiler DNA basierte Methode zum Nachweis präleukämischer Translokationen (genomisch inverse PCR zur Detektion von ligierten Bruchpunkten, abgekürzt: GIPFEL) entwickelt. Die GIPFEL-Methode weist Genfusionen ohne vorherige Kenntnis des Bruchpunkts mit hoher Sensitivität ( $10^{-4}$ ) und Spezifität nach. In einem weiteren BMU/BfS-Projekt wurde diese Technik von der Projektleitung für den Nachweis von translokationspositiven Zellen in Nabelschnurblutproben von gesunden Neugeborenen adaptiert. In einem ersten populationsbasierten, retrospektiven Screening von 1 000 gesunden Neugeborenen zeigten 5 % *ETV6-RUNX1*-positive Signale. Um dieses Ergebnis in einer erweiterten Kohorte zu prüfen, werden in dem aktuellen Projekt weitere 1 000 Nabelschnurblutproben von gesunden Neugeborenen mit der GIPFEL-Technik untersucht.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK SOWIE DARSTELLUNG DER VORGEHENSWEISE

In einem ersten Bearbeitungsschritt sollte der vorliegende Stand von Wissenschaft und Technik für die Zwecke des Vorhabens aufgearbeitet, die relevanten bisherigen Arbeiten zusammengefasst und maßgebliche Unterlagen und Veröffentlichungen identifiziert werden.

### 2.2 SCREENING VON 1 000 NABELSCHNURBLUTBANKPROBEN

In dieser konfirmatorischen Studie sollten 1 000 weitere Nabelschnurblutproben von gesunden Neugeborenen mit der GIPFEL-Technik untersucht werden, um die Präsenz von *ETV6-RUNX1*-positiven präleukämischen Zellen in gesunden Neugeborenen zu prüfen. Ein Abgleich der Screening-Ergebnisse mit tatsächlichen Leukämie-Erkrankungen sollte erfolgen und die allgemeine Leukämierate Neugeborener in dem untersuchten Zeitraum und der bestimmten Population bestimmt werden. Die Ergebnisse sollten es ermöglichen, die Penetranz und das Leukämie induzierende Potenzial des chimären Transkriptionsfaktors *ETV6-RUNX1* bei menschlichen Neugeborenen zu bewerten und sollten eine Grundlage für

die Beurteilung des Einflusses sekundärer umweltbedingter oder spontan auftretender kooperierender onkogener Läsionen bei der *ETV6-RUNX1*-positiven Kinderleukämie bilden.

### **2.3 CHARAKTERISIERUNG DER BRUCHPUNKTE ETV6-RUNX1-POSITIVER PROBEN**

Die *ETV6-RUNX1*-positiv getesteten Proben sollten durch Sequenzierung näher charakterisiert werden. Es sollte untersucht werden, ob es Unterschiede oder Gemeinsamkeiten in den Sequenzen der Bruchpunkte von Leukämie-Patienten verschiedenen Alters und gesunden Probanden gibt.

## **3. METHODIK**

Es wurden Online-Literaturrecherchen (Pubmed-Datenbank) zum aktuellen Stand der Wissenschaft durchgeführt. Für die Analyse der Nabelschnurblutproben wurde die GIPFEL-Technik eingesetzt. Bruchpunkte wurden durch Sequenzierung näher charakterisiert.

## **4. DURCHFÜHRUNG**

### **4.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK SOWIE DARSTELLUNG DER VORGEHENSWEISE**

Wissenschaftliche Veröffentlichungen zum Vorkommen präleukämischer *ETV6-RUNX1*-positiver Zellen in Neugeborenen wurden recherchiert, analysiert und verglichen. Der aktuelle Wissensstand wurde aufgearbeitet und in einem Bericht zusammengefasst.

### **4.2 SCREENING VON 1 000 NABELSCHNURBLUTBANKPROBEN**

1 000 Nabelschnurblutproben von gesunden Neugeborenen wurden asserviert und pseudonymisiert. Sie werden mit Hilfe der etablierten "Standard Operation Procedure (SOP)" der GIPFEL-Methode, die im vorangegangenen Screening etabliert wurde (Schäfer *et al.*, Blood 2018; 131: 821-826), auf die Präsenz von *ETV6-RUNX1*-positiven präleukämischen Zellen untersucht. Die Frequenz der Zellen im Nabelschnurblut der positiven Neugeborenen wird bestimmt und die mögliche Erkrankung des Kindes überprüft.

### **4.3 CHARAKTERISIERUNG DER BRUCHPUNKTE ETV6-RUNX1-POSITIVER PROBEN**

Die *ETV6-RUNX1*-positiv getesteten Proben werden durch Sequenzierung, wie in Schäfer *et al.* (Blood 2018; 131: 821-826) beschrieben, näher charakterisiert. Die Sequenzierung soll durch Amplifikation des translokationstragenden DNA-Zirkels und anschließender Sanger-Sequenzierung erfolgen. Der DNA-Zirkel wird dabei ähnlich wie bei einer Ganzgenomamplifizierung, allerdings mit Primern, die spezifisch für die *ETV6-RUNX1*-Region sind, unter Verwendung einer Ultra-Long-Range-Polymerase vermehrt. Der amplifizierte DNA-Zirkel wird dann per Primerwalk sequenziert, bis der Bruchpunkt gefunden ist. Da für unterschiedliche Bruchpunkte verschiedene Primer benutzt werden müssen, muss eine Optimierung vor der Bestimmung des Bruchpunkts durchgeführt werden. Die mittels Sequenzierung identifizierten und charakterisierten Bruchpunkte werden im Anschluss mit aus der Literatur bekannten, leukämiespezifischen *ETV6-RUNX1*-Bruchpunkten verglichen. Es wird untersucht werden, ob es Unterschiede oder Gemeinsamkeiten in den Sequenzen der Bruchpunkte von Leukämiepatienten verschiedenen Alters und gesunden Probanden gibt.

## **5. ERGEBNISSE**

Die angestrebte Fallzahl (n=1 000 Nabelschnurblutproben) wurde erreicht. Aus Klinik-eigenen Sach- und Personalmitteln wurde das Screening noch erweitert, so dass bisher bereits 1 117 Nabelschnurblutproben analysiert wurden. 83 Proben wurden mittels der GIPFEL-Technik als *ETV6-RUNX1*-positiv identifiziert und durch Sanger-Sequenzierung validiert. Dies entspricht einer Inzidenz von ~7,43 % bei den untersuchten gesunden Neugeborenen. Die Frequenz ist in dieser Kohorte etwas höher als im vo-

rangegangenen Screen (5 %, n=1 000). Dies beruht wahrscheinlich in erster Linie auf der höheren Qualität der verwendeten Proben aus der Düsseldorfer José Carreras Nabelschnurblutbank verglichen mit den in der früheren Untersuchung verwendeten Proben, die von Prof. Schmiegelow vom Rigshospitalet (Kopenhagen, Dänemark) zur Verfügung gestellt wurden. In dieser früher untersuchten Kohorte waren 15,2 % der Proben nicht auswertbar. Die Frequenz (nur auf auswertbare Proben bezogen) lag bei 5,9 %.

Die *ETV6-RUNX1*-positiven Zellen traten in der aktuellen und der vorherigen Studie mit einer Frequenz von  $\approx 1$  pro 100 bis 1 pro 100 000 negativer Zellen auf ( $10^{-2}$  bis  $10^{-5}$ ). Wie im vorherigen Screen wurden auch in der aktuellen Studie Proben (n=3) identifiziert, in denen gleichzeitig zwei Klone mit verschiedenen *ETV6-RUNX1*-Bruchpunkten nachgewiesen werden konnten. Die Frequenzen, mit denen diese Bruchpunkte nachgewiesen wurden, sprechen in allen Fällen für das gleichzeitige Vorliegen zweier verschiedener Klone aus zwei separaten, mutagenen Ereignissen ( $2,7 \times 10^{-5}$  und  $7,4 \times 10^{-5}$  bzw.  $6,6 \times 10^{-5}$  und  $2,1 \times 10^{-5}$  bzw.  $4,8 \times 10^{-4}$  und  $7,0 \times 10^{-5}$ ). Bisher konnte der Gesundheitszustand von 43 der 83 positiv getesteten Neugeborenen überprüft werden. Diese Kinder, die heute zwischen 16 und 17 Jahre alt sind, haben keine Leukämie oder andere Tumore entwickelt.

In der untersuchten Population (wohnhaft in Deutschland zum Diagnosezeitpunkt) betrug die allgemeine Malignomrate  $\sim 15$  bezogen auf 100 000 Kinder unter 15 Jahren (alterstandardisiert, Segi Welt-Standardpopulation, Quelle: Robert Koch Institut, „Krebs in Deutschland 2007-2008“ (Daten des Deutschen Kinderkrebsregisters (DKKR)). Das kumulative Risiko eines neugeborenen Kindes, innerhalb der ersten 15 Lebensjahre ein Malignom zu entwickeln, beträgt 225 auf 100 000 (0,2 %). Etwa 1 von 500 Kindern wird eine bösartige Krebserkrankung entwickeln. Häufigste Einzeldiagnose ist die akute lymphatische Leukämie ( $\sim 30$  %).

Die Inzidenz der akuten lymphatischen Leukämie in dem untersuchten Zeitraum (Diagnose im Jahr 2006- 2009) beträgt  $\sim 4,3$  auf 100 000 Kinder, die der *ETV6-RUNX1*-positiven lymphatischen Leukämie  $\sim 1$  auf 100 000 (Quellen: Robert Koch Institut, Krebs in Deutschland, Ausgaben 7-9; Bhojwani D, Yang JJ, Pui C-H, Biology of childhood acute lymphoblastic leukemia, *Pediatr Clin North Am.* 2015 Feb; 62(1):47-60. doi: 10.1016/j.pcl.2014.09.004.). D. h., das kumulative Risiko, dass Kinder bis zu einem Alter von 6 Jahren (nach dem Alterspeak der *ETV6-RUNX1*-positiven akuten lymphatischen Leukämie von 2-5 Jahren) eine solche Leukämie entwickeln, beträgt 6 auf 100 000 (0,006 %). Die gewonnenen Daten bestätigen bisher, dass die Inzidenz von *ETV6-RUNX1*-Translokationen bei Neugeborenen hoch ist ( $\sim 5-8$  %) und die Inzidenz der Leukämie ( $\sim 0,006$  %) übersteigt. Die Translokationen führen also nur in sehr seltenen Fällen zu einer Leukämie. Die Penetranz und das Leukämie induzierende Potenzial des chimären Transkriptionsfaktors *ETV6-RUNX1* ist daher bei menschlichen Neugeborenen als gering zu bewerten und der Einfluss sekundärer umweltbedingter oder spontan auftretender kooperierender onkogener Läsionen bei der *ETV6-RUNX1*-positiven Kinderleukämie als entscheidend anzusehen.

**Tabelle 1: *ETV6-RUNX1*-positiv getestete Nabelschnurproben.**

(Dargestellt sind die 83 *ETV6-RUNX1*-positiven Proben von 1 117 untersuchten Proben insgesamt. Die verwendeten Primer (Primernummern für forward (fwd) bzw. reverse (rev)) und die anhand einer internen Kontrolle ermittelten Frequenzen der die Translokation tragenden Zellen sind dargestellt. Bei drei Proben wurde ein zweiter Klon nachgewiesen. Die verwendeten Farben zeigen die Zugehörigkeit zu den vier verschiedenen Primer-Bündeln an, die für das Screening verwendet und später demultiplexed wurden (Primer-Bündel Blau, Rot, Gelb und Grün).

ID	fwd	rev	Frequenz	fwd	rev	Frequenz	Positiv Nr.	Nr. in Bündel
1014	15	3	$9.6 \times 10^{-5}$				1	1
1023	17	2	$7.1 \times 10^{-5}$				2	2
1035	13	3	$6.0 \times 10^{-5}$				3	1
1041	15	1	$2.7 \times 10^{-5}$	11	2	$7.4 \times 10^{-5}$	4	3/1
1055	13	1	$5.8 \times 10^{-4}$				5	2
1076	22	1	$2.3 \times 10^{-4}$				6	4
1098	25	1	$2.3 \times 10^{-4}$				7	3

ID	fwd	rev	Frequenz	fwd	rev	Frequenz	Positiv Nr.	Nr. in Bündel
1105	24	2	6.3 x 10-5				8	2
1133	14	3	2.8 x 10-4				9	3
1136	13	1	8.8 x 10-5				10	4
1142	21	1	2.6 x 10-5				11	5
1146	22	3	6.6 x 10-5	11	3	2.1 x 10-5	12	5/4
1157	20	2	2.2 x 10-4				13	1
1176	4	3	7.7 x 10-4				14	5
1185	23	2	1.2 x 10-3				15	6
1188	11	3	5.7 x 10-4				16	6
1191	11	3	6.7 x 10-4				17	7
1198	23	3	2.8 x 10-4				18	7
1234	4	3	2.6 x 10-4				19	8
1238	25	3	4.6 x 10-3				20	6
1253	17	1	1.5 x 10-3				21	8
1270	11	2	2.3 x 10-4				22	9
1281	20	2	6.1 x 10-4				23	2
1284	25	1	7.5 x 10-5				24	7
1293	14	2	2.4 x 10-4				25	10
1301	22	2	1.2 x 10-4				26	9
1312	17	3	1.0 x 10-4				27	10
1336	14	3	7.1 x 10-5				28	11
1341	14	3	7.1 x 10-5				29	12
1355	25	1	5.6 x 10-5				30	8
1369	11	3	3.7 x 10-4				31	13
1402	25	1	4.8 x 10-4				32	9
1429	13	1	1.4 x 10-4				33	10
1430	11	2	1.6 x 10-4				34	14
1465	13	3	2.1 x 10-4				35	11
1467	1	3	5.1 x 10-4				36	15
1468	14	3	4.0 x 10-4				37	16
1473	11	2	5.7 x 10-4				38	17
1494	4	2	1.5 x 10-3				39	18
1501	13	2	1.5 x 10-3				40	12
1510	17	3	2.1 x 10-3				41	11
1518	23	3	4.7 x 10-3				42	12
1542	12	2	9.3 x 10-3				43	13
1553	29	1	7.6 x 10-3				44	3
1559	10	1	7.7 x 10-3				45	19
1609	25	2	5.4 x 10-4				46	13
1617	14	3	8.6 x 10-4				47	20
1618	17	3	5.5 x 10-3				48	14
1623	14	3	1.5 x 10-3				49	21
1632	11	3	3.3 x 10-4				50	22
1642	22	3	1.5 x 10-3				51	15

TB03

ID	fwd	rev	Frequenz	fwd	rev	Frequenz	Positiv Nr.	Nr. in Bündel
1646	14	3	9.0 x 10 <sup>-4</sup>				52	23
1678	4	2	2.8 x 10 <sup>-3</sup>				53	24
1680	4	2	4.6 x 10 <sup>-3</sup>				54	25
1692	12	2	1.5 x 10 <sup>-2</sup>				55	16
1694	17	3	2.4 x 10 <sup>-2</sup>				56	17
1695	23	2	3.6 x 10 <sup>-2</sup>				57	18
1699	17	3	6.8 x 10 <sup>-3</sup>				58	19
1735	14	3	4.2 x 10 <sup>-4</sup>				59	26
1743	25	2	1.4 x 10 <sup>-4</sup>				60	14
1744	18	2	4.8 x 10 <sup>-4</sup>	25	3	7.0 x 10 <sup>-5</sup>	61	4/15
1745	11	3	1.2 x 10 <sup>-4</sup>				62	27
1746	24	2	3.1 x 10 <sup>-3</sup>				63	28
1748	21	1	7.5 x 10 <sup>-4</sup>				64	16
1752	14	2	2.6 x 10 <sup>-4</sup>				65	29
1757	25	2	6.5 x 10 <sup>-4</sup>				66	17
1780	23	2	2.3 x 10 <sup>-3</sup>				67	20
1828	23	2	5.5 x 10 <sup>-3</sup>				68	21
1838	18	3	4.5 x 10 <sup>-4</sup>				69	5
1842	17	3	3.1 x 10 <sup>-3</sup>				70	22
1897	14	3	3.6 x 10 <sup>-3</sup>				71	30
1910	23	3	1.3 x 10 <sup>-3</sup>				72	23
1912	24	3	1.4 x 10 <sup>-3</sup>				73	31
1929	25	3	1.6 x 10 <sup>-3</sup>				74	18
1963	15	3	5.9 x 10 <sup>-4</sup>				75	24
1993	13	2	6.2 x 10 <sup>-4</sup>				76	19
2039	5	3	3.9 x 10 <sup>-4</sup>				77	20
2047	17	3	2.8 x 10 <sup>-3</sup>				78	25
2074	17	3	4.5 x 10 <sup>-3</sup>				79	26
2090	23	2	4.4 x 10 <sup>-3</sup>				80	27
2091	17	2	7.2 x 10 <sup>-3</sup>				81	28
2104	24	3	1.8 x 10 <sup>-3</sup>				82	32
2117	11	2	3.7 x 10 <sup>-3</sup>				83	33

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Obwohl die angestrebte Fallzahl (n=1 000) bereits erreicht ist, wird das Screening der Nabelschnurblutproben (aus Klinik-eigenen Sach- und Personalmitteln) noch für alle vorhandenen Proben aus dem Jahr 2004 fortgesetzt (n=1 400) und mögliche Leukämie-Erkrankungen der Kinder in der analysierten Kohorte überprüft.

Die Bruchpunkte werden mittels Sequenzierung näher charakterisiert und mit bisherigen Daten verglichen. Es wird untersucht werden, ob es Unterschiede oder Gemeinsamkeiten in den Sequenzen der Bruchpunkte von Leukämiepatienten verschiedenen Alters und gesunden Probanden gibt.

**3.4 Themenbereich 04**  
**Medizinische Strahlenexposition / Röntgenverordnung**

**3.4 *Subject area 04***  
***Medical radiation exposures / X-ray Ordinance***

## Thema

Evaluation der Brustkrebsmortalität im Deutschen Mammographie-Screening-Programm (Mortalitätsevaluation) - 1. Teil der Hauptstudie

## Subject

*Evaluation of the breast cancer mortality in the German mammography-screening-program*

**Kennzeichen**  
3617S42402

**Beginn**  
01.01.2018

**Ende**  
31.03.2021

**Fördermittel**  
EUR 932.583,-

## Forschungs- / Auftragnehmer

Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Institut für Epidemiologie und Sozialmedizin, Bereich Klinische Epidemiologie, Münster

## Projektleitung

Univ.-Prof. Dr. med. A. Karch, MSc

## Fachbetreuung BfS

Prof. Dr. G. Brix / MB

## verantwortlich für den Text

Univ.-Prof. Dr. med. A. Karch, MSc

## 1. ZIELSETZUNG

In dieser Studie soll der Einfluss des deutschen Mammographie-Screening-Programms (MSP) auf die Brustkrebsmortalität evaluiert werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Im Rahmen von zwei der Hauptstudie vorangeschalteten Machbarkeitsstudien sind Verfahren zur Nutzung von Daten aus den klinischen und epidemiologischen Krebsregistern sowie aus den beteiligten gesetzlichen Krankenkassen entwickelt worden. Zusätzlich werden auch Daten der Kassenärztlichen Vereinigungen Westfalen-Lippe und Nordrhein berücksichtigt.

Im derzeit noch laufenden ersten Teil der Hauptstudie werden diese Verfahren und damit einhergehend auch die technisch-organisatorisch konzipierten Modelle in die Praxis überführt. Damit werden alle benötigten Daten gesammelt und aufbereitet, um die Datenbasis für die jeweiligen Auswertungen zu schaffen. Außerdem werden in dieser Studienphase auch die in den zwei Machbarkeitsstudien entwickelten statistischen und epidemiologischen Auswertungskonzepte kontinuierlich vom Generalunternehmer (GU) und seinen Unterauftragnehmern (UA) weiterentwickelt. Die rasch zunehmenden Forschungserkenntnisse werden dabei berücksichtigt.

Im anvisierten zweiten Teil der Hauptstudie sollen dann die Analysen gemäß den entwickelten Auswertungskonzepten umgesetzt werden.

## 3. METHODIK

In dieser Mortalitätsevaluation wird die Strategie der konvergierenden Evidenzen verfolgt. Hierbei werden die Daten der epidemiologischen und klinischen Krebsregister sowie der beteiligten Krankenkassen mit unterschiedlichen, sich ergänzenden Analyseverfahren hinsichtlich der Auswirkungen des deutschen MSP auf die Brustkrebssterblichkeit ausgewertet. Darüber hinaus werden die diversen methodischen Ansätze angewendet, um die vermuteten Mortalitätseffekte auf Ergebniskonvergenz zu überprüfen.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 PROJEKTMANAGEMENT

Die Westfälische Wilhelms-Universität ist in der Hauptstudie weiterhin der GU, der die administrativen und wissenschaftlichen Aktivitäten des Konsortiums koordiniert.

Im halbjährlichen Rhythmus wurde die Literatur aktualisiert, sodass die etablierte und zentral zugängliche Literaturdatenbank inzwischen mehr als 730 relevante Beiträge zu dem Forschungsthema umfasst. Neben den regelmäßigen Quartalstreffen mit allen Beteiligten, die auf Grund der SARS-CoV-2-Pandemie zuletzt virtuell stattfanden, wurden u. a. auch erste externe Audits beim GU und den einzelnen UA durchgeführt.

### 4.2 MODELL DER GESETZLICHEN KRANKENKASSENDATEN

In diesem Modell soll der primäre Endpunkt der brustkrebsassoziierten Mortalität mit Hilfe der Abrechnungsdaten von sechs zum Teil überregional agierenden gesetzlichen Krankenkassen evaluiert werden. Die Daten der AOK Niedersachsen, AOK Bremen, DAK, TK und HKK werden von dem Unterauftragnehmer Leibniz Institut für Epidemiologie und Präventionsforschung BIPS GmbH (BIPS) analysiert. Die Daten der BARMER werden vom Unterauftragnehmer SOCIUM Forschungszentrum Ungleichheit und Sozialpolitik, Abteilung Gesundheit, Pflege und Alterssicherung der Universität Bremen (SOCIUM) ausgewertet. Da die Daten der Gesetzlichen Krankenversicherungen (GKV) originär keine Informationen zur Todesursache beinhalten, müssen diese angereichert werden. Dafür erfolgt zum einen der direkte Abgleich mit den drei epidemiologischen Krebsregistern (EKR) (EKR Niedersachsen, Landeskrebsregister Nordrhein-Westfalen gGmbH (LKR NRW) und Bayerisches Krebsregister), zum anderen werden aber auch die fehlenden Todesursachen indirekt mittels einer adaptierten Form des Gagnon-Algorithmus ergänzt. Ausgewählte Informationen werden durch definierte Variablen im Rahmen kassenbasierter Minimaldatensätze in die kassenbasierte Datenzusammenführende Stelle (kDZS) übermittelt.

### 4.3 MODELL DER EPIDEMIOLOGISCHEN KREBSREGISTERDATEN

Dieser Ansatz soll dazu beitragen, die Evidenzbasis hinsichtlich der auftretenden Brustkrebstumore (z. B. Größe, Stadium, Unterschiede im Verlauf bei fortgeschrittenen Tumoren) detailliert darzustellen. Damit können die unter 4.2. dargestellten Analysen der gesetzlichen Krankenkassendaten hochauflösend ergänzt werden. Aus diesem Grund werden für die Studienregion Nordrhein-Westfalen die Daten der Screening-Einheiten und des UA LKR NRW zusammengeführt. Damit sind bereits Informationen über Screeninghistorie, inzidente Brustkrebs Erkrankungen, Vitalstatus und zur Todesursache Brustkrebs sowohl für erkrankte MSP-Teilnehmerinnen und Nicht-Teilnehmerinnen als auch für MSP-Teilnehmerinnen ohne Brustkrebs verfügbar. Um in den Auswertungen auch Informationen zu den gesunden, d. h. nicht an Brustkrebs erkrankten, Nicht-Teilnehmerinnen zu berücksichtigen, werden pseudonymisierte Daten der Kassenärztlichen Vereinigungen Westfalen-Lippe und Nordrhein in diesem Modell ergänzt. Alle Daten werden dabei in der registerbasierten Datenzusammenführenden Stelle (rDZS) eingespeist und miteinander verknüpft.

Der UA LKR NRW ist sowohl für die technische Umsetzung der rDZS als auch der kDZS (einschließlich des Todesursachen-Abgleiches) zuständig. Auch für die Umsetzung der Evaluierenden Stelle am BfS hat das LKR NRW eine zentrale Funktion, da dieser UA für die gesamte und abgestimmte Entwicklung der einzelnen Softwarekomponenten verantwortlich ist.

### 4.4 MODELL KLINISCHE KREBSREGISTERDATEN

Damit Aussagen zu Auswirkungen der Therapieadhärenz und der weiteren Versorgung von MSP-Teilnehmerinnen und Nicht-Teilnehmerinnen auf die Mortalität abgeleitet werden können, sollen bestehende Daten eines klinischen Krebsregisters, die mit Informationen der dortigen Mammographie-Screening-Einheiten angereichert werden, retrospektiv analysiert werden. Da die Brustkrebsmortalität durch Unterschiede in der Teilnahmebereitschaft am Screening, Lebensstil und Therapieadhärenz beeinflusst und stark verzerrt werden kann, wird dieser Ansatz als Ergänzung zu den beiden vorherigen Modellen verfolgt.

## 5. ERGEBNISSE

Rohdaten der sechs Krankenkassen wurden für weitere Kalenderjahre bereitgestellt, fortlaufend eingearbeitet und auf Konsistenz überprüft, so dass beim UA SOCIUM nun die Daten von 2006 bis einschließlich 2018 und beim UA BIPS diese von 2004 bis einschließlich 2017 eingespeist sind. Der Todesursachen-Abgleich weist sowohl beim UA BIPS als auch beim UA SOCIUM auf Grund verschiedener, miteinander verwobener Faktoren Verzögerungen auf. Der zeitliche Verzug beim UA BIPS ist trotz Erhalt eines positiven Vorabvotums aber weiterhin primär durch die ausstehende Genehmigung des Bundesamtes für Soziale Sicherung (ehemals Bundesversicherungsamt) bedingt. Hingegen hat sich beim UA SOCIUM eine leichte Verzögerung auf Grund inzwischen überwundener technischer Probleme in der Umsetzung des Abgleiches ergeben.

Die Meldungen der einzelnen Datenhalter (aufbereitete Krankenkassendaten sowie Daten des LKR NRW und der Kassenärztlichen Vereinigungen) werden beim Pseudonymisierungsdienst, der bei der KV-IT GmbH IT-Gesellschaft für integrierte Services im Gesundheitswesen (KV-IT) verortet ist, überverschlüsselt. Anschließend werden die Daten in Abhängigkeit der zwei Modelle in die rDZS/kDZS übermittelt, die beide bei der ZTG Zentrum für Telematik und Telemedizin GmbH (ZTG) implementiert sind.

In die rDZS wurden inzwischen erste Daten überführt, die dort mittels eines Linkages miteinander personengenau verbunden werden. Neben dem zeitlichen Verzug in der Entwicklung und Implementierung der Software haben zuletzt Herausforderungen bei eben diesem Datenlinkage zu weiteren Verzögerungen in der Erstellung der Datenbasis für das Modell der epidemiologischen Krebsregisterdaten geführt. Ein Routinebetrieb für die kDZS ist erst für den zweiten Teil der Hauptstudie vorgesehen.

Von der rDZS/kDZS werden die anonymisierten Daten an die Evaluierende Stelle übermittelt, die parallel zu den anderen Arbeitsprozessen vom UA LKR NRW, seinem Vertragspartner und dem BfS erfolgreich eingerichtet wurde.

Darüber hinaus wurden vom UA LKR NRW die für dieses Projekt relevanten Inzidenzraten für fortgeschrittene Brustkrebsstadien nach den EU-Richtlinien ermittelt. Eine dazugehörige Publikation wurde in der Fachzeitschrift BMC Cancer publiziert.

Im Modell der klinischen Krebsregisterdaten wurde nach der Überprüfung einer möglichen Zusammenführung und Anreicherung mit den Informationen der Screening-Einheiten ursprünglich eine Umsetzung in der Modellregion Mecklenburg-Vorpommern für den Zeitraum von 2009 bis 2017 angestrebt, da die Daten zu den Brustkrebserkrankungen seit Einführung des MSP insbesondere in den klinischen Krebsregistern der östlichen Bundesländer erfasst sind. Nach negativer Rückmeldung zum geplanten Vorhaben in diesem Bundesland haben der UA Arbeitsgemeinschaft Deutscher Tumorzentren e.V. (ADT) und der GU das gemeinsam erstellte Forschungskonzept auf die nun angestrebte Modellregion Sachsen-Anhalt angepasst und spezifiziert. Die erforderlichen Genehmigungen zur Umsetzung stehen allerdings weiterhin aus.

Während der gesamten bisherigen Laufzeit wurden alle statistischen und epidemiologischen Auswertungskonzepte kontinuierlich debattiert und angepasst. Die verfügbaren Forschungserkenntnisse wurden dabei hinzugezogen und berücksichtigt.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Trotz einer kostenneutralen Verlängerung der Projektlaufzeit um ein zusätzliches Quartal bis zum 31.03.2021 besteht in einzelnen Arbeiten weiterhin zeitlicher Verzug. Durch das Vorziehen anderer Tätigkeiten und eine daran angepasste aktualisierte Priorisierung sollen die Verzögerungen möglichst auf ein Minimum reduziert werden, damit im Falle einer Bewilligung der Hauptstudie II am Ende der Studienphase das Projekt zeitnah weitergeführt werden kann.

## Thema

Verlängerung der Nachbeobachtungszeit in der REQUITE-Studie zu Nebenwirkungen und Biomarkern für Strahlenempfindlichkeit bei Strahlentherapiepatienten

## Subject

*Extension of the follow-up in the REQUITE study on side effects and biomarkers for radiation sensitivity in radiotherapy patients*

<b>Kennzeichen</b> 3619S42261	<b>Beginn</b> 15.09.2019	<b>Ende</b> 31.08.2022	<b>Fördermittel</b> EUR 363.492,-
----------------------------------	-----------------------------	---------------------------	--------------------------------------

## Forschungs- / Auftragnehmer

Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Abt. Epidemiologie von Krebserkrankungen, Heidelberg

## Projektleitung

Dr. P. Seibold,  
Prof. Dr. J. Chang-Claude

## Fachbetreuung BfS

Dr. M. Gomolka / WR 1

## verantwortlich für den Text

Dr. P. Seibold,  
Prof. Dr. J. Chang-Claude

## 1. ZIELSETZUNG

Ziel des Projekts ist die Fortsetzung der Erfassung von Spätfolgen nach einer Krebsbestrahlung bei einer internationalen Patientenkohorte sowie die Sammlung von weiteren Biomarkerproben.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das REQUITEplus-Projekt wird auf einer prospektiven multizentrischen Patientenkohorte aufgebaut, die im Rahmen des REQUITE-Projekts etabliert wurde ([www.requite.eu](http://www.requite.eu), Seibold & Webb et al. Radioth Oncol 2019). Zwischen 2014 und 2016/2017 wurden 4400 Brust-, Prostata- und Lungenkrebspatienten vor Strahlentherapie in acht Ländern in Europa und den USA rekrutiert. Die Bestrahlung erfolgte nach lokalen Regimen. Es wurden standardisiert epidemiologische, klinische, dosimetrische und Nebenwirkungsdaten zu verschiedenen Zeitpunkten erhoben und eine Biobank aufgebaut. Die Patienten wurden bis mindestens 2 Jahre nach Bestrahlung nachbeobachtet.

Da strahlentherapiebedingte Spätfolgen auch Jahre nach der Bestrahlung auftreten können, ist eine Nachbeobachtungszeit über zwei Jahre hinaus für klinische Fragestellungen wichtig. Außerdem ist eine ausreichend hohe Fallzahl notwendig, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Für einen Teil der REQUITE-Patientenkohorte wird die Verlängerung der Nachbeobachtungszeit durch eine anderweitige Förderung sichergestellt. Das REQUITEplus-Projekt ermöglicht die Fortsetzung der Nachbeobachtung in der restlichen Kohorte und somit die Etablierung einer großen Patientenkohorte mit standardisiert erhobenen Daten zu Spätfolgen nach Strahlentherapie.

Das REQUITEplus-Projekt umfasst zwei Hauptziele:

### 2.1 ERHEBUNG VON LANGZEITNEBENWIRKUNGEN NACH STRAHLENTHERAPIE

Ziel des Projekts ist die Erfassung von Langzeitnebenwirkungen (inklusive Lebensqualität) mindestens 5 Jahre nach Bestrahlung in der restlichen REQUITE-Patientenkohorte. Die Verlängerung der Nachbeobachtungszeit ermöglicht somit eine vergleichbare Nachbeobachtungsdauer der gesamten Kohorte, die mit ihren „Real World“-Daten eine wertvolle Ressource für Forschungsarbeiten im Bereich Strahlenepidemiologie darstellt.

### 2.2 BIOPROBENSAMMLUNG FÜR BIOMARKERANALYSEN

Im Rahmen der vorherigen REQUITE-Studie wurden PAXgene-Proben vor Bestrahlung zur Gewinnung von RNA gesammelt. Um Genexpressionsmuster vor und nach Bestrahlung zu vergleichen, wird in ausgewählten Kliniken in Deutschland eine zweite PAXgene-Blutprobe entnommen, diesmal etwa 5 Jahre

nach Bestrahlung. Dies ermöglicht einen späteren Vergleich von Genexpressionsmustern vor und nach Bestrahlung, um potenzielle Strahlenempfindlichkeitsreaktionen anzuzeigen.

### 3. METHODIK

Es wurde geschätzt, dass insgesamt 1 250 Patienten an dem verlängerten Follow-up von mindestens 5 Jahren teilnehmen werden, was einer Teilnahmerate von 60 % entspricht.

#### 3.1 LANGZEITNEBENWIRKUNGEN NACH STRAHLENTHERAPIE

Die jährliche standardisierte Datenerhebung umfasst Patientencharakteristika wie Begleiterkrankungen sowie Informationen zum Krankheitsverlauf. Es werden krebsartenspezifische Symptome wie Armlymphödem oder Harninkontinenz gemäß CTCAE-Kriterien durch medizinisches Fachpersonal erhoben sowie Patientenfragebögen (*Patient Reported Outcomes*, z. B. EORTC BR23 bei Brustkrebs, *Pelvic Symptoms Questionnaire* bei Prostatakrebs) inklusive Lebensqualität (EORTC QLQ C30) erfasst. In einzelnen Kliniken werden auch Informationen zu Fatigue und körperlicher Aktivität mittels erprobten Fragebögen (MFI bzw. GPAQ) erhoben. Sofern die Patienten ihre Einwilligung dazu gegeben haben, sollen die pseudonymisierten Studiendaten in Zukunft auch externen Forschern auf Antrag für weiterführende wissenschaftliche Fragestellungen zugänglich gemacht werden.

#### 3.2 PAXGENE-SAMMLUNG

In ausgewählten Kliniken in Deutschland soll von etwa 170 Patienten eine zweite PAXgene-Probe bei einer Nachsorgeuntersuchung etwa 5 Jahre nach Bestrahlung gesammelt werden. Die Proben werden bei -80°C zentral konserviert, um später daraus RNA für Genexpressionsanalysen zu extrahieren.

## 4. DURCHFÜHRUNG

#### 4.1 PROJEKTKOORDINATION

Die Etablierung großer Patientenkohorten mit standardisiert erhobenen Daten erfordert häufig internationale Kooperationen, wie auch bei diesem REQUITEplus-Projekt, das vom Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ) in Heidelberg koordiniert wird.

Folgende Institutionen sind an der Verlängerung der klinischen Nachbeobachtung bzw. an der Datenbank-Infrastruktur beteiligt: Ghent University Hospital, Gent (Belgien); University Hospital Leuven (Belgien); Institut du Cancer de Montpellier (Frankreich); The Christie NHS Foundation Trust / University of Manchester, Manchester (Großbritannien); University of Leicester (Großbritannien); Maastricht, Maastricht University Medical Center (Niederlande); Icahn School of Medicine at Mount Sinai, New York (USA).

Mit den Projektbeteiligten erfolgt ein regelmäßiger Austausch über den aktuellen Stand per E-Mailkorrespondenz und Telefon-/Videokonferenzen.

Das Studienprotokoll, Fragebögen und Standardvorgehensweisen (SOPs) wurden an die verlängerte Nachbeobachtungszeit angepasst und bei der Ethikkommission Heidelberg eingereicht und genehmigt. Die beteiligten Kliniken stellen sicher, dass ein gültiges lokales Ethikvotum zur Durchführung der verlängerten Nachbeobachtungszeit vorliegt.

#### 4.2 ERFASSUNG VON LANGZEITNEBENWIRKUNGEN

Die bestehende Datenbankanfrastruktur an der University of Leicester wurde erweitert, um die Eingabe von Langzeit-Nachbeobachtungsdaten nach Bestrahlung zu ermöglichen.

Das zentrale Datenmanagement erfolgt am DKFZ und umfasst u. a. folgende Aufgaben: Überprüfung der Dateneingaben, Qualitätskontrollen und Plausibilitätschecks, Ansprechpartner für die internationalen Zentren, Bearbeitung von Daten-Rückfragen und Versenden von Erinnerungen an die Kliniken, Überprüfung von Datenkorrekturen, Erstellung von regelmäßigen Statusberichten (Dateneingabe, Qualitätskontrollen) sowie die Erstellung von bereinigten Datensets für Analysen.

### **4.3 BIOMARKERSAMMLUNG**

Die Organisation der PAXgene-Probensammlung inklusive Versand und die zentrale Konservierung der Proben erfolgt ebenfalls durch das DKFZ.

## **5. ERGEBNISSE**

Auf Grund der COVID19-Pandemie kam es zu Verzögerung im Klinikbetrieb und in der Administration. Die Nachsorgeuntersuchungen wurden teilweise ganz ausgesetzt oder konnten nur telefonisch durchgeführt werden. Dadurch konnten Spätfolgen nur bei einem Teil der Patienten erfasst werden. Die langfristigen Auswirkungen der Pandemie (z. B. eine niedrigere Teilnehmerrate) können noch nicht umfassend abgeschätzt werden.

### **5.1 LANGZEITNEBENWIRKUNGEN NACH STRAHLENTHERAPIE**

Informationen zu Spätfolgen und Lebensqualität 5 Jahre nach Bestrahlung sind bislang von über 150 Brust- und Prostatakrebspatienten in die zentrale Datenbank eingegeben. Daten von weiteren Patienten wurden erhoben und werden sukzessive in die Datenbank eingegeben.

### **5.2 PAXGENE-PROBEN**

PAXgene-Proben nach Bestrahlung konnten bislang von mehr als 20 Patienten an deutschen Kliniken gesammelt werden.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Die klinische Nachbeobachtung der Patienten wird weitergeführt, ggf. mit COVID19-bedingten Einschränkungen. Bereits erhobene Langzeit-Nachbeobachtungsdaten werden sukzessive in die zentrale Datenbank eingegeben.

Die Zielsetzung des Projekts kann trotz Verzögerungen weiterhin erreicht werden.

**Thema**

Bestimmung von Mindestanforderungen an Bildqualität und Dosis in der Brusttomosynthese

**Subject***Determination of minimum requirements for image quality and dose in breast tomosynthesis***Kennzeichen**  
3619S42363**Beginn**  
01.10.2019**Ende**  
30.09.2021**Fördermittel**  
EUR 279.798,-**Forschungs- / Auftragnehmer**

Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Institut für Klinische Radiologie, Münster

**Projektleitung**  
H. Lenzen**Fachbetreuung BfS**  
Dr. H. de las Heras Gala / MB 3**verantwortlich für den Text**  
A. Sommer

## 1. ZIELSETZUNG

Ziel des Projektes ist die Entwicklung multipler Qualitätssicherungskonzepte zur Bestimmung der Bildqualität an Tomosynthesegeräten (DBT) unterschiedlicher Hersteller. Ein besonderes Augenmerk soll hierbei auf den Einsatz von modellbasierten Analysen gelegt werden (Model Observer). Hierdurch sollen Aufwand und Subjektivität gegenüber visuellen Auswertungen reduziert werden. Die ermittelte Bildqualität wird direkt oder indirekt durch physikalische Surrogatparameter in Relation zur Strahlenexposition gesetzt (Dosiseffizienz). Als Maß für die Strahlenexposition wird hierbei eine standardisierte Messung der mittleren Parenchymdosis (AGD) verwendet.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

In diesem Rahmen sollen zwei Konzepte für jeweils zwei unterschiedliche Untersuchungsprotokolle zunächst theoretisch anhand von aktueller Literatur erarbeitet und anschließend die praktische Umsetzbarkeit für verschiedene Gerätehersteller und DBT-Typen erprobt werden. Das Projekt unterteilt sich hierbei in zwei Arbeitspakete.

## 3. METHODIK

Im ersten Arbeitspaket (AP 1) erfolgt die Ermittlung des Sachstands anhand von Literaturrecherchen sowie der Gegenüberstellung von Normen, Messvorschriften und Richtlinien. Weiter wird ein Vergleich von den auf dem Markt verfügbaren Prüfkörpern für DBT-Systeme durchgeführt. Auf Basis dieser Evaluierung erfolgt die Entwicklung von zwei Prüfkzepten. Des Weiteren werden die modellbasierten Analysen im Bereich der Qualitätssicherung anhand von Publikationen beurteilt (NPWE<sup>1</sup>, Hotelling Observer, Channelized Hotelling Observer).

## 4. DURCHFÜHRUNG

Aufbauend auf Arbeitspaket 1 werden im Arbeitspaket 2 die beiden entwickelten Konzepte und Protokolle in der Praxis an DBT-Systemen verschiedener Hersteller erprobt und getestet. Im letzten Schritt sollen auf Basis dieser Auswertungen Mindestanforderungen für die Bildqualität im Kontext zur Strahlenexposition bestimmt werden.

<sup>1</sup>) non-prewhitening matched filter with an eye filter

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 PHANTOM

Um eine geeignete Phantomwahl für das AP 2 zu treffen, wurden neun Phantome miteinander verglichen. Die Prüfmittel sollten insbesondere für die Bestimmung des Kontrastaufklärungsvermögens in der Tomosynthese geeignet sein. Dabei waren der Phantomhintergrund, die Möglichkeit unterschiedliche Phantomdicken zu simulieren sowie die Vielfalt von eingebetteten Strukturen von Interesse.

Die insgesamt fünf vorausgewählten Phantome wurden anschließend hinsichtlich ihrer Handhabung, ihrer Dosissensitivität und ihrer Auswertbarkeit durch verschiedene Testmessungen miteinander verglichen. Hieraus haben sich für das AP 2 folgende Phantome qualifiziert:

- model 020 BR3D (CIRS)
- TORMAM (Leeds Test Objects)
- MAMMO-TOM (Kooperation der Medizinischen Universität Wien und elimpex).

### 5.2 QS-PROTOKOLLE

Basierend auf der Literaturrecherche, den Testmessungen und dem Vergleich der unterschiedlichen Messvorschriften wurden zwei Qualitätssicherungskonzepte erarbeitet. Die Protokolle sollen die Qualität einer DBT-Anlage aus unterschiedlichen Blickwinkeln beurteilen. Hierzu zählen physikalische Parameter, anatomische Vergleichsstrukturen und typische klinische Anforderungen in der Früherkennung, Abklärungsdiagnostik und kurativen Mammographie.

Beide QS-Protokolle setzen sich jeweils aus einem Basisprotokoll (Leistungsparameter der Röntgenröhre, Überprüfung der Belichtungsautomatik, Bestimmung physikalischer- und technischer 3D-Parameter sowie Überprüfung der Homogenität) und einer Prüfung der Bildqualität mit oben genannten Phantomen zusammen. Eines der Protokolle soll hierbei ausschließlich für die Verwendung eines Model Observers ausgelegt sein. Das zweite Protokoll soll zusätzlich die Möglichkeit einer visuellen Auswertung der Objekte bieten. Für die Ermittlung der Strahlenexposition erfolgt die Bestimmung der AGD<sup>1)</sup> bei 7 unterschiedlichen Objektdicken (20 – 70 mm PMMA<sup>2)</sup>). Für einen Vergleich zur konventionellen Mammographie wird die Kontrast-Detail-Erkennbarkeit mittels des CDMAM<sup>3)</sup>-Phantoms bestimmt.

#### 5.2.1 Protokoll 1: Mammographie Screening (hoher Automatisierungsgrad)

Im QS-Protokoll 1 kommt für die Bestimmung der Bildqualität das MAMMO-TOM (L2 „Schüttelphantom“) in Kombination mit einem Model Observer zum Einsatz.

Das Phantom bietet durch seinen variablen und heterogenen Hintergrund die besten Voraussetzungen für die Evaluation von Qualitätssicherung mittels Model Observer.

#### 5.2.2 Protokoll 2: Kurative Mammographie

Die Testmessungen zeigten, dass sowohl das TORMAM-Phantom als auch das CIRS Model 20 mit den bekannten ACR-Strukturen für eine Bestimmung der Bildqualität geeignet sein könnten. Da beide Phantome unterschiedliche Schwächen aufweisen (beispielsweise homogener Hintergrund TORMAM), erfolgt die Prüfung der Bildqualität im QS-Protokoll 2 mit Hilfe von beiden Phantomen. Dies dient einer detaillierteren Evaluation der Prüfkörper, wodurch sich die positiven Aspekte der beiden Phantome ergänzen und die Voraussetzungen für eine optimale Überprüfung der Bildqualität geschaffen werden.

### 5.3 MODEL OBSERVER

Bei der Anwendung von Model Observern im Bereich der radiographischen Bildgebung können verschiedene Algorithmen zum Einsatz kommen:

- Ideal Observer

---

1) Average Glandular Dose, mittlere Parenchymdosis

2) Polymethylmethacrylat

3) Contrast Detail Mammography

- Hotelling Observer
- Channelized Hotelling Observer.

Für die Weiterarbeit im AP 2 wird der Channelized Hotelling Observer (CHO) als bester Kompromiss zwischen Ergebnis, Datenmenge und Rechenleistung angesehen.

#### 5.4 PRAKTISCHE ERPROBUNG (AP 2)

Aufbauend auf AP 1 werden die beiden entwickelten Konzepte und Protokolle in der Praxis an DBT-Systemen verschiedener Hersteller erprobt und getestet.

Für die Erfassung, Dokumentation und Berechnung der zu ermittelnden Messgrößen wurde ein entsprechendes Excelprotokoll entwickelt. Weiter wurde ein Software-Tool (DIANA-Randomizer) zum „zerschneiden“ von DICOM BTO-Tomosynthesedatensätzen programmiert. Mit Hilfe dieses Programms können die Strukturen, wie Hoch- und Niedrigkontrastobjekte, sowie Bereiche ohne Strukturen aus den Prüfkörperaufnahmen ausgeschnitten werden. Für die visuelle Auswertung stellt das Programm dem Auswerter jeweils randomisiert vier Bildausschnitte dar. Es werden jeweils drei Ausschnitte ohne Struktur sowie ein Ausschnitt mit Struktur angezeigt. Der Auswerter hat zusätzlich zu den vier Bildausschnitten noch die Option zu dokumentieren, dass er kein Objekt erkennen kann (4+1AFC<sup>1</sup>).

#### 5.5 AKQUIRIERUNG DER PRÜFKÖRPER-AUFNAHMEN

Im AP 2 sollen zunächst die QS-Protokolle an fünf verschiedenen Gerätetypen von fünf unterschiedlichen Herstellern angewendet werden. Die Messungen erfolgen jeweils an Tomosynthesystemen in unterschiedlichen Screening-Einheiten. Durch die Reisebeschränkungen des Universitätsklinikums Münster während der Corona-Pandemie konnten zwischen Oktober 2020 und Januar 2021 nur Messungen an zwei der fünf Gerätetypen durchgeführt werden. Im ursprünglichen Zeitplan sollten diese fünf Messungen Ende 2020 abgeschlossen sein. Die Akquirierung und Auswertung der Bilddaten stellt einen zentralen Punkt in der Entwicklung hinsichtlich des Model Observers dar. Durch die Corona-Einschränkungen ergeben sich Verzögerungen im gesamten Projektablauf, deren zeitliches Ausmaß sich durch die dynamische Corona-Situation nicht genau abschätzen lässt.

Hinsichtlich der Entwicklung und Parametrisierung des Model Observers wurden Kontakte mit der Arbeitsgruppe von Herrn Anton bei der PTB aufgenommen. Es wurde weiterhin versucht einen Kontakt zu der Arbeitsgruppe von Frau Hilde Bosmans (Belgien) aufzunehmen.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Bei der weiteren Projektarbeit spielen im Moment die noch gültigen Corona-Beschränkungen eine zentrale Rolle. Sobald diese aufgehoben werden, ist eine zeitnahe Fortsetzung der Messungen an den drei verbleibenden Gerätetypen geplant. Parallel wird mit der Auswertung der bereits erstellten Prüfkörperaufnahmen begonnen.

Ebenfalls betroffen von der Corona Pandemie ist die Planung eines Workshops zum Thema Einsatz von Model Observern für die Qualitätssicherung von Tomosynthesystemen. Bis zu einem möglichen Präsenzworkshop werden kleinere Webmeetings mit unterschiedlichen Gruppen abgehalten (Arbeitsgruppe der Universität Wien, PTB).

Weiter soll mit der Parametrisierung der Kanäle des Model Observers begonnen werden.

---

<sup>1</sup>) alternative forced-choice

## Thema

Daten-, Prozess- und Auswertungsaudits im Zuge der Evaluation der Brustkrebsmortalität im Deutschen Mammographie-Screening-Programm (MSP)

## Subject

*Data, process and evaluation audits in the course of the evaluation of breast cancer mortality in the German Mammography Screening Program (MSP)*

Kennzeichen	Beginn	Ende	Fördermittel
3619S42460	16.03.2020	31.05.2021	EUR 27.164,-

## Forschungs- / Auftragnehmer

Institut für Medizinische Informatik, Biometrie und Epidemiologie (IMIBE), Universitätsklinikum Essen

**Projektleitung**  
Prof. Dr. K.-H. Jöckel

**Fachbetreuung BfS**  
Dr. E. Schüler / MB 1

**verantwortlich für den Text**  
Dr. K. Schuldt

## 1. ZIELSETZUNG

Seit 2009 wird flächendeckend in Deutschland ein organisiertes, qualitätsgesichertes Mammographie-Screening-Programm (MSP) angeboten. Ziele des MSP sind die Früherkennung von Brustkrebs auf höchstem Qualitätsniveau und die Reduktion der Brustkrebsmortalität. Um die langfristige Wirkung des MSP auf die Brustkrebsmortalität in der Zielbevölkerung in Deutschland zu evaluieren, wurde vom BfS ein Forschungsvorhaben an die Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Institut für Epidemiologie und Sozialmedizin (Generalunternehmer) vergeben („Mortalitätsevaluation“). Zur Sicherstellung der Qualität der Mortalitätsevaluation sollen in den Hauptstudien I und II Daten-, Prozess- und Auswertungsaudits durch ein unabhängiges Expertengremium durchgeführt werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Zur Qualitätssicherung der Hauptstudie I wurden zwei Audits, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen, ausgeschrieben. Das Institut für Medizinische Informatik, Biometrie und Epidemiologie (IMIBE), Universitätsklinikum Essen, führt diese Auditierung durch. Kernelemente der Daten- und Prozessaudits sind die Datenhaltung, die Datenflüsse, die Einschätzung der Qualität der Rohdaten und die Umsetzung des Datenschutzes.

### 2.1 ZIELE DES ERSTEN AUDITS

Ziele des ersten Daten- und Prozessaudits sind die Feststellung des Status quo und des Konformitätsgrades von Aktivitäten, Prozessen, Dokumentation bezüglich der Auditkriterien beim Generalunternehmer (GU) und bei den Unterauftragnehmern SOCIUM-Forschungszentrum Ungleichheit und Sozialpolitik der Universität Bremen, Leibniz-Institut für Präventionsforschung und Epidemiologie-BIPS GmbH, Landeskrebsregister NRW gGmbH, dem Pseudonymisierungsdienst (PSD; angesiedelt an der KV-IT GmbH<sup>1)</sup>) und der Datenzusammenführenden Stelle (DZS; angesiedelt am Zentrum für Telematik im Gesundheitswesen GmbH).

### 2.2 ZIELE DES ZWEITEN AUDITS

Ziel des zweiten Daten- und Prozessaudits am Ende der Hauptstudie I ist die Sicherstellung, dass valide, vollständige, zusammengeführte, anonymisierte Daten in der Evaluierenden Stelle beim Bundesamt für Strahlenschutz für die Auswertungen in der Hauptstudie II vorliegen. Außerdem wird im zweiten Audit geprüft, ob die aus dem ersten Audit resultierenden Ergebnisse und Verbesserungsvorschläge umgesetzt wurden.

<sup>1)</sup> IT-Gesellschaft für Integrierte Services im Gesundheitswesen

### 3. METHODIK

Die zu auditierenden Projektbeteiligten stellten Dokumente (Standard Operating Procedure, insbesondere zur Beurteilung der internen Qualitätssicherung, des Datenmanagements und zur Definition der Schnittstellen), Protokolle, Berichte, Verträge, Datenschutzvereinbarungen etc., die für das erste Datenaudit relevant sind, zur Verfügung. Diese Dokumente waren Bestandteil der Auditkriterien, die zur Feststellung des Konformitätsgrades von Aktivitäten, Prozessen, Dokumentationen etc. als Referenz genutzt werden. Weitere Auditkriterien waren die Leitlinien und Empfehlungen der Guten Epidemiologischen Praxis (GEP) und der Guten Praxis der Sekundärdatenanalyse (GPS). Für alle am Projekt Beteiligten war das revidierte Angebot des Generalunternehmers Westfälische Wilhelms-Universität Münster vom 21.11.2017 und das revidierte Datenschutzkonzept der Hauptstudie vom 31.01.2019 Grundlage des Audits.

#### 3.1 AUDITBEOBACHTUNGEN

Die Bewertungen der Auditbeobachtungen erfolgten in Anlehnung an die Definitionen der EMA<sup>1)</sup> GCP<sup>2)</sup> Inspectors Working Group vom 01.12.2014 (EMA/INS/GCP/46309/ 2012). Dabei wird in geringfügige Beobachtungen, kritische Beobachtungen und schwerwiegende Beobachtungen unterschieden. Abhängig von der Ausprägung der Beobachtung wurden diese als nicht akzeptabel, direkte Verstöße gegen die Auditkriterien oder als abweichend von der erwarteten Praxis, jedoch ohne negativen Einfluss auf die Qualität und Integrität der Daten, eingestuft. Die Auditbeobachtungen wurden in einem Auditbericht dokumentiert und mit den Beteiligten diskutiert.

### 4. DURCHFÜHRUNG

Das erste Audit fand im September 2020 statt. Das zweite Audit ist für März 2021 geplant.

Um die am Projekt Beteiligten optimal auf das erste Audit vorzubereiten, wurden in zwei Videokonferenzen die Anforderungen an ein Audit konkretisiert und der Auditplan vorgestellt. Der Auditplan enthielt die Auditziele, den Auditumfang, die Auditmethoden, den Auditablauf und die Auditkriterien.

Nach der Eröffnung des Audits erfolgte eine Präsentation der Struktur der auditierten Institutionen, inklusive Darstellung des Organigramms und der direkten Kooperationspartner im Projekt. Danach berichteten die Beteiligten über den Status quo des Projektes inklusive der Vorstellung des Meilensteinplans. Weitere Themen, die im Audit erörtert wurden, waren der Status quo des projektspezifischen Datenschutzes, des Datenmanagements und des internen Qualitätssicherungsplans. Anschließend wurden die Ergebnisse diskutiert und mögliche Verbesserungspotenziale erörtert. Weiterhin wurde sich über die Umsetzung des zweiten Audits ausgetauscht.

Die Durchführung des Audits, insbesondere unter den Bedingungen/Auflagen von SARS-CoV-2, war mit Einschränkungen verbunden, so dass die Erhebung des Status quo nicht vor Ort stattfinden konnte.

### 5. ERGEBNISSE

Die Erhebung des Status quo war von Seiten der auditierten Unternehmen sehr gut vorbereitet. Aus Sicht der Auditoren konnte festgestellt werden, dass zahlreiche Qualitätssicherungsmaßnahmen ergriffen wurden. Es wurde keine kritische Beobachtung festgestellt. Eine schwerwiegende Beobachtung wurde umgehend behoben. Insgesamt wurden 26 geringfügige Beobachtungen identifiziert, die Verbesserungspotenzial aufzeigten.

Die Erhebung des Status quo im ersten Datenaudit führte zu einer deutlichen Transparenz der Datenprozesse. Die Qualität der Rohdaten und die gesamten Datenflüsse werden erst zu einem späteren Zeitpunkt beurteilbar sein. Die Umsetzung des Datenschutzes nach dem revidierten Datenschutzkonzept der Hauptstudie vom 31.01.2019 wurde von den Projektbeteiligten bestätigt.

---

<sup>1)</sup> European Medicines Agency

<sup>2)</sup> good clinical practice

Um eine größtmögliche Qualität bei der Evaluation der Brustkrebsmortalität im MSP zu erreichen, wird angeregt, eine konsequentere Qualitätssicherung in der Hauptstudie I und II zu etablieren. Weiterhin wird ein engeres Monitoring des Meilensteinplans empfohlen.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Die Vorbereitungen für das zweite Audit werden durchgeführt. Dies umfasst das Einholen, die Sichtung und Bewertung weiterer Unterlagen, die im Anschluss an das erste Audit zur Verfügung gestellt wurden. Nach der Diskussion des Auditplans mit dem GU und dem BfS wird das zweite Audit 03/2021 durchgeführt. Der Abschluss der externen Qualitätssicherung mit der Präsentation der Ergebnisse wird 05/2021 erfolgen. Der Abschlussbericht wird auch Empfehlungen für die Ausgestaltung der Daten- und Auswertungsaudits in der Hauptstudie II beinhalten.

**TB04**

**Thema**

Konzept zur Umrechnung dosisrelevanter Parameter in der digitalen Volumentomographie

**Subject**

*Development of a concept to convert dose quantities on cone beam computed tomography scenarios*

**Kennzeichen**  
3619S42462

**Beginn**  
01.07.2019

**Ende**  
30.06.2021

**Fördermittel**  
EUR 289.313,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Städtisches Klinikum Braunschweig gGmbH

**Projektleitung**  
Dr. M. Borowski

**Fachbetreuung BfS**  
Dr. H. de las Heras Gala / MB 3

**verantwortlich für den Text**  
Dr. M. Borowski

## 1. ZIELSETZUNG

Diagnostische Referenzwerte (DRW) für konventionelle Computertomographen (CT) werden in den Dosisgrößen Dosis-Längenprodukt (DLP) und Volumen-Computertomographie-Index (CTDI<sub>vol</sub>) festgelegt. Bei Digitalen Volumentomographen (DVT), auch als Cone-Beam CT (CBCT) bezeichnet, wird vielfach das Dosisflächenprodukt (DFP) als Messgröße verwendet.

Es gibt zunehmend klinische Untersuchungen, welche alternativ mit CT sowie CBCT durchgeführt werden. Aktuell ist es nicht möglich, konsistent DRW für diese Untersuchungen festzulegen. Es besteht daher die Notwendigkeit, die genannten dosisrelevanten Parameter ineinander umzurechnen. Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung eines Konzeptes für die Umrechnung zwischen CTDI<sub>vol</sub> / DLP- und DFP-Werten sowie die Bewertung der damit verbundenen Unsicherheiten.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das Vorhaben wurde gemäß seiner Leistungsbeschreibung in drei Arbeitspakete aufgeteilt.

### 2.1 ERMITTLUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Vor der Durchführung der weiteren Arbeitspakete sowie danach kontinuierlich sind aktuelle Informationen zu dem Thema aus internationalen Zeitschriften sowie von Empfehlungen nationaler und internationaler Gremien zu ermitteln und in die Arbeit des Projektes einzubeziehen.

### 2.2 VORSCHLAG GEEIGNETER KONZEPTE

Basierend auf der Recherche nach Abschnitt 2.1 sowie eigenen Überlegungen sind mindestens zwei geeignete Konzepte vorzulegen, die beabsichtigen, Umrechnungsfaktoren der Messgrößen zu ermitteln. Ein Konzept soll auf der Basis von Phantommessungen an repräsentativen Geräten Umrechnungsfaktoren bestimmen. Das zweite Konzept soll vornehmlich auf der Basis von Monte-Carlo-Simulationen für verschiedene Bau- und Bestrahlungsgeometrien entsprechende Faktoren ermitteln.

### 2.3 ANWENDUNG UND BEWERTUNG DER AUSGEWÄHLTEN KONZEPTE

Mit Hilfe der Konzepte nach Abschnitt 2.2 sind für eine repräsentative Auswahl von CBCT-Systemen Umrechnungsfaktoren anhand von Messungen sowie auf der Basis von Simulationsrechnungen zu bestimmen. Die Arbeiten haben für eine repräsentative Auswahl von mindestens zehn CBCT-Geräten zu erfolgen.

Für jedes CBCT sind die Arbeiten für die klinischen Untersuchungsarten durchzuführen, für die vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) DRW veröffentlicht wurden. Nach Bestimmung der Geräte- und untersuchungsspezifischen Umrechnungsfaktoren ist zu prüfen, ob für bestimmte Geräteklassen oder

Untersuchungsarten einheitliche Umrechnungsfaktoren festgelegt werden können. Der mit der Vereinfachung verbundene Fehler ist zu spezifizieren und zu bewerten.

### 3. METHODIK

Die internationale Fachliteratur wurde hinsichtlich relevanter Schlüsselbegriffe zur Dosimetrie der CBCT gesichtet. Hierzu wurde die Methode „preferred reporting items for systematic reviews (PRISMA)“ nach D. Moher eingesetzt. Als formale Auswahlkriterien wurden verwendet:

- Publikation in einem Peer Review basierten wissenschaftlichen Journal
- Publikationsdatum nach dem 01.01.2000
- Arbeiten in englischer oder deutscher Sprache.

Verwendet wurden die Datenbanken Pubmed/Medline, Web of Science, Scopus und Science Direct. Nach einem Hinweis des BfS wurde die Datenbank EuropePMC ergänzt.

Es wurden zwei Ansätze erarbeitet, um Konversionsfaktoren zu ermitteln. Ein Ansatz basiert auf messtechnischen Arbeiten unter der Verwendung von konventionellen Prüfkörpern. Der zweite Ansatz strebt an, die effektive Dosis, die mit CT- und CBCT-Untersuchungen einhergeht, anzugleichen, s. Abschnitt 5.2. Beide Konzepte wurden im Rahmen eines Projektgesprächs mit dem BfS abgestimmt.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 ERMITTLUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Die anhand der Abfragekriterien erhaltenen Treffer wurden hinsichtlich der Eignung für das Vorhaben bewertet.

Ergänzend wurde in Verlautbarungen von deutschen und internationalen Gremien nach geeigneten Ansätzen geforscht. Es wurden gleichwohl keine geeigneten Arbeiten gefunden.

### 4.2 VORSCHLAG GEEIGNETER KONZEPTE

Anhand der gesichteten Literatur nach Abschnitt 4.1 sowie durch Kontakt mit Klinikern wurden klinische Einsatzbereiche ermittelt, in denen CBCT zum Einsatz kommt und für die auf Seiten der CT DRW existieren.

Die auf dem Markt verfügbaren Geräte wurden gesichtet und hinsichtlich ihrer Einsatzbereiche und Aufnahmecharakteristika sortiert. Es zeigte sich, dass CBCT-Geräte sich im Hinblick auf die Expositionsparameter, die Rotationswinkel sowie auch teilweise hinsichtlich der Aufnahmetrajektorien unterscheiden. Eine Selektion von Geräten wurde so durchgeführt, dass möglichst umfassend die auf dem Markt präsenten Charakteristika in der Stichprobe berücksichtigt werden, die in den Arbeiten nach Abschnitt 2.3 erfolgt.

Es wurden zwei Ansätze erarbeitet, um Konversionsfaktoren zu ermitteln. Ein Ansatz basiert auf messtechnischen Arbeiten unter der Verwendung von konventionellen Prüfkörpern. Der zweite Ansatz strebt an, die effektive Dosis, die mit CT und CBCT-Untersuchungen einhergeht, anzugleichen, s. Abschnitt 5.2. Beide Konzepte wurden im Rahmen eines Projektgesprächs mit dem BfS abgestimmt.

### 4.3 UMSETZUNG DER KONZEPTE NACH ABSCHNITT 4.2

- An insgesamt acht CBCT-Geräten wurden Messungen durchgeführt (a). Es wurden Messungen unter Verwendung der für den Kopf- und Körperbereich verwendeten CTDI-Prüfkörper vorgenommen. Soweit an einem Röntgengerät mehrere Untersuchungsprogramme zur Verfügung standen, wurden sämtliche Programme betrachtet. Als Volumenkennggröße wurde das DLP<sub>100</sub> verwendet. Die an den Geräten angezeigten Werte der Dosisflächenprodukte wurden unter Verwendung einer kalibrierten Messkammer korrigiert. Aus den Messdaten wurden Konversionsfaktoren für den Übergang vom DFP zum DLP ermittelt.

- An bislang einem Multi-Slice-Computertomographen wurden die mit Untersuchungen einhergehenden Dosisflächenprodukte bestimmt. Hierzu wurden die Dosisprofile längs und orthogonal zur Scanrichtung ausgemessen. Mit den parallel bestimmten DLP-Werten wurden Konversionsfaktoren für den Übergang vom DLP zum DFP ermittelt.
- An den CBCT-Geräten wurden im Rahmen der Messungen nach Position (a) Basisparameter für Simulationen der Dosisverteilung mit Hilfe des Programms ImpactMC bestimmt. Erste Simulationen wurden durchgeführt.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 ERMITTLUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

In keiner der bislang gesichteten Arbeiten wird der Versuch unternommen, die Dosisgrößen aus CT und CBCT miteinander zu verbinden. Gefunden wurden zahlreiche Arbeiten zu Messungen mit CTDI-Prüfkörpern, die teilweise den für CBCT verwendbaren Ansatz von Dixon/Boone nutzen. Zudem gab es einige Arbeiten mit interessanten simulationstechnischen Ansätzen. In den meisten Fällen beschränkt sich die Dosimetrie jedoch auf Detailfragestellungen, denen mit TLD<sup>1)</sup>-Messungen in anthropomorphen Phantomen nachgegangen wurde.

### 5.2 VORSCHLAG GEEIGNETER KONZEPTE

Die Messungen an den CBCT sowie am CT ergeben Hersteller und Geräte übergreifend sehr gut konsistente Werte für Konversionsfaktoren vom DFP zum DLP. Die Werte sind vom verwendeten Spektrum abhängig. Es deutet sich jedoch an, dass dieser Einfluss gut zu korrigieren ist. Wenn die bisherigen Resultate sich an einem größeren Satz an Geräten verifizieren lassen, läge ein guter konsistenter Ansatz vor, mit dem zukünftig Vorgaben diagnostischer Referenzwerte aus dem Bereich der Computertomographie in den Bereich der CBCT übertragen werden können. Erste testweise Übertragungen ergeben plausible Daten.

Die bisherigen Resultate der Simulationen sind vielversprechend. Es liegen jedoch noch keine Daten vor, die es erlauben Konversionsfaktoren auf der Basis der Simulationen zu entwickeln. Wenn dieses genauso konsistent möglich ist wie bei dem messtechnischen Ansatz, so wäre der simulationstechnische Ansatz tendenziell zu favorisieren, da er die asymmetrische Bestrahlung des Körpers, die sich bei CBCT ergibt - die in vielen Fällen keine 360°-Exposition vornehmen -, berücksichtigt.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Insbesondere die Arbeiten am messtechnischen Ansatz sind durch die Corona-Bedingungen im Vorankommen behindert. Sobald der Zugriff auf weitergehende Röntgenanlagen möglich ist, sollen die Arbeiten finalisiert werden. Parallel werden die Simulationen fortgeführt. Abschließend werden die Resultate beider Vorgehensweisen verglichen werden.

---

<sup>1)</sup> Thermolumineszenzdosimeter

## Thema

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

## Subject

*Preparation and revision of technical standards for radiation protection and quality assurance in medical radiology*

### Kennzeichen

3620S42351

### Beginn

01.04.2020

### Ende

31.03.2023

### Fördermittel

EUR 217.726,-

### Forschungs- / Auftragnehmer

DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

### Projektleitung

E. Beck

### Fachbetreuung BfS

Dr. H. Schlattl / MB 3

### verantwortlich für den Text

E. Beck

## 1. 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<sup>1)</sup> und CENELEC<sup>2)</sup> 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<sup>3)</sup> bzw. IEC<sup>4)</sup> etabliert werden, um die Ziele neuerer europäischer Vorgaben für den Strahlenschutz harmonisiert umsetzen zu können.

## 2. 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 Volumetomographie (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

<sup>1)</sup> Europäisches Komitee für Normung

<sup>2)</sup> Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung

<sup>3)</sup> Internationale Organisation für Normung

<sup>4)</sup> Internationale Elektrotechnische Kommission

- 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 Normenerstellung zu gewährleisten.

### 3. METHODIK

Das Vorhaben gliedert sich in drei Arbeitspakete: In einem ersten Arbeitspaket (AP 1) erfolgt eine Aufarbeitung des themenbezogenen Standes der Technik, zur weiteren Berücksichtigung bei der Bearbeitung von AP 2 und AP 3. Im Rahmen von AP 2 und AP 3 steht 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 Normenausschusses Radiologie (NAR) sowie der DIN 820-4 "Geschäftsgang".

### 4. DURCHFÜHRUNG

Die Durchführung der 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 2020 nicht erlaubten. Dieser Umstand hatte, wie sich im Zuge der Arbeiten herausstellte, keine negative Auswirkung auf die erzielten Ergebnisse.

Der im Rahmen des AP 1 vorgesehene Sachbericht wurde planmäßig erstellt. Einzelne, im Rahmen der weiteren Arbeiten noch zu klärende Fachfragen wurden vermerkt und deren Lösung sodann nachgehalten.

Im Rahmen von AP 2 sowie AP 3 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 Normenausschusses Radiologie (NAR) festgelegten Maßnahmen vorangetrieben.

Einhergehend wurde im Berichtszeitraum die Prüfung der noch zu klärenden Detailfragen zu neuen Normungsvorhaben in Zusammenarbeit mit dem BfS-Fachbegleiter abgeschlossen. Am 30. November 2020 erhielt die NAR-Geschäftsstelle die Rückmeldung zu den noch offenen Fragen in Konkretisierung der Aufgabenstellung. Eine finale Verständigung und Konsensfindung zur Themenabgrenzung zwischen den Obleuten der Arbeitsausschüsse und Vertretern des BfS fand im Rahmen einer Webkonferenz statt.

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 zusammen mit diesem Bericht übergeben.

### 5. ERGEBNISSE

Der vorgesehene Sachbericht wurde erstellt und fristgerecht übergeben.

Weiterhin konnten im Berichtszeitraum sechs Normenentwürfe und eine Norm veröffentlicht werden. Belegexemplare dieser nachfolgend aufgeführten Dokumente wurden dem BfS-Fachbegleiter übersandt.

Es handelt sich um folgende Norm-Entwürfe:

- E DIN 6868-159-2020-09, „Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben – Teil

159: Abnahme- und Konstanzprüfung in der Teleradiologie“

- E DIN 6812:2020-08, „Medizinische Röntgenanlagen bis 300 kV – Regeln für die Auslegung des baulichen Strahlenschutzes“
- E DIN 6815:2020-09, „Medizinische Röntgenanlagen bis 300 kV – Regeln für die Prüfung des Strahlenschutzes nach Errichtung, Instandsetzung und wesentlicher Änderung“
- E DIN 6847-2:2020-08, „Medizinische Elektronenbeschleuniger-Anlagen – Teil 2: Regeln für die Auslegung des baulichen Strahlenschutzes“
- E DIN 6873-1:2020-08, „Bestrahlungssysteme – Teil 1: Inbetriebnahme“
- E DIN 6868-1:2020-10, „Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben - Teil 1: Allgemeines“, im vorliegenden Vertrag als neues Normvorhaben DIN EN, Messunsicherheiten (Umsetzung der SSK-Empfehlung), gekennzeichnet.

Es handelt sich um folgende Norm:

- DIN 6868-163:2020-08, „Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben – Teil 163: Abnahme- und Konstanzprüfung an Röntgeneinrichtungen für die digitale mammographische Stereotaxie“.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

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

Hinsichtlich der neuen Normvorhaben ist den fachlich Verantwortlichen der einzelnen NAR-Arbeitsausschüsse nach finaler Klärung offener Fragen nun der jeweilige Anwendungsbereich, Zweck und Zielsetzung der vorgesehenen neuen Normen bekannt. Erste Ergebnisse hierzu werden beginnend 2021 erarbeitet.

TB04



**3.5 Themenbereich 05**  
**Radioökologie**

**3.5 *Subject area 05***  
***Radioecology***

## Thema

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

## Subject

*Modelling of hydrodynamics and mass transport in water-bound transport processes in radiation protection considering clearance of material with negligible activity*

<b>Kennzeichen</b> 3618E03510	<b>Beginn</b> 01.09.2019	<b>Ende</b> 31.08.2022	<b>Fördermittel</b> EUR 227.512,-
----------------------------------	-----------------------------	---------------------------	--------------------------------------

**Forschungs- / Auftragnehmer**  
Universität Stuttgart, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung

<b>Projektleitung</b> apl. Prof. B. Flemisch	<b>Fachbetreuung BfS</b> Dr. R. Merk / UR 6	<b>verantwortlich für den Text</b> R. Winter
---	--	---

## 1. ZIELSETZUNG

Die hydrodynamische Modellierung wird von dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) eingesetzt, um wassergebundene Transportprozesse von Radionukliden in verschiedenen porösen Medien zu erforschen und zu beschreiben. Dies ist unter anderem in der Freigabe von sehr schwach kontaminiertem Material auf Oberflächendeponien relevant. Dabei handelt es sich in der Regel um Bauschutt. Hier wird der Transport auf dem Wasserpfad von der Deponie über die ungesättigte Zone bis zu einem Grundwasserleiter untersucht. Dabei wird vor allem die Einlösung von Radionukliden in Wasser (z. B. Regen-, Sicker- oder Grundwasser) und dessen Transport modelliert.

Forschungsbedarf ergibt sich in Hinsicht auf die Anwendbarkeit der bisher verwendeten Ansätze, die Aspekte vereinfachen oder vernachlässigen. Vor allem Bauschutt zeigt eine starke Heterogenität der Größenklassen, wodurch Effekte eine Rolle spielen können, die im homogenen Fall vernachlässigbar sind.

Ein weiteres Aufgabengebiet ist die Einbeziehung von extremen Wetterereignissen. Vor allem Starkregen und mögliche damit zusammenhängende Phänomene, wie zum Beispiel die Überschwemmung der Deponie, sollen untersucht werden.

Um dies zu realisieren wird die selbstentwickelte Simulationssoftware DuMu<sup>x</sup> genutzt. Diese wird nach Open-Source-Prinzipien entwickelt, wodurch die Transparenz der Forschungsprozesse erhöht und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse vereinfacht wird. Viele Modelle sind dabei schon vorhanden und können um neue erweitert werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 SPEZIALISIERTE HYDRODYNAMIK HETEROGENER PORÖSER MEDIEN

Im ersten Teil wird untersucht, welchen Einfluss stark heterogene Modellgebiete wie Bauschuttdeponien auf den Einsatz der Modellierungsansätze haben. Dabei werden die partiellen Differentialgleichungen der Zweiphasenströmung (Wasser und Luft) und als deren Vereinfachung die Richards-Gleichung untersucht. Der Unterschied bei der Richards-Gleichung ist die Annahme, dass auf Grund der erhöhten Mobilität der Gasphase im Vergleich zur Wasserphase entsprechende Druckgradienten vernachlässigbar sind und daher die Gleichung der Gasphase nicht gelöst werden muss.

Des Weiteren wird der Einfluss von Gebieten mit sehr hoher Permeabilität innerhalb der Deponie auf die Modellierungsansätze untersucht. Durch eine hohe Permeabilität können auch hohe Geschwindigkeiten auftreten, wodurch der Einsatz der normalerweise verwendeten Darcy-Gleichung nicht mehr gerechtfertigt ist. Stattdessen kann die Darcy-Forchheimer-Gleichung verwendet werden. Diese bein-

haltet einen Zusatzterm, der eine nicht-lineare Abhängigkeit zwischen Druckgradient und Geschwindigkeit herstellt. Damit wird der Einfluss der Trägheit berücksichtigt.

## **2.2 ANKOPPLUNG DER HYDRODYNAMIK AN DIE TRANSPORTTHEORIE DER RADIONUKLIDE IN HETEROGENEN PORÖSEN MEDIEN**

Das Augenmerk liegt auf dem Zusammenhang zwischen den Transportgleichungen eines der oben beschriebenen Mehrphasen-Modelle und dem Transport der Radionuklide. Die Radionuklide können als Teil der Wasserphase verstanden werden, oder als gelöste Teilchen, die die Wasserströmung nicht beeinflussen.

## **3. METHODIK**

### **3.1 SPEZIALISIERTE HYDRODYNAMIK HETEROGENER PORÖSER MEDIEN**

In einem ersten Schritt muss ein Modellgebiet erstellt werden, das die Heterogenität einer Bauschuttdeponie abbilden kann. Dazu wird mit Hilfe des geostatistischen Programms „gstat“ ein Modellgebiet mit zufälligem Permeabilitätsfeld erstellt. Dabei wird die Matérn-Kovarianz-Funktion verwendet. Die Besonderheit bei dieser Funktion ist, dass lokal keine großen Wertesprünge auftreten. In der Funktion können unterschiedliche Parameter, wie die Weite der Verteilung oder eine mögliche Anisotropie variiert werden. Da die Permeabilität auch immer einen Einfluss auf den Eindringdruck hat, wird mit Hilfe der Leverett-J-Funktion der Eindringdruck für jede Permeabilität angepasst. Bei dieser Funktion gibt es einen Referenz-Eindringdruck für eine Referenz-Permeabilität, mit deren Hilfe der Eindringdruck für die vorhandene Permeabilität skaliert wird. Der Eindringdruck geht in die Berechnung des Kapillardrucks mit Hilfe des Brooks-Corey-Modells ein. Dadurch erhält man ein 2D-Modellgebiet mit einer Permeabilitäts- und Kapillardruckverteilung.

Für die Darcy-Forchheimer-Gleichung können mehrere Ansätze verwendet werden. Manche bevorzugen die Verwendung eines Forchheimer-Koeffizienten nur unter Einbeziehung der Permeabilität, andere berücksichtigen zusätzlich die Sättigung.

### **3.2 ANKOPPLUNG DER HYDRODYNAMIK AN DIE TRANSPORTTHEORIE DER RADIONUKLIDE IN HETEROGENEN PORÖSEN MEDIEN**

Um die Modellierung der Hydrodynamik mit dem Transport der Radionuklide zu verknüpfen, wird ein sogenanntes Tracer-Modell verwendet. Dabei werden die Transportgleichungen für das Wasser und die Radionuklide getrennt voneinander gelöst. Da die Radionuklide in einer sehr geringen Konzentration zu erwarten sind, wird davon ausgegangen, dass sie die Hydrodynamik nicht beeinflussen und deswegen irrelevant für die Lösung der Transportgleichung des Wassers sind.

Zuerst werden die Wasser- und Gas-Transportgleichungen gelöst. Die berechneten Volumenflüsse werden dann in das Tracer-Modell übernommen und dessen Transportgleichung gelöst. Daraus ergibt sich eine sequentielle Kopplung.

## **4. DURCHFÜHRUNG**

### **4.1 SPEZIALISIERTE HYDRODYNAMIK HETEROGENER PORÖSER MEDIEN**

Für den Vergleich zwischen den oben beschriebenen Zweiphasen- und Richards-Modellen werden einige repräsentative Parametersätze für das „gstat“-Programm ausgewählt. Die Ergebnisse werden darauf untersucht, ob substantielle Unterschiede auftreten und wie das Konvergenzverhalten der Modelle ist. Auch die Rechenzeit spielt eine große Rolle. Beim Auswählen der Parameter wird versucht, ein Modellgebiet zu erstellen, das die Unterschiede zwischen den Gleichungen berücksichtigt. Dies zielt vor allem darauf ab, die Mobilität der Gasphase einzuschränken, da dabei die größten Unterschiede zu erwarten sind.

Ähnlich wird bei dem Vergleich zwischen Darcy- und Darcy-Forchheimer-Gleichung vorgegangen. Hier wird versucht, das Modellgebiet so zu erstellen, dass Gebiete mit hoher Geschwindigkeit entstehen, welche einen relevanten Einfluss auf die Hydrodynamik haben. Das können zum Beispiel vertikal verlaufende Gebiete mit hoher Permeabilität sein.

## **5. ERGEBNISSE**

### **5.1 SPEZIALISIERTE HYDRODYNAMIK HETEROGENER PORÖSER MEDIEN**

Einige Untersuchungen zur Hydrodynamik sind noch nicht abgeschlossen. Bis jetzt konnten für die verwendeten Permeabilitätsfelder aber keine substantiellen Unterschiede zwischen den untersuchten Modellen festgestellt werden. Nur bei der Entwicklung einer Fließfront gibt es kleine Differenzen, die aber auch auf numerische Feinheiten zurückzuführen sind.

Auch die Untersuchungen zum Vergleich zwischen Darcy- und Darcy-Forchheimer-Gleichung sind nicht abgeschlossen. Sie zeigen auch hier zum aktuellen Zeitpunkt keine relevanten Unterschiede.

### **5.2 ANKOPPLUNG DER HYDRODYNAMIK AN DIE TRANSPORTTHEORIE DER RADIONUKLIDE IN HETEROGENEN PORÖSEN MEDIEN**

Für die Kopplung zwischen Hydrodynamik und Transport der Radionuklide gibt es noch Handlungsbedarf in Hinblick auf unphysikalisches Verhalten beim Tracer-Modell. Deswegen können noch keine Ergebnisse präsentiert werden.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Wenn die Korrekturen am Tracer-Modell abgeschlossen sind, liegt der nächste Schwerpunkt auf der Entwicklung eines Modells für den partikelgebundenen Transport von Radionukliden.

Parallel ist auch die Erstellung eines großskaligen Modellgebiets in Arbeit, das nicht nur die Deponie berücksichtigt, sondern auch den darunter liegenden Boden.

## Thema

Ermittlung eines generischen Quellterms für die Modellierung der Staubfreisetzung aus NORM mit ARTM unter Berücksichtigung meteorologischer Parameter und relevanter Stoffeigenschaften

## Subject

*Evaluation of a generic source term for modelling of dust dispersion from NORM material using ARTM computer code considering meteorological parameter and relevant material properties*

### Kennzeichen

3620S52270

### Beginn

01.06.2020

### Ende

31.08.2022

### Fördermittel

EUR 348.252,-

### Forschungs- / Auftragnehmer

Brenk Systemplanung GmbH

### Projektleitung

Dr. O. Nitzsche

### Fachbetreuung BfS

J. Dilling / UR 2

### verantwortlich für den Text

Dr. O. Nitzsche

## 1. ZIELSETZUNG

Im Rahmen des ausgeschriebenen Forschungsvorhabens soll ein alternatives Berechnungsverfahren für eine Bewertung des Staubpfades im Vergleich zu den Vorgaben der Berechnungsgrundlagen Bergbau entwickelt werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Die zeitliche Variabilität der Staubfreisetzung soll im Rahmen des Projektes unter Berücksichtigung von meteorologischen Parametern untersucht werden.

Der zentrale Aspekt des Forschungsvorhabens ist es, einen zeitlich aufgelösten Quellterm unter Berücksichtigung meteorologischer und ggf. stoffspezifischer Parameter für die Resuspension zu entwickeln, um damit den Transport und die Deposition von Staub zu berechnen. Ein geeignetes Modell hierfür ist ARTM (Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell). Das Modell ARTM benötigt als Eingabeparameter die Angabe eines Quellterms. Im Rahmen dieses Projektes soll einerseits abgeleitet werden, welche Parameter die Staubfreisetzung im Wesentlichen bestimmen. Andererseits soll mit diesen Informationen die Berechnung eines zeitaufgelösten Quellterms erarbeitet werden.

Neben der Entwicklung des Modellansatzes für die Staubfreisetzung sind auch experimentelle Untersuchungen unter definierten Umweltbedingungen zur Validierung des Modellansatzes im Forschungsvorhaben durchzuführen.

Das Vorhaben ist in die folgenden vier Arbeitspakete gegliedert:

- Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik (AP 1)
- Modellentwicklung für einen zeitaufgelösten Quellterm (AP 2)
- Experimentelle Validierung des Quellterms (AP 3)
- Vergleich zu Berechnungsgrundlagen Bergbau (AP 4).

## 3. METHODIK

### 3.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik wird zu Beginn der Arbeiten im Rahmen einer Recherche aufbereitet und dokumentiert. Aus den Ergebnissen dieser Recherche werden die einzubeziehenden Arbeiten ausgewählt. Des Weiteren wird Literatur ausgewertet, die Informationen liefert, welche

konkreten Szenarien der Staubfreisetzung beim Umgang mit Rückständen in Deutschland von Bedeutung sein können.

### 3.2 MODELLENTWICKLUNG

Es wird herausgearbeitet, welche Szenarien unter welchen Umweltbedingungen jeweils signifikante Beiträge zur Staubfreisetzung liefern. Es wird eine Softwareanwendung mit MS-EXCEL erstellt, mit der die Ermittlung von Stundenwerten des Quellterms (Punkt, Linie, Fläche, Volumen) für die definierten Szenarien und die Erzeugung ARTM-kompatibler Eingabedateien erfolgen kann. Es wird ein Standard-satz generischer Parameter erarbeitet, welcher (unter Berücksichtigung von Randbedingungen) im Fall nicht vorhandener standortspezifischer Informationen angewendet werden kann und typische Bedingungen widerspiegelt.

### 3.3 EXPERIMENTELLE ARBEITEN

Zur Ermittlung der Abwehungen von Halden sind Windtunnelexperimente vorgesehen, bei denen die verschiedenen Materialien und Umweltbedingungen betrachtet werden. Für die weiteren, für den Quellterm relevanten Prozesse Abwurf/Aufnahme von Material und Auswirkungen von Fahrzeugbewegungen sind mikroskalige Experimente (Messungen von Staubkonzentrationen während der Prozesse) mit anschließenden Rückrechnungen auf die Quellstärke vorgesehen.

### 3.4 VERGLEICHSRECHNUNGEN

Es werden Emissions-, Ausbreitungs- und Dosisberechnungen für verschiedene fiktive Standorte in Deutschland durchgeführt. Die Ermittlung des Quellterms (Emissionsberechnung) erfolgt dabei mit Hilfe der in AP 2 und AP 3 ermittelten Modellansätze unter Verwendung der dazu erforderlichen meteorologischen Daten (s. u.). Als fiktive Standorte werden Standorte in den vom Deutschen Wetterdienst (DWD) im Rahmen des bis 2017 verwendeten Konzepts definierten TRY<sup>1)</sup>-Klimaregionen verwendet. Hierbei handelt es sich um insgesamt 15 Regionen. Die Ermittlung der potenziellen Exposition soll möglichst realitätsnah erfolgen.

## 4. DURCHFÜHRUNG

AP 1 wurde entsprechend der in Abschnitt 5.1 dargestellten Ergebnisse abschließend bearbeitet. Die Bearbeitung von AP 2 erfolgt derzeit auf Basis der in Abschnitt 5.2 dargestellten Ergebnisse. Für die Durchführung der in AP 3 vorgesehenen experimentellen Arbeiten konnte eine geeignete Anlage ermittelt werden. Der Betreiber einer Halde mit Rückständen aus dem bergbaulichen Betrieb wird die Arbeiten auf geeigneten Flächen ermöglichen.

## 5. ERGEBNISSE

AP 1 wurde komplett bearbeitet, die entsprechenden Ergebnisse wurden in einem Bericht dokumentiert und in einem Abschlussgespräch diskutiert.

### 5.1 ZUSAMMENFASSUNG DER LITERATURRECHERCHE (AP 1)

In der Literaturrecherche wurden (im Wesentlichen zwei) unterschiedliche mathematische Darstellungsweisen zur Ermittlung des Emissionsfaktors identifiziert, die sich für eine zeitaufgelöste Modellierung grundsätzlich eignen können:

- Multiplikative Beschreibungen sowie additive Formeln. Die Modellparameter dieser Formeln sind mathematisch verhältnismäßig einfach durch multivariate lineare Regression zu bestimmen. Die Beschreibung des Einflusses der Materialfeuchte erfolgt durch einen Korrekturfaktor, der entweder ebenfalls einem Potenzgesetz folgt oder in einer anderen geeigneten funktionalen Form vorliegt bzw. tabelliert ist.

<sup>1)</sup> Testreferenzjahre

- Multiplikative Verfahren mit konsequenter Tabellierung aller Faktoren zur Beschreibung der meteorologischen Bedingungen und Materialparameter. Auch hier steht ein physikalisch fundiertes Verständnis nicht im Vordergrund, sondern die einfache und standardisierte Anwendbarkeit.
- Auf physikalisch begründeten Modellansätzen beruhende Formeln zur Bestimmung des Emissionsfaktors, insbesondere für die Erosion von ruhend gelagertem Material. Die größte Hürde zur praktischen Anwendung der physikalisch begründeten Modelle besteht in der Schwierigkeit, die erforderlichen Modellparameter (Stoffparameter) messtechnisch zu bestimmen.

Die in bergbaulichen Zusammenhängen am häufigsten verwendete Quelle für Emissionsfaktoren ist die Datensammlung AP-42 der US EPA<sup>1)</sup>. Ein erheblicher Anteil der Literatur beschreibt Untersuchungen, in denen die in früheren Veröffentlichungen angegebenen Parametersätze auf ihre Anwendbarkeit unter lokalen Bedingungen bewertet und ggf. an die jeweiligen Erfordernisse angepasst werden müssen.

Die in der Literatur ermittelten Emissionsfaktoren sind anwendbar unter den Randbedingungen der Versuche bzw. Feldmessungen, für die sie ermittelt wurden. Liegen die meteorologischen und insbesondere die materialspezifischen Bedingungen außerhalb dieses Rahmens, ist eine Anwendbarkeit nicht mehr gegeben. Die Schwankungsbreiten der Materialeigenschaften, welche zur Ermittlung von Emissionsfaktoren in der Literatur herangezogen wurden, sind teilweise erheblich, so dass häufig nur ein sehr geringes Bestimmtheitsmaß bei der Anpassung der funktionalen Parameter an die Messdaten erzielt wird.

## 5.2 MODELLENTWICKLUNG FÜR EINEN ZEITAUFGELÖSTEN QUELLTERM (AP 2)

Aufbauend auf den Ergebnissen des AP 1 wurde ein Ansatz für die Formulierung eines zeitaufgelösten Quellterms für die Modellierung der Staubabwehung und -ausbreitung mittels ARTM abgeleitet.

Im Ergebnis des AP 1 wurde ein multiplikativer Ansatz des Quellterms mit potenzierten Parametern, wie er aus der Dokumentensammlung EPA AP 42 bekannt ist, als am besten geeignet ausgewählt. Allerdings sind folgende Korrekturen an der Grundform vorzunehmen:

- Berücksichtigung einer Schwellgeschwindigkeit
- Feuchtekorrektur
- zeitliche Erschöpfung des abwehbaren Materials
- Einfluss der Krustenbildung bzw. Verschlammung
- ggf. Sättigungslänge der Abwehung.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Im AP 2 wird der beschriebene Ansatz in eine Computeranwendung umgesetzt. Vorgesehen ist dabei die Anwendung des Tabellenkalkulationsprogramms MS-EXCEL. Mit Hilfe der aus der Literaturrecherche gewonnenen Parametersätze wird eine generische Berechnung durchgeführt und anhand geeigneter Prüfungen verifiziert. Die aus AP 3 abzuleitenden modifizierten Parameter fließen sukzessive in die Anwendung mit ein.

In AP 3 erfolgt die Planung der experimentellen Arbeiten und die Detailabstimmung mit dem Haldenbetreiber.

---

<sup>1)</sup> United States Environmental Protection Agency



**3.6 Themenbereich 06**  
**Notfallschutz**

**3.6 *Subject area 06***  
***Emergency management***

## Thema

Entwicklung ausführlicher Abfallkataster aus radiologischer Sicht für alle im allgemeinen Notfallplan des Bundes beschriebenen Referenzszenarien zur Vorbereitung der Evaluierung des besonderen Notfallplans des Bundes „Abfälle“

## Subject

*Development of detailed radiological waste registers for all reference scenarios described in the general emergency plan of the Federal Government of Germany for the preparation of the evaluation of the special emergency plan*

## Kennzeichen

3618S62575

## Beginn

01.11.2018

## Ende

31.08.2021

## Fördermittel

EUR 579.747,-

## Forschungs- / Auftragnehmer

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln

## Projektleitung

Dr. M. Sogalla

## Fachbetreuung BfS

B. Denstorf / RN 3

## verantwortlich für den Text

Dr. M. Sogalla

## 1. ZIELSETZUNG

Das Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz - StrlSchG), enthält Anforderungen an die Bewirtschaftung von notfallbedingt kontaminierten Abfällen sowie die Errichtung und den Betrieb von dafür vorzusehenden Anlagen. Die entsprechenden Planungen sind gemäß § 99 StrlSchG in einem besonderen Notfallplan des Bundes darzustellen. Die Realisierung des besonderen Notfallplans „Abfälle“ stellt komplexe fachliche und administrative Anforderungen, deren Bewertungsgrundlagen teilweise noch zu erarbeiten sind.

Als Teil des Notfallmanagementsystems ist auch der besondere Notfallplan "Abfälle" innerhalb einer fünfjährigen Phase zu evaluieren. Als Basis für die Evaluierung wird im Rahmen des Vorhabens für jedes der im allgemeinen Notfallplan des Bundes vorgesehenen Referenzszenarien detaillierte Kataster notfallbedingt kontaminierter Abfälle für kontaminierte Abfälle, die infolge des jeweiligen Notfalls im öffentlichen Raum anfallen, erstellt und mit bestehenden Entsorgungsmöglichkeiten verglichen. Auf dieser Basis werden der Entsorgungsbedarf ermittelt und die wissenschaftliche Basis für die Überprüfung der Realisierbarkeit des im Notfallmanagementsystem vorzusehenden Entsorgungskonzepts geschaffen.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Entsprechend dem Gesamtziel des Vorhabens werden Kataster für kontaminierte Abfälle, die infolge des jeweiligen Notfalls im öffentlichen Raum anfallen, erstellt und mit bestehenden Entsorgungsmöglichkeiten verglichen. Die jeweils in den Katastern zu erfassenden Abfälle umfassen die folgenden Arten:

- Dekontaminationsabfälle aus der Sanierung kontaminierter Gebiete
- nicht mehr vermarktungsfähige landwirtschaftliche Produkte
- andere infolge ihrer Kontamination nicht mehr gebrauchsfähige Güter
- Haushalts- und Gewerbeabfälle, die bei der Nutzung kontaminierter Gebiete anfallen.

Die Kataster werden als Grundlage für die Überprüfung des im besonderen Notfallplan „Abfälle“ vorgesehenen Entsorgungskonzepts aufbereitet und herangezogen. Das Anforderungsprofil an die zu erstellenden Kataster ergibt sich aus den in den Notfallplänen festzulegenden Optimierungszielen und Abwägungsgrundsätzen für das Abfallmanagement nach nuklearen oder radiologischen Notfällen.

### 3. METHODIK

Entsprechend der Zielsetzung verfolgt das Verfahren einen raumorientierten Ansatz. Als radiologische Basis für die Erarbeitung der Kataster dienen Simulationen mit dem Entscheidungshilfesystem RODOS<sup>1)</sup> für die Referenzszenarien. Für das Vorhaben werden die benötigten RODOS-Daten durch das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) bereitgestellt. Zur Ableitung von Objektkontaminationen werden die RODOS-Ergebnisse mit Daten zur Flächennutzung verknüpft, die ihrerseits in Relation zu relevanten Objekten (Dekontaminationsobjekte, Abfälle etc.) gesetzt werden. Auf diese Weise wird ein kohärentes Verfahren zur Ableitung von Objektkontaminationen aus Flächenkontaminationen entwickelt. Als Basisdaten für die Flächennutzung dient der CORINE Land Cover (CLC)-Datensatz der europäischen Union.

Die berechneten Abfallmengen werden radiologisch klassifiziert. Die Klassifikation richtet sich nach den für das Notfallmanagement entsprechend den Vorgaben nach § 95 StrlSchG spezifizierten Kriterien.

Zur Evaluierung der Notfallplanung bezüglich Entsorgungsbedarf und Entsorgungsmöglichkeiten wird eine Soll-Ist-Analyse durchgeführt. Zu diesem Zweck wird ein Vergleichsschema für den aus den Abfallkatastern ablesbaren Entsorgungsbedarf mit verfügbaren Informationen über bestehende Entsorgungsmöglichkeiten entwickelt. Das Vergleichsschema wird auf drei in Abstimmung mit dem Auftraggeber ausgewählte Referenzszenarien angewendet und auf dieser Basis der Bedarf an zusätzlichen Einrichtungen für die Entsorgung spezifiziert.

### 4. DURCHFÜHRUNG

Das Vorhaben ist in die folgenden Arbeitspakete (AP) gegliedert:

- Recherche zu Erkenntnissen und Erfahrungsrückflüssen sowie Kick-Off-Meeting als Workshop (AP 1)
- Entwicklung von Dekontaminationsstrategien (AP 2)
  - Entwicklung eines Bewertungsschemas für Dekontaminationsmaßnahmen (AP 2.1)
  - Ausarbeitung von Dekontaminationsstrategien (AP 2.2)
- Entwicklung einer Methodik zur Erstellung von Abfallkatastern aus Referenzszenarien (AP 3)
  - Erarbeitung eines Klassifikationsschemas (AP 3.1)
  - Aufstellung empirischer Beziehungen zwischen Flächennutzungsdaten und Abfallaufkommen (AP 3.2)
  - Abschätzung der Abfallkontamination aus RODOS-Ergebnisfeldern (AP 3.3)
- Entwicklung von Abfallkatastern sowie Konzeption von Skalierungsmethoden (AP 4)
  - Aufbereitung der RODOS-Datensätze (AP 4.1)
  - Berechnung der Abfallkataster (AP 4.2)
  - Konzeption von Skalierungsmethoden (AP 4.3)
- Soll-Ist-Analysen (AP 5)
  - Entwicklung des Vergleichsschemas (AP 5.1)
  - Soll-Ist-Vergleich für ausgewählte Referenzszenarien (AP 5.2)
  - Untersuchung der anderen Bundesnotfallpläne auf Rückwirkungen mit dem Entsorgungskonzept (AP 5.3)
- Entwicklung von zwei Planspielen zur Entsorgung notfallbedingt kontaminierter Abfälle (AP 6)
  - Szenarienentwicklung (AP 6.1)

---

<sup>1)</sup> Realtime Online Decision Support System

- Planung und Durchführung der Planspiele (AP 6.2)
- Auswertung der Planspiele und Schlussfolgerungen (AP 6.3)
- Projektmanagement und Projektcontrolling (AP 7).

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 RECHERCHE ZU ERKENNTNISSEN UND ERFAHRUNGSRÜCKFLÜSSEN SOWIE KICK-OFF- MEETING ALS WORKSHOP (AP 1)

Die Erkenntnisse aus bisherigen Planungen auf nationaler und internationaler Ebene sowie die verfügbaren Erfahrungsrückflüsse aus der Bewältigung realer Unfallsituationen werden in AP 1 für das Vorhaben recherchiert, zusammengestellt und systematisch als aktueller Stand von Wissenschaft und Technik in diesem Bereich aufbereitet.

### 5.2 ENTWICKLUNG VON DEKONTAMINATIONSSTRATEGIEN (AP 2)

Zur Entwicklung von Dekontaminationsstrategien ist insbesondere eine Bewertung der in Betracht kommenden Dekontaminationstechniken nach Durchführbarkeit, Aufwand und Effektivität erforderlich. Um in Hinblick auf diese Aufgaben eine erste Auswahl und Bewertung möglicher Strategien treffen zu können, wurde das Verfahren *Das-ABB* (Dekontaminationsstrategien – Auswahl, Bewertung und Berechnung) entwickelt. Das Verfahren wurde als EDV-gestütztes Werkzeug in Form einer Microsoft Excel®-Arbeitsmappe mit unterlegten Makros umgesetzt.

### 5.3 ENTWICKLUNG EINER METHODIK ZUR ERSTELLUNG VON ABFALLKATASTERN AUS REFERENZ-SZENARIEN (AP 3)

Als Basis für die Methodik wurde ein Klassifikationsvorschlag für Abfälle erarbeitet. Zur Aufstellung empirischer Beziehungen zwischen Flächennutzungsdaten und Abfallaufkommen wurde ein multivariates statistisches Verfahren entwickelt. Zur Abschätzung der Beziehung zwischen Flächenkontamination und spezifischer Aktivität im Hausmüll wurde ein empirisches Modell entwickelt.

### 5.4 ENTWICKLUNG VON ABFALLKATASTERN SOWIE KONZEPTION VON SKALIERUNGSMETHODEN (AP 4)

Durch das BfS wurde ein RODOS-Testdatensatz für einen hypothetischen Kernkraftwerksunfall im Inland übermittelt. Auf dieser Basis wurden unterschiedliche Dekontaminationsszenarien mittels *Das-ABB* durchgespielt und eine erste Grobabschätzung kontaminierter Siedlungs- und Sekundärabfälle im ersten Jahr nach einem Kernkraftwerksunfall in Deutschland erstellt.

### 5.5 SOLL-IST-ANALYSEN (AP 5)

In diesem Arbeitspaket wurde ein Vergleichsschema für den aus den Abfallkatastern ablesbaren Entsorgungsbedarf mit verfügbaren Informationen über bestehende Entsorgungsmöglichkeiten entwickelt. Außerdem wurden Untersuchungen zur zusätzlichen Strahlenexposition bei der Verbrennung kontaminierter Abfälle durchgeführt.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die geplante Weiterarbeit konzentriert sich auf die Erstellung einer flächen- und zeitaufgelösten Detailabschätzung zum Aufkommen kontaminierter Abfälle aus der Bewirtschaftung betroffener Gebiete, die Berechnung des Abfallaufkommens auf Grund nicht mehr vermarktungsfähiger landwirtschaftlicher Produkte und die Durchführung des Soll-Ist-Vergleichs.

## Thema

Integration des atmosphärischen Ausbreitungsmodells FLEXPART in RODOS zur Erweiterung der Möglichkeiten der inversen Modellierung zur Quellort- und Quelltermbestimmung auf der Grundlage von Messdaten

## Subject

*Integration of the atmospheric dispersion model FLEXPART into RODOS to extend the capabilities of inverse modeling for source location and source term determination based on measured data*

## Kennzeichen

3619S62500

## Beginn

01.01.2020

## Ende

31.07.2021

## Fördermittel

EUR 307.197,-

## Forschungs- / Auftragnehmer

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

## Projektleitung

W. Raskob

## Fachbetreuung BfS

Dr. T. Hamburger / RN 2

## verantwortlich für den Text

W. Raskob, D. Trybushnyi,  
C. Staudt

## 1. ZIELSETZUNG

Ziel des Vorhabens ist die Installation von FLEXPART 10.4 sowohl als „Stand-alone“ Programm beim Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) als auch seine Integration in JRODOS<sup>1)</sup>. Beide Realisationen sollen sowohl die normale als auch die „inverse“ Nutzung von FLEXPART erlauben.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 WETTER- UND HINTERGRUNDDATEN

Es muss gewährleistet sein, dass die operationell nutzbaren numerischen Vorhersagedaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) als Eingabe für FLEXPART genutzt werden können. Da dies mit der jetzigen FLEXPART-Version nicht möglich ist, müssen die hierzu notwendigen Anpassungen im Rahmen des Projekts durchgeführt werden. Hintergrunddaten wie z. B. Landnutzung und Topographie werden aus den Daten, die in JRODOS am BfS vorhanden sind, generiert. Damit soll vermieden werden, dass zwei Datenbasen vorgehalten werden müssen.

### 2.2 PARALLELISIERUNG

Auf Grund der doch beträchtlichen Rechenzeiten von FLEXPART sollen Parallelisierungsansätze untersucht und realisiert werden.

### 2.3 INTEGRATION IN JRODOS

Die in JRODOS integrierte Version von FLEXPART soll alle Funktionalitäten eines JRODOS Modules erhalten, insbesondere soll sie auch als Ausgangspunkt für nachfolgende Dosisabschätzungen und die Modellierung des Lebensmittelpfades dienen.

## 3. METHODIK

Um FLEXPART möglichst minimal zu modifizieren, wird es nicht vollständig in den JRODOS Rahmen integriert, sondern nur Ein- und Ausgabe Routinen entwickelt, um die notwendigen Eingabeparameter für die Modelle zu generieren. Um die Kompatibilität zu den anderen Ausbreitungsmodellen von JRODOS zu erhalten, werden die existierenden Dosisberechnung der integrierten Ausbreitungsmodelle ge-

<sup>1)</sup> Java based Realtime Online Decision Support System

nutzt. Das beinhaltet Module, die anhand der Luft- und Bodenkonzentrationen Dosen und Dosisraten berechnen. Hierzu werden auch die in der Datenbank von JRODOS hinterlegten Dosisfaktoren genutzt. Dadurch wird gewährleistet, dass die Dosisabschätzungen aller in JRODOS integrierten Simulationsmodelle konsistent sind.

Hintergrunddaten werden aus bestehenden europäischen und weltweiten Datenbanken in das erforderliche FLEXPART-Format konvertiert. Die Wetterdaten des DWD werden untersucht und die notwendigen Änderungen in FLEXPART durchgeführt.

Die OpenMP<sup>1)</sup>- und MPI (Message Passing Interface)-Parallelsierungen werden untersucht und testweise integriert. Je nach Performance wird mit der besten Methode oder eine Kombination von den zwei Methoden weitergearbeitet.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Das Vorhaben ist in die folgenden fünf Arbeitspakete untergliedert

- Definition der benötigten Schnittstellen zwischen dem Entscheidungshilfesystem JRODOS und dem atmosphärischen Ausbreitungsmodell FLEXPART (AP 1)
- Integration von FLEXPART in JRODOS (AP 2)
  - Implementierungen in FLEXPART (AP 2.1)
  - Implementierungen in JRODOS (AP 2.2)
  - Installation von FLEXPART als „Stand-Alone“-Software (AP 2.3)
  - Integration von FLEXPART in JRODOS für den operativen Betrieb (AP 2.4)
- Qualitätssicherung und Nachweis der Anwendbarkeit des integrierten Ausbreitungsmodells (AP 3)
- Erstellung eines Handbuchs zur Nutzung des integrierten Modells sowie Erarbeitung von entsprechenden Schulungsunterlagen (AP 4)
- Durchführung einer Schulung der Mitarbeiter der RODOS-Zentrale beim BfS zur Anwendung des integrierten Modells (AP 5).

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 DEFINITION DER BENÖTIGTEN SCHNITTSTELLEN ZWISCHEN DEM ENTSCHEIDUNGSHILFESYSTEM JRODOS UND DEM ATMOSPHERISCHEN AUSBREITUNGSMODELL FLEXPART (AP 1)

AP 1 bearbeitet die Hintergrund- und Wetterdaten. Die Topographie wird aus den Wetterdaten des DWD übernommen. Die Landnutzung wurde aus CORINE (für Europa) und Copernicus Global Land Service (für die Welt) in einem 1x1 km Raster erstellt. Rauigkeiten werden aus den konvertierten Landnutzungsdaten in FLEXPART ermittelt. Um die DWD-Daten in FLEXPART nutzen zu können, musste der Katalog der zu übergebenden Daten erweitert werden. Die vom DWD übermittelten Wetterdaten werden vom BfS prozessiert. Die notwendige Software wurde vom KIT in Zusammenarbeit mit dem BfS erstellt und parallelisiert.

KIT hat zwei interne Berichte erstellt. Der erste Bericht in Deutsch beschreibt die Eingabedaten, während der zweite Bericht in Englisch die Ergebnisse des Ausbreitungsmoduls LSMC und das Interface zu den nachfolgenden Modulen beschreibt. Beide Berichte bilden die Basis für die Arbeiten in AP 2.

Mit der Bereitstellung der Basisdaten und der beiden Berichte ist AP 1 abgeschlossen.

---

<sup>1)</sup> Open Multi-Processing

## 5.2 INTEGRATION VON FLEXPART IN JRODOS (AP 2)

AP 2 beinhaltet die Anpassung der Stand Alone Version von FLEXPART an die neuen Basis- und Wetterdaten sowie die Integration in JRODOS. Dazu wurden bestimmte Routinen in FLEXPART modifiziert, um z. B. Werte auf den vertikalen Modellebenen zu berechnen. Der Test der verschiedenen Parallelisierungsmethoden für FLEXPART hat gezeigt, dass die Methode MPI die besten Resultate liefert. Die Arbeiten dazu wurden begonnen und in der ersten Stand Alone Version implementiert. Diese Version wurde Ende Oktober an das BfS ausgeliefert und dort getestet.

Bis Ende November 2020 hat das KIT eine erste Integration von FLEXPART mit graphischer Benutzeroberfläche (GUI) erstellt. Die GUI wurde so entwickelt, dass ein Look-and-feel mit der jetzigen GUI von JRODOS besteht. Spezielle Parameter wurden in gesonderten Eingaben realisiert. Die GUI ist so ausgelegt, dass Vorwärts- und Rückwärtsrechnungen mit ihr durchgeführt werden können. Dem November-Prototyp fehlen bestimmte Funktionalitäten, die 2021 mit dem zweiten Prototyp und der finalen Version geliefert werden.

## 5.3 QUALITÄTSSICHERUNG UND NACHWEIS DER ANWENDBARKEIT DES INTEGRIERTEN AUSBREITUNGSMODELS (AP 3)

AP 3 dient der Qualitätssicherung und deshalb werden Testprozeduren für die Stand Alone und integrierte FLEXPART-Version erarbeitet. KIT hat die Erstellung einer Teststrategie begonnen. Die Teststrategie beinhaltet zum einen Funktionstests um sicherzustellen, dass die Optimierung keine Fehler produziert und die GUI die Daten richtig an FLEXPART übergibt, sowie spezielle Tests, die die korrekte Konvertierung und Weiterverarbeitung der Wetterdaten überprüfen.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Vor der finalen Version sowohl der Stand Alone und der in JRODOS integrierten Version werden noch weitere Prototypen erstellt. Insbesondere die integrierte Version wird dabei schrittweise um die fehlenden Funktionalitäten ergänzt (Dosisabschätzungen, Darstellung der Wetterdaten, Interface zu FDMT<sup>1)</sup> und Modul zur Berechnung einer Nuklearexplosion). Parallel dazu werden die Teststrategien umgesetzt und am Ende die sechs Testszenarien, die das BfS entwickelt hat, genutzt, um die operationelle Anwendbarkeit zu demonstrieren.

Im Rahmen der Erstellung der weiteren Prototypen wird auch die Parallelisierung von FLEXPART und der Einlese-Routinen vorangetrieben.

In AP 4 wird ein Handbuch zur Nutzung des integrierten Modells erstellt sowie Schulungsunterlagen entwickelt, die dann am Ende des Projekts bei der eintägigen Schulung der BfS-Mitarbeiter genutzt werden sollen. Generell werden alle Änderungen an FLEXPART und die Erweiterungen von JRODOS dokumentiert und dem BfS zur Verfügung gestellt.

Im Rahmen von AP 5 wird im Juni/Juli 2021 ein eintägiger Kurs entweder am BfS oder online durchgeführt.

---

<sup>1)</sup> Food Chain and Dose Module for Terrestrial Pathways

## Thema

Überprüfung und Weiterentwicklung des radiologischen Lagebildes als Grundlage für Information und Kommunikation im radiologischen Notfallschutz

## Subject

*Review and further development of the radiological situation report as basis for information and communication in radiological emergency management*

## Kennzeichen

3619S62580

## Beginn

01.12.2019

## Ende

23.07.2021

## Fördermittel

EUR 261.741,-

## Forschungs- / Auftragnehmer

Mesh & Moser Situation Management, Wien, Österreich

## Projektleitung

P. Meschenmoser

## Fachbetreuung BfS

C. Pözl-Viol / St-RK

## verantwortlich für den Text

P. Meschenmoser

## 1. ZIELSETZUNG

Im Fall eines überregionalen radiologischen Notfalls richtet das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) gemäß Strahlenschutzgesetz (StrlSchG, § 106 und § 108) ein radiologisches Lagezentrum des Bundes (RLZ) ein. Das RLZ hat unter anderem die Aufgabe, das radiologische Lagebild des Bundes (RLB) zu erstellen (§ 106 StrlSchG). Diese Aufgabe liegt im Zuständigkeitsbereich des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS). Im RLB werden relevante Informationen zu Art, Umfang und erwarteter Entwicklung der radiologischen Lage dargestellt, bewertet und regelmäßig aktualisiert. Das Lagebild dient der Information der zuständigen Behörden auf Bundes- und Länderebene im Ereignisfall. Struktur und Inhalte des radiologischen Lagebildes werden im BfS entwickelt und in Zusammenarbeit mit den zuständigen Länderbehörden weiterentwickelt.

Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens ist es, Verbesserungspotenzial für das radiologische Lagebild als Grundlage für Information und Kommunikation mit Behörden und im Weiteren als Grundlage für die Information der Bevölkerung im radiologischen Notfall zu identifizieren. Das radiologische Lagebild soll auf seine Verständlichkeit durch die geplanten Empfänger\*innen und auf die Nutzbarkeit der enthaltenen Informationen durch weitere beteiligte Akteure geprüft werden. Konkret geht es um die Verständlichkeit textlicher wie grafischer Informationen, auch in Stresssituationen und unter Zeitdruck, sowie um die Auslegung darin enthaltener Informationen in unterschiedlichen Kontexten bzw. von Beteiligten mit unterschiedlichen Kompetenzen und Verantwortungsbereichen.

Das Ergebnis des Forschungsvorhabens sind konkret umsetzbare Gestaltungsvorschläge für das Lagebild in Hinblick auf die Verwendbarkeit durch verschiedene Anwendergruppen und zur möglichen Unterstützung der Öffentlichkeitsarbeit.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Zur effektiven Zielerreichung wurde das Forschungsvorhaben in vier Arbeitspakete (AP) unterteilt. Mit der Erhebung des Standes von Wissenschaft und Technik legte AP 1 die Grundlagen für das weitere Vorgehen und gab bereits erste Hinweise auf Verbesserungsmöglichkeiten. Hierbei wurde insbesondere auf Aspekte der Verarbeitung, Darstellung und Wahrnehmung von Lageinformationen fokussiert. AP 2 hatte zum Ziel, konkret die Verständlichkeit und Effektivität des aktuell genutzten Lagebildes durch Befragung von Vertretern der unterschiedlichen Anwendergruppen zu eruieren, den Status quo zu beschreiben und Optimierungspotenzial zu identifizieren. In AP 3 werden die Erkenntnisse aus AP 1 und AP 2 in einer ersten Überarbeitung des RLB synthetisiert. Schließlich sollen in AP 4 die vorgenommenen Änderungen mit Hilfe einer Kontrollgruppe aus dem Nutzerkreis und mittels eines Plangesprächs auf ihre Wirksamkeit getestet und eventuell Anpassungen vorgenommen werden. So soll zum Ende des Forschungsvorhabens ein überarbeiteter Lagebildentwurf zur Verfügung stehen.

### 3. METHODIK

Zur Erreichung von Zielsetzung und Einzelzielen wurde ein Methodenmix gewählt. So wurden die Grundlagen für die Ermittlung des Standes von Wissenschaft und Technik in AP 1 zunächst mit einer Desktop- und Onlinerecherche gelegt und anschließend durch eine zielgerichtete Recherche in einschlägigen Datenbanken vertieft. Zum Lückenschluss und der Ermittlung blinder Flecken wurden anschließend leitfadengestützte Expert\*inneninterviews geführt, um ein möglichst umfassendes Gesamtbild zu erhalten.

Auf Grundlage der Ergebnisse aus AP 1 wurden in AP 2 im Rahmen eines qualitativen, explorativen Ansatzes leitfadengestützte Interviews mit Vertretern der Anwendergruppen des RLB geführt und systematisch softwaregestützt ausgewertet. Die Ergebnisse der Befragung und die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche werden in AP 3 umgesetzt, um für AP 4 ein Test-RLB mit entsprechenden Verbesserungen zu erstellen. In AP 4 wird dieses wiederum mit den Methoden aus AP 2 getestet und nach etwaig notwendigen Anpassungen mittels eines Plangesprächs beim BfS final überprüft und optimiert. Wo nötig wurde das Vorgehen durch Workshops und Abstimmungsmeetings ergänzt. Ab Mitte 2020 wurden diese, auf Grund der COVID-Pandemie, online durchgeführt.

### 4. DURCHFÜHRUNG

Am Anfang von AP 1 und zum Auftakt des Forschungsvorhabens wurde ein eintägiger Kick-off-Workshop beim BfS durchgeführt, um ein gemeinsames Verständnis über den Projektlauf zu erzielen und offene Fragen zu klären. Nach der initialen Desktop- und Onlinerecherche wurden hauptsächlich die Datenbanken Web of Science und SCOPUS genutzt. Ergänzend wurde Google Scholar durchsucht, um auf die dort gelistete graue Literatur Zugriff zu erlangen, die im Bereich hochspezialisierter Themen von Interesse sein kann, vor allem im Hinblick auf einschlägige Arbeiten internationaler Organisationen. Aus diesem Grund und angesichts der thematischen Fokussierung wurde auch die IAEO-Datenbank INIS<sup>1)</sup> abgefragt. Nach Sichtung relevanter Treffer flossen am Ende mehr als 90 Quellen in den Zwischenbericht zum Arbeitspaket ein. Auf dieser Grundlage wurden anschließend zehn Experteninterviews geführt. Die Auswahl der Experten erfolgte entlang der Ziele und des Erkenntnisinteresses des Forschungsprojekts und berücksichtigte Experten im Bereich der allgemeinen und radiologischen Lage Darstellung, der Entscheidungsfindung in Notlagen sowie der Krisen- und Risikokommunikation.

In einem eintägigen Abstimmungs-Meeting wurde das Vorgehen im AP 2 unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus AP 1 konkretisiert. Auf Grundlage des Meeting-Ergebnisses und nach der Definition des Empfänger- und Nutzerkreises des RLB durch das BfS wurden von diesem, in Abstimmung mit dem Projektteam, Interviewpartner identifiziert, denen das radiologische Lagebild anhand eines fiktiven Störfalls in seiner derzeitigen Gestaltung zum Test auf Verständlich- und Anwendbarkeit vorgelegt wurde. Dabei wurde darauf geachtet, die Interviewpartner so zu wählen, dass sie einen Querschnitt der Nutzergruppen des RLB repräsentieren. Insgesamt wurden so 28 Einzelinterviews zu durchschnittlich 90 Minuten geführt. Hinsichtlich der organisatorischen Zugehörigkeit wurden sowohl Bundesbehörden (15) als auch Landesbehörden (11) und sonstige Organisationen (2) (z. B. Behörden benachbarter Länder) berücksichtigt. Hinsichtlich funktionaler Rollen wurden radiologische Experten und Fachberater (19), Experten in Sachen Öffentlichkeitsarbeit (6) und Katastrophenschutz-Entscheider (3) befragt. Insgesamt besaßen damit 19 der Befragten radiologisches Fachwissen, neun waren in dieser Hinsicht Laien. Alle Interviews wurden aufgezeichnet und im Anschluss mit der Transkriptionssoftware F4 verschriftlicht, um das für eine nachvollziehbare Analyse nötige Datenformat zu erhalten. Aus weit über 40 Stunden Interviewmaterial entstanden so mehr als 500 Seiten Transkript. Die Analyse des Interviewmaterials erfolgte mit der Textanalysesoftware ATLAS.ti 8, die eine umfangreiche Bearbeitung der Daten nach aktuellem sozialwissenschaftlichem Standard erlaubt und mittels Codierungen und Auswertungsschemata die anschließende Analyse und Kategorisierung der Interview-Ergebnisse ermöglicht. Die Resultate und Schlussfolgerungen zu etwaigen Optimierungen des RLB wurden dem BfS in einem Zwischenbericht vorgelegt.

---

<sup>1)</sup> International Nuclear Information System

## 5. ERGEBNISSE

Wie angesichts des hochspezifischen Einsatzzweckes des RLB nicht anders zu erwarten, ergab die Analyse in AP 1, dass bislang keine systematische, wissenschaftliche Erforschung eines radiologischen Lagebildes oder direkt vergleichbarer Produkte stattgefunden hat. Dies betrifft qualitative Analysen ebenso wie quantitative. Insofern mussten Erkenntnisse aus Teilaspekten zusammengestellt werden. Hieraus ergaben sich erste Anhaltspunkte für Verbesserungsempfehlungen insbesondere in den Bereichen Gliederung, Struktur und Layout, visuelle und textliche Darstellung von Daten, Einsatz von Karten und Farben sowie Umgang mit prognostischen Ungewissheiten.

Die Abfrage in AP 2 ergab, dass die Gesamtzufriedenheit mit dem RLB, insbesondere unter den Nutzern mit radiologischer Expertise, bereits sehr hoch ist. Daher sollten nur dort Änderungen vorgenommen werden, wo der zu erwartende Effektivitätsgewinn den Gewöhnungsaspekt übersteigt. Dabei ist allerdings die sehr heterogene Nutzerschaft des RLB zu berücksichtigen. Die größte Diskrepanz zeichnet sich hier zwischen radiologischen Experten und Entscheidern einerseits sowie der Öffentlichkeitsarbeit andererseits ab. Während die Einen kurze und prägnante Informationen für den schnellen Überblick erwarten, bedarf es für die Öffentlichkeitsarbeit eingehenderer Erklärungen und eine breitere Darstellung des Gesamtzusammenhangs. Konkret ergab die Befragung Verbesserungsempfehlungen in folgenden Bereichen:

- Elektronisches Format des RLB, Hintergrundinformationen zur Verwendung des RLB
- Bereitstellungsprozess
- Harmonisierung von RLB mit den Lagebildern der Länder
- Frequenz der Aktualisierung
- Schulungen und Übungen
- Gliederung der Inhalte
- Metadaten (Autorenschaft, Freigabe, Datum und Uhrzeit etc.)
- Interaktivität
- Unterscheidung von Messdaten und Prognosen
- Darstellung immanenter Ungewissheiten (insbesondere bei Prognosen)
- Ergonomie der verwendeten Schrift und Symbole
- Umgang mit Abkürzungen und Fachjargon
- Art der Kartendarstellung sowie deren Maßstab und Generalisierung
- Verwendung von Farben
- Hervorhebung aktualisierter oder wichtiger Informationen
- spezifische Inhalte für die Krisenkommunikation.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

In einem eintägigen Übergangsmeeeting wurden die Änderungsempfehlungen aus AP 1 und AP 2 bereits gemeinsam mit dem BfS besprochen und für die Umsetzung in AP 3 priorisiert. Das auf dieser Basis erstellte Test-RLB wird dann in AP 4 wie geplant einer Kontrollgruppe von nunmehr 15 Probanden, die sich aus der Gruppe der in AP 2 interviewten Teilnehmer rekrutiert, vorgelegt und die Änderungen auf die beabsichtigte Effektivitätssteigerung hin überprüft. Die Erkenntnisse werden dazu genutzt, das Test-RLB weiter zu optimieren, um es letztlich in einem eintägigen Planspiel, je nach Pandemielage beim BfS oder online, anhand eines fiktiven Szenarios auf seine Anwendbarkeit in einem simulierten Notfall zu testen. Mit den auf den Erkenntnissen aus dem Planspiel basierenden Optimierungen ist das Forschungsprojekt unter Vorlage des finalen Gestaltungsvorschlages für ein überarbeitetes RLB abgeschlossen. Die Erkenntnisse und Arbeiten werden in einem Abschlussbericht dokumentiert.

**Thema**

Unterstützung der RLZ-Kopfstelle beim BMU und des Lagezentrums BfS-Neuherberg bei RLZ-Notfallübungen

**Subject**

*Support of the RLZ head office at the BMU and the situation centre BfS-Neuherberg during RLZ emergency exercises*

**Kennzeichen**

3619S62581

**Beginn**

01.10.2019

**Ende**

28.02.2021

**Fördermittel**

EUR 248.112,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln

**Projektleitung**

Dr. S. Holbein

**Fachbetreuung BfS**

N. Zander, Dr. P. Woidy / RN 2

**verantwortlich für den Text**

Dr. S. Holbein

## 1. ZIELSETZUNG

Gemäß den Anforderungen des Strahlenschutzgesetzes (s. § 102 StrlSchG) sollen die behördlichen Notfallreaktionen regelmäßig geübt werden. Dabei sind die Notfallübungen nach Art der Übung, Umfang, Notfallszenarien und Beteiligten angemessen zu differenzieren. Um die fachlichen Fähigkeiten des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) geleiteten Radiologischen Lagezentrum des Bundes (RLZ) zu trainieren und somit kontinuierlich effizienter zu gestalten, müssen regelmäßig anspruchsvolle Übungsmaßnahmen vorbereitet, durchgeführt und ausgewertet werden. Für solche Übungen sind entsprechende Szenarien zu erarbeiten, die das Aufgabenspektrum aller RLZ-Einheiten bei einem radiologisch signifikanten Notfall auf der Basis fundierter Abschätzungen möglicher Gefahrenpotentiale gut abdecken.

Die GRS ist als ein Teil des RLZ u. a. für fachliche Abschätzungen möglicher Gefahrenpotentiale in einem radiologischen Notfall zuständig. In einer Reihe von Vorläufervorhaben im Auftrag von BMU/BfS wurden von der GRS bereits umfangreiche Erfahrungen auf dem Gebiet der Analysen radiologisch signifikanter Ereignisse in kerntechnischen Anlagen gesammelt und für die Übungsszenarien verwendet. Diese Arbeiten werden in dem vorliegenden Vorhaben fortgesetzt.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das Vorhaben ist in fünf Arbeitspakete (AP) unterteilt. Im Rahmen des AP 1 werden auf Basis von bereits vorliegenden Untersuchungen auf dem Gebiet der schweren auslegungsüberschreitenden Störfälle Analysen zum radiologischen Gefährdungspotenzial bei möglichen massiven Freisetzungen mit großflächiger Kontamination durchgeführt. Aufbauend auf diesen Untersuchungen wird in AP 2 die Übungsdokumentation für eine RLZ-Übung erstellt. Weiterhin werden im Rahmen des AP 3 mögliche anlagenexterne Gefährdungspotentiale für einen Forschungsreaktor anhand vorhandener Quelltermabschätzungen analysiert. Aufbauend auf diesen Untersuchungen wird in AP 4 die Übungsdokumentation für eine weitere Notfallübung erstellt. Die Unterstützung bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von RLZ-Notfallübungen auf der Basis der in diesem Vorhaben erarbeiteten Übungsdrehbücher wird im Rahmen des AP 5 geleistet.

## 3. METHODIK

Je nach AP werden unterschiedliche Methodiken angewendet. AP 1 und AP 3 beinhalten eine umfangreiche Fachliteraturrecherche in Bezug auf mögliche Ereignisabläufe sowie deren Analyse im Hinblick auf die Anforderungen an die RLZ-Notfallorganisation. Ebenso werden die neuen Erkenntnisse innerhalb des Vorhabens aufbereitet. Aus den Erkenntnissen zu den untersuchten Ereignisabläufen werden

Übungsszenarien sowie die darauf aufbauende Übungsdokumentation erstellt (AP 2 und AP 4). Diese beinhalten die zeitliche Entwicklung von Anlagenparametern, Angaben zu möglichen Quelltermen, Meldeformulare des Betreibers sowie ein zeitlicher Ablauf der zu erwartenden Ereignisse sämtlicher Übungsteilnehmer (Übungsdrehbuch). Die in AP 5 zu leistende Unterstützung bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Notfallübungen umfasst die Teilnahme und Durchführung von Vorbesprechungen und Abstimmungsbesprechungen, die Durchführung von Übungsbriefings, die Wahrnehmung von Regie- und Beobachtungsaufgaben während der Übung sowie Mitarbeit bei der Erstellung der Übungsberichte. Darüber hinaus erfolgt die aktive Teilnahme des GRS Notfallzentrums bei den Übungen zur Unterstützung der Kopfstelle des RLZ.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Auf Grund der Einschränkungen infolge der Corona-Pandemie ist es zu einer Verschiebung des RLZ-Übungsprogramms gekommen, was eine Anpassung des Arbeitsprogramms erforderlich machte.

In AP 1 erfolgte die Erstellung der Übungsdokumentation für die RLZ-Übung CORE 2020, die in Zusammenarbeit mit Landesbehörden Niedersachsens durchgeführt werden soll. Für die Notfallübung wurden ein Übungsszenario und ein Übungsdrehbuch erstellt.

Im AP 2 erfolgten Arbeiten zur Vorbereitung einer Planbesprechung zur Krisenkommunikation im RLZ zum Training des RLZ-Stabs Kommunikation (Stab K). Die Inhalte umfassten dabei insbesondere die Arbeitsabläufe innerhalb des RLZ und die Inhalte des Radiologischen Lagebilds.

Die Arbeiten in AP 3 und 4 erfolgten wie geplant (siehe Punkt 2 und 3).

In AP 5 erfolgte die Vorbereitung, Begleitung und Auswertung der Planbesprechung für den Stab K des RLZ sowie die Vorbereitung der Notfallübung CORE 2020. Darüber hinaus erfolgte die Unterstützung bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung des im Dezember 2020 durchgeführten Kommunikations- und Techniktest „Virtuelles RLZ – CORE 2020“. Das GRS Notfallzentrum war als Teil des RLZ aktiv an dem Test beteiligt. Außerdem wurde die Erstellung des Auswertebereichs unterstützt, in dem insbesondere die Erkenntnisse des Tests aufgeführt wurden.

## 5. ERGEBNISSE

Im Rahmen des Vorhabens wurden in allen APs Ergebnisse erzielt. In AP 1 wurde die Übungsdokumentation für die RLZ-Übung CORE 2020 erstellt. In AP 2 wurden Vorträge für eine Planbesprechung zur Krisenkommunikation im RLZ erstellt. In AP 3 wurde ein Bericht zu Ereignisabläufen in Forschungsreaktion mit Relevanz für die Notfallplanungen des RLZ erstellt. In AP 4 wurde die Übungsdokumentation für eine Notfallübung an einem Forschungsreaktor erstellt. In AP 5 erfolgte die Begleitung der Planbesprechung zur Krisenkommunikation im RLZ, die Vorbereitung der RLZ-Übung CORE 2020 sowie die Unterstützung bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung des Kommunikations- und Techniktest „Virtuelles RLZ – CORE 2020“.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Für das dritte Jahr des Vorhabens ist die Begleitung und Auswertung einer weiteren RLZ-Notfallübung vorgesehen. Darüber hinaus werden die Arbeitsergebnisse der einzelnen Arbeitspakete gemeinsam mit identifizierten Optimierungsmöglichkeiten sowie Abstimmungs- und weiterem Übungsbedarf für den Auftraggeber in einem Abschlussbericht aufbereitet.

## Thema

Entwicklung qualitativer und quantitativer Methoden der Analyse von Gamma-Spektren unter Anwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz

## Subject

*Machine learning and artificial intelligence: applications in environmental radiation monitoring*

## Kennzeichen

3620S62594

## Beginn

01.06.2020

## Ende

31.12.2022

## Fördermittel

EUR 346.590,-

## Forschungs- / Auftragnehmer

ENVINET GmbH, Haar

## Projektleitung

Dr. H. Breitkreutz

## Fachbetreuung BfS

Dr. U. Stöhlker / RN 4

## verantwortlich für den Text

Dr. H. Breitkreutz

## 1. ZIELSETZUNG

Zur Bewältigung von radiologischen Notfällen unterhält das BMU 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 Information liefern. Verfügbar sind bereits Systeme auf LaBr<sub>3</sub>- 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 Unfallablaufs 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 wie auch einer operationellen Spektrumauswertenumgebung automatisch analysiert, in die weitere Peak-basierende Verfahren wie auch 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 wie 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 (KI) 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 auf Grund bekannter Fehlertypen zu sichten, z. B. technische Einflüsse elektromagnetischer Störungen auf die Messergebnisse zu erkennen und diese Daten als unplausibel zu maskieren.

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 aus-

gelöst. Die Zeitverläufe und die räumliche Ausdehnung dieser niederschlagsbedingten Ereignisse zeigen charakteristische Merkmale, die von der Rufbereitschaft dazu genutzt werden, um künstlich 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.

## **2. EINZELZIELSETZUNG**

### **2.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK (AP 1)**

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 Anomalitäten-erkennung („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 sind zu betrachten und darzustellen.

### **2.2 VORALARMKRITERIEN (AP 3)**

Ein Klassifizierungssystem für die Erkennung von niederschlagsbedingten Erhöhungen von Messwerten konventioneller ODL-Sonden zur Anwendung bei der Bearbeitung von Voralarmen im ODL-Messnetz soll entwickelt werden.

Als Input-Parameter stehen 10 min- und 1 min- ODL-Daten von ca. 1 800 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 verwendet werden sollen, um einen entsprechenden Algorithmus softwaretechnisch abzubilden. Und schließlich sind die ausgewählten Algorithmen zu implementieren und anzuwenden.

### **2.3 PLAUSIBILITÄT VON ODL-DATEN (AP 2)**

Ein Klassifizierungssystem für die Plausibilisierung von Daten konventioneller ODL-Sonden ist zu entwickeln.

Als Input-Parameter stehen 10 min- und 1 min- ODL-Daten von ca. 1 800 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. Und schließlich ist ein Vorschlag zu erarbeiten, welche Methoden verwendet werden sollen, um einen entsprechenden Algorithmus softwaretechnisch abzubilden. Die ausgewählten Algorithmen sind zu implementieren und anzuwenden.

## 2.4 ENERGIEKALIBRIERUNG VON LABR3-SPEKTREN (AP 4)

In diesem AP wird ein Klassifizierungssystem für die Erkennung von Abweichungen der Energiekalibrierung von Spektren spektroskopischer ODL-Sonden, basierend auf LaBr<sub>3</sub>-Detektoren, zur routinemäßigen Anwendung bei der Analyse von Spektren entwickelt.

Als Input-Parameter stehen 10 min-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.

## 2.5 NIEDERSCHLAGSERKENNUNG VON LABR3-SPEKTREN (AP 5)

Ein Klassifizierungssystem für die Erkennung von niederschlagsbedingten Erhöhungen von Messwerten spektroskopischer ODL-Sonden, basierend auf LaBr<sub>3</sub>-Detektoren, soll zur routinemäßigen Anwendung bei der Analyse von Spektren entwickelt werden.

Als Input-Parameter stehen 10 min-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 Kompensation der Drift 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 verwendet werden sollen, um einen entsprechenden Algorithmus softwaretechnisch abzubilden. Und schließlich sind die ausgewählten Algorithmen zu implementieren und anzuwenden.

## 2.6 QUANTIFIZIERUNG VON NUKLIDEN IN SPEKTREN (AP 6)

AP 6 sieht die Entwicklung eines qualitativen Verfahrens zur Detektion von Radionukliden in Spektren von In-situ-Daten und in Spektren spektroskopischer ODL-Sonden, basierend auf LaBr<sub>3</sub>-Detektoren, zur routinemäßigen Anwendung bei der Analyse von Spektren vor.

Als Input-Parameter stehen 10 min-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<sup>1)</sup> 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<sup>2)</sup>-, LaBr<sub>3</sub>- 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 verwendet werden sollen, um einen entsprechenden Algorithmus softwaretechnisch abzubilden. Und schließlich sind die ausgewählten Algorithmen zu implementieren und anzuwenden.

---

<sup>1)</sup> Deutscher Wetterdienst

<sup>2)</sup> Hochreiner Germaniumdetektor

## 3. METHODIK

### 3.1 METHODENAUSWAHL

Die Auswahl der Methoden erfolgt für jedes AP separat. Dabei wird neben der Literaturrecherche (AP 1) 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 neuste Erkenntnisse aus der Wissenschaft einfließen. Bei späteren APs wird jeweils die Erfahrung aus vorangegangenen APs berücksichtigt. Gegebenenfalls werden an früheren APs auch noch kleinere Korrekturen vorgenommen.

Die Auswahl der Methodiken 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.

### 3.2 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.

### 3.3 TEST

Der Auftragnehmer testet alle Algorithmen mit Hilfe vom Auftraggeber (AG) bereitgestellter Daten. Diese Daten werden vom Auftragnehmer (AN), 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 gegebenenfalls iterativ verbessert.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Neben den in den einzelnen AP genannten Methoden finden über den gesamten Projektverlauf hinweg Meetings zwischen Auftraggeber und -nehmer statt, um erarbeitetes Wissen zu reflektieren und das weitere Vorgehen zu planen. AP 3 ist weitestgehend abgeschlossen. AP 2 ist parallel in Bearbeitung.<sup>1)</sup>

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 am BfS-Standort in Freiburg statt. Die jeweiligen Software-Module inkl. Dokumentation und die Zwischenberichte sind nach Abschluss der einzelnen Arbeitspakete zu liefern.

## 5. ERGEBNISSE

Bereits inhaltlich vollständig bearbeitet wurden AP 1 und AP 3.

---

<sup>1)</sup> Die ursprüngliche Reihenfolge von AP 2 und AP 3 wurde umgekehrt, da sich diese Reihenfolge als vielversprechender dargestellt hat. Die ursprüngliche Nummerierung wurde aber beibehalten. Daher wurde AP 3 vor AP 2 bearbeitet.

## 5.1 LITERATURRECHERCHE (AP 1)

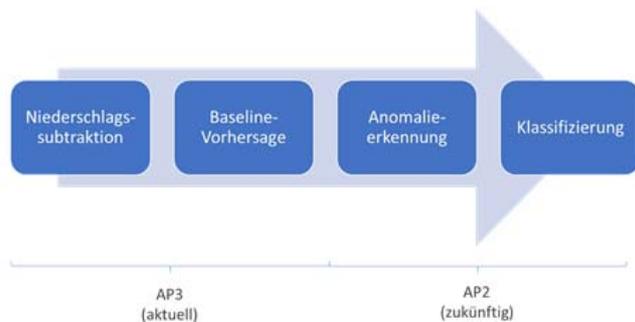
Für die umfangreiche Literaturrecherche wurden über 300 wissenschaftliche Publikationen, Abschlussarbeiten, Patente, Forschungsberichte u. ä. gesichtet und analysiert. Zusammenfassend kann man sagen, dass bisher vergleichsweise wenig Literatur zu ML/KI mit reinen ODL-Sonden existiert. Es gibt aber vielversprechende Konzepte für deren Anwendung, die in den Arbeitspaketen 2 und 3 implementiert, getestet und verbessert werden können.

In der Gammasspektroskopie hingegen hat sich insbesondere in den letzten 2-3 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.

## 5.2 NIEDERSCHLAGSERKENNUNG (AP 3)

Das Arbeitspaket wurde gegenüber der ursprünglichen Definition in Abstimmung zwischen AN und AG etwas abgewandelt. Ziel ist es nun, eine Vorhersage der erwarteten ODL basierend auf Wetter- und historischen Daten zu erhalten. Die nachfolgende Anomalieerkennung in AP 2 würde dann auf der Differenz zwischen Vorhersage und tatsächlichem Messsignal arbeiten und somit eine deutlich bessere Ausgangsdatenbasis vorfinden – somit können sowohl die Sensitivität verbessert als auch gleichzeitig die Fehlerrate gesenkt werden.

Der gewählte Ansatz für AP 3 ist ein zweistufiger (s. Abb. 1).



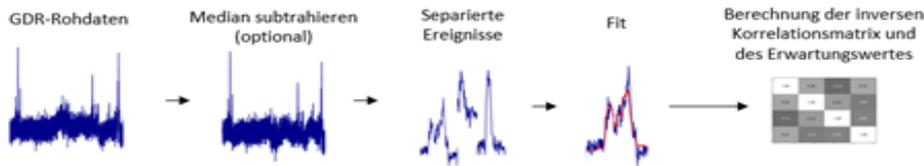
**Abbildung 1:** Lösungsansatz für AP 3 und Überführung in AP 2

Mit einem ersten, regressionsbasierten Schritt können die ODL-Spitzen nach Regenereignissen zuverlässig vom Signal entfernt werden. Eine Plausibilitätsprüfung der Fit-Parameter stellt dabei sicher, dass sich nicht heimlich Spaltprodukte im Regen verstecken. Diese Prüfung basiert auf automatisch aus historischen Daten gelernten Korrelationen und der Mahalanobis-Distanz (s. Abb. 2).

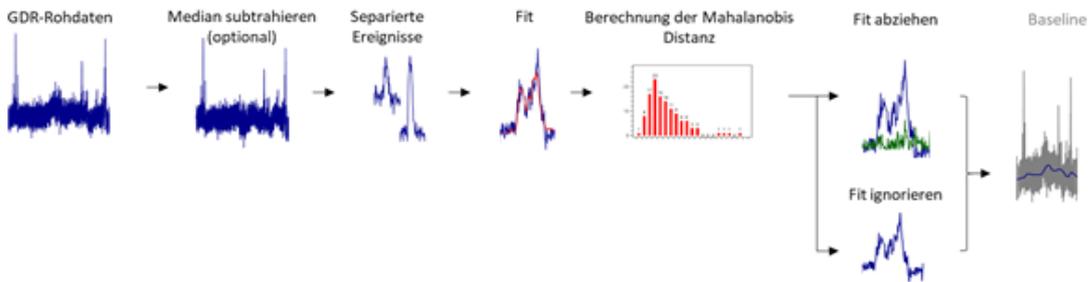
Für den nächsten Schritt, die Vorhersage der Basislinie ohne Regenspitzen, wurden zwei Algorithmen untersucht, der auf einer klassischen Methode basierende gleitende Mittelwert ARIMAX (*autoregressive integrated moving average*) und LSTM (*Long short-term memory networks*). ARIMAX ist der wichtigste Vertreter der statistischen Prognosealgorithmen. Das Konzept von LSTMs beruht auf künstlichen neuronalen Netzen, bei denen die Verbindungen zwischen den Neuronen einen gerichteten Graphen entlang einer zeitlichen Abfolge bilden. 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 3 h-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.

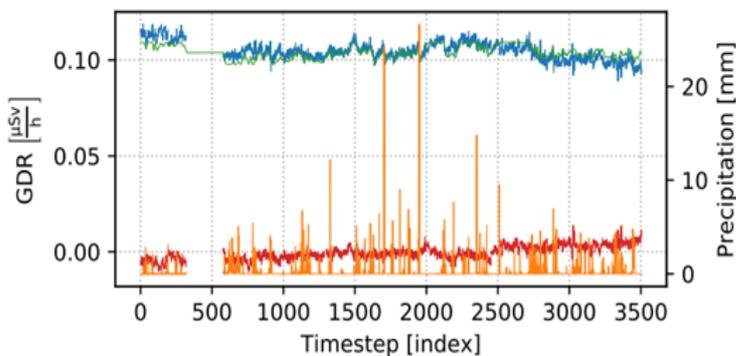
## Training



## Test



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung der Vorgehensweise beim Training und der Anwendung der Methode der Niederschlagserkennung



**Abbildung 3:** Messwerte und Vorhersagen basierend auf der LSTM-Methode

In der Beispielgrafik (s. Abb. 3) ist blau der ODL Messwert, grün die Vorhersage, rot die Abweichung, orange die Niederschlagsintensität. Das LSTM hat nur Wetterdaten als Eingabe bekommen, hat aber alle relevanten Zusammenhänge gelernt, inklusive der Abschirmung durch Bodenfeuchte. Der Trainingsdatensatz dazu hat Messwerte aus etwa 4 Jahren umfasst, die Vorhersage ein weiteres Jahr. Bei der oben abgebildeten Station wurde zwischenzeitlich sogar die Sonde ersetzt. Die Vorhersage ist trotzdem noch sehr gut. Die Vorhersagen werden mit zunehmender Länge der zum Training verfügbaren Zeitreihe auch immer besser. Lediglich Schnee stellt erwartungsgemäß ein gewisses Problem dar.

Im Rahmen der Bearbeitung von AP 3 wurde auch die Literatursammlung aus AP 1 nochmals aktualisiert und einige neue Veröffentlichungen hinzugefügt.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Es wird mit der Arbeit am AP 2 begonnen. Ziel dieses AP ist es, die Abweichungen zwischen Vorhersage und tatsächlichem Messsignal zu klassifizieren.

Die Abwicklung des Projekts ist auf Grund der Umstellung der Arbeitspakete leicht verzögert. Es wird daher darüber nachgedacht, das von den Vorläufer-Arbeitspaketen unabhängige AP 4 teilweise parallel zu bearbeiten.



### **3.7 Themenbereich 07**

**Vorhaben mit allgemeiner Bedeutung für den Strahlenschutz**

### **3.7 *Subject area 07***

***Projects of general importance to radiation protection***

**Thema**

Untersuchungen zur tätigkeitsbezogenen Strahlenexposition bei der mobilen Radiographie

**Subject**

*Survey of activity-related occupational dose exposure during mobile radiography*

**Kennzeichen**

3617S72382

**Beginn**

01.10.2017

**Ende**

31.03.2021

**Fördermittel**

EUR 166.793,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Brenk Systemplanung GmbH

**Projektleitung**

A. Kummer

**Fachbetreuung BfS**

L. Kammerer / MB 4

**verantwortlich für den Text**

A. Kummer

## 1. ZIELSETZUNG

In Deutschland liegen mehrere tausend gültige Genehmigungen zum Umgang mit radioaktiven Stoffen nach § 7 StrlSchV sowie § 3 RöV vor. Hiervon sind ein erheblicher Teil Genehmigungen zur zerstörungsfreien Materialprüfung mittels mobiler Strahlenquellen oder mobiler Röntgeneinrichtungen (mobile Radiographie). In diesem Arbeitsbereich werden verhältnismäßig hohe berufliche Strahlenexpositionen der etwa 2 500 in diesem Tätigkeitsfeld beschäftigten Personen im Vergleich zu anderen nach StrlSchV und RöV ausgeübten Tätigkeiten ermittelt. Das Expositionspotential soll durch eine detaillierte Analyse des Umgangs mit radioaktiven Quellen der mobilen Radiographie besser eingeschätzt und mögliche Optimierungen zum Schutz des beschäftigten Personals abgeleitet werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das Projekt ist in fünf Arbeitspakete unterteilt:

### 2.1 ERMITTLUNG DER TÄTIGKEITEN, DER BENUTZTEN GERÄTE / RADIOAKTIVEN QUELLEN UND DER BETRIEBE IN DER MOBILEN RADIOGRAPHIE (AP 1)

AP 1 umfasst die Erstellung und das Versenden einer Umfrage zur Datenerhebung zur Nutzung mobiler Radiographie bei relevanten Betrieben, um einen Überblick über die verwendeten Geräte, Anzahl der strahlenexponierten Mitarbeiter, die Arbeitsabläufe, Strahlenschutzmaßnahmen und Notfallmanagement zu erlangen.

### 2.2 REGULATORISCHE ANFORDERUNGEN FÜR GERÄTE UND TÄTIGKEITEN DER MOBILEN RADIOGRAPHIE (AP 2)

Im Rahmen des AP 2 werden Anforderungen und Regelungen für die Durchführung von Messungen mit Geräten zur mobilen Radiographie dargelegt. Dazu gehört die Darstellung der aktuellen Gesetze, Verordnungen und Richtlinien für den Betrieb und die Beförderung der Geräte.

### 2.3 DATENSAMMLUNG DER TÄTIGKEITSBEZOGENEN PERSONENDOSEN (AP 3A UND 3B)

AP 3 dient der Sammlung von Expositionsdaten des Personals, wie sie beispielsweise durch Auswertung der betrieblichen Dosiserfassung, zusätzlichen Messungen vor Ort oder aus Dosisdaten des Strahlenschutzregisters des BfS erhoben werden können. Neben der Erhebung werden die Daten auch auf ihre Konsistenz und Plausibilität geprüft.

## **2.4 AUSWERTUNG DER BESONDEREN VORKOMMNISS, NOTFALLVORSORGE (AP 4)**

AP 4 beschäftigt sich mit der Aufbereitung und Auswertung von Meldungen über besondere und potenzielle Ereignisse, insbesondere beim Einsatz von hochradioaktiven Quellen, die zu ungeplanten Expositionen führen könnten.

## **2.5 DATENANALYSE (AP 5)**

Der Fokus des AP 5 liegt auf der Analyse der dosimetrischen Daten in Bezug auf die Wirksamkeit und Angemessenheit der regulatorischen Anforderungen. Ziel ist dabei die Optimierung des Arbeitsschutzes mit konkreten Hinweisen zu Arbeitsabläufen, die zu Dosisersparungen führen können.

# **3. METHODIK**

## **3.1 ERMITTLUNG DER TÄTIGKEITEN, DER BENUTZTEN GERÄTE / RADIOAKTIVEN QUELLEN UND DER BETRIEBE IN DER MOBILEN RADIOGRAPHIE (AP 1)**

Die Umfrage, die an verschiedene Betriebe mit mobiler Radiographie versendet wurde, dient der Datensammlung zu den Themenbereichen „verwendete Geräte“, „Anzahl der strahlenexponierten Mitarbeiter“, „Strahlenschutzmaßnahmen“ und „Notfall und Zwischenfälle“. Die Adressen der relevanten Betriebe sind in gewissem Umfang bekannt und wurden durch Verbände, wie beispielsweise der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP), Aufsichtsbehörden sowie Daten des Strahlenschutzregisters ergänzt.

## **3.2 REGULATORISCHE ANFORDERUNGEN FÜR GERÄTE UND TÄTIGKEITEN DER MOBILEN RADIOGRAPHIE (AP 2)**

Für das AP 2 wurden die bestehenden regulatorischen Anforderungen an die Verwendung und den Transport von Geräten für die mobile Radiographie recherchiert und aktuelle Richtlinien zusammengestellt.

## **3.3 DATENSAMMLUNG DER TÄTIGKEITSBEZOGENEN PERSONENDOSIS (AP 3)**

Im AP 3 werden anhand der Datenerhebung aus AP 1 Betriebe ermittelt, bei denen die Dosisdaten der verwendeten Geräte und Methoden sowie die tatsächlichen Dosiswerte der Mitarbeiter ausführlich erhoben werden. Um eine vollständige Abdeckung der Überwachung der Dosiswerte zu gewährleisten, werden den Betrieben zusätzliche Dosimeter bereitgestellt. Damit werden die involvierten Mitarbeiter (anonymisiert), die Methoden und Arbeitsabläufe, die ausgeführten Tätigkeiten und die Dauer des Einsatzes genau ermittelt und auf Plausibilität überprüft. Zusätzlich werden Strahlungsfelder in der Umgebung der Strahlenquellen bei der Installation, dem Abbau, während der Messdurchführung, dem Transport und der Lagerung der mobilen Messgeräte vor Ort mit geeigneter Ortsdosisleistungsmessgeräten gemessen.

## **3.4 AUSWERTUNG DER BESONDEREN VORKOMMNISS, NOTFALLVORSORGE (AP 4)**

AP 4 umfasst eine Literaturrecherche zu allen in Deutschland seit 2010 dokumentierten meldepflichtigen Vorkommnissen im Bereich der mobilen Radiographie. Zusätzlich werden mögliche Ereignisse benannt, die zu ungeplanten Expositionen hätten führen können.

## **3.5 DATENANALYSE (AP 5)**

Die erhobenen Daten werden im AP 5 abschließend auf Wirksamkeit und Angemessenheit der regulatorischen Anforderungen analysiert. Dabei werden vor allem die in AP 3 erhobenen Expositionsdaten der Strahlungsfelder in der Umgebung der Strahlenquellen und die Dosiswerte des Personals betrachtet. Aus der Datenanalyse können gegebenenfalls Optimierungsmöglichkeiten für die weiteren Tätigkeiten an den Geräten der mobilen Radiographie abgeleitet werden. Dazu gehören die Aspekte einer guten Strahlenschutzorganisation, Schutzausrüstung, Vorgehensweisen und Arbeitsabläufe, schnelle Einschätzungen des Gefahrenpotentials bei besonderen Vorkommnissen und der Einfluss von Fortbildungs- und Informationsveranstaltungen.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 DATENSAMMLUNG DER TÄTIGKEITSBEZOGENEN PERSONENDOSEN (AP 3)

Vier Radiografie-Betriebe haben sich bereit erklärt, an der Datenerfassung teilzunehmen. An diese Betriebe wurden betriebliche Dosimeter zusammen mit einem Erfassungsbogen zur monatlichen Übermittlung der Daten zugestellt. Die Datenerfassung wurde für die Zeitperiode von 9 Monaten durchgeführt (April – Dezember 2020).

Für jeden Einsatz wurden die folgenden Daten erfasst:

- Typ des Geräts
- Typ der Strahlenquelle
- Aktivität der Strahlenquelle
- ausgeführte Tätigkeiten wie z. B. Transport von Messgeräten, Vorbereitung und Durchführung von Aufnahmen
- Anzahl der Aufnahmen
- Dauer (Std.)
- abgelesener Dosiswert
- zusätzliche Informationen zu den Arbeitsabläufen.

Zur Überprüfung auf Plausibilität wurden die Dosiswerte mit den Daten aus dem Strahlenschutzregister abgeglichen.

### 4.2 AUSWERTUNG DER BESONDEREN VORKOMMNISSSE, NOTFALLVORSORGE (AP 4)

Die besonderen Vorkommnisse beim Betrieb von Einrichtungen der mobilen Radiographie wurden aus den Jahresberichten des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) ermittelt. Da zum Zeitpunkt der Erstellung des AP 4-Berichts der letzte Jahresbericht des BMU nur bis zum Jahr 2017 veröffentlicht wurde, konnten die relevanten Ereignisse für den Zeitraum von 2010 bis 2017 erfasst werden.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass zwischen 2018 und 2020 andere relevante meldepflichtige Ereignisse eingetreten sind. Da die Zwischenfälle oder meldepflichtige Ereignisse der Stufe 2 (Störfall) oder größer gemäß der Internationalen Nuklearen und Radiologischen Ereignisskala (INES) bei der Internationalen Atomenergie-Organisation (International Atomic Energy Agency/IAEA) gemeldet werden müssen, sind Informationen zu solchen Ereignissen in IAEA-Berichten (IAEA-News) verfügbar. Für den Zeitraum von 2017 bis 2019 ist ein Vorfall bei der Anwendung des Radiographie-Gerätes der INES-Stufe 2 bekannt. Dieser Vorfall trat jedoch bei der Durchstrahlprüfung im Labor auf.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 ERMITTLUNG DER TÄTIGKEITEN, DER BENUTZTEN GERÄTE / RADIOAKTIVEN QUELLEN UND DER BETRIEBE IN DER MOBILEN RADIOGRAPHIE (AP 1)

Unter AP 1 wurden die Antworten der versendeten Fragebögen ausgewertet. In der mobilen Radiographie werden überwiegend die Strahlenquellen Ir-192 oder Se-75 verwendet. Eine weitere mögliche Strahlenquelle ist Co-60, die jedoch seltener verwendet wird. Die eingesetzten Aktivitäten und Belichtungszeiten hängen von der Strahlungsquelle, den Spezifikationen des Gerätes und dem Verwendungszweck ab. Ein direkter Vergleich der Belichtungszeiten und angesetzten Aktivitäten bei der Röntgenradiographie ist nur schwer möglich, da es sich immer um Geräte von unterschiedlichen Herstellern gehandelt hat.

Die durch die Umfrage erfassten strahlenexponierten Mitarbeiter sind zum Großteil der Strahlenschutzkategorie A zugehörig und unterliegen einer medizinischen Überprüfung. Die Auswertung der amtlichen Dosimeter ergab, dass die höchste jährliche effektive Dosis für Mitarbeiter in der mobilen

Radiographie bis maximal 6 mSv pro Jahr beträgt. Der jährlich zulässige Grenzwert für strahlenexponiertes Personal liegt bei 20 mSv im Jahr. Der Großteil der Mitarbeiter erfährt jedoch Dosen unter 3 mSv (etwa 92 %). Etwa 50 % des gesamten exponierten Personals erhält eine Dosis von unter 1 mSv im Jahr. Um eine höhere Strahlenbelastung zu erkennen sind alle strahlenexponierten Mitarbeiter, neben dem amtlichen vorgeschriebenen Dosimeter, mit einem betrieblichen Dosimeter mit akustischem Alarm ausgestattet. Die Anzahl der durchgeführten Durchstrahlungsprüfungen variiert für das betroffene Personal stark zwischen einzelnen bis hin zu mehr als 100 Anwendungen im Monat.

In den meisten Betrieben beträgt der Abstand zur offenen Strahlenquelle während der Belichtung mehr als 10 Meter. Zusätzlich ist das Gerät meist mit Kollimatoren, Abschirmungen und Blenden ausgestattet und zusätzlich werden Gebäudestrukturen und Bleiabschirmungen verwendet.

In den letzten fünf Jahren kam es nach Angaben der Betriebe zu keinem Zwischenfall, beinahe-Unfall oder sonstigen Vorkommnissen bei der Verwendung von Strahlenquellen im Rahmen der mobilen Radiographie. Bei Unfällen würden die Informationen zu den Vorkommnissen an die zuständigen Aufsichtsbehörden oder andere öffentliche Institutionen weitergegeben.

## **5.2 REGULATORISCHE ANFORDERUNGEN FÜR GERÄTE UND TÄTIGKEITEN DER MOBILEN RADIOGRAPHIE (AP 2)**

In AP 2 wurden die aktuellen regulatorischen Anforderungen gesichtet und zusammengefasst. Übergeordnet fungieren die Strahlenschutzverordnung und das zum Ende 2018 in Kraft getretene Strahlenschutzgesetz sowie die Röntgenverordnung. Darin ist festgelegt, wie hoch die jährliche effektive und Organdosis für strahlenexponiertes Personal sein darf, welche Grenzwerte nicht überschritten werden dürfen und wie die Regularien überprüft werden müssen. In der Regel sind Strahlenschutzbeauftragte für die Überwachung und Einhaltung der Grenzwerte der Mitarbeiter zuständig.

## **5.3 DATENSAMMLUNG DER TÄTIGKEITSBEZOGENEN PERSONENDOSEN (AP 3)**

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die unter AP 3 erfassten Dosisdaten. Obwohl diese Daten nicht repräsentativ genug sind, um die gesamte Situation in der deutschen mobilen Gammadiographie darzustellen, können sie typische Probleme und Besonderheiten veranschaulichen.

Die in der Tabelle 1 dargestellten Dosisdaten zeigen einen großen Unterschied zwischen der mobilen Gammadiographie, bei der der Kollimator (oder die Blende) und der Abstand zur Strahlungsquelle die Hauptmittel des Strahlenschutzes sind, und der Radiographie am stationären Bestrahlungsplatz, wo verschiedene Abschirmungsmittel, wie z. B. mobile Stellwände aus Beton, zu Verfügung stehen. Die Daten zeigen auch erhebliche Unterschiede in der Anzahl der Arbeitseinsätze der einzelnen Firmen.

Die Dosiswerte pro Einsatz wurden in Abhängigkeit von der Quellenstärke und der Anzahl der Aufnahmen analysiert. Die Werte zeigen erhebliche Schwankungen, da die Randbedingungen an verschiedenen Messorten sehr unterschiedlich und daher schwer zu standardisieren sind. Die Abhängigkeit der Strahlendosis von der Anzahl der Aufnahmen ist erkennbar, während keine Korrelation zwischen der Strahlendosis und der Aktivität der Strahlenquelle gefunden wurde. Die Erklärung liegt in der üblichen Praxis der mobilen Radiographie, die Größe des Kontrollbereichs zu minimieren.

Die Dosis des Mitarbeiters F1\_M2 war bei den gemeinsam durchgeführten Einsätzen (62 Einsätze) im Durchschnitt 1,9-mal höher als die von F1\_M1. Dieser Unterschied ist auf die folgenden Tätigkeiten zurückzuführen, die nur von F1\_M2 ausgeführt wurden:

- Bedienung des Gammadiographie-Geräts
- Bedienung der Fernbedienungshandkurbel innerhalb des Kontrollbereichs (schwer zugängige Stellen).

**Tabelle 1: Gesamtüberblick der gesammelten Dosisdaten**

Firma	Mitarbeiter	Periode	Quellen	Geräte	Einsätze	Aufnahmen	Dosis [mSv]	Anmerkungen
1	F1_M1	April – Oktober	Ir-192	Teletron	118	1 680	1,33	M1 bereitet hauptsächlich die Filmtaschen vor und beschriftet die RT-Filme. Ab November ist M1 hauptsächlich für Einlesen und Auswertung von Speicherfolien zuständig. Daher gibt es für November - Dezember keine erfasste Strahlenexposition.
			Se-75	GammaMat Se	11	384		
	F1_M2	April – Dezember	Ir-192	Teletron	146	2 350	3,43	M2 ist der eigentliche RT-Prüfer des Trupps. Er bedient die Fernbedienung, richtet die Aufnahmen ein und öffnet bzw. schließt das Isotopengerät.
			Se-75	GammaMat Se	16	525		
2	F2_M1	März – Dezember	Se-75	GammaMat Se	53	1 557	1,10	
3	F3_M1	Mai – Dezember	Ir-192	GammaMat TIF	8	151	0,50	
			Se-75	GammaMat Se	21	400		
4	F4_M1	April – Dezember	Ir-192	Gammamat TI, Gammamat TIF	61	844	0,17	stationärer Bestrahlungsplatz, mobile Stellwände aus Beton

Zusätzliche Angaben wurden angefordert, wenn der Dosiswert 40 µSv pro Einsatz überschritt. Die Ursachen können wie folgt klassifiziert werden (Tabelle 2):

- große Anzahl von Aufnahmen oder längere Belichtungszeiten durch hohe Wandstärken und große Rohrdurchmesser
- ungünstige Messbedingungen: schwer zugängliche Stellen (Gerüst, tiefe Gruben).

**Tabelle 2: Angaben zu Einsätzen mit erhöhten Dosiswerten (mehr als 40 µSv pro Einsatz)**

Firma	Ursachen (Anzahl der Einsätze)	
	große Anzahl von Aufnahmen / längere Belichtungszeit	ungünstige Messbedingungen
1	2	6 (Gerüst)
2	7	3 (tiefe Gruben, Rohrbrüche)
3	2	-

#### 5.4 AUSWERTUNG DER BESONDEREN VORKOMMNISSSE, NOTFALLVORSORGE (AP 4)

Für den Zeitraum von 2010 bis 2017 wurden in Deutschland insgesamt 10 besondere Vorkommnisse beim Betrieb von Einrichtungen der mobilen Radiographie gemeldet. Die Mehrzahl der Vorfälle mit erheblichen radiologischen Folgen war mit Störung beim Rück-/Ausfahren der Strahlenquelle des Gam-

maradiographie-Geräts verbunden. Diese Störung kann jedoch nur im Zusammenhang mit groben Fehlern und Missachtung der Strahlenschutzregeln zu einer unzulässigen Strahlenexposition führen.

Die niedrige Zahl der Vorkommnisse spricht für die Wirksamkeit der folgenden Präventionsmaßnahmen.

- Organisatorische Maßnahmen:
  - Unterweisungen und Schulungen  
Die wichtigste Voraussetzung zur Prävention der bedeutsamen Vorkommnisse ist, dass jeder, der am Betrieb von Einrichtungen der mobilen Radiographie beteiligt ist, über die notwendigen Kenntnisse zum Strahlenschutz verfügt. Jedem Prüftrupp muss ein Strahlenschutzbeauftragter vor Ort bestellt werden, der entsprechende Fachkenntnisse besitzt.
  - Strahlenschutzregeln für den Betrieb  
Vom Betrieb erstellte Strahlenschutzanweisungen beschreiben die Regeln, die einen sicheren, störungsfreien Arbeitsablauf gewährleisten.
- Technische Maßnahmen  
Technische Defekte sind die häufigste Ursache für schwerwiegende radiologische Vorfälle beim Betrieb von Einrichtungen der mobilen Radiographie. Deswegen gehören technische Kontrolle und Wartungsarbeiten an radiographischen Geräten zu den wichtigsten Präventionsmaßnahmen. Diese sind in den entsprechenden DIN-Normen festgelegt.
- Anweisungen für Notfallsituationen  
Im Notfall, wie z. B. eine Störung beim Einfahren der radioaktiven Quelle, müssen Mitarbeiter das genaue Verfahren kennen, um die Störung zu beheben und eine unzulässige Strahlenexposition auszuschließen. Dieses Verfahren, der Maßnahmenkatalog für bedeutsame Vorkommnisse, ist in den Strahlenschutzanweisungen festgelegt.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

AP 3 wird mit geplanten Messungen der Strahlungsfelder in der Umgebung der Strahlenquellen bei der Installation, dem Abbau, während der Messdurchführung, dem Transport und der Lagerung der mobilen Messgeräte vor Ort abgeschlossen. Auf diese Weise erstellt AP 3 zusammen mit bereits abgeschlossenen Arbeitspaketen (AP 1, AP 2 und AP 4) eine Datenbasis für die Implementierung von AP 5.

## Thema

Studie zu Aktivitäts- und Partikelgrößenverteilungen im Nano- und Millimeterbereich in der Fortluft kerntechnischer Anlagen mit und ohne Vollfilterung

## Subject

*Study on the distribution of activity and particle sizes in the nano- and millimetre range in gaseous effluents from nuclear installations with and without filter*

### Kennzeichen

3617S72572

### Beginn

01.06.2017

### Ende

31.01.2020

### Fördermittel

EUR 563.792,-

### Forschungs- / Auftragnehmer

Brenk Systemplanung GmbH, Aachen  
RCM Radiochemie München, Garching

### Projektleitung

Dr. S. Thierfeldt

### Fachbetreuung BfS

A. Heckel / UR 3

### verantwortlich für den Text

Dr. S. Thierfeldt,  
Dr. G. von Oertzen

## 1. ZIELSETZUNG

Dieses Vorhaben bezieht sich auf Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Fortluft aus kerntechnischen Anlagen, die gemäß § 99 StrlSchV radiologisch zu bewerten sind und über die an die Europäische Kommission sowie im Rahmen des Parlamentsberichts „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung“ zu berichten ist. Hierfür müssen die Aktivitätsableitungen so genau wie möglich bestimmt werden. Als ein hierfür relevanter Faktor wird die Kenntnis der Aktivitätsverteilung als Funktion des aerodynamischen Partikeldurchmessers angesehen.

In diesem Vorhaben erfolgt vor diesem Hintergrund die nähere Untersuchung der Verteilung der Partikelgrößen und der Aktivitäten auf die Partikelgrößenklassen bei Ableitungen mit der Fortluft aus verschiedenen kerntechnischen Anlagen, darunter insbesondere solchen in der Stilllegungsphase. Ferner wird der Einfluss der Filterung untersucht.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK (AP 1)

Eine Literaturrecherche in etablierten Fachzeitschriften und anderen einschlägigen Quellen ergab einen Überblick über vorhandene Messdaten zu Partikel- und Aktivitätsverteilungen in den interessierenden Größenbereichen aus kerntechnischen Anlagen sowie eine Zusammenstellung der Messmethoden, die bei diesen Bestimmungen der Aktivitätsverteilungen verwendet wurden.

### 2.2 ERARBEITEN DER MESSSTRATEGIE, PLANUNG DER MESSUNGEN (AP 2)

Die Messungen wurden konkret geplant und die Ausführung in AP 3 wurde vorbereitet. Hierzu gehörte die Entwicklung einer Messstrategie, einschließlich der Auswahl geeigneter kerntechnischer Anlagen sowie Einholung von Zustimmungen zur Durchführung der geplanten Messungen und die technische Vorbereitung des Messequipments.

### 2.3 EXPERIMENTELLE BESTIMMUNG DER PARTIKELGRÖßEN- UND AKTIVITÄTSVERTEILUNGEN IN KERNTÉCHNISCHEN ANLAGEN MIT UND OHNE VOLLFILTERUNG (AP 3)

Im Rahmen von AP 3 erfolgte die experimentelle Bestimmung der Partikelgrößen- und Aktivitätsverteilungen in kerntechnischen Anlagen mit und ohne Vollfilterung. Hierzu gehören die Bestimmung der Anzahl-, Massen- und nuklidspezifischen Aktivitätsverteilungen als Funktion des Aerosolpartikeldurchmessers, die Ermittlung geeigneter Beprobungsstellen, die Durchführung dieser Messungen in kern-

technischen Anlagen sowohl im bestimmungsgemäßen Betrieb als auch im Rückbau sowie die Bestimmung der Partikelgrößen- und Aktivitätsverteilungen mit ausreichender Auflösung in Bezug auf den Partikeldurchmesser.

### 3. METHODIK

Im Rahmen von AP 1 wurden die Grundlagen für die späteren Messungen und deren Auswertungen erarbeitet.

Im Rahmen von AP 2 wurden die Messstrategie und die Planung der in AP 3 durchzuführenden experimentellen Messkampagnen entworfen und beschrieben sowie probeweise erste Messungen durchgeführt und ausgewertet.

Die Durchführung der Messungen in AP 3 erfolgte in zwei Schritten: die Entnahme der Partikel erfolgte mit einem Impaktor. In den verschiedenen Impaktor-Stufen scheiden sich Partikel unterschiedlicher aerodynamischer Durchmesser (AED) ab. Im zweiten Schritt wurden diese nach Korngröße getrennten Partikel gammaspektrometrisch und mit Messungen der Alpha- und Beta-Gesamtaktivität sowie weiteren Verfahren (Rasterelektronenmikroskopie, Massenspektrometrie) untersucht. Ziel ist die Ermittlung der Verteilung (massenbezogener) Aktivitäten relevanter Radionuklide auf die einzelnen Partikelgrößen und ein Vergleich dieser Verteilung mit vorliegenden Ergebnissen für Anlagen in der Betriebsphase, z. B. solchen aus Literaturangaben.

### 4. DURCHFÜHRUNG

Die durchgeführten Messungen umfassen Kurzzeitmessung am Aerosolpartikelentstehungsort, Online-Kurzzeitmessungen hinter den Vorfiltern an den Zerlegeplätzen und Langzeitmessungen vor und hinter der Filteranlage zum Fortluftkamin.

Es wurden folgende Messungen durchgeführt:

- Offline-Kurzzeitmessung in der Lüftungsanlage des stillgelegten Forschungsreaktors München (über mehrere Stunden)
- Offline-Langzeitmessungen in Fortluft und Abluft des Kernkraftwerkes Isar Block 1 (KKI-1) und des Kernkraftwerkes Biblis Block A (KWB-A) (jeweils über mindestens 4 Monate)
- Offline-Kurzzeitmessungen am Aerosolentstehungsort ohne Filterung, am KWB-A bei verschiedenen Zerlegearbeiten (über mehrere Stunden)
- Online-Kurzzeitmessungen in der Abluft verschiedener Zerlegearbeiten am KKI-1 (über einige Tage).

Die Auswertung der Offline-Messungen erfolgte über die gravimetrische Bestimmung der Massenkonzentration in den einzelnen Partikelgrößenklassen. Bei den Online-Messungen ergab die Auswertung eine Verteilung der Anzahlkonzentrationen in den verschiedenen Partikelgrößenklassen. Bei allen Messungen wurde zudem die Aktivitätsverteilung durch gammaspektrometrische Messungen und Messung der Alpha- und Beta-Gesamtaktivität in den verschiedenen Größenklassen bestimmt.

Im Anschluss wurden anhand von Ausbreitungsrechnungen für einen generischen Standort die potenziellen Auswirkungen verschiedener Parametrisierungen auf die berechnete Exposition dargestellt und verglichen.

### 5. ERGEBNISSE

Die Langzeitmessungen ergaben eine bimodale Verteilung der Partikelmassenkonzentration sowohl in der Abluft als auch in der Fortluft beider kerntechnischen Anlagen. Die lokalen Maxima lagen bei etwas unterschiedlichen AED mit einem kleineren Maximum zwischen 0,1 µm und 0,25 µm und dem jeweils größeren lokalen Maximum bei einem AED von 2 µm bis 2,5 µm.

Die Filterwirkung wurde durch die deutlich reduzierte Gesamtmasse und Gesamtaktivität der Aerosole sehr gut nachgewiesen: Die Massenkonzentration hinter dem Filter wurde jeweils um mehr als das Dreifache reduziert, die Aktivitätskonzentration in der Fortluft war jeweils so gering, dass auch nach einer Dauer der Partikelsammlung von mehreren Monaten in fast allen Größenklassen keine Aktivität mehr nachgewiesen werden konnte.

Auch bei den Offline-Kurzzeitmessungen am Aerosolentstehungsort ohne Filterung ergaben sich bimodale Partikelmassenkonzentrationsverteilungen mit lokalen Maxima bei AED von einerseits bis zu 0,25  $\mu\text{m}$  und andererseits zwischen 1,5 und 2,5  $\mu\text{m}$ . Die Partikelaktivitätskonzentrationsverteilung folgte hier annähernd der Partikelmassenkonzentrationsverteilung, wobei in den Bereichen der AED unter etwa 0,3  $\mu\text{m}$  keine Aktivität mehr nachgewiesen werden konnte.

Die Online-Messungen ergaben bei den unterschiedlichen Zerlegearbeiten sehr unterschiedliche Partikelanzahlkonzentrationen, während die Messungen für eine radiologische Auswertung nicht ausreichend Material in den einzelnen Größenklassen ansammeln konnten.

Von den Partikelgrößenklassen, die im Partikelmodell ARTM berücksichtigt werden müssen, werden nur die beiden kleineren (AED-Klasse 1: < 2,5  $\mu\text{m}$  und AED-Klasse 2: 2,5  $\mu\text{m}$  - 10  $\mu\text{m}$ ) von der hier verwendeten Messtechnik abgedeckt. Allerdings zeigen die Messergebnisse, dass die Partikelkonzentration in der Fortluft bei AED > 1  $\mu\text{m}$  verschwindend klein ist und die AED-Klassen 3 (10  $\mu\text{m}$  – 50  $\mu\text{m}$ ) und 4 (> 50  $\mu\text{m}$ ) für die Ausbreitungsrechnungen der Partikel hinter dem Filter keine Rolle spielen. Auch für Anlagen ohne Filterung spielen diese Partikelklassen auf Grund der sehr kurzen Ablagerungsdistanz für die Ausbreitungsrechnung keine maßgebliche Rolle.

Für die Ausbreitungsrechnung nach ARTM ohne Filterung gleicht die Verteilung der Partikelkonzentration der Verteilung der Aktivitätskonzentration auf die beiden AED-Klassen mit jeweils ca. 75 % der Masse und Aktivität in AED-Klasse 1 und jeweils 25 % in AED-Klasse 2. Nach dem Filter verschiebt sich dieses Verhältnis teilweise noch deutlicher, so dass in der Fortluft nur noch weniger als 10 % von Masse und Aktivität in AED-Klasse 2 anzutreffen sind.

Generische Berechnungen der durch Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Luft bedingten Exposition zeigen deutlich, dass die Parametrisierung der trockenen und der nassen Ablagerung einen erheblichen Einfluss auf die berechnete Exposition hat. Dabei zeigte sich, dass die bisher bestehende Parametrisierung (AVV zu § 47 StrlSchV in der vor dem 31.12.2018 gültigen Fassung) als eine konservativ-realistische Abschätzung für die im Rahmen dieses Vorhabens ermittelte Partikelgrößenverteilung in der Fortluft gefilterter Abgaben angesehen werden kann.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Zusätzlich zu den bereits durchgeführten Auswertungen erfolgt noch die detailliertere Bestimmung der Aktivitätskonzentrationsverteilung durch LSC<sup>1)</sup>-Messungen der Beta-Aktivität in den Größenklassen, bei denen sich auf Grund der Messungen im Gasdurchflusszähler Anhaltspunkte für Aktivität ergeben haben. Zudem wird durch Rasterelektronenmikroskopie die Form der Partikel in den einzelnen Größenklassen näher untersucht.

---

<sup>1)</sup> Flüssigszintillationsmessung

<b>Thema</b>			
Fortschreibung der Untersuchung und Bewertung der tätigkeitsbezogenen Strahlenexposition in Anlagen nach AtG und standortnahen Zwischenlagern für radioaktive Abfälle			
<b>Subject</b>			
<i>Update of the investigation and evaluation of task-related radiation exposure in nuclear facilities and on-site interim storage facilities for radioactive waste</i>			
<b>Kennzeichen</b> 3618S72392	<b>Beginn</b> 01.11.2018	<b>Ende</b> 30.09.2021	<b>Fördermittel</b> EUR 318.618,-
<b>Forschungs- / Auftragnehmer</b> Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH			
<b>Projektleitung</b> Dr. A. Günther	<b>Fachbetreuung BfS</b> L. Kammerer / MB 4		<b>verantwortlich für den Text</b> Dr. A. Günther

## 1. ZIELSETZUNG

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 (im so genannten Nachbetrieb) und bei Arbeiten zur Stilllegung und dem Rückbau dieser Anlagen. Durch die endgültige Abschaltung von acht Leistungsreaktoren im Jahr 2011 und je einem weiteren in den Jahren 2015, 2017 und 2019 (Philippsburg 2) sowie der Abschaltung aller Leistungsreaktoren bis Ende 2022 erhält die mit den genannten Arbeiten einhergehende Exposition eine zusätzliche aktuelle Bedeutung für den radiologischen Arbeitsschutz in kerntechnischen Anlagen. Ebenso gewinnt der Betrieb standortnaher Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente sowie für die Lagerung radioaktiver Abfälle aus Stilllegung und Abbau von Leistungsreaktoren an Bedeutung.

Eine optimierte Arbeitsplanung und -durchführung und die systematische Auswertung gemachter Erfahrungen kann zu beträchtlichen Dosisersparungen 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 deutlich über Daten der amtlichen Personendosimetrie hinausgehen.

Im Rahmen dieses Vorhabens werden frühere 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, die die Datenreihen früherer Jahre fortsetzen und ergänzen, 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 insbesondere bei wiederkehrenden Prüfungen und bei typischen Arbeitsschritten bei der Revision und der Stilllegung erarbeitet. Des Weiteren werden relevante Vorhabensergebnisse in den nationalen und internationalen Erfahrungsaustausch, insbesondere im Rahmen der Mitarbeit im Information System on Occupational Exposure (ISOE) der OECD Nuclear Energy Agency (NEA), eingebracht.

Darüber hinaus werden aufbauend auf den Ergebnissen des Vorläufervorhabens „Fortschreibung der Untersuchung und Bewertung der tätigkeitsbezogenen Strahlenexposition in Anlagen nach AtG, standortnahen Zwischenlagern für radioaktive Abfälle und nichtkerntechnischen Einrichtungen nach StrlSchV und RöV“ (3615S22301) Untersuchungen zum Einsatz ausländischen Fremdpersonals in kerntechnischen Anlagen durchgeführt und Aspekte vertieft analysiert, die sich aus den unterschiedlichen nationalen Verfahrensregelungen und Strahlenschutzsystemen des Herkunftslandes des Fremdpersonals und des Landes der kerntechnischen Anlage ergeben.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Die übergeordneten Zielsetzungen des Vorhabens werden durch die Bearbeitung der nachstehenden, miteinander verknüpften Einzelziele umgesetzt.

### 2.1 DATENERHEBUNG UND DOKUMENTATION

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 2017 bis 2019 erhoben, aufbereitet und in jährlichen bzw. zweijährlichen 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.

### 2.2 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 mit 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 eine international einheitliche Charakterisierung der Tätigkeiten angewendet. Die internationale Zusammenarbeit und der Informationsaustausch erfolgen insbesondere durch die Mitarbeit im ISOE.

### 2.3 OPTIMIERUNGSEMPFEHLUNGEN

Auf der Basis der erhobenen Daten und Analyseergebnisse sowie nationaler und internationaler Entwicklungen werden Vorschläge zur Optimierung der Arbeitseinsätze und der Arbeitsmittel, insbesondere bei wiederkehrenden Prüfungen und bei typischen Arbeitsschritten der Revision, im Nachbetrieb und bei der Stilllegung erarbeitet.

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.

### 2.4 EINSATZ VON AUSLÄNDISCHEM FREMDPERSONAL

Aufbauend auf den Ergebnissen des Vorläufervorhabens und unter Berücksichtigung der Erfahrungen aus der Sammlung und Analyse der Expositionsdaten sowie des gezielten Erfahrungsaustauschs auf nationaler und internationaler Ebene werden Fragen im Zusammenhang mit dem Strahlenschutz ausländischen Fremdpersonals bearbeitet. Ziel ist es, Beiträge zu eindeutigen Vorgehensweisen beim Einsatz ausländischen Fremdpersonals in deutschen Kernkraftwerken zu leisten, die einen grenzüberschreitenden Strahlenschutz sicherstellen.

## 3. METHODIK

Der VGB (European Technical Association for Power and Heat Generation) und damit die deutschen Betreiber von Leistungsreaktoren sind zum 31. März 2016 aus ISOE ausgetreten. Die Betreiber sind trotz des Ausstiegs aus ISOE im Rahmen der jährlichen Berichterstattung an die Reaktor-Sicherheitskommission 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 im Vorläufervorhaben herausgestellt, dass die Sammlung

der Expositionsdaten im Vergleich zu den Vorjahren erschwert wird, da ein Großteil der Betreiber ihre Expositionsdaten nicht mehr direkt an ISOE melden und die GRS dadurch teilweise auf andere Quellen angewiesen ist. Darüber hinaus werden für Teilbereiche die Daten durch ergänzende Anfragen bei den jeweiligen Anlagen angereichert. Die bei der Auswertung und Analyse gewonnenen Ergebnisse werden für die verschiedenen Themenbereiche in Berichten dokumentiert. Die in den Abschnitten 2.2 und 2.3 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. Aspekte der Optimierung werden bei der Diskussion der Daten fortlaufend verfolgt.

## **4. DURCHFÜHRUNG**

Zur Untersuchung der beruflichen Strahlenexposition in kerntechnischen Anlagen werden die Daten eines Jahres jeweils im Folgejahr in den Anlagen erhoben. Mit dem Austritt des VGB aus ISOE zum 31. März 2016 werden Expositionsdaten von einem Großteil der Betreiber nicht mehr direkt an ISOE gemeldet, so dass die GRS teilweise auf andere Quellen, u. a. die Berichte der Betreiber an die Reaktor-Sicherheitskommission, angewiesen ist. Für die Anlagen der Ver- und Entsorgung werden standardisierte Datenerfassungsbögen genutzt, die im Rahmen früherer 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.

## **5. ERGEBNISSE**

Die bislang vorliegenden Ergebnisse des Vorhabens werden nach der Struktur der Einzelzielsetzungen zusammengefasst.

### **5.1 DATENERHEBUNG UND DOKUMENTATION**

Die Erstellung der nach Abschnitt 2.1 vorgesehenen Jahresberichte wurde für die Anlagen in Stilllegung für die Berichtsjahre 2017 und 2018 abgeschlossen. Die Berichtsentwürfe zu den Anlagen in Betrieb/Nachbetrieb bis zu dem Berichtsjahr 2018 wurden den Anlagen zur Prüfung überlassen. Die Sammlung der Daten zur Strahlenexposition für das Berichtsjahr 2019 wurde für die Anlagen im Leistungsbetrieb, im Nachbetrieb und in der Stilllegung weitestgehend abgeschlossen. Zu beachten ist, dass die Berichte mit anlagenspezifischen Informationen der Öffentlichkeit nicht zur Verfügung stehen.

### **5.2 INTERNATIONALER ERFAHRUNGSUSTAUSCH**

Es erfolgte eine enge Mitarbeit in den Gremien und Arbeitsgruppen des ISOE, die die Sitzungen der ISOE *Working Group on Radiological Protection Aspects of Decommissioning Activities at Nuclear Power Plants* (WGDECOM, Oktober 2020 – Videokonferenz) und des ISOE Management Boards (MB, Dezember 2020 – Videokonferenz) umfassten.

### **5.3 EINSATZ VON AUSLÄNDISCHEM FREMDPERSONAL**

Es wurde damit begonnen, mögliche spezifische Probleme im Rahmen des Einsatzes von ausländischem Fremdpersonal zu identifizieren. Hierzu wurde insbesondere mit nationalen und internationalen Recherchen angefangen.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Im Jahr 2021 ist die Fortführung der Arbeiten geplant. Dies umfasst insbesondere die im Vorhaben vorgesehene Datensammlung und die Fortführung der jährlichen bzw. zweijährlichen Berichterstattung zur Exposition in kerntechnischen Anlagen. Ebenso wird die Mitarbeit in den Gremien und Arbeitsgruppen des ISOE fortgesetzt, welche neben dem ISOE MB insbesondere auch die im Frühjahr 2015 gegründete ISOE-Expertengruppe WGDECOM, die sich speziell mit Fragestellungen der Stilllegung von Kernkraftwerken befasst, umfasst, um sowohl deutsche Erfahrungen in den internationalen Erfahrungsaus-

tausch als auch umgekehrt internationale Erfahrungen in den deutschen Erfahrungsaustausch einzubringen. Darüber hinaus sind Teilnahmen am nationalen und internationalen Erfahrungsaustausch geplant, wie beispielsweise das ISOE International Symposium, das in Tours, Frankreich, stattfinden soll (ursprünglich für Juni 2020 geplant, mittlerweile auf 2022 verschoben). Weiterhin wird die Untersuchung zum Einsatz ausländischen Fremdpersonals in kerntechnischen Anlagen weitergeführt.

**Thema**

Validierung des atmosphärischen Ausbreitungsmodells ARTM durch experimentelle Untersuchungen

**Subject**

*Validation of atmospheric dispersion model ARTM by field studies*

**Kennzeichen**  
3618S7259A

**Beginn**  
01.05.2019

**Ende**  
31.12.2021

**Fördermittel**  
EUR 487.633,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Konsortium: Brenk Systemplanung GmbH und Hochschule Düsseldorf (University of Applied Science)

**Projektleitung**  
Dr. O. Nitzsche

**Fachbetreuung BfS**  
Dr. M. Pattantyús-Ábrahám / UR 3

**verantwortlich für den Text**  
Dr. O. Nitzsche,  
Prof. Dr. K. Weber, C. Fischer

## 1. ZIELSETZUNG

Das Langzeitausbreitungsmodell ARTM (Atmosphärisches-Radionuklid-Transport-Modell) wird zur mikro- und mesoskaligen Berechnung der atmosphärischen Dispersion im Rahmen von 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. Die Ausbreitungsberechnung erfolgt mit einem Lagrange-schen Partikelmodell. Im Forschungsvorhaben soll das vorliegende Programmpaket durch experimentelle Untersuchungen im Feldmaßstab validiert werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

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 verschiedenen Wettersituationen übereinstimmen. Die jeweiligen Experimente sollen geeignet sein, Rückschlüsse auf Langzeitsituationen zu ermöglichen.

## 3. 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. 2 000 m Höhe) erfolgen. Benötigt werden neben Lage und zeitlichem Verlauf der Emission:

- die lokale Bebauungsstruktur
- Geländedaten
- Immissionskonzentrationen
- meteorologische Daten.

### 3.1 IMMISSIONSMESSUNGEN

Als Emissionen sollen permanente SO<sub>2</sub>-Freisetzungen aus Kohlekraftwerken und Freisetzungen eines Tracers, z. B. Perfluorcarbon (PFC), genutzt werden (Details siehe Abschnitt 5.2).

## 3.2 METEOROLOGISCHE MESSUNGEN

Messungen meteorologischer Parameter sollen an einer Stelle vertikal aufgelöst und ergänzend bodennah an weiteren Stellen erfolgen (Details siehe Abschnitt 5.3).

## 3.3 VALIDIERUNGSBERECHNUNGEN

Es wird mit den Daten zur Gebäudestruktur und zum Geländeverlauf am jeweiligen Messstandort ein ARTM-Modell erstellt. Mit den ausgewählten meteorologischen Parametern erfolgt die Windfeldberechnung. Ergebnisse dieser Berechnung werden mit weiteren meteorologischen Daten verglichen. Ggf. erfolgt die Anpassung der Windfeldberechnung im Rahmen der Möglichkeiten von ARTM. Anschließend erfolgen Ausbreitungsberechnungen unter Verwendung der ermittelten Emissionsdaten und ein Vergleich der berechneten mit den gemessenen Immissionswerten.

# 4. DURCHFÜHRUNG

Zur Validierung der Ausbreitungsmodelle ist eine messtechnische Nachverfolgung der SO<sub>2</sub>-Emission durch Kraftwerke sowie die Freisetzung eines spezifischen Tracers geplant. Im Jahr 2020 wurden im Forschungsvorhaben folgende Arbeitspunkte bearbeitet:

- Ermittlung von potenziell geeigneten Untersuchungsgebieten im Bundesgebiet sowie Durchführung von Ausbreitungsrechnungen als Grundlage für die zu erarbeitende Messstrategie – Machbarkeitsstudie (AP 2)
- Erarbeitung einer Messstrategie zur Durchführung luftchemischer Messungen von Stoffen im Umfeld von Emittenten (AP 3)
- Erarbeitung der Messstrategie für die Durchführung von meteorologischen Messungen (AP 4).

# 5. ERGEBNISSE

## 5.1 ERMITTLUNG VON POTENZIELL GEEIGNETEN UNTERSUCHUNGSGBIETEN IM BUNDESGBIET SOWIE DURCHFÜHRUNG VON AUSBREITUNGSRECHNUNGEN ALS GRUNDLAGE FÜR DIE ZU ERARBEITENDE MESSSTRATEGIE (AP 2)

Im AP 2 wurde eine Standortanalyse hinsichtlich geeigneter Kraftwerksstandorte durchgeführt. Im Ergebnis wurde der Standort Neurath für ein flaches Gelände und der Standort Weisweiler für ein stärker strukturiertes Gelände (bei Anströmungen aus Nordwest bis Nordost) als besonders geeignet bewertet. Mit für den Standort repräsentativen Ausbreitungsmodellierungen konnte gezeigt werden, dass die zu erwartenden SO<sub>2</sub>-Emissionen aus beiden Anlagen zu Immissionen führen, die mit der für den Einsatz geplanten Technik nachweisbar sind. Die Lage des Standorts ermöglicht eine einfache Logistik für die luftgestützten Messungen. Die Freisetzung eines PFC-Tracers ist möglich. Eine Analyse der standortbezogenen meteorologischen Daten ergab besonders geeignete Zeitfenster für die Durchführung der Experimente in den Sommermonaten. Die Luftraumanalyse hat ergeben, dass eine Befliegung mit nur kleinen Einschränkungen im Bereich des Kraftwerks Neurath möglich ist.

Die mit den Flugzeugen durchgeführte Beprobung im Untersuchungsgebiet soll auf drei Ebenen stattfinden. Dabei sollen die Flugzeuge in drei unterschiedlichen Höhen weitgehend parallel zueinander das Flugmuster abfliegen. Zusätzlich werden bodennahe Messungen im Untersuchungsgebiet mit einem Messfahrzeug durchgeführt.

## 5.2 ERARBEITUNG EINER MESSSTRATEGIE ZUR DURCHFÜHRUNG LUFTCHEMISCHER MESSUNGEN VON STOFFEN IM UMFELD VON EMITTENTEN (AP 3)

Eine Strategie zur Freisetzung des geplanten Tracers (insbesondere Freisetzungsrates) und zur Messung sowohl des SO<sub>2</sub> als auch des Tracers in verschiedenen Flughöhen und zusätzlich durch eine fahrzeuggestützte Bodenmessung wurde erarbeitet. Entsprechende Online-Messgeräte für SO<sub>2</sub> stehen zur Verfügung, ein Sammler für die Tracermessungen wurde auf die speziellen Messanforderungen ausgelegt

und wird in Kürze erprobt. Die Messungen werden mit Hilfe von drei Flugzeugen in mehreren quer zur Ausbreitungsrichtung (PFC und SO<sub>2</sub>) und einer längs zur Ausbreitungsrichtung stattfindenden Befliegungen (nur SO<sub>2</sub>) sowie ergänzend mit einer fahrzeuggestützten Beprobung und Messung mit einem passiven DOAS<sup>1)</sup>-System am Boden durchgeführt.

### 5.3 ERARBEITUNG DER MESSSTRATEGIE FÜR DIE DURCHFÜHRUNG VON METEOROLOGISCHEN MESSUNGEN (AP 4)

Eine Messstrategie zur Bestimmung primärer (d. h. ausbreitungsrelevanter) und sekundärer (Niederschlagsmengen, Temperatur und weitere) meteorologischer Parameter wurde erarbeitet. Dabei soll beispielsweise ein stationäres *Sonic Detecting And Ranging Gerät* (SODAR) zur Ermittlung der Ausbreitungsparameter in verschiedenen Messhöhen zum Einsatz kommen. Weitere Messungen von Ausbreitungsparametern sind bodennah mit mehreren Ultraschallanemometern (USA) vorgesehen. Zur Ermittlung der Niederschlagsintensität wird auf die zahlreichen Messstellen insbesondere des DWD<sup>2)</sup> zurückgegriffen, entsprechende Daten sind öffentlich und kostenfrei zugänglich. Sekundäre meteorologische Daten werden an den Bodenstationen erhoben. Zusätzlich erfolgt bei den Befliegungen eine Messung der Temperatur und Luftfeuchte.

Die Auswertung vorhandener meteorologischer Daten von den Standorten ermöglicht eine grobe Planung von Messzeiträumen, bei denen die angestrebten Bedingungen am wahrscheinlichsten sind. Detailplanungen müssen kurzfristig auf Basis von belastbaren Wettervorhersagen erfolgen. Optimale Messbedingungen ergeben sich, wenn:

- die Windrichtung eine Messbefliegung im Lee ohne Einschränkungen zulässt
- während der Messbefliegung und Befahrung möglichst eine Abfolge aller Ausbreitungsklassen, insbesondere aber auch neutrale Ausbreitungsklassen, beobachtet werden
- kein Niederschlag auftritt.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Durchführung der Messungen wird derzeit vorbereitet. Allerdings muss mit den Messungen abgewartet werden, bis wesentliche pandemiebedingte Einschränkungen aufgehoben sind. Die Messungen werden nach in AP 3 und AP 4 erarbeiteten Messstrategien durchgeführt. Im Untersuchungsgebiet werden mit den Messflugzeugen und einem Messfahrzeug in unterschiedlichen Höhen, quasi zeitgleich, die Konzentrationsdaten ermittelt. Das Untersuchungsgebiet befindet sich überwiegend im Lee der Tracerquelle und erstreckt sich über ein Gebiet hinreichender Größe. Eine Evaluierung der erhobenen Daten schließt sich der Messkampagne an. Die validierten Daten stehen zur Überprüfung des Ausbreitungsmodells zur Verfügung.

---

<sup>1)</sup> dedicated outdoor air system

<sup>2)</sup> Deutscher Wetterdienst

## Thema

Repräsentative Umfrage zur deutschlandweiten Erfassung verhältnispräventiver Maßnahmen zur Vorbeugung UV- bedingter Erkrankungen bei Kindertagesstätten und Schulen

## Subject

*Representative survey to record structural measures for the prevention of UV-induced diseases in childcare facilities and schools in Germany*

### Kennzeichen

3619S72401

### Beginn

01.12.2019

### Ende

30.11.2021

### Fördermittel

EUR 158.486,-

### Forschungs- / Auftragnehmer

Institut für Therapie- und Gesundheitsforschung IFT-Nord gGmbH, Kiel

### Projektleitung

Prof. Dr. R. Hanewinkel

### Fachbetreuung BfS

Dr. C. Baldermann / WR 4

### verantwortlich für den Text

Prof. Dr. R. Hanewinkel,  
Dr. B. Isensee

## 1. ZIELSETZUNG

Es soll eine Bestandsaufnahme der technischen verhältnispräventiven Vorkehrungen und Maßnahmen zum Sonnenschutz in Kindertagesstätten und Schulen erfolgen. Zu diesem Zweck wird eine repräsentative quantitative Online-Befragung durchgeführt, in der mind. 1 % und max. 10 % aller Kindertagesstätten und Schulen in Deutschland befragt werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 ERFASSUNG VON VORHANDENSEIN, ANZAHL UND ART DES TECHNISCHEN UV-SCHUTZES

Es soll erfasst werden, ob die Einrichtungen über einen Außenbereich verfügen. Der Außenbereich soll charakterisiert werden hinsichtlich Größe und Beschaffenheit sowie des Vorhandenseins von Maßnahmen zum UV-Schutz. Vorhandener UV-Schutz soll näher beschrieben werden (Art, Größe, Ort etc.).

### 2.2 ERFASSUNG DES ERZIELTEN EFFEKTS DES TECHNISCHEN UV-SCHUTZES

Für den vorhandenen UV-Schutz soll abgeschätzt werden, wie groß der Effekt (im Sinne der Beschattung des Außengeländes) ist.

### 2.3 ERFASSUNG DER AKZEPTANZ DES TECHNISCHEN UV-SCHUTZES

Die Einrichtungen sollen angeben, wie gut der durch den technischen UV-Schutz erreichte Schatten von den Kindern, Jugendlichen und dem Personal angenommen und genutzt wird.

### 2.4 ERFASSUNG VON BEDARFEN UND HINDERNISSEN FÜR DIE UMSETZUNG VON TECHNISCHEM UV-SCHUTZ

Es soll erfasst werden, wie bereits existierender technischer UV-Schutz umgesetzt und finanziert werden konnte, ob und welche Schwierigkeiten es gab und wo Verbesserungspotenzial inkl. Umsetzungschancen und –barrieren gesehen werden.

## 3. METHODIK

Es wird eine einmalige Querschnittserhebung mittels Onlinebefragung von Kindertagesstätten, Grundschulen, Schulen mit Sekundarstufe I und II sowie berufsbildenden Schulen durchgeführt. Es werden für jedes Bundesland Listen mit den Kindertagesstätten und Schulen bezogen und eine Zufallsauswahl

von 25 % der Einrichtungen (stratifiziert nach Träger bzw. Schulform) zur Beteiligung an der Befragung eingeladen. In dem Onlinefragebogen werden erfasst: Anzahl, Art und erzielter Effekt des technischen UV-Schutzes, Akzeptanz bei Kindern, Jugendlichen und Personal, Finanzierung, Anregungen und Wünsche, strukturelle Charakteristika der Einrichtung (z. B. Größe, Betreuungsangebot, Größe des Außenbereichs). Unter den beteiligten Einrichtungen werden Incentives in Höhe von insgesamt 20 000 Euro verlost, die zweckgebunden für die Erweiterung des UV-Schutzes in der Einrichtung einzusetzen sind.

## **4. DURCHFÜHRUNG**

### **4.1 GENEHMIGUNGSVERFAHREN**

Für das Setting der Schule wurden die je nach Schulgesetz erforderlichen Genehmigungen zur Durchführung der Befragung an den Schulen des jeweiligen Bundeslandes eingeholt.

### **4.2 ENTWICKLUNG UND PROGRAMMIERUNG DES FRAGEBOGENS**

Zwei Versionen des Fragebogens für die beiden Settings – Kindertagesstätten und Schulen – wurden in enger Absprache mit dem Bundesamt für Strahlenschutz erstellt und in einer Software für Online-Fragebögen programmiert.

### **4.3 AUSWAHL UND REKRUTIERUNG DER STICHPROBE**

Bei den zuständigen Landesbehörden wurden Listen mit den Kindertagesstätten und Schulen des Landes angefragt. Aus den Listen wurden je Bundesland zufällig jeweils 25 % der Einrichtungen ausgewählt, wobei bei den Kindertagesstätten nach Träger und bei den Schulen nach Schultyp stratifiziert wurde. Dies bedeutet, dass bei der Ziehung der Stichprobe jeweils für die einzelnen Träger bzw. Schultypen getrennt 25 % der in dieser Untergruppe befindlichen Einrichtungen per Zufall ausgewählt wurden, so dass die Stichproben bestmöglich die reale Verteilung auf die Träger/Schultypen abbilden. Da die Einladung zur Beteiligung per E-Mail-Versand erfolgen sollte, wurden ggf. E-Mail-Adressen nachrecherchiert; alle Adresslisten wurden im Format angeglichen und in eine gemeinsame Datenbank überführt.

Auf Grund der Covid-19-Pandemie und der zur Eindämmung ergriffenen flächendeckenden Schließungen bzw. Einschränkungen des Betriebs von Schulen und Kindertagesstätten wurde in enger Abstimmung mit dem Bundesamt für Strahlenschutz entschieden, im Jahr 2020 die Umfrage zunächst nur in den Kindertagesstätten zu starten und die Befragung der Schulen um ein Jahr zu verschieben.

Daher wurden im Mai 2020 in jedem Bundesland 25 % der Kindertagesstätten (insgesamt 13 728 Einrichtungen) unter Verwendung einer Mailingsoftware per E-Mail zur Beteiligung eingeladen. Die E-Mail enthielt eine URL, durch die der Online-Fragebogen direkt verlinkt war.

### **4.4 MONITORING ZUM RÜCKLAUF UND ERREICHTE STICHPROBE**

Der Rücklauf in der Befragung wurde über das Monitoring der Mailingsoftware kontinuierlich dokumentiert. So konnten die Institutionen, die noch nicht an der Befragung teilgenommen hatten, identifiziert, herausgefiltert und per E-Mail an die Teilnahme erinnert werden. Diese Erinnerung wurde im Abstand von 7 bis 14 Tagen nach der ersten Einladung versandt. Nach dieser Erinnerung lagen in 13 Bundesländern die Rücklaufquoten über dem Mindestwert von 1 % aller Einrichtungen, in den anderen drei Bundesländern (Hamburg, Schleswig-Holstein, Niedersachsen) wurde eine weitere Erinnerungsmail versandt mit dem Ergebnis, dass in der Folge auch dort die Mindestquote erreicht werden konnte. Postalisches oder telefonisches Nachfassen war somit nicht erforderlich.

Von insgesamt 1 439 Kindertagesstätten wurde der Fragebogen mindestens bis zu der Frage nach der Existenz eines Außengeländes beantwortet. Dies entspricht einer Erreichungsquote von 2,62 %, bezogen auf alle Kindertagesstätten in Deutschland, sowie einer Antwortquote von 10,48 %, bezogen auf alle eingeladenen Kindertagesstätten.

## **5. ERGEBNISSE**

Es erfolgte im Jahr 2020 noch keine Auswertung der Befragungsdaten, so dass noch keine Ergebnisse vorliegen.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Für das Jahr 2021 ist die Umsetzung der Befragung im Setting Schule geplant und nach deren Abschluss die Auswertung der in beiden Settings erfassten Daten sowie die Berichterstellung.

**Thema**

Blendattacken und Augenschädigungen durch Laser und andere starke optische Strahlungsquellen

**Subject**

*Dazzle attacks and eye injuries by lasers and other powerful sources of optical radiation*

**Kennzeichen**  
3620S72410

**Beginn**  
01.07.2020

**Ende**  
31.08.2021

**Fördermittel**  
EUR 116.792,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Fraunhofer Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung, Ettlingen

**Projektleitung**  
M. Henrichsen

**Fachbetreuung BfS**  
Dr. M. Asmuß / WR 4

**verantwortlich für den Text**  
S. Stutz

## 1. ZIELSETZUNG

Ziel des Vorhabens ist es, Blendattacken und Augenschädigungen durch Laser und andere starke optische Strahlungsquellen qualitativ und quantitativ zu erfassen und das mit diesen Attacken einhergehende Gefährdungspotential zu bewerten. Da in Deutschland hierzu keine zentrale Datenerfassung existiert, muss in einem ersten Schritt zunächst die Datenlage dafür geschaffen werden. Das Vorhaben dient gleichzeitig auch der Verbesserung der Informationsgrundlage zur Einschätzung der mit Blendattacken verbundenen individuellen Gesundheitsrisiken sowie von Folgerisiken für Dritte. Auf dieser Grundlage sollen, unter Berücksichtigung der aktuellen rechtlichen Situation, regulative bzw. normative Möglichkeiten zur Minimierung der gesundheits- und verkehrssicherheitsrelevanten Risiken von Blendattacken aufgezeigt werden. Präventivmaßnahmen von Ländern, die bereits gesetzliche Restriktionen bezüglich des Erwerbs und Besitzes von sogenannten Laserpointern implementiert haben, können als Orientierungshilfe dienen.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 AURARBEITUNG DES AKTUELLEN KENNTNISSTANDES (AP 1)

- Recherchen zu nationalen und internationalen Erhebungen oder auch zu Umfragen, die für die Studie herangezogen werden können.

### 2.2 RECHERCHE UND AUFBEREITUNG DER ERGEBNISSE (AP 2)

- Erstellung eines mit dem BfS abgestimmten Abfragebogens, der relevante Informationen, wie z. B. Zeit, Art des Vorfalls, Auswirkungen der Attacke, u. a. beinhaltet
- Abfrage behördlicher, medizinischer sowie sonstiger öffentlicher Institutionen.

### 2.3 AUSWERTUNG UND BEURTEILUNG (AP 3)

- Auswertung der aus den Rückmeldungen gewonnenen Ergebnisse
- Einschätzung der mit den Laserattacken verbundenen Risiken
- Analyse der rechtlichen Situation
- Diskussion möglicher Ansätze zur Risikominimierung.

TB07

## 3. METHODIK

### 3.1 AUFARBEITUNG DES AKTUELLEN KENNTNISSTANDES (AP 1)

Im ersten Arbeitspaket (AP) wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, welche auf einer schlagwortbasierten Internetabfrage basierte. Dabei wurden einerseits wissenschaftliche Veröffentlichungen zu Blendvorfällen mit Laserpointern als auch entsprechende Meldungen auf dem Presseportal der Polizei recherchiert.

### 3.2 RECHERCHE UND AUFBEREITUNG DER ERGEBNISSE (AP 2)

In diesem Arbeitspaket ist ein Abfragebogen zur Erfassung der Blendattacken der letzten 5 Jahre (2015 – 2020) erstellt und mit einem entsprechenden Anschreiben an verschiedene öffentliche, behördliche und medizinische Institutionen verteilt worden.

### 3.3 AUSWERTUNG UND BEURTEILUNG (AP 3)

- Weiterführende Analysen der Vorfälle aus AP 2: Dies beinhaltet Hochrechnungen, Trendanalysen und weitere Auswertungen. Diese sollen zeigen, wie sich die Anzahl und Art der Angriffe mit der Zeit entwickelt haben und welche Parameter Einfluss auf Gefährdungen haben.
- Einschätzung der mit den Attacken verbundenen Risiken: Die direkten Auswirkungen von Laserattacken auf die betroffenen Personen – sowie auf die durch deren Verhalten betroffene Dritte – werden betrachtet. Darüber hinaus werden potenzielle Gefährdungsbereiche auf Basis von Lasersicherheitsberechnungen für die Risikobetrachtung analysiert.
- Analyse der rechtlichen Situation: Auf Basis der recherchierten Faktenlage wird in Zusammenarbeit mit der Hochschule Polizei Baden-Württemberg, Fakultät III Rechtswissenschaften in Villingen-Schwenningen, die aktuelle rechtliche Situation bewertet.
- Ansätze zur Risikominimierung: Die Erkenntnisse der bereits bearbeiteten Aufgabenteile werden daraufhin untersucht, inwieweit normative oder gesundheitspolitische Ansätze einer effizienten Risikominimierung möglich bzw. erfolgversprechend sein könnten. Hier wird auch analog zu Regulierungen in anderen Nationen die Frage diskutiert, inwieweit ähnliche Maßnahmen in Deutschland in Betracht kommen könnten.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 AUFARBEITUNG DES AKTUELLEN KENNTNISSTANDES (AP 1)

Zur Vorbereitung der Literaturrecherche wurden Schlagwörter definiert und in Gruppen eingeteilt. Diese wurden in Kombinationen für Suchanfragen verwendet.

Über die allgemeinen Internetsuchmaschinen hinaus wurde nach Veröffentlichungen in Dokument- und Statistik-Datenbanken recherchiert. Darüber hinaus wurden fachspezifische Internetseiten, die sich bekanntermaßen mit Laserpointern und deren Gefahren, sicherem Umgang sowie Auswirkungen von Laserstrahlung beschäftigen, durchsucht.

### 4.2 RECHERCHE UND AUFBEREITUNG DER ERGEBNISSE (AP 2)

#### 4.2.1 Anfragen an Institutionen

Um Aufschluss über Anzahl und Details zu Vorfällen mit Laserpointern in Deutschland zu bekommen, wurden alle relevanten öffentlichen und medizinischen Institutionen angefragt. Diese Institutionen sind u. a. Bundespolizei, Landespolizeien, Innenministerien, Luftfahrtbundesamt, Gewerkschaften, Verbände und Augenkliniken.

## 4.2.2 Erstellung von Abfragebögen

Bezüglich der öffentlichen und medizinischen Institutionen wurden zwei verschiedene Abfragebögen erstellt. Der erste Abfragebogen bezieht sich auf formale Detailinformationen zu Laservorfällen und enthält u. a. Fragen zu Datum, Tatort, Tathintergrund. Der zweite Abfragebogen zielt auf die medizinischen Belange, d. h. auf Auswirkungen und Schädigungen am Auge und enthält u. a. Fragen zu Einschränkungen der Sehfähigkeit sowie Art und Dauer dieser Einschränkung.

# 5. ERGEBNISSE

## 5.1 AUFARBEITUNG DES AKTUELLEN KENNTNISSTANDES (AP 1)

### 5.1.1 Vorfälle im Straßen-, Fuß-, Schienen- und Schiffsverkehr

Seit 2015 wurden im Presseportal der Polizei 151 Meldungen zu Vorfällen mit Laserblendung im Straßenverkehr, 37 Meldungen zu Vorfällen mit Fußgängern und Einsatzkräften (zu Fuß), 45 Meldungen zu Vorfällen im Schienen- und Straßenbahnverkehr und 5 Vorfälle im Schiffsverkehr veröffentlicht.

Ein systematisches Meldewesen für Laserzwischenfälle im Straßen- Fuß-, Schienen- und Schiffsverkehr existiert bislang nicht. Es wurden daher auch keine publizierten Erhebungen oder Statistiken zu diesen Vorfällen gefunden.

### 5.1.2 Vorfälle im Luftverkehr

Für die Recherche wurden Daten des Luftfahrtbundesamts, der Deutschen Flugsicherung und der Dienststelle General Flugsicherheit der Bundeswehr herangezogen. Im zivilen Luftverkehr besteht seit 2009 eine Meldepflicht für Laserattacken auf Luftfahrzeuge. Seit Beginn der Aufzeichnung wurden nach derzeitigem Stand ca. 3 000 Laservorfälle registriert, von denen etwa die Hälfte auf den Zeitraum von 2015 bis 2020 entfällt.

Im Presseportal der Polizei wurden seit 2015 119 Meldungen zu Vorfällen mit Laserblendung im Luftverkehr publiziert. Die Diskrepanz zwischen den seitens der Flugsicherung gemeldeten Fällen und den im Presseportal publizierten Fällen erklärt sich aus einer restriktiven Publikationspolitik der polizeilichen Dienststellen, um keine zusätzlichen Anreize für Nachahmer und Trittbrettfahrer zu generieren.

## 5.2 RECHERCHE UND AUFBEREITUNG DER ERGEBNISSE (AP 2)

Zum heutigen Zeitpunkt sind von der Bundespolizei und von elf Landespolizeien Fallzahlen zu Laservorfällen eingegangen. Rückmeldungen von bisher fünf Gewerkschaften/Verbänden brachten keine Ergebnisse.

# 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Datenerhebungen über Fallzahlen, Fallinformationen und medizinische Auswirkungen werden kontinuierlich fortgeführt (AP 2) und sind Grundlage für die Bearbeitung von AP 3.

**Thema**

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

**Subject**

*Survey of sound fields of publicly available ultrasound sources: Evaluation of the potential hazards*

**Kennzeichen**

3620S72412

**Beginn**

01.09.2020

**Ende**

31.08.2021

**Fördermittel**

EUR 164.140,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

GAMPT mbH, Merseburg

**Projektleitung**

Dr. M. Schultz

**Fachbetreuung BfS**

Dr. J. Kuhne / WR 5

**verantwortlich für den Text**

Dr. A. Schlesinger

## 1. ZIELSETZUNG

Im Projekt sollen frei erhältliche Ultraschallquellen, die von ungeschulten Anwendern im häuslichen Umfeld am Menschen angewendet werden können (Eigenbehandlung), untersucht und vermessen werden. Hierunter fallen Geräte, die für medizinische Anwendungen vorgesehen sind, wie Fetaldopppler zur vorgeburtlichen Überwachung und Bildgebungsgeräte sowie Geräte für die Therapie bei Schmerzen. Neben den medizinischen Produkten existiert eine Reihe von Ultraschallquellen mit nicht-medizinischer Zweckbestimmung, die den steigenden Bedarf nach kosmetischen Behandlungen z. T. zu sehr geringen Preisen bedienen sollen. Hierzu gehören Geräte mit vermutetem geringen Leistungspotential für z. B. das Einmassieren von Kosmetika in die Haut, aber auch Produkte mit vermutetem hohen Leistungspotential für die Zerstörung von Fettgewebe durch mechanische und thermische Wirkprinzipien. Obwohl der Gesetzgeber regulatorische Anforderungen für den Markteintritt in Deutschland bzw. der Europäischen Union in Form des Produktsicherheitsgesetzes und des Medizinproduktegesetzes an derartige Produkte formulierte, wird vermutet, dass viele der Hersteller der genannten Produktgruppen diese Anforderungen nicht erfüllen und ein Risiko für die Allgemeinheit durch die Beschaffenheit der Geräte und unsachgemäße Anwendung besteht. Ziel des Projektes ist es vorrangig, die von den Geräten ausgehende Gefahr für den Menschen abzuschätzen und auf Basis entsprechender Ergebnisse zu prüfen, ob regulatorischer Handlungsbedarf besteht.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

In Übereinstimmung mit der Leistungsbeschreibung wurde das Projekt in drei Projektteile (Arbeitspakete, AP) untergliedert.

- AP 1 umfasst die Aufarbeitung des für das Projekt relevanten Standes von Wissenschaft und Technik. Hierfür sollen folgende Themenkomplexe recherchiert werden:
  - Marktübersicht über frei verfügbare Ultraschallquellen
  - regulatorische und normative Situation für betreffende Produkte im nationalen und internationalen Vergleich
  - Kennwerte, Exposition und Dosimetrie von Ultraschall.

Auf Basis der Ergebnisse der drei Teilpakete werden 12 Geräte beschafft. Diese sollen repräsentative Vertreter des Marktangebotes sein, deren Gefahrenpotential ohne messtechnische Überprüfung nicht unmittelbar ersichtlich ist.

- AP 2 beinhaltet die Vermessung der Ultraschallquellen und Auswertung der Messungen.
- AP 3 umfasst die Risikobewertung der Ultraschallquellen und das Erstellen des Abschlussberichts.

### 3. METHODIK

Das Projekt bedient sich in AP 1 (Recherche) wissenschaftlicher Recherchemethoden und vergleichender Analysen der gefundenen Literaturquellen. Arbeitspaket 2 basiert auf den in einschlägigen Normen angegebenen Messvorschriften und, wo entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Forschung notwendig, ggf. Abwandlungen der in den Normen angegebenen Vorgaben. Für die Messung werden kalibrierte Schallfeldscanner eingesetzt, die in der Lage sind, das von den Geräten in Wasser erzeugte Schallfeld orts aufgelöst zu vermessen.

### 4. DURCHFÜHRUNG

Nach der Marktrecherche wurden die zu untersuchenden Geräte ausgewählt.

### 5. ERGEBNISSE

Die Marktrecherche ergab unter Beachtung der vorstehenden Kriterien folgenden Stichprobenumfang pro Gruppe:

Produktgruppe	Umfang der Stichprobe
Bildgebung	1
Fetaldoppler	10
Kosmetikgeräte	20
Therapiegeräte	10
Vasculardoppler	4

Bis auf die Gruppe der Bildgebung und Vasculardoppler konnten in jeder Gruppe zehn bis zwanzig für das Marktangebot repräsentative Produkte zusammengestellt werden. Das unmittelbar verfügbare Marktangebot entsprach jeweils etwa der zweifachen Stichprobenmenge nach Entnahme von Doppelungen.

Pro Gruppe wurde schließlich vom Projektteam in Absprache mit dem Projektträger eine qualitativ begründete Auswahl getroffen. Dabei haben die Autoren versucht, einen Querschnitt hinsichtlich Anwendung, Leistungsabgabe, Bauform, Beschreibungsqualität und Verfügbarkeit abzubilden. In der Produktauswahl diente der vorläufig entwickelte Risikoindex zur Abschätzung des vermuteten Gefahrenpotentials, dieser war jedoch nicht das alleinige Auswahlkriterium. Aus diesem Grund sind auch exotische Geräte in den Auswahlvorschlag aufgenommen worden, die eventuell wenig Leistung abgeben aber in Bezug auf die Bauform Risiken darstellen könnten oder bei denen die Datenlage keine Rückschlüsse über das Gefährdungspotential zulässt. Doppelungen wurden in der Auswahl ausgeschlossen. Der Recherchezeitraum umfasste das 4. Quartal 2020. Vasculardoppler wurden auf Grund der rein medizinischen Zweckhaftigkeit, die im häuslichen Bereich wenig verbreitet ist, nicht in die Auswahl der zu vermessenden Geräte aufgenommen.

In Übereinstimmung mit der Leistungsbeschreibung des Projektvorhabens konnte durch Untersuchung der Bereiche Markt, Regulierung und Wissenschaft ein schlüssiges Bild zur Situation von frei erwerblichen Ultraschallquellen für medizinische und kosmetische Anwendungen erstellt werden. Die Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst.

Therapiegeräte bilden neben Kosmetikgeräten und Überwachungs- und Bildgebungsgeräten eine weitere Gruppe der frei erwerblichen Ultraschallgeräte und wurden in die Untersuchung mit aufgenommen.

Für Ultraschallgeräte existieren zahlreiche Leitlinien und regulatorische Anforderungen, vor allem in den Industrieländern. Die Verbreitung von Ultraschall in der Kosmetik für professionelle Anwender und private Endverbraucher wird weltweit beobachtet, sukzessive reguliert und in Prüf- und Messstandards beachtet.

Diese Sicherheitsstandards für Ultraschallanwendungen am Menschen entstehen international in den Technischen Gremien der IEC. Diese werden anschließend in nationalen Standardisierungsgremien, für Deutschland die DKE<sup>1)</sup>, in die Landessprache übersetzt und gelegentlich in Details geändert.

Die Mehrzahl der beschriebenen Produktgruppen von Ultraschallgeräten für den Privatanwender fällt voraussichtlich unter das dt. Medizinprodukterecht bzw. unter die europäische Medizinprodukteverordnung ab Einführung im Mai 2021. Letztere hat den Anwendungsbereich auf viele Gruppen von Kosmetikgeräten explizit erweitert. Es bleibt abzuwarten, welche Anforderungen der Gemeinsame Ausschuss der zuständigen gesetzgebenden Behörde an diese Produkte schlussendlich stellen wird. Hierfür stehen die Projektbearbeiter im Kontakt mit den Gremienmitgliedern der DKE. Zusätzlich sind Begrifflichkeiten der Gesetzestexte noch zu klären. Ggf. werden Ultraschallgeräte, die nicht zu einer Änderung der Anatomie führen können, z. B. Produkte zum Einmassieren von Kosmetika, unter das Produktsicherheitsgesetz fallen.

Die medizinische Forschung konnte bis heute keine deterministischen Zusammenhänge zwischen Freifeld-Expositionsgrößen, In-situ-Expositionsgrößen, Dosisgrößen und Effektgrößen erarbeiten. Die mögliche Schädigung von Gewebe oder gar ungeborenem Leben muss in jedem Fall vermieden werden. Seit Beginn der Anwendung des Ultraschalls wurden daher vereinfachte Expositionsgrößen zur Risikobeherrschung erarbeitet. Bezogen auf die EU wird die Abwägung von Schaden und Nutzen im medizinischen Bereich Hersteller und Anwender übergeben, während in der Therapie strikte Grenzwerte gelten. Für die kosmetische Anwendung von Ultraschall besteht eine Anleitung zur Marktzulassung der FDA<sup>2)</sup> in den USA.

Ultraschallbasierte Geräte für Endverbraucher, welche sehr günstig über globale Marktplattformen aus Asien ihren Weg nach Europa finden, können die Marktzulassungsanforderungen der noch geltenden Medizinprodukterichtlinie bislang unterlaufen. Es ist jedoch an den CE<sup>3)</sup>- und FDA-Aufklebern auf den Geräten zu erkennen, dass auch die Hersteller ihren Produkten ein Risiko zuweisen.

Für die Gefahrenbeurteilung der ultraschallbasierten Produktgruppen im Projektvorhaben wird vorgeschlagen, die Risikoanalysen quantitativ auf Basis von wissenschaftlich und in der Praxis etablierten Expositionsgrößen durchzuführen und so eine universell quantifizierbare Beschreibung der Ultraschallquellen zu erarbeiten. Diese vorrangige Leistungsbeschreibung kann in einem weiteren Schritt die Einwirkdauer der Exposition einbeziehen und damit einen Beitrag zur aktuell in Standardisierungsgremien diskutierten erweiterten Risikobeurteilung von Ultraschall liefern.

In Bezug auf die in AP 2 durchzuführende Vermessung der Ultraschallquellen werden für Geräte mit einer Arbeitsfrequenz unter 500 kHz neue normative Messverfahren angewandt. Für einen höheren Frequenzbereich ergeben sich gegenüber dem Messkonzept des Angebots keine Änderungen.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die bisherigen Rechercheergebnisse zeigen, dass für Geräte mit hochfokussierenden Ultraschallfeldern oder Kavitationswirkung ein besonderes Risikopotential vermutet wird. Dieser Einschätzung wird in der Produktauswahl Rechnung getragen. Das Messkonzept wird um neue standardisierte Prüfungsanweisungen für den tiefen Frequenzbereich unter 500 kHz erweitert. Für außergewöhnliche Geräte müssen Anpassungen der Messmethode entwickelt werden.

Darüber hinaus bestehen keine wesentlichen Änderungen zum Projektplan, welcher nach Abschluss des Arbeitspaketes 1 die Vermessung der Ultraschallquellen in Arbeitspaket 2 und die Risikobeurteilung und Dokumentation in Arbeitspaket 3 beschreibt.

---

<sup>1)</sup> Deutsche Kommission Elektrotechnik

<sup>2)</sup> Food and Drug Administration

<sup>3)</sup> Communauté Européenne

**3.8 Themenbereich 08**  
**Nichtionisierende Strahlung**

**3.8**    *Subject area 08*  
*Non-ionising radiation*

## Thema

Leukämie im Kindesalter - Einfluss des Immunsystems auf die Entstehung der Erkrankung (experimentelle Studie an einem geeigneten Tiermodell)

## Subject

*Childhood leukemia - influence of the immune system on the development of the disease (experimental study in a suitable animal model)*

<b>Kennzeichen</b> 3616S82440	<b>Beginn</b> 01.10.2016	<b>Ende</b> 30.09.2019	<b>Fördermittel</b> EUR 851.432,-
----------------------------------	-----------------------------	---------------------------	--------------------------------------

## Forschungs- / Auftragnehmer

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., München

## Projektleitung

Dr. A. Bitsch

## Fachbetreuung BfS

Dr. J.-A. Schmidt / WR 5

## verantwortlich für den Text

Dr. A. Bitsch

## 1. ZIELSETZUNG

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 ELF-MF im Jahr 2002 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 pB-ALL, 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 Veränderung beim jungen sich entwickelnden Immunsystem ein zwingend notwendiger Schritt für die Manifestation einer B-ALL ist, sollen auf Grund dieser Hinweise im Projekt Phänotyp und Funktion von Immunzellen an einem geeigneten Mausmodell für die genannte Kinderleukämie B-ALL vergleichend mit und ohne Magnetfeldexposition untersucht werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 FESTLEGUNG DES TIERMODELLS

Die Sca1-ETV6-RUNX1-Mäuse tragen eine Leukämie-spezifische Veränderung im Erbgut und scheinen daher als Tiermodell besonders geeignet. Eine Zuchtkolonie des Tiermodells soll am Fraunhofer ITEM etabliert und auf die benötigten Tierzahlen expandiert werden (siehe Punkt 3.1 in Statusbericht zum Jahr 2018).

### 2.2 DEFINITION DER EXPOSITIONS-SZENARIEN UND UNTERSUCHUNGSZEITPUNKTE

Für die tierexperimentelle Überprüfung der epidemiologischen Hinweise auf einen möglichen Einfluss von niederfrequenten Magnetfeldern (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.

## 2.3 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 insbesondere auf die Entwicklung der T-Lymphozyten eingegangen werden.

## 3. METHODIK

### 3.1 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 und Feldstärken von 0 (Scheinexposition sowie zusätzliche Käfigkontrolle), 10  $\mu$ 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) befledet. Für die Ausprägung der Leukämie-spezifischen Veränderung Sca1-ETV6-RUNX1 in der zu untersuchenden F1-Generation der Mäuse besteht eine Wahrscheinlichkeit von 50 %. Vorerst werden alle Nachkommen befledet und nach Abschluss der jeweiligen Aufarbeitungen genotypisiert. Die exakte Aufschlüsselung der Tierzahlen in den jeweiligen Behandlungsgruppen kann dem Punkt 3.1 des Statusberichts im Programmreport 2018 entnommen werden (<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2019102319808>).

### 3.2 IMMUNOLOGIE

Die Wirkung der prä- und postnatalen ELF-MF-Expositionen an den Jungtieren sollen 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 Immunstatus in immunologisch relevanten Organen wie Blut, Milz, Knochenmark und Thymus durchgeführt.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Die Punkte Abstimmung der (tier-)experimentellen Untersuchungen, Wiederaufbau der Expositionsanlage, Aufbau einer Mäusezucht sowie Festlegung der immunologischen Untersuchungen an der Maus können dem Punkt 4 des Statusberichtes zum Jahr 2018 entnommen werden (<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2019102319808>).

## 5. 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 Auswertung der durchflusszytometrischen Daten für Thymus, Knochenmark und Milz ist abgeschlossen. Weiterhin wurde zur Bestimmung der sezernierten Zytokine ein Multiplexpanel aus Überständen von unstimulierten und stimulierten Milzzellsuspensionen der behandelten Tiere etabliert und notwendige Testmessungen abgeschlossen. Die entsprechende Bestellung der Kits wurde ausgeführt. Die immunhistochemische Multiplexfärbung für Organschnitte mit sechs Immunzellmarkern wurde vollständig etabliert. Von allen relevanten Organen der transgenen Tiere wurden Paraffinstufenschnitte angefertigt, mit Hämatoxylin-Eosin und mit dem Immunhistochemie-Multiplexverfahren gefärbt und anschließend digitalisiert. Ein Verfahren für die bildanalytische Auswertung der Multiplex-gefärbten Organschnitte wurde etabliert.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Für die Fertigstellung der Untersuchung zur Immunphenotypisierung wird die Auswertung der durchflusszytometrischen Daten des Blutes finalisiert.

Des Weiteren erfolgt nach Lieferung der Zytokin Multiplex Kits die Messung und Auswertung der Zytokinsekretionsdaten.

Die morphologische Auswertung der histopathologischen Schnitte der transgenen Tiere mittels erweiterter Histopathologie ist in Bearbeitung. Nach Abschluss einer Qualitätskontrolle der digitalisierten Multiplex- Schnittpräparate auf Artefakte erfolgt die bildanalytische Auswertung.

Im Anschluss an die Finalisierung der Datenauswertung erfolgt die Entblindung der einzelnen Behandlungsgruppen, ein Zusammenführen und eine finale Interpretation aller erhobenen Daten und die Erstellung der im Zusammenhang stehenden Schlussfolgerungen.

## Thema

Bewertende Literaturstudie zum Auftreten, zur Ausbreitung und zu gesundheitlichen Auswirkungen von ionisierten Schadstoffpartikeln in der Umgebung von Starkstromleitungen

## Subject

*Study and evaluation of literature on occurrence, spread and health effects of ionised pollutant particles in the vicinity of power lines*

## Kennzeichen

3618S82453

## Beginn

01.07.2019

## Ende

30.09.2020

## Fördermittel

EUR 75.001,-

## Forschungs- / Auftragnehmer

Leibnitz-Institut für Troposphärenforschung Leipzig e.V.

## Projektleitung

Dr. U. Winkler

## Fachbetreuung BfS

Dr. J. Kuhne / WR 5

## verantwortlich für den Text

Dr. U. Winkler

## 1. ZIELSETZUNG

Hochspannungsleitungen emittieren sogenannte Korona-Ionen. Zum Teil übertragen diese ihre Ladung an in der Luft befindliche Partikel. Das Thema möglicher biologischer und gesundheitlicher Wirkungen von Ionen oder geladenen Partikeln wurde in der Literatur kontrovers diskutiert. Die Risikobewertung vor allem im Umfeld von auch in Deutschland geplanten Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen (HGÜ) / Hochspannungsleitungen ist nicht abschließend geklärt (bei Wechselspannungsleitungen sorgt der rapide Polaritätswechsel für einen schnellen Abbau der Mehrzahl der emittierten Ionen, bei HGÜ hingegen nicht). Ziel des Forschungsvorhabens ist, den aktuellen Kenntnisstand zur Exposition der Allgemeinbevölkerung gegenüber Ionen und geladenen Partikeln im Wirkungsbereich von Hochspannungsleitungen sowie zu möglicherweise daraus folgenden gesundheitsrelevanten Wirkungen zusammenzufassen und zu bewerten. Das Vorhaben dient zur Verbesserung der Risikobewertung und zur Information der Bevölkerung.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das Projekt besteht aus 6 Arbeitspaketen (AP):

- Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik (AP 1)
- Quantitative Bestimmung der Exposition der Bevölkerung mit Ionen und geladenen Schadstoffpartikeln von Hochspannungsleitungen (AP 2) und aus anderen Quellen (AP 3)
- Zusammenfassung und Bewertung der Literaturangaben speziell zur Ladungs-induzierten Depositionserhöhung (AP 4) und zu möglichen biologischen und gesundheitlichen Wirkungen im Allgemeinen (AP 5)
- Identifikation des Weiteren Forschungsbedarfes (AP 6).

## 3. METHODIK

Haupt-Methodik ist die Literaturrecherche. Ein Fokus liegt dabei auf der Recherche nach Messungen von Konzentrationen von Ionen und geladenen Partikeln sowie zu theoretischen Ansätzen zur Berechnung derartiger Werte. Ein weiterer Fokus liegt auf relevanten theoretischen und experimentellen medizinischen Studien.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Der Auftragnehmer besitzt Vollzugriff auf den Bestand und die Online-Ressourcen der Universitätsbibliothek Leipzig. Während der Pandemie war dieser Zugang allerdings eingeschränkt bis unmöglich, da aus Lizenzgründen auch der Online-Zugriff nur aus dem Bibliotheksbereich möglich ist.

## 5. ERGEBNISSE

Zu AP 1 und 3 wurden Zwischenberichte verfasst.

### 5.1 STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK (AP 1)

Im Rahmen der Literaturrecherche zu AP 1 wurden insgesamt etwa 100 relevante Publikationen, davon 90 Originalpublikationen, identifiziert, welche für das Projektziel relevante Aspekte behandeln. Die in der Literatur meistdiskutierte Hypothese zu möglichen biologischen und gesundheitlichen Wirkungen von Ionen oder geladenen Partikeln ist die folgende: An den Leitungen entstehen Ionen, diese lagern sich an existierende Partikel an. Damit erhöht sich möglicherweise die Depositionswahrscheinlichkeit dieser Partikel in Lunge und Atemtrakt signifikant. Selbst wenn dies der Fall ist, hängt eine möglicherweise resultierende Schadwirkung primär von der physikalischen, chemischen und gegebenenfalls biologischen Zusammensetzung der Partikel ab, diese wurde durch die Ladungsaufnahme allerdings nicht verändert; eine Ionen-induzierte Nukleation kann laut mehreren Studien unter den nahe der Erdoberfläche herrschenden Bedingungen ausgeschlossen werden.

In der Literatur werden auch zwei weitere mögliche Kausalketten diskutiert. In Leitungsferrne erzeugen die sich mit dem Wind bewegenden Ionenwolken elektrische Felder; hier wurde vorgeschlagen, dass diese ggf. stark genug sind, um den zirkadianen Rhythmus zu beeinflussen. In Leitungsnähe kommt es an stark konvexen Oberflächen, wie der Vegetation oder dem Kopfbereich von Personen, zur Verzerrung und Verstärkung elektrischer Felder. Dies kann eine erhöhte Deposition geladener Partikel bewirken. Die zu erwartenden Depositionen im Mund-Nasen-Bereich würden laut einschlägiger Studien, wenn überhaupt, nur bei praktischem Daueraufenthalt von Personen im Freien unter einer Hochspannungsleitung zu signifikanten Mehrbelastungen führen. Erhöhte Konzentrationen von Schmutz im Allgemeinen oder von speziellen Schadstoffen (z. B. PCB<sup>1)</sup>) wurden an den Bauelementen der Leitungen (besonders Isolatoren) und an der Vegetation im Umfeld von Hochspannungsleitungen festgestellt. Radon-Zerfallsprodukte sind auf Grund ihrer Entstehung in überproportionalem Maß geladen; auch hier wurden in einer Studie erhöhte Konzentrationen im Umfeld von Hochspannungsleitungen festgestellt.

### 5.2 GELADENE PARTIKEL IN ANDEREN UMGEBUNGEN (AP 3)

Studien zu Ionen und geladenen Partikeln in der bodennahen Atmosphäre wurden in den verschiedensten Umgebungen durchgeführt, zum einen als pauschale Messungen (zum Teil als Langzeitstudie) der Konzentrationen in ruraler oder urbaner Luft, zum anderen in der Nähe spezifischer natürlicher oder anthropogener Ionenquellen. Hier kristallisierten sich vor allem zwei Bereiche ohne Bezug zu Elektrizität heraus, in welchen die Partikel-Ladungskonzentration Werte erreichen kann, welche mit den Werten windabwärts von HGÜ-Leitungen vergleichbar sind oder diese sogar übersteigen (sowohl absolut als auch relativ zur Partikelkonzentration): zum einen Verkehrsemissionen, zum anderen Wasserfälle.

Messungen der Konzentration geladener Partikel nahe an Verkehrswegen beschränkten sich bisher auf Partikel mit Durchmessern kleiner als etwa 40 Nanometer: hier treten praktisch keine Ladungszahlen größer als 1 bzw. kleiner als -1 auf, damit kann aus der einfach durchführbaren Messung der elektrischen Mobilität direkt auf die Partikel-Größenverteilung geschlossen werden. Die Studien ergaben einen Anstieg der Partikel-Ladungskonzentration mit wachsendem Partikeldurchmesser. Es kann allerdings keine Aussage getroffen werden, wie sich der Trend im Bereich größerer Partikel fortsetzt. Bei Verbrennungsprozessen im Allgemeinen, und somit auch in Fahrzeugmotoren, werden positive und negative Ladungen etwa paritätisch erzeugt. Dies sollte nach den theoretischen Erwartungen für eine schnelle (Teil-)Neutralisierung höher beladener Partikel sorgen. Bei hoher initialer Partikel-Ladungs-

---

<sup>1)</sup> Polychlorierte Biphenyle

konzentration in den emittierten Fahrzeugabgasen können aber trotzdem hohe Partikel-Ladungskonzentrationen auch im Bereich größerer Partikel auftreten.

Auch im Umfeld von Wasserfällen treten überproportional hohe Ionen- und Partikel-Ladungskonzentrationen der negativen Polarität auf; Ursache ist der balloelektrische Effekt. Die geladenen Partikel bestehen hier allerdings überwiegend aus Wasser, deshalb ist eine Schadwirkung unwahrscheinlich.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Arbeiten zu AP 2 stehen vor dem Abschluss. Zum Vergleich mit experimentell bestimmten Ionenkonzentrationen und Partikelladungsverteilungen erwiesen sich verschiedene theoretische Ansätze zur Abschätzung maximal möglicher Konzentrationen von Ionen windabwärts von Hochspannungsleitungen als nützlich. Diese Ansätze benötigen nur wenige und im Allgemeinen bekannte Parameter (Leitungsspannung, Entfernung zur Leitung, Windgeschwindigkeit). Die Begrenzung der Ionenkonzentration begrenzt auch die Aufnahme von Ladungen durch Partikel.

Zur Interpretation medizinischer Studien (AP 4 & 5) erwies sich das von der International Commission on Radiological Protection (ICRP) publizierte *Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection*, oft einfach als ICRP-Modell bezeichnet, als nützlich. Das Modell liefert Gleichungen zur Berechnung der Deposition von Partikeln in verschiedenen Abschnitten des Atemtrakts. Die Partikelladung wird im Modell selbst zwar nicht als Parameter berücksichtigt, die Modellgleichungen können allerdings um entsprechende Ausdrücke erweitert werden, welche empirisch aus verschiedenen Messtudien abgeleitet werden können. Darüber hinaus beschränkt dieses Modell auch prinzipiell den Bereich, in welchem Partikelladungen die Depositionswahrscheinlichkeit signifikant erhöhen könnten: die Deposition kann 100 % nicht übersteigen, und in einigen Partikel-Größenbereichen ergibt dieses Modell bereits ohne Ladungseinfluss sehr hohe Depositionen.

Zur Identifikation des Weiteren Forschungsbedarfes (AP 6) ergaben die bisher abgearbeiteten Arbeitspunkte wichtige Ansätze; eine Zusammenfassung wird erfolgen.

## Thema

Berücksichtigung aktueller Mobilfunkantennentechnik bei der HF-EMF-Expositionsbestimmung

## Subject

*Consideration of current mobile radio antenna technology for RF-EMF exposure assessment*

## Kennzeichen

3619S82463

## Beginn

15.12.2019

## Ende

14.03.2021

## Fördermittel

EUR 249.940,-

## Forschungs- / Auftragnehmer

Institut für Hochfrequenztechnik, RWTH Aachen University, Aachen

## Projektleitung

Prof. Dr. D. Heberling

## Fachbetreuung BfS

D. Geschwentner / WR 5

## verantwortlich für den Text

T. Kopacz, Dr. C. Bornkessel,  
Prof. Dr. M. Wuschek

## 1. ZIELSETZUNG

Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung und Beschreibung von Messverfahren zur Bestimmung tatsächlicher, typischer und maximal möglicher Expositionen von 5G-Massive-MIMO<sup>1)</sup>-Basisstationen mit Beamforming-Antennen im 3,6-GHz-Band an für die Allgemeinbevölkerung zugänglichen Orten. Mit Hilfe der Messverfahren werden an 10 Immissionsorten im Umfeld von 10 Basisstationen Größe und Spannbreite der Expositionsbeiträge bestimmt. Des Weiteren werden die Expositionsbeiträge an 10 Immissionsorten mit denen von konventionellen Basisstationen (GSM, UMTS, LTE<sup>2)</sup>, TETRA-BOS<sup>3)</sup>) verglichen und an 5 Immissionsorten über jeweils 24 Stunden die tageszeitabhängigen Expositions-schwankungen gemessen.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK (AP 1)

Zu Beginn des Projekts wird der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik aufgearbeitet. Hierbei werden funktechnisch relevante Spezifikationen des 5G-Standards sowie von Beamforming-Antennen untersucht. Hinsichtlich der Durchführung von Messungen werden die Spezifikationen verfügbarer codeselektiver Immissionsmessgeräte zusammengetragen sowie nationale und internationale Messempfehlungen untersucht. Des Weiteren werden Ergebnisse und Erkenntnisse von früher durchgeführten Messungen der Projektnehmer sowie anderer Stellen vorgestellt.

### 2.2 ENTWICKLUNG UND VORSCHLAG VON VERFAHREN (AP 2)

Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus AP 1 wird ein Immissionsmessverfahren zur Bestimmung typischer und maximal möglicher Expositionsbeiträge von 5G-Massive-MIMO-Basisstationen vorgeschlagen.

### 2.3 BESTIMMUNG UND ANALYSE VON IMMISSIONSVERTEILUNGEN UND EXPOSITIONSBEITRÄGEN (AP 3)

Basierend auf dem in AP 2 vorgeschlagenen Immissionsmessverfahren werden an 100 Immissionsorten im Umfeld von zehn 5G-Massive-MIMO-Basisstationen typische und maximal mögliche Expositionsbeiträge bestimmt.

---

<sup>1)</sup> multiple input multiple output

<sup>2)</sup> Long Term Evolution

<sup>3)</sup> Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben

## **2.4 BESTIMMUNG DER GESAMTEXPOSITION DURCH ORTSFESTE MOBILFUNKSENDER UND TAGESZEITABHÄNGIGER SCHWANKUNGEN VON EXPOSITIONSBEITRÄGEN (AP 4)**

Zusätzlich werden an fünf Immissionsorten im Umfeld von zwei 5G-Massive-MIMO-Basisstationen die tageszeitabhängigen Schwankungen der Expositionsbeiträge über jeweils 24 Stunden ermittelt. Des Weiteren werden an zehn der 100 Immissionsorte typische und maximal mögliche Expositionsbeiträge im gesamten Mobilfunk-Downlink bestimmt (GSM, UMTS, LTE, 5G und TETRA-BOS).

## **3. METHODIK**

Der relevante Stand von Wissenschaft und Technik wird basierend auf einer Literaturrecherche unter Verwendung einschlägiger Datenbanken (für wissenschaftliche Publikationen) sowie Online-Suchen (z. B. für technische Spezifikationen) ermittelt.

Die vorzuschlagenden Immissionsmessverfahren zur Bestimmung typischer und maximal möglicher Expositionsbeiträge von 5G-Massive-MIMO-Basisstationen werden sowohl unter Feldbedingungen an Anlagen im Wirkbetrieb als auch, sofern möglich, unter kontrollierten Laborbedingungen erprobt und validiert. Dabei kommen sowohl frequenzselektive als auch codeselektive Messverfahren zum Einsatz.

Zur Durchführung der Messungen zur Charakterisierung der Expositionen werden die Immissionsorte so gewählt, dass hinsichtlich des Abstands und der Sichtverbindung zur Basisstationsantenne als auch hinsichtlich der Lage außerhalb bzw. innerhalb von Gebäuden eine Heterogenität vorliegt. Darüber hinaus werden die ausgewählten Standorte in etwa die Anteile der Netzbetreiber bzw. der bei den Netzbetreibern eingesetzten Systemtechnikhersteller im 5G-Netz bei 3,6 GHz repräsentieren.

## **4. DURCHFÜHRUNG**

Die Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik erfolgte in einem ersten Zwischenbericht. Die Entwicklung und der Vorschlag eines Immissionsmessverfahrens zur Bestimmung typischer und maximal möglicher Expositionsbeiträge von 5G-Massive-MIMO-Basisstationen wurde im Rahmen eines zweiten Zwischenberichts dokumentiert. Seit November 2020 wird die Durchführung der in AP 3 und AP 4 vorgesehenen Messungen konzeptionell geplant. Dabei wurden u. a. erste geeignete Basisstationsstandorte identifiziert.

## **5. ERGEBNISSE**

### **5.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK (AP 1)**

Durch Recherchen zum Aufbau des Physical Layers und der Signalstruktur bei 5G konnten Randbedingungen zur Entwicklung geeigneter Messverfahren abgeleitet werden. Des Weiteren wurden typische Aufbauten/Größen von Massive-MIMO-Antennen sowie typische Herstellerangaben für die äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP) recherchiert. Ferner wurden codeselektive Messgeräte basierend auf den Angaben in den jeweiligen Datenblättern hinsichtlich ihrer Eignung zur Durchführung von Immissionsmessungen analysiert.

Bei der Untersuchung von aktuell existierenden Messempfehlungen, bei denen der Fokus auf der Bestimmung der maximal möglichen Exposition liegt, wurden zwei Herangehensweisen identifiziert: Bei der direkten Messung wird die Ausrichtung eines Traffic Beams mit maximaler EIRP zum Messpunkt erzwungen, wohingegen bei der Extrapolation ein Referenzsignal gemessen und anschließend auf Maximalexposition hochgerechnet wird. Die Messung des Referenzsignals erfolgt entweder frequenz- oder codeselektiv. Bei bisherigen Arbeiten der Projektnehmer sowie anderer Stellen (z. B. der Universität Gent) wurden ausschließlich frequenzselektive Messungen durchgeführt.

## **5.2 ENTWICKLUNG UND VORSCHLAG VON VERFAHREN (AP 2)**

Es wurden Messverfahren zur Bestimmung typischer (frequenzselektiv) sowie maximal möglicher Expositionsbeiträge (frequenz- und codeselektiv) vorgeschlagen und unter Laborbedingungen validiert sowie unter Feldbedingungen an einer Anlage im Wirkbetrieb erprobt. Darüber hinaus wurden verschiedene Verfahren der Projektnehmer sowie anderer Stellen zur Hochrechnung auf maximal mögliche Exposition analysiert und miteinander verglichen. Abschließend wurden vorbereitend für die Messungen in AP 3 und AP 4 exemplarisch unterschiedliche Expositionsszenarien generiert und die Expositionsbeiträge bestimmt.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Die bereits aufgenommenen vorbereitenden Arbeiten zu AP 3 und AP 4 werden fortgeführt. Die eigentliche Messdurchführung wird sich auf Grund der Pandemielage und den damit verbundenen Kontakt- und Reisebeschränkungen sowie jahreszeitlichen Verschiebungen (Messgeräte sind nur für bestimmte Temperaturbereiche spezifiziert) voraussichtlich verzögern.

## Thema

Bewertende Literaturstudie zum Einfluss elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf oxidative Prozesse bei Menschen sowie in Tier- und Laborstudien

## Subject

Assessed literature study on the influence of electric, magnetic and electromagnetic fields on oxidative processes in humans as well as in animal and laboratory studies

## Kennzeichen

3619S82464

## Beginn

01.09.2019

## Ende

28.02.2021

## Fördermittel

EUR 63.887,-

## Forschungs- / Auftragnehmer

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., München

## Projektleitung

D. Sachno

## Fachbetreuung BfS

B. Henschenmacher / WR 5

## verantwortlich für den Text

D. Sachno

## 1. ZIELSETZUNG

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 Stoffwechselforgänge 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 sehr 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.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 ERSTELLUNG EINES REVIEW-PROTOKOLLS

Nach den Richtlinien des Centre for Reviews and Dissemination wird ein Review-Protokoll erstellt, 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.

### 2.2 ERSTELLUNG DES SYSTEMATISCHEN REVIEWS

Im Anschluss an die Genehmigung des Review-Protokolls erfolgt die Literatursuche, -auswahl und -aufarbeitung der Daten, unter Beachtung der Richtlinien des Centre for Reviews and Dissemination, als systematisches Review. 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.

## 3. METHODIK

### 3.1 DEFINITION EINER PRÄZISEN FORSCHUNGSFRAGE

Eine präzise Forschungsfrage, die durch den gesamten Review-Prozess führt, sowie die damit zusammenhängenden Einschlusskriterien werden anhand des PECO (Population, Exposure, Comparison, Outcome)-Verfahrens definiert.

### 3.2 SUCHSTRATEGIE

Zur exakten Definition der Suchstrategie erfolgt die Festlegung der zu durchsuchenden Datenbanken, der entsprechenden Suchbegriffe und die Modalitäten der einzelnen Suchbegriffe (z. B. MESH-Term, Verbindung der Suchbegriffe durch AND/OR etc.). Zusätzlich werden weitere Einschlusskriterien wie Sprache, Erscheinungsdatum, Art der Studie etc. definiert. Die Suchstrategie wird anhand vorab definierter Referenzartikel, die durch die Suche identifiziert werden müssen, validiert.

### 3.3 SELEKTION UND BEWERTUNG EINZUSCHLIEßENDER STUDIEN

Alle relevanten Artikel, identifiziert nach der zuvor festgelegten Forschungsfrage und Suchbegriffen, werden bei Erfüllung der Einschlusskriterien in die Studie aufgenommen. Die interne Validität und die Qualität der eingeschlossenen Studien wird anschließend mit einem vom „Office of Health Assessment and Translation“ veröffentlichten Protokoll überprüft. Dabei werden beispielsweise Kriterien wie Verblindung, Qualität der Dosimetrie sowie Vergleichbarkeit der experimentellen Konditionen zwischen den Dosisgruppen betrachtet.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 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“ dedupliziert, 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.

### 4.2 EXTRAKTION DER DATEN

Für die Extraktion der graphischen Daten und Details zu der exponierten Spezies (d. h. Mensch, Tier oder in vitro) 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 voneinander durchgeführt und im Anschluss diskutiert.

### 4.3 BEURTEILUNG DER STUDIEN

Die interne Validität und die Qualität der eingeschlossenen Studien werden mit dem „Risk of Bias“-Tool des vom „Office of Health Assessment and Translation“ veröffentlichten Protokolls 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 Voreingenommenheitsrisiko
- "--" definitiv hohes Voreingenommenheitsrisiko.

## 5. ERGEBNISSE

Das Review-Protokoll wurde erfolgreich finalisiert und die PROSPERO-Registrierung eingereicht. Nach der im Review-Protokoll definierten Suchstrategie wurden die Datenbanken PubMed, Scopus, und Web of Science durchsucht. 25 von 25 Referenzartikel konnten in allen Datenbanken identifiziert werden. Die folgenden Trefferzahlen wurden erzielt: 1 862 Artikel in PubMed, 5 476 Artikel in Scopus, 3 232 Artikel in Web of Science. Weiterhin wurde das Screening und Datenextraktionsprotokoll in „DistillerSR“ etabliert und eine Pilotstudie mit 100 zufällig ausgewählten Artikeln durchgeführt.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Es erfolgt die Selektion der einzuschließenden Studien nach Punkt 4.1. Referenzlisten relevanter Artikel werden nach weiteren, bisher nicht berücksichtigten Artikeln durchsucht – ggf. erfolgt eine Ergänzung der bereits identifizierten Artikel. Daten werden 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.

## Thema

Detaillierte vergleichende Analyse der Alters- und Geschlechtsabhängigkeit des Einflusses hochfrequenter elektromagnetischer Felder von Mobilfunk-Endgeräten auf Gehirnaktivität, Schlaf und kognitive Leistungsfähigkeit

## Subject

Detailed comparative analysis of age and sex related effects of radiofrequency electromagnetic fields from mobile telephony devices on brain activity, sleep and cognitive performance

## Kennzeichen

3619S82465

## Beginn

01.08.2019

## Ende

30.11.2020

## Fördermittel

EUR 103.444,-

## Forschungs- / Auftragnehmer

Kompetenzzentrum Schlafmedizin, Charité-Universitätsmedizin Berlin, Berlin

## Projektleitung

Prof. Dr. H. Danker-Hopfe

## Fachbetreuung BfS

PD Dr. B. Pophof / WR 5

## verantwortlich für den Text

Prof. Dr. H. Danker-Hopfe,  
Dr. T. Eggert

## 1. ZIELSETZUNG

Der Einfluss elektromagnetischer Felder ausgehend von Endgeräten nach dem GSM, UMTS und TETRA-Standard wurde bisher im Auftrag des BfS in insgesamt vier experimentellen Laborstudien an Probanden untersucht:

1. *Untersuchungen an Probanden unter Exposition mit hochfrequenten elektro-magnetischen Feldern von Mobiltelefonen* (M8808, [http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/biologie/biologie\\_abges/bio\\_080.html](http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/biologie/biologie_abges/bio_080.html)). Diese Studie wurde im Rahmen des DMF (2003 - 2007) an gesunden jungen Männern (18 - 30 Jahre) mit GSM und UMTS bei jeweils 2 W/kg durchgeführt.
2. *Probandenstudie zur Untersuchung des Einflusses der für TETRA genutzten Signalcharakteristik auf kognitive Funktionen* (FM8846, <https://www.bfs.de/DE/bfs/wissenschaft-forschung/ergebnisse/tetra/studie-kognitive-funktionen.html>). Die von der BDBOS finanzierte Studie (2009 - 2013) wurde ebenfalls an gesunden jungen Männern bei TETRA 1,5 W/kg und TETRA 6 W/kg durchgeführt.
3. *Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder von Mobilfunk-Endgeräten auf Gehirnaktivität, Schlaf und kognitive Leistungsfähigkeit älterer Frauen* (3614S30012, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2019013117414>). Untersucht wurden Frauen im Alter von 60 - 80 Jahren bei GSM 2 W/kg und TETRA 6W/kg (2014 - 2016).
4. *Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder von Mobilfunk-Endgeräten auf Gehirnaktivität, Schlaf und kognitive Leistungsfähigkeit älterer Männer* (3616S82430, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2019101519604>). Untersucht wurden Männer im Alter von 60 - 80 Jahren bei GSM 2 W/kg und TETRA 6W/kg (2016 - 2019).

Ziel dieses Forschungsprojekts ist es zu prüfen, ob sich der Einfluss dieser hochfrequenten elektromagnetischen Felder auf Gehirnaktivität, Schlaf und kognitive Leistungsfähigkeit bei älteren Männern und Frauen sowie im Vergleich älterer und jüngerer Männer unterscheidet. Die gesundheitliche Relevanz der Ergebnisse ist im Sinne des Strahlenschutzes zu bewerten. Die Ergebnisse der Studie werden den Strahlenschutz der Gesamtbevölkerung verbessern und werden zur Überprüfung der Gültigkeit der Grenzwerte dienen.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Insgesamt erlauben die vorliegenden Studien die folgenden Vergleiche:

- junge Männer vs. ältere Männer bei GSM 2 W/kg (Studie 1. und 4.)

- junge Männer vs. ältere Männer bei TETRA 6 W/kg (Studie 2. und 4.)
- ältere Frauen vs. ältere Männer bei GSM 2 W/kg (Studie 3. und 4.)
- ältere Frauen vs. ältere Männer bei TETRA 6 W/kg (Studie 3. und 4.)

Diese Vergleiche sollen für die Makrostruktur des Schlafes, die Powerspektralwerte des Schlaf-EEGs, die Powerspektralwerte des Wach-EEGs sowie für einige Ergebnisparameter der am Tage durchgeführten psychophysiologischen Experimente und kognitiven Tests erfolgen.

## **2.1 MAKROSTRUKTUR DES SCHLAFES**

Es sollen insgesamt 30 Ergebnisparameter mit geeigneten statistischen Methoden vergleichend analysiert werden.

## **2.2 POWERSPEKTRALWERTE DES SCHLAF- UND WACH-EEGS**

Es soll eine vergleichende statistische Auswertung von Powerspektralwerten nach Spektrallinien und nach Frequenzbändern mit geeigneten Methoden erfolgen.

## **2.3 KOGNITIVE LEISTUNGSFÄHIGKEIT**

Alle Ergebnisparameter zur kognitiven Leistungsfähigkeit, bei denen in mindestens einer der 4 durchgeführten Studien ein Expositionseffekt festgestellt werden konnte, sollen mit geeigneten statistischen Methoden vergleichend analysiert werden.

# **3. METHODIK**

Bevor die statistische Auswertung vorgenommen werden kann, muss zunächst eine Vergleichbarkeit der Daten hergestellt werden. Dafür ist eine Reihe von Neuauswertungen der bereits vorliegenden Daten sowie eine erneute Bestimmung der zu analysierenden Ergebnisparameter notwendig. Als statistisches Testverfahren soll dann eine Varianzanalyse mit Messwiederholung zum Einsatz kommen. Dabei handelt es sich um ein gängiges Analyseverfahren für abhängige Stichproben, welches dementsprechend häufig Anwendung bei der Auswertung von Cross-over-Studien findet. Da in allen vier Forschungsprojekten drei unterschiedliche Expositionssignale untersucht wurden und jede\*r Proband\*in diese Versuchsbedingungen dreimal in unterschiedlicher, zufällig zugeordneter Reihenfolge durchlaufen musste, sollen robuste Mittelwerte für die jeweils drei Untersuchungstage bzw. -nächte mit gleicher Exposition die Basis für die statistische Analyse von Expositionseffekten darstellen. Im statistischen Modell sollen dann der messwiederholte Faktor „Exposition“ sowie je nach Fragestellung entweder das Geschlecht oder das Alter als weiterer Faktor berücksichtigt werden.

# **4. DURCHFÜHRUNG**

## **4.1 NEUAUSWERTUNG VON DATEN**

Die notwendigen Maßnahmen für die Neuauswertung der Daten umfassen die Anwendung gleicher Verfahren zur Korrektur von Augenartefakten für das Wach-EEG sowie für alle ereigniskorrelierten Potentiale, die Berücksichtigung der Bettzeit bei den Ergebnisparametern zur Makrostruktur des Schlafes sowie bei den Powerspektralwerten des Schlaf-EEGs, die Anwendung eines einheitlichen 50 Hz-Sperrfilters für alle EEG-Aufzeichnungen und eine Neuauswertung einiger Tagestestungen unter dem Aspekt einer einheitlichen Durchführung (s. u.).

## **4.2 MAKROSTRUKTUR DES SCHLAFES**

Die Variablen zur Schlaf-Makrostruktur von den jungen Probanden müssen mit einer vereinheitlichten Bettzeit von 7,5 Stunden neu berechnet werden, um eine Vergleichbarkeit herzustellen (bei den jungen Probanden betrug die Bettzeit 8 Stunden, bei den Älteren jedoch nur 7,5 Stunden). Ausgewertet werden sollen insgesamt 20 Parameter der Makrostruktur, je zwei Parameter zu Aufwachereignissen und der Anzahl der Stadienwechsel in der Nacht sowie sechs Arousal-Parameter.

### 4.3 POWERSPEKTRALWERTE

Das Vorgehen bei den EEG-Aufzeichnungen wurde im Zuge der vier Studien stetig weiterentwickelt. Unter anderem musste in den späteren Studien auf Grund z. T. deutlicher Störungen durch das Stromnetz ein 50 Hz-Sperrfilter eingeführt werden, welches in den früheren Studien noch nicht notwendig war. Diese Störungen haben zwar keine Bedeutung für die EEG-Spektren, aber sie beeinflussen die Artefaktbehandlung. Weiterhin wurden in den neueren Studien verbesserte Algorithmen zur Artefakterkennung erprobt. Um hier einheitliche Bedingungen zu schaffen, ist es erforderlich, die quantitative Auswertung des Schlaf- und des Wach-EEGs für einen Teil der Studien unter Berücksichtigung dieser methodischen Änderungen neu durchzuführen.

#### 4.3.1 Schlaf-EEG

Bei der erneuten Berechnung der Powerspektralwerte des Schlaf-EEGs bei den jüngeren Probanden muss zusätzlich auf die verkürzte Bettzeit geachtet werden. Aus der quantitativen EEG-Auswertung resultieren Powerspektralwerte auf der Basis von einzelnen Spektrallinien, die zusätzlich eine Einteilung des Schlaf-EEGs in fünf vordefinierte Frequenzbänder erlauben. Vor der statistischen Analyse sollten die Powerspektralwerte aber noch logarithmisch transformiert werden, da diese in der Regel starke Abweichungen von einer Normalverteilung aufweisen.

#### 4.3.2 Wach-EEG

Augenbewegungen, die starke Störungen im EEG verursachen, führten auf Grund der Amplitudenkriterien, die in allen Studien benutzt wurden, zum Ausschluss der betroffenen EEG-Segmente. Eine Möglichkeit, die Anzahl der ausgeschlossenen Segmente zu reduzieren, ist eine vorherige Korrektur dieser Artefakte im EEG. Für eine korrekte Arbeitsweise muss diese Korrektur der Augenartefakte allerdings anhand von Aufzeichnungen, die überwiegend Augenbewegungen und Lidschläge enthalten, kalibriert werden. Die Vorgehensweise dazu ist für die Studien bestmöglich zu vereinheitlichen und muss bei der erneuten Berechnung der Powerspektralwerte des Wach-EEGs zusätzlich Berücksichtigung finden. Wie beim Schlaf-EEG resultieren aus der quantitativen EEG-Auswertung Powerspektralwerte auf der Basis von einzelnen Spektrallinien, die zusätzlich eine Einteilung des Wach-EEGs in sechs vordefinierte Frequenzbänder erlauben. Auch hier soll vor der statistischen Auswertung eine logarithmische Transformation der Daten erfolgen.

### 4.4 KOGNITIVE LEISTUNGSFÄHIGKEIT

Wie beim Wach-EEG muss auch für alle anderen EEG-basierten Ergebnisparameter aus den psychophysiologischen Experimenten eine vereinheitlichte Augenartefaktkorrektur erfolgen. Da sich im Laufe der Zeit auch die Methode zur Bestimmung der ereigniskorrelierten Potentiale geändert hatte, sind diese Berechnungen ebenfalls zu vereinheitlichen. Bei einigen der kognitiven Aufgaben wurde die Testdurchführung dem Alter der Testpersonen entsprechend angepasst, weswegen einzelne Ergebnisparameter für die Untersuchung von Altersunterschieden neu auszuwerten sind, um die Vergleichbarkeit sicherzustellen. Dies betrifft z. B. die Anzahl von Versuchsdurchgängen bzw. eine einheitliche Testdauer.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 MAKROSTRUKTUR DES SCHLAFES

Die Ergebnisse der Geschlechts- und altersabhängigen Analysen von Expositionseffekten auf Variablen zur Schlaf-Makrostruktur sind inzwischen publiziert worden. Expositionseffekte sind bei älteren Frauen ausgeprägter als bei älteren Männern, während sich Expositionseffekte bei jüngeren und älteren Männern nicht wesentlich unterscheiden.

### 5.2 SCHLAF-EEG

Die erneute quantitative Auswertung der Schlaf-EEG-Daten unter Berücksichtigung einheitlicher Parameter ist erfolgt. Visuelle Kontrollen zur Identifikation artifizierlicher Signale sind ebenfalls abgeschlossen. Gegenwärtig läuft die statistische Analyse zur Überprüfung möglicher geschlechtsspezifischer Expositionseffekte.

### **5.3 WACH-EEG**

Die erneute quantitative Auswertung der Wach-EEG-Daten unter Berücksichtigung einheitlicher Parameter und der Augenartefaktkorrektur ist größtenteils erfolgt.

### **5.4 EREIGNISKORRELIERTE POTENTIALE**

Die einzelnen Testabschnitte sind aus den artefaktkorrigierten Tagesaufzeichnungen ausgeschnitten worden, aus denen dann im Anschluss die ereigniskorrelierten Potentiale neu bestimmt wurden.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Für das Schlaf-EEG stehen noch die altersabhängigen Analysen von Expositionseffekten aus. Die erneute quantitative Auswertung der Wach-EEG-Daten unter Berücksichtigung einheitlicher Parameter und der Augenartefaktkorrektur muss noch abgeschlossen werden. Anschließend müssen für diesen Aspekt dann noch die visuellen Kontrollen zur Identifikation von Artefakten sowie die statistische Auswertung erfolgen. Bei den ereigniskorrelierten Potentialen fehlen noch die statistischen Analysen. Die Neuauswertung der Leistungsparameter aus den kognitiven Tests unter Berücksichtigung der altersbedingten Anpassungen bei der Testdurchführung ist weiterhin offen. Die Erstellung des Abschlussberichts erfolgt parallel zum Projektverlauf.

## Thema

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

## Subject

*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*

<b>Kennzeichen</b> 3619S82468	<b>Beginn</b> 01.12.2019	<b>Ende</b> 30.11.2021	<b>Fördermittel</b> EUR 298.133,-
----------------------------------	-----------------------------	---------------------------	--------------------------------------

## Forschungs- / Auftragnehmer

Institut für Hochfrequenztechnik, RWTH Aachen University, Aachen

**Projektleitung**  
Prof. Dr. D. Heberling

**Fachbetreuung BfS**  
Dr. J. Kuhne / WR 5

**verantwortlich für den Text**  
S. Schießl

## 1. ZIELSETZUNG

Die Realisierung eines flächendeckenden und kontinuierlichen Immissions-Monitorings elektromagnetischer Felder ist auf Grund des mit herkömmlichen Methoden verbundenen Aufwands nicht möglich. Für den Bereich des Mobilfunks könnte ein Crowdsourcing-basierter Ansatz, der auf die Erhebung von Messdaten mittels Standard-Smartphones setzt, Abhilfe schaffen.

Das vorliegende Vorhaben beabsichtigt daher die technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit dieses Ansatzes zu untersuchen. Konkret soll die Frage geklärt werden, ob die von vielen Endgeräten gemessenen Signalstärke-Indikatoren ein repräsentatives Bild der Exposition über das gesamte genutzte Mobilfunkspektrum zeichnen können.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK (AP 1)

Als Grundlage zur Bearbeitung des Projekts wird der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik zusammengestellt und aufbereitet. Schwerpunkte sind hierbei die Signalstärke-Indikatoren 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.

### 2.2 BEANTWORTUNG DER FRAGESTELLUNG: WELCHE MESSGENAUIGKEIT IST BEI NUTZUNG VON ENDGERÄTE-INTERNEN FELDSTÄRKE-PROXIES REALISTISCHERWEISE 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 soll der Zusammenhang zwischen den im Android-Betriebssystem zugänglichen Signalstärke-Indikatoren von Smartphones und der zugrunde liegenden Feldstärke bzw. Immission untersucht werden. Hierfür ist die unter realistischen Bedingungen erreichbare Feldstärke-Messgenauigkeit zu ermitteln, Einflussgrößen auf diese zu bestimmen und die Stärke der Einflüsse zu quantifizieren.

### **2.3 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 ist zu bestimmen. Geeignete Maßnahmen zur Erhöhung der Genauigkeit der Feldstärkeermittlung sind zu erarbeiten, exemplarisch umzusetzen und unter realistischen Bedingungen zu validieren.

### **2.4 BEWERTUNG DER EIGNUNG DES KONZEPTS „SMARTPHONE-BASIERTES MESSNETZWERK“ ZUR QUANTITATIVEN ERFASSUNG DER EXPOSITION DER ALLGEMEINBEVÖLKERUNG MIT HOCHFREQUENTEN ELEKTROMAGNETISCHEN FELDERN DES MOBILFUNKS (AP 4)**

Abschließend soll 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 sind zu identifizieren und abzuwägen. Der Implementierungsaufwand eines derartigen Systems ist außerdem abzuschätzen.

## **3. METHODIK**

Der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik wird anhand einer Literaturstudie in einschlägigen Datenbanken und durch Internetrecherche zusammengetragen und in einem Bericht aufgearbeitet.

Der Zusammenhang der Signalstärke-Indikatoren von Smartphones und der vorherrschenden Exposition wird anhand von Labor- und Feldmessungen untersucht, um daraus Umrechnungsfaktoren in Feldstärkewerte und deren typische Schwankungsbreiten abzuleiten. Labormessungen erlauben 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 ermöglichen. Vor allem für die Feldmessungen kommt eine speziell für diesen Zweck vom Projektnehmer entwickelte Smartphone-App zur Erfassung der Messdaten aus dem Android-Betriebssystem zum Einsatz.

Der Einfluss der Vergrößerung der Datenbasis wird anhand eines durch ein existierendes Crowdsourcing-Netzwerk im Laufe eines Jahres im Großraum München erhobenen Datensatzes analysiert. Die erarbeiteten Auswertungsmethoden werden anschließend an einem Datensatz im Umfang eines Monats vom Stadtgebiet Aachen angewendet und mit Feldstärkemessungen aus dem Erhebungszeitraum verglichen.

## **4. DURCHFÜHRUNG**

Die Literaturstudie wurde unter Zuhilfenahme einer Literaturverwaltungs-Software durchgeführt. Die Quellen wurden kategorisiert und thematisch zusammenhängend ausgewertet und die Erkenntnisse in einem Zwischenbericht dokumentiert.

Für die Labormessungen wurden geeignete Messaufbauten definiert und Messskripte zur Steuerung des Messablaufs und Abspeicherung der Messdaten programmiert. Die Messreihe mit insgesamt 30 Smartphones wurde zwischenzeitlich abgeschlossen. Die Auswertung der Messdaten ist noch im Gange. 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. Die Messreihe befindet sich derzeit noch in der Ausführung.

Der für die Untersuchung des Einflusses der Vergrößerung der Datenbasis benötigte Datensatz wurde beschafft und bereits einer grundlegenden Plausibilitätsprüfung unterzogen. Außerdem wurden mögliche Auswertungsverfahren ermittelt und ein Verfahren bereits exemplarisch erprobt.

## 5. ERGEBNISSE

Die Analyse der Eigenschaften der Signalstärke-Indikatoren der Mobilfunkstandards im Rahmen der Literaturstudie ergab, dass diese hinsichtlich ihrer Definition einen direkten Bezug zur Exposition durch die Mobilfunkdienste aufweisen. Die in der Immissionsmesstechnik verwendeten Messverfahren beruhen auf den gleichen Referenzsignalen wie die Signalstärkemessungen der Smartphones. Außerdem zeigte sich, dass die für eine Expositionsabschätzung grundsätzlich notwendigen Parameter im Android-Betriebssystem prinzipiell abrufbar sind. Im Zuge der Umsetzung der Smartphone-App für die Messungen konnte dies auch praktisch verifiziert werden. Bestimmte Parameter sind zum Teil jedoch erst in neueren Betriebssystemversionen und abhängig von der Implementierung der Smartphone-Hersteller verfügbar. Weiterhin wurde durch die Literaturstudie ersichtlich, dass die dem Vorhaben zugrunde liegende Fragestellung bislang nicht umfassend beantwortet wurde.

Die Ergebnisse der Labormessungen zeigen, dass für den Fall eines aus nur einer Richtung einfallenden Signals eine deutliche Abhängigkeit des Signalstärkepegels von der Einfallsrichtung des Signals besteht. Dieser Spezialfall tritt außerhalb des Labors allerdings ausschließlich bei Sichtverbindung und auch dann nur näherungsweise auf, da durch Reflexionen fast immer Mehrwegeausbreitung vorliegt, sodass ein Signal aus mehreren Richtungen beim Endgerät eintrifft. Aus diesem Grund werden die Labormessungen durch Messungen im freien Feld ergänzt, um die typischen Ausbreitungsbedingungen in verschiedenen Umgebungen (freies Feld, Vorstadt, Innenstadt, gewerblich) zu berücksichtigen. Die bisherigen Ergebnisse der Außenmessreihe demonstrieren, dass sich ein im Mittel konstanter Zusammenhang zwischen elektrischer Feldstärke und dem jeweiligen Signalstärke-Indikator des Mobilfunkstandards ergibt. Die Untersuchungen weisen außerdem darauf hin, dass sich der Umrechnungsfaktor abhängig vom genutzten Frequenzband unterscheiden kann.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die nächsten Schritte bestehen darin, die noch laufende Messreihe im Außenbereich abzuschließen und ebenso wie die bereits vorliegenden Ergebnisse der Labormessungen final auszuwerten. Anschließend wird der Fokus auf die Verarbeitung des Crowdsourcing-Datensatzes verlegt und Auswertungsmethoden evaluiert. Zur Validierung der erarbeiteten Methoden werden Feldstärkemessungen durchgeführt und mit Ergebnissen der Auswertung von Crowdsourcing-Daten verglichen.

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung sämtlicher erzielter Erkenntnisse in Form eines Abschlussberichts und die Bewertung der Eignung des Konzepts eines HF-Messnetzwerks zur Expositionsabschätzung im Mobilfunk.

**Thema**

Wirkungen auf Zellen der Körperoberfläche bei Expositionen mit Zenti- und Millimeterwellen (5G-Frequenzen)

**Subject**

*Effects of centi- and millimeter wave exposure (5G frequencies) on cells of the body surface*

**Kennzeichen**

3619S82470

**Beginn**

01.11.2019

**Ende**

30.09.2022

**Fördermittel**

EUR 1.167.818,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Jacobs University Bremen, Focus Area Health

**Projektleitung**

Prof. Dr. A. Lerchl

**Fachbetreuung BfS**

Dr. J.-A. Schmidt / WR 5

**verantwortlich für den Text**

Prof. Dr. A. Lerchl

## 1. ZIELSETZUNG

Das neue 5G-Protokoll zum Übertragen großer Datenmengen im Bereich des Mobilfunks verursacht Bedenken und Befürchtungen in der Bevölkerung, wenngleich die zunächst benutzten Frequenzen hinlänglich untersucht sind. Die biologischen Effekte der später genutzten Frequenzen im Bereich von etwa 27 und über 40 GHz sind hingegen nur in wenigen Veröffentlichungen thematisiert worden. Daher ist es Ziel dieses Projekts, Wirkungen von elektromagnetischen Feldern im Zenti- und Millimeterwellenbereich auf menschliche Zellen zu untersuchen. Da die elektromagnetischen Felder in den hier untersuchten Frequenzbereichen nur in die oberen Schichten der Haut eindringen, sollen als biologische Endpunkte die Genexpression sowie die DNA-Methylierung nach Exposition in Zellen der Körperoberfläche analysiert werden. Die Ergebnisse des Vorhabens sind für die weitere Verbesserung des Strahlenschutzes und der Strahlenschutzvorsorge mit Hinblick auf die Einführung von 5G erforderlich.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK (AP 1)

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist die Sichtung und Bewertung aller relevanten wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu biologischen Wirkungen und Wirkmechanismen einer Exposition mit Zenti- und Millimeterwellen im Frequenzbereich 3 – 100 GHz der letzten 15 Jahre.

### 2.2 EXPOSITION UND DOSIMETRIE (AP 2)

Es sollen Expositionsanlagen geplant und gebaut werden, die es ermöglichen, in Kultur befindliche Zellen der Haut (Fibroblasten und Keratinozyten) mit definierten elektromagnetischen Feldern (27 GHz und über 40 GHz) zu beaufschlagen.

Die Kulturen der Zelllinien sind zu etablieren. Dafür sind menschliche Zelllinien (Fibroblasten und Keratinozyten) so in Kultur zu nehmen, dass sie in ausreichender Zahl für die Exposition zur Verfügung stehen und den berechneten Expositionsbedingungen ausgesetzt werden. Weiterhin ist die Gewinnung und Aufreinigung der mRNA und DNA zu etablieren.

### 2.3 ZU UNTERSUCHENDE BIOLOGISCHE ENDPUNKTE (AP 3)

Es sollen menschliche Zelllinien, genauer Keratinozyten (HaCaT) und Fibroblasten (HDF), unter den in AP 2 etablierten Bedingungen exponiert und Veränderungen im Genexpressionsmuster und im DNA-Methylierungsstatus analysiert werden.

### 3. METHODIK

Die beiden Zelllinien werden mit definierten elektromagnetischen Feldern (27 GHz und 41 GHz) exponiert. Eine scheinexponierte Kontrolle wird jeweils mitgeführt. Die Temperaturen während der Exposition werden aufgezeichnet. Die Leistungsflussdichte soll  $1 \text{ mW/cm}^2$  bzw.  $10 \text{ mW/cm}^2$  betragen. Zusätzlich sind für jede Frequenz und Leistungsflussdichte eine kürzere (2 Stunden) und eine längere Exposition (48 Stunden) zu untersuchen. Die Exposition hat verblindet zu erfolgen. Ein neuartiges experimentelles Design soll die simultane Temperaturkontrolle während der Exposition in identischen Petrischalen ohne Zellen erlauben. Die Exposition der Zellen erfolgt dabei in sehr großen Inkubatoren, in denen sich die Antennen der Expositionsanlagen und die Petrischalen an genau definierten Stellen befinden. Durch zufällige, im Steuerungsrechner generierte und gespeicherte Zuordnungen werden pro Einzelexperiment die Antennen eines Inkubators mit dem Generator verbunden, der sich zwischen den Inkubatoren befindet. Die Exposition wird per Mausclick gestartet und nach der vorgegebenen Zeit automatisch beendet. Währenddessen erfolgt die fortlaufende Speicherung der Expositionsstärken (durch reflektierte elektromagnetische Felder) und der Temperaturen. Der technische Kooperationspartner kann jederzeit online auf die Daten zugreifen sowie ggf. notwendige Anpassungen oder Änderungen der Expositionsparameter vornehmen. Die Zellen werden unmittelbar nach der Exposition geerntet, die mRNA extrahiert und eingefroren. Am Ende einer Versuchsserie werden die Expressionsmuster und die Methylierungen durch ein externes Labor ermittelt und danach durch den Auftragnehmer einer aufwändigen biostatistischen Analyse unterzogen.

### 4. DURCHFÜHRUNG

Die Expositionsanlagen wurden in Betrieb genommen. Die Exposition der Zellen wurde wie unter 3. Methodik beschrieben durchgeführt. Für die Weiterarbeit ist die Kultivierung der Zelllinien zu etablieren. Die beiden Zelllinien sind dabei so in Kultur zu nehmen, dass sie in ausreichender Zahl für die Exposition zur Verfügung stehen und den berechneten Expositionsbedingungen ausgesetzt werden. Weiterhin ist die Gewinnung und Aufreinigung der mRNA und DNA zu etablieren.

### 5. ERGEBNISSE

Die Literaturrecherche wurde erfolgreich abgeschlossen und ein Zwischenbericht zu AP 1 geliefert. Die Literatur-Übersicht erlaubt eine detaillierte Einschätzung der bisherigen Forschungsergebnisse und der Lücken.

Die Expositionsanlagen sind durch den technischen Kooperationspartner fertiggestellt, montiert und kalibriert. Die numerische Simulation der Exposition ist erfolgt und in einem Bericht detailliert dokumentiert. Die erforderliche Güte der Exposition wird bei beiden Frequenzen (27 bzw. 40,5 GHz) erreicht. Weiterhin wurden die beiden Zelltypen erfolgreich vermehrt. Die Gewinnung der mRNA ist ebenfalls etabliert.

### 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Arbeiten zu AP 2 werden wie geplant weitergeführt. Die zeitlichen Verzögerungen im Projekt können voraussichtlich aufgefangen werden.

## Thema

Sichtweisen der Bevölkerung auf den 5G-Mobilfunkstandard und dessen kommunikative Darstellung

## Subject

*Views of the population on the 5G mobile phone standard and its communicative presentation*

**Kennzeichen**  
3620S82471

**Beginn**  
01.09.2020

**Ende**  
31.11.2021

**Fördermittel**  
EUR 150.654,-

## Forschungs- / Auftragnehmer

GIM - Gesellschaft für Innovative Marktforschung GmbH

**Projektleitung**  
Dr. T. Jerković,  
A. Wachenfeld-Schell

**Fachbetreuung BfS**  
S. Tophofen / St-RK

**verantwortlich für den Text**  
Dr. T. Jerković,  
A. Wachenfeld-Schell

## 1. ZIELSETZUNG

Das Thema „Mobilfunk und Gesundheit“ erfährt seit geraumer Zeit wieder ein erhöhtes mediales und öffentliches Interesse. Dieses Interesse richtet sich vor allem auf die Einführung des neuen Mobilfunkstandards 5G (im Folgenden kurz „5G“). Ziel des vorliegenden Vorhabens ist es, die Sichtweisen der Bevölkerung auf den Mobilfunk im Allgemeinen sowie auf 5G im Speziellen zu erfassen. Dazu soll zum einen mit einem qualitativen Ansatz untersucht werden, wie die Bürger\*innen verschiedene Aspekte des Mobilfunks und von 5G verstehen und interpretieren und zum anderen soll eine für die deutsche Bevölkerung repräsentative Umfrage erfolgen. Die Ergebnisse des Vorhabens liefern dem BfS Erkenntnisse über den Informationsbedarf auf Seiten der Bürger\*innen, ihren Wissensstand und ihre Ansichten zum Thema 5G bzw. Mobilfunk und Gesundheit.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Zur Erreichung der Zielsetzungen wurden die folgenden Forschungsfragen für die **qualitative Erhebung** formuliert:

- In welchem Zusammenhang sehen die Bürger\*innen den Mobilfunk inkl. vorhergehender Mobilfunkstandards und den neuen Standard 5G?
- Wie beurteilen Bürger\*innen mit 5G in Zusammenhang stehende technische Neuerungen und was wissen sie über Aufbau und Einsatz der Technologie?
- Inwieweit können die in vorangegangenen Studien beobachteten Konzeptionen und Fehlkonzeptionen zur Funktionsweise des Mobilfunks ebenfalls beobachtet werden?
- Inwiefern gibt es weitere, bislang unbekannte Konzeptionen und Fehlkonzeptionen, insbesondere auch in Zusammenhang mit den technischen Neuerungen bei 5G?
- Wie gefestigt sind entsprechende Fehlkonzeptionen?
- Welchen Zusammenhang sehen die Bürger\*innen zwischen Strahlungsexposition und potenziellem Gesundheitsrisiko?
- Wie schätzen die Bürger\*innen wissenschaftliche Unsicherheiten bzw. allgemeine Unsicherheiten beim Thema Mobilfunk und Gesundheit bzw. 5G und Gesundheit ein – auch im Vergleich zu Unsicherheiten bei anderen Gesundheitsthemen? Welche Maßnahmen ergreifen sie gegebenenfalls?

Folgende Forschungsfragen wurden für die **repräsentative Bevölkerungsbefragung** formuliert:

- Welcher Informationsbedarf besteht?
- Welcher Wissensstand besteht?

- Welche Ansichten zum Thema 5G bzw. Mobilfunk und Gesundheit lassen sich identifizieren?
- Welches Schutz- und Vorsorgeverhalten ist intendiert und/oder wird betrieben?

Diese Forschungsfragen werden ggf. noch ergänzt basierend auf den Erkenntnissen der qualitativen Erhebung.

Darüber hinaus sollen die wesentlichen Erkenntnisse der Vorgängerstudie in ihrer zeitlichen Entwicklung fortgeschrieben werden um den Stellenwert von Mobilfunk gesellschaftlich einordnen und Veränderungen über die Zeit feststellen zu können.

### 3. METHODIK

#### 3.1 LITERATURRECHERCHE ZUR METHODIK (AP 1)

In einem Zwischenbericht wurde der aktuelle Stand der qualitativen Forschung zum Thema „Mobilfunk bzw. elektromagnetische Felder und Gesundheit“ zusammengetragen und eine Bewertung der verfügbaren Quellen hinsichtlich der angewendeten Methoden vorgenommen. Gegenstand dieser Recherche waren ausschließlich veröffentlichte Quellen. In die Recherche wurden neben deutschen auch internationale Studien integriert.

#### 3.2 QUALITATIVE ERHEBUNG (AP 1)

Die qualitative Primärdatenerhebung wurde mit Hilfe der Slot-Methode durchgeführt. Das Slot-Modell besteht aus einer zweistufigen Datenerhebung von Einzelinterviews mit nachfolgender Minigruppen-diskussion. Zweck dieses Vorgehens ist es, Befragungsinhalte passgenau den methodischen Komponenten zuordnen zu können und sowohl die individuelle als auch kollektive Perspektive auf die interessierenden Themen zu ermitteln:

- **Stufe 1 – Einzelinterviews**  
Zunächst wurden zeitgleich vier Einzelinterviews zu 75 Minuten durchgeführt. Über alle Interviews hinweg wurde eine heterogene Stichprobe ausgewählt, d. h. die Teilnehmer unterschieden sich in wesentlichen Merkmalen (in dieser Studie v. a. kritische vs. unkritische Einstellung zu Mobilfunk). Innerhalb des Einzelinterviews wurde die individuelle, von anderen Teilnehmern unbeeinflusste Meinung der Befragten eingeholt. Besonderer Schwerpunkt lag hier auf der Ermittlung von Erfahrungen, Wahrnehmungen, Emotionen, Risikobewusstsein zu den interessierenden Themen, v. a. generelle Lebensrisiken, Mobilfunk und 5G.
- **Stufe 2 – Minigruppendifkussionen:**  
Im Anschluss an die Einzelinterviews wurden die Teilnehmer zu einer gemeinsamen Minigruppen-diskussion von 75 Minuten Dauer zusammengeführt. Die nun kollektiv durchgeführte Diskussion ermöglichte die Identifizierung von Unterschieden und Gemeinsamkeiten zwischen Einzel- und Gruppenmeinung, was insbesondere durch die heterogene Zusammensetzung der Stichprobe (bewusst) verstärkt wurde. Die durch Dynamik geprägte Gruppensituation wurde zur Ermittlung des kollektiven Diskurses sowie zur Diskussion von Thesen und Konzepten genutzt.

Insgesamt wurden 8 Slots an 4 Erhebungsorten durchgeführt:

- 4 Teilnehmer pro Slot
- 2,5 h Dauer pro Slot
- 2 Slots pro Erhebungsort (Mannheim, München, Erfurt, Hamburg)
- pro Erhebungsort je 1 Slot mit Personen aus ländlichem, 1 Slot mit Personen aus städtischem Umfeld
- N = 32.

### **3.3 REPRÄSENTATIVE BEVÖLKERUNGSBEFRAGUNG (AP 2)**

Die Durchführung der Studie ist als repräsentative telefonische Befragung – CATI - geplant. Es sollen mindestens n = 2 000 Personen der deutschsprachigen in Privathaushalten lebenden Wohnbevölkerung ab 16 Jahren befragt werden. Die Befragung dauert ca. 20 min. Die Stichprobenziehung erfolgt auf Basis der „ADM Auswahlgrundlage für Telefonstichproben“ (Festnetz und Mobilfunk). Der Auswahlrahmen basiert auf den von der Bundesnetzagentur jährlich zur Nutzung bereitgestellten Nummernbereichen. Da der Anteil der Haushalte, die ihre Telefonnummer nicht veröffentlichen lassen, stetig zunimmt, umfasst die ADM-Telefonstichprobe sowohl eingetragene als auch nach dem Gabler-Häder-Verfahren generierte Rufnummern.

## **4. DURCHFÜHRUNG**

### **4.1 LITERATURRECHERCHE ZUR METHODIK (AP 1)**

Die Darstellung der verfügbaren qualitativen Studien zum Thema und deren Bewertung erfolgte in einem Zwischenbericht. Die in der Literaturrecherche gewonnenen Erkenntnisse wurden direkt nutzbar gemacht, indem die Kriterien für die Stichprobenziehung für die qualitative Erhebung bestätigt und darüber hinaus ergänzt werden konnten. Ferner haben die Ergebnisse der Literaturrecherche methodisch die Wahl des Slot-Modells bekräftigt.

### **4.2 QUALITATIVE ERHEBUNG (AP 1)**

Die qualitative Erhebung wurde im November durchgeführt. Um den zum Zeitpunkt der Datenerhebung herrschenden amtlichen Bestimmungen hinsichtlich Kontaktbeschränkungen und auch forschungsethischen Prinzipien Genüge zu tun, wurde die Datenerhebung digital per Zoom durchgeführt. Am 17.11.2020 erfolgte der Pre-Test. Danach wurden kleine Änderungen an den Themenleitfäden vorgenommen, bevor in der Zeit vom 23.-26.11.2020 die Datenerhebung stattfand. Am 30.11.2020 erfolgte das Debriefing aller beteiligten Interviewer, bei dem auch die beiden Studienleiterinnen für die repräsentative Bevölkerungsbefragung von AP 2 sowie das BfS anwesend waren.

## **5. ERGEBNISSE**

Zum Ende des Jahres 2020 lagen die Ergebnisse der Literaturrecherche vor, die in einem Zwischenbericht zusammengestellt wurden.

Die Auswertung der qualitativen Erhebung dauert an.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Die Auswertung der qualitativen Erhebung wird Anfang 2021 beendet.

Die repräsentative Bevölkerungsbefragung wird im 2. bzw. 3. Quartal 2021 durchgeführt, im 4. Quartal 2021 ausgewertet und in einem barrierefreien Endbericht, der die Ergebnisse von AP 1 und AP 2 enthält, dargestellt.

## Thema

Systematische Review zum Einfluss elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf die Fruchtbarkeit bei Menschen sowie in Tier- und Laborstudien

## Subject

*Systematic review on the influence of electric, magnetic and electromagnetic fields on adverse fertility outcomes in humans as well as in animal and laboratory studies*

## Kennzeichen

3620S82475

## Beginn

01.09.2020

## Ende

31.10.2021

## Fördermittel

EUR 79.188,-

## Forschungs- / Auftragnehmer

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., München

## Projektleitung

D. Sachno

## Fachbetreuung BfS

B. Henschenmacher / WR 5

## verantwortlich für den Text

D. Sachno

## 1. ZIELSETZUNG

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.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 ERSTELLUNG EINES REVIEW-PROTOKOLLS

Nach den Richtlinien des Centre for Reviews and Dissemination wird ein Review-Protokoll erstellt, 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.

### 2.2 ERSTELLUNG DES SYSTEMATISCHEN REVIEWS

Im Anschluss an die Genehmigung des Review-Protokolls erfolgt die Literatursuche, -auswahl und -aufarbeitung der Daten, unter Beachtung der Richtlinien des Centre for Reviews and Dissemination, als systematische Review. 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.

## 3. METHODIK

### 3.1 DEFINITION EINER PRÄZISEN FORSCHUNGSFRAGE

Eine präzise Forschungsfrage, die durch den gesamten Review-Prozess führt, sowie die damit zusammenhängenden Einschlusskriterien werden anhand des PECO (*Population, Exposure, Comparison, Outcome*)-Verfahrens definiert.

### 3.2 SUCHSTRATEGIE

Zur exakten Definition der Suchstrategie erfolgt die Festlegung der zu durchsuchenden Datenbanken, der entsprechenden Suchbegriffe und die Modalitäten der einzelnen Suchbegriffe (z. B. MESH-Term, Verbindung der Suchbegriffe durch AND/OR etc.). Zusätzlich werden weitere Einschlusskriterien wie Sprache, Erscheinungsdatum, Art der Studie etc. definiert. Die Suchstrategie wird anhand vorab definierter Referenzartikel, die durch die Suche identifiziert werden müssen, validiert.

### 3.3 SELEKTION UND BEWERTUNG EINZUSCHLIEßENDER STUDIEN

Alle relevanten Artikel, identifiziert nach der zuvor festgelegten Forschungsfrage und Suchbegriffen, werden bei Erfüllung der Einschlusskriterien in die Studie aufgenommen. Die interne Validität und die Qualität der eingeschlossenen Studien wird anschließend mit einem vom „Office of Health Assessment and Translation“ veröffentlichten Protokoll überprüft. Dabei werden beispielsweise Kriterien wie Verblindung, Qualität der Dosimetrie sowie Vergleichbarkeit der experimentellen Konditionen zwischen den Dosisgruppen betrachtet.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 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“ dedupliziert 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.

### 4.2 EXTRAKTION DER DATEN

Für die Extraktion der graphischen Daten und Details zu der exponierten Spezies (d. h. Mensch, Tier oder in vitro) 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.

### 4.3 BEURTEILUNG DER STUDIEN

Die interne Validität und die Qualität der eingeschlossenen Studien werden mit dem "Risk of Bias"-Tool des vom "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 Voreingenommenheitsrisiko
- "--" definitiv hohes Voreingenommenheitsrisiko.

## 5. ERGEBNISSE

Das Review-Protokoll wurde erfolgreich finalisiert. Nach der im Review-Protokoll definierten Suchstrategie wurden die Datenbanken PubMed, Scopus, und Web of Science durchsucht. 74 von 74 Referenzartikeln konnten in allen Datenbanken identifiziert werden. Die folgenden Trefferzahlen wurden erzielt: 6 633 Artikel in PubMed, 15 190 Artikel in Scopus, 6 860 Artikel in Web of Science.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Suchstrategie wird optimiert, sodass speziell weniger irrelevante Artikel identifiziert werden. Weiterhin wird das Screening und Datenextraktionsprotokoll in „DistillerSR“ etabliert und eine Pilotstudie mit 100 zufällig ausgewählten Artikeln durchgeführt. Es erfolgt die Selektion der einzuschließenden Studien nach Punkt 4.1. Referenzlisten relevanter Artikel werden nach weiteren, bisher nicht berücksichtigten Artikeln, durchsucht – ggf. erfolgt eine Ergänzung der bereits identifizierten Artikel. Daten werden nach 4.2. extrahiert und nach 4.3. bewertet. Anschließend werden die Ergebnisse in Form einer systematischen Review 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.

### **3.9 Themenbereich 09**

**Deutsches Mobilfunk Forschungsprogramm / Stromnetzausbau**

### ***3.9 Subject area 09***

***German Mobile Telecommunication Research Programme / national grid expansion***

## Thema

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

## Subject

*Testing, development and validation of new measurement techniques for static and low-frequency electric and magnetic fields*

### Kennzeichen

3619S92411

### Beginn

01.02.2020

### Ende

31.03.2022

### Fördermittel

EUR 695.746,-

### Forschungs- / Auftragnehmer

Donau-Universität Krems (Universität für Weiterbildung Krems, DUK), Department für Integrierte Sensor-Systeme (DISS), Wr. Neustadt, Österreich

TU Wien, Institut für Sensor und Aktuatorssysteme, Wien, Österreich

Seibersdorf Labor GmbH, Seibersdorf, Österreich

### Projektleitung

Dr. W. Hortschitz

### Fachbetreuung BfS

Dr. J. Kuhne / WR 5

### verantwortlich für den Text

Dr. W. Hortschitz

## 1. ZIELSETZUNG

Das BfS hat die Aufgabe, die von geplanten Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen (HGÜ) ausgehenden gesundheitlichen Risiken zu ermitteln. Dazu müssen unter anderem die vorherrschenden statischen und niederfrequenten elektrischen und magnetischen Felder gemessen werden. Herkömmliche Messmethoden erweisen sich hierbei als unzuverlässig oder problematisch. Ein Grund liegt unter anderem im Einfluss von z. B. Luftionen, welche zu Aufladungen und damit zu einer Beeinflussung des Feldes führen können. Dieses Forschungsvorhaben verfolgt das Ziel neuartige Messmethoden zu evaluieren und ein Messsystem für die notwendigen Messaufgaben aufzubauen, zu erproben und zu validieren.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Im Arbeitspaket (AP) 1 soll der Stand der Technik und Wissenschaft evaluiert und darauf aufbauend ein Konzept für ein neues Messsystem entwickelt werden. Dieses Konzept dient als Grundlage für AP 2, in dem das Messsystem aufgebaut und erprobt werden soll.

### 2.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK, IDENTIFIKATION VON SENSORTYPEN/MESSSYSTEMEN UND DETAILLIERUNG DER PROJEKTPLANUNG (AP 1)

Der für das Vorhaben relevante Stand von Wissenschaft und Technik und die identifizierte, relevante Messtechnik wird im AP 1 in einem fachlichen Bericht dargelegt. Der Bericht enthält eine detaillierte, begründete und bewertbare Darstellung der vom Auftragnehmer zur Bearbeitung der Aufgabenstellung gewählten Vorgehensweise.

### 2.2 AUFBAU, ANPASSUNG UND ERPROBUNG DES MESS- UND KALIBRIERSYSTEMS SOWIE KALIBRATION (AP 2)

In AP 2 soll ein neuartiges Messsystem, das sich zur Erfassung statischer und niederfrequenter elektrischer und ggf. Magnetfelder im Einwirkungsbereich von HGÜ und HGÜ-HWÜ<sup>1)</sup>-Trassen eignet, aufgebaut und charakterisiert werden.

<sup>1)</sup> Hochspannungs-Wechselstromübertragung

### **3. METHODIK**

Die Literaturrecherche in AP 1 wird durch alle Projektpartner vorgenommen. Dabei werden die unterschiedlichen Expertisen, Herangehensweisen und die sich ergänzenden Zugriffsmöglichkeiten zu Literaturdatenbanken von der Donau-Universität Krems (DUK), der TU Wien und Seibersdorf Labor GmbH genutzt, um einen umfassenden Stand der Literatur herauszuarbeiten. Das schlussendliche Konzept für das neue Messsystem wird in AP 1 vorrangig durch die DUK als auch die TU Wien erarbeitet und mit den Projektpartnern diskutiert.

Der Aufbau und die Anpassung des Messsystems in AP 2 erfolgt durch die TU Wien und die DUK. Hierbei wird speziell der mikro-mechanische Sensor durch die TU Wien hergestellt und getestet. Die DUK leitet die Entwicklung des Ausleseverfahrens, die Entwicklung der Elektronik und auch die Zusammenführung der Einzelkomponenten zu einem Gesamtsystem.

### **4. DURCHFÜHRUNG**

#### **4.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK, IDENTIFIKATION VON SENSORTYPEN/MESSSYSTEMEN UND DETAILLIERUNG DER PROJEKTPLANUNG (AP 1)**

Die Durchführung der Literaturrecherche, die Erarbeitung eines passenden Konzeptes sowie die gewünschte Dokumentation erfolgt wie in Unterpunkt Methodik geschrieben.

#### **4.2 AUFBAU, ANPASSUNG UND ERPROBUNG DES MESS- UND KALIBRIERSYSTEMS SOWIE KALIBRATION (AP 2)**

Basierend auf den Resultaten von AP 1 werden die Komponenten des Messsystems entworfen, hergestellt, kombiniert und getestet. Die Hauptgruppen gliedern sich dabei in den Wandler, das Ausleseverfahren, die Elektronik und das Gehäuse sowie ggf. einen Magnetfeldsensor.

### **5. ERGEBNISSE**

#### **5.1 AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK**

Die in AP 1 durchgeführte Literaturrecherche hat Gegebenheiten und die Erfordernisse unter hybriden Hochspannungstrassen erfasst sowie die Vor- und Nachteile bestehender Messtechnik aufgelistet. Diese Themen wurden im Abschlussbericht zu AP 1 umfangreich beschrieben.

#### **5.2 IDENTIFIKATION VON SENSORTYPEN/MESSSYSTEMEN UND DETAILLIERUNG DER PROJEKTPLANUNG**

Es wurde eine detaillierte Zusammenstellung aller relevanten Sensortypen erstellt. Dabei wurden auch Bewertungen nach wesentlichen Parametern wie Auflösungsvermögen oder das Verhalten bei Anlagerung von Ionen durchgeführt. Schlussendlich wurde ein Konzept für ein neuartiges Sensorsystem, basierend auf den vom Auftraggeber vorgegebenen Kriterien, erarbeitet und im Abschlussbericht zu AP 1 dokumentiert. Im Zuge der Erstellung des Konzeptes wurde auch eine Detaillierung der Projektplanung vorgenommen.

### **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Erst wird die Herstellung der Mikrosysteme als auch deren Charakterisierung abgeschlossen. Danach beginnen Tests des optischen Auslesesystems gemeinsam mit einem Mikrosystem. Die Ansteuerungs- und Auswerteelektronik wird parallel kontinuierlich weiterentwickelt und angepasst.

Danach ist der Aufbau und die Anpassung des Gesamtsystems geplant. Die Erprobung und Kalibrierung des Messsystems an typischen Bedingungen im Einwirkungsbereich von HGÜ und HGÜ-HWÜ-Hybridtrassen ist gegen Ende des AP 2 geplant.

<b>Thema</b>			
Untersuchung der Möglichkeiten einer Fortbildung von Multiplikatoren in lokalen Behörden (Gesundheitsämter, Amtsärzte und Immissionsschutzämter) für die Risikokommunikation beim Stromnetzausbau			
<b>Subject</b>			
<i>Analysis of the possibilities of an advanced training for multipliers in local authorities (public health departments, public health officers and immission control offices) for risk communication during the expansion of the electricity grid</i>			
<b>Kennzeichen</b> 3619S92412	<b>Beginn</b> 01.09.2019	<b>Ende</b> 30.09.2021	<b>Fördermittel</b> EUR 105.654,-
<b>Forschungs- / Auftragnehmer</b> adelphi research gemeinnützige GmbH, Berlin			
<b>Projektleitung</b> G. Will	<b>Fachbetreuung BfS</b> M. Kornek / KEMF	<b>verantwortlich für den Text</b> J. Paulus, G. Will, G. Becker	

## 1. ZIELSETZUNG

Übergeordnetes Ziel des Vorhabens ist es, Inhalte und nicht-digitale und digitale Fortbildungsformate für sogenannte „Wissensvermittler\*innen“ zu entwickeln, an die sich besorgte Bürger\*innen zum Thema der potenziellen gesundheitlichen Auswirkungen von elektrischen und magnetischen Feldern (EMF) ausgehend von Stromleitungen wenden könnten.

Vertreter\*innen politischer Institutionen, die in der Öffentlichkeit als Unterstützer des Netzausbaus wahrgenommen werden, eignen sich nicht oder nur bedingt als glaubwürdige Wissensvermittler\*innen zum Themenkomplex EMF. Bei dem konflikträchtigen Thema des Netzausbaus ist es wesentlich, dass die Vermittler\*innen von Fachwissen als unabhängig wahrgenommen werden. Auf Basis der Erkenntnisse des Vorgängerprojekts, Expert\*inneninterviews und der Literaturrecherche wurden Ärzt\*innen und Lehrer\*innen als unabhängige und glaubwürdige gesellschaftliche Gruppen mit unmittelbarem Zugang zu Bürger\*innen identifiziert. Bei Ängsten und Fragen besorgter Bürger\*innen zu potenziellen gesundheitlichen Risiken von EMF sind Ärzt\*innen wichtige und häufig erste Ansprechpartner\*innen. Lehrer\*innen können auf Nachfrage oder aus eigenem Impuls in vom Netzausbau betroffenen Regionen das Thema EMF in den Unterricht integrieren und somit ebenfalls zur Klärung offener Fragen und zum Abbau von Unsicherheiten bei Schüler\*innen und Eltern beitragen. Neben diesen bürgernahen glaubwürdigen potenziellen Wissensvermittler\*innen sind auch Bürgerämter und kommunale Vertreter\*innen häufig erste Adressaten für Anfragen und somit ebenfalls wichtige Multiplikator\*innen und Wissensvermittler\*innen.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das Vorhaben gliedert sich in vier Arbeitspakete (AP), wobei AP 1 und 2 abgeschlossen sind.

Aufgabenstellung von AP 1 war die Identifikation von Kriterien und Rahmenbedingungen sowie von Treibern und Hemmnissen für die Akzeptanz und Nutzung von Fortbildungsangeboten bei den jeweiligen Zielgruppen. In AP 2 galt es für vom Netzausbau betroffene Bundesländer sogenannte Bildungsstrukturanalysen zu erstellen.

AP 3 umfasst die folgenden Aufgaben:

- Berücksichtigung von unterschiedlichen Wissensvermittler\*innengruppen (hier: Lehrkräfte, Ärzt\*innen, Behördenmitarbeiter\*innen)
- Entwicklung von Fortbildungskonzepten „Präsenzveranstaltungen“ (hier: fokussiert auf die Zielgruppe Lehrkräfte)
- Entwicklung von Fortbildungskonzepten „Tools im Internet“ (hier: fokussiert auf die Zielgruppe Lehrkräfte).

### 3. METHODIK

Für AP 3 wurden die folgenden Methoden angewandt:

- Literaturrecherche: Analyse und Auswertung der bestehenden Literatur zu den Bildungs- und Fortbildungsstrukturen in verschiedenen Bundesländern in den Bereichen Gesundheit, Bildung und Verwaltung.
- Desktop-Recherche: Die Literaturrecherche wird durch eine Desktop-Recherche, d. h. durch die Prüfung und Klassifikation der Online-Angebote und Informationen relevanter Institutionen ergänzt.
- Expert\*innen-Interviews: Interviews mit Expert\*innen aus den Bereichen, Gesundheit, Bildung und Verwaltung sowie themenübergreifender Institutionen der Bildung und Politikberatung
- Telefon-Recherche: Anruf und Kurzinterviews mit Wissensvermittler\*innen/Vertreter\*innen relevanter zielgruppenspezifischer Institutionen der Fort- und Weiterbildung
- Aufbereitung der Schulungsinhalte für die Zielgruppen Ärzt\*innen und Lehrkräfte in Form von Foliensätzen
- eLearning-Angebot: Konzeption und Umsetzung eines Kurses für die Zielgruppe Lehrkräfte auf der Plattform Moodle, sukzessives Einpflegen der Module sowie schrittweise Optimierung der Nutzerführung.

### 4. DURCHFÜHRUNG

In einem ersten Schritt wurde eine umfangreiche Literaturanalyse und Desktoprecherche zur Identifikation des aktuellen Standes der Wissenschaft durchgeführt. Ziel der Arbeiten war es, ein inhaltliches Gerüst für die Konzeption der Weiterbildungsangebote für die oben genannten Zielgruppen im Kontext von EMF zu schaffen.

Die Inhalte wurden entlang der folgenden Module aufbereitet:

- Kontext der Energiewende in Deutschland
- Umgang mit Emotionen und Ängsten
- physikalische Grundlagen
- mathematische Grundlagen
- Wirkungen von EMF auf Mensch und Umwelt
- rechtliche Grundlagen.

Das in diesem Zuge erarbeitete Dokument (im Word-Format) wurde mit dem Auftraggeber abgestimmt und bildete im Folgenden die fachlich-inhaltliche Grundlage zur Konzeption der zielgruppenspezifischen Weiterbildungs- bzw. Informationsformate.

### 5. ERGEBNISSE

Auf Basis der abgestimmten Inhalte wurden zwei umfangreiche Foliensätze für die Zielgruppen Ärzt\*innen und Lehrkräfte erarbeitet. Sie bildeten die Grundlage für die Ausgestaltung entsprechender Formate, also zum Beispiel des eLearnings oder eines Lehrvideos bzw. einer Präsenzveranstaltung.

Für die Zielgruppe Lehrer\*innen wurden die Inhalte in ein eLearning-Angebot auf der Grundlage des Systems Moodle überführt. Der Kurs erlaubt es Nutzern\*innen, sich die Schulungsinhalte Schritt für Schritt anzueignen. Lernerfolgskontrollen in verschiedenen Formaten ermöglichen den Lernenden kontinuierliches Feedback zum Lernprozess. Eine Sammlung von Unterrichtsmaterialien und weiterführenden Informationen zu jedem Modul rundet das Angebot ab. Darüber hinaus wurde ein Veranstaltungskonzept für eine 90-minütige Informationsveranstaltung inkl. eines Foliensatzes entwickelt. Ziel der Veranstaltung ist es, Lehrkräfte über ausgewählte Sachverhalte im Zusammenhang mit EMF zu

informieren und ihnen die erarbeiteten Unterrichtsmaterialien sowie das Online-Schulungsangebot näher zu bringen.

Die Ansprache der Zielgruppe Ärzt\*innen soll in Form eines 90-minütigen Lehrvideos erfolgen, das den Anforderungen einer CME-Zertifizierung kompatibel aufgebaut und gestaltet ist. Zu diesem Zweck wurde eine erste Fassung für ein Skript erarbeitet, das Inhalte und zentrale Botschaften des Lehrvideos formuliert.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Die angebrochenen Arbeiten aus AP 3 werden sukzessive fortgeführt bzw. abgeschlossen:

- Das eLearning-Angebot für Lehrkräfte wurde in Moodle umgesetzt. Abschließende Arbeiten betreffen die Optimierung der Nutzerführung und der Lernerfolgskontrollen. Auch ein kurzes Video zur Nutzer\*innenführung und zur Orientierung der Teilnehmenden wird noch erarbeitet.
- Für die Zielgruppe Ärzt\*innen wird ein entsprechendes Lehrvideo vorbereitet und umgesetzt.
- Auf Basis der Angebote für die Zielgruppe Ärzt\*innen und Lehrer\*innen wird ein Informationsangebot für Behördenvertreter\*Innen konzipiert und umgesetzt.

Nach Beendigung des AP 3 erfolgt ein Test der Fortbildungsunterlagen mit Zielgruppenvertreter\*innen. Angesichts der anhaltenden Pandemielage werden verschiedene Formate mit potenziellen Teilnehmenden diskutiert.

<b>Thema</b>			
Untersuchung zum Auftreten von Leukämie bei prädisponierten, Magnetfeld-exponierten Tiermodellen			
<b>Subject</b>			
<i>Investigation of leukemia development in predisposed animal models exposed to magnetic fields</i>			
<b>Kennzeichen</b> 3620S92410	<b>Beginn</b> 01.08.2020	<b>Ende</b> 30.07.2023	<b>Fördermittel</b> EUR 1.398.534,-
<b>Forschungs- / Auftragnehmer</b>			
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., München			
<b>Projektleitung</b> Dr. A. Bitsch	<b>Fachbetreuung BfS</b> Dr. J-A Schmidt / WR 5		<b>verantwortlich für den Text</b> Dr. A. Bitsch

## 1. ZIELSETZUNG

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. 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 (co-)karzinogenen Potential von ELF-MF im Mikrottesla-Bereich sind hingegen widersprüchlich bzw. unvollständig und untermauern diese epidemiologischen Beobachtungen nur sehr schwach. 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 transgenen *Sca1-ETV6-RUNX1*-Mäusen stammen von Tieren eines Pilotversuchs zur möglichen kanzerogenen Wirkung von ELF-MF im ARIMMORA-Projekt. In einem Pilotversuch wurden *Sca1-ETV6-RUNX1*-Mäuse in utero und postnatal bis 90 Tage post partum, 7 Tage/Woche und 20 Stunden/Tag diskontinuierlich (10'/5' 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. Auf Grund der kleinen Gruppengröße war das Ergebnis nicht signifikant, spiegelte aber die Leukämie-Inzidenz bei Kindern gut wieder.

Um die Ergebnisse aus dem ARIMMORA-Projekt zu überprüfen, soll in vorliegendem Projekt eine größere Anzahl an *Sca1-ETV6-RUNX1*-Mäusen gegenüber ELF-MF exponiert und auf das Auftreten von Leukämie im späteren Lebensalter untersucht werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 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. Im Einzelnen soll dabei auf bereits durchgeführte Arbeiten des Fraunhofer ITEM, des IBMCC Universität Salamanca sowie der IT'IS Foundation eingegangen werden, wobei die Methodik, Vorgehensweise, Daten und Ergebnisse dieser Arbeiten detailliert betrachtet werden sollen. 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.

## **2.2 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. Die Konzeption und den Aufbau dieser Anlagen übernimmt dabei die IT'IS Foundation mit weitgreifenden Erfahrungen u. a. aus dem ARIMMORA-Projekt.

## **2.3 EXPOSITONSSZENARIO UND VERLAUFSKONTROLLE**

204 Sca1-ETV6-RUNX1-Mäuse je Gruppe sollen, beginnend in utero, gegenüber ELF-MF einer Frequenz von 50 Hz und einer magnetischen Flussdicht von 1,5 mT bzw. 0 mT bis zu einem Alter von 3 Monaten postpartum 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.

# **3. METHODIK**

## **3.1 VERSUCHSDESIGN**

Zwei Gruppen von je 68 trächtigen Muttertieren (ausgehend von 3 transgenen Tieren pro Wurf sind dies später insgesamt 204 Tiere pro Gruppe) werden nach Feststellung der Trächtigkeit in zwei äußerlich nicht unterscheidbaren Anlagen gegenüber 50 Hz ELF-MF mit einer magnetischen Flussdichte von jeweils 0 mT (Scheinexposition) und 1,5 mT bis zum Alter von 3 Monaten post partum (p.p.) exponiert. Die Expositionen sind 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 Tierraum in der SPF<sup>1)</sup>-Haltung. Die Verblindung der Expositionsgruppen wird jederzeit aufrecht erhalten.

## **3.2 VERLAUFSKONTROLLE**

Zur Kontrolle einer möglichen Leukämie-Entwicklung wird den Versuchstieren an acht vordefinierten Zeitpunkten Blut abgenommen (6, 12, 15, 18, 20, 22, 23, 24 Monate p.p.). An jedem der genannten Zeitpunkte wird je Tier 1 Blutaussstrich zur Anfertigung eines Differentialblutbildes (zelluläre Zusammensetzung der Leukozyten: neutrophile, eosinophile und basophile Granulozyten, Lymphozyten, Monozyten) erstellt und eine Immunphänotypisierung mittels Durchflusszytometrie durchgeführt. Parallel wird der Gesundheitszustand der Tiere regelmäßig überwacht; einmal pro Woche wird das Körpergewicht gemessen und klinische Symptome erfasst.

## **3.3 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.

---

<sup>1)</sup> spezifisch pathogenfrei

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 DESIGN UND AUFBAU DER EXPOSITIONSANLAGEN

Die Konzeption und der Aufbau der Expositionsanlagen wird von der IT'IS Foundation durchgeführt. Es werden Anlagen konzipiert, die eine dauerhafte Exposition von jeweils einer Gruppe von 204 frei beweglichen Mäusen gewährleisten. Die Expositionsanlagen ermöglichen eine vollständig verblindete Exposition (diskontinuierlich - 10 min an/5 min aus) der Versuchstiere gegenüber einem homogenen Magnetfeld einer Frequenz von 50 Hz mit Oberschwingungen und einer magnetischen Flussdichte von 1,5 mT bzw. 0 mT (Scheinexposition).

### 4.2 ANTRAG AUF GENEHMIGUNG FÜR DAS TIERVERSUCHSVORHABEN

Es wurde ein Antrag zur Genehmigung eines Tierversuchsvorhabens gem. Tierschutzgesetz finalisiert und dieser wird beim zuständigen Niedersächsischen Landesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit eingereicht.

### 4.3 AUFBAU EINER MÄUSEZUCHT

Eine primäre Zuchtkolonie von transgenen Zuchtmäusen wurde am IBMCC Universität Salamanca expandiert und für den Versand vorbereitet. Bei Erstellung des Gesundheitszertifikates wurden die Mäuse positiv auf den intestinalen Parasiten *Entamoeba muris* getestet, was eine direkte Aufnahme der Mäuse in den SPF-Bereich des ITEMs ausschließt.

Für eine Sanierung des Mausstamms wurden die transgenen Mäuse nun in einem Zwischenschritt an Charles River übergeben. Nach erfolgter Sanierung werden die Mäuse in das ITEM-Tierhaus überführt und die Zuchtkolonie wird dann auf die geforderten Mauszahlen expandiert.

## 5. ERGEBNISSE

Ergebnisse des tierexperimentellen Teils des Vorhabens liegen noch nicht vor.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

- Expansion der Zuchtkolonie
- Implementierung der notwendigen Soft- und Hardware Expositionstechnik am ITEM
- Exposition trächtiger Muttertiere
- Beginn der Leukämie-Verlaufskontrolle.

<b>Thema</b>			
Nutzung von Mobiltelefonen und Verlauf der Gliom-Inzidenz seit 1979			
<b>Subject</b>			
<i>The use of mobile phones and the development of glioma incidence since 1979</i>			
<b>Kennzeichen</b> FM 8867	<b>Beginn</b> 01.08.2018	<b>Ende</b> 31.12.2019	<b>Fördermittel</b> EUR 138.820,-
<b>Forschungs- / Auftragnehmer</b>			
International Agency for Research on Cancer (IARC), Lyon, Frankreich			
<b>Projektleitung</b> Dr. J. Schüz	<b>Fachbetreuung BfS</b> Dr. F. Heinzl, Dr. K. Fuks / WR 3		<b>verantwortlich für den Text</b> Dr. J. Schüz, Dr. I. Deltour

## 1. ZIELSETZUNG

Das Forschungsvorhaben untersucht den Zusammenhang zwischen Mobiltelefonnutzung und Hirntumorrisiko, indem es überprüft, ob angenommene Risiken durch hochfrequente (radiofrequente) elektromagnetische Felder (RF-EMF) bei tatsächlich beobachteten Gliom-Inzidenzen in Nordeuropa plausibel sind. RF-EMF wurden 2011 durch die Internationale Agentur für Krebsforschung (IARC/WHO) als „möglicherweise krebserregend für den Menschen“ eingestuft. Die Studienlage zu diesem Thema ist nach wie vor nicht eindeutig.

Die damalige Einschätzung beruhte insbesondere auf den Ergebnissen epidemiologischer Studien. Dies war zum einen die Interphone-Studie, einer 2010 publizierten internationalen Fallkontrollstudie zum Hirntumorrisiko in Bezug auf die Mobiltelefonnutzung. Die Studie fand ein leicht erhöhtes Hirntumorrisiko in der höchsten Nutzungskategorie (den ca. 5 % häufigsten Mobiltelefon-Nutzern). Des Weiteren wurden in einer Reihe schwedischer Fallkontrollstudien bei ähnlicher Fragestellung stark erhöhte Risikoschätzer gefunden. In zwei weitaus größeren Kohortenstudien, der britischen „UK Million Women Study“ und einer dänischen Studie zu diesem Thema, konnten diese beobachteten Risiken nicht bestätigt werden. Alle gelisteten Studien weisen allerdings methodische Schwächen auf. Seit Projektbeginn im August 2018 wurden keine weiteren in diesem Kontext relevanten epidemiologischen Studien veröffentlicht. Zuletzt fanden zwei jüngst veröffentlichte Langzeitexpositionsstudien an Ratten in der jeweils höchsten Expositions-kategorie vermehrt Schwannome am Herzen. Die Ergebnisse der Studien waren jedoch inkonsistent über unterschiedliche Expositionsbedingungen hinweg.

Ein tatsächlich schädigender Effekt von Mobiltelefonnutzung, der zu einem Anstieg des Hirntumorrisikos führen würde, sollte gleichermaßen auf Grund der häufigen Nutzung dieser Technologie in der Bevölkerung zu einem erkennbaren Anstieg der Inzidenzrate in der Bevölkerung führen. Dieser Hypothese folgend konnte in einer 2012 im Journal „Epidemiology“ publizierten Analyse von Deltour et al. auf Basis der Krebsregisterdaten der nordischen Länder allerdings kein Zusammenhang zwischen Mobiltelefonnutzung und Inzidenzkurven von Hirntumoren für den Zeitraum von 1979 bis 2008 gefunden werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Die weiterhin nicht eindeutige Studienlage und die hohe Public-Health-Relevanz auf Grund der flächendeckenden Verbreitung von Mobiltelefonen machte eine Neuevaluation der Hirntumorinzidenzraten dringend erforderlich. Dem statistischen Ansatz von Deltour et al. folgend sollten die Inzidenzraten in den nordischen Ländern Dänemark, Schweden, Norwegen und Finnland von 1979 bis zum heutigen Zeitpunkt neu evaluiert werden, insbesondere auch im Hinblick auf eventuelle Änderungen in den zeitlichen Trends. Bei dem untersuchten Hirntumortyp handelt es sich um das sogenannte „Gliom“.

In einer Simulationsstudie werden verschiedene in epidemiologischen Studien beobachtete Risikoschätzer auf ihre Plausibilität überprüft. Überprüfung der Plausibilität bedeutet in diesem Zusam-

menhang, dass untersucht wird, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein erhöhtes Gliomrisiko in einer Studie entdeckt werden würde. Angenommene Risiken können beispielsweise so hoch sein, dass sie in einer Studie entdeckt werden müssen. Wenn nun in einer Studie aber kein Hinweis auf ein erhöhtes Risiko entdeckt wurde, dann können solche angenommenen Risiken als unplausibel angesehen werden. Die Einzelzielsetzung ist somit die Überprüfung der Plausibilität von in den epidemiologischen Studien gefundenen Risikoschätzern ohne irgendwelche Annahmen zur Qualität dieser Studien treffen zu müssen, d.h. eine komplett objektive Prüfung.

### 3. METHODIK

#### 3.1 DATENBASIS

Die Gliom-Inzidenzraten für den Zeitraum von 1979 bis zur maximal aktuellen Verfügbarkeit zum Zeitpunkt der Datenbereitstellung der Krebsregister wurden aus den nationalen, bevölkerungsbezogenen Krebsregistern der Länder Dänemark, Finnland, Norwegen und Schweden extrahiert. Relevante demographische Daten zur Bevölkerungsgröße, unterteilt nach Altersgruppen in ihrer zeitlichen Entwicklung seit 1979, wurden von den nationalen Bevölkerungsregistern zur Verfügung gestellt.

Trends in der Bevölkerungsexposition, was Änderungen im typischen Nutzungsverhalten von Mobiltelefonen angeht, wurden aus einer Kombination von Datenquellen geschätzt. Dazu gehört die u. a. in den vier nordischen Ländern durchgeführte Interphone-Fallkontrollstudie, da deren Kontrollpersonen einer bevölkerungsbasierten Schätzung der Exposition am nächsten kommen. Die Expositionsprävalenz, d. h. Anteil von Mobiltelefon-Nutzern in der Bevölkerung, kann hier für jedes Jahr von 1979 bis 2002 (Ende der Interphone-Studie) für alle 30-59-Jährigen (Altersgruppe für Interphone) ermittelt werden; für den späteren Zeitraum musste dies extrapoliert werden. Diese Informationen wurden ergänzt durch die COSMOS-Studie. COSMOS ist eine prospektive Kohortenstudie von Mobiltelefon-Nutzern in Dänemark, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Niederlande und Schweden (mit IARC<sup>1</sup>)-Beteiligung), welche zur Expositionserfassung die offiziellen Nutzungsdaten der Netzbetreiber nutzt und damit ein objektives Maß der tatsächlichen Nutzung liefert. Da COSMOS ein kontrastoptimiertes Design hat (d. h. überproportionales Sampling von Personen mit beispielsweise sehr häufiger Mobiltelefon-Nutzung), können keine Expositionsprävalenzen geschätzt werden, aber die zeitlichen Nutzungstrends innerhalb von Nutzungsgruppen können als repräsentativ angesehen werden und wurden zu einer Adjustierung der extrapolierten Interphone-Daten herangezogen. Hierbei wurden die COSMOS-Daten aus Dänemark benutzt als ein Land mit sehr früher und im internationalen Vergleich häufiger Mobiltelefon-Nutzung als auch Frankreich als Vertreter von Ländern mit eher verzögerter Ausweitung der Nutzung. Beide Datensätze wurden in den Simulationen herangezogen.

#### 3.2 STATISTISCHE AUSWERTUNG

Schritt 1 ist die Berechnung der altersstandardisierten Inzidenzraten für jedes Kalenderjahr inklusive der Analyse der zeitlichen Trends und Ermittlung möglicher Änderungspunkte (d. h. Zeitpunkte, an welchen sich der Trend in den Inzidenzraten in Bezug auf die vorherigen Jahre signifikant verändert), für Gliome insgesamt, unterteilt in hoch-gradige und niedrig-gradige Gliome, sowie den häufigsten Subtyp, das Glioblastom.

Schritt 2 ist die Vorhersage der Anzahl der jährlich erwarteten Gliom-Fälle unter der Annahme unterschiedlicher Risikoszenarien in Simulationsstudien. Die Risikoszenarien beruhen auf der Annahme unterschiedlicher Risikoschätzer (prozentualer Anstieg der Inzidenz) für unterschiedliche Expositionsprävalenzen gemessen an der Anrufzeit. Die beiden verwendeten Prävalenzen für Mobiltelefon-Nutzung ist hierbei die „reguläre“ Nutzung (definiert als mindestens ein Anruf die Woche über mindestens ein halbes Jahr) sowie die „häufige“ Nutzung, die sich je nach Vergleichsmodell an der Definition der jeweiligen Vergleichsstudie orientiert, deren Risikoschätzer auf Plausibilität überprüft werden sollte. Für die Interphone-Studie waren dies z. B. kumuliert mehr als 1 640 Stunden.

Schritt 3 ist, dass die so ermittelten projizierten Gliom-Inzidenztrends mit den wahren in der nationalen Bevölkerung beobachteten Inzidenztrends verglichen werden. Diese Plausibilität wird durch eine

<sup>1</sup>) International Agency for Research on Cancer

Wahrscheinlichkeit angegeben, die besagt, wie wahrscheinlich es unter Annahme des jeweiligen Risikomodells ist, die Nullhypothese ("kein erhöhtes Risiko") zu verwerfen.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Gemäß des für Deltour et al. 2012 verwendeten Studienprotokolls, welches in diesem Projekt aktualisiert werden sollte, wurde für die Simulationsstudien diejenige Bevölkerungsgruppe gewählt, für die – sollte Mobiltelefon-Nutzung tatsächlich ein Risiko für Gliome darstellen – der Effekt am ehesten und am stärksten zum Ausdruck kommt, weil diese Gruppe am frühesten und damals häufigsten Mobiltelefone nutzte. Dies sind Männer im Alter von 40-59 Jahren. Als Ergänzung zum 2012-Protokoll wurde die Altersgruppe um die 60-69-Jährigen erweitert, weil viele aus den 2012 40-59-Jährigen inzwischen dieser Gruppe angehörten.

Nachdem im ersten Arbeitspaket die erforderlichen Genehmigungen für den Datenzugriff eingeholt wurden, wurde im zweiten Arbeitspaket der Datenbestand für die Analysen aufgebaut und aufbereitet. Die Umsetzung der EU-Datenschutz-Grundverordnung war deutlich komplexer als geplant und hat zu erheblichen Verzögerungen im Projekt geführt, da die Krebsregister die Inzidenzdaten nicht im vorher abgesprochenen Format liefern durften. Das Arbeitspaket 2 konnte daher erst ein Jahr später als geplant abgeschlossen werden. Mit den Daten aus dem Vorgängerprojekt lagen damit Inzidenzdaten für den Zeitraum 1979-2016 vor. Die Simulationsstudien wurden Ende Oktober 2020 abgeschlossen. Seitdem wurde an der Ergebniszusammenfassung gearbeitet.

## 5. ERGEBNISSE

Alle Analysen sind abgeschlossen. Die Ergebnisse umfassen:

- zeitlicher Verlauf der Gliom-Inzidenz für Männer und Frauen in Altersgruppen zwischen 20 und 84 Jahren für alle vier nordischen Länder
- zeitlicher Verlauf der Prävalenz der „häufigen“ Mobiltelefon-Nutzer unter 40-69-jährigen Männern in verschiedenen Szenarien
- Ergebnisse der Simulationsstudien zu fünf Szenarien „regulärer“ Mobiltelefon-Nutzer (mit 0, 5, 10, 15, 20 Jahren Latenzzeit) sowie sechs Szenarien „häufiger“ Mobiltelefon-Nutzer auf Basis der in den Vergleichsstudien beobachteten Risikoschätzer sowie ergänzend hypothetischer Risikoschätzer.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden in einem Ergebnisbericht ausführlich beschrieben und diskutiert.



**4. 2020 begonnene Forschungsvorhaben, zu denen noch keine Ergebnisse vorliegen**

**4. *Research projects initiated in 2020 of which results are not available yet***

## THEMENBEREICH 01 / NATÜRLICHE STRAHLENEXPOSITION

### Thema

Ermittlung von charakteristischen Expositionsbedingungen bei Radon an Arbeitsplätzen in Innenräumen

### Subject

*Determination of characteristic conditions of exposures to radon at indoor workplaces*

**Kennzeichen**  
3620S12380

**Beginn**  
15.12.2020

**Ende**  
31.12.2022

**Fördermittel**  
EUR 295.823,-

### Forschungs- / Auftragnehmer

IAF-Radioökologie GmbH, Radeberg

### Projektleitung

Dr. H. Schulz, Dr. C. Kunze

### Fachbetreuung BfS

T. Beck / UR 1

### verantwortlich für den Text

T. Beck

## ZIELSETZUNG / KURZBESCHREIBUNG

Das Forschungsvorhaben verfolgt das Ziel, die Datenbasis über die Expositionsbedingungen bei Radon an Arbeitsplätzen in Innenräumen in Deutschland zu verbessern und die in den biokinetisch-dosimetrischen Modellen zugrunde gelegten Annahmen für die ausgewählten Arbeitsplätze zu verifizieren.

Der Forschungsnehmer wählt dazu in 5 verschiedenen Arbeitsfeldern jeweils 3 typische Arbeitsplätze aus. An den Arbeitsplätzen sind folgende Messungen durchzuführen:

- die zeitliche Variation der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Luft
- die zeitliche Variation der Aktivitätskonzentrationen der kurzlebigen Radon-Zerfallsprodukte (Po-218, Pb-214, Bi-214/Po-214) in der Luft, die an Aerosolpartikel angelagert und nicht angelagert sind
- die Temperatur, der Luftdruck und die Luftfeuchte am Arbeitsplatz
- die Konzentration und Größenverteilung der Aerosolpartikel am Arbeitsplatz.

Im Ergebnis sind charakteristische Expositionsbedingungen an den Arbeitsplätzen abzuleiten und mit den in der Literatur veröffentlichten Daten zu vergleichen.

## THEMENBEREICH 03 / STRAHLENBIOLOGIE - WIRKUNG VON IONISIERENDER UND NICHTIONISIERENDER STRAHLUNG, STRAHLENEMPFLINDLICHKEIT

<b>Thema</b>			
Validierung genetischer Loci, die das Lungenkrebsrisiko in Abhängigkeit von der Radonexposition beeinflussen - Qualitätssicherung und Auswertung			
<b>Subject</b>			
<i>Validation of genetic loci that modify the risk of lung cancer interacting with radon exposure - quality assurance and evaluation</i>			
<b>Kennzeichen</b> 3620S32271	<b>Beginn</b> 01.10.2020	<b>Ende</b> 28.03.2023	<b>Fördermittel</b> EUR 156.668,-
<b>Forschungs- / Auftragnehmer</b>			
Universitätsmedizin Göttingen, Institut für Genetische Epidemiologie			
<b>Projektleitung</b> Prof. Dr. H. Bickeböller	<b>Fachbetreuung BfS</b> Dr. M. Gomolka / WR 1		<b>verantwortlich für den Text</b> Dr. A. Rosenberger

### ZIELSETZUNG / KURZBESCHREIBUNG

Verschiedene Studien zur Radonexposition in Wohnräumen oder bei Uranbergarbeitern zeigen einen Zusammenhang zwischen Radonexposition und Lungenkrebs. Mehrere Studien, darunter das Vorgängerprojekt 3615S32253 „Genomweite Analyse genetisch bedingter Strahlenempfindlichkeit in Wismut Bergarbeitern: Datenauswertung und Bewertung der Assoziationsanalysen“, haben Hinweise geliefert, dass das strahleninduzierte Lungenkrebsrisiko zusätzlich durch genetische Faktoren modifiziert wird. 34 Gene wurden bisher identifiziert, die einen Einfluss auf das individuelle strahleninduzierte Lungenkrebsrisiko haben könnten. Zielsetzung des Projektes 3620S32271 ist die Validierung der Ergebnisse der Vorgängerprojekte und ggf. der Ergebnisse anderer Studien zu Radon-Gen-Interaktionen in einer unabhängigen Stichprobe. Als Probenmaterial steht DNA aus Lungengewebe von ehemaligen Uranbergarbeitern zur Verfügung, die an Lungenkrebs verstorben sind.

Im Einzelnen sind folgende Arbeitspakete, zum Erreichen des Projektziels zu bearbeiten:

- Konzeption eines Analyseplans unter Berücksichtigung des relevanten Stands von Wissenschaft und Technik. Hierbei sollen insbesondere die Kandidatengene identifiziert, gewichtet und die viel versprechendsten Kandidaten selektioniert werden. Ebenso müssen zusätzliche Kohorten zur Überprüfung der Hypothese identifiziert werden und Modelle zur statistischen Analyse der Daten aufgestellt werden. (AP 1)
- Nach Ausschreibung und Durchführung einer experimentellen Typisierungsstudie, muss die Qualität der SNP-Typisierung fortlaufend überprüft und gesichert werden. (AP 2)
- Statistische Analyse der genomischen Daten mittels der in AP 1 beschriebenen Modelle unter Berücksichtigung von Strahlenexposition, Tumorethnizität und anderer das Lungenkrebsrisiko modifizierenden Faktoren (AP 3).

## THEMENBEREICH 06 / NOTFALLSCHUTZ

### Thema

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

### Subject

*Enhancement of the application range for tools which combine plant and radiological information to assess radioactive releases*

**Kennzeichen**  
3620S62501

**Beginn**  
09.11.2020

**Ende**  
31.03.2023

**Fördermittel**  
EUR 494.520,-

### Forschungs- / Auftragnehmer

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln

**Projektleitung**  
Dr. M. Sogalla

**Fachbetreuung BfS**  
Dr. T. Hamburger / RN 2

**verantwortlich für den Text**  
Dr. M. Sogalla

## ZIELSETZUNG / KURZBESCHREIBUNG

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. Die im Vorläufervorhaben 3616S62550 konzipierten Methoden sollen im Forschungsvorhaben 3620S62501 mit dem Schwerpunkt auf Ereignisse in grenznahen und europäischen ausländischen Anlagen sowie auf das gesamte Spektrum potenzieller radiologischer Notfallsituationen weiterentwickelt und in einer anwenderfreundlichen Benutzerumgebung zusammengeführt werden.

## THEMENBEREICH 07 / VORHABEN MIT ALLGEMEINER BEDEUTUNG FÜR DEN STRAHLENSCHUTZ

<b>Thema</b>			
Erfassung des Umgangs der deutschen Bevölkerung mit Radon als Grundlage für Risikokommunikation und Stärkung des Schutzverhaltens			
<b>Subject</b>			
<i>Survey of the German population's dealing with radon as a basis for risk communication and strengthening of protective behavior</i>			
<b>Kennzeichen</b>	<b>Beginn</b>	<b>Ende</b>	<b>Fördermittel</b>
3620S72211	01.11.2020	31.01.2022	EUR 129.579,-
<b>Forschungs- / Auftragnehmer</b>			
GIM - Gesellschaft für Innovative Marktforschung GmbH			
<b>Projektleitung</b>	<b>Fachbetreuung BfS</b>	<b>verantwortlich für den Text</b>	
Dr. T. Jerković, A. Wachenfeld-Schell	C. Pözl-Viol / St-RK	Dr. T. Jerković, A. Wachenfeld-Schell	

### ZIELSETZUNG / KURZBESCHREIBUNG

Als übergeordnete **operative Ziele** gelten für die zuständigen Behörden BMU und BfS:

- der Bevölkerung **umfassende Informationen** über die gesundheitlichen Auswirkungen von Radon, der Messung von Radon und zu möglichen baulichen Schutzmaßnahmen vor Radon zur Verfügung zu stellen
- die **Aufmerksamkeit** der Bevölkerung gegenüber Radon zu erhöhen
- die Anzahl der **Radon-Messungen** in der Bevölkerung zu erhöhen
- bei Bedarf **Maßnahmen** zu ergreifen, um die Radonkonzentration in Innenräumen zu reduzieren.

Um diese operativen Ziele zu erreichen bzw. diese auf Basis empirischer Erkenntnisse anzugehen, soll eine mehrphasige sozialwissenschaftliche Studie initiiert werden.

**Forscherrische Ziele** sind:

- In einem **qualitativen Ansatz** sollen die zugrunde liegenden Einstellungen, Handlungsmotivationen und -barrieren beleuchtet werden. Hierzu ist ein **zweistufiger Ansatz aus Sekundäranalyse** (Recherche zu Methodik und Theorien) **und Primärerhebung** (Einzelinterviews und Fokusgruppen) angedacht.
- In einer **quantitativen Erhebung**, die repräsentativ für die deutsche Wohnbevölkerung ab 18 Jahren in Bezug auf demografische und soziostrukturelle Merkmale ist, sollen die Kenntnisse und die Handlungsbereitschaft in der deutschen Bevölkerung erfasst werden und spezifische Fragestellungen zur Gestaltung von Informationen getestet werden.

Zusammengenommen gilt es zu verstehen, welche Art von Information auf welche Denkmuster und Voreinstellungen in der Bevölkerung trifft, welche Handlungsmotivationen und Handlungsbarrieren vorliegen und mit welchen Kommunikationsmitteln bei welchen Zielgruppen ein positiver Effekt auf die eigenmotivierte Handlungsbereitschaft zur Information bewirkt werden kann.

<b>Thema</b>			
Eine vergleichende Evaluation der Online-Krisenkommunikation von Behörden und unabhängigen Expert*innen im Zuge der Covid-19 Pandemie als Grundlage für die Verbesserung der BfS-Krisenkommunikation - Los 1			
<b>Subject</b>			
<i>A comparative evaluation of the online crisis communication of authorities and independent experts in the course of the Covid 19 pandemic as a basis for improving BfS crisis communication - Lot 1</i>			
<b>Kennzeichen</b> 3620S72215	<b>Beginn</b> 01.12.2020	<b>Ende</b> 31.12.2021	<b>Fördermittel</b> EUR 116.799,-
<b>Forschungs- / Auftragnehmer</b> Stiftung Risiko-Dialog, Zürich			
<b>Projektleitung</b> M. Holenstein	<b>Fachbetreuung BfS</b> M. Gruß / St-RK	<b>verantwortlicher für den Text</b> T. Rüthi	

## ZIELSETZUNG / KURZBESCHREIBUNG

Im Kontext der Covid-19-Pandemie zeigen erste Rezeptionsstudien, dass während der Pandemie ein erhöhtes Bedürfnis nach verlässlichen Informationen besteht. Dabei vertrauen die Menschen insbesondere der Wissenschaft und setzen auf etablierte Kanäle, wie nationale Zeitungen und TV-Sender. Die sozialen Medien stellen wichtige intermediäre Quellen dar, die den Bürger\*innen Inhalte unterschiedlicher Absender, einschließlich persönlicher Kontakte, vermitteln. Hierbei ist teilweise eine Art Desintermediation zu beobachten, wo Information an journalistischen Medien vorbei direkt von unabhängigen Experten\*innen bezogen wurden. Das hier beschriebene Forschungsprojekt möchte, basierend auf einem Mehr-Methoden-Ansatz, die Online-Kommunikation im spezifischen Akteursgefüge aus Behörden und unabhängigen Expert\*innen untersuchen und dabei den Vergleich zwischen verschiedenen Rollen berücksichtigen. Dabei sollen die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Welche Merkmale und Unterschiede weist die Krisenkommunikation verschiedener Behörden und Organisation sowie unabhängiger Experten\*innen auf?
- Wie wird ihre Kommunikation auf Seiten der Rezipient\*innen wahrgenommen und interpretiert?
- Was können Behörden und Organisationen von der Online-Krisenkommunikation unabhängiger Experten\*innen lernen?

Durch die Beantwortung dieser Forschungsfragen können Erkenntnisse zu Erfolgsfaktoren der Online-Krisenkommunikation abgeleitet werden, welche wiederum Rückschlüsse und Implikationen für die Online-Krisenkommunikation des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS) erlauben. Diese werden dem BfS in der Form von praxisrelevanten Empfehlungen verfügbar gemacht.

<b>Thema</b>			
Eine vergleichende Evaluation der Online-Krisenkommunikation von Behörden und unabhängigen Expert*innen im Zuge der Covid-19 Pandemie als Grundlage für die Verbesserung der BfS-Krisenkommunikation - Los 2			
<b>Subject</b>			
<i>A comparative evaluation of the online crisis communication of authorities and independent experts in the course of the Covid 19 pandemic as a basis for improving BfS crisis communication - Lot 2</i>			
<b>Kennzeichen</b> 3620S72216	<b>Beginn</b> 01.12.2020	<b>Ende</b> 30.04.2021	<b>Fördermittel</b> EUR 74.970,-
<b>Forschungs- / Auftragnehmer</b>			
Bietergemeinschaft C <sup>3</sup> team GbR und Süddeutsches Institut für empirische Sozialforschung e. V., beide München			
<b>Projektleitung</b> Prof. Dr. J. Roosen	<b>Fachbetreuung BfS</b> M. Gruß / St-RK	<b>verantwortlicher für den Text</b> Dr. L. Drescher, Dr. K. Aue	

## ZIELSETZUNG / KURZBESCHREIBUNG

Die weltweite Verbreitung des Covid-19-Virus hat auch in Deutschland eine Kommunikation von Behörden mit der Bevölkerung notwendig gemacht. Social-Media-Plattformen und besonders Twitter spielen für die Informationssuche der Bevölkerung eine entscheidende Rolle und die Kommunikation wird hier stark von Covid-19-Expert\*innen mitgeführt. Bereits vor der Covid-19-Pandemie sind Twitter-Daten wissenschaftlich zur Analyse der Krisenkommunikation (z. B. Kommunikation während und nach Naturkatastrophen oder Terroranschlägen) herangezogen worden und konnten wertvolle Erkenntnisse zur Ausgestaltung zukünftiger Kommunikation liefern. Das Projekt untersucht daher die Krisenkommunikation auf Twitter zur Covid-19-Pandemie in Deutschland und vergleicht dabei bestehende Unterschiede in der Kommunikation von Behörden auf der einen und Expert\*innen auf der anderen Seite. Methodisch erfolgt die Auswertung über die soziale Netzwerkanalyse und die quantitative Textanalyse. Im ersten Projektabschnitt werden ausgehend von einer umfassenden Literaturrecherche aktuelle Quellen und Methoden zur Krisenkommunikation auf Twitter ausgewertet mit dem Ziel, die Methodik für die Netzwerk- und Textanalyse zu optimieren. Im zweiten Projektabschnitt werden Twitter-Nachrichten und Accounts von 40 ausgewählten Behörden und Expert\*innen analysiert und Unterschiede in der Krisenkommunikation zu Covid-19 herausgearbeitet. Die Netzwerkstrukturen der Expert\*innen und Behörden sowie die inhaltliche Ausgestaltung der Tweets werden für verschiedene Abschnitte der Covid-19-Pandemie in einem Zeitraum vom 01.01.2020 bis 15.01.2021 untersucht und dargestellt. Übergeordnetes Ziel dieses Vorhabens ist es, Hinweise für eine erfolgreiche Krisenkommunikation im Strahlenschutz für den Auftraggeber abzuleiten.

## THEMENBEREICH 08 / NICHTIONISIERENDE STRAHLUNG

### Thema

Beteiligung an einer Folgestudie zur Verifikation oder Falsifikation der Ergebnisse der NTP-Langzeitstudie an Mäusen und Ratten zu Ganzkörperexposition mit Mobilfunkfeldern

### Subject

*Participation in a follow-up study for verification or falsification of the results of the NTP-longterm study concerning whole body exposure of mice and rats in mobile communications radio frequency fields*

**Kennzeichen**  
3620S82474

**Beginn**  
01.12.2020

**Ende**  
30.11.2022

**Fördermittel**  
EUR 296.786,-

### Forschungs- / Auftragnehmer

Seibersdorf Labor GmbH, Seibersdorf, Österreich

**Projektleitung**  
G. Schmid

**Fachbetreuung BfS**  
Dr. J. Kuhne / KEMF

**verantwortlich für den Text**  
G. Schmid

## ZIELSETZUNG / KURZBESCHREIBUNG

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 (Ganzkörperexposition) die Absorptionsverteilung im Körper der Tiere entscheidend von jener im menschlichen Körper abweicht. Während eine Teilkörperexposition nahe des Teilkörper-Expositionsgrenzwertes beim Menschen typischerweise zu keiner relevanten Erhöhung der Körperkerntemperatur führt, liegt bei Exposition von Ratten und Mäusen am Teilkörper-Basisgrenzwert, die Ganzkörperabsorption bereits in einem Bereich, bei dem es zu einer erhöhten thermischen Last in den exponierten Tieren kommt, wodurch die Studienergebnisse möglicherweise verfälscht werden.

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 Exposition nachgebildet wird, ohne jedoch gleichzeitig zu einer relevanten Absorption von HF-EMF in den Zielorganen der Tiere zu führen. Dazu werden, aufbauend auf einer Bestandsaufnahme des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes, mittels messtechnisch validierter Modelle und numerischer Berechnungen mögliche Lösungsansätze für Expositionseinrichtungen, die eine Mitführung derartiger thermischer Kontrollgruppen erlauben, erarbeitet und im Hinblick auf Ihre praktische Einsetzbarkeit bewertet.

<b>Thema</b>			
Mobilfunkkonflikte aus der Vergangenheit als Lehrbeispiel für Kommunikationsstrategie 5G?			
<b>Subject</b>			
<i>Media-historical conflicts of mobile communication as a learning exercise of communication about the 5th generation (5G) of mobile networks</i>			
<b>Kennzeichen</b>	<b>Beginn</b>	<b>Ende</b>	<b>Fördermittel</b>
3620S82476	01.12.2020	30.11.2021	EUR 174.554,-
<b>Forschungs- / Auftragnehmer</b>			
Eberhard Karls Universität Tübingen / Universität des Saarlandes, Tübingen			
<b>Projektleitung</b>	<b>Fachbetreuung BfS</b>	<b>verantwortlich für den Text</b>	
Univ.-Prof. Dr. Dr. habil. O. Kühne	M. Kornek / KEMF	M. Kornek / KEMF	

## ZIELSETZUNG / KURZBESCHREIBUNG

Die Einführung des neuen Mobilfunkstandards 5G geht mit konflikthafter Auseinandersetzungen einher, da von einigen besorgten Bürger\*innen Auswirkungen auf Mensch und Natur befürchtet werden. Eine ähnliche Diskussion gegen den Mobilfunk gab es bereits in der Vergangenheit. Die Medien griffen damals und greifen auch heute das Thema Mobilfunk und Gesundheit in ihrer Berichterstattung auf.

Sowohl die Vergangenheit als auch die Gegenwart des Mobilfunks wurde und wird in den Printmedien in unterschiedlichster Weise dargestellt: Zum einen werden die Möglichkeiten mit der neuen Technik gepriesen, zum anderen wird verstärkt über vermeintliche Gesundheitsrisiken und Unsicherheiten berichtet. Ob die Berichterstattung nur gefühlt oder wirklich anders als zu den Anfangszeiten des Mobilfunks ist, untersucht dieses Forschungsvorhaben. Kann aus der Vergangenheit bei der Einführung des Mobilfunks eine kommunikative Vorgehensweise für die jetzige 5G-Situation adaptiert werden?

Ziel dieses Vorhabens ist eine medienresonanzanalytische Aufbereitung historischer wie rezenter Diskurse um den Mobilfunk, die mittels einer soziologischen Theorie eingeordnet wird. Die Bedeutung neuer Kommunikationswege und -mittel (wie zum Beispiel Social Media) im Vergleich zur Einführung des flächendeckenden Mobilfunks in der Vergangenheit ist zu bewerten. Das Vorhaben soll klären, inwiefern die derzeitige Diskussion bei der Einführung von 5G lediglich eine Wiederholung darstellt oder ob sie sich durch neue Argumente, neue Erkenntnisse, andere Akteure und/oder eine veränderte Diskussionskultur gewandelt hat. Die Ergebnisse sollen einen Rückschluss darauf zulassen, ob die derzeitige Risiko- und Wissenschaftskommunikation des BMU/BfS mit den besorgten und an Information interessierten Bürger\*innen verändert werden muss, da sie in den Medien keinen beziehungsweise zu wenig Niederschlag findet.

# Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

## 2. ERGEBNISSE (ABSCHLUSSBERICHTE)

### 2.2 Themenbereich 02

#### Strahlenschutztechnik

##### Studie über die Notwendigkeit, Möglichkeit und Machbarkeit der Ablösung von hochradioaktiven Strahlenquellen durch alternative Technologien in Deutschland / 3618S22363

**Tabelle 1:** Anteil der HRQ in Deutschland (Stand: 26.02.2019)

7

**Tabelle 2:** Anwendungsgebiete und typische Eigenschaften von HRQ

8

**Tabelle 3:** Alternativtechnologien, die Machbarkeit der Technologieumstellung und der dafür geschätzte Zeithorizont

10

### 2.3 Themenbereich 03

#### Strahlenbiologie - Wirkung von ionisierender und nichtionisierender Strahlung, Strahlenempfindlichkeit

##### Strahlenresistenzmechanismen in Tumorstammzellen / 3616S32262

**Abbildung 1:** Beispiel zweier Dosis-Effekt-Kurven der GSZ nach Bestrahlung mit beschleunigten Kohlenstoffionen und Röntgenstrahlen. Es wurden technische 4-fach-Bestimmungen verwendet und mindestens drei unabhängige Experimente durchgeführt.

18

**Abbildung 2:** Links: Beispiel einer M-FISH-Färbung (U87-Zellen). Jedes Chromosomenpaar wird in einer anderen Falschfarbe, basierend auf verschiedenen Fluoreszenzfarbstoff-Kombinationen, dargestellt. Das Beispiel zeigt ein hypo-diploides Karyogramm mit mehreren Chromosomenaberrationen (u. a. 1'-13; 20-1'-14; 6'-7; 6'-12; 12'-6; 16'-1). Rechts: 2-color-FISH (U87-Zellen) nach Bestrahlung, Chromosom #5 rot und Chromosom #8 grün gefärbt. Polyploide Metaphase mit strukturellen Aberrationen in Chromosom #5.

18

### 2.4 Themenbereich 04

#### Medizinische Strahlenexposition / Röntgenverordnung

##### Erhebung von Häufigkeit und Dosis für nuklearmedizinische Untersuchungsverfahren / 3617S42443

**Abbildung 1:** Verteilung der relativen Häufigkeiten, mit der Untersuchungen unterschiedlicher Organsysteme durchgeführt werden  
links: aktuelle Erhebung; rechts: Daten aus der Erhebung 2007-2008

25

**Abbildung 2:** mittlere effektive Dosis durch die Applikation von Radiopharmaka bei der Untersuchung unterschiedlicher Körperbereiche. Den Daten der aktuellen Erhebung wurden Daten der Vorläuferstudie gegenübergestellt.

26

**Abbildung 3:** mittlere in Einrichtungen applizierte Aktivität bei Untersuchungen der Schilddrüse mit Tc-99m Pertechnetat (a), des Skeletts wegen eines benignen Prozesses mit Tc-99m-Phosphaten (b) sowie des Ganzkörpers mit Ga-68-PSMA (c); die rote Linie entspricht dem aktuellen DRW, die grüne dem Mittelwert über die Mittelwerte der Einrichtungen

27

**Abbildung 4:** Verteilung der in Einrichtungen bei CT-Untersuchungen bei PET-CT verwendeten Dosis im Fall einer diagnostischen Untersuchung sowie bei low-dose Untersuchungen zur Schwächungskorrektur und anatomischen Koregistrierung. Als Dosisgröße wurde der Volumen-CT-Dosisindex CTDIvol verwendet.

27

## **Erfassung der Häufigkeit von Strahlentherapien in Deutschland / 3618S42434**

**Tabelle 1:** Anzahl der Strahlentherapien in Deutschland 2015 bis 2017 (nach Gebührenordnungen/Kodiersystemen)

33

**Tabelle 2:** Zusammenfassende Tabelle zu den Projektergebnissen bei AP 2

33

**Tabelle 3:** Anzahl der ambulant und stationär erbrachten Strahlentherapien nach Diagnose-Gruppen 2016 (Tumoren und maligne Erkrankungen)

34

## **2.5 Themenbereich 05**

### **Radioökologie**

#### **Erfassung der aktuellen Kontaminationssituation bei Wildschweinen in Deutschland / 3617S52531**

**Abbildung 1:** Prognose für die Gewichtsverteilung von Wildschweinen für ein Musterrevier

41

**Tabelle 1:** Statistische Daten der Gesamtfrischgewichte von Hirschtrüffeln an je 15 Rasterpunkten pro Untersuchungsgebiet (Boden-Suchvolumen jeweils 2 x 2 x 0,25 m)

41

**Abbildung 2:** Box-Plots der Cs-137-Aktivität von je 15 Hirschtrüffeln aus 3 Untersuchungsgebieten. Probenentnahme April - September 2018. Der Maximalwert für den Standort Dahn ist mit einem roten Stern markiert.

42

**Tabelle 2:** Statistische Daten zur Cs-137-Aktivität von Hirschtrüffeln bezogen auf Frischsubstanz

42

**Tabelle 3:** Statistische Daten der Cs-137-Messdaten von Wildschweinen. Angaben in Bq/kg

43

**Tabelle 4:** Mittelwerte der Cs-137-Aktivität von Wildschweinen aus Zusmarshausen, ausgewertet nach Erlegungszeiten, unter Berücksichtigung der Frucht-Mast-Phase 2018/2019

43

#### **Evaluierung des aktuellen Standes bei der Überwachung der Ableitung von radioaktiven Stoffen mit der Fortluft und dem Abwasser in Medizin und Industrie / 3619S52560**

**Tabelle 1:** Übersicht über Emittenten radioaktiver Stoffe

48

#### **Freigabekonzepte einer neuen Strahlenschutzverordnung nach EURATOM-Grundnormen 2013 in der Anwendung / 4717E03510**

**Abbildung 1:** Darstellung der Geometrie für das Szenario T in MicroShield (links) und Geant 4 (rechts)

54

**Abbildung 2:** Schematischer Aufbau des SPRING-Gittermodells

55

**Abbildung 3:** Horizontale Verteilung der nassen Deposition von Co-60 in Bq/(m<sup>2</sup>) bei einer Emissionsrate von 1 Bq/s

55

#### **Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen**

279

## 2.7 Themenbereich 07

### Vorhaben mit allgemeiner Bedeutung für den Strahlenschutz

#### Erweiterung und Aktualisierung von ProZES (Programm zur Berechnung der Zusammenhangswahrscheinlichkeit zwischen einer Erkrankung und einer Strahlenexposition) / 3618S72230

- Tabelle 1:** In ProZES implementierte Risikomodelle 97
- Abbildung 1:** Oberfläche von ProZES mit Ausgabe in grafischer Form. 98
- Abbildung 2:** Oberfläche von ProZES mit Ausgabe in Berichtsform 98

#### Machbarkeitsstudie zur mikroskaligen Modellierung von UV-Belastungen in urbanen Umgebungen für verschiedene Bevölkerungsgruppen zur Hautkrebsprävention / 3618S72490

- Abbildung 1:** Beispiele von Himmelsprofilen, die mit Fischaugen-Kamerasystemen und mit morphologischen 3D-Daten mit Bäumen und Gebäuden vom SkyHelios-Modell im Produktionsmodus erzeugt wurden. Die Farben und die Opazität entsprechen unterschiedlichen kurzwelligen Albedo, langwelligen Emissionsgraden und Direktstrahlungsfaktor der Oberflächen. 102
- Abbildung 2:** Erythemwirksame diffuse Strahldichte (in  $\text{mW}/\text{m}^2\text{sr}$ ) mit städtischen atmosphärischen Bedingungen bei wolkenlosem Himmel (links) und unter dem Schatten eines künstlichen Gebäudes (rechts). Die Werte der globalen Bestrahlungsstärke betragen  $89,12 \text{ mW}/\text{m}^2$  bzw.  $49,39 \text{ mW}/\text{m}^2$ . 103
- Abbildung 3:** Variabilität der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke für abgeschattete Bedingungen mit der Höhe und für verschiedene Aerosoleigenschaften (links) sowie Ozonsäulendichten (rechts). 104
- Abbildung 4:** Erythemwirksame diffuse Strahldichte (in  $\text{mW}/\text{m}^2\text{sr}$ ) mit städtischen atmosphärischen Bedingungen für zwei Konfigurationen von künstlichen Gebäuden. Die linke Modellierung wurde für die tägliche Variation und die rechte Modellierung für die Reflexionsanalyse verwendet. 104
- Abbildung 5:** Tagesvariabilität der erythemgewichteten Globalbestrahlungsstärke bei bewölktem und wolkenlosem Himmel unter unverschatteten Bedingungen (kein Gebäude) und teilverschatteten Bedingungen. Die Modellierung wurde mit dem DISORT RTE, städtischen Aerosolbedingungen, Ozonwerten von 300 DU (Dobson-Einheit) und einer Albedo von 5 % durchgeführt. 104

#### Möglichkeiten des Zuschnitts von Risikoinformationen im Strahlenschutz auf unterschiedliche Zielgruppen im Internet / 3619S72402

- Tabelle 1:** Experimentdesign 108
- Abbildung 1:** Untersuchungsdesign 109

### **3. STATUSBERICHTE**

#### **3.3 Themenbereich 03**

##### **Strahlenbiologie - Wirkung von ionisierender und nichtionisierender Strahlung, Strahlenempfindlichkeit**

###### **Einfluss von Niedrigdosisstrahlung auf die Leukämieentwicklung bei genetischer Prädisposition in einem Mausmodell / 3618S32274**

**Abbildung 1:** B-ALL-spezifische Überlebenskurven der Sca1-ETV6-RUNX1-Mäuse, die im Alter von einem Monat mit einer einzelnen Dosis Gammastrahlung bestrahlt wurden (0 Gy: Sham Kontrollgruppe, bzw. 0,05-2 Gy). In den Gruppen 0 Gy, 0,5 Gy und 2 Gy befinden sich noch Tiere in der Nachverfolgung (vgl. Tabelle 1). Log-rank (Mantel-Cox) test p-value=0,0568.

147

**Tabelle 1:** Mauskohorten

147

###### **Bestimmung der Frequenz präleukämischer Translokationen in Nabelschnurblut / 3618S32275**

**Tabelle 1:** ETV6-RUNX1-positiv getestete Nabelschnurproben.

150

#### **3.6 Themenbereich 06**

##### **Notfallschutz**

###### **Entwicklung qualitativer und quantitativer Methoden der Analyse von Gamma-Spektren unter Anwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz / 3620S62594**

**Abbildung 1:** Lösungsansatz für AP 3 und Überführung in AP 2

197

**Abbildung 2:** Schematische Darstellung der Vorgehensweise beim Training und der Anwendung der Methode der Niederschlagserkennung

198

**Abbildung 3:** Messwerte und Vorhersagen basierend auf der LSTM-Methode

198

#### **3.7 Themenbereich 07**

##### **Vorhaben mit allgemeiner Bedeutung für den Strahlenschutz**

###### **Untersuchungen zur tätigkeitsbezogenen Strahlenexposition bei der mobilen Radiographie / 3617S72382**

**Tabelle 1:** Gesamtüberblick der gesammelten Dosisdaten

206

**Tabelle 2:** Angaben zu Einsätzen mit erhöhten Dosiswerten (mehr als 40 µSv pro Einsatz)

206

## Abkürzungen

### Abbreviations

ATG	Atomgesetz
cDNA/cRNA	complementäre DNA/RNA
CT	Computertomographie
DAB	digital audio broadcasting
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V./ the German institute for standardisation
DNA	Desoxyribonukleinsäure (desoxyribosenucleic acid)
DTX	discontinuous transmission
DVB-T	digital video broadcast-terrestrial
EMF	elektromagnetische Felder
EPR	Lumineszenz- und paramagnetische Elektronenresonanz
FDTD	finite - difference time - domain
GSM	global system mobile communication
HF/RF	high/radio frequency
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
LET	linearer Energietransfer
MMS	multimedia messaging service
mRNA	messenger RNA
MRT/MRI	Magnetresonanztomographie / Magnet Resonance Imaging
ODL	Ortsdosisleistung
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PCR	polymerase chain reaktion
PET-CT	Positronen-Emissions-Tomographie (PET) - Computertomographie
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
RBW	resolution band width
RNA	Ribonukleinsäure (ribonucleic acid)
ROC	receiver operating characteristic
RöV	Röntgenverordnung
RT-PCR	reverse transkription-polymerase chain reaction
SAR	spezifische Absorptionsrate
siRNA	small interfering RNA
SSK	Strahlenschutzkommission
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
TETRA	terrestrial trunked radio
UMTS	universal mobile telecommunication system
UVI	UV-Index
WAP	wireless application protocol

ATG	Atomgesetz
cDNA/cRNA	complementäre DNA/RNA
WHO	World Health Organization
WLAN	wireless local area network
WTD	Wehrtechnische Dienststelle

## **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) 18333-2119