

# Strahlenschutzforschung

Programmreport 2015

**Bericht über das vom Bundesamt für Strahlenschutz fachlich begleitete und administrativ umgesetzte Forschungsprogramm Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit**

**Schriften**



**Redaktion:**

Annemarie Schmitt-Hannig

Dr. Angelika Löbke-Reinl

Dr. Josef Peter

Ralph Gödde

Claudia Hachenberger

Angela Trugenberger-Schnabel

**BfS-SCHR-59/16**

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

**urn:nbn:de:0221-2016080114068**

Zur Beachtung:

BfS-Berichte und BfS-Schriften können von den Internetseiten des Bundesamtes für Strahlenschutz unter <http://www.bfs.de> kostenlos als Volltexte heruntergeladen werden.

**Salzgitter, August 2016**

# **Strahlenschutzforschung**

**Programmreport 2015**

**Bericht über das vom Bundesamt für Strahlenschutz fachlich  
begleitete und administrativ umgesetzte Forschungsprogramm  
Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz,  
Bau und Reaktorsicherheit**

**Schriften**



# INHALT

|                       |      |
|-----------------------|------|
| ZUSAMMENFASSUNG ..... | VIII |
|-----------------------|------|

|                    |      |
|--------------------|------|
| VORBEMERKUNG ..... | VIII |
|--------------------|------|

|                  |      |
|------------------|------|
| EINFÜHRUNG ..... | VIII |
|------------------|------|

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| ZUSAMMENFASSUNG DER FORSCHUNGSERGEBNISSE 2015 ..... | IX |
|-----------------------------------------------------|----|

## ERGEBNISSE

### RESULTS

#### THEMENBEREICH 01

#### NATÜRLICHE STRAHLENEXPOSITION

##### SUBJECT AREA 01

##### NATURAL RADIATION EXPOSURE

|                                                                                                  |   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Genexpressionsänderungen als Folge chronischer Strahlenexposition bei Wismut-Bergarbeitern ..... | 2 |
| <i>Expression changes as cause of chronical radiation exposition to uranium (Wismut)-Miners</i>  |   |
| 3611S10010                                                                                       |   |

|                                                                                                                                                             |   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Untersuchung des Einflusses baulicher Energiesparmaßnahmen (energetische Sanierung, Passivbauweise) auf die Radonkonzentration in Innenräumen (Los 2) ..... | 6 |
| <i>Influence of structural energy-conservation methods on indoor radon concentration - part 2</i>                                                           |   |
| 3611S10016                                                                                                                                                  |   |

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Genomweite Analyse genetisch bedingter Strahlenempfindlichkeit in Wismut Bergarbeitern ..... | 13 |
| <i>Genome wide analysis of radiosensitivity in former uranium miners of SDAG Wismut</i>      |    |
| 3614S10013                                                                                   |    |

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Genomweite Analyse genetisch bedingter Strahlenempfindlichkeit in Wismut-Bergarbeitern - Qualitätssicherung der Typisierungsergebnisse ..... | 18 |
| <i>Genome wide analysis of radiosensitivity in former uranium miners of SDAG Wismut - quality management and control of the genotyping</i>   |    |
| 3614S10014                                                                                                                                   |    |

#### THEMENBEREICH 02

#### STRAHLENSCHUTZTECHNIK

##### SUBJECT AREA 02

##### RADIATION PROTECTION TECHNIQUES

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Evaluierung neuer CT-Techniken und Bestimmung der mit ihnen erzielten Strahlenreduktion bei verschiedenen CT-Betreibern in Deutschland ..... | 24 |
| <i>Evaluation of dose reduction and image quality achieved during CT examinations in Germany using modern CT techniques</i>                  |    |
| 3613S20025                                                                                                                                   |    |

|                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Untersuchung der Messmethoden und messtechnischen Eigenschaften von Messgeräten für Radon-220 (Thoron) und ihrer Eignung für den Einsatz in nationalen Erhebungsprogrammen ..... | 31 |
| <i>Investigation of measurement methods and metrological characteristics of instruments for radon-220 (thoron) and their suitability for use in national survey programs</i>     |    |
| 3614S20026                                                                                                                                                                       |    |

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

**SUBJECT AREA 03**

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

Entwicklung kardiovaskulärer Erkrankungen nach Strahlenexposition mit niedrigen Dosen ..... 36  
*Development of cardiovascular diseases after low dose radiation exposure*  
 3611S30022

**THEMENBEREICH 04**

**MEDIZINISCHE STRAHLENEXPOSITION / RÖNTGENVERORDNUNG**

**SUBJECT AREA 04**

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

Analyse des Risikos für ischämische Herzerkrankungen in der kanadischen Fluoroskopie-Kohorte mit verschiedenen Dosis-Wirkungsmodellen ..... 44  
*Analysis of the risk for ischemic heart diseases in the Canadian Fluoroscopy Cohort with different dose-response models*  
 3615S42221

**THEMENBEREICH 06**

**NOTFALLSCHUTZ**

**SUBJECT AREA 06**

**EMERGENCY MANAGEMENT**

Bewertung und Prognose der Weiterentwicklung eines radiologisch relevanten Ereignisses in einer kerntechnischen Anlage mit Hilfe der Abschätzung von Quelltermen auf Grundlage von Messdaten in der Umgebung ..... 52  
*Assessment and forecast of the development of a radiological incident in a nuclear facility using the estimation of source terms based on measured data in the vicinity*  
 33612S60026

**THEMENBEREICH 07**

**VORHABEN MIT ALLGEMEINER BEDEUTUNG FÜR DEN STRAHLENSCHUTZ**

**SUBJECT AREA 07**

**PROJECTS OF GENERAL IMPORTANCE TO RADIATION PROTECTION**

Quantitative Abschätzung des Strahlenrisikos unter Beachtung individueller Expositionsszenarien, Teil 2 ..... 60  
*Quantitative radiation risk assessment under consideration of individual exposure scenarios, part 2*  
 3612S70030

Weiterentwicklung der Internet-Informationsplattform "EMF Portal" und Ausbau zum WHO-Kollaborationszentrum ..... 66  
*Advancement of the internet information platform "EMF Portal" and development into a WHO-Collaboration Centre*  
 3612S70033

## **THEMENBEREICH 08 NICHTIONISIERENDE STRAHLUNG**

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

Analyse des öffentlichen Diskurses zu gesundheitlichen Auswirkungen von Hochspannungsleitungen - Handlungsempfehlungen für die strahlenschutzbezogene Kommunikation beim Stromnetzausbau ..... **74**  
*Analysis of public discourse on health effects of high voltage power lines - recommendations for radiation protection-related communication in current grid expansion*  
3614S80008

Internationaler Vergleich der rechtlichen Regelungen im nichtionisierenden Bereich ..... **81**  
*International comparison of the statutory regulations governing non-ionising radiation*  
3614S80010

## **STATUSBERICHTE STATUS REPORTS**

### **THEMENBEREICH 01 NATÜRLICHE STRAHLENEXPOSITION**

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

Methodische Untersuchungen zur Qualifizierung der VOC-Kammern zur Bestimmung der Radon-exhalationsrate von Bauprodukten, Los 1 ..... **90**  
*Systematic investigations on the use of VOC chambers for the determination of the radon exhalation rate of building products, lot 1*  
3613S10021

4. Mortalitäts-Follow-Up der Kohorte von ca. 64 000 ehemaligen Wismutbeschäftigten zum Stichtag 31.12.2013 ..... **93**  
*Fourth follow-up of the mortality of the cohort of approximately 64 000 former Wismut employees at the appointed date 31/12/2013*  
3613S10022

Erfassung der biokinetischen und dosimetrischen Unsicherheiten bei der Dosisermittlung nach Inkorporation von Uran und Radon-Folgeprodukten und deren Anwendung bei Bergbau-Arbeitern und Uran-Aufbereitern der WISMUT-Kohorte ..... **95**  
*Evaluation of the biokinetic and dosimetric uncertainties on the dose assessment following intake of uranium and radon progeny, and their application to miners and millers of the WISMUT-cohort*  
3615S12230

Ermittlung von potenziellen Strahlenexpositionen durch Ableitungen aus NORM-relevanten Industriezweigen ..... **98**  
*Determination of potential exposure to radiation due to discharges from NORM relevant industrial sectors*  
3615S12232

Erstellung einer Bioprobendatenbank der an Lungenkrebs verstorbenen Wismutarbeiter aus dem Wismut Pathologiearchiv ..... **101**  
*Establishment of a biobank based on the Wismut pathology archive of former Wismut workers who died of lung cancer*  
3614S10015

**THEMENBEREICH 02**  
**STRAHLENSCHUTZTECHNIK**

**SUBJECT AREA 02**  
**RADIATION PROTECTION TECHNIQUES**

|                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Entwicklung und Umsetzung von Konzepten zur Charakterisierung klinischer CT-Systeme unter Einbeziehung von Bildqualität und Dosis .....                                                                                               | 106 |
| <i>Development and implementation of concepts for characterisation of clinical CT systems considering image quality and dose</i>                                                                                                      |     |
| 3613S20007                                                                                                                                                                                                                            |     |
| Fortschreibung der Untersuchung und Bewertung der tätigkeitsbezogenen Strahlenexposition in Anlagen nach AtG, standortnahen Zwischenlagern für radioaktive Abfälle und nichtkerntechnischen Einrichtungen nach StrlSchV und RÖV ..... | 109 |
| <i>Update and evaluation of task-related exposure in nuclear facilities and other radiation relevant installations under the aspect of optimisation</i>                                                                               |     |
| 3615S22301                                                                                                                                                                                                                            |     |
| Schaffung einer operationellen Infrastruktur zur Analyse von Spektren aus Halbleiterdetektoren mit mittlerer Energieauflösung .....                                                                                                   | 112 |
| <i>Supply of an operational infrastructure for analysis of spectrum obtained with semiconductor detector of intermediate resolution</i>                                                                                               |     |
| 3615S22530                                                                                                                                                                                                                            |     |

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

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

|                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Validierung eines genomischen PCR-Verfahrens zum Nachweis von chromosomalen Translokationen zur Identifizierung prä-leukämischer Zellen bei Kindern - Pilotstudie .....   | 116 |
| <i>Validation of a genomic PCR approach to detect chromosomal translocations to identify pre-leukaemic cells in children - pilot study</i>                                |     |
| 3614S30034                                                                                                                                                                |     |
| Machbarkeitsstudie zum Aufbau einer Geburtskohorte und zur Überprüfung genetischer Prädisposition bei kindlichen Leukämien - Verbesserung der Teilnahmebereitschaft ..... | 119 |
| <i>Feasibility study for establishing a birth cohort and for testing genetic predisposition to childhood leukaemia</i>                                                    |     |
| 3614S30035                                                                                                                                                                |     |

**THEMENBEREICH 04**  
**MEDIZINISCHE STRAHLENEXPOSITION / RÖNTGENVERORDNUNG**

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

|                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Erfassung der Häufigkeit bildgebender Diagnostik im stationären Bereich .....                                       | 124 |
| <i>Assessment of the frequency of diagnostic imaging in the hospital sector</i>                                     |     |
| 3613S20020                                                                                                          |     |
| Evaluation der Brustkrebsmortalität im deutschen Mammographie-Screening-Programm - Machbarkeitsstudie II .....      | 128 |
| <i>Evaluation of the breast cancer mortality in the German mammography-screening-program - Feasibility study II</i> |     |
| 3614S40002                                                                                                          |     |

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| Verbesserung der Inhalationsdosimetrie am Arbeitsplatz .....  | 131 |
| <i>Improvement of the inhalation dosimetry at work places</i> |     |
| 3614S40015                                                    |     |

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Erstellung und Überarbeitung von technischen Normen für den Strahlenschutz und die Qualitätssicherung in der medizinischen Radiologie ..... | 134 |
| <i>Preparation and revision of technical standards for radiation protection and quality assurance in medical radiology</i>                  |     |
| 3615S42320                                                                                                                                  |     |

## **THEMENBEREICH 05**

### **RADIOÖKOLOGIE**

#### **SUBJECT AREA 05**

##### **RADIOECOLOGY**

|                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Fachliche Unterstützung des BfS bei der Erstellung von Referenzbiosphärenmodellen für den radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis von Endlagern - Quantitative Modellierung des Radionuklidtransports in der Biosphäre .....                                       | 138 |
| <i>Supporting the Federal Office for Radiation Protection in the development of reference biosphere models for the radiological long-term safety assessment of nuclear waste repositories - Quantitative Modelling of the radionuclide transport in the biosphere</i> |     |
| 3614S50010                                                                                                                                                                                                                                                            |     |

|                                                                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Messtechnische und modellbasierte Abschätzung des Eintrags von I-131 in die OSPAR-Regionen auf Grund der nuklearmedizinischen Anwendungen von Radioiod in Deutschland ..... | 141 |
| <i>Measurements and modelling of I-131 fluxes from nuclear medical applications in Germany into the OSPAR region</i>                                                        |     |
| 3614S50015                                                                                                                                                                  |     |

## **THEMENBEREICH 06**

### **NOTFALLSCHUTZ**

#### **SUBJECT AREA 06**

##### **EMERGENCY MANAGEMENT**

|                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ergänzung der Quelltermdatenbank des Entscheidungshilfesystems RODOS für Freisetzen aus Brennelement-Lagerbecken in Kernkraftwerken .....        | 146 |
| <i>Complement of the source term data bank of the decision support system RODOS for releases from spent fuel pools in nuclear power stations</i> |     |
| 3614S60033                                                                                                                                       |     |

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Verifizierung des Dosismoduls DARTM (Dosis-Atmosphärisches-Radionuklid-Transportmodell) ..... | 149 |
| <i>Verification of the dose module DARTM (Dose-Atmospheric-Radionuclide-Transport Model)</i>  |     |
| 3615S62542                                                                                    |     |

## **THEMENBEREICH 07**

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

#### **SUBJECT AREA 07**

##### **PROJECTS OF GENERAL IMPORTANCE TO RADIATION PROTECTION**

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Aktualisierung und Migration der Internet-Plattform STORE von der Uni Cambridge ans BfS .....  | 154 |
| <i>Update and migration of the internet platform STORE from University of Cambridge to BfS</i> |     |
| 3613S70035                                                                                     |     |

|                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Überarbeitung der Strahlenschutzverordnung bez. der Regelungen zur Freigabe künstlicher radioaktiver Stoffe zur Umsetzung der neuen Euratom-Grundnormen in deutsches Recht - Konzept zur Umsetzung .....                                       | 158 |
| <i>Revision of the radiation protection ordinance with respect to clearance of material with artificial contamination for the transposition of the new EURATOM Basic Safety Standards into German legislation - concept for implementation</i> |     |
| 3614R03520                                                                                                                                                                                                                                     |     |
| Überarbeitung von technischen Strahlenschutznormen aus dem Bereich des Normenausschuss Materialprüfung (NMP) .....                                                                                                                             | 162 |
| <i>Revision of technical radiation protection standards in the range of the Materials Testing Standards Committee (NMP)</i>                                                                                                                    |     |
| 3614S70005                                                                                                                                                                                                                                     |     |
| Überarbeitung der Strahlenschutzverordnung bez. der Freigrenzen von radioaktiven Stoffen zur Umsetzung der neuen EURATOM-Grundnormen in deutsches Recht .....                                                                                  | 165 |
| <i>Revision of the radiation protection ordinance with respect to the exemption values for radioactive substances for the transposition of the new EURATOM Basic Safety Standards into German legislation</i>                                  |     |
| 3614S70051                                                                                                                                                                                                                                     |     |
| Untersuchungen zur Strahlenexposition der Augenlinse von beruflich strahlenexponiertem Personal ....                                                                                                                                           | 169 |
| <i>Studies on the radiation exposure of the eye lens of radiation-exposed workers</i>                                                                                                                                                          |     |
| 3613S40011                                                                                                                                                                                                                                     |     |
| Untersuchung und Bewertung des Detrimentbegriffs im Strahlenschutz .....                                                                                                                                                                       | 172 |
| <i>Exploration and assessment of the concept of "detriment" in radiation protection</i>                                                                                                                                                        |     |
| 3615S72264                                                                                                                                                                                                                                     |     |

## **THEMENBEREICH 08**

### **NICHTIONISIERENDE STRAHLUNG**

#### **SUBJECT AREA 08**

#### **NON-IONISING RADIATION**

|                                                                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf die Gehirnaktivität, Schlaf und kognitive Leistungsfähigkeit älterer Frauen .....                                                                            | 176 |
| <i>Effect of high frequency electromagnetic fields on brain activity, sleep and cognitive performance in elderly women</i>                                                                                          |     |
| 3614S30012                                                                                                                                                                                                          |     |
| Kosmetik, Wellness, Gesundheit - optische Strahlenquellen außerhalb der Medizin. Systematische Erfassung und Charakterisierung von Strahlenquellen und ihren Anwendungen im gewerblichen sowie im Heimbereich ..... | 179 |
| <i>Cosmetics, wellness, health - non medical optical radiation sources. Systematic identification and characterisation of optical radiation sources and their applications in the professional and home area</i>    |     |
| 3614S80007                                                                                                                                                                                                          |     |

## **THEMENBEREICH 09**

### **DEUTSCHES MOBILFUNK FORSCHUNGSPROGRAMM**

#### **SUBJECT AREA 09**

#### **GERMAN MOBILE TELECOMMUNICATION RESEARCH PROGRAMME**

|                                                                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Einfluss hochfrequenter Felder des Mobilfunks auf das blutbildende System in vitro: Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse .....                         | 184 |
| <i>Influence of high frequency electromagnetic fields of mobile communications on the hematopoietic system in vitro: Studies of the reproducibility of the results</i> |     |
| FM8863                                                                                                                                                                 |     |

## 2015 BEGONNENE FORSCHUNGSVORHABEN, ZU DENEN NOCH KEINE ERGEBNISSE VORLIEGEN

### *Research projects initiated in 2015 of which results are not available yet*

|                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Identifizierung strahlenspezifischer Biomarker in Brusttumorpatienten - zu Grunde liegende molekulare Mechanismen der strahleninduzierten Mammakarzinogenese .....                   | 188 |
| <i>Identification of radiation-specific biomarkers in breast cancer patients - basic molecular mechanisms of radiation-induced breast carcinogenesis</i>                             |     |
| 3615S32454                                                                                                                                                                           |     |
| Untersuchung des Brustkrebsrisikos nach Radioiodtherapie eines Schilddrüsenkarzinoms - Machbarkeitsstudie .....                                                                      | 189 |
| <i>Assessment of breast cancer risk following radioiodine treatment for thyroid cancer among female, adolescents and young women</i>                                                 |     |
| 3615S42421                                                                                                                                                                           |     |
| Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu radioaktiven Quellen und Gegenständen im Stahlschrott .....                                                                        | 190 |
| <i>Orphan sources and radioactive materials in steel scrap (experimental and theoretical studies)</i>                                                                                |     |
| 3615S52320                                                                                                                                                                           |     |
| Fortschreibung des Szenarienkatalogs für behördliche Notfallübungen und Durchführung von Schulungen für die Notfallorganisationen des BfS und des BMUB .....                         | 191 |
| <i>Extrapolation of the catalogue of exercise scenarios for emergency response planning by authorities and training courses for emergency response organisations of BfS and BMUB</i> |     |
| 3615S62506                                                                                                                                                                           |     |
| Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen .....                                                                                                                                       | 193 |
| Abkürzungen .....                                                                                                                                                                    | 197 |
| Kontaktadressen .....                                                                                                                                                                | 198 |

## ZUSAMMENFASSUNG

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) vergibt im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) 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 die Ergebnisse bzw. Zwischenergebnisse (in Form von Statusberichten) von Strahlenschutzvorhaben des BMUB-Umweltforschungsplans im Jahr 2015.

## Vorbemerkung

Der Schutz von Mensch und Umwelt vor den Gefahren der ionisierenden und nichtionisierenden Strahlung ist eine der wichtigsten Aufgaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit und des Bundesamtes für Strahlenschutz. Diese 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).

## Einführung

Im Folgenden werden die **Themenbereiche** dieses Berichts näher erläutert:

Eine vordringliche Aufgabe besteht darin, die **zivilisatorische und natürliche Strahlenexposition** 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 Dosismessung. Die vielfältigen und komplizierten Messaufgaben der **Strahlenschutztechnik** 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 der Bevölkerung und für den Schutz beruflich strahlenexponierter Personen bei deren Berufsausübung. Diese Grenzwerte basieren auf wissenschaftlichen Erkenntnissen, die im Interesse eines möglichst umfassenden Strahlenschutzes ständig zu aktualisieren und dem neuesten Stand naturwissenschaftlicher und medizinischer Forschung anzupassen sind. Die **biologische Reaktion auf ionisierende und nichtionisierende Strahlung** kann individuell sehr unterschiedlich sein und muss deshalb weiter untersucht und bewertet werden. Insbesondere müssen Verfahren zur Erkennung individueller **Strahlenempfindlichkeit** weiterentwickelt werden.

Die heutige „Philosophie“ des Strahlenschutzes im Bereich der ionisierenden Strahlung wird entscheidend durch die Grundsätze bestimmt, Tätigkeiten und Arbeiten, die zu zivilisatorischen Strahlenexpositionen führen, nur dann zuzulassen, wenn diese gerechtfertigt sind (Rechtfertigungsgebot) und gleichzeitig die Strahlenexposition gerechtfertigter Tätigkeiten und Arbeiten auch unterhalb der Strahlenschutzgrenzwerte soweit zu senken, wie das mit vernünftigem Aufwand möglich ist (Optimierungsgebot). Beide Grundsätze sind in der Strahlenschutzverordnung verankert. Ihre Einhaltung wird im Rahmen der Zweckmäßigkeitssupervision überprüft.

Da die zivilisatorische Strahlenexposition der Bevölkerung zum überwiegenden Teil durch die **medizinische Strahlenexposition** moderner Diagnosemethoden bestimmt wird, ist diese ein weiterer Schwerpunkt der Projekte im BMUB-Umweltforschungsplan 2015. 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 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** 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 Vorsorge-maßnahmen zur Vermeidung von Störfällen und Unfällen eine ständige Aufgabe des BfS. Der **Notfallschutz** 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** 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** geführt.

Neben den bisher vorliegenden fundierten wissenschaftlichen Erkenntnissen über gesundheitliche Beeinträchtigungen gibt es Hinweise auf mögliche weitere, wissenschaftlich noch nicht verstandene biologische Wirkungen bei Feldintensitäten unterhalb der geltenden Grenzwerte. Deshalb wurden im **Deutschen Mobilfunk-Forschungsprogramm (DMF)** 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 zu gleichen Teilen vom Bundesumweltministerium und den Betreibern der Mobilfunknetze in Deutschland finanziert wurden, wurden allein vom BfS vergeben und fachlich betreut, so dass interessensgesteuerte Einflüsse ausgeschlossen waren. Das vom BfS initiierte DMF lief Ende 2008 aus. Unter Vergabe und fachlicher Betreuung durch das BfS werden nun noch einzelne Folgeprojekte im Rahmen des sogenannten DMF II finanziert.

## Zusammenfassung der Forschungsergebnisse 2015

Im Folgenden wird über Ergebnisse 2015 abgeschlossener Forschungsvorhaben berichtet:

### THEMENBEREICH 01 - NATÜRLICHE STRAHLENEXPOSITION

Die Wismut-Kohorte ist weltweit die größte Kohorte beruflich radonbelasteter Bergarbeiter und stellt auf Grund ihrer Biobank und der dazugehörigen Metadaten eine einzigartige Forschungsquelle dar. Um die Langzeitwirkung von Strahlung auf das Expressionsprofil von humanen Genen zu untersuchen, wurden in dem vorliegenden Forschungsvorhaben „**Genexpressionsänderungen als Folge chronischer Strahlenexposition bei Wismut-Bergarbeitern (3611S10010)**“ insgesamt 200 Blutproben von Wismut-Bergarbeitern auf ihre Expressionsprofile hin untersucht. In einem ersten Studienabschnitt wurden nach erfolgreicher RNA-Isolation Mikroarray Expressionsprofile von 70 Probanden mit hoher Strahlungsexposition mit 70 Expressionsprofilen von Probanden mit niedriger Strahlungsexposition verglichen. Es konnte durch aufwendige bioinformatische Verfahren eine Gensignatur von 96 Genen identifiziert werden, die eine Diskriminierung zwischen hoher und niedriger Strahlungsexposition erlaubt. In dem anschließenden Validierungsverfahren wurden 30 hochexponierte und 30 niedrigexponierte Probanden verglichen und die Gensignatur mit einer Selektivität von 96 % und einer Spezifität von 76 % positiv validiert. In einem systembiologischen Ansatz wurde der Einfluss der Erkrankungen Silikose, chronische Bronchitis sowie die Arsenbelastung auf das Expressionsprofil innerhalb des Kollektivs betrachtet. Es wurde festgestellt, dass zumindest die chronische Bronchitis ein ähnliches Expressionsprofil entwickelt und somit einen Einfluss auf das identifizierte Genset nahe legt. In einem weiteren Arbeitspaket wurden erstmals Teile der Wismut-Kohorte (22) mittels RNA-Sequenzierungen untersucht. Diese Analysen eröffneten neben einem erweiterten Blick auf die Transkriptionsprofile auch die Möglichkeit Mutationspektren und Fusionstranskripte auf der Ebene der RNA zu beobachten. Trotz der Tatsache, dass weder bei

den Varianten noch bei den Fusionen statistisch signifikante unterschiedliche Anzahlen zwischen hoch exponierten und niedrig exponierten Probanden gefunden wurden, war es dennoch möglich, interessante Fusionspartner zu definieren, die eine tiefgreifende Analyse weiterer Proben aus der Wismut-Kohorte als sinnvoll erscheinen lassen.

Im Zuge energetischer Sanierungsmaßnahmen kann der Luftaustausch in Gebäuden herabgesetzt werden. Im Rahmen des Projekts **„Untersuchung des Einflusses baulicher Energiesparmaßnahmen auf die Radonkonzentration in Innenräumen (Los 2) (3611S10016)“** wurde untersucht, inwieweit sich dies auf die Radonkonzentration in Wohnhäusern auswirkt. Die Ergebnisse der Radonkonzentration vor und nach der energetischen Sanierung wurden verglichen. Dabei sind die Einflussgrößen analysiert und der Bezug zur energetischen Sanierung hergestellt worden. Durch die dichtere Gebäudehülle strömt frische Luft im Falle von Unterdruck, der im Haus durch den Kamineffekt hervorgerufen wird, nun nicht überwiegend von außen nach, sondern auch durch den Keller aus dem Boden. Auf diesem Weg kann vermehrt radonhaltige Luft in die Wohnräume transportiert werden. Die Einflüsse der Hausbewohner überwiegen den Einfluss der Witterungsparameter, deshalb sollte die Quellstärke zur nutzerunabhängigen Bestimmung der Radonsituation herangezogen werden.

Im Rahmen der Wismut-Kohorte stehen DNA-Proben und Expositionsdaten zur Strahlenbelastung von an Lungenkrebs verstorbenen sowie von gesunden Bergarbeitern zur Verfügung. Fünfhundert dieser Proben wurden im Rahmen des Projektes **„Genomweite Analyse genetisch bedingter Strahlenempfindlichkeit in Wismut Bergarbeitern (3614S10013)“** genomweit genotypisiert. Mit den Genotypen sollten Assoziationen von genetischen Markern (single nucleotide polymorphisms (SNPs)) zur strahlungsabhängigen Steigerung des Lungenkrebsrisikos untersucht werden. Nach erfolgreicher Qualitätskontrolle der Proben folgte die genomweite Genotypisierung der Proben mit Hilfe des Infinium® OncoArray-500K BeadChip der Firma Illumina auf der etablierten Genotypisierungsplattform des Genom-Analyse-Zentrums (GAC, Helmholtz Zentrum München). Zur fortführenden Qualitätskontrolle und späteren Analyse der Daten erfolgte die Weitergabe der Genotypisierungsrohdaten an den dritten Auftragnehmer, Institut für genetische Epidemiologie der Universitätsmedizin Göttingen, wodurch eine sehr gute Qualität der Daten bestätigt wurde (Projekt 3614S10014). Zusammenfassend verlief die Genotypisierung der Proben sehr erfolgreich und es ist von einer sehr guten Verwendbarkeit der erzeugten Daten für alle Nachfolgeprojekte auszugehen.

Das Ziel der Wismut-Studien ist es abzuklären, welche genetischen Dispositionen im Zusammenhang mit Strahlung zum Lungenkrebsrisiko beitragen. Dafür stehen DNA-Proben von gesunden und von ehemaligen, an Lungenkrebs verstorbenen Wismut-Bergarbeitern zur Verfügung. Das Forschungsprojekt **„Genomweite Analyse genetisch bedingter Strahlenempfindlichkeit in Wismut Bergarbeitern - Qualitätssicherung der Typisierungsergebnisse (3614S10014)“** umfasste Aspekte der Planung und der Qualitätssicherung der Genotypisierung. Die statistische Datenauswertung erfolgt erst im Rahmen des Folgeprojekts 3615S32253. Bekannte genetische Risikofaktoren für Lungenkrebs wurden in Übersichten zusammengefasst. Ein Ablaufplan aller notwendigen Schritte (einschließlich der statistischen Auswertung), beginnend bei den Vorbereitungen zur notwendigen Fallzahlberechnung bis zur Genotypisierung wurde erstellt. Eine genomweite Typisierung der verfügbaren Proben mit dem Onco-Array-500K wurde empfohlen. Die Qualität der externen Genotypisierung wurde geprüft. Bereinigte Genotypdaten stehen für eine statistische Analyse zur Verfügung (Folgeprojekt 3615S32253).

## THEMENBEREICH 02 - STRAHLENSCHUTZTECHNIK

In der Querschnittsstudie **„Evaluierung neuer CT-Techniken und Bestimmung der mit ihnen erzielten Strahlenreduktion bei verschiedenen CT-Betreibern in Deutschland (3613S20025)“** zur Evaluierung neuer CT-Techniken und zur Bestimmung der mit ihnen erzielten Strahlendosisreduktion wurde der Einfluss der Konstantstromtechnik, der Röhrenstrommodulation und der iterativen Rekonstruktion auf die Strahlenexposition des Patienten und die objektive und subjektive Bildqualität der CT-Schnittbilder untersucht. Hierzu wurde bei 54 verschiedenen CT-Betreibern in Deutschland eine Analyse von 465 CT-Bildserien aus 280 CT-Untersuchungen des Schädels, des Thorax, des Abdomens und der CT-Angiographie der A. pulmonalis bei erwachsenen Patienten durchgeführt. Wie gezeigt werden konnte, bewirkt die Röhrenstrommodulation gegenüber der Konstantstromtechnik bei Erhaltung einer diagnostisch vernünftigen Bildqualität eine Reduktion der medianen effektiven Dosis des Patienten um etwa 30 % bei der CT-Angiographie und um bis zu etwa 40 % bzw. 45 % bei der CT-Untersuchung des Thorax bzw. Abdomens. In Kombination mit iterativen Bildre-

konstruktionsverfahren ist unter klinischen Bedingungen bei gleichzeitig signifikanter Anhebung der Bildqualität eine Reduktion der medianen effektiven Dosis um etwa 40 % bei der CT-Angiographie und um bis zu 45 % bzw. 75 % bei der CT-Untersuchung des Thorax bzw. des Abdomens möglich. Insbesondere bei den Abdomentechniken gestattet der Einsatz der iterativen Bildrekonstruktion in Kombination mit der Röhrenstrommodulation bei zunehmender Dicke des Patienten eine weitgehende Konstanthaltung des mittleren Röhrenstromes und damit der effektiven Dosis bei weitgehend gleichbleibender objektiver Bildqualität.

Im Forschungsvorhaben „**Untersuchung der Messmethoden und messtechnischen Eigenschaften von Messgeräten für Radon-220 (Thoron) und ihrer Eignung für den Einsatz in nationalen Erhebungsprogrammen (3614S20026)**“ wurden verschiedene Messmethoden und Messsysteme für Thoron und Thoronfolgeprodukte recherchiert und abgestuft nach Eignung für den Einsatz in Erhebungsmessungen beurteilt. Die verfügbaren Messgeräte wurden dabei nach messtechnischen, wirtschaftlichen und praxistauglichen Kriterien bewertet. Für die zurzeit auf dem Markt und in Entwicklung befindlichen Messverfahren lässt sich feststellen, dass zahlreiche Messsysteme zur Ermittlung der Thoron-Gas- oder Folgeproduktkonzentration zur Verfügung stehen. Diese unterscheiden sich dabei zum Teil erheblich in deren Aufwand zur Durchführung von Messungen, Kosten und Aussagekraft der Messwerte. Bedingt durch die physikalischen Eigenschaften von Thoron und ihrer Auswirkungen im Innenraum werden Geräte zur Messung der Folgeprodukte empfohlen. Unter Berücksichtigung der ermittelten Kandidaten (auch der noch nicht kommerziell erhältlichen Prototypen) wird ein zeitnaher Typ- und Praxistest angeraten, um die Eignung der verfügbaren Messgeräte besser bewerten zu können.

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

Im Projekt „**Entwicklung kardiovaskulärer Erkrankungen nach Strahlenexposition mit niedrigen Dosen (3611S30022)**“ wurden epidemiologische Analysen für die Kohorte der Majakarbeiter durchgeführt im Hinblick auf Herz-Kreislauf-Erkrankungen mit speziellem Fokus auf den Niedrigdosisbereich. Zusätzlich wurde das Proteom von Gewebeproben aus den Herzen von verstorbenen Majakarbeitern analysiert. Die epidemiologischen Analysen zeigen, dass die Strahlung das relative Risiko für Inzidenz stärker zu erhöhen scheint als für Mortalität. Dieser Unterschied war für zerebrovaskuläre Erkrankungen statistisch signifikant. Für die Inzidenz von ischämischen Herzerkrankungen (IHD) wurde beobachtet, dass die schädigenden Effekte aus der äußeren Gammaexposition hauptsächlich erst nach mehr als 30 Jahren auftreten. Für die Inzidenz von zerebrovaskulären Erkrankungen wie auch IHD wurden Abweichungen von der linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung gefunden. Die Proteom-Analysen zeigen, dass chronische Strahlenexposition zu einer Beeinträchtigung des kardialen Metabolismus führt und die Pathogenese von Herzerkrankungen in einer dosisabhängigen Weise beschleunigt. Die metabolischen Veränderungen sind assoziiert mit verringerter Aktivität von PPAR-alpha (peroxisome proliferator-activated receptor alpha). Die Anwendung eines neuen mechanistischen, biologisch motivierten Modells für Atherosklerose auf die epidemiologischen Daten führte zu einer erfolgreichen Beschreibung der spontanen Fälle von kardiovaskulären Erkrankungen, konnte aber die Beschreibung des strahleninduzierten Risikos nicht verbessern. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Analysen des vorliegenden Projekts die Existenz von Einflüssen niedrigdosierter ionisierender Strahlung auf das kardiovaskuläre System unterstützen.

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

Im Vorhaben „**Analyse des Risikos für ischämische Herzerkrankungen in der kanadischen Fluoroskopie-Kohorte mit verschiedenen Dosis-Wirkungsmodellen (3615S42221)**“ wurde anhand einer Kohorte von mehr als 60.000 kanadischen Tuberkulose-Patienten, die zum Teil mehrfach mit Röntgenstrahlung durchleuchtet worden waren, das strahlenbedingte Risiko für Mortalität durch ischämische Herzkrankheit (IHD) untersucht. Die in dieser Kohorte erfassten Patienten wurden zur Behandlung von Tuberkulose mit fraktionierter Bestrahlung mit mittleren Dosen von Röntgenstrahlung behandelt. Im Vergleich zur früheren Analyse von Zablotska und Kollegen wurden mehrere zusätzliche nichtlineare Dosis-Wirkungsmodelle getestet. Die Modelle wurden, je nachdem wie gut sie die Daten beschreiben können, mit Gewichten belegt und danach mathematisch überlagert. Die dabei verwendete innovative statistische Methode der Multi-model Inference (MMI) erlaubt es, mehrere Risikomodelle, die die Daten ungefähr gleich gut beschreiben, in die Risikoabschätzungen zu integrieren sowie Modellunsicherheiten in den Fehlerabschätzungen zu berücksichtigen. Es wurden

deutliche Hinweise auf nichtlineare Dosiswirkungsbeziehungen bei IHD-Mortalität gefunden. Für Dosen unterhalb von ungefähr 1 Gray scheint das Risiko für Individuen aus dieser Kohorte tendenziell kleiner zu sein als durch das Linear-No-Threshold-Modell vorhergesagt. Die Ergebnisse aus der vorliegenden Studie sind konsistent mit jenen für die Atombombenüberlebenden und die Majak-Arbeiter.

## THEMENBEREICH 06 - NOTFALLSCHUTZ

Im Rahmen des Vorhabens „**Bewertung und Prognose der Weiterentwicklung eines radiologisch relevanten Ereignisses in einer kerntechnischen Anlage mit Hilfe der Abschätzung von Quelltermen auf Grundlage von Messdaten in der Umgebung (3612S60026)**“ wurde ein Programmpaket implementiert, das bei einem radiologisch relevanten Ereignis in einer kerntechnischen Anlage (insbesondere Kernkraftwerk) aus Eingabedaten zum Ereignis und zur Anlage eine Abschätzung des tatsächlichen Quellterms durchführt, der zur Beurteilung des aktuellen Anlagenzustands verwendet werden soll. Die Eingabedaten umfassen hierbei Messungen der Immissionen in der Umgebung der Anlage (Dosisleistung oder nuklidspezifische Aktivitätskonzentrationen in der Luft oder am Boden), bereits vorliegende, ggf. rudimentäre a priori-Informationen zum Quellterm und die zeitliche Entwicklung der meteorologischen Parameter während des Ereignisses. Tests des Verfahrens zeigten, dass vom Programmpaket Ereignisse mit hohen Emissionen von Ereignissen mit niedrigen bzw. mittleren Emissionen unterschieden werden können. Aus den Eingabedaten können somit abschätzende Anlagenzustandsdiagnosen und Quelltermprognosen durchgeführt werden.

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

Im Forschungsvorhaben „**Quantitative Abschätzung des Strahlenrisikos unter Beachtung individueller Expositionsszenarien, Teil 2 (3612S70030)**“ wurden die Methoden und ein entsprechendes Computerprogramm ProZES entwickelt, um die Wahrscheinlichkeit abzuschätzen, mit der eine vorangegangene Strahlenexposition bei einer bestimmten Person und bei einer gegebenen Expositionssituation zu einer Krebserkrankung geführt hat (Verursachungs- oder Zusammenhangswahrscheinlichkeit Z). ProZES kann die wissenschaftliche Basis bereitstellen, um Entscheidungen zu Kompensationsklagen bei Auftreten von Krebs nach beruflicher Strahlenexposition zu unterstützen. Aufbauend auf der ersten Phase der Entwicklung von ProZES, die sich auf die Entwicklung von Risikomodellen für Krebs von Darm, Magen, Lunge und weiblicher Brust konzentrierte, wurden in dieser zweiten Phase alle anderen Krebslokalitäten, einschließlich Leukämien und Lymphome, berücksichtigt sowie Modelle für Lungenkrebs nach Radonexposition.

Die Modelle zur Abschätzung der Krebsrisiken und der Bestimmung der Zusammenhangswahrscheinlichkeit Z beruhen hauptsächlich auf den Inzidenzdaten für die Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki. Ein Großteil der Modelle wurde für das Projekt neu entwickelt. Spezifische Risikomodelle gibt es für die häufigsten Krebsarten, für seltenere Krebsarten liegen sie als gruppierte Modelle vor. Da verschiedene Modelle eines Dosis-Wirkungs-Zusammenhangs auf Basis der gleichen Daten unterschiedliche Aussagen machen können, wird für manche Krebsarten die Methode der „Multi-Modell-Inferenz“ benutzt um Risikofaktoren abzuleiten, die weniger abhängig von einzelnen Modellen sind und Modellunsicherheiten berücksichtigen. Risikowerte für die japanische Bevölkerung müssen auf die deutsche Bevölkerung übertragen werden. Ein wesentliches Element ist die Abschätzung der Unsicherheiten der Zusammenhangswahrscheinlichkeit. ProZES wurde als benutzerfreundliches Stand-Alone Programm entwickelt, das die individuelle Zusammenhangswahrscheinlichkeit textbasiert oder graphisch darstellen kann.

Im Forschungsvorhaben „**Weiterentwicklung der Internet-Informationsplattform "EMF Portal" und Ausbau zum WHO Kollaborationszentrum (3612S70033)**“ wurde das internationale und frei zugängliche Internet-Informationssystem EMF-Portal ([www.emf-portal.org](http://www.emf-portal.org)) zu den Wirkungen elektromagnetischer Felder auf die Gesundheit und biologische Systeme aktualisiert und ergänzt. So wurden z. B. Messwerte zur Abschätzung der Exposition der Bevölkerung durch nieder- und hochfrequente Felder für 275 Feldquellen recherchiert und online zur Verfügung gestellt. Außerdem wurden sowohl die epidemiologischen (n=449) als auch experimentellen *In-vivo*- und *In-vitro*-Studien (n=1722) im 50/60 Hz-Bereich kategorisiert und in Form von vorgefilterten Suchergebnissen grafisch aufbereitet. Flankierend dazu wurden umfangreiche Hintergrundinformationen zu den Themen Technik, Wirkungen, Grenzwerte und Risikokommunikation zusammengestellt.

Durch die vorgenommenen Arbeiten und Erweiterungen steht auch in Zukunft ein System zur Verfügung, welches durch die transparente Darstellung des wissenschaftlichen Kenntnisstandes dabei hilft, kontroverse Diskussionen in der Öffentlichkeit zu versachlichen und nationalen wie internationalen Expertengremien als Hilfsmittel bei der Grenzwertsetzung dient. Alle Angebote stehen kostenfrei in deutscher und englischer Sprache

zur Verfügung. Im Rahmen eines Kooperationsprojektes mit dem Japan EMF Information Center (JEIC) wird außerdem derzeit an einer vollständigen Übersetzung aller Inhalte auch ins Japanische gearbeitet.

## THEMENBEREICH 08 - NICHTIONISIERENDE STRAHLUNG

Die Energiewende in Deutschland verändert mit dem Ausstieg aus der Kernkraft und dem Ausbau erneuerbarer Energien in weitreichender Weise bisherige Energieversorgungsstrukturen und wirkt sich dabei räumlich stark aus. Einen Bestandteil bilden hierbei Veränderungen im bestehenden Stromnetz. Das Forschungsvorhaben **„Analyse des öffentlichen Diskurses zu gesundheitlichen Auswirkungen von Hochspannungsleitungen - Handlungsempfehlungen für die strahlenschutzbezogene Kommunikation beim Stromnetzausbau (3614S80008)“** setzte an dieser Stelle an und untersuchte aus diskurstheoretischer Perspektive, wie mögliche gesundheitliche Nebenfolgen des Stromnetzausbaus kommunikativ konstruiert werden und welche Deutungsmuster vorherrschend sind. Zusammenfassend bilden die Bedarfsfrage des Stromnetzausbaus, Beteiligung, die eingesetzte Technik sowie Landschaft, Gesundheit, Natur und Wirtschaft zentrale Konfliktfelder, die innerhalb des Stromnetzausbaus ausgehandelt werden und sich in eher kognitive, emotionale sowie ästhetische Bewertungsmuster einreihen. Hierauf aufbauend wurden Handlungsempfehlungen mit einem Fokus auf gesundheitspolitische Aufklärung abgeleitet.

Für das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) wurde im Rahmen des Projektes **„Internationaler Vergleich der rechtlichen Regelungen im nichtionisierenden Bereich (3614S80010)“** eine Analyse und vergleichende Bewertung der internationalen unterschiedlichen Regelungen zum Schutz der Allgemeinbevölkerung vor nichtionisierender Strahlung erstellt. Basierend auf einer umfassenden Datenbasis wurden in zwei Ergebnisberichten für die Bereiche der elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Felder (EMF) sowie der optischen Strahlung (OS) die geltenden nationalen Regelungen und Bestimmungen zum Schutz der Allgemeinbevölkerung vor nichtionisierender Strahlung erfasst und dargestellt. Neben einer ausführlichen länderspezifischen Darstellung der Rechtslage enthalten die Ergebnisberichte zudem vergleichende Zusammenfassungen in rechtlicher (Übersicht über die rechtlichen Umsetzungsmöglichkeiten) sowie in quantitativer (Übersicht der geltenden Werte) Hinsicht.

## Summary

On behalf of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMUB) 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 BMUB's Environmental Research Plan for the year 2015.

## Preface

Protecting man and the environment from the risk of ionising and non-ionising radiation is one of the most important responsibilities assigned to the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMUB) 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).

## Introduction

The **subject areas** of this report will be explained in detail in the following:

One of the primary tasks consists in the assessment and evaluation of **natural and artificial radiation exposures** 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 measurement of **radiation protection technology** 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** can vary considerably depending on the individual, further research and evaluation is required. Therefore, procedures to identify individual **radio-sensitivity** must be further developed.

Today's radiation protection philosophy in the area of ionising radiation is ruled by the principle of not adopting any action or practice leading to artificial exposure unless it is justified (so-called Principle of Justification) and at the same time keeping radiation exposure of justified activities and practices as low as reasonably achievable (Principle of Optimisation). Both principles are stipulated in the Radiation Protection Ordinance. The observance of these principles will be controlled.

Since man-made radiation exposure of the public is mainly made up of **medical radiation exposure** from diagnostic procedures, this latter is another focal point of the BMUB Environmental Research Plan (Umweltforschungsplan) 2015. 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** 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** 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**.

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**.

Apart from the existing well-founded scientific findings on health effects, there are indications for potential additional biological effects at lower field intensities which have not yet been fully understood by scientists. For this reason, the **German Mobile Telecommunication Research Programme (DMF)** continued its research by systematically studying the effects of different uses of non-ionising radiation on man. The main emphasis of these research projects was in the fields of biology, epidemiology, dosimetry and risk communication. It was funded in equal shares by BMUB and the German mobile phone network operators. In order to exclude possible conflicts of interest, the projects were assigned and scientifically overseen solely by the BfS. The Research Programme was initiated by the BfS and ended in 2008. Individual follow-up projects, assigned and scientifically overseen by the BfS, are now being funded within the scope of the so-called DMF II.

## Summary of results from recent research projects

In the following results of research projects concluded in 2015 will be reported:

### SUBJECT AREA 01 - NATURAL RADIATION EXPOSURE

The Wismut cohort is the largest cohort of miners exposed to radon. The available biobank and the related metadata is a unique source of research. To investigate the long-term effects of radiation on transcriptional profiles a total of 200 blood samples of Wismut miners were investigated by using whole genome microarrays within the research project „**Expression changes as cause of chronic radiation exposition to uranium (Wismut)-Miners (3611S10010)**“. In a first stage of study 70 RNA samples of high radiation exposure were compared to subjects of low radiation exposure. By elaborate bioinformatic methods, a gene signature of 96 genes were identified which allowed discrimination between high and low radiation exposure. In the subsequent validation procedures 30 highly exposed and 30 exposed subjects were compared and the gene signature was validated positively with a selectivity of 96 % and a specificity of 76 %. In a systems biology approach, the influence of the diseases silicosis, chronic bronchitis, and arsenic contamination was examined. The results show that at least chronic bronchitis can produce similar expression profile as determined in the gene-signature of 96 transcripts. In a further work package parts of the Wismuth cohort (22) were examined by RNA sequencing. These method provides a better insight in transcriptional profiles and also allows the detection of mutations as well as fusion transcripts at the level of RNA. Neither in the variants nor in the fusions were found statistically significant different numbers between high exposure and low exposure subjects. Nevertheless highly impact candidates of fusion partners could be defined and should be further examined in the complete Wismut cohort.

Due to energy-conservation methods the air exchange in residential houses may be reduced. The aim of the project „**Influence of structural energy-conservation methods on indoor radon concentration - part 2 (3611S10016)**“ was to investigate if this affects the concentration of radon in homes. The radon concentration before and after renovation were compared. The influencing factors were analysed and referred to the ener-

gy-conservation methods. By tighter building envelope the air flows in case of underinflation now mostly not from the outside, but rather through the basement from the ground. In this way radon-containing air can be transported in the interiors. The influences of the residents outweigh the influence of climatic parameters, whereby the radon emission rate should be used for user-independent determination of the radon situation.

The German Miners Cohort Study (Wismut cohort) contains radiation exposure records and DNA samples from patients, who died of lung cancer, as well as healthy miners. Within the scope of the project „**Genome wide analysis of radiosensitivity in former uranium miners of SDAG Wismut (3614S10013)**“ genome-wide genotyping of 500 samples were performed with the aim to identify single nucleotide polymorphisms (SNPs) which contribute to lung cancer risk dependent on radiation exposure. After quality control of all samples (including DNA quantity and quality) genome-wide analysis of DNA samples using Illumina Infinium® OncoArray-500K BeadChip was conducted on the genotyping platform at the genome analysis center (GAC, Helmholtz Zentrum München). For further data analysis, genotyping raw data was handed over to the Department of Genetic Epidemiology, University Medical Center Göttingen, who continued detailed quality control of data (project 3614S10014) and confirmed high quality genotyping data of the Wismut cohort. In summary, within this project genome wide analysis of radiosensitivity in former uranium miners of the Wismut cohort was successfully completed and genetic data will now help to identify new genetic variants which contribute to lung cancer dependent on radiation exposure.

The aim of the Wismut-projects is to clarify which genetic disposition relating to radiation contributes to lung cancer risk. DNA samples are available of former Wismut miners, either healthy or diseased with lung cancer. The research project „**Genome wide analysis of radiosensitivity in former uranium miners of SDAG Wismut - quality management and control of the genotyping (3614S10014)**“ comprised aspects of planning as well as quality assurance and control of the genotyping. Known genetic risk factors for lung cancer were summarised. A work schedule of all the necessary steps (including statistical analysis) was created, starting with power calculations up to the preparations for genotyping. A genome-wide typing of the available samples with the OncoArray 500K was recommended. The quality of the external genotyping was examined. Clean genotype data are now available for a statistical analysis (follow-up project 3615S32253).

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

In the study „**Evaluation of dose reduction and image quality achieved during CT examinations in Germany using modern CT techniques (3613S20025)**“, the impact of CT techniques such as constant tube current technique, automatic exposure control (AEC) and iterative image reconstruction (IR) on radiation dose and objective and subjective image quality was investigated. For this purpose, image data from 54 radiologic institutions in Germany were collected. Overall, 465 CT image series, corresponding to 280 CT examinations of skull, chest, abdomen and of the CT angiography of the pulmonary arteries in adults, were analyzed. It could be shown that, compared to constant current technique, AEC allows a reduction of median effective dose by 30 % in CT angiography and by 40 % and 45 % in CT examinations of the chest and of the abdomen, respectively. Combination of AEC with iterative reconstruction techniques allows a reduction of median effective dose in CT angiography by 40 % and in CT examination of the chest and of the abdomen by 45 % and 75 %, respectively, simultaneously enhancing image quality. Beyond that, iterative reconstruction technique combined with AEC was found to be a powerful mean for keeping the mean tube current constant while maintaining objective image quality also in obese patients.

The aim of the project „**Investigation of measurement methods and metrological characteristics of instruments for radon-220 (thoron) and their suitability for use in national survey programs (3614S20026)**“ was to determine different measurement methods and systems for thoron and its progeny. The instruments and methods were graded according to their suitability for the use in surveys. The available instruments have been rated for their metrological, economic and practical features. Several measurement systems for determining the thoron gas or progeny concentration are available. These differ significantly in their costs for performing and analysing measurements, as well as in the quality of the acquired data. Due to the physical properties of thoron and their consequences indoors, devices are recommended which measure thoron progeny. Considering the determined candidates, it is suggested to perform a type and practical test, to check whether the available instruments are suitable candidates. Also prototypes which are not yet commercially available should be included in the test in order to assess their potential for survey measurements.

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

Within the project „**Development of cardiovascular diseases after low dose radiation exposure (3611S30022)**“, detailed epidemiological analyses of the Mayak Worker Cohort were performed with respect to cardiovascular diseases with special emphasis on the low dose regime. In addition, the proteome of heart tissues of occupational exposed workers was analysed. The epidemiological analyses showed that radiation seemed to stronger increase the relative incidence risk compared to mortality; this difference was significant for cerebrovascular diseases. For incidence of ischemic heart diseases, it was observed that the main detrimental effects of external radiation exposure occur after more than 30 years. For the incidence of cerebrovascular diseases as well as ischemic heart diseases, deviations from a linear dose response were detected. The proteomics analyses suggested that chronic radiation exposure induces impairment of cardiac metabolism and accelerates the pathogenesis of cardiac diseases in a dose-dependent manner. The metabolic disordering is associated with reduced peroxisome proliferator-activated receptor alpha (PPAR-alpha) activity. The application of a novel mechanistic atherosclerosis model to the epidemiological data proved successful for the description of spontaneous cases of cardiovascular diseases but did not improve the description of the radiation induced risk. In summary, the analyses support the existence of radiation effects on the cardiovascular system at low doses.

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

In the project „**Analysis of the risk for ischemic heart diseases in the Canadian Fluoroscopy Cohort with different dose-response models (3615S42221)**“ the radiation related risk for mortality from ischemic heart diseases (IHD) was analysed within a cohort of more than 60,000 Canadian tuberculosis patients. This cohort comprises patients who had been treated for tuberculosis with fractionated moderate doses of X-rays. Compared to the previous analyses conducted by Zablotska and colleagues, a series of additional nonlinear dose-response models was tested. The models were weighted according to their quality of fit and were then mathematically superposed applying the Multi-model Inference (MMI) technique, an innovative statistical method of mathematically combining different models, which all describe the data about equally well, to allow risk estimates to be based on several plausible dose-response models rather than just relying on a single model of choice. Clear evidence for nonlinear dose-response relationships for IHD mortality was found. For doses smaller than approximately 1 Gray the risk for individuals from this cohort tend to be smaller than predicted by the Linear-No-Threshold-model. The results of the study are consistent with those for the atomic bomb survivors and the Mayak workers.

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

In the framework of the project „**Assessment and forecast of the development of a radiological incident in a nuclear facility using the estimation of source terms based on measured data in the vicinity (3612S60026)**“ a software package has been implemented, which estimates the source term of a radiological incident in a nuclear installation (in particular, a nuclear power plant), based on input information about the incident and the installation. The input information comprises measurements of dose rate or nuclide specific activity concentration (in air or on ground) in the surroundings of the installation, already existing a priori information about the source term and temporal development of the meteorological parameters during the course of the incident. Tests of the method showed that incidents with high emissions can be distinguished from incidents with low or medium emissions by the software package. Using the input data, diagnosis of the plant operating conditions and source term prognosis can be carried out.

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

In the project „**Quantitative radiation risk assessment under consideration of individual exposure scenarios, Part 2 (3612S70030)**“ methodology and a corresponding computer Program ProZES were developed to estimate the probability that a previous radiation exposure for a specific person and a given exposure situation has resulted in cancer (probability of causation or relationship between the exposure and the disease, Z). ProZES can provide the scientific basis to support making decisions on compensation claims due to cancer following occupational exposure to radiation. Starting from the results achieved in the first version of ProZES, when the general methodology and risk models for colon, stomach, lung, and female breast were implemented, the second stage of the ProZES development was focused on the development of risk models for all other

cancer locations, including leukaemias and lymphomas as well as risk models for lung cancer after exposure to radon.

The models for estimating the cancer risks and the associated probability  $Z$  are mostly based on the observed cancer incidence in the cohort of the atomic bomb survivors in Hiroshima and Nagasaki. Most of the models are newly developed for the project. For the frequent types of cancer, specific models of radiation risk have been developed, while for the less common diseases the risk models were developed for groups of functionally similar diseases. Since various models built upon the basis of the same data can result in different predictions for „dose-effect“ relationships, the method of „multi model inference“ is used for some types of cancer to derive risk factors, which are less dependent on individual models and take model uncertainties into account. Risk estimates for the Japanese population must be transferred to the German population. An essential element is the estimation of the uncertainty of the associated probability. ProZES was developed as a user-friendly stand-alone program, which can assess and present the individualised estimate of probability of relationship between radiation exposure and cancer graphically or in textual form.

In the research project „**Advancement of the internet information platform "EMF Portal" and development into a WHO Collaboration Centre (3612S70033)**“ the international and freely accessible Internet information system EMF portal ([www.emf-portal.org](http://www.emf-portal.org)) on the effects of electromagnetic fields on health and biological systems has been updated and expanded. Studies containing measurement data for estimating the exposure of the population to low and radio frequency fields were searched from 275 field sources and have been made available online. In addition, both the epidemiological ( $n = 449$ ) as well as experimental *in vivo* and *in vitro* studies ( $n = 1722$ ) in the 50/60 Hz frequency range were categorised and presented graphically in the form of pre-filtered search results. In support of this extensive background information on the subject of technology, effects, limits and risk communication have been gathered.

By the modification and extension of the EMF-Portal, there will also be a system in the future, which will help to objectify controversial discussions in the public through the transparent representation of scientific knowledge and which will serve as a tool for national and international expert committees in setting limit values.

All information is available in English and German and free of charge. Additionally, the whole content is currently translated into Japanese by the Japan EMF Information Center (JEIC).

## SUBJECT AREA 08 - NON-IONISING RADIATION

With its phase-out of nuclear power generation and the expansion of renewable sourced energy, the German energy turnaround has radically changed existing power supply structures, with wide geographical repercussions. Existing networks are to be upgraded and new long-distance north-south power-lines built. This creates resistance and conflict. One aspect of this is changes to the national power grid. The research project „**Analysis of public discourse on the health impacts of high-voltage power lines - recommendations for action in radiation-protection discourse related to the extension of the power grid (3614S80008)**“ started precisely at the point of conflict. It investigated from a discourse theory perspective how power grid extensions and possible health-related consequences are communicatively constructed, and what interpretive patterns dominate the discussion. In sum, the underlying need for grid extension and the technology involved on the one hand, and issues of landscape, natural environment, health, and local economies, as well as participation in the decision-making process on the other, form central fields of conflict to be negotiated at cognitive, emotional and aesthetic levels of discourse. Here building up it derived recommendations for action, with a focus on health politics information and discourse.

On behalf of the Federal Office for Radiation Protection (Bundesamt für Strahlenschutz - BfS), an analysis and a comparative assessment of the different international regulations on the protection of the general population against non-ionising radiation was conducted in the project „**International comparison of the statutory regulations governing non-ionising radiation (3614S80010)**“. Based on a comprehensive set of data, the applicable national regulations and legislation for the protection of the general population against non-ionising radiation were compiled and presented in two final reports focussing on electric, magnetic and electromagnetic fields (EMF) and, respectively, on optical radiation (OR). In addition to a detailed country-specific presentation of the legal situation, the final reports also include comparative summaries from a legal (overview of the legal possibilities of implementation) and a quantitative point of view (overview of the applicable values).

## **ERGEBNISSE**

**der vom BfS begleiteten Strahlenschutz-Forschungsvorhaben des BMUB 2015**

## ***RESULTS***

***of BfS supported BMUB radiation protection research projects in 2015***

### **Themenbereich 01**

**Natürliche Strahlenexposition**

### ***Subject area 01***

***Natural radiation exposure***

|                                                                                                                                                                    |                                                        |                           |                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>Thema</b><br>Genexpressionsänderungen als Folge chronischer Strahlenexposition bei Wismut-Bergarbeitern                                                         |                                                        |                           |                                                    |
| <b>Subject</b><br><i>Expression changes as cause of chronical radiation exposition to uranium (Wismut)-Miners</i>                                                  |                                                        |                           |                                                    |
| <b>Kennzeichen</b><br>3611S10010                                                                                                                                   | <b>Beginn</b><br>01.01.2013                            | <b>Ende</b><br>31.12.2014 | <b>Fördermittel</b><br>EUR 365.575,-               |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Eberhard Karls-Universität Tübingen, Institut für Medizinische Genetik und Angewandte Genomik, Arbeitsgruppe Transcriptomics |                                                        |                           |                                                    |
| <b>Projektleitung</b><br>Dr. M. Bonin                                                                                                                              | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. M. Gomolka / AG-SG 1.2 |                           | <b>verantwortlich für den Text</b><br>Dr. M. Bonin |

## 1. ZIELSETZUNG

Zentrale Fragestellung des Projektes war die Generierung von Genexpressionsprofilen zur Unterscheidung von Probanden mit hoher Strahlenbelastung im Vergleich zu Probanden mit niedriger Strahlenbelastung. Dafür wurden insgesamt 200 Blutproben von Bergarbeitern der Wismut-Kohorte untersucht. Zusätzlich sollten mit Hilfe der Next-Generation-Sequenzierungsmethode von 20 Proben neben der quantitativen Information weitere Unterschiede wie Fusionstranskripte oder Mutationen zwischen Probanden mit hoher bzw. niedriger Strahlenbelastung erhoben werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Die oben geschilderte Zielsetzung teilte sich in zwei große Bereiche, die sich auf Grund ihrer technologischen Herangehensweise unterschieden. Zum einen sollten mit Hilfe der Gesamtgenom-Microarray-Technologie Genexpressionsunterschiede in 200 Wismut-Bergarbeitern untersucht und Gene definiert werden, die zwischen hoher und niedriger Strahlenbelastung diskriminieren (1-3). In einem zweiten Ansatz sollten mit Hilfe der RNA-Sequenzierungsmethode (RNA-Seq) in einer kleineren Stichprobe von 20 Probanden zusätzliche Informationen wie das Auftreten von Fusionstranskripten und Mutationen gewonnen werden (4).

- Ermittlung einer signifikanten Strahlensignatur in insgesamt 140 (70/70) Blutproben der Wismut-Kohorte (1)
- Validierung der signifikanten Strahlensignatur in zusätzlichen 60 (30/30) Blutproben der Wismut-Kohorte (2)
- Biologische Interpretation der differentiell exprimierten Gene durch eine Pathway- und Netzwerkanalyse (3)
- Identifikation von Fusionstranskripten und Mutationen bei Blutproben von Wismut-Bergarbeitern (4).

## 3. METHODIK

Microarray-basierte Expressionsanalysen gehören seit mehr als einem Jahrzehnt zu den zentralen Methoden zur Untersuchung von Genregulationsvorgängen. In dem vorliegenden Projekt werden die aktuellen Versionen von hochparallelen Microarrays verwendet, um eine Gesamtgenom-Analyse von allen 200 Wismut-Bergarbeiterproben durchzuführen. Die eigentliche Herausforderung liegt in der sich anschließenden bioinformatischen Analyse zur Identifikation der Gensignatur, die zwischen hoher und niedriger Strahlenexposition diskriminiert. Um diese Transkripte zu identifizieren, die eine Vorhersage erlauben, ob eine hohe oder niedrige Strahlenexposition vor Jahren aufgetreten ist, werden aus dem Gesamtdatensatz zufällig je 70 Betroffene und Kontrollen ausgewählt. Die Paare werden bezüglich Rauchstatus und Alter angeglichen. In diesem Trainingsset werden dann durch komplexe bioinformatische Analysen Transkripte ermittelt, die eine optimale Trennung der beiden Klassen erlauben. Die im ersten Ansatz gefundenen Gene der Signatur werden dann in einem zweiten Ansatz unabhängig validiert und biologisch mit Hilfe von Netzwerk-Analysen interpretiert.

Um die Unterschiede mit Hilfe der RNA-Sequenzierung zu erweitern, nutzt man die Möglichkeit, mittels der Next-Generation-Sequencing (NGS)-Methode das Gesamt-Transkriptom zu sequenzieren und eine quantitative und qualitative Expressionsanalyse für die Proben durchzuführen. Neben der Expression ist es möglich, Mutationsspektren der Proben zu erheben, die unter Umständen durch die Strahlenexposition erfolgt sind. Weiterhin ermöglicht die Methode die Untersuchung von alternativen Spleißvarianten und den Nachweis von

Fusionstranskripten, die aus einer Translokation von Chromosomen oder einem anderen genomischen Rearrangement entstanden sind.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 ISOLATION, QUALITATIVE ANALYSE DER RNA UND QUANTITATIVE EXPRESSIONSANALYSE MIT HILFE VON MIKROARRAYS

Zunächst wurde aus den vorliegenden PAXgene-Blut-Proben RNA isoliert und qualitativ überprüft. Anschließend erfolgte die Expressionsanalyse mit Hilfe des Human Genome U219 Mikroarrays für 140 Proben (70/70). Nach bioinformatischer Auswertung wurde eine strahlenspezifische Gensignatur ermittelt. Diese wurde im weiteren Verlauf des Projektes in zusätzlichen 60 Proben (30/30) auf die gleiche technologische Weise untersucht und validiert. Zusätzlich wurden Expressionsunterschiede einzelner Gene über RT-PCR verifiziert.

### 4.2 RNA-SEQUENZIERUNG

In enger Abstimmung mit dem BFS erfolgte eine Auswahl von geeigneten 20 Probanden (10 hoch/10 niedrig Exponierte, sowohl bez. der Lungendosis als auch der ermittelten Dosis für das rote Knochenmark), die dann einer RNA-Sequenzierung zugeführt wurden. Die RNA wird dafür zunächst fragmentiert, spezifische Adaptoren anligiert und anschließend auf einem Illumina HiSeq 2500 Gerät sequenziert. Insgesamt wurden mehr als 20 Mio. RNA-Moleküle pro Probe mit 2 x 65 Nukleotiden paired-end sequenziert, den entsprechenden Transkripten zugeordnet und auf diese Weise digital quantifiziert. Darüber hinaus konnten auf der Basis der RNA auch Mutationen und Fusionstranskripte detektiert werden.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 MICROARRAY-BASIERTE EXPRESSIONSANALYSEN

Die Signalintensitäten wurden nach der RMA-Methode (Robust Multi-array Average) normalisiert, anschließend die Kontrollgene aus der Analyse entfernt und diskriminierende Transkripte mit zwei nicht parametrischen Tests (RankProduct-, Weighted Average Difference-Methode) identifiziert. Es wurde eine spezifische Gensignatur von 97 differentiell exprimierten Genen ermittelt. Die Transkripte dieser Signatur wurden nachfolgend mit Hilfe von Pathway- und Netzwerkanalysen (Ingenuity Pathway Analysis Software, IPA, Qiagen) untersucht. Dazu konnten die erhaltenen Expressionsdaten über eine manuell erstellte Genontologie-Datenbank (Ingenuity Knowledgebase) abgeglichen und kontextspezifisch verknüpft werden.

Neben den funktionellen Zuordnungen konnte auf Grund der berechneten Regulationsrichtung aller Moleküle des Datensatzes der Einfluss der 97 differentiell regulierten Gene auf deregulierte, kanonische Signalwege vorhergesagt werden. Die Vorhersage beruht hierbei auf der Anzahl regulierter Moleküle, die über die Ingenuity Wissensdatenbank mit einem kanonischen Signalweg in Verbindung gebracht werden können. Die Signifikanz wurde mit einem Fisher's Exact Test überprüft. Am stärksten verändert waren der eIF2-, eIF4 und mTor-Signalweg.

Die Microarray-Ergebnisse sollten anhand einer Auswahl von geeigneten Transkripten mit Hilfe der SYBR-green-qRT-PCR<sup>1)</sup> Methode auf einem Roche Lightcycler 480 validiert werden. Die Selektion der Transkripte erfolgte nach Stärke der differentiellen Expression, Gesamtsignalintensität (also Expressionsstärke) und Informationsgehalt des Transkriptes. Für alle Proben, die initial für die Hybridisierung der Arrays prozessiert wurden, erfolgte eine cDNA-Synthese mit dem Qiagen QuantiTect Reverse Transcription Kit von Qiagen. Dabei wurden 250 ng totalRNA in cDNA umgeschrieben. Anschließend wurden mit Hilfe des SYBRgreen Assays von Qiagen die Quantität der einzelnen Transkripte bestimmt. Hierbei erfolgte jeweils eine Normalisierung auf zwei zuvor ausgewählte „Housekeeping“ Gene. Die Auswahl der „Housekeeping“ Gene erfolgte mit Hilfe der Software qBase. Dabei wurden an Gemischen der einzelnen Proben Standardverdünnungskurven von mehreren Housekeeping Kandidaten analysiert und dann auf Grund dieser Ergebnisse GAPDH<sup>2)</sup> und PDH<sup>3)</sup> ausgewählt. Jedes Transkript wurde in jeder Probe in Triplikaten gemessen und biostatistisch ausgewertet. Insgesamt bestätigte sich bei 9 der untersuchten 18 Transkripte eine statistisch signifikante differentielle Expres-

<sup>1)</sup> quantitative real time-PCR

<sup>2)</sup> Glycerinaldehyd-3-phosphat-Dehydrogenase

<sup>3)</sup> Pyruvatdehydrogenase

sion (50 %). Diese suboptimale Validierungsquote lässt sich auf die sehr schwachen Expressionsveränderungen sowie die hohe Heterogenität der humanen Expression zurückführen.

Um eine abschließende Einschätzung der Validität der definierten Expressionsunterschiede vorzunehmen, wurde mit der unabhängigen Untersuchung an 30 Probenpaaren (siehe 4.1) begonnen. Hierbei erfolgte analog zum ersten Datensatz eine standardisierte Prozessierung der 60 RNA-Proben mit anschließender Hybridisierung auf den Human Genome U219 Mikroarray der Firma Affymetrix. Hierbei zeigte sich eine vergleichbare gute Qualität der Expressionsergebnisse im Hinblick auf das 3'-5'-Verhältnis sowie den Median der Signalintensitäten eines Microarrays.

Auf Grund von Unregelmäßigkeiten mussten jedoch zwei Probenpaare ausgeschlossen werden, so dass insgesamt die Analyse mit 56 Proben fortgesetzt werden konnten. Um die Güte des zuvor erhobenen Klassifikators, bestehend aus den Expressionswerten der 97 Gene, zu bewerten, wurde im weiteren Verlauf nun bei jedem Probanden in der zweiten Gruppe der reale Bestrahlungszustand (high/low) mit dem vorhergesagten Ergebnis des Tests verglichen. Dabei ergab sich eine Testgüte mit einer Sensitivität von 96,3 % und einer Spezifität von 75,9 %.

Um eine systembiologische Analyse des Gesamtdatensatzes folgen zu lassen, wurden die vorliegenden klinischen Daten mit hinzugenommen. In einem ersten Schritt wurden die Erkrankungen Silikose, chronische Bronchitis sowie die Arsenbelastung innerhalb des Kollektivs betrachtet, um jeweils den Einfluss der Erkrankung auf das Expressionsprofil zu überprüfen. Für jede dieser Stellgrößen wurde auf Basis eines Subkollektivs eine Expressionsanalyse durchgeführt und die Ergebnisse mit dem initialen Ergebnis der Gesamtkohorte verglichen.

Für die Silikose ließ sich feststellen, dass sowohl die Canonical Pathways als auch die Interaktionsnetzwerke keinen hohen Überlappungsgrad mit den korrespondierenden Ergebnissen der Signaturgene des Klassifikators zeigen, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die gefundenen Gene aus diesem Vergleich Silikose-spezifische Transkripte sind und diese nur geringen bis keinen Einfluss auf das Expressionsprofil durch die Strahlungsexposition besitzen.

Für das Krankheitsbild der chronischen Bronchitis wurde festgestellt, dass sowohl die Funktionsanalyse, die Canonical Pathways als auch die Interaktionsnetzwerke einen sehr hohen Überlappungsgrad mit den korrespondierenden Ergebnissen der Signaturgene des Klassifikators zeigen, so dass davon ausgegangen werden muss, dass die gefundenen Signaturgene durchaus stark durch das Auftreten der chronischen Bronchitis beeinflusst werden.

Abschließend kann für das Krankheitsbild der Arsenbelastung festgestellt werden, dass sowohl die Funktionsanalyse, die Canonical Pathways als auch die Interaktionsnetzwerke einen Überlappungsgrad mit den korrespondierenden Ergebnissen der Signaturgene des Klassifikators zeigen. Dieser ist nicht so stark ausgeprägt wie bei der chronischen Bronchitis, aber auf Basis der funktionellen Analyse sichtbar.

## 5.2 RNA-SEQUENZIERUNG

Die RNA-Sequenzierungen wurden beginnend mit der Selektion von 11 geeigneten Probenpaaren (hoch exponiert/niedrig exponiert) aus dem initialen Microarray-Experiment Proben-Kollektiv gestartet. Die RNA lag bereits vor, so dass direkt mit der Prozessierung der Proben begonnen werden konnte. Es konnten auf dem Illumina HiSeq2500 Gerät alle 22 Proben erfolgreich mit mehr als 20 Mio. reads und 2x65 bp paired-end pro Probe sequenziert werden. Sowohl die Qualität als auch die Quantität der Analysen erfüllen die im Antrag definierten Kriterien und wurden daraufhin bioinformatisch analysiert.

Die zunächst durchgeführte Expressionsanalyse ergab eine Liste von 466 differentiell exprimierten Transkripten mit einem /LogFC/ von  $>0,66$  und einem p-value  $<0,05$ . Es fanden sich jedoch nur 3 Gene in dieser Liste mit einer Überlappung zu den Ergebnissen des Microarray Experimentes. Dieses unbefriedigende Ergebnis spiegelt allerdings ein häufig beschriebenes Phänomen beim Vergleich von zwei Technologien, wie hier Microarrays und RNAseq, wider. Als ein Grund anzuführen ist die stark unterschiedliche Zahl von Proben, die in die Analyse mit eingeflossen sind (200 vs. 22). Dies führt zu abweichenden Signifikanz- und Mittelwertberechnungen und somit zu einer erschwerten Vergleichbarkeit der Ergebnislisten. Bei der Analyse von Varianten auf Grund der RNA-Sequenzen ergaben sich bei der Betrachtung der absoluten Anzahl von Varianten in Abhängigkeit der Strahlenexposition keine signifikanten Unterschiede zwischen diesen beiden Gruppen. Die Zahlen bewegen sich darüber hinaus in einem bekannten Rahmen, so dass zunächst nicht von einem mutationsfördernden Ereignis durch die in der Vergangenheit stattgefundene Exposition auszugehen ist. Die abschließende Analyse von Fusionstranskripten ergab eine Zahl von 1-12 Fusionen pro Probe, allerdings auch

in diesem Fall keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit der Strahlenexposition. Es zeigten sich jedoch einige Fusionen als gehäuft in den Proben, die weiterhin Gegenstand der Untersuchung sein sollten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die erstmalige Erhebung von Mutationsspektren und potenziellen Fusionstranskripten auf der Basis der RNA zwischen hochexponierten und niedrigexponierten Probanden keine quantitativen Unterschiede offenbart hat. Nach diesen jetzt vorliegenden Ergebnissen ist weder von einer höheren Mutationsrate noch von einer zugenommenen Instabilität des Genoms (Ursache für Fusionen) durch die hohe Exposition auszugehen. Allerdings basieren die Ergebnisse nur auf 20-22 untersuchten Proben. Eine Vergrößerung des Gesamtdatensatzes würde hier Klarheit bringen.

Die Rohdaten sowie die Auswertungsergebnisse wurden an das BfS übermittelt. Ebenfalls wurden die isolierten RNA Proben wieder dem BfS übergeben.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Die vorliegenden genomweiten Daten aus den Microarray-basierten Expressionsanalysen in Wismut Bergarbeitern zeigen zum ersten Mal, dass eine veränderte Genexpression durch die Strahlenexposition auch Jahre nach Expositionsende (hier z. B. 20-30 Jahre) beobachtet werden kann. Es muss hier allerdings noch abgeklärt werden, wie stark die beobachteten Veränderungen durch Gesundheitseffekte, wie chronische Bronchitis und Arsenexposition, beeinflusst sind. Somit steht ein Genmuster zur Verfügung um eine chronische, lang zurück liegende Strahlenexposition nachzuweisen. Es muss überprüft werden, ob diese Gensignatur für die Wismutkohorte (hier hauptsächlich Radon-Exposition) spezifisch ist und sie sich auf andere beruflich strahlenexponierte Kohorten übertragen lässt. Die Daten werden weitergehend am BfS ausgewertet und stehen anschließend in der internationalen STORE-Datenbank auf Anfrage beim BfS für weitere Forschungszwecke zur Verfügung.

**Thema**

Untersuchung des Einflusses baulicher Energiesparmaßnahmen (energetische Sanierung, Passivbauweise) auf die Radonkonzentration in Innenräumen (Los 2)

**Subject**

*Influence of structural energy-conservation methods on indoor radon concentration - part 2*

**Kennzeichen**

3611S10016

**Beginn**

01.01.2012

**Ende**

31.03.2015

**Fördermittel**

EUR 234.561,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Technische Hochschule Mittelhessen, Institut für Medizinische Physik und Strahlenschutz, Gießen

**Projektleitung**

Prof. Dr. J. Breckow

**Fachbetreuung BfS**

Dr. W. Meyer / SW 1.1

**verantwortlich für den Text**

A.-L. Grund

## 1. ZIELSETZUNG

Gegenstand der Untersuchung war die Auswirkung energetischer Gebäudesanierungsmaßnahmen auf die Radonkonzentration in Wohnräumen. Die Ergebnisse sollen zur Klärung der Frage beitragen, ob und welche Methoden der energetischen Sanierung eine Erhöhung der Radonkonzentration in den Wohnräumen zur Folge haben. Mögliche Einflussparameter auf die Radonkonzentration wurden in ihrer Ausprägung analysiert um ein Modell für die Radonausbreitung entwickeln zu können.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

In fünf ausgesuchten Einfamilienhäusern erfolgten zeitaufgelöste Messungen. Erfasst wurde die Radonkonzentration in jeweils zwei Räumen aller bewohnter Stockwerke und dem evtl. vorhanden Keller jeweils vor und nach einer energetischen Sanierung. Zusätzlich wurden eine Reihe möglicher Einflussparameter auf die Radonkonzentration aufgezeichnet. Die Durchführung von Luftdichtheitsmessungen der Objekte vor und nach der Sanierung mittels eines modifizierten Differenzdruck-Messverfahrens war ebenfalls ein Bestandteil des Forschungsvorhabens. Ein Schwerpunkt war die Analyse der Messdaten auf Korrelationen zwischen der Radonkonzentration und anderen Parametern. Ein Modell zur Darstellung verschiedener Einflussgrößen auf die Radondynamik wurde erstellt.

## 3. METHODIK

### 3.1 RADONMESSUNGEN

Das Integrationsintervall der Messgeräte ist auf zehn Minuten eingestellt, um Schwankungen der Radonkonzentrationen schnellstmöglich wahrzunehmen und Zusammenhänge mit anderen Parametern erkennen zu können. Die Aufnahme der Messdaten findet jeweils über einen Zeitraum von mindestens vier Wochen unter Vermeidung extremer Großwetterlagen statt.

### 3.2 ERFASSUNG WEITERER DATEN

In jedem Radonmessraum werden auch Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Druck in Abhängigkeit der Zeit erfasst. Zusätzlich werden im Freien mit Hilfe einer Wetterstation zeitlich aufgelöste Werte der Lufttemperatur, -feuchte und -druck, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Niederschlagsmenge erfasst.

### 3.3 ERFASSUNG DER RAUMNUTZUNG

Um den Einfluss des Nutzungsverhaltens der Bewohner auf die mittlere Radonkonzentration in den einzelnen Wohnräumen zu quantifizieren, werden in allen Radonmessräumen Zeitreihen der CO<sub>2</sub>-Konzentration aufgenommen. Dieser zeitliche Verlauf erlaubt Rückschlüsse auf den Luftwechsel, die Anwesenheit von Personen und somit auf die Raumnutzung. Außerdem werden die Bewohner gebeten, die übliche Raumnutzung und Abweichungen davon in Protokollen zu dokumentieren.

### 3.4 DICHEMESSUNGEN AN GEBÄUDEN

Mit Hilfe eines für die Zwecke des vorliegenden Projektes modifizierten Differenzdruck-Messverfahrens wird vor und nach der Sanierung die Luftdichtheit der Messobjekte festgestellt. Durch die Messergebnisse der Luftdichtheit der Gebäudehülle, dem damit verbundenen Luftwechsel und den zeitgleich erfassten Radonkonzentrationen können Radonquellen quantifiziert bzw. Radon-Eintrittspfade identifiziert werden.

## 4. AUSWERTUNG

Die gewonnenen Zeitreihen werden visuell und statistisch analysiert, um Einflüsse aufeinander feststellen zu können. Dafür wird die Radonkonzentration der verschiedenen Räume mit den möglichen Einflussparametern Abschnittsweise betrachtet, um auch kurzzeitige Einflüsse von diesen zu erkennen. Bei der rechnerischen Überprüfung werden sowohl die Rohdaten als auch die Mittelwerte verschiedener Zeiten, bis hin zu Tagesmittelwerten, genutzt. Auch die periodischen Tagesschwankungen zweier Zeitreihen werden auf ihre Korrelation überprüft. Zur Berechnung wird das Statistikprogramm R genutzt. Neben der Korrelation zwischen Radon und den möglichen Einflussparametern werden auch die jeweiligen mittleren Radonkonzentrationen der einzelnen Räume und des gesamten Hauses sowie die Maximal- und Minimalwerte berechnet. Für die Maximal- und Minimalwerte werden 10% der höchsten und niedrigsten Werte beschnitten, sodass möglichst keine statistischen Ausreißer mehr enthalten sind.

Die Berechnung der möglichen Korrelationen bezieht sich auf die Wetterdaten sowie die raumklimatischen Einflussgrößen. Die Berechnung der Korrelation zwischen Radon und CO<sub>2</sub> hat nicht den Zweck, einen möglichen Einfluss festzustellen, sondern um den Einfluss der Raumnutzung und Luftwechselrate herzuleiten. Dafür wird im weiteren Verlauf die Quantisierung der CO<sub>2</sub>- und Radonwerte vorgenommen um anhand dieser eine Raumnutzung und Luftwechselrate zu modellieren.

Die Radonquellstärke wird auf drei unterschiedliche Weisen bestimmt:

#### 4.1 Verfahren 1

Durch den Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration wird die Luftwechselrate berechnet. Mit dem zeitgleichen Verlauf der Radonkonzentration kann die Quellstärke für diesen Raum berechnet werden (Gleichung 1).

$$Q = \frac{-c_{(n-1)} \cdot (k + \lambda) + c_{(n)} \cdot (k + \lambda) \cdot e^{(k+\lambda) \cdot t} - c_A \cdot k \cdot (e^{(k+\lambda) \cdot t} - 1)}{e^{(k+\lambda) \cdot t} - 1} \quad (1)$$

Mit:

Q = Quellstärke

c<sub>A</sub> = Radon-Außenkonzentration

k = Luftwechselrate

λ = Zerfallskonstante

t = Zeit für den Anstieg des Radons von c<sub>(n-1)</sub> auf c<sub>(n)</sub>

c<sub>(n-1)</sub> = Anfangskonzentration des Radons

c<sub>(n)</sub> = Endkonzentration des Radons

#### 4.2 Verfahren 2

Mit der Unterdruckmessung wird ein Wert für die Luftwechselrate bei einem Unterdruck von 50 Pascal ermittelt. Dieser kann auf die mittlere Luftwechselrate innerhalb eines Jahres unter Normalbedingungen umgerechnet werden. Mit diesem Wert kann unter Verwendung von Gleichung 1 und einem beliebigen Radonverlauf die Radonquellstärke berechnet werden. Dieser Wert ist allerdings nur eine Näherung, da die Luftwechselrate einen Jahresmittelwert repräsentiert und die Radonkonzentrationen aktuelle Werte sind.

#### 4.3 Verfahren 3

Das dritte Verfahren nutzt ebenfalls die Unterdruck-Messung zur Bestimmung der Radonquellstärke. Das Unterdruck-Gerät transportiert einen kontinuierlichen Luftstrom durch eine Öffnung im Gebäude nach außen, um den eingestellten Unterdruck einzuhalten. Dieser Volumenstrom beinhaltet das Radon aus dem gesamten

Haus. In der Nähe des Unterdruckgerätes wird die Radonkonzentration mit einem Intervall von zehn Minuten gemessen. Durch Multiplikation des Volumenstroms mit der Radonkonzentration kann die Radonaustrittsrate berechnet werden. Erreicht die Radonkonzentration ein Plateau, so entspricht die Radonaustrittsrate, normiert auf das Gebäudevolumen, der Radonquellstärke bei dem jeweiligen Unterdruck (Gleichung 2).

$$Q = \frac{V_{\Delta p}}{V} \cdot c_{Rn} \quad (2)$$

Mit:

$Q$  = Quellstärke

$V_{\Delta p}$  = Volumenstrom aus dem Gebäude beim angelegten Unterdruck

$V$  = Gebäudevolumen

$c_{Rn}$  = Radonkonzentration beim angelegten Unterdruck

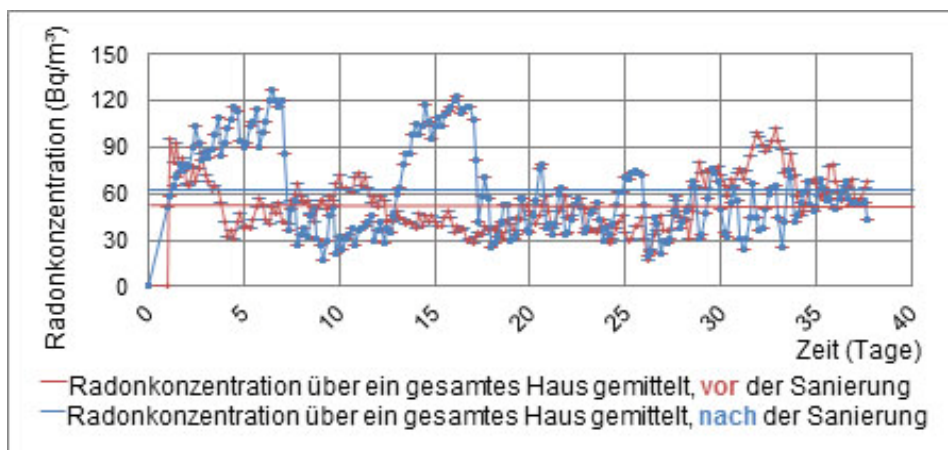
Da die Radonquellstärke bei Unterdruck deutlich größer ist als unter Normalbedingungen, wurden verschiedene Drücke aufgebaut, unter denen die Quellstärke berechnet wurde. Durch Extrapolation kann die Radonquellstärke unter Normalbedingungen daraus abgelesen werden.

Die drei verschiedenen Verfahren wurden verglichen und auf Plausibilität geprüft.

## 5. ERGEBNISSE

In Messobjekt 1 hat sich die Radonkonzentration trotz einer merklichen Reduktion der Luftwechselrate nicht signifikant erhöht.

Auch in Messobjekt 2 hat sich insgesamt im Gebäude keine höhere Radonkonzentration ergeben, da das Radonpotential im Untergrund gering ist und regelmäßig gelüftet wird. Hier wurde allerdings deutlich, dass in einzelnen Räumen höhere Werte auftraten. Der Maximalwert erhöhte sich in einem schlecht belüfteten Raum von 112 Bq/m³ auf 316 Bq/m³. Der Verlauf der gemittelten Radonkonzentration sowohl vor als auch nach der Sanierung wird in Abbildung 1 dargestellt.



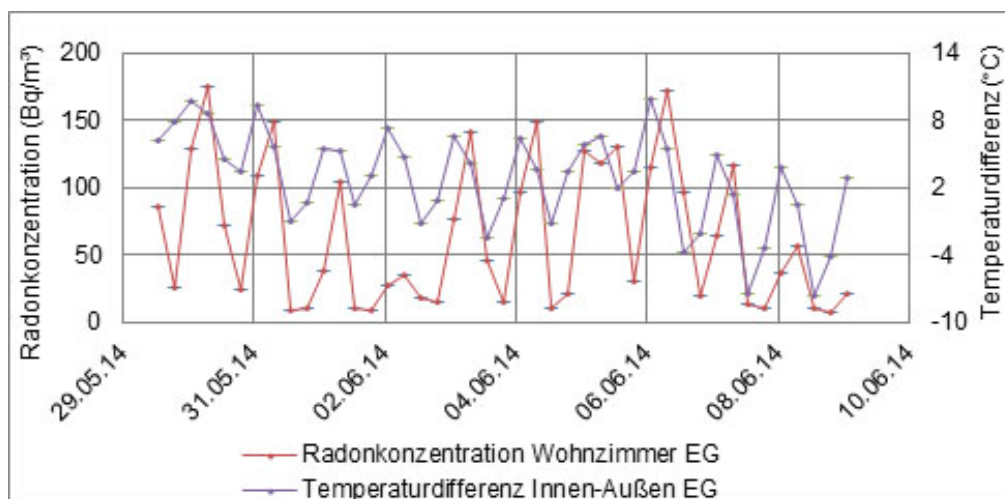
**Abbildung 1: Verlauf der Radonkonzentration vor und nach der Sanierung bei Messobjekt 2**

Es wurde ersichtlich, dass in diesem Gebäude auf Grund des geringen Radonpotentials im Untergrund eine regelmäßige Lüftung ausreicht, um die Radonkonzentration gering zu halten.

In Messobjekt 3 sind die Radonkonzentrationen im Mittel signifikant angestiegen. Der Anstieg beschränkt sich auf die sanierten Räume. In einem Bereich des Untergeschosses wurden keine Sanierungsmaßnahmen durchgeführt; hier blieben die Radonkonzentrationen im Bereich der Messunsicherheit gleich. Für dieses Messobjekt zeigt die energetische Sanierung einen deutlichen negativen Einfluss auf die Radonkonzentration in Wohnräumen. Es zeichnet sich durch umfassende Sanierungsmaßnahmen, wie dem Einbau neuer Fenster und einer Fassadendämmung, aus.

Weitere Messobjekte gingen aus Gründen deutlich unterschiedlicher Temperaturniveaus während der vergleichenden Messungen oder mangelhafter Sanierung nicht in den Vergleich ein.

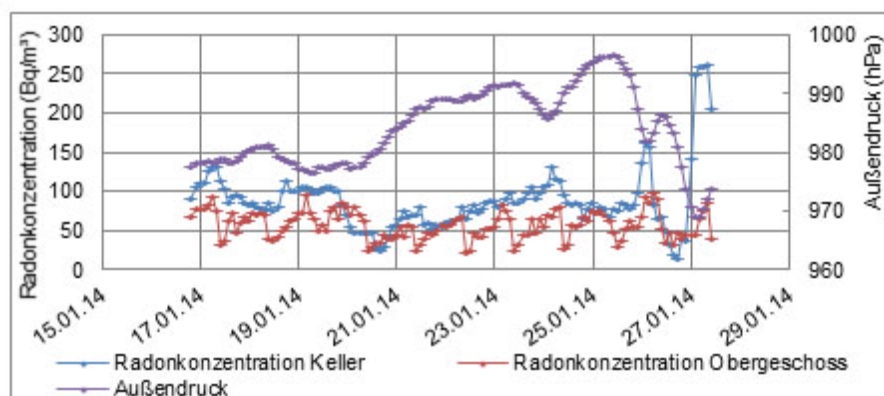
Bei der Einflussanalyse wurden Außentemperatur, Temperaturdifferenz, Außendruck, Luftdruckdifferenz, Regen und Wind auf ihren Einfluss auf die Radonkonzentration im Haus untersucht. Die Außentemperatur hat auf Grund ihrer Wirkung auf die Luftbewegung im Haus großen Einfluss auf die Radonkonzentration. Abbildung 2 zeigt den Verlauf der Radonkonzentration sowie der Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen am Beispiel von Messobjekt 1.



**Abbildung 2: Verlauf der Radonkonzentration und der Temperaturdifferenz am Beispiel von Messobjekt 1**

Es ist zu sehen, dass die Radonkonzentration bei höher werdenden Temperaturdifferenzen zunimmt. Grund dafür ist der Kamineffekt. Eine mathematische Betrachtung der Korrelationen zeigt, dass die Ausprägung der Temperatureinflüsse extremer ist, wenn Tagesmittelwerte statt Rohdaten zur Berechnung herangezogen werden. Grund dafür sind die statistischen Schwankungen sowie die Einflüsse der Raumnutzer. Zudem ist die Ausprägung nach erfolgter Sanierung deutlicher, da die Gebäudehülle dichter ist und Drücke sich dadurch besser aufbauen können. Doch es zeigen sich auch negative Korrelationen. Ein Grund dafür kann die Jahreszeit sein, da die Messzeiträume dieser Messobjekte in der Übergangszeit lagen. Temperaturdifferenzen sind hier noch gering ausgeprägt. Ein Einfluss kann deshalb von dem Verhalten der Bewohner überlagert sein.

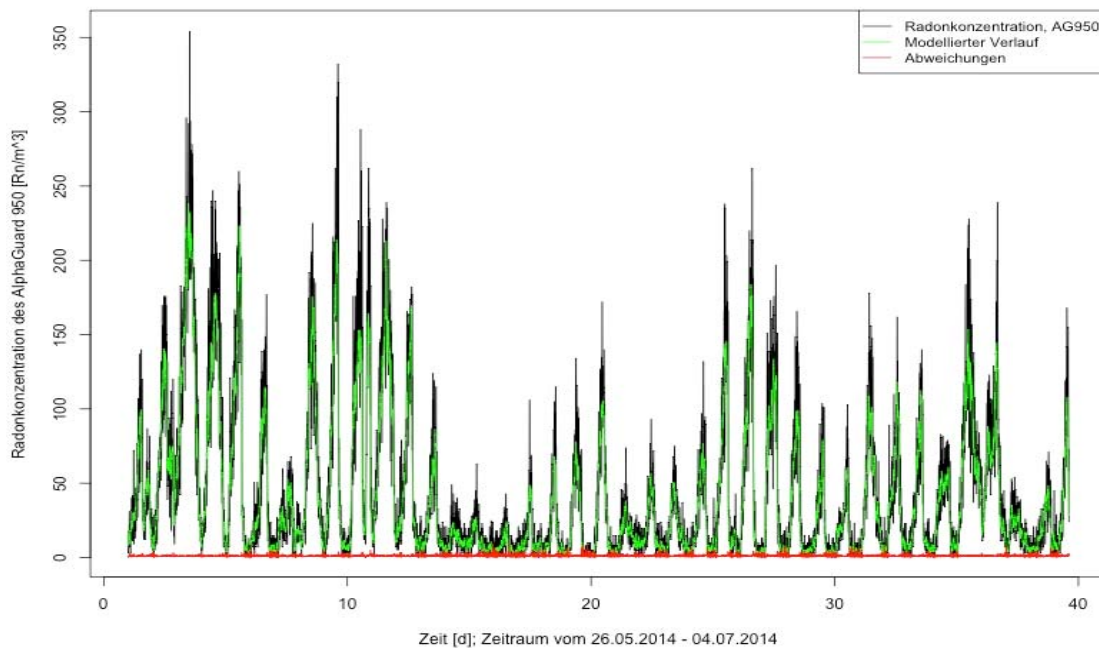
Die Korrelation des Absolutdrucks zum Radon ist bei den ausgewerteten Messobjekten größer als die der Druckdifferenz. Abbildung 3 zeigt den Verlauf der Radonkonzentration im Keller und Obergeschoss sowie des Außendrucks am Beispiel von Messobjekt 5.



**Abbildung 3: Verlauf der Radonkonzentration und des Außendrucks bei Messobjekt 5**

Es zeigt sich, dass der Außendruck mit der Radonkonzentration im Keller gegenläufig ist. Die Radonkonzentration im Obergeschoss dagegen zeigt überwiegend tageszeitliche Schwankungen. Auch hier überwiegt vermutlich der Nutzereinfluss den des Luftdrucks.

Auch die Erstellung eines multiplikativen Regressionsmodells der Radonausbreitung im Gebäude machte deutlich, dass der Nutzereinfluss gegenüber dem Einfluss der klimatischen Parameter deutlich überwiegt. Das Modell wird in Abbildung 4 dargestellt.

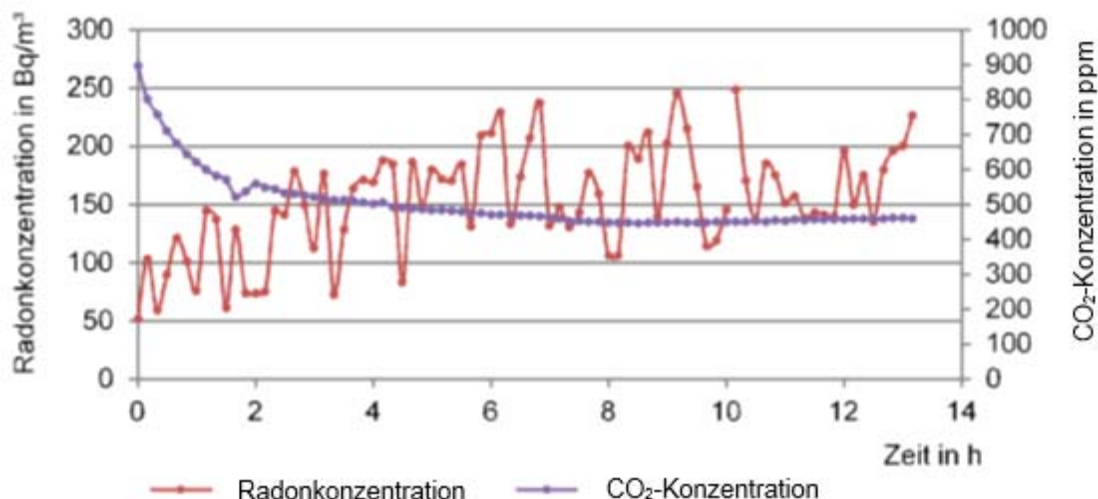


**Abbildung 4: Modellierter Radonverlauf**

Sie zeigt die gemessene Radonkonzentration in schwarz und die modellierte Radonkonzentration in grün. Das Modell ist stark autoregressiv und beinhaltet neben der Radonkonzentration der vorherigen Zeitpunkte die Faktoren der verschiedenen Witterungsparameter sowie erstellte Variablen zur Raumnutzung. Bei der Parameteranalyse zeigte sich, dass die Variablen zur Raumnutzung der Bewohner eine höhere Wichtigkeit haben als die Witterungsparameter.

Um den Einfluss der Hausbewohner zu umgehen, wurde die Radonquellstärke herangezogen. Diese beschreibt die Radon-Charakteristik eines Gebäudes, welche vor allem durch den baulichen Zustand und geologische Gegebenheiten bestimmt wird.

Beim ersten Verfahren wurde die Luftwechselrate aus der  $\text{CO}_2$ -Konzentration bestimmt und mit einem zeitgleichen Radonanstieg (Abbildung 5) und Gleichung 1 in die Radonquellstärke umgerechnet.



**Abbildung 5: Zeitgleicher Anstieg der Radonkonzentration und Abfall der CO<sub>2</sub>-Konzentration**

Das Verfahren liefert plausible Ergebnisse. Es muss dennoch weiter verifiziert werden, da ein zeitgleicher Anstieg der Radonkonzentration und Abfall der CO<sub>2</sub>-Konzentration schwierig zu finden ist. Insbesondere im Keller konnte im Verlauf des Projekts keine Quellstärke ermittelt werden.

Das zweite Verfahren nutzt die mittlere Luftwechselrate eines Jahres bei geschlossenen Fenstern, die mit Hilfe der Unterdruck-Messung berechnet wurde. Mit dieser und Gleichung 1 wird ebenfalls aus einem beliebigen Radonanstieg mit Plateaubildung die Quellstärke berechnet. Das Ergebnis zeigte gute Übereinstimmungen mit Verfahren 1 und lieferte plausible Werte. Ein Nachteil der Methode ist, dass eine mittlere Luftwechselrate auf eine aktuelle Radonkonzentration angewendet wird. Durch die Variation der Luftwechselrate in Abhängigkeit des Windes ist die Berechnung der Quellstärke auf diese Weise somit einem Fehler ausgesetzt, der bei starkem Wind zunimmt.

Das Verfahren zur Bestimmung der Radonquellstärke über die Blower-Door-Messung® ist auf lange Messzeiten mit verschiedenen Unterdruck-Stufen angewiesen. Bei jeder Druckstufe muss ein Gleichgewichtsplateau erreicht werden, um den Fehler möglichst gering zu halten. Das Ergebnis ist dennoch einem unvermeidbaren Fehler unterzogen, da die Radondynamik provoziert ist und nicht der natürlichen entspricht. Auch nach Extrapolation auf Umgebungsbedingungen (im Mittel ca. 2,5 Pa), wird die Radonquellstärke deutlich überschätzt. Dies zeigt der Vergleich mit den zwei anderen vorgestellten Methoden.

Eine Erhöhung der Radonkonzentration nach erfolgter Sanierung wurde in weniger als der Hälfte der Messräume bestätigt. Grund dafür sind unterschiedliche Renovierungsmaßnahmen (bspw. Kellerdeckendämmung), geringe Ausgangskonzentrationen und eine geringe Stichprobe. Bemerkenswert war, dass bei Häusern mit guter Lüftung und geringer Radonkonzentration auch nach der Sanierung, bei gleichbleibender aktiver Lüftung der Bewohner, keine Erhöhung eintritt. Messobjekte mit einer Erhöhung der Radonkonzentration zeichnen sich durch eine hohe Radonkonzentration auch vor der Sanierung und umfassende Renovierungsmaßnahmen, zu denen neue Fenster und eine Fassadendämmung gehören, aus.

Der Einfluss der Witterungsparameter wie Temperaturunterschied und Luftdruck ist deutlich, allerdings von Gebäudenutzern stark beeinflusst.

Da der Einfluss bei Gebäuden nach der Sanierung deutlicher war, könnte dies zu einer ausschließlichen Erhöhung der Radonkonzentration in den Wintermonaten führen, in denen geheizt wird.

Das Nutzerverhalten beeinflusst die Radonkonzentration maßgeblich. Die Radonquellstärke kann ein Weg sein, die Radonsituation in einem Haus unabhängig vom Nutzer bestimmen zu können.

Weiterführend bietet die Methode zur Bestimmung der Quellstärke einen vielversprechenden Ansatz zur Beurteilung der Radondichtheit eines Gebäudes gegen den Baugrund. Des Weiteren ist eine Überprüfung der Abhängigkeiten der Radonquellstärke von äußeren Einflüssen notwendig. Um kurze Messzeiten gewährleisten zu können, muss sichergestellt sein, dass die Radonquellstärke im Rahmen der Messdauer ausreichend konstant ist. Auch der Bezug der Radonquellstärke zur mittleren Radonkonzentration über die Luftwechselra-

te muss hergestellt und überprüft werden. Es zeigte sich, dass nur diese eine unabhängige Größe bezüglich der Radonproblematik in einem Gebäude liefert.

## **6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE**

Die Ergebnisse des Vorhabens zeigen, dass eine energetische Sanierung nicht zwingend zu einer Erhöhung der Radonkonzentration in Aufenthaltsräumen führt. Sie bilden eine Grundlage für die Beurteilung verschiedener Maßnahmen zur energetischen Sanierung von Gebäuden bezüglich des Risikos die Radonkonzentration zu erhöhen. Auf dieser Basis ist eine Weiterentwicklung der Methoden und Standards zur energetischen Sanierung möglich, die eine Erhöhung der Radonkonzentration vermeidet. Bei Überschreitung des im novellierten Strahlenschutzrecht zu verankernden Referenzwertes würden sonst weitere Sanierungsmaßnahmen zum Radonschutz erforderlich. Weiterführend bietet die Methode zur Bestimmung der Quellstärke einen vielversprechenden Ansatz zur Beurteilung der Radondichtheit eines Gebäudes gegen den Baugrund. Eine darauf basierende Methode, die mit überschaubarem Aufwand und in kurzer Zeit noch vor der Bauabnahme die Prüfung der Radondichtheit erlaubt, würde sowohl für Bauplaner als auch ausführende Firmen Rechtssicherheit bezüglich rechtlich geforderter oder vertraglich vereinbarter Zielwerte für die Radonkonzentration in Aufenthaltsräumen herstellen. Bisher stehen dazu nur langandauernde Messungen unter Nutzungsbedingungen während der bereits laufenden Garantiefrist zur Verfügung. Die Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Radondichtheit eines Gebäudes soll im Rahmen des Vorhabens 3616S12241 erfolgen.

|                                                                                                                                               |                                                        |                           |                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>Thema</b><br>Genomweite Analyse genetisch bedingter Strahlenempfindlichkeit in Wismut Bergarbeitern                                        |                                                        |                           |                                                            |
| <b>Subject</b><br><i>Genome wide analysis of radiosensitivity in former uranium miners of SDAG Wismut</i>                                     |                                                        |                           |                                                            |
| <b>Kennzeichen</b><br>3614S10013                                                                                                              | <b>Beginn</b><br>01.03.2015                            | <b>Ende</b><br>29.02.2016 | <b>Fördermittel</b><br>EUR 53.042,-                        |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Helmholtz Zentrum München (HMGU), Abteilung für molekulare Epidemiologie, Institut für Epidemiologie II |                                                        |                           |                                                            |
| <b>Projektleitung</b><br>Dr. C. Gieger<br>Dr. M. Waldenberger                                                                                 | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. M. Gomolka / AG-SG 1.2 |                           | <b>verantwortlich für den Text</b><br>J. Manz, P. Singmann |

## 1. ZIELSETZUNG

Das Ziel des Vorhabens war es 500 DNA-Proben der Wismut-Kohorte, bestehend aus an Lungenkrebs verstorbenen sowie gesunden Bergarbeitern, genomweit zu genotypisieren, um in einem Folgeprojekt genetische Marker (single nucleotide polymorphisms (SNPs)) zu identifizieren, die strahlungsabhängig das Lungenkrebsrisiko erhöhen.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Die Einzelzielsetzung des Vorhabens bestand darin die für die Analyse benötigten Daten zu generieren. Die Durchführung des Projektes war in folgende 2 Arbeitspakete aufgeteilt:

### 2.1 ALIQUOTIERUNG VON DNA-PROBEN ZUR ÜBERPRÜFUNG DER DNA-QUALITÄT UND TYPISIERUNG (AP 1)

Die DNA-Qualität und -Quantität der vom Bundesamt für Strahlenschutz bereit gestellten Proben wurden vor Beginn der Genotypisierung mittels DNA-Gelelektrophorese und spektrophotometrischer Messung überprüft und entsprechende Proben als Vorbereitung für die folgende Genotypisierung aliquotiert.

### 2.2 SNP-TYPISIERUNG MITTELS ONCOARRAY-500K BEADCHIP IN WISMUT-BERGARBEITERN (AP 2)

Das AP 2 umfasste die Genotypisierung der in AP 1 nach erfolgreicher Qualitätskontrolle vorbereiteten Proben, die Qualitätssicherung der Typisierungs-Rohdaten und deren Übergabe an den dritten Auftragnehmer (Institut für genetische Epidemiologie, Universitätsmedizin Göttingen) zur weiterführenden Auswertung der Daten.

## 3. METHODIK

Die DNA-Qualität der Proben wurde mittels DNA-Gelelektrophorese bestimmt um eine mögliche Degradation der DNA auszuschließen. Die DNA-Quantität wurde spektrophotometrisch mit einem NanoDrop-Gerät ermittelt. Zusätzlich diente das bei dieser Messung ermittelte 260/280 nm-Verhältnis als Qualitätsmesswert zur Einstufung der Reinheit der Proben.

Die Genotypisierung der Proben wurde mittels dem Infinium® OncoArray-500K v1.0 DNA Analysis Kit der Firma Illumina gemäß Herstellerangaben auf der seit vielen Jahren etablierten Genotypisierungsplattform des Genome Analyse Zentrums durchgeführt. Der hierfür verwendete Array zur genomweiten Typisierung (Infinium® OncoArray-500K) der Firma Illumina wurde auf Basis eines Expertenpanels (OncoArray Network) entwickelt und mit Markern für relevante Gene verschiedener Krebsarten (Brust-, Lungen-, Ovarial-, Kolorektal- und Prostata-Karzinom) angereichert. Die Qualitätssicherung der Rohdaten wurde mit einer speziellen Software der Firma Illumina (GenomeStudio V2011.1) durchgeführt, wobei im Wesentlichen die Detektionsrate, sog. Callrate (beschreibt die Anzahl an SNPs jeder Probe, denen ein Genotyp zugeordnet werden konnte), die Intensitätswerte der internen Kontrollen sowie der Abgleich zwischen genotypischem und phänotypischem

schem Geschlecht analysiert wurden. Die Datenübergabe der Genotypisierungsdaten an die Universitätsmedizin Göttingen zur detaillierten Qualitätskontrolle und Analyse fand nach Vorgaben per Cloud-Dienst statt.

## **4. DURCHFÜHRUNG**

Die Durchführung der Arbeitspakete 1 und 2 richtete sich nach der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Methodik.

### **4.1 ALIQUOTIERUNG VON DNA-PROBEN ZUR ÜBERPRÜFUNG DER DNA-QUALITÄT UND TYPISIERUNG (AP 1)**

Zur Sicherung der DNA-Qualität wurde die DNA elektrophoretisch in einem DNA-Gel aufgetrennt, um eine mögliche Degradation zu identifizieren, die sich durch eine nicht klare Auftrennung der DNA (sog. „Schmier“ der Bande) verdeutlicht. Qualitativ mindere DNA-Proben wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen, da sonst nicht sicherzustellen ist, dass bei den verwendeten Proben die Genotypisierung verlässliche, robuste Ergebnisse liefert. Die DNA-Quantität wurde spektrophotometrisch mit einem NanoDrop-Gerät bestimmt und 60 ng/µl der DNA-Probe für die Genotypisierung aliquotiert. Das durch die NanoDrop-Messung ermittelte 260/280 nm-Verhältnis wurde als weiterer Qualitätsmesswert herangezogen. Ein Wert von ~1,8 weist auf eine reine DNA-Probe hin, liegt der Wert deutlich < 1,8 deutet dies auf eine mögliche Kontamination (meist Proteine, Phenole, o. ä.) der Probe hin.

### **4.2 SNP-TYPISIERUNG MITTELS ONCOARRAY-500K BEADCHIP IN WISMUT-BERGARBEITERN (AP 2)**

Die Genotypisierung der Proben wurde mittels dem Infinium® OncoArray-500K v1.0 DNA Analysis Kit der Firma Illumina gemäß Herstellerangaben durchgeführt. Zur Vorbereitung für die Genotypisierung wurden die Proben auf eine Konzentration von 60 ng/µl eingestellt

Als interner Standard und zur laborinternen Qualitätsüberprüfung wurden eine HapMap-Kontrolle sowie interne Kontrollen (gleiche DNA-Probe mit bekanntem Genotyp) verwendet. HapMap-Kontrollen beschreiben DNA-Proben, die im Rahmen des HapMap Projektes (internationales Projekt zur Kartographierung der Haplotypen des menschlichen Genoms) typisiert wurden und dienen zusätzlich zur Vergleichbarkeit der Daten mit anderen großen Typisierungsprojekten im Rahmen des OncoArray Konsortiums.

Der Laborprozess der Genotypisierung ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Die auf 60 ng/µl eingestellten DNA-Proben wurden dem Protokoll folgend zunächst denaturiert, neutralisiert und anschließend bei 37 °C über Nacht amplifiziert. Am nächsten Tag folgte eine enzymatische Fragmentierung der DNA mit anschließender DNA-Fällung mittels Isopropanol. Nach Resuspendierung der Proben wurden diese über Nacht bei 48 °C auf dem entsprechenden OncoArray-500K v1.0 BeadChips hybridisiert. Am nächsten Tag folgte ein Waschschriff, um nicht gebundene DNA zu entfernen, gefolgt von einer Einzelbasenverlängerung der auf dem Beadchip hybridisierten DNA und Einbau fluoreszierender Marker (Fluorophore) zur späteren Bestimmung des Genotyps der Probe. Dabei wurden verschiedene Marker eingesetzt, um die entsprechenden Genotypen schlussendlich ermitteln zu können. Im Anschluss wurden die Beadchips mit Hilfe des iScan-Systems der Illuminaplattform gescannt. Hierbei regt ein Laser die eingebauten Fluorophore an; das emittierte Licht wird von einem Scanner erfasst und in hochauflösende Bilder transformiert.

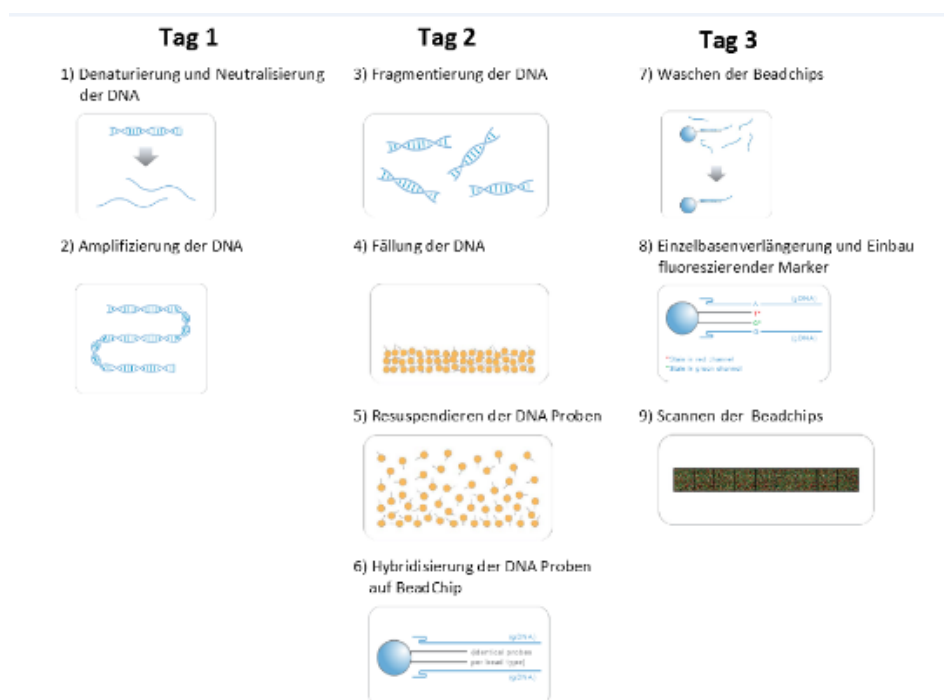


Abbildung 1: Schematischer Laborprozess einer Genotypisierung auf der Illumina-Plattform

## 5. ERGEBNISSE

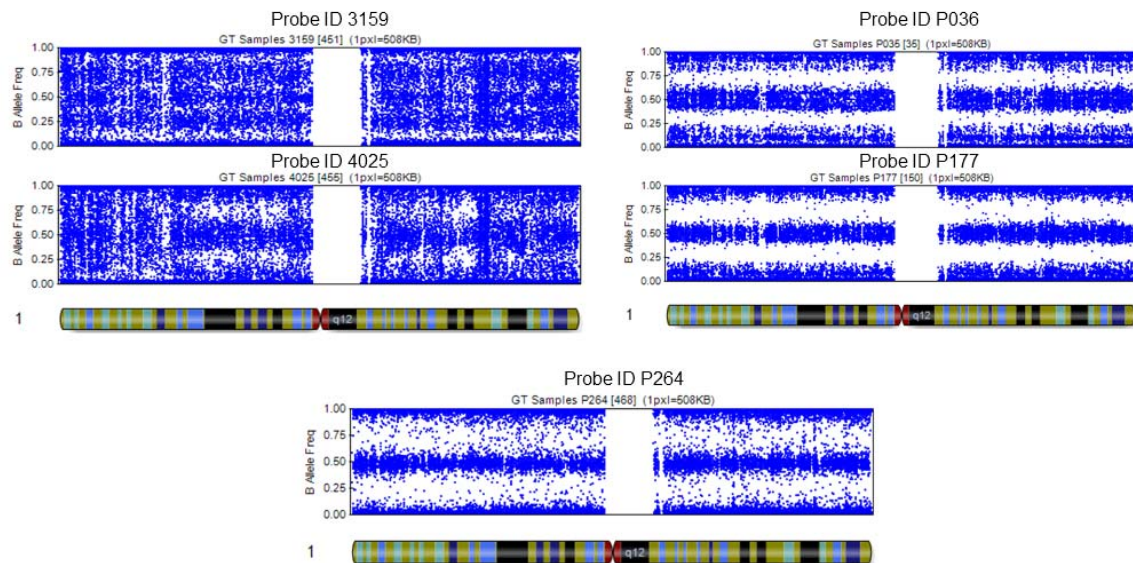
### 5.1 ÜBERPRÜFUNG DER DNA-QUALITÄT UND QUANTITÄT (AP 1)

Nach der Qualitätskontrolle in AP 1 mussten lediglich 4 Proben auf Grund zu geringer DNA-Konzentration ( $< 10\text{ng}/\mu\text{l}$ ) von der folgenden Genotypisierung ausgeschlossen werden. Weitere vier Proben zeigten zwar ein erhöhtes 260/280 nm Ratio ( $> 2$ ), durch zusätzliche Qualitätskontrolle dieser Proben mittels Gel-Elektrophorese konnte sich aber kein Verdacht auf eine mögliche Kontamination bestätigen, weshalb diese Proben somit in die Analyse eingeschlossen wurden. Nach abgeschlossener Qualitätskontrolle aller Proben konnten demnach 496 Proben zur Genotypisierung in AP 2 verwendet werden.

### 5.2 SNP-TYPISIERUNG MITTELS INFINIUM® ONCOARRAY-500K BEADCHIP (ILLUMINA) UND QUALITÄTSSICHERUNG DER ROHDATEN (AP 2)

Wie bereits unter Punkt 4 beschrieben wurden 496 DNA-Proben der Wismut-Kohorte mittels dem Infinium® OncoArray-500K BeadChip der Firma Illumina genomweit genotypisiert. Der Erfolg der Genotypisierung wurde mittels der Illumina-Software GenomeStudio (Version 2011.1) in Verbindung mit dem Genotypisierungsmodul (Genotyping Module, Version 1.9.4) beurteilt.

Zur Analyse der Qualität der Genotypisierung wurden die Call-Raten und Intensitätswerte der internen Kontrollen herangezogen. Die Call-Rate ist eine Detektionsrate und beschreibt die Anzahl an SNPs jeder Probe, denen ein Genotyp zugeordnet werden konnte. Von allen 496 typisierten Proben zeigten fünf Proben eine Call-Rate von  $\leq 95\%$ . Diese Proben wurden zusätzlich auf mögliche Kontaminationen hin untersucht. Mit Hilfe der Software GenomeStudio kann die Frequenz eines Allels der jeweiligen Probe für alle SNPs angeschaut werden (s. Abbildung 2). Graphisch werden homozygote Genotypen (2 gleiche Allele) mit einem Cluster bei 0 und 1 dargestellt, heterozygote Genotypen (2 unterschiedliche Allele) mit einem Cluster bei 0,5. Zusätzliche Cluster geben einen Hinweis auf eine mögliche Kontamination der Probe, wie hier bei zwei Proben festgestellt wurde (s. Abbildung 2, Proben 3159 und 4025).



**Abbildung 2:** Überprüfung ausgewählter Proben auf Kontamination mittels der Software GenomeStudio: Dargestellt ist die Frequenz des B-Allels der jeweiligen Probe für alle SNPs auf Chromosom 1. Die Cluster bei 0 und 1 zeigen homozygote Genotypen, das Cluster bei 0,5 zeigt heterozygote Genotypen. Zusätzliche Cluster bei 0,25 und 0,75 deuten auf mögliche Kontamination der Probe hin (s. linke Panels für Proben 3159 und 4025).

Im weiteren Verlauf der Qualitätskontrolle zeigte die Überprüfung der Chip-basierten internen Kontrollen, womit acht Qualitätsmerkmale des Prozesses überprüft werden, keinerlei Auffälligkeiten.

Als weitere Qualitätskontrolle wurde das Geschlecht jeder Probe mittels X-chromosomal spezifischer SNPs ermittelt (genotypisches Geschlecht). Im Anschluss daran wurde ein Geschlechterabgleich zwischen phänotypischem und genotypischem Geschlecht durchgeführt um mögliche Fehler im Laborprozess (bspw. Verwechslung der Proben durch „Plattendreher“) auszuschließen. Bei 14 Proben stimmten diese Geschlechter nicht überein (inkl. Geschlecht einer HapMap-Kontrolle).

Alle nach der Genotypisierung qualitätsauffälligen Proben wurden im Rahmen einer Nachtypisierung (HMGU intern) wiederholt gemessen. Nach der Wiederholung zeigten vier der fünf Proben mit einer Call-Rate  $\leq 95\%$  eine verbesserte Call-Rate von  $> 95\%$ . Die Proben mit vermeintlicher Kontamination zeigten nach Wiederholung ebenfalls gute Ergebnisse. Bei jenen Proben, die auf Grund von Geschlechtsdiskrepanzen wiederholt wurden, blieben bei 10 Proben die Diskordanzen bestehen, trotz sehr guter Call-Raten. Für alle anderen wiederholten Proben konnten keine Geschlechtsdiskordanzen festgestellt werden.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Geschlechtsbestimmung lediglich auf einer statistischen Schätzung beruht, die während der Auswertungsroutine zur Detektion von möglichen Laborfehlern dient (z. B. „Plattendreher“) und nicht zur tatsächlichen Geschlechtsbestimmung herangezogen wird. Möglicherweise konnten bei den geschlechtsdiskordanten Probanden die wenigen Marker, die zur Geschlechtsschätzung herangezogen werden, nicht ausreichend typisiert werden, die überwiegende Mehrheit der Marker jedoch sehr gut (was die trotzdem sehr gute Call-Rate erklären würde).

Generell lag die Rate der zu wiederholenden Proben jedoch unter 5 %, was basierend auf unserer langjährigen Erfahrung in der Qualitätssicherung von Typisierungsdaten eine erfolgreiche Durchführung der Genotypisierung und somit des geforderten Vorhabens zeigt. Auch die anschließende Qualitätskontrolle der generierten und übermittelten Genotypisierungsdaten seitens der Universitätsmedizin Göttingen bestätigte ein sehr gutes Gelingen der gestellten Aufgabe (Projekt 3614S10014). Insgesamt ist dieses Projekt somit erfolgreich abgeschlossen und es ist von einer sehr guten Verwendbarkeit der erzeugten Daten für alle Nachfolgeprojekte auszugehen.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Die vorliegenden genomweiten Daten zu genetischen Markern auf dem neuartigen Oncoarray-Chip sind speziell für die Erforschung von Tumorprädisposition und Tumorrisiken entwickelt worden. Die in diesem Projekt erzeugten Daten wurden auf ihre Qualität überprüft (3614S10014) und können nun für weitere Forschungszwecke, z. B. zur Ermittlung von genetischen Prädispositionen, die das Risiko für einen strahleninduzierten Lungenkrebs erhöhen, verwendet werden. Die Daten wurden vom Projekt 3614S10014 in die internationale STORE-Datenbank eingespeist und stehen auf Anfrage beim BfS nach Abschluss des Projektes 3615S32253 für Forschungszwecke zur Verfügung.

|                                                                                                                                            |                                                        |                           |                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Thema</b>                                                                                                                               |                                                        |                           |                                                      |
| Genomweite Analyse genetisch bedingter Strahlenempfindlichkeit in Wismut-Bergarbeitern - Qualitätssicherung der Typisierungsergebnisse     |                                                        |                           |                                                      |
| <b>Subject</b>                                                                                                                             |                                                        |                           |                                                      |
| <i>Genome wide analysis of radiosensitivity in former uranium miners of SDAG Wismut - quality management and control of the genotyping</i> |                                                        |                           |                                                      |
| <b>Kennzeichen</b><br>3614S10014                                                                                                           | <b>Beginn</b><br>01.08.2014                            | <b>Ende</b><br>31.07.2016 | <b>Fördermittel</b><br>EUR 13.411,-                  |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Universitätsmedizin Göttingen, Institut für Genetische Epidemiologie                                 |                                                        |                           |                                                      |
| <b>Projektleitung</b><br>Prof. Dr. H. Bickeböllner                                                                                         | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. M. Gomolka / AG-SG 1.2 |                           | <b>verantwortlich für den Text</b><br>A. Rosenberger |

## 1. ZIELSETZUNG

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist abzuklären, welche genetischen Veränderungen im Zusammenhang mit Strahlung zum Lungenkrebsrisiko (LK) beitragen.

Erstes Ziel war, die optimale Zusammensetzung des Studienkollektivs abzuschätzen, um mit einer ausreichenden Teststärke eine genetische Assoziation zum strahleninduzierten Lungenkrebs (LK) nachzuweisen. Als Studienkollektive stehen DNA-Proben von 430 gesunden Wismut-Bergarbeitern und von 76 ehemaligen an Lungenkrebs gestorbenen Wismut-Bergarbeitern sowie 90 Kindern von Nachkommen von früh an Lungenkrebs verstorbenen Wismut-Arbeitern zur Verfügung. Vergleichsdaten der LUCY-Studie (LUNG Cancer in the Young, Kooperationspartner, PI: Dr. Irene Bröske, HMGU<sup>1)</sup>) und der Heidelberg Lungenkrebsstudie (Heidelberg-PI: Dr. Angela Risch, DKFZ<sup>2)</sup>), sowie krebsfreien Kontrollen der KORA<sup>3)</sup>-Studie (Kooperative Gesundheitsforschung in der Region Augsburg, PI: Dr. Annette Peters, HGMU) stehen, auch als Teil des ILC-CO<sup>4)</sup>-Konsortiums, zur Verfügung.

Das zweite Ziel war es, unter Berücksichtigung des Standes von Wissenschaft und Technik einen optimalen Chip für die genomweite Charakterisierung zu ermitteln.

Das dritte Ziel war die Qualitätssicherung der anschließenden externen genomweiten Typisierung aus dem Parallelprojekt 3614S10013.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

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

- Erstellung einer Übersicht der bekannten genetischen Risiken des Lungenkrebses und der Strahlenempfindlichkeit
- Auswahl, Begründung und Powerabschätzung der gewählten Methode zur genomweiten Assoziationsanalyse unter Einbeziehung der Studienkollektive beim BfS nach dem gegenwärtigen Stand von Wissenschaft und Technik
- Empfehlung zur Wahl eines geeigneten Chips zur Genotypisierung.

### 2.2 QUALITÄTSSICHERUNG DER SNP TYPISIERUNG MITTELS 660K CHIP (ILLUMINA) ODER VERGLEICHBARER CHIP-ANALYSE (AP 2)

- Qualitätssicherungsprüfungen der SNP<sup>5)</sup>-Typisierung in 3614S10013

<sup>1)</sup> Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt

<sup>2)</sup> Deutsche Krebsforschungszentrum

<sup>3)</sup> Kooperative Gesundheitsforschung in der Region Augsburg

<sup>4)</sup> International Lung Cancer Consortium

<sup>5)</sup> single nucleotide polymorphism

- Expertenbegleitung auf Basis des Qualitätsberichts für Nachforderungen des BfS an FKZ 3614 S 10014
- Einstellen der SNP-Daten der BfS-Kollektive in die Datenbank STORE

### 3. METHODIK

Die Übersicht der bekannten genetischen Risiken des Lungenkrebses basierte hauptsächlich auf einer Literaturrecherche in der Datenbank PubMed. Verschiedene Möglichkeiten der Datenauswertung wurden hinsichtlich der notwendigen Fallzahl und der erzielbaren Power untereinander verglichen. Die Wahl eines geeigneten Chips zur Genotypisierung erfolgte unter Berücksichtigung der erzielbaren „genomic coverage“ und Verwendung in vergleichbaren Studien weltweit. Die Qualitätssicherungsprüfungen der SNP-Typisierung erfolgte in Anlehnung an die QC/QS-Prüfung des OncoArray-Netzwerks.

### 4. DURCHFÜHRUNG

#### 4.1 ERSTELLUNG EINER ÜBERSICHT DER BEKANNTEN GENETISCHEN RISIKEN DES LUNGENKREBSES UND DER STRAHLENEMPFLINDLICHKEIT DURCH LITERATURRECHERCHEN (AP 1.1)

In der Übersicht zusammengestellt wurden einerseits genetische Risikofaktoren für Lungenkrebs und andererseits für Strahlenempfindlichkeit. Die Übersicht wurde in einer Detailtiefe erfasst, wie sie für Projektanträge mit Entscheidung zur Erstauswahl üblich ist.

#### 4.2 AUSWAHL, BEGRÜNDUNG UND POWERABSCHÄTZUNG DER GEWÄHLTEN METHODE ZUR GENOMWEITEN ASSOZIATIONSANALYSE UNTER EINBEZIEHUNG DER STUDIENKOLLEKTIVE BEIM BFS NACH DEM GEGENWÄRTIGEN STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK (AP 1.2)

Die Power für das bestehende Kollektiv wurde für einen GxE Interaktionseffekt von  $RR_{GE}^1=3,0$  (gemeinsam mit dem angenommen Umwelteffekt E und dem angenommen genetischen Haupteffekt G) berechnet. Alternative Analysestrategien wurden empfohlen. Diese beinhalten:

- die Beschränkung der Analyse auf ausgewählte Kandidatengene
- die Anwendung einer gewichteten Bonferroni-Korrektur
- die Fokussierung auf eine nachgelagerte Gen-Set-Analyse (pathway analysis).

Die Power für eine Gen-Set-Analyse wurde abgeschätzt. Ebenso wurde die Möglichkeit geprüft, das bestehende Kollektiv durch Rekonstruktion der Genotypen von verstorbenen LK-Fällen nach Typisierung derer leiblicher Nachfahren zu vergrößern.

#### 4.3 EMPFEHLUNG ZUR WAHL EINES GEEIGNETEN CHIPS ZUR GENOTYPISIERUNG (AP 1.3)

Eine Übersicht der derzeit zur Verfügung stehenden und bei Lungenkrebs-GWAS (Genomweite Assoziationsstudie) verwendenden Genotypisierungs-Arrays wurde erstellt. Basierend auf dem medianen Abstand zwischen den Markern in Kombination mit einer Empfehlung des HapMap<sup>2</sup>-Konsortiums über die notwendige Abdeckung der Arrays konnten die Betrachtungen auf zwei Arrays mit ausreichender SNP-Dichte (Human-Hap-550K Duov3 oder des Onco-Array-500K) konzentriert werden.

Schließlich wurden die Arrays hinsichtlich enthaltener Marker verglichen und die Gene zugeordnet, die für die Fragestellung des Projekts potenziell relevant erscheinen (bzg. Lungenkrebs oder DNA-Reparatur) (siehe AP 1.1).

#### 4.4 QUALITÄTSKONTROLLE (AP 2.1)

Die Qualitätskontrolle der genomweiten Typisierung aus dem Projekt 3614S10013 wurde durchgeführt.

---

<sup>1</sup>) Relatives Risiko zu erkranken, gegeben einen Genotyp und eine Exposition

<sup>2</sup>) haplotype map

## **5. ERGEBNISSE**

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

#### **5.1.1 Übersicht der bekannten genetischen Risiken des Lungenkrebses und der Strahlenempfindlichkeit**

Der Stand des Wissens über genetische Risikofaktoren des Lungenkrebses wurde in folgende Übersichten zusammengefasst:

- genetische Risikofaktoren für Lungenkrebs (identifiziert mittels GWAS oder darauf aufbauender Meta-Analysen)
- genomische Regionen und Telomerase-Länge, die mit Lungenkrebs (ohne GWAS) assoziiert wurden
- mit Lungenkrebs assoziierte Kandidatengene (alphabetische Reihenfolge)

Die Tabellen umfassen insgesamt 189 Gene, für die eine Assoziation zu Lungenkrebs beobachtet wurde oder diskutiert wird.

#### **5.1.2 Methode zur genomweiten Assoziationsanalyse**

Folgende Empfehlungen zur Durchführung des Projektes werden gegeben:

- Eine genomweite Typisierung der 76 Fälle und 300 Kontrollen wird empfohlen.
- Die Typisierung größerer Familien wird nur bedingt geraten.
- Die Wahl der Auswertungsstrategie hängt stark von den weiteren Detailzielen des Forschungsvorhabens ab. Es wird eine gemeinsame Auswertung des BfS-Kollektivs mit Fällen der LUCY-Studie und verfügbaren Kontrollen der KORA-Studie dringend empfohlen.
- Eine herkömmliche Marker-für-Marker-Auswertung (klassischer Ansatz einer genomweiten Assoziationsstudie) ist nicht sinnvoll. Hingegen kann mit 82 % Power eine Häufung von assoziierten Genen in der Gruppe aller DNA-Reparatur-Gene gezeigt werden, wenn etwa 50 jener 635 auf dem Onco-Array-500K platzierten und für eine genomische Region repräsentativen Marker, die solchen Genen zugeordnet werden, tatsächlich assoziiert sind. Anstelle einer Marker-für-Marker-Auswertung der erhobenen Daten wird daher eine darauf aufbauende Gen-Set-Analyse empfohlen.
- Es wird empfohlen, einen kombinierten Test auf einen genetischen Haupteffekt und eine Gen-Umweltinteraktion für Fall-Kontroll-Studien zu verwenden, da dieser eine höhere Power als ein alleiniger Test auf eine Gen-Umweltinteraktion aufweist.
- Ein Ablaufplan aller notwendigen Schritte, beginnend bei den Vorbereitungen zur Genotypisierung bis zu einer Publikation der Ergebnisse wurde erstellt.

#### **5.1.3 Empfehlung zur Wahl eines geeigneten Chips zur Genotypisierung**

Es wird empfohlen, die Genotypisierung mit dem Onco-Array-500K Chip durchzuführen. Zur Qualitätskontrolle sollten je Batch eine Probe doppelt und zusätzlich eine HapMap-Kontrolle mittypisiert werden.

## **5.2 QUALITÄTSSICHERUNG DER SNP-TYPISIERUNG (AP 2)**

### **5.2.1 Qualitätssicherungsprüfungen der SNP-Typisierung in 3614S10013**

Die Qualitätssicherung der Genotypisierung (3614S10013) gemäß der obigen Empfehlungen wurde im Verbund mit einer anderen Studie durchgeführt, um die Aussagegüte zu steigern. Folgende Aussage zur Güte der Genotypisierung konnten getroffen werden:

- Von den 499 170 Markern, die mit dem OncoArray typisiert werden können, erwiesen sich nur 26 172 Marker (~5 %) als für die Datenanalyse ungeeignet. Darunter befinden sich 12 440 monomorphe Marker (Marker, die keine Variation aufweisen), die zur Feinkartierung ausgewählter genomischer Regionen vorgesehen waren. Dieser Ausfall stellt daher keinen QC/QS-Mangel dar.
- Von den insgesamt 1344 Proben aus allen Studien wiesen 139 (rund 10 %) Qualitätsmängel der Genotypisierung auf oder waren Proben rein zu Kontrollzwecken (n=30). Schlussendlich konnten valide Genotypen von 405 der 416 krebsfreien Wismut-Bergarbeiter und 64 der 80 an Lungenkrebs erkrankten Wismut-Bergarbeiter bestimmt werden.
- Es traten keine nennenswerten Batcheffekte auf. Die Qualität der Genotypisierung mit dem OncoArray mehrerer Stichproben kann somit als sehr gut bezeichnet werden.

### 5.2.2 Expertenbegleitung auf Basis des Qualitätsberichts für Nachforderungen des BfS

Bevor die abschließende Qualitätssicherung durchgeführt wurde, wurde die Dateistruktur mit dem HGMU besprochen und aufgetretene Probleme durch intensive Kommunikation geklärt. Die daraufhin übergebenen Daten waren von hoher Qualität und eine Nachtypisierung nicht erforderlich. Das Vorhaben konnte vorzeitig 2015 abgeschlossen werden.

### 5.2.3 Einstellen der SNP-Daten der BfS-Kollektive in die Datenbank STORE

Die bereinigten Genotypdaten wurden in die Datenbank STORE eingestellt.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Die Ergebnisse wurden genutzt, um ein Forschungsprojekt mit Proben aus der Wismut Biobank zu konzipieren mit dem Ziel, genetische Prädispositionen zu identifizieren, die das Risiko für einen strahleninduzierten Lungenkrebs erhöhen. In einem ersten Schritt wurde daher das Studiendesign entwickelt und der optimale Chip ausgewählt, um genetische Marker, die im Zusammenhang mit Tumorprädisposition/Tumorrisiko stehen, zu untersuchen. Anschließend wurde in einem Parallelvorhaben die Markertypisierung durchgeführt (3614S10013). Die in diesem Projekt erzeugten Daten wurden auf ihre Qualität überprüft und können nun für weitere Forschungszwecke verwendet werden. Durch die Genotypisierung und deren Qualitätskontrolle stehen nun verwertbare, hochwertige, genomweite Informationen von 469 Wismut-Bergarbeitern zur Verfügung. Diese können auch für andere Untersuchungen in der Strahlenforschung verwendet werden und von anderen Forschergruppen über die Datenbank STORE bezogen werden, sobald die statistische Analyse im Folgeprojekt 3615S32253 zum strahleninduzierten Lungenkrebsrisiko abgeschlossen ist. Die Daten sind auf Anfrage und beim BfS zugänglich.



**Themenbereich 02**  
**Strahlenschutztechnik**

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

|                                                                                                                                        |                                                          |                           |                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------|
| <b>Thema</b>                                                                                                                           |                                                          |                           |                                                          |
| Evaluierung neuer CT-Techniken und Bestimmung der mit ihnen erzielten Strahlenreduktion bei verschiedenen CT-Betreibern in Deutschland |                                                          |                           |                                                          |
| <b>Subject</b>                                                                                                                         |                                                          |                           |                                                          |
| <i>Evaluation of dose reduction and image quality achieved during CT examinations in Germany using modern CT techniques</i>            |                                                          |                           |                                                          |
| <b>Kennzeichen</b><br>3613S20025                                                                                                       | <b>Beginn</b><br>01.01.2014                              | <b>Ende</b><br>30.06.2015 | <b>Fördermittel</b><br>EUR 259.268,-                     |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Institut für Klinische Radiologie, Klinikum der Universität München                              |                                                          |                           |                                                          |
| <b>Projektleitung</b><br>Prof. Dr. med. C. Becker                                                                                      | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. A. Schegerer / AG-SG 2.3 |                           | <b>verantwortlich für den Text</b><br>Dr. M. Seidenbusch |

## 1. ZIELSETZUNG

Ziel der retrospektiven Studie war die Evaluierung der bei neuen CT-Techniken (automatische Dosismodulation, iterative Bildrekonstruktion, Dual-Energy-CT) unter klinischen Routinebedingungen zu erzielenden Reduktion der Patientendosis bei verschiedenen CT-Betreibern in Deutschland.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Entsprechend der Zielsetzung wurde eine Literaturrecherche zum Stand von Wissenschaft und Technik in der Computertomographie (CT) durchgeführt. Im Anschluss hieran erfolgte eine bundesweite Akquisition klinischer CT-Datensätze mit den Schwerpunkten Bayern und Hamburg, aus welchen wiederum die bei den Patienten bei CT-Untersuchungen des Schädels, des Thorax und des Abdomens sowie im Rahmen von CT-Angiographien unter den diversen CT-Techniken applizierte Strahlendosis ermittelt und objektiven sowie subjektiven Bildqualitätsmerkmalen gegenübergestellt wurde.

### 2.1 LITERATURRECHERCHE

Anhand einer Literaturrecherche sollte ein Überblick über den derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik in der Computertomographie (CT) gegeben werden. Hierzu sollte die relevante internationale Literatur mindestens der letzten 10 Jahre nach den entsprechenden Themen durchsucht werden.

### 2.2 DATENAKQUISITION

Ein Ziel der Studie war die Akquisition von mindestens 300 Bilddatensätzen aus etwa 50 verschiedenen radiologischen Einrichtungen. Hierbei sollten CT-Datensätze von Untersuchungen des Schädels, des Thorax, des Abdomens und einer typischen kinderradiologischen Untersuchung erfasst werden, wie sie durch (a) CT-Geräte der vorhergehenden Generationen ohne Dosismodulation oder iterative Rekonstruktion, (b) CT-Geräte mit automatischer Dosismodulation, (c) CT-Geräte der jüngsten Generation mit Dosismodulation und iterativer Rekonstruktion sowie (d) Dual-Energy-CTs aufgezeichnet wurden.

### 2.3 ANALYSE VON STRAHLENDOSIS UND BILDQUALITÄT

Zur Illustration der Auswirkung der modernen CT-Techniken auf den Dosisbedarf der einzelnen CT-Untersuchungen erfolgte eine Abschätzung der im Rahmen der einzelnen CT-Untersuchungen bei den Patienten applizierten Effektivdosen. Diese sollten objektiven sowie subjektiven Bildqualitätskriterien gegenübergestellt werden.

### 2.4 BEWERTUNG DER CT-TECHNIKEN HINSICHTLICH VON STRAHLENDOSIS UND BILDQUALITÄT

Zum Abschluss der Studie sollte in Gestalt einer synoptischen Betrachtung von Bildqualität und Strahlendosis eine Bewertung des Dosisreduktionspotentials der einzelnen CT-Techniken vor dem Hintergrund einer klinisch adäquaten Bildqualität erfolgen.

### 3. METHODIK

#### 3.1 LITERATURRECHERCHE

Die Literaturrecherche sollte über die allgemein zugänglichen nationalen und internationalen Literaturdatenbanken wie Pubmed, MedPilot, DIMDI, Cochrane IEEE nach den Schlagwörtern „Strahlenexposition“ und „Computertomographie“ (radiation exposure & computed tomography) aus den letzten 10 Jahren durchgeführt werden.

#### 3.2 DATENAKQUISITION

Unter Zuhilfenahme der ärztlichen Stellen und einer Internet-Recherche sollten zahlreiche radiologische Einrichtungen in Deutschland identifiziert und in Form einer schriftlichen Anfrage bezüglich einer möglichen Teilnahme an der Studie kontaktiert werden.

#### 3.3 ANALYSE VON DOSIS UND BILDQUALITÄT

##### 3.3.1 Dosisrekonstruktion

Die Rekonstruktion der im Rahmen der betrachteten CT-Untersuchungen beim Patienten applizierten Strahlendosen sollte durch ein etabliertes Dosisrekonstruktionsverfahren erfolgen.

##### 3.3.2 Analyse der Bildqualität

Die Analyse der objektiven und der subjektiven Bildqualität der CT-Datensätze sollte in Abhängigkeit von der Art der CT-Untersuchung in ausgewählten anatomischen Strukturen durch Messung des Pixelrauschens erfolgen (Tabelle 1).

**Tabelle 1: Zur Ermittlung des Pixelrauschens herangezogene anatomische Strukturen**

| CT-Untersuchung            | Axiale Position des Schnittbildes | Betrachtete anatomische Strukturen                                                                   |
|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Schädel                    | Seitenventrikel                   | Graue Substanz<br>Liquor                                                                             |
| Thorax /<br>CTA-Pulmonalis | Truncus pulmonalis                | Aorta descendens<br>thorakales Fettgewebe<br>thorakales Muskelgewebe                                 |
| Abdomen /<br>CTA-Aorta     | Milzhilus                         | Aorta abdominalis<br>abdominales Fettgewebe<br>abdominales Muskelgewebe<br>Lebergewebe<br>Milzgewebe |

### 4. DURCHFÜHRUNG

#### 4.1 LITERATURRECHERCHE

Die Literaturrecherche wurde in Abweichung von der ursprünglich geplanten Methodik im Wesentlichen durch die manuelle Durchsicht der einschlägigen Fachzeitschriften vorgenommen, da sich eine Recherche über die allgemein zugänglichen nationalen und internationalen Literaturdatenbanken wie Pubmed, MedPilot, DIMDI, Cochrane IEEE nach den Schlagwörtern „Strahlenexposition“ und „Computertomographie“ (radiation exposure & computed tomography) aus den letzten 10 Jahren auf Grund der äußerst zahlreichen Literaturstellen zu diesem Thema und der geringen Spezifität der Suchalgorithmen als nicht effizient erwies. Die Titel und Abstracts wurden entsprechend ihrer Relevanz für das Projekt gesichtet, speziell in Hinblick auf Arbeiten zu CT-Dosisumfragen (CT dose surveys), zur automatischen Dosismodulation (automated exposure control) und zur iterativen Bildrekonstruktion (iterative reconstruction). Wie ein Vergleich mit Übersichtsartikeln zeigte, dürfte auf diese Weise ein repräsentativer Überblick über den Status der internationalen Literatur geschaffen worden sein.

## **4.2 DATENAKQUISITION**

Die im Bundesgebiet mit den Schwerpunkten Bayern und Hamburg aufgefundenen radiologischen Einrichtungen wurden abweichend von der ursprünglichen Planung telefonisch kontaktiert; Auswahl und Anonymisierung der Datensätze bzw. die Aufwandsentschädigung wurden in aller Regel persönlich vor Ort bzw. in Barzahlung vorgenommen. Auf diese Weise war eine effiziente Abwicklung der Datenakquisition für alle Beteiligten möglich. Sämtliche Bilddatensätze wurden im DICOM-Bilddaten-Standard übernommen, wodurch semi-automatische rechnergestützte Dosisrekonstruktionen und Bildqualitätsanalysen möglich wurden.

## **4.3 ANALYSE VON DOSIS UND BILDQUALITÄT**

### **4.3.1 Dosisrekonstruktion**

Die Rekonstruktion der im Rahmen der betrachteten CT-Untersuchungen beim Patienten applizierten Strahlendosen erfolgte durch die bundesweit etablierte Dosisrekonstruktions-Software CT-EXPO, Version 2.3.1 (Programmautoren: Dres. G. Stamm und D. Nagel). Zur Anbindung der Software an die in DICOM-Format vorliegenden CT-Bilddatensätze wurde vom Autor ein Algorithmus entwickelt, welcher die im DICOM-Header der Bilddatensätze enthaltene Information unmittelbar an CT-EXPO weiterleitete. Da die bei Patienten klinisch applizierte Strahlendosis nicht nur von der gewählten CT-Technik, sondern ganz wesentlich auch vom Durchstrahlungsdurchmesser des Patienten abhängig ist, wurde der effektive Diameter des Patienten in der thoracoabdominalen Region als Einflussparameter für die Strahlendosis herangezogen. Zur Berücksichtigung des Einflusses der bei Röhrenstrommodulation resultierenden individuellen Röhrenstromprofile der einzelnen Patienten auf deren Strahlenexposition wurde ein rechnergesteuerter Transfer der in den DICOM-Headern der Einzelschnittbilder dokumentierten und unter Röhrenstrommodulation variablen mAs-Produkte in den CT-EXPO-Algorithmus vorgenommen.

### **4.3.2 Analyse der objektiven Bildqualität**

Die Ermittlung der objektiven Bildqualität erfolgte für jede Scanserie in Abhängigkeit von der anatomischen Region der CT-Untersuchung durch Messung des Pixelrauschens in den in Tabelle 1 aufgeführten anatomischen Strukturen. Als Maß für das Pixelrauschen wurde die Standardabweichung der Hounsfield-Werte der Bildpixel in einem kreisförmig oder hilfsweise ellipsenförmig definierten Pixelareal des jeweils betrachteten Gewebebereiches herangezogen. Als weitere Parameter der Bildgüte wurden das Signal-Rausch-Verhältnis (signal-to-noise ratio, SNR) und das Kontrast-Rausch-Verhältnis (contrast-to-noise ratio, CNR) ermittelt. Das SNR wurde in der Schädelregion bzw. in der Rumpfregeion durch das Verhältnis aus dem Hounsfield-Wert in der weißen Substanz bzw. in den Lumina der Aorta thoracalis und der Aorta abdominalis ermittelt. Das CNR wurde in der Schädelregion bzw. in der Rumpfregeion als Differenz der Hounsfield-Werte in der weißen Substanz bzw. in den Lumina der kontrastmittelführenden Aorta thoracalis und der kontrastmittelführenden Aorta abdominalis und dem Hounsfield-Wert im Liquor bzw. im Muskelgewebe der Thoraxwand und des Abdomens errechnet, jeweils bezogen auf die mittlere Standardabweichung des Hounsfield-Wertes in der den Patienten umgebenden Luft.

## **5. ERGEBNISSE**

### **5.1 LITERATURRECHERCHE**

Insgesamt wurden in der internationalen Literatur rund 800 Beiträge mit Bezug zum Thema der Studie aufgefunden. Fachzeitschriften, in welchen eine hohe Zahl von Beiträgen aufgefunden wurde, werden in Tabelle 2 aufgeführt.

Die Datenbasis enthält über 600 Beiträge zur Strahlenexposition des Erwachsenen in der CT. Hiervon wurden bisher folgende Arbeiten den CT-Techniken bzw. den CT-Protokollen näher zugeordnet (Tabelle 3).

**Tabelle 2: Auswahl der in der Literaturrecherche berücksichtigten Fachzeitschriften**

| Zeitschrift                                                                                                                                                           | Geprüfter Zeitraum* | Anzahl Artikel | Anzahl Artikel (%) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| American Journal of Radiology                                                                                                                                         | 01/2000 - 03/2014   | 141            | 18                 |
| Radiation Protection Dosimetry                                                                                                                                        | 01/1980 - 03/2014   | 103            | 13                 |
| European Radiology                                                                                                                                                    | 01/1991 - 03/2014   | 77             | 10                 |
| Radiology                                                                                                                                                             | 01/1998 - 03/2014   | 71             | 9                  |
| British Journal of Radiology                                                                                                                                          | 01/1928 - 03/2014   | 70             | 9                  |
| European Journal of Radiology                                                                                                                                         | 01/1990 - 03/2014   | 54             | 7                  |
| Pediatric Radiology                                                                                                                                                   | 01/1973 - 03/2014   | 52             | 6                  |
| Medical Physics                                                                                                                                                       | 01/1974 - 03/2014   | 41             | 5                  |
| Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen (RöFo)                                                                                                               | 01/1949 - 03/2014   | 39             | 5                  |
| Acta radiologica                                                                                                                                                      | 01/1987 - 03/2014   | 20             | 2                  |
| Health Physics                                                                                                                                                        | 01/1999 - 02/2014   | 18             | 2                  |
| Physics in Medicine and Biology                                                                                                                                       | 01/1956 - 03/2014   | 12             | 1                  |
| * Die im Rahmen der Fragestellung des Projektes irrelevanten Jahrgänge waren bereits in anderem Zusammenhang bezüglich strahlendosimetrischer Themen überprüft worden |                     |                |                    |

**Tabelle 3: Thematik der wissenschaftlichen Publikationen**

| Arbeiten                                                                 | Anzahl allgemein* | Anzahl Pädiatrie* |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|
| zu Referenzdosiswerten                                                   | 89                | 20                |
| mit dem Charakter einer Übersichtsarbeit                                 | 110               | 20                |
| über Abschirmungsmethoden                                                | 31                | 9                 |
| über Röhrenspannungsreduktion                                            | 43                | 6                 |
| zur EKG-Triggerung                                                       | 45                | 6                 |
| zur automatischen Röhrenstrommodulation                                  | 57                | 14                |
| zur iterativen Rekonstruktion                                            | 52                | 5                 |
| zu High-Pitch-Verfahren                                                  | 16                | 1                 |
| zur Dual-Energy-CT                                                       | 9                 | 0                 |
| zur Schädel-CT                                                           | 23                | 14                |
| zur Thorax-CT                                                            | 17                | 9                 |
| zur Abdomen-CT und Becken-CT                                             | 13                | 4                 |
| zur CT-Angiographie                                                      | 100               | 9                 |
| * auf Grund thematischer Überschneidungen sind Mehrfachnennungen möglich |                   |                   |

## 5.2 DATENBESTAND

Nach Abschluss der Datenakquisition und Ausschluss der für die Studie als nicht geeignet betrachteten Datensätze insbesondere pädiatrischer CT-Untersuchungen lagen insgesamt 280 CT-Datensätze von 54 an der Studie teilnehmenden radiologischen Einrichtungen vor (Tabelle 4).

Tabelle 4: Datenbestand der CT-Studie

| Untersuchungsregion | konventionell | Röhrenstrommodulation | iterative Rekonstruktion | Dual-Energy-Technik | Summe      |
|---------------------|---------------|-----------------------|--------------------------|---------------------|------------|
| Schädel             | 39            | 11                    | 9                        | 8                   | 67         |
| Thorax              | 8             | 45                    | 1                        | 18                  | 72         |
| Abdomen             | 6             | 50                    | 0                        | 27                  | 83         |
| CTA                 | 9             | 31                    | 0                        | 18                  | 58         |
| <b>Summe</b>        | <b>62</b>     | <b>137</b>            | <b>10</b>                | <b>71</b>           | <b>280</b> |

### 5.3 EFFEKTIVER DIAMETER DER PATIENTEN

Auf Grund der exponentiellen Beziehung zwischen effektivem Diameter des Patienten und der im Rahmen einer CT-Untersuchung beim Patienten applizierten Strahlendosis stellt der effektive Diameter eine wesentliche Determinante der Strahlenexposition dar. Wie gezeigt werden konnte, waren entgegen der Erwartung die medianen effektiven Diameter bei den einzelnen Untersuchungstechniken nicht gleich verteilt; die höchsten bzw. niedrigsten medianen effektiven Diameter wiesen Patienten auf, die unter Konstantstromtechnik bzw. unter Röhrenstrommodulation mit iterativer Rekonstruktion untersucht wurden. Als signifikant erwies sich dieser Zusammenhang indessen lediglich bei der CT-Untersuchung des Abdomens. Obgleich diese Korrelation als rein zufällig zu betrachten ist, muss sie bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

### 5.4 EXPOSITIONSPARAMETER

#### 5.4.1 Röhrenspannung

Die Wahl der mittleren Röhrenspannung erfolgte deutlich in Abhängigkeit von der CT-Technik; sie wurde bei Einsatz der iterativen Rekonstruktion in der Regel niedriger gewählt als bei den anderen CT-Techniken, wodurch eine Dosisreduktion mit dem Quadrat der Röhrenspannungsverminderung zu erzielen ist. Allerdings konnte lediglich bei der CT-Untersuchung des Schädels eine signifikante Abhängigkeit der Röhrenspannung von der CT-Technik festgestellt werden.

#### 5.4.2 Mittlerer Röhrenstrom

Die Wahl des mittleren Röhrenstromes erfolgte bei allen CT-Untersuchungen mit Ausnahme der CT-Untersuchung des Abdomens nahezu unabhängig von der CT-Technik; so erfolgte in Verbindung mit Röhrenstrommodulation und iterativer Rekonstruktion nur bei der CT-Untersuchung des Abdomens eine signifikante Verwendung niedrigerer mittlerer Röhrenströme. Offensichtlich wurde die bei der iterativen Rekonstruktion mögliche Dosisreduktion im Wesentlichen durch die Einstellung niedrigerer Röhrenspannungen aber nicht durch die Wahl niedrigerer mittlerer Röhrenströme bewirkt.

Allerdings erfolgte aber durchaus eine Adaptation des mittleren Röhrenstromes an den effektiven Diameter des Patienten in Abhängigkeit von der CT-Technik. Bei Anwendung der Konstantstromtechnik war die Abhängigkeit des mittleren Röhrenstromes vom effektiven Diameter am stärksten, bei der Anwendung der Röhrenstrommodulation in Verbindung mit iterativen Verfahren am schwächsten ausgeprägt. Dieser Zusammenhang liefert einen Hinweis auf die offensichtliche Leistungsfähigkeit der iterativen Rekonstruktion vornehmlich bei adipösen Patienten.

#### 5.4.3 Pitch-Faktor

Da bei gegebener Schichtdicke und gegebenem Dosisbedarf einer CT-Untersuchung eine Erhöhung des Pitch-Faktors eine Erhöhung des mittleren Röhrenstromes erfordert oder mit einer Erhöhung des Bildrauschens einhergeht, würden iterative Verfahren prinzipiell die Erhöhung des Pitch-Faktors und damit die Durchführung schnellerer CT-Untersuchungen ermöglichen. Indessen wurde von dieser Möglichkeit offensichtlich kein Gebrauch gemacht, im Gegenteil schien sogar speziell in Verbindung mit iterativen Verfahren ein geringerer Pitch-Faktor angewandt zu werden als bei CT-Untersuchungen ohne iterative Verfahren unter Konstantstromtechnik.

### 5.5 STRAHLENEXPOSITION

Zur Charakterisierung der Strahlenexposition des Patienten wurden der Volumen-CTDI (Computed Tomographic Dose Index), der SSDE (Size Specific Dose Estimate) und die Effektive Dosis verwendet. Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Rekonstruktion der Effektiven Dosis dargestellt werden; Tabelle 5 zeigt die Perzen-

tile sowie die Mittelwerte (MW) der effektiven Dosis bei den CT-Untersuchungen des Schädels, des Thorax, des Abdomens sowie bei der CT-Angiographie der Aa. Pulmonales unter Konstantstromtechnik (K), Röhrenstrommodulation (RM) und Iterativer Rekonstruktion (IR).

**Tabelle 5: Effektive Dosis unter den verschiedenen CT-Techniken (Perzentilen)**

| Perzentile    | Effektive Dosis (mSv) |     |          |        |      |          |         |      |          |                |     |          |
|---------------|-----------------------|-----|----------|--------|------|----------|---------|------|----------|----------------|-----|----------|
|               | Schädel               |     |          | Thorax |      |          | Abdomen |      |          | CTA-Pulmonalis |     |          |
|               | K                     | RM  | RM<br>IR | K      | RM   | RM<br>IR | K       | RM   | RM<br>IR | K              | RM  | RM<br>IR |
| <b>90 %</b>   | 4,8                   | 4,4 | -        | 24,0   | 10,2 | 13,7     | -       | 17,5 | 17,9     | -              | 9,8 | 9,5      |
| <b>75 %</b>   | 4,0                   | 4,1 | 4,4      | 13,0   | 8,1  | 8,2      | 19,5    | 12,6 | 10,0     | 11,0           | 7,8 | 6,3      |
| <b>50 %</b>   | 3,0                   | 3,5 | 2,8      | 10,5   | 6,2  | 5,8      | 15,4    | 8,4  | 5,4      | 8,2            | 5,6 | 5,0      |
| <b>MW</b>     | 3,3                   | 3,0 | 3,1      | 10,4   | 6,7  | 6,2      | 18,1    | 9,8  | 8,3      | 8,5            | 5,5 | 5,0      |
| <b>25 %</b>   | 2,2                   | 1,8 | 1,8      | 4,9    | 4,3  | 2,8      | 11,3    | 5,4  | 4,0      | 6,1            | 3,3 | 2,7      |
| <b>10 %</b>   | 1,9                   | 1,3 | -        | 2,1    | 2,7  | 2,0      | -       | 4,0  | 3,3      | -              | 1,3 | 1,9      |
| <b>Serien</b> | 50                    | 12  | 10       | 10     | 70   | 22       | 8       | 110  | 49       | 5              | 23  | 12       |

Demnach erlaubte die Röhrenstrommodulation bei den CT-Untersuchungen des Thorax bzw. des Abdomens eine statistisch signifikante bzw. statistisch hochsignifikante Reduktion der medianen effektiven Dosis um jeweils etwa 40 % und bei der Pulmonalis-Angiographie eine nicht signifikante Dosisreduktion um rund 30 %. Der Einsatz der iterativen Rekonstruktion ermöglichte bei der CT-Untersuchung des Thorax bzw. bei der Pulmonalis-Angiographie eine statistisch nicht signifikante bzw. statistisch signifikante Reduktion der medianen effektiven Dosis um jeweils etwa 40 % und bei der CT-Untersuchung des Abdomens eine statistisch hochsignifikante Dosisreduktion um über 70 %. Hingegen wirkten sich die unterschiedlichen CT-Techniken auf die Reduktion der effektiven Dosis bei der CT-Untersuchung des Schädels nahezu nicht aus (Tabelle 6).

**Tabelle 6: Relative Dosisreduktion (%) unter den einzelnen CT-Techniken**

| CT-Technik               | Reduktionsfaktor (%) |        |         |                |
|--------------------------|----------------------|--------|---------|----------------|
|                          | Schädel              | Thorax | Abdomen | CTA-Pulmonalis |
| Konstantstromtechnik     | 0                    | 0      | 0       | 0              |
| Röhrenstrommodulation    | 0                    | 41     | 45      | 32             |
| iterative Rekonstruktion | 7                    | 45     | 75      | 39             |

## 5.6 OBJEKTIVE BILDQUALITÄT

### 5.6.1 Bildpixelrauschen

Bei keiner der CT-Untersuchungen führte die Röhrenstrommodulation zu einer statistisch signifikanten Abnahme des Bildpixelrauschens, vielmehr schien das Bildpixelrauschen in Übereinstimmung mit dem Funktionsprinzip der Röhrenstrommodulation im Wesentlichen konstant gehalten zu werden. Der Einsatz der iterativen Rekonstruktion hingegen bewirkte bei der CT-Untersuchung des Abdomens eine statistisch hochsignifikante und bei der Pulmonalis-Angiographie eine statistisch sehr signifikante Abnahme des Bildpixelrauschens. Da das Bildpixelrauschen mit steigendem Patientenvolumen und damit mit steigendem effektiven Durchmesser des Patienten tendenziell zunehmen muss, erwies sich bei Anwendung der Konstantstromtechnik die Abhängigkeit des Bildpixelrauschens vom Durchstrahlungsdurchmesser am stärksten und bei der Anwendung der Röhrenstrommodulation in Verbindung mit iterativen Verfahren am schwächsten ausgeprägt.

### 5.6.2 Signal-Rausch-Verhältnis und Kontrast-Rausch-Verhältnis

Während unter Verwendung der Röhrenstrommodulation und der iterativen Rekonstruktion bei den meisten CT-Untersuchungen eine Konstanzhaltung oder eine - statistisch nicht signifikante - Anhebung des Signal-Rausch-Verhältnisses beobachtet werden konnte, wurde bei der Pulmonalis-Angiographie eine statistisch nicht signifikante Verringerung des Signal-Rausch-Verhältnisses gefunden. Bei Anwendung der Röhrenstrommodulation und der iterativen Rekonstruktion konnte bei den meisten CT-Untersuchungen eine Kons-

tanthaltung des Kontrast-Rausch-Verhältnisses beobachtet werden; bei der CT-Untersuchung des Thorax bewirkte der Einsatz der Röhrenstrommodulation und der iterativen Rekonstruktion eine statistisch signifikante Anhebung des Kontrast-Rausch-Verhältnisses, bei der Pulmonalis-Angiographie zeigte sich bei Anwendung der iterativen Rekonstruktion eine paradoxe statistisch signifikante Verringerung des Signal-Rausch-Verhältnisses.

## **5.7 SUBJEKTIVE BILDQUALITÄT**

Die Beurteilung der subjektiven Bildqualität wurde von zwei unabhängigen Befundern anhand einer 5-Punkte-Likert-Skala (1 = hervorragende Bildqualität, 2 = gute Bildqualität, 3 = mittelmäßige Bildqualität, 4 = ausreichende Bildqualität, 5 = ungenügende Bildqualität) jeweils ohne Kenntnis der klinischen Indikationen und der durch die Studienteilnehmer erhobenen radiologischen Befunde vorgenommen. Bezüglich der Bildbewertung bestand kein wesentlicher Unterschied zwischen den Befundern, weswegen die subjektiven Bildqualitätsparameter im Folgenden den Mittelwert der Punktwertungen der beiden Befunder darstellen.

Eine statistisch signifikante Abhängigkeit der Qualität der Darstellung der untersuchten anatomischen Region von der eingesetzten CT-Technik konnte lediglich für die iterative Rekonstruktion bei der CT-Untersuchung des Abdomens und bei der Pulmonalis-Angiographie aufgefunden werden. Die mutmaßliche diagnostische Qualität des Gesamtbildes hingegen wies keine signifikante statistische Abhängigkeit von der CT-Technik auf. Bei den CT-Untersuchungen des Thorax erfolgte weitestgehend unabhängig von der gewählten CT-Technik in nahezu sämtlichen Fällen eine hervorragende Darstellung des Lungenparenchyms. Allerdings bewirkte die iterative Rekonstruktion nicht zwangsläufig eine verbesserte diagnostische Wertigkeit der Bild Datensätze.

Im Übrigen war eine Korrelation zwischen dem objektiv gemessenen Bildpixelrauschen und der subjektiven Beurteilung der Bildqualität festzustellen; diese Korrelation ist naturgemäß nicht von der Art der angewandten CT-Technik abhängig, wie auch eine weitergehende Analyse zeigte.

## **5.8 ZUSAMMENHANG ZWISCHEN DOSIS UND OBJEKTIVER BILDQUALITÄT**

Die zu erwartende negativ-lineare Korrelation zwischen Bildpixelrauschen und Strahlendosis zeigte sich lediglich bei der CT-Untersuchung des Schädels unter Röhrenstrommodulation sowie bei der CT-Pulmonalisangiographie unter Konstantstromtechnik und unter Röhrenstrommodulation. Bei der CT-Untersuchung des Abdomens war indessen eine positive lineare Korrelation unter Konstantstromtechnik nachweisbar, welche auf den bereits festgestellten Anstieg der Strahlendosis bzw. des Bildpixelrauschens mit dem effektiven Diameter des Patienten vor dem Hintergrund einer zunehmenden Insuffizienz der Feststromtechnik bezüglich einer Konstanzhaltung des Bildpixelrauschens bei zunehmendem effektiven Diameter des Patienten hinweist. In den meisten Fällen war keine eindeutige Korrelation zwischen Strahlendosis und Bildpixelrauschen erkennbar.

## **6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE**

Die Dosis durch radiographische Verfahren, insbesondere CT-Untersuchungen, stellt den weitaus größten Anteil der zivilisatorischen Strahlenexposition der Bevölkerung dar. Die Ergebnisse dieses Vorhabens zeigen das Dosisreduktionspotential neuer CT-Techniken auf und dienen dazu, dieses Dosisreduktionspotential beurteilen zu können und den Strahlenschutz für Patienten zu verbessern.

**Thema**

Untersuchung der Messmethoden und messtechnischen Eigenschaften von Messgeräten für Radon-220 (Thoron) und ihrer Eignung für den Einsatz in nationalen Erhebungsprogrammen

**Subject**

*Investigation of measurement methods and metrological characteristics of instruments for radon-220 (thoron) and their suitability for use in national survey programs*

**Kennzeichen**  
3614S20026

**Beginn**  
15.01.2015

**Ende**  
15.06.2015

**Fördermittel**  
EUR 59.323,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Helmholtz Zentrum München - Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH)

**Projektleitung**  
Dr. J. Tschiersch

**Fachbetreuung BfS**  
E. Foerster / SW 1.3

**verantwortlich für den Text**  
Dr. J. Irlinger

## 1. ZIELSETZUNG

Durch die neue EU-Richtlinie zum Strahlenschutz 2013/59/EU-RATOM könnte die Strahlenexposition durch das Radon-Isotop Radon-220 (im Folgenden als Thoron bezeichnet) Gegenstand strahlenschutzrechtlicher Regelungen werden. Während zur Verbreitung von Radon-222 (im Folgenden als Radon bezeichnet) in Deutschland ein großer Datensatz vorliegt, aus welchem sich eine durchschnittliche Radon-Konzentration von ca. 50 Bq/m<sup>3</sup> in Innenräumen ergibt, ist wenig über die Verteilung der Aktivitätskonzentration von Thoron in Gebäuden in Deutschland bekannt. Dies gilt folglich auch für die durch Thoron verursachte mittlere effektive Jahresdosis.

Für die Durchführung von Erhebungsmessungen, welche als Basis rechtlicher Regelungen dienen können, müssen daher geeignete Messmethoden und Instrumente verfügbar sein. Diese Arbeit gibt einen Überblick zum aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik sowie zu gängigen und angewandten Messmethoden und Messtechniken, welche zur Bestimmung der Exposition durch Thoron und dessen Folgeprodukte eingesetzt werden können. Darüber hinaus wurden Kriterien für die fachliche Bewertung von Messverfahren und Messgerätesystemen hinsichtlich deren Eignung zur Anwendung in nationalen Erhebungsprogrammen erarbeitet und kommerziell verfügbare Systeme dementsprechend bewertet.

Während der Projektlaufzeit wurde der Bericht um weitere Ergebnisse der Literaturrecherche ergänzt, welche im Laufe des Forschungsvorhabens durchgehend fortgesetzt wurde. In den betreffenden Kapiteln wurde dies entsprechend vermerkt. Unter anderem wurden die Hersteller von Messsystemen kontaktiert und die Messverfahren entsprechend einer entwickelten Bewertungsmatrix eingestuft, sowie die entsprechenden Geräte eingehend beschrieben und bewertet. Hieraus resultierte im Kontext mit der laufend ausgewerteten einschlägigen Literatur eine Fortschreibung des aktuellen Kenntnisstandes.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Ziel des Vorhabens war die Identifizierung von geeigneten Messgeräten zur Durchführung von Erhebungsmessungen der Thoron-Exposition. Die ermittelten Geräte sollten für Ihre Empfindlichkeit und systematische Unsicherheit solche Eigenschaften aufweisen, dass die zu erwartende Thoron-Konzentration innerhalb eines angemessenen Zeitrahmens und mit angemessener Unsicherheit ermittelt werden kann. Dabei können verschiedene Faktoren zu einer Verzerrung der Messung und daraus folgend zu nicht repräsentativen Ergebnissen führen. Dabei sind, je nach Messverfahren, Einflüsse zu beachten welche sich auf das Ansprechvermögen auf Grund physikalischer Effekte auswirken, beziehungsweise technisch oder organisatorisch bedingt sind. Die wichtigsten Faktoren wurden ermittelt und sind bei der Bewertung der verfügbaren Geräte mit eingeflossen. Die Verfügbarkeit und die Nutzungsbedingungen der Messgerätesysteme wurde recherchiert mit dem Ziel ausreichende Informationen für Typ- und Praxistest zur Verfügung zu stellen.

## 3. METHODIK

Im ersten Bearbeitungsschritt wurde der gegenwärtige Stand von Wissenschaft und Technik aufgearbeitet. Dazu gehörten unter anderem die Messgrößen und Messverfahren, welche für die Ermittlung der Exposition durch Thoron und dessen Folgeprodukte in Wohnungen und an Arbeitsplätzen relevant sind, sowie Anforde-

rungen an Messgeräte, die sich für die Messung der Exposition in nationalen Erhebungsprogrammen eignen. Ebenso wurden Einflussgrößen recherchiert, welche bei Messungen ausschlaggebend sind und vorliegende Bewertungsmaßstäbe, die dem Vorhaben zu Grunde gelegt werden können, ermittelt. Des Weiteren wurden auch Ergebnisse und wichtige Untersuchungen von anderen Stellen aufgeführt. Erstmals wurde anhand verfügbarer Daten eine Abschätzung des Beitrags durch Inhalation von Thoron und dessen Folgeprodukten zur Exposition durch ionisierende Strahlung in Wohnungen, an Arbeitsplätzen und im Freien auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland durchgeführt.

Im zweiten Schritt wurde anhand des Standes von Wissenschaft und Technik und der im Untersuchungsgebiet Deutschland zu erwartenden Aktivitätskonzentrationen von Thoron und dessen Zerfallsprodukten Kriterien für die fachliche Bewertung festgelegt. Als nächstes wurden potenzielle Anbieter von Messgerätesystemen ermittelt, sowie Informationen über Kosten und Konditionen für Miete und Kauf eingeholt. Die recherchierten Messverfahren und Messgerätesysteme wurden entsprechend der zuvor definierten Kriterien abgestuft nach messtechnischen und wirtschaftlich-organisatorischen Kriterien bewertet. Zur systematischen Bestimmung der Gewichtungsfaktoren wurde eine Bewertungsmatrix verwendet. Zur größtmöglichen Transparenz bei der abschließenden Bewertung der Messsysteme wurden für jedes Kriterium ein Notenbereich mit genauen Grenzen, beziehungsweise Eigenschaften definiert und ausführlich dargestellt.

## **4. DURCHFÜHRUNG**

Das Vorhaben war in 2 Arbeitspakete untergliedert:

- Aufarbeitung des gegenwärtigen Standes von Wissenschaft und Technik sowie Ermittlung verfügbarer Messsysteme zur Thoron-Expositionsbestimmung (AP 1)
- Erstellung einer Gewichtungs- und Bewertungsmatrix für die ermittelten Messverfahren und Messgerätesysteme (AP 2)

In einem ersten Bearbeitungsschritt wurde der gegenwärtige Stand von Wissenschaft und Technik für die Zwecke des Vorhabens aufgearbeitet. Dazu gehörten die Definition von Messgrößen, die für die Ermittlung der Exposition durch Radon-220 und dessen Folgeprodukte in Wohnungen und an Arbeitsplätzen benötigt werden und dazugehörige Messverfahren. Dabei galt es auch die Anforderungen an Messgeräte für die Ermittlung der Exposition durch Radon-220 und dessen Folgeprodukte zu ermitteln und Einflussgrößen zu identifizieren. Im nächsten Schritt wurden auf dem Markt verfügbare Messgerätesysteme für Radon-220 und dessen Folgeprodukte ermittelt, sowie wichtige Untersuchungen und Ergebnisse anderer Stellen (abgeschlossene sowie laufende Arbeiten) einbezogen. Auf Basis verfügbarer Daten wurde eine Abschätzung des Beitrags durch Inhalation von Radon-220 und dessen Folgeprodukten zur Exposition durch ionisierende Strahlung in Wohnungen, an Arbeitsplätzen und im Freien auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland durchgeführt. Im Rahmen des AP 1 wurde auch ein erstes Projektgespräch im Bundesamt für Strahlenschutz durchgeführt, um inhaltliche Details und Ziele des Vorhabens abzustimmen.

Im AP 2 wurde eine Charakterisierung, Prüfung und Bewertung der in AP 1 ermittelten Messverfahren und Messgerätesysteme durchgeführt. Dabei wurden bei den potenziellen Anbietern von Messgerätesystemen technische Daten und Informationen zu Kosten und Konditionen für Miete und Kauf der zu testenden Messgerätesysteme zum Zweck der Durchführung eines Typtests eingeholt. Zu diesem Zwecke wurde unter anderem die internationale Konferenz „Radon in the Environment“ (Krakau, Polen, 2015) besucht, auf der eine Vielzahl von kommerziellen Anbietern vertreten war. Die letztendliche Bewertung der Geräte beruht auf Kriterien, welche auf Grund der ermittelten Erkenntnisse aus dem Stand von Wissenschaft und Technik und der im Untersuchungsgebiet Deutschland zu erwartenden Aktivitätskonzentrationen von Radon-220 festgelegt wurden. Die gefundenen neuen Erkenntnisse und Ergebnisse wurden in bei einer Abschlusspräsentation am Bundesamt für Strahlenschutz in Berlin vorgestellt.

## **5. ERGEBNISSE**

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

Bei der Betrachtung der Thoron (Rn-220)-Innenraumkonzentration und der resultierenden Exposition des Menschen sind einige Besonderheiten und Unterschiede im Vergleich zu dessen verwandtem Isotop Radon (Rn-222) zu beachten. Die Diffusionslängen beider Isotope unterscheiden sich in Baumaterialien und Luft erheblich, wodurch für die Exhalation von Thoron meist nur die oberste Schicht des Baumaterials von wenigen Zentimetern Tiefe als Quellvolumen in Frage kommt. Im Innenraum angelangt zerfällt das radioaktive Edelgas

auf Grund seiner kurzen Lebensdauer in der Nähe des Eintrittsorts. Generell lässt sich ein exponentieller Abfall der Thoron-Gaskonzentration mit zunehmender Entfernung von diesem feststellen. Auf Grund dieser Tatsachen ist die Aussagekraft von Thoron-Gas-Messungen sehr eingeschränkt, da die ermittelte Aktivität vor allem von der Platzierung des Messsystems abhängt. Daher ist eine ähnliche Vorgehensweise wie bei Radon (Messungen der Gaskonzentration bei Annahme eines Gleichgewichtsfaktors) für Thoron nicht anwendbar, da Quellort und Verteilung von Thoron im Allgemeinen unbekannt sind. Im Gegensatz dazu sind die Folgeprodukte wegen ihrer längeren Lebensdauer homogen in Innenräumen verteilt und tragen auch den Hauptanteil zu Exposition bei. Deshalb kann für die Thoron-Expositionsbestimmung nur ein Messsystem empfohlen werden, welches in der Lage ist, die Folgeprodukt-Aktivitätskonzentration zu bestimmen.

Zur Qualitätssicherung auf dem Gebiet der Messung von Thoron und der Folgeprodukte ist zudem eine Kalibrierkammer mit einer Referenzatmosphäre unabdingbar. Zu diesem Zweck wurde an der Physikalischen Technischen Bundesanstalt (PTB) im Rahmen eines BFS-Projekts (St.Sch. 4453) ein Primärnormal für ein Thoron-Folgeprodukt-Referenzfeld entwickelt, welches den normativen Vorgaben entspricht und die Erzeugung definierter Aktivitätskonzentrationen und Umweltbedingungen erlaubt. Im Besonderen war es notwendig wichtige Einflussfaktoren/Umweltparameter zu variieren, wie z. B. die Luftfeuchte, Temperatur, Luftdruck, Aerosolteilchendichte und Verteilung. In der neuen Fassung der DIN 61577-4:2015-03 wurde festgelegt, dass in einem Referenzfeld die Umgebungs-Gammadosisleistung und der nichtangelagerten Anteil als vernachlässigbar zu betrachten sind, und somit nicht überwacht werden müssen. Der Service an der PTB zur Vorhaltung einer Primär- und Sekundärnormal-Messeinrichtung zur Rückführung und Qualitätssicherung wurde am 31.12.2014 eingestellt. Damit gibt es derzeit keine Möglichkeit in Deutschland Messgeräte für Thoron und dessen Folgeprodukte nach DIN 61577 zu kalibrieren.

Daher ist die Einrichtung einer den DIN 61577-4 Spezifikation folgenden Thoron-Referenzkalibrierkammer in einem nach ISO/IEC 17025 akkreditierten Labor Voraussetzung für die Überprüfung und Kalibrierung von Messgeräten zur Bestimmung der Thoron-Exposition.

## 5.2 DEFINITION UND GEWICHTUNG DER BEWERTUNGSKRITERIEN

Die Kriterien, welche für die abgestufte Bewertung der ermittelten Geräte verwendet werden, lassen sich im Wesentlichen in drei Kategorien aufteilen. Dabei handelt es sich um messtechnische und wirtschaftliche Kriterien, sowie um besondere organisatorische Anforderung im Hinblick auf den geplanten Einsatz bei nationalen Erhebungsmessungen. So gehören zu messtechnischen Kriterien unter anderem die Einflussfaktoren, Messgrößen, Nachweiseffektivität, Normenkonformität und der Nulleffekt. Die Kriterien für Erhebungsmessungen sind Bedienbarkeit, Betriebsdauer, Lautstärke, Manipulationsfestigkeit und mechanische Stabilität. Bei wirtschaftlichen Kriterien ist vor allem auf die Abwicklungs-, Kauf- und Mietkosten sowie die Verfügbarkeit und Reife zu achten.

Die Gewichtungsfaktoren legen eine relative Bedeutung fest, die den einzelnen Kriterien bei der Bewertung zukommen soll. Zur systematischen Bestimmung der Gewichtungsfaktoren wird eine Bewertungsmatrix verwendet. Sie erlaubt die Kriterien jeweils einzeln gegeneinander zu werten. Auf Grund der besonderen Anforderungen für ein Thoron-Expositions-Messsystem sind diese, vor allem im Hinblick auf die erforderlichen Typprüfungen, anhand der messtechnischen Kriterien zu bewerten. Daher wurden messtechnische und wirtschaftliche/technische Kriterien separat gewichtet. Dabei zeigte sich, dass vor allem die Messgröße, Empfindlichkeit und Messunsicherheit entscheidende Kriterien sind. In Summe sind allerdings die Abhängigkeiten der Empfindlichkeit eines Messsystems von Einflussfaktoren wie Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, Turbulenz und Aerosolkonzentration entscheidend, welche sich auf ca. 50% addieren.

## 5.3 ABGESTUFTE BENOTUNG DER MESSSYSTEME

Für die zurzeit auf dem Markt und in Entwicklung befindlichen Messverfahren lässt sich feststellen, dass zahlreiche Messsysteme zur Ermittlung der Thoron-Gas- oder Folgeproduktkonzentration zur Verfügung stehen. Diese unterscheiden sich dabei zum Teil erheblich im Messaufwand, Kosten und Aussagekraft. Die Mehrzahl der Geräte ist dabei für die Untersuchung wissenschaftlicher Fragestellungen entwickelt worden und bedarf daher geschulten Personals für deren Einsatz. Die Standardisierung der unterschiedlichen Verfahren und Messvorschriften sind mit DIN 61577, ISO 16641 sowie ISO 11665 größtenteils erfolgt. Dennoch zeigten sich bei Vergleichsmessungen von passiven Thoron-Detektoren zum Teil große Unterschiede zwischen Referenz- und der von den Geräten bestimmten Konzentration. Dies deutet auf merklich vorhandene Qualitätsdefizite bei den in der zitierten Veröffentlichung überprüften Messsystemen hin. Auch ist die Anwendbarkeit und Einhaltung der Messvorschriften bei Erhebungsmessungen kaum sicherzustellen und hat, im Gegensatz zu Radon-Innraummessungen, einen signifikanten Einfluss auf die Aussagekraft der ermittelten Werte.

Bei der durchgeführten abgestuften Bewertung der ermittelten Messsysteme kann von keinem Gerät eine sehr gute Endnote aber von 4 Messsystemen eine gute Erfüllung bei den messtechnischen Anforderungen erreicht werden. Diese Geräteklasse mit guter Erfüllung der messtechnischen Anforderung erreicht allerdings bei der Bewertung der organisatorischen und wirtschaftlichen Kriterien nur ausreichende bis befriedigende Endnoten, wohingegen kostengünstige Systeme bei den messtechnischen Anforderungen Defizite aufweisen. Dies liegt vor allem an der Ausrichtung der Geräte nach spezifischer Fragestellung, wodurch bei der Entwicklung entweder messtechnischen oder kostenbezogenen Kriterien Vorzug gegeben werden muss.

## **5.4 AUSBLICK UND EMPFEHLUNG**

Im nächsten Schritt sind die ermittelten Geräte einem Typ- und Praxistest zu unterziehen, um die von Herstellern und aus Publikationen ermittelten Daten zu verifizieren. Dafür benötigt es der Einrichtung einer Thoron-Kalibrierkammer welche den DIN 61577-4-Spezifikationen genügt und von einem nach ISO/IEC 17025 akkreditierten Labor betrieben wird. Dies ist eine nötige Voraussetzung für die Überprüfung und Kalibrierung der ermittelten Messgeräte zur Bestimmung der Thoron-Exposition.

Zusätzlich wird empfohlen, auf Basis der bereits vorhandenen Geräte geeignete Kandidaten weiterzuentwickeln, um eine gute bis sehr gute Erfüllung aller für Erhebungsmessungen erforderlichen Kriterien zu gewährleisten. Dabei sollte der Fokus im Besonderen auf der Entwicklung eines kompakten, aktiven und autonomen Messsystems liegen. Dabei ist folgendes zu den Kriterien zu beachten:

- kompakt: geringe Größe und Gewicht vereinfachen Versand, Handhabung und Anbringung des Messgerätes.
- aktiv: eine aktive Probenentnahme ist meist Voraussetzung für die Unabhängigkeit des Messsystems von Einflussparametern, wie zum Beispiel der Aerosolteilchendichte und Verteilung, und erlaubt oftmals eine erhöhte Sensitivität. Dabei ist allerdings auf einen geringen Stromverbrauch sowie geringe Lautstärke zu achten, welches sich eventuell durch die Verwendung von Piezo-Mikropumpen oder mittels elektrostatischer Abscheidesysteme realisieren lässt.
- autonom: die Messsysteme sollten, über einen längeren Zeitraum (1-6 Monate) ohne externe Stromversorgung betrieben werden können. Zudem bedarf es eines Systems, welches keinerlei Bedienoptionen bietet und betriebsbereit in den Versand gegeben werden kann. Alternativ könnte ein netzabhängiges Gerät mit Plug&Measure Betrieb realisierbar sein.

Als weiterer wichtiger Punkt ist natürlich der Kostenfaktor für ein solches Detektionssystem zu berücksichtigen. Dieser lässt sich aber unter realistischen Gesichtspunkten, auf Grund der erhöhten Anforderungen an die Messmethoden für die Bestimmung der Thoron-Exposition, nicht auf das Niveau von integrierenden Radon-Monitoren senken.

Unter Berücksichtigung der aufgeführten Punkte wird ein zeitnaher Typ- und Praxistest empfohlen, um die etwaige Eignung bereits verfügbarer und gut bewerteter Messgeräte besser bestimmen zu können. Dabei sollten auch die noch nicht kommerziell verfügbaren Prototypen mit einbezogen werden, um deren etwaiges Potential für Erhebungsmessungen abschätzen zu können. Sollten dabei sämtliche Geräte entsprechend der bisherigen Bewertung nur bedingt für Erhebungsmessungen geeignet sein, ist die oben erörterte Weiterentwicklung der Messgeräte anzuraten.

## **6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE**

Für die Durchführung von repräsentativen Erhebungsmessungen zur Ermittlung der Exposition durch Thoron an Arbeitsplätzen, in Wohnungen und anderen Gebäuden müssen geeignete Messmethoden und Messgeräte verfügbar sein. Die vorgelegte Erfassung und Bewertung der auf dem Markt verfügbaren und von in Entwicklung befindlichen Messgerätesystemen kann bei der weiteren Planung eines Typtests und eines Praxistests einbezogen werden. Erst danach können idealerweise geeignete Messgerätesysteme für Erhebungsmessungen empfohlen oder ein entsprechender Entwicklungsbedarf konkret aufgezeigt werden.

Aus fachlicher Sicht ist als nächster Schritt ein Typtest erforderlich, um die Einhaltung der Anforderungen an die Messgeräte gemäß Normenreihe IEC 61577 zu prüfen, da die hier vorgelegte Bewertung auf Herstellerangaben und Daten aus Publikationen beruhen. Für den Typtest muss noch eine geeignete Einrichtung zur Herstellung und Untersuchung definierter Thoron-Zerfallsprodukt-Referenzfelder zur Kalibrierung von Messgeräten vertraglich gebunden oder im BfS entwickelt werden, da die bisher durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt angebotene Leistung seit dem 1.1.2015 nicht mehr zur Verfügung steht.

**Themenbereich 03**

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

***Subject area 03***

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

|                                                                                                          |                                                  |                                                               |                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Thema</b><br>Entwicklung kardiovaskulärer Erkrankungen nach Strahlenexposition mit niedrigen Dosen    |                                                  |                                                               |                                      |
| <b>Subject</b><br><i>Development of cardiovascular diseases after low dose radiation exposure</i>        |                                                  |                                                               |                                      |
| <b>Kennzeichen</b><br>3611S30022                                                                         | <b>Beginn</b><br>01.12.2011                      | <b>Ende</b><br>30.04.2015                                     | <b>Fördermittel</b><br>EUR 469.001,- |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Helmholtz Zentrum München, Institut für Strahlenschutz, Neuherberg |                                                  |                                                               |                                      |
| <b>Projektleitung</b><br>PD Dr. H. Schöllnberger                                                         | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. A. Dehos / AG-SG | <b>verantwortlich für den Text</b><br>PD Dr. H. Schöllnberger |                                      |

## 1. ZIELSETZUNG

Am Institut für Strahlenschutz (ISS) des Helmholtz Zentrums München wurden mehrere aktualisierte Datensätze zu Erkrankungen bei den Majakarbeitern analysiert, die externer Gamma- und interner Alphastrahlung ausgesetzt waren. Es wurde der Einfluss von ionisierender Strahlung auf die Entstehung kardiovaskulärer Erkrankungen untersucht. Dabei wurden Methoden der empirischen und mechanistischen Modellierung angewendet.

Die untersuchten biologischen Endpunkte sind die Inzidenz und Mortalität durch Ischämische Herzerkrankungen (IHD) und zerebrovaskuläre Erkrankungen sowie die Inzidenz von atherosklerotisch verursachtem Schlaganfall. Am Institut für Strahlenbiologie (ISB) wurden Proteomanalysen von Gewebeproben exponierter Majakarbeiter durchgeführt mit dem Ziel, Marker für die Strahlenexposition zu finden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 ZIELE DER DATENANALYSE UND MODELLIERUNGEN AM ISS

- Analyse der Mortalitäts- und Inzidenzdaten für IHD
- Analyse der Mortalitäts- und Inzidenzdaten für zerebrovaskuläre Erkrankungen
- Analysen der Daten für die Inzidenz von atherosklerotisch verursachtem Schlaganfall mit einem mechanistischen stochastischen Modell für Atherosklerose

### 2.2 PROBENANALYSE AM ISB

In Kooperation mit dem Southern Urals Biophysics Institute (SUBI) wurden Gewebeproben aus den Herzen von Majakarbeitern, deren Todesursache eine IHD war, bei der Autopsie gesammelt und am ISB analysiert. Diese Arbeiter waren kumulativen Dosen von <100 mGy, zwischen 100-500 mGy und >500 mGy ausgesetzt. Die Kontrollpersonen waren nicht exponiert. Die Proben beinhalteten Teile des linken Ventrikels und der Koronararterie. Die Proteomuntersuchung wurde an allen Proben der Probanden individuell durchgeführt. Die Untersuchung war als Fall-Fall-Studie auszuführen, bei der alters-gematchte Repräsentanten der drei Expositionsgruppen verglichen wurden.

### 2.3 SOUTHERN URALS BIOPHYSICS INSTITUTE

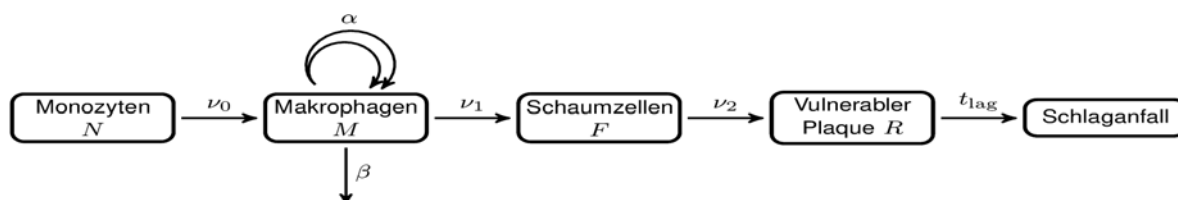
Die Hauptaufgabe bestand in der Erstellung und Formatierung von epidemiologischen Datensätzen sowie der Entnahme von Proben des menschlichen Herzens und deren Übersendung ans ISB. Die Kollegen vom SUBI waren darüber hinaus an Diskussionen beteiligt, die die Ergebnisse der Datenanalyse am ISS betrafen.

### 3. METHODIK

#### 3.1 DATENANALYSE UND MODELLIERUNGEN AM ISS

Die Arbeiten beinhalteten das Einlesen der Daten und die Anpassung des am ISS vorhandenen C++-Codes (MECAN), das Durchführen von Plausibilitätschecks der Daten und die Wiederholung der Analyse von Dr. Azizova (SUBI) sowie einen Ergebnisvergleich. Darüber hinaus musste eine passende parametrische Baseline-Funktion entwickelt werden, die zum einen die Daten möglichst gut beschreibt, jedoch nicht überparametrisiert ist. Dieses altersabhängige Modell wurde mit zahlreichen verschiedenen Dosiswirkungsmodellen (Linear no-threshold (LNT) Modell, verschiedene Stufenmodelle und andere nichtlineare Modelle) entweder als excess relative risk (ERR) oder als excess absolute risk (EAR) Modell kombiniert und an die verschiedenen Daten angepasst. Mit Hilfe der MECAN-Software wurde für die verschiedenen ERR- und EAR-Modelle die Likelihood berechnet. Die Maximierung der Likelihood erfolgte mit Hilfe des externen Programmpakets MINUIT. Da bei den Majakarbeitern individuelle Informationen vorliegen, wurden Analysen mit der individual likelihood durchgeführt. Es wurden auch verschiedene Dosiswirkungsmodifikatoren getestet. Diese Vorgehensweise führte für jeden untersuchten Datensatz zu einem Satz von nicht genesteten Modellen, die diese Daten alle ungefähr gleich gut beschreiben. Diese Modelle wurden dann mit Hilfe der Multi-Model Inference Methode überlagert.

Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung des mechanistischen Atherosklerose Modells. Die analytische Lösung des Modells wurde in die MECAN-Software implementiert. Somit konnte das Modell an die Daten für atherosklerotisch verursachten Schlaganfall angepasst werden.



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung des Modells für Atherosklerose. Die kleinste Einheit des Modells ist ein Monozyt (N), der nach Eindringen in die Arterienwand in einen Makrophagen (M) umgewandelt wird und nach Aufnahme von Cholesterin zu einer Schaumzelle (F) wird. Daraus entsteht mit der Übergangsrate  $\nu_2$  ein atherosklerotischer Plaque (R) und mit einer Verzögerungszeit  $t_{lag}$  ein Schlaganfall oder Herzinfarkt. Makrophagen können sich symmetrisch teilen mit Rate  $\alpha$  und absterben mit Rate  $\beta$ .

#### 3.2 PROTEOMANALYSEN (ISB)

Die Labeling-Methode für die Proteinanalyse der Gewebeproben wurde anhand der drei Dosisgruppen gewählt. Es wurde die Triplex-Isotope-Coded-Protein-Labeling-(ICPL)-Methode gewählt, um alle drei Proben im gleichen Durchlauf vergleichen zu können. Im ISB Labor wurde diese Methode erfolgreich optimiert. Dabei kam zwar anderes, aber durchaus vergleichbares biologisches Material zum Einsatz (humane umbilikale venöse Endothelzellen, HUVEC). Zusammen mit der Helmholtz Core Facility Proteomics wurde die Software so angepasst, dass mit ihr die Analysen erstellt werden konnten. Die Herzgewebeproben für die Proteomanalyse stammten von verstorbenen Majakarbeitern, die unterschiedliche Dosen ionisierender Strahlung erhalten hatten. Alle Proben wurden mit Hilfe der markierungsfreien massenspektrometrischen Quantifizierung analysiert, was die Erstellung eines individuellen und unabhängigen Proteomprofils jeder einzelnen Probe ermöglichte.

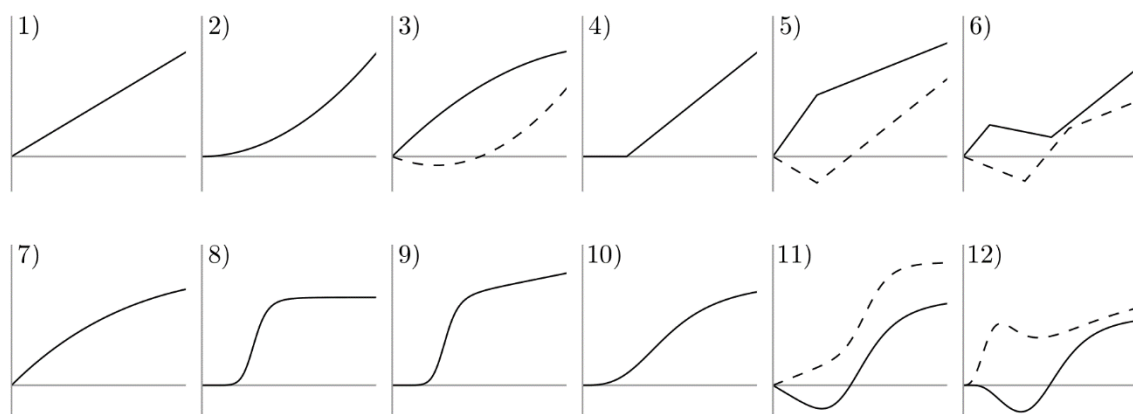
#### 3.3 EPIDEMIOLOGISCHE DATEN (SUBI)

Die Arbeit mit den epidemiologischen Datensätzen beinhaltete den Vergleich der Daten mit den primären Informationsquellen und die etwaige Korrektur in Bezug auf Vitalstatus, Sterbedatum, Datum und Ursache des Todes, Migrationsdatum, Inzidenz von Kreislauferkrankungen und Risikofaktoren für die Arbeiter aus der Studienkohorte, Stand Ende 2008. Die Entnahme der Gewebeproben aus den Herzen erfolgte nach den Standard Operating Procedures aus dem Jahr 2011.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 MODELLANALYSEN AM ISS

Frühere Analysen der Kollegen vom SUBI wurden wiederholt und die Ergebnisse miteinander verglichen. Da die Datensätze innerhalb der Zeit zwischen den Analysen am SUBI und der Übergabe ans ISS modifiziert wurden und den neuesten Daten auch ein neues Dosimetriesystem zu Grunde liegt, konnte keine exakte Übereinstimmung erwartet werden. Die gefundenen Abweichungen sind jedoch plausibel. Die Bestimmung passender parametrischer Baseline-Funktionen wurde ebenfalls erfolgreich durchgeführt. Es zeigten sich Schwierigkeiten in der Parametrisierung der sehr heterogenen Daten. Zum Beispiel deutet eine starke Datsabhängigkeit des Inzidenzrisikos auf eine sich verändernde medizinische Überwachung hin. Daraufhin wurden jene Daten ausgeschlossen, die sich auf Jahre mit zu starker Schwankung des Inzidenzrisikos beziehen. Es wurde sodann eine umfassende Analyse der Mortalitäts- und Inzidenzdaten für IHD durchgeführt. Hierfür wurde eine Analyse des zeitlichen Verlaufs des Risikos durch externe Gammabestrahlung mit verschiedenen Methoden wie dem *time-lagging*<sup>1)</sup> und der Dosiswirkungs-Modifizierung vorgenommen. Die Wechselwirkung von Strahlung mit anderen Risikofaktoren (Rauchen, Alkoholkonsum, Body Mass Index, Blutdruck) wurde analysiert. Die Form der Dosiswirkungsbeziehungen für externe Gammabestrahlung wurde mit 12 verschiedenen empirischen Modellen (Abbildung 2) durchgeführt. Das Risiko durch innere Bestrahlung aus der Plutoniuminhalation wurde ebenfalls ermittelt. Das Vorgehen bei den Daten für zerebrovaskuläre Erkrankungen war ähnlich. Hier galt es insbesondere zu testen, ob das sehr unterschiedliche Strahlenrisiko zwischen Inzidenz und Mortalität für zerebrovaskuläre Erkrankungen ein Artefakt der Daten sein könnte. Bei den Analysen mit dem Atherosklerose-Modell wurden zur korrekten Beschreibung der Altersabhängigkeit zusätzlich zur stochastischen Lösung auch die Möglichkeit der Parameter-Variabilität in Betracht gezogen, sowie altersabhängige Modellparameter getestet.



**Abbildung 2:** Darstellung der 12 verschiedenen Dosiswirkungsmodelle, die für die Analysen am ISS verwendet wurden. Die zusätzlichen gestrichelten Linien zeigen die Flexibilität von einigen dieser Funktionen. 1) LNT Modell, 2) quadratisches Modell, 3) Linear-quadratisches Modell, 4) Lineares Schwellenwertmodell, 5) Two-line-spline Modell, 6) Three-line-spline Modell, 7) Linear-exponentielles Modell, 8) Stufenmodell, 9) Step-linear Modell, 10) Sigmoid Modell, 11) Hormesis I Modell, 12) Hormesis II Modell.

### 4.2 PROBENAUFBEREITUNG (ISB)

Die vom SUBI erhaltenen Proben repräsentieren die drei Dosisgruppen <50 mGy, 50 mGy - 500 mGy und >500 mGy. Pro Person wurden vier Ampullen versendet: zwei mit Proben des linken Ventrikels und zwei mit Proben der Koronararterie. Auf der Grundlage einer bovinen Serumalbumin-(BSA)-Standardkurve wurde die Proteinkonzentration jeder Probe mittels der Bradford-Methode bestimmt. 50 µg der Proteine aus jeder Probe wurden isotopisch markiert. Vor der Typisierung und der Durchführung der Tandemmassenspektrometrie

<sup>1)</sup> Das sog. *time-lagging* ist eine Technik aus der Epidemiologie. Dabei werden jene absorbierten Dosen, die in den letzten Jahren vor einer festgestellten Erkrankung oder einem Todesfall akkumuliert wurden, nicht mehr berücksichtigt, da es unwahrscheinlich ist, dass diese Dosen die besagte Erkrankung bzw. den Todesfall verursacht haben.

wurden die Proben vermischt und auf ein 12 % SDS-PAGE<sup>1)</sup>-Gel aufgetragen. Mit Hilfe eines neuen Verfahrens zur filtergestützten Probenvorbereitung, mit dem die Effizienz der Proteinextraktion in der Proteomik verbessert werden kann, wurden die Proben verarbeitet und gereinigt. Dann wurden sie einer ESI-LC-MS/MS-Analyse<sup>2)</sup> unterzogen und das Proteomprofil unter Verwendung der Progenesis-Software quantifiziert. Schließlich wurden alle Daten in einer Bioinformatik-Analyse mit Software-Tools miteinander kombiniert.

### 4.3 ARBEITEN AM SUBI

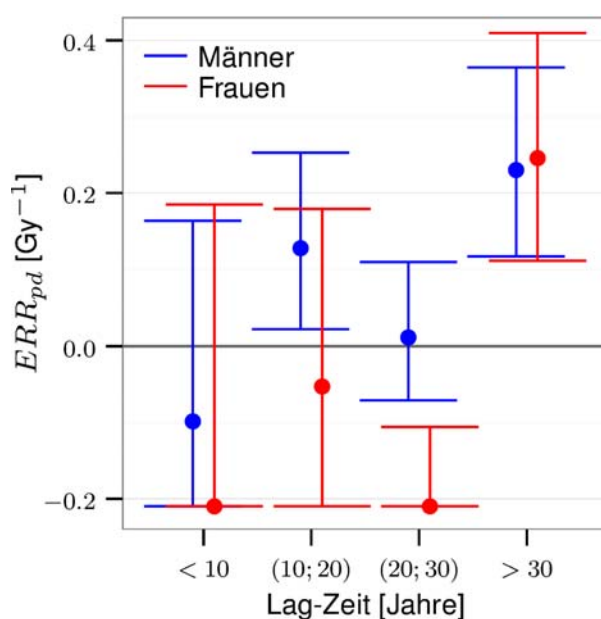
Es wurden Arbeiten an den neuen epidemiologischen Datensätzen und der Datenerhebung durchgeführt, basierend auf den primären medizinischen Quellen der Studienkohorte. Zahlreichen verstorbenen Personen (Majakarbeiter und Einwohner von Osjorsk) wurden Herzproben entnommen. Bei der Entnahme des Herzgewebes und der Einfrierprozedur wurde bei der Wahl der möglichen Spender auf die zuvor vereinbarten Ein- und Ausschlusskriterien geachtet.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 ANALYSEN AM ISS

Es wurden die Inzidenz- und Mortalitätsdaten für IHD bei Männern und Frauen analysiert und dabei die äußere Gamma- und die innere Alphabestrahlung berücksichtigt. Es wurden folgende Ergebnisse erzielt:

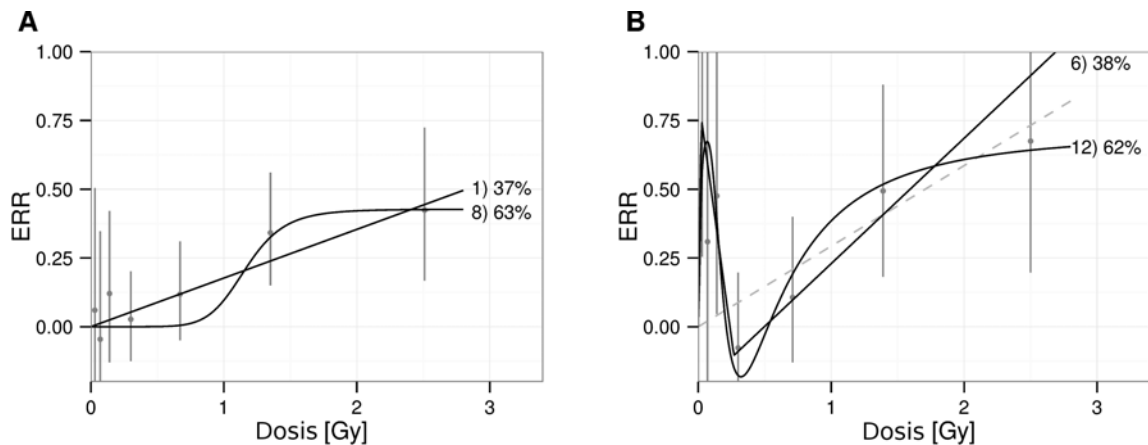
- Wesentliche schädigende Effekte durch die externe Gammabestrahlung treten bei IHD-Inzidenz erst nach mehr als 30 Jahren auf (Abbildung 3).
- In der Dosiswirkungsbeziehung für IHD-Inzidenz ist bei kleinen Dosen von externer Gammabestrahlung bei Frauen ein überraschend starker schädigender Effekt erkennbar - im Widerspruch zu Ergebnissen anderer epidemiologischer Kohorten (Abbildung 4).
- Für IHD-Mortalität bei Männern ergibt sich ein schwach signifikantes Risiko durch die externe Gammabestrahlung; bei Frauen konnte kein signifikantes Risiko nachgewiesen werden.
- Sowohl für die IHD-Inzidenz als auch für die Mortalität ergab sich kein signifikantes Risiko durch innere Bestrahlung.
- Die Dosiswirkungsbeziehung für die Inzidenz zerebrovaskulärer Erkrankungen verhält sich eher quadratisch als linear (Abbildung 5).
- Für die Mortalität konnte kein signifikanter Einfluss der Strahlung gefunden werden.



**Abbildung 3:** ERR pro Dosis externer Gammabestrahlung und 95 % Konfidenzintervalle für IHD-Inzidenz bei verschiedenen lag-Zeiten

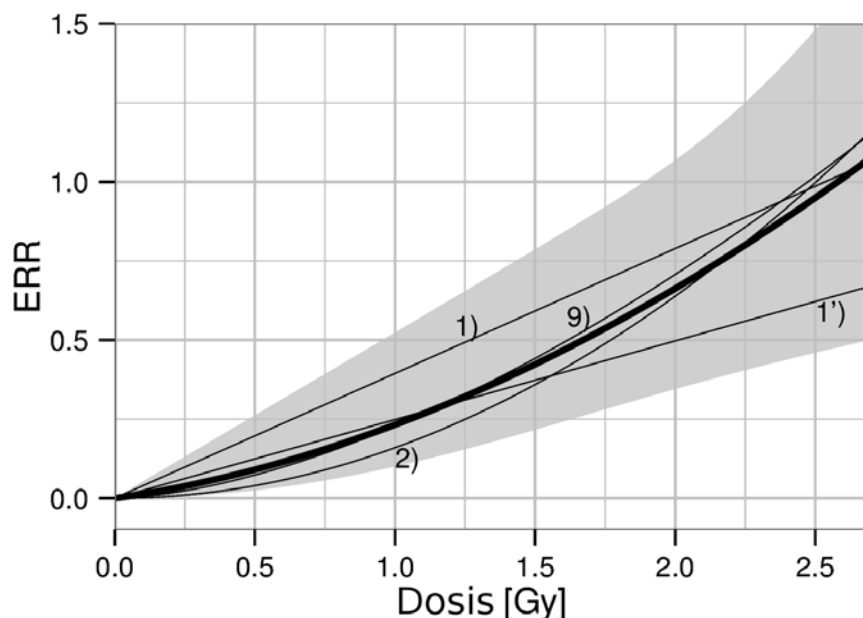
<sup>1)</sup> sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis

<sup>2)</sup> eine Form der Massenspektrometrie



**Abbildung 4:** ERR versus absorbierte Dosis der äußeren Gammabestrahlung für Inzidenz von IHD. (A) Männer; Zeit seit dem Medianwert der Bestrahlung  $\geq 30$  Jahre. (B) Frauen; Zeit seit dem Medianwert der Bestrahlung  $\geq 35$  Jahre. Die vertikalen Balken zeigen die 95 % Konfidenzintervalle der kategoriellen Analyse. Die dargestellten nicht genesteten Modelle sind mit einer Nummer versehen, die sich auf Abbildung 2 beziehen, und mit ihrem jeweiligen Akaike-Gewicht<sup>1)</sup>. Abbildung B zeigt gestrichelt das LNT-Modell als Referenz.

<sup>1)</sup> Das Akaike-Gewicht ist direkt proportional zu  $\exp(-AIC)$ . Das *Akaike Information Criterion* (AIC) ist folgendermaßen definiert:  $AIC = dev + 2 \times N_{par}$ . Hier steht *dev* für die *Deviance*, die ein Maß ist für die Güte des Fits (je kleiner die *Deviance* desto besser der Fit). Die Anzahl der Parameter eines Modells ist  $N_{par}$ . Ein zusätzlicher Parameter erhöht also den AIC-Wert um 2 Punkte. Je besser (kleiner) der AIC-Wert, desto höher das Akaike-Gewicht und desto stärker der Beitrag des betreffenden Modells zum Ergebnis aus der *Multi-model Inference*.

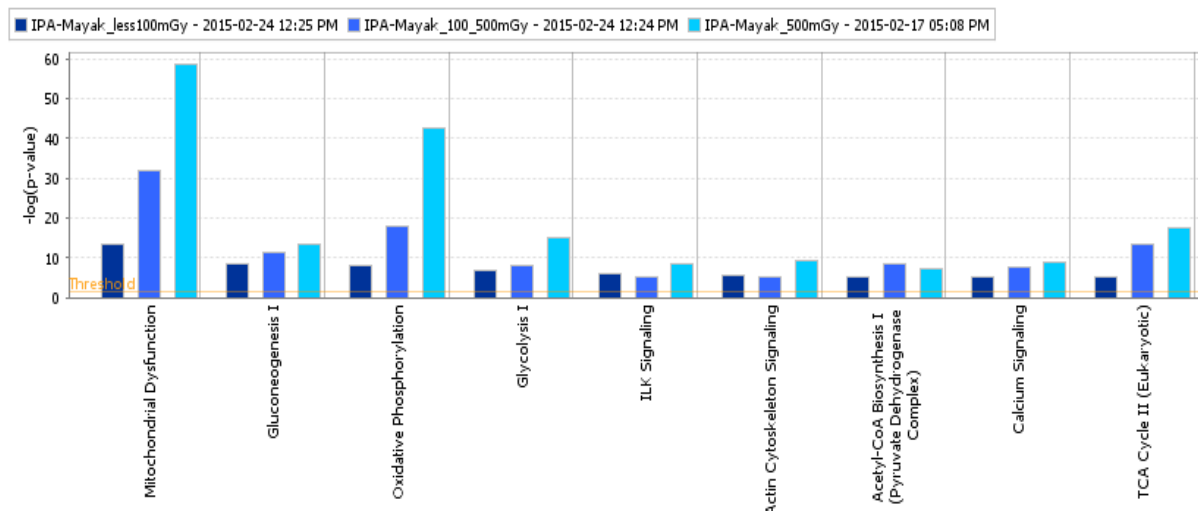


**Abbildung 5:** ERR für Inzidenz von zerebrovaskulären Erkrankungen für ein Alter von 60 Jahren. Die dargestellten nicht genesteten Modelle sind mit Nummern versehen, die sich auf Abbildung 2 beziehen. Das höchste Akaike-Gewicht besitzt mit 53 % das quadratische Modell. Die breite schwarze Linie mit dem grauen 95 % Konfidenzband stellt das Ergebnis aus der *Multi-model Inference* dar.

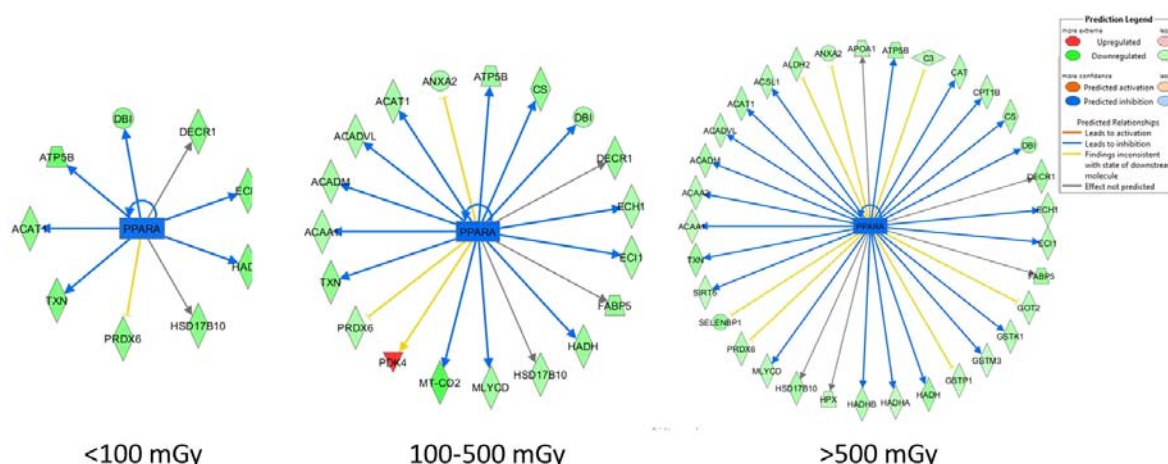
Während des vorliegenden Projekts wurde zum ersten Mal weltweit ein stochastisches mechanistisches Modell an einem großen strahlenepidemiologischen Datensatz getestet. Die erfolgreich durchgeführten Analysen haben gezeigt, dass das Modell mit den Daten der Majakarbeiter kompatibel ist. Das Modell konnte die Inzidenzdaten für atherosklerotisch verursachten Schlaganfall bei Männern ähnlich gut beschreiben wie die empirischen Modelle, wenn eine Altersabhängigkeit der biologischen Parameter zugelassen wurde. Für die vier in den Daten vorhandenen Risikofaktoren Schulausbildung (*graduation*), Bluthochdruck, Raucherstatus und Strahlung wurde untersucht, in welchen Stufen des Modells sie wirken. Es konnte gezeigt werden, dass Bluthochdruck am stärksten auf die Übergangsrate  $v_2$  (Abbildung 1) wirkt. In Diskussionen mit einem führenden Kardiologen und anhand von Fachliteratur wurde die Plausibilität dieses Ergebnisses herausgearbeitet. Weiterhin zeigte sich, dass jenes Modell den Vorzug hatte, in dem Strahlung die Übergangsrate  $v_1$  erhöhte. Es wurde jedoch kein eindeutiger Hinweis auf einen signifikanten Einfluss der Strahlung auf die Entstehung der untersuchten Krankheit gefunden.

## 5.2 PROTEOMVERÄNDERUNGEN (ISB)

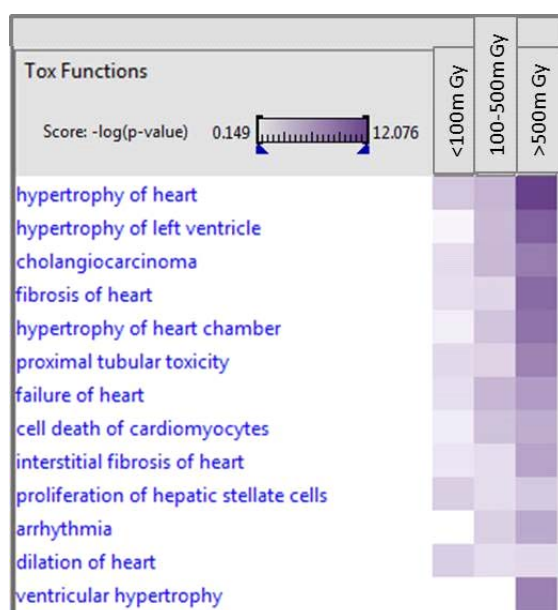
Die Quantifizierungsanalyse des Proteoms aus Gewebeproben des linken Ventrikels ergab signifikante Veränderungen der Herzstruktur in allen exponierten Gruppen, einschließlich der Gruppe, die der niedrigsten kumulativen Dosis (<100 mGy) ausgesetzt war. Die Ergebnisse deuten auf einen dosisabhängigen Anstieg des Levels einiger Proteine hin, die im Zusammenhang mit biologischen Signalwegen stehen, von denen man weiß, dass sie eine Rolle bei kardiovaskulären Erkrankungen spielen. Zu diesen betroffenen Signalwegen gehören die mitochondriale Dysfunktion, die Glukoneogenese, die oxidative Phosphorylierung, das Calcium-Signalling und der Citratzyklus. Das Proteom-Profil zeigt eine mitochondriale Dysfunktion und Beeinträchtigung in der Energieproduktion (Abbildung 6). Aus dem Proteom-Profil der deregulierten Proteine kann geschlossen werden, dass der Transkriptionsfaktor der peroxisom-proliferator-aktivierten Rezeptoren (PPAR-alpha) maßgeblich in allen exponierten Gruppen beeinträchtigt war, dass aber die Zahl der PPAR-alpha-Zielproteine sich dosisabhängig erhöhte (Abbildung 7). Der Großteil der deutlich veränderten Proteine stand im Zusammenhang mit verschiedenen Herzkrankheiten, einschließlich ventrikularer Dysfunktion und Herzhypertrophie (Abbildung 8).



**Abbildung 6:** Kanonische Pfadanalyse von verschiedenen regulierten Herzproteinen. Durch eine beeinträchtigte mitochondriale Funktion zeigt sich eine dosisabhängige Veränderung in den Hauptpfaden, die bei der Energieerzeugung eine Rolle spielen.



**Abbildung 7:** Die Mehrheit der deregulierten Proteine wird durch PPAR-alpha reguliert, einem Hauptregulator des Lipidmetabolismus im Herzgewebe. Die hochregulierten Proteine sind rot markiert, die herunterregulierten grün. Blaue Farbe zeigt Inhibition an.



**Abbildung 8:** Die veränderten Proteine kategorisiert in verschiedenen kardiotoxischen Gruppen. Der Score-Wert repräsentiert den negativen Logarithmus des p-Werts. Je größer der Score-Wert, umso größer die Anzahl der Proteine, die in einer bestimmten Toxizitätsgruppe identifiziert wurden und umso dunkler die violette Farbe.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Zwischen hohen Dosen ionisierender Strahlung und dem Auftreten von Herzkreislauferkrankungen besteht ein eindeutiger Zusammenhang. In diesem Vorhaben wurden die Daten, die an den Majak-Arbeitern erhoben wurden, mit verschiedenen statistischen Modellen neu analysiert. Außerdem wurden an Proben des Herzgewebes von verstorbenen Majak-Arbeitern Proteom-Analysen durchgeführt. Dabei wurden Veränderungen gefunden, die zu einer Beeinträchtigung der Funktion der Mitochondrien und der Energieproduktion führen. Diese Veränderungen spielen bei der Entstehung kardiovaskulärer Erkrankungen eine wichtige Rolle. Sie waren bereits bei Dosen unterhalb von 100 mGy festzustellen und die Ausprägung steigerte sich mit der Dosis.

Zusammengenommen zeigen die Ergebnisse, dass in dieser Kohorte auch unterhalb einer Strahlenexposition in Höhe von 1 Gy das Risiko für Herzkreislauferkrankungen erhöht ist. Für kardiovaskuläre Erkrankungen wurde anhand der Proteom-Analysen ein biologisch plausibler Mechanismus für deren Entstehung ermittelt. Diese Ergebnisse müssen anhand weiterer Untersuchungen verifiziert werden. Wenn sie bestätigt werden, müssen sie bei der Bestimmung des Strahlenrisikos und damit im Strahlenschutz berücksichtigt werden.

**Themenbereich 04**

**Medizinische Strahlenexposition / Röntgenverordnung**

***Subject area 04***

***Medical radiation exposures / X-ray Ordinance***

|                                                                                                                                       |                                                          |                                                                                    |                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Thema</b>                                                                                                                          |                                                          |                                                                                    |                                     |
| Analyse des Risikos für ischämische Herzerkrankungen in der kanadischen Fluoroskopie-Kohorte mit verschiedenen Dosis-Wirkungsmodellen |                                                          |                                                                                    |                                     |
| <b>Subject</b>                                                                                                                        |                                                          |                                                                                    |                                     |
| <i>Analysis of the risk for ischemic heart diseases in the Canadian Fluoroscopy Cohort with different dose-response models</i>        |                                                          |                                                                                    |                                     |
| <b>Kennzeichen</b><br>3615S42221                                                                                                      | <b>Beginn</b><br>20.07.2015                              | <b>Ende</b><br>19.11.2015                                                          | <b>Fördermittel</b><br>EUR 80.605,- |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Institut für Strahlenschutz (ISS), Helmholtz Zentrum München                                    |                                                          |                                                                                    |                                     |
| <b>Projektleitung</b><br>PD Dr. H. Schöllnberger                                                                                      | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. M. Schnelzer / AG-SG 1.3 | <b>verantwortlich für den Text</b><br>PD Dr. H. Schöllnberger,<br>Dr. M. Schnelzer |                                     |

## 1. ZIELSETZUNG

Ziel des Projektes war die Untersuchung des strahlenbedingten Risikos für Ischämische Herzkrankheiten (IHD) mit neueren Modellen und unter Berücksichtigung von Modell-Unsicherheiten anhand Daten einer Kohorte von 63.707 kanadischen Tuberkulose-Patienten (Fluoroskopie-Kohorte). Die Kohorte umfasst 24.932 Personen, die zur Behandlung der Tuberkulose mehrfach mit Röntgenstrahlung durchleuchtet (Fluoroskopie) worden waren und 38.775 nicht bestrahlte Patienten.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 REPRODUKTION DER ERGEBNISSE BISHER DURCHGEFÜHRTER ANALYSEN

Die Daten der Fluoroskopie-Kohorte waren bereits von Zablotska und Kollegen analysiert worden. Diese verwendeten für ihre Analysen die Methode der internen Poisson Regression zur Schätzung des zusätzlichen relativen Risikos (ERR), wobei die Modelle stratifiziert wurden. Dabei wurde auch die Baseline stratifiziert und zwar nach Geschlecht, Provinz, Diagnose, stage of tuberculosis (also eine Abstufung hinsichtlich des Schweregrads der Erkrankung) sowie hinsichtlich des erreichten Alters, der Kalenderzeit und der Dauer der fluoroskopischen Durchleuchtungen. Dies führte zu einem Baseline-Modell mit insgesamt 5967 freien Parametern, das multiplikativ mit einem linearen Modell verknüpft wurde unter Berücksichtigung einer Adjustierung für die Dosisfraktionierung, die einen wesentlichen Einfluss hat und deshalb berücksichtigt wurde. Diese Analyse sollte in dem Vorhaben zunächst reproduziert werden.

### 2.2 ENTWICKLUNG EINES GEEIGNETEN ALTERSABHÄNGIGEN PARAMETRISCHEN BASELINE-MODELLS UND ANALYSE DER KANADISCHEN FLUOROSKOPIE-KOHOORTE (IHD-MORTALITÄT) IN KOMBINATION MIT VERSCHIEDENEN PARAMETRISCHEN DOSIS-WIRKUNGSMODELLEN

Da aus den Arbeiten von Zablotska und Kollegen kein parametrisches Baseline-Modell als Ausgangspunkt der Analysen am ISS zur Verfügung stand, sollte ein geeignetes parametrisches Baseline-Modell entwickelt werden. Dieses ist mit einer Reihe von verschiedenen parametrischen Dosiswirkungsmodellen multiplikativ zu verknüpfen und an den Daten zu testen.

### 2.3 ANALYSE VON UNSICHERHEITEN EINSCHLIEßLICH DER MODELLUNSICHERHEITEN MITTELS MULTI-MODEL INFERENCE

Unsicherheiten, einschließlich der Modellunsicherheiten, sollten mittels der Methode der Multi-model Inference (MMI) untersucht werden. Dies ist eine statistische Methode, um verschiedene Dosiswirkungsmodelle entsprechend ihrer Anpassungsgüte mathematisch zu überlagern.

## 2.4 BEWERTUNG DER ERGEBNISSE IM HINBLICK AUF LIMITATIONEN (BIAS, CONFOUNDING) UND DISKUSSION IM KONTEXT ZU ANDEREN STUDIEN

Die Ergebnisse sollten im Hinblick auf die Erkenntnisse aus der früheren Analyse der Daten von Zablotska aber auch im Kontext zu Studien über andere Kohorten diskutiert werden.

## 3. METHODIK

Da aus den Arbeiten von Zablotska und Kollegen kein parametrisches Baseline-Modell als Ausgangspunkt der Analysen zur Verfügung stand, wurde auf ein parametrisches Baseline-Modell zurückgegriffen, das für die Analyse der IHD-Daten der Majak-Arbeiter entwickelt worden war. Die Majak-Arbeiter wurden am Arbeitsplatz kontinuierlich bestrahlt. Diese Bestrahlung ist der protrahierten Bestrahlung der kanadischen Tuberkulosepatienten ähnlicher als jene der Atombombenüberlebenden, die einer einzigen Kurzzeitbestrahlung ausgesetzt waren. Daher wurde diesem Baseline-Modell der Vorzug gegeben gegenüber dem für die Analyse der Atombombenüberlebenden verwendeten Modell.

Der ermittelte finale Satz von nicht-genesteten bevorzugten Modellen wurde für das MMI herangezogen. MMI ist eine innovative statistische Methode, um verschiedene Dosiswirkungsmodelle entsprechend ihrer Anpassungsgüte mathematisch zu überlagern. Bei MMI werden Risikoschätzer der finalen nicht genesteten Modelle gebildet gemäß den mit diesen Modellen assoziierten Akaike-Gewichten: jene Modelle, die die Daten besser beschreiben (d. h. kleinerer AIC<sup>1</sup>-Wert), gehen stärker in die MMI ein als andere.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 REPRODUKTION DER ERGEBNISSE BISHER DURCHGEFÜHRTER ANALYSEN

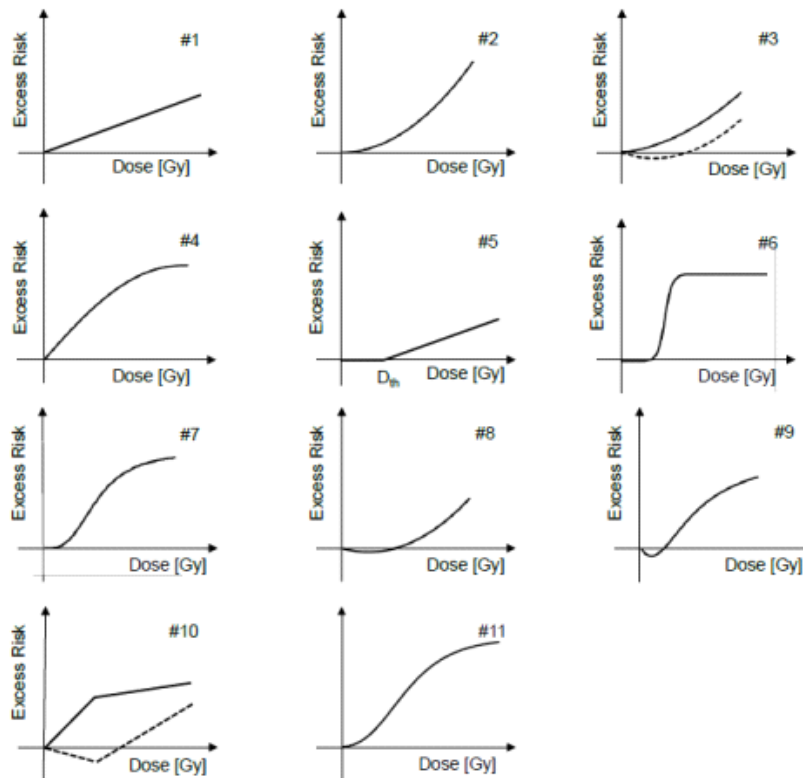
Hierfür wurde die gleiche stratifizierte Baseline verwendet wie von Zablotska. Eine Adjustierung für die Dosis-Fraktionierung wurde ebenfalls durchgeführt und führte zu folgendem Ergebnis: ERR = 0,1755 Gy<sup>-1</sup> (0,01144; 0,3931). Es wurde ein Likelihood-Ratio-Test (LRT) durchgeführt, um zu testen, ob die Adjustierung für Dosis-Fraktionierung statistisch signifikant ist. Man erhält dev = 4,674. Zusammen mit einem errechneten p-Wert von 0,0306 zeigt dies die statistische Signifikanz des entsprechenden Parameters auf dem 5 %-Niveau. Die Ergebnisse stimmen mit den Ergebnissen der Analysen von Zablotska überein.

### 4.2 ENTWICKLUNG EINES GEEIGNETEN ALTERSABHÄNGIGEN PARAMETRISCHEN BASELINE-MODELLS UND ANALYSE DER IHD-MORTALITÄT IN KOMBINATION MIT VERSCHIEDENEN PARAMETRISCHEN DOSISWIRKUNGSMODELLEN

Dem Baseline-Modell, das für die Analyse der Daten von Majak-Arbeitern entwickelt worden war, wurde für die Analyse der Daten der Fluoroskopie-Kohorte entsprechend den Charakteristika der Kohorte modifiziert. Das adaptierte Baseline-Modell wurde in die MECAN-Software implementiert, mit einem LNT<sup>2</sup>-Modell als ERR-Modell kombiniert und mit einer Dosismodifizierung nach der Dosisfraktionierung versehen. Dieses Modell wurde an die Daten angepasst. Danach wurden 10 weitere Dosiswirkungsmodelle (Abbildung 1) getestet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

<sup>1</sup>) Akaike Information Criterion

<sup>2</sup>) linear no-threshold



**Abbildung 1:** Die im vorliegenden Projekt verwendeten 11 parametrischen Dosiswirkungsmodelle.

1. Reihe: LNT-Modell, quadratisches (Q) Modell, linearquadratisches (LQ) Modell; 2. Reihe: linear-exponentielles (LE) Modell, lineares Schwellenwert-Modell (LTH), Stufenmodell (Step); 3. Reihe: Sigmoid Modell, Hockey-stick-Modell (J-shaped model), Brain-Cousens-Modell; 4. Reihe:

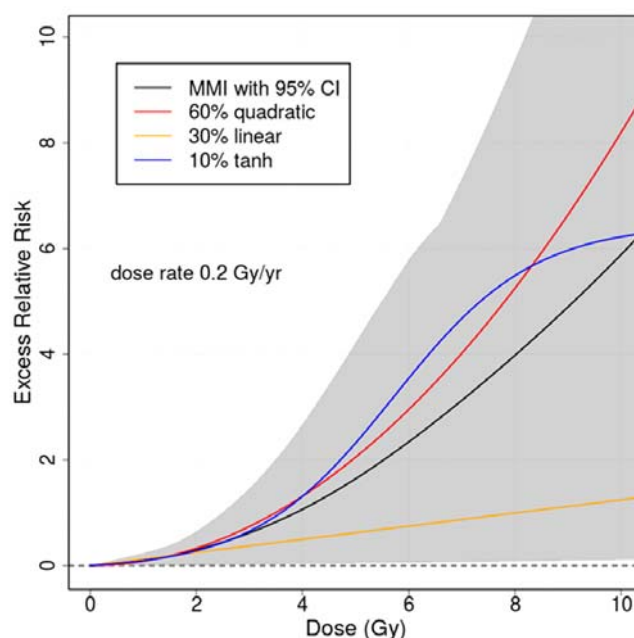
**Tabelle 1:** Ergebnisse aus den Modellanpassungen der 11 verwendeten Dosiswirkungsmodelle aus Abbildung 1 an die Daten für IHD-Mortalität aus der kanadischen Fluoroskopie-Kohorte.

| Dosiswirkungsmodell                               | dev        | $\Delta$ dev | N <sub>par</sub> | AIC       | $\Delta$ AIC | Akaike-Gewicht |
|---------------------------------------------------|------------|--------------|------------------|-----------|--------------|----------------|
| ERR-LNT, [#1]                                     | 13237,872  | 4,543        | 26               | 13289,872 | 1,345        | 0,30422        |
| ERR-Q, [#2]                                       | 13236,526  | 3,198        | 26               | 13288,526 | 0            | 0,59604        |
| ERR-LQ, [#3]                                      | 13236,393  | 3,065        | 27               | 13290,393 | 1,867        |                |
| ERR-LE, [#4]                                      | 13236,531  | 3,203        | 27               | 13290,531 | 2,004        |                |
| ERR-LTH, [#5],<br>$D_{th} = 0.65$ Gy              | 13236,608  | 3,280        | 27               | 13290,608 | 2,082        |                |
| ERR-Step, [#6],<br>$D_{th} = 5.71$ Gy             | 13236,102  | 2,774        | 28               | 13292,102 | 3,576        | 0,09974        |
| ERR-Sigmoid, [#7],<br>$D_{th} = 396.82$ Gy        | 13236,526  | 3,198        | 28               | 13292,526 | 4,000        |                |
| ERR-Hockey stick, [#8]                            | 13236,393  | 3,065        | 27               | 13290,393 | 1,867        |                |
| ERR-Brain-Cousens, [#9]                           | 13236,256  | 2,927        | 29               | 13294,256 | 5,730        |                |
| ERR-Two-line spline, [#10],<br>$D_{th} = 1.73$ Gy | 13235,651  | 2,322        | 28               | 13291,651 | 3,124        |                |
| ERR-Gompertz, [#11],<br>$D_{th} = 2.51$ Gy        | 13233,3283 | 0            | 29               | 13291,328 | 2,802        |                |

Für jedes Modell bzw. jeden Modell-Fit sind folgende Größen angegeben: die finale Deviance  $\text{dev}$ ,  $\Delta\text{dev}$ , die Anzahl der Modellparameter  $N_{\text{par}}$ , das Akaike Information Criterion (AIC) und das  $\Delta\text{AIC}$ . Die drei fett markierten Modelle sind die sich in der vorliegenden Studie ergebenden finalen nicht genesteten Modelle. Sie wurden für das MMI verwendet. Für diese Modelle findet man in der rechten Spalte das jeweilige Akaike-Gewicht. Die Nummern in eckigen Klammern beziehen sich auf die 11 Dosiswirkungsmodelle aus Abbildung 1. Durchführung der Multi-Model Inference

Für die Durchführung der MMI wurden die Akaike-Gewichte der drei finalen nicht genesteten Modelle aus Tabelle 1 mit dem Faktor 10.000 multipliziert. Dies ergibt die Anzahl von Monte Carlo Realisierungen, die für die drei nicht genesteten Modelle durchgeführt wurden. Somit wurden für eine Dosis von null Gray (Gy) für das ERR-LNT Modell 3042 ERR-Werte berechnet. Für 0,02 Gy wurden weitere 3042 ERR-Werte berechnet usw. Analog dazu war das Vorgehen für das zweite nicht genestete Modell; hier wurden für null Gy 5961 ERR-Werte berechnet, für 0,02 Gy wurden weitere 5961 ERR-Werte berechnet usw. Analog war die Vorgehensweise für das ERR-Step Modell. Danach wurden für jede Dosis die ERR-Werte aus den nicht genesteten Modellen vereinigt (d. h. zusammengefügt) und die Durchschnittswerte, Medianwerte, Perzentilen etc. berechnet. Dies ergibt die Mittelwerte für das MMI und die damit verbundenen Unsicherheitsintervalle wie zum Beispiel die 95 % Konfidenzintervalle.

## 5. ERGEBNISSE



**Abbildung 2:** Zusätzliches relatives Risiko, ERR, für IHD-Mortalität in der kanadischen Fluoroskopie Kohorte, aufgetragen gegen die absorbierte Dosis für die drei finalen nicht genesteten Modelle aus Tabelle 1 und für das MMI. Der graue Bereich stellt das 95 % Konfidenzintervall für das MMI dar. Das ERR-LNT-Modell ist in der Abbildung orange und in der Figurenlegende als „30 % linear“ gekennzeichnet und ist identisch mit dem Fit von Zablotska et al. 2014; ERR-Q-Modell: rot, „60 % quadratic“; ERR-STEP-Modell: blau, „10 % tanh“. Die Prozentzahlen stellen die Akaike-Gewichte dar (Tabelle 1). Die Abbildung gilt sowohl für Männer als auch für Frauen. Es wurde eine Dosis-Fraktionierung von 0,2 Gy/Jahr angenommen.

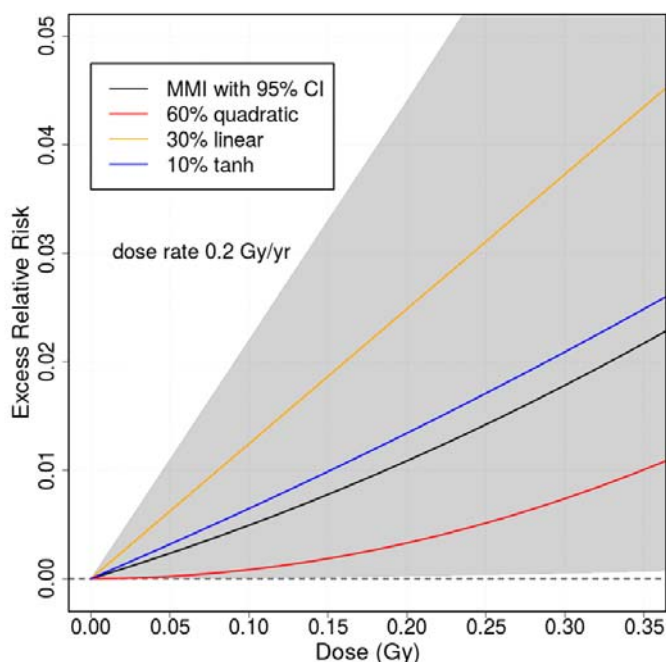
Abbildung 2 zeigt das zusätzliche relative Risiko, ERR, aufgetragen gegen die Dosis bis 10 Gy für die drei finalen nicht genesteten Modelle und für das MMI. Gezeigt sind die Ergebnisse von Monte Carlo Simulationen, die die besten Schätzwerte der drei Modelle verwendet haben, und die dazugehörigen Unsicherheiten. Bei 1 Gy wurde ein ERR von 0,0959 (0,0044; 0,2306) gefunden. Abbildung 3 zeigt das ERR für den Dosisbereich bis 0,35 Gy. Es zeigt sich, dass im höheren Dosisbereich das LNT-Modell das Risiko deutlich unterschätzt im Vergleich zum MMI (Abbildung 2). Die Ursache hierfür ist vor allem der relativ starke Beitrag des ERR-Q-Modells von 60 % (siehe die Akaike-Gewichte in Tabelle 1). Im niedrigen Dosisbereich ist das MMI weitgehend linear (Abbildung 3). Hier überschätzt das ERR-LNT-Modell das Risiko um etwa einen Faktor 2. Es zeigt sich,

dass für den gesamten Dosisbereich die untere Grenze des 95 % Konfidenzintervalls für das MMI nahe bei null ist.

Obwohl es sich im Vergleich zur Situation in Hiroshima und Nagasaki um sehr unterschiedliche Expositionsszenarien handelt, ist ein  $ERR = 0,1$  bei 1 Gy ähnlich zu jenem aus der Analyse der Mortalität durch alle Herzkrankungen bei den Atombombenüberlebenden. Preston und Kollegen berichten ein  $ERR = 0,17$  per Gy, Schöllnberger und Kollegen finden ein  $ERR = 0,09$ . Innerhalb der angegebenen Fehlergrenzen sind diese Werte miteinander konsistent. Die neuesten Analysen der Atombombenüberlebenden mit verlängertem Follow-up und deutlich höheren Fallzahlen zeigen ähnliche Resultate. Für die Arbeiter der Majak-Kohorte, die externer Gamma- und interner Alpha-Strahlung bei kleinen und mittleren Dosen bei kleinen Dosissraten ausgesetzt waren, berichten Simonetto und Kollegen für Mortalität durch IHD bei Männern ein  $ERR = 0,09$  per Gy mit einem 95 % Konfidenzintervall von (0,03; 0,17). Dieser Wert ist konsistent mit dem mit MMI vorhergesagten Risiko aus der hier vorliegenden Studie.

Es besteht eine gewisse Limitierung in der Aussagekraft der vorliegenden Studie, da für die analysierten Daten der kanadischen Fluoroskopie-Kohorte Informationen zu potenziell wichtigen Confoundern fehlen. Im Speziellen fehlt die Information über den sozioökonomischen Status der Patienten. Außerdem ist nur für ca. 20 % der Patienten der Raucherstatus verfügbar - bei etwa 80 % der Studienteilnehmer gibt es keine Informationen, ob sie Raucher oder Nichtraucher waren. Die kanadische Fluoroskopie-Kohorte beinhaltet außerdem keine Informationen über andere kardiovaskuläre Risikofaktoren wie familiäre Vorgeschichte von Herzkrankungen, Diabetes, Bluthochdruck, Adipositas (Fettleibigkeit) und den Cholesterin-Plasma-Level. Da es jedoch unwahrscheinlich ist, dass diese Risikofaktoren mit der absorbierten Dosis assoziiert sind, ist es auch unwahrscheinlich, dass sie die beobachtete Relation zwischen der absorbierten Dosis und dem Risiko für IHD-Mortalität störend beeinflussen hätten können.

Die vorliegende Studie liefert deutliche Hinweise auf nichtlineare Dosis-Wirkungs-Beziehungen bei IHD-Mortalität. Für Dosen unterhalb von ungefähr 1 Gy scheint das Risiko für Individuen aus der kanadischen Fluoroskopie-Kohorte tendenziell kleiner zu sein als durch das LNT-Modell vorhergesagt. Die Ergebnisse aus der vorliegenden Studie sind konsistent mit jenen für die Atombombenüberlebenden und die Majak-Arbeiter.



**Abbildung 3:** Zusätzliches relatives Risiko, ERR, für IHD-Mortalität in der kanadischen Fluoroskopie Kohorte (Zablotska et al. 2014) aufgetragen gegen die absorbierte Dosis bis 0.35 Gy für die drei finalen nicht genesteten Modelle aus Tabelle 1 und für das MMI. Der graue Bereich stellt das 95% Konfidenzintervall für das MMI dar. Das ERR-LNT Modell ist in der Abbildung orange und in der Figurenlegende als „30% linear“ gekennzeichnet und ist identisch mit dem Fit von Zablotska et al. 2014; ERR-Q Modell: rot, „60% quadratic“; ERR-STEP Modell: blau, „10% tanh“. Die Prozentzahlen stellen die Akaike-Gewichte dar (Tabelle 1). Die Abbildung gilt sowohl für Männer als auch für Frauen. Es wurde eine Dosis-Fraktionierung von 0,2 Gy/Jahr angenommen.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Die Beziehung zwischen Strahlung und Herzkreislauf-Erkrankungen ist noch weitgehend ungeklärt und zählt zu den wichtigen offenen Grundsatzfragen der europäischen Strahlenforschung. Das vorliegende Vorhaben trägt dazu bei die Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen ionisierender Strahlung und Ischämischen Herzerkrankungen eingehender als bisher möglich zu beschreiben. Das Vorhaben leistet damit einen Beitrag zur Ermittlung und Bewertung gesundheitlicher Risiken durch ionisierende Strahlung.



**Themenbereich 06**  
**Notfallschutz**

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

|                                                                                                                                                                                                              |                                                |                                                                            |                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Thema</b>                                                                                                                                                                                                 |                                                |                                                                            |                                      |
| Bewertung und Prognose der Weiterentwicklung eines radiologisch relevanten Ereignisses in einer kerntechnischen Anlage mit Hilfe der Abschätzung von Quelltermen auf Grundlage von Messdaten in der Umgebung |                                                |                                                                            |                                      |
| <b>Subject</b>                                                                                                                                                                                               |                                                |                                                                            |                                      |
| <i>Assessment and forecast of the development of a radiological incident in a nuclear facility using the estimation of source terms based on measured data in the vicinity</i>                               |                                                |                                                                            |                                      |
| <b>Kennzeichen</b><br>33612S60026                                                                                                                                                                            | <b>Beginn</b><br>01.03.2013                    | <b>Ende</b><br>30.09.2015                                                  | <b>Fördermittel</b><br>EUR 514.913,- |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>TÜV SÜD Industrie Service GmbH<br>Norwegian Institute for Air Research (NILU)                                                                                          |                                                |                                                                            |                                      |
| <b>Projektleitung</b><br>Dr. S. Thummerer                                                                                                                                                                    | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>N. Zander / SW 2.2 | <b>verantwortlich für den Text</b><br>Dr. Chr. Wallner<br>Dr. S. Thummerer |                                      |

## 1. ZIELSETZUNG

Die Schutzmaßnahmen für die Bevölkerung bei einem radiologisch relevanten Ereignis in der Umgebung von kerntechnischen Anlagen basieren entweder auf möglichst zuverlässigen Abschätzungen von Quelltermen in Verbindung mit (auch prognostischer) Ausbreitungsmodellierung oder/und auf bereits gemessenen radiologischen Daten während oder nach dem Durchzug der radioaktiven Wolke. Beim Fehlen von Quellterminformationen - wie es beim Fukushima-Ereignis der Fall war - können kaum Rückschlüsse auf den Anlagenzustand gezogen werden, wodurch auch weitere prognostische Aussagen zu möglichen Freisetzungen in die Umgebung erschwert sind.

Für behördliche Entscheidungen ist die Kenntnis des Anlagenzustandes und seiner möglichen weiteren Entwicklung, insbesondere möglicher weiterer Freisetzungen radioaktiver Stoffe und deren Ausbreitung in der Umgebung, von erheblicher Bedeutung. Im Rahmen des Vorhabens wurde daher ein Verfahren erarbeitet, mit dem die Ableitung entsprechender Erkenntnisse verbessert wird.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Wesentliches Ziel des Vorhabens war die Erarbeitung eines inversen Berechnungsverfahrens, mit dem bei einem radiologisch relevanten Ereignis in einer kerntechnischen Anlage aus zeitabhängigen Eingabedaten ein Quellterm abgeschätzt werden kann, der eine belastbare Basis zur Beurteilung des aktuellen Anlagenzustands bildet. Entsprechend den Vorgaben für das Vorhaben wurde bei der Entwicklung des Verfahrens internationales Vorgehen auf dem Gebiet recherchiert und dargestellt. Vorliegende Erfahrungen aus dem Fukushima-Ereignis wurden berücksichtigt.

### 2.1 ABSCHÄTZUNG EINES QUELLTERMS AUF DER GRUNDLAGE VON VORLIEGENDEN RADIOLOGISCHEN MESSDATEN (AP 1)

Ziel des Arbeitspaket (AP) 1 war die Entwicklung des inversen Verfahrens zur Abschätzung eines Quellterms auf Basis von vorliegenden Messdaten.

### 2.2 AUSSAGEN ZUM ANLAGENZUSTAND ZUR PROGNOTIZIERUNG WEITERER FREISETZUNGEN (AP 2)

Ziel des AP 2 war die Entwicklung eines Verfahrens zur Diagnose des Anlagenzustandes auf Basis von Quelltermparametern und zur Ableitung der Prognose der weiteren Freisetzung.

### 2.3 NACHWEIS DER ZUVERLÄSSIGKEIT DES VORGESCHLAGENEN VERFAHRENS (AP 3)

Im AP 3 erfolgte ein Test der Zuverlässigkeit der in den AP 1 und 2 entwickelten Verfahren durch die Anwendung mit hypothetischen Messdatenpaketen für eine Referenzanlage und mittels Sensitivitätsstudien.

## 2.4 ERSTELLUNG EINES HANDBUCHS ZUR NUTZUNG DES VORGESCHLAGENEN VERFAHRENS SOWIE DURCHFÜHRUNG EINER SCHULUNG (AP 4 UND 5)

Ziele der AP 4 und AP 5 waren die Erstellung eines Handbuchs zur Nutzung des Programmpaketes sowie die Schulung von Mitarbeitern des BFS in dessen Anwendung.

## 3. METHODIK

Die Eingabedaten des inversen Verfahrens setzen sich aus drei unabhängigen Datensätzen zusammen:

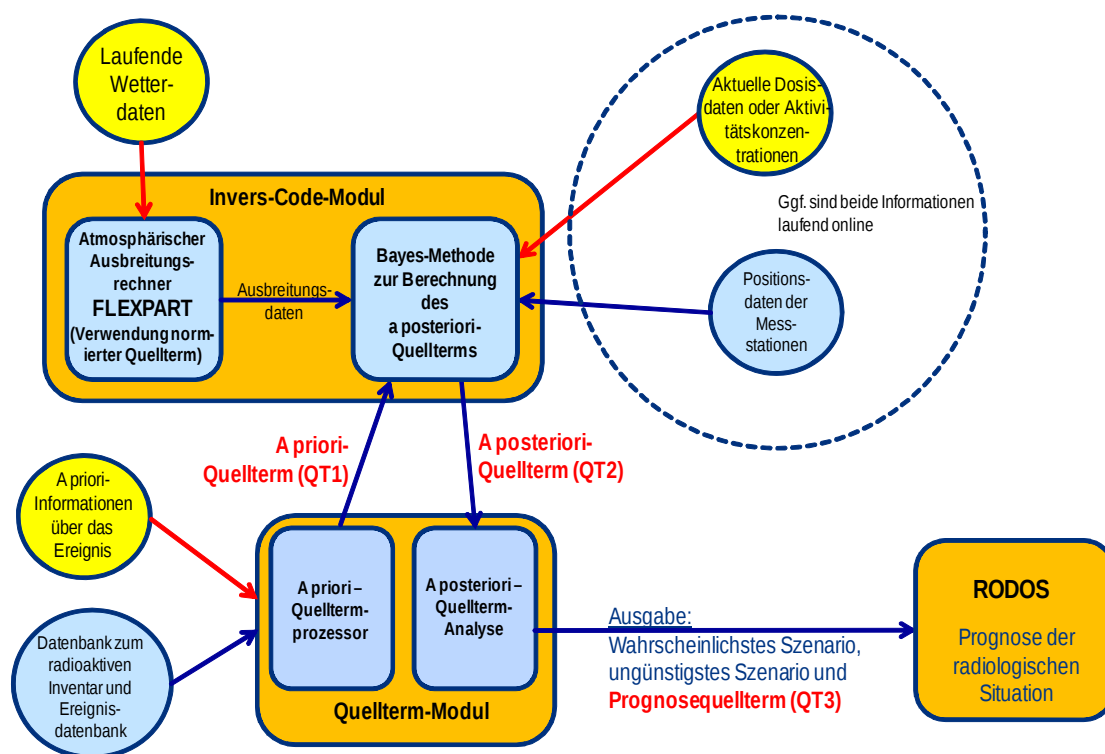
- zeitabhängige Ergebnisse von Messungen der Dosisleistung oder der nuklidspezifischen Aktivitätskonzentrationen in der Luft oder am Boden in der Umgebung der emittierenden Anlage
- geschätzter, ggf. rudimentärer Quellterm (sog. a priori-Quellterm), der aus ggf. bekannten Randbedingungen abgeleitet werden kann (sogenannte a priori-Daten)
- zeitliche Entwicklung der meteorologischen Parameter ab dem vermuteten Beginn der Emission radioaktiver Stoffe aus der betroffenen Anlage.

Aus den Datensätzen wird mit Hilfe von atmosphärischer Ausbreitungsrechnung und einem Bayes-Verfahren ein genauerer a posteriori-Quellterm ermittelt.

Die Methodik des Verfahrens wird anhand Abbildung 1 beschrieben, das die einzelnen Module des Programmpaketes sowie die Schnittstellen zwischen den Modulen skizziert. Das Programmpaket besteht im Wesentlichen aus den zwei unabhängigen Modulen

- Quellterm-Modul (Excel VBA, Microsoft) und
- Invers-Code-Modul (Fortran, Unix).

Beide Module sind in Abbildung 1 orange hinterlegt.



**Abbildung 1: Module und Schnittstellen des Programmpaketes**

Mit folgenden Schritten wird die Ermittlung und Analyse von Quelltermen mit dem Programmpaket durchgeführt.

- Schritt 1: Erzeugung eines a priori-Quellterms QT1  
Mit dem Quelltermmodul wird in einem ersten Schritt der sogenannte a priori-Quellterm (QT1 gemäß Abbildung 1) aus den a priori-Daten (von den Messdaten unabhängige Daten) berechnet. A priori-Daten sind Informationen zum erfolgten Freisetzeitpunkt, zum Freisetzungsort und mögliche Eingrenzungen des Quellterms. Das Quelltermmodul greift für die Ermittlung des a priori-Quellterms auf Datenbanken mit radioaktiven Inventaren und Freisetzungsverläufen für bestimmte Anlagen und bestimmte Ereignisse zurück und berechnet daraus einen mittleren nuklidspezifischen Freisetzungsverlauf sowie dessen Bandbreite, den sogenannten a priori-Quellterm. Dessen Bandbreite ist umso größer, je weniger a priori-Informationen vorliegen. Für die Erstellung der Datenbanken wurden Quellterme aus dem Forschungsvorhaben 3609S60009 verwendet.
- Schritt 2: Erzeugung von Ausbreitungsdaten  
In diesem Schritt werden vom Invers-Code-Modul Ausbreitungsdaten erzeugt. Aus einer Datenbank werden hierzu die Wetterdaten für den Zeitraum zwischen dem vermuteten Emissionsbeginn und dem aktuellen Zeitpunkt ermittelt. Unter Verwendung des Ausbreitungsmodells FLEXPART wird aus diesen Daten für die zu berücksichtigenden Nuklide jeweils für eine Einheitsaktivität eine Ausbreitungsrechnung durchgeführt. Diese Berechnungen wurden im Rahmen des Vorhabens mit FLEXPART gemacht, können aber im Prinzip mit jedem beliebigen Ausbreitungsmodell durchgeführt werden, für das geeignete meteorologische Eingangsdaten zur Verfügung stehen.
- Schritt 3: Ermittlung des a posteriori-Quellterms QT2  
Das Invers-Code-Modul liest nun Daten von radiologischen Messungen (ODL-Daten oder Aktivitätskonzentrationen an Messstationen oder aus mobilen Messungen) in der Umgebung der emittierenden Anlage für den Zeitraum des vermuteten Emissionsbeginns bis zum aktuellen Zeitpunkt sowie die Positionen der Messstationen ein. Unter Verwendung der Ausbreitungsdaten aus Schritt 2 und der Messdaten aus Schritt 3 wird mit einem Bayes-Verfahren der a priori-Quellterm QT1 aus Schritt 1 modifiziert und optimiert und als genauerer a posteriori-Quellterm QT2 ausgegeben (vgl. Abbildung 1).
- Schritt 4: Analyse des QT2  
In diesem Schritt wird der a posteriori-Quellterm QT2 mit Quelltermen einer Quelltermdatenbank für bestimmte Ereignisse der betroffenen Anlage verglichen. Die Bewertung der Übereinstimmung zwischen den Quelltermen erfolgt durch die Ermittlung von Bestimmtheitsmaßen zwischen dem QT2 und den Quelltermen der Datenbank. Aus dem Bestimmtheitsmaß, den noch zu erwartenden radiologischen Auswirkungen (abhängig vom jeweiligen Ereignis der Datenbank) und dem Zeitraum bis zu einer noch folgenden Emissionsexkursion (z. B. durch Venting oder SHB<sup>1)</sup>-Bruch) wird ein Indikator ermittelt, der mit dem Bestimmtheitsmaß dem Benutzer als Entscheidungshilfe für die Auswahl eines Ereignisses und eines Quellterms dient, auf Basis dessen die Maßnahmen des Katastrophenschutzes abgeleitet werden können. Die Quellterme der Datenbank entsprechen dabei ebenfalls den Quelltermen aus dem Forschungsvorhaben 3609S60009.
- Schritt 5: Ausgabe eines Prognosequellterms QT3  
Der Nutzer des Programms wählt in diesem Schritt auf Basis des Bestimmtheitsmaßes der einzelnen Ereignisse sowie des Indikators für die radiologischen Auswirkungen ein Ereignis aus, für das ein Prognosequellterm QT3 (vgl. Abbildung 1) auf Basis der Datenbank, in der die Freisetzungsverläufe der unterschiedlichen Ereignisse der betroffenen Anlage hinterlegt sind, erstellt wird. Der QT3 wird im xml-Format erzeugt, das mit dem Entscheidungshilfesystem RODOS eingelesen und somit zur Lagebeurteilung verwendet werden kann.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 ABSCHÄTZUNG EINES QUELLTERMS AUF DER GRUNDLAGE VON VORLIEGENDEN RADIOLOGISCHEN MESSDATEN (AP 1)

Im ersten Abschnitt des AP 1 wurde analysiert, welche stationären Messeinrichtungen in der Umgebung von kerntechnischen Anlagen in der Regel zur Verfügung stehen, welche mobilen Maßnahmen zur Beschaffung von Messdaten in der Anlagenumgebung im Katastrophenfall üblicherweise geplant sind und inwieweit bestimmte Parameter für die inverse Modellierung geeignet sind. Im Rahmen des ersten Abschnitts des AP 1 wurde ferner der a priori-Quelltermprozessor (vgl. Abbildung 1) entwickelt. Für die konkrete Anwendung des

<sup>1)</sup> Sicherheitsbehälter

zu entwickelnden Programmpakets wurden vom BfS entsprechende Quellterme einer DWR<sup>1)</sup>-Anlage vom Typ Konvoi aus Ereignisanalysen des BfS-Forschungsvorhabens 3609S60009 zur Verfügung gestellt. Diese Quellterme wurden für die Verwendung im Programmpaket aufgearbeitet und in Datenbanken hinterlegt.

Im zweiten Abschnitt des AP 1 wurde das Inversionsverfahren zur Bestimmung des a posteriori-Quellterms mit Hilfe von nuklidspezifischen Beobachtungsdaten und atmosphärischen Ausbreitungsrechnungen entwickelt, implementiert und entsprechend dokumentiert. Um eine generische Nutzung des Inversionsprogramms zu gewährleisten, wurde eine Schnittstelle definiert, die Informationen zu Emissionen, Beobachtungsdaten (Immissionsmessungen) und Ausbreitungsrechnungen umfasst.

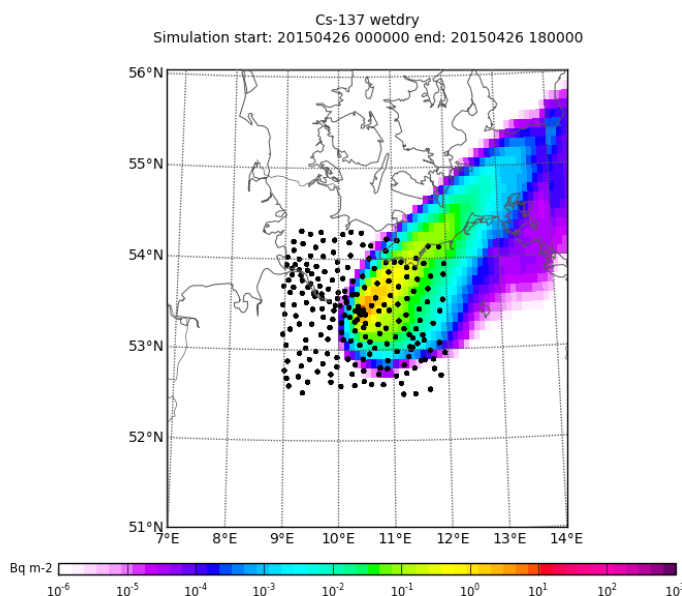
Im dritten Abschnitt des AP 1 wurde das Inversionsverfahren um die Verwendung von ODL-Beobachtungen erweitert. Bestandteile des dritten Abschnitts des AP 1 waren die Entwicklung der Methodik der Verwendung von ODL-Daten sowie die Implementierung des Verfahrens in den bestehenden Code.

## 4.2 AUSSAGEN ZUM ANLAGENZUSTAND ZUR PROGNOTIZIERUNG WEITERER FREISETZUNGEN (AP 2)

Im AP 2 wurde das Verfahren zur Analyse des a posteriori-Quellterms entwickelt und implementiert. Ferner wurde ein Vorschlag zur Berechnung des Indikators erarbeitet, der als Entscheidungshilfe für die Auswahl eines Prognosequellterms dient (vgl. Abschnitt 3 - Schritt 4).

## 4.3 NACHWEIS DER ZUVERLÄSSIGKEIT DES VORGESCHLAGENEN VERFAHRENS (AP 3)

Zur Validierung des Verfahrens wurden synthetische Messdaten ermittelt, indem Ausbreitungsrechnungen unter Verwendung von RODOS und FLEXPART mit Basisquelltermen durchgeführt und daraus der Impakt (ODL und Aktivitätsniederschlag) am Ort der ODL-Messstellen des ODL-Messnetzes in der Umgebung des für das Ereignis unterstellten Anlagenortes berechnet wurde (vgl. Beispiel in Abbildung 2). Die entsprechenden Ausbreitungsrechnungen wurden auf Basis von zwei unterschiedlichen Quelltermen, unter Verwendung von zwei unterschiedlichen Wetterlagen, durchgeführt. Der Quellterm wurde im Anschluss als unbekannt angenommen und mit Hilfe des Inversionsalgorithmus aus unabhängigen Modellrechnungen unter Verwendung des Ausbreitungsmodells FLEXPART und unter Zugrundelegung verschiedener a priori-Quellterme rekonstruiert. Die rekonstruierten Quellterme wurden dann mit Hilfe des Analyseverfahrens für den a posteriori-Quellterm analysiert, um das Szenario zu identifizieren, das dem ursprünglichen Quellterm zu Grunde lag.



**Abbildung 2: Beispiel für die Ermittlung einer Cs-137 Deposition, ausgehend von einem Szenario mit sehr hoher Freisetzung. Die Beobachtungsorte sind durch schwarze Punkte gekennzeichnet.**

<sup>1)</sup> Druckwasserreaktor

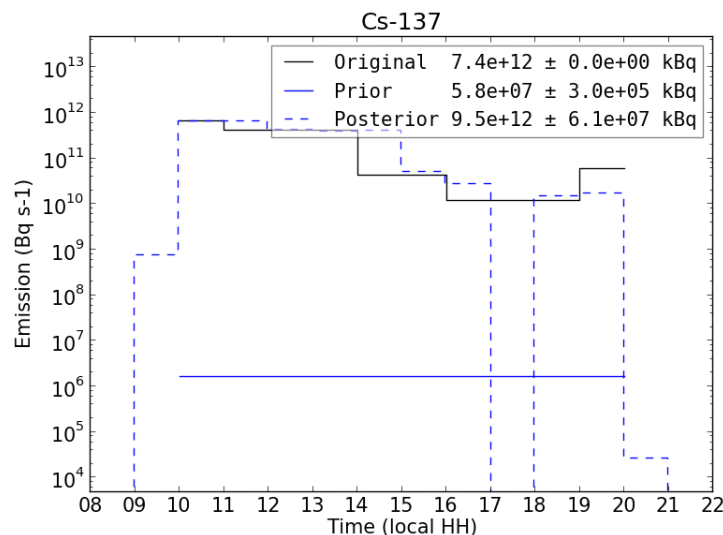
#### 4.4 ERSTELLUNG EINES HANDBUCHS ZUR NUTZUNG DES VORGESCHLAGENEN VERFAHRENS SOWIE DURCHFÜHRUNG EINER SCHULUNG (AP 4 UND 5)

Das Handbuch wurde im Rahmen des AP 4 erstellt und dem BfS vorgelegt. Die Schulung von Mitarbeitern des BfS fand am 26.11.2015 am Standort des BfS in Neuherberg statt.

### 5. ERGEBNISSE

Erste Analysen des Inversionsverfahrens hatten gezeigt, dass das für die Inversmethode verwendete Modell (FLEXPART) und das für die Erstellung der Test-Messdaten verwendete Modell (RODOS) im Hinblick auf die Ausbreitungsmodelle und die Ausbreitungsparameter voneinander abweichen. Nach Anpassung der Eingangsparameter von FLEXPART an die Eingangsparameter von RODOS wurde die abschließende Validierung des Verfahrens durchgeführt.

Die Ergebnisse der inversen Methode zur Bestimmung des a posteriori-Quellterms, ausgehend von den synthetischen Messdaten sowie den verschiedenen a priori-Quelltermen, zeigten, dass die Optimierung des a priori-Quellterms, welcher um bis zu acht Größenordnungen vom originalen Quellterm abweicht, zu einem a posteriori-Quellterm führt, welcher sowohl die Größenordnung sowie den zeitlichen Verlauf des originalen Quellterms im Großteil der angegebenen Fälle wiedergibt (vgl. Beispiel in Abbildung 3). In der Regel lieferte das inverse Verfahren konservative Ergebnisse, welche eine höhere Emission des a posteriori-Quellterms im Vergleich zum originalen Quellterm aufweisen.



**Abbildung 3:** Ergebnisse der Inversionsrechnung für eine Cs-137-Emission unter der Verwendung eines stärker abweichenden a priori-Quellterms. Während der a priori-Quellterm eine konstant niedrige Emission von Cs-137 aufweist, welche die gesamte Emission des originalen Quellterms um um fünf Größenordnungen unterschätzt, kommt es durch die Inversion zu einer Erhöhung des a posteriori-Quellterms, welche die Größenordnung des originalen Quellterms gut wiedergibt. fünf Größenordnungen unterschätzt, kommt es durch die Inversion zu einer Erhöhung des a posteriori-Quellterms, welche die Größenordnung des originalen Quellterms gut wiedergibt.

Die originalen Quellterme konnten im a posteriori-Quellterm auch unter der Verwendung von ODL-Messdaten mit Hilfe der inversen Methode reproduziert werden, wenn genügend Informationen zum emittierten Nuklidspektrum vorhanden waren oder zusätzliche Beobachtungen von nuklidspezifischen Aktivitätskonzentrationen zur Verfügung standen.

Die Analysen der a posteriori-Quellterme auf Basis der unterschiedlichen a priori-Quellterme haben gezeigt, dass ein Szenario mit anfänglich sehr hohen Emissionen (Szenario FKA gemäß Forschungsvorhaben 3609S60009, Kernschmelzszenario mit direkter Freisetzung in die Umgebung über einen Bypass) sowohl bei der Analyse von ODL-basierten a posteriori-Quelltermen als auch bei der Analyse von nuklidspezifisch ermittelten a posteriori-Quelltermen unter den gegebenen Randbedingungen (Wetter, Emissionsort, Quelltermdauer)

er etc.) eindeutig identifiziert werden kann. Szenarien mit anfänglich mittleren (z. B. FKI: Kernschmelzszenario mit funktionierender Störfallunterdruckhaltung im SHB) oder geringeren Emissionen (z. B. Kühlmittelverluststörfälle - KMV) lassen sich nicht eindeutig identifizieren, hier kann aber zumindest eine Aussage getroffen werden, ob tendenziell ein Quellterm mittlerer oder geringerer Emission vorliegt. Entsprechende Empfehlungen zur Optimierung des Verfahrens wurden ausgesprochen.

Im Rahmen der Schulung des Programmpakets wurde in einem Vortragsteil das Verfahren von TÜV SÜD und NILU im Überblick vorgestellt und diskutiert. Im Schulungsteil erfolgte ein vollständiger Lauf einer a priori-Quellterm-Ermittlung, einer Inversionsrechnung und einer a posteriori-Quellterm-Analyse. Im Rahmen der Diskussion hat sich ergeben, dass eine gemeinsame programmiertechnische Basis der beiden Programmtteile (das Quelltermmodul läuft derzeit unter MS Windows, das Inversionsprogramm unter UNIX) sowie eine stärkere Automatisierung wünschenswert ist. Die Implementierung einer Benutzeroberfläche für das Inversionsverfahren, die nicht Teil des Forschungsvorhabens ist, hat sich ebenfalls als wünschenswert herausgestellt.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens, insbesondere der Tests, die im Rahmen des AP 3 durchgeführt wurden, zeigen, dass auf Basis von a priori-Informationen und von Messdaten aus der Umgebung eines Kernkraftwerkes, das infolge eines Kernschmelzunfalles radioaktive Stoffe emittiert, die Abschätzung eines Quellterms (a posteriori-Quellterm) mit solcher Genauigkeit möglich ist, dass die dem Ereignis zu Grunde liegenden Szenarien zumindest auf Gruppen mit unterschiedlichen Emissionen eingegrenzt werden können (Ereignisse mit anfänglich hoher Emission, z. B. FKA oder Ereignisse mit anfänglich niedriger oder geringer Emission, wie z. B. FKI und KMV).

Das im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte Verfahren ist somit geeignet, bei einem radiologischen Ereignis in einem Kernkraftwerk aus dem beobachteten Emissionsverlauf eine abschätzende Anlagenzustandsdiagnose zu geben und daraus eine abschätzende Prognose des Anlagenzustandsverlaufes und der Emissionen zu erstellen. Zur Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten des Programmpaketes und zur Optimierung des Verfahrens wurde empfohlen, die Datenbasis des Programms insbesondere auf weitere Ereignisse und Anlagenzustände sowie auf andere Kernkraftwerke und kerntechnische Anlagen zu erweitern bzw. entsprechende Untersuchungen anzustellen.

Weitere Optimierungsmöglichkeiten der inversen Quelltermermittlung und des Verfahrens zur Anlagenzustandsdiagnose (a posteriori-Quellterm-Analyse) wurden im Rahmen des Vorhabens angedacht und als Empfehlungen ausgesprochen. Insbesondere erscheint eine Verknüpfung des vorliegenden Verfahrens mit dem probabilistischen Quelltermabschätzungsmodul QPRO vielversprechend zur Verbesserung der Anlagenzustandsdiagnose. Hierzu wurde ebenfalls eine Empfehlung ausgesprochen.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Das im Rahmen des Vorhabens entwickelte Verfahren zur Abschätzung der bereits freigesetzten Quellterme auf der Basis von erfassten Messdaten in der Umgebung sowie die anschließende Abschätzung weiterer möglicher Freisetzungen soll die Tätigkeit des Lagezentrums BfS-Neuherberg bei der Lageermittlung unterstützen. Die vorhandenen Messdaten nach der bereits erfolgten Freisetzung sollen mit dem entwickelten Tool verarbeitet und unter Berücksichtigung des jeweiligen Anlagenzustandes zur Abschätzung möglicher Weiterentwicklung des Ereignisses im Hinblick auf radiologische Gefährdung der Umgebung genutzt werden. Somit können nachfolgende radiologische Prognosen durch das Lagezentrum vorgenommen werden.



**Themenbereich 07**

**Vorhaben mit allgemeiner Bedeutung für den Strahlenschutz**

***Subject area 07***

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

|                                                                                                                              |                                                                        |                           |                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Thema</b><br>Quantitative Abschätzung des Strahlenrisikos unter Beachtung individueller Expositionsszenarien, Teil 2      |                                                                        |                           |                                                                              |
| <b>Subject</b><br><i>Quantitative radiation risk assessment under consideration of individual exposure scenarios, part 2</i> |                                                                        |                           |                                                                              |
| <b>Kennzeichen</b><br>3612S70030                                                                                             | <b>Beginn</b><br>01.02.2013                                            | <b>Ende</b><br>31.12.2015 | <b>Fördermittel</b><br>EUR 391.825,-                                         |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Helmholtz-Zentrum München                                                              |                                                                        |                           |                                                                              |
| <b>Projektleitung</b><br>Dr. M. Eidemüller                                                                                   | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. L. Walsh, Dr. M. Schnelzer / AG-SG 1.3 |                           | <b>verantwortlich für den Text</b><br>Dr. A. Ulanowski,<br>Dr. M. Eidemüller |

## 1. ZIELSETZUNG

In diesem Projekt wurden die Methoden und das Softwareprogramm ProZES (Programm zur Berechnung der Zusammenhangswahrscheinlichkeit einer Erkrankung und einer Strahlenexposition) entwickelt um abzuschätzen, welchen Anteil die Strahlenexposition einer Person an einer späteren Krebsentstehung hat. Das aktuelle Projekt führte Entwicklungen aus einer ersten Phase (Vorhaben 3607S04570) fort. Es wurden in diesem Projekt nun alle Krebsarten berücksichtigt, sowie hoch-Linear Energy Transfer (LET)-Strahlung mit Einflüssen von Latenzzeit, Expositionsraten und weiteren Faktoren. Der Risikotransfer auf die deutsche Bevölkerung verlangt zuverlässige und aktuelle Krebsinzidenz- und Bevölkerungsstatistiken. Diese Daten wurden im Rahmen dieses Projektes gesammelt und aufbereitet. Das Software Programm ProZES implementierte die Methoden in einer berechnungseffizienten Form als Windows Anwendung mit graphischer Oberfläche und graphischer oder numerischer Ausgabe.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

- Krebserkrankungsrisiko bei den Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki: Modelle für Leukämie, Schilddrüsenkrebs und „andere“ Krebsarten
- weitere Elemente zur Abschätzung des zusätzlichen Krebserkrankungsrisikos nach Strahlenexposition in Deutschland:
  - Modelle für Lungenkrebs nach Radonexposition
  - Entwicklung eines Datensatzes für Bevölkerungs- und Gesundheitsstatistiken
  - Übertragung der Krebsrisiken auf deutsche Verhältnisse
- Berechnungscode der Zusammenhangswahrscheinlichkeit einer Krebserkrankung und einer Strahlenexposition für die verschiedenen Krebsarten, Simulation der Unsicherheitsintervalle
- Implementierung des Programms zur Berechnung der Zusammenhangswahrscheinlichkeit einer Erkrankung und einer Strahlenexposition, ProZES

## 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 strahleninduzierten Exzess-Rate  $h$  zu der totalen Inzidenzrate  $(h+h_0)$ , wobei  $h_0$  die Hintergrund-Inzidenzrate der Zielbevölkerung darstellt:

$$Z = h / (h + h_0) \quad (1)$$

Die Exzess-Raten  $h$  werden 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 Minenarbeitern. Typischerweise hängt das Risiko von Geschlecht, erreichtem Alter, Alter bei Exposition oder anderen Faktoren, wie z. B. Rauchverhalten bei Lungenkrebs, ab. Zusätzlich zu den besten Fit-Parametern für diese Abhängigkeiten wird auch die Kovarianz-Matrix berücksichtigt, so dass stochastische Verteilungen mit angemessenen Unsicherheitsintervallen bestimmt werden können.

Von der Vielzahl der möglichen Modelle werden nur diejenigen berücksichtigt, die die Daten am besten beschreiben unter dem Akaike Informations-Kriterium (AIC) und unter dem Likelihood-Ratio-Test. Die resultierenden Risikofunktionen werden bestimmt durch die Methode der „multi-model inference“, d. h. die Verteilung der Z Werte wird erzeugt durch modell-spezifische Verteilungen, die dann jeweils gewichtet werden mit dem globalen Gewicht der einzelnen Modelle, das durch den AIC-Wert bestimmt wird.

Die Risikomodelle müssen auf die Zielbevölkerung (Deutschland) übertragen werden. Dazu werden Deutschland-spezifische demographische Daten und Daten für die Krebsinzidenz benutzt.

Der Transfer der Strahlenrisiken, die von epidemiologischen Kohorten wie z. B. der LSS abgeleitet wurden, auf die deutsche Bevölkerung kann additiv oder multiplikativ erfolgen. Er wird ausgedrückt über die Hintergrund- und Exzess Rate  $h_{0m}$  und  $h_m$  des Modells der Kohorte, sowie die Hintergrundrate  $h_0$  der Zielbevölkerung:

$$h = (1 - f) h_m + f h_0 (h_m/h_{0m}) \quad (2)$$

wobei  $f$  der Anteil des multiplikativen Transfers darstellt, d. h. die relativen Risiken werden in der Kohorte und Zielbevölkerung als gleich angenommen. Der Faktor  $(1 - f)$  stellt den Anteil des additiven Transfers dar, bei dem die Exzess-Raten in beiden Bevölkerungen als identisch angenommen werden. Bei Unterschieden in den Hintergrundraten der Bevölkerungen ergeben die beiden Arten des Transfers verschiedene Risiken.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Ein Modell für Schilddrüsenkrebs wurde auf Basis der LSS-Daten entwickelt. Anders als bei alternativen Modellen von demselben Datensatz wurde ein frühes Entdecken durch Kohorten-spezifische Screening- und Autopsie-Programme explizit berücksichtigt. Das endgültige Modell zeigt eine gute Übereinstimmung mit Risiken von Modellen, die vom Tschernobyl-Unfall gewonnen wurden.

Die verbleibenden Krebsarten, inklusive Krebsarten des blutbildenden Systems, wurden in Gruppen zusammengefasst, um eine ausreichende statistische Power für die Entwicklung eines Risikomodells zu haben. Zuerst wurde eine Einteilung nach funktionellen Gruppen vorgenommen (z. B. Krebs des Verdauungstraktes, der Atemwege, der Harnorgane oder geschlechtsspezifische Krebsarten). Diese Gruppen wurden weiter verfeinert, indem geprüft wurde, ob die Hintergrund-Inzidenzraten dieser Krebsarten dieselbe Altersabhängigkeit aufweisen. Dies führte z. B. dazu, dass die weiblichen Geschlechtsorgane (ohne Brustkrebs, für den ein eigenes Modell existiert) in zwei Gruppen aufgespalten wurden, und Gebärmutterhalskrebs dabei eine eigene Gruppe bildet. Hodenkrebs und malignes Melanom wurden in die Gruppe der verbleibenden Krebsarten aufgenommen. Hodenkrebs wies eine andere Altersabhängigkeit als andere Krebsarten der männlichen Geschlechtsorgane auf und das maligne Melanom hatte unzureichende statistische Power (17 Fälle in der LSS-Datenbank). Krebsarten des blutbildenden Systems wurden in 5 Gruppen eingeteilt:

- akute lymphatische Leukämie (ALL) und ähnliche,
- chronische lymphatische Leukämie (CLL) und Lymphome,
- akute myeloische Leukämie (AML) und ähnliche,
- chronische myeloische Leukämie (CML) und
- Plasmozytom (Multiple Myeloma - MM).

Die Modelle des zusätzlichen relativen und absoluten Risikos wurden von den LSS-Daten mit parametrischer Poisson Regression in Matlab für solide Krebsarten sowie in der statistischen Computersprache R für blutbildende Krebsarten hergeleitet. Vergleiche mit dem Computerprogramm Epicure wurden durchgeführt. Die resultierenden Modelle für solide Krebsarten wurden weiter verifiziert durch einen Vergleich mit den krebs-spezifischen Hintergrundraten für Krebsinzidenz in ganz Japan sowie der Städte Hiroshima und Nagasaki. Für jede Gruppe resultierte ein Satz statistisch signifikanter Modelle, die mittels Multi-Modell-Inferenz berücksichtigt wurden.

Das Lungenkrebsrisiko nach einer Hoch-LET-Exposition mit Radon wurde über zwei spezifische Modelle implementiert: eines für berufliche Exposition für Minenarbeiter, das auf der Wismut Kohorte beruht, und eines für Innenräume. Die Lungenkrebsrisiken in ProZES können so für drei verschiedenen Arten von Exposition berechnet werden: für Strahlenbelastung mit Dosis in Sievert (Sv), für Radon Exposition in Minen in Working Level Month (WLM) und für Radon Konzentration in der Umgebungsluft in Bq/m<sup>3</sup>.

Der Transfer der Strahlenrisiken auf die deutsche Bevölkerung wird mit einer Uniformverteilung von  $f$  (s. Gleichung 2) vorgenommen. Dies erzeugt keine Präferenz für einen additiven oder multiplikativen Transfer und berücksichtigt zugleich die vorhandenen Unsicherheiten. Da es keinen wissenschaftlichen Konsens über die Art des Transfers für die einzelnen Krebsarten gibt, wurde damit eine konservative Abschätzung gewählt. Eine verbesserte Abschätzung ließe sich erreichen durch eine höhere statistische Power europäischer oder amerikanischer Kohorten sowie ein besseres mechanistisches Verständnis der Karzinogenese und des Effekts der Strahlung auf die verschiedenen Stufen dieses Prozesses.

Datenbanken für Krebsinzidenz- und Bevölkerungsdaten wurden aufgebaut. Sie wurden zu den in ProZES implementierten Krebsgruppen kompatibel gemacht. Diese Datenbanken wurden für das Programm in eine passwortgeschützte und verschlüsselte Excel-Datei übertragen. Dies erlaubt eine Aktualisierung der Daten, ohne mögliche Sicherheitsprobleme durch unbefugte Modifikationen zuzulassen.

Das Programm wurde komplett auf die Windows-.NET-Plattform portiert ohne Einbußen von Performance. Im Vergleich zur ersten Version von ProZES hängt das Programm nun nicht mehr von kommerziellen numerischen Bibliotheken von Drittanbietern ab. Der Transfer schafft auch die Voraussetzungen, das Programm in Zukunft auf anderen Computerplattformen zu implementieren oder es zu einer Web-basierten Anwendung zu konvertieren.

Ein Vergleich der Resultate der finalen Version von ProZES und des korrespondierenden amerikanischen Programms IREP (der NCI-basierten Version) zeigt zum Teil ähnliche Ergebnisse, aber auch Unterschiede für eine Reihe von Krebsarten auf. Die beobachteten Unterschiede können zum einen auf die unterschiedliche Gruppierung von Krebsarten in beiden Programmen zurückgeführt werden, zum anderen darauf, dass ProZES die neuesten und am weitesten fortgeschrittenen Modelle für das Risiko von strahleninduziertem Krebs implementiert, welche oftmals von den früheren Modellen der IREP-Programme abweichen. Weitere Unterschiede ergeben sich aus der unterschiedlichen Beschreibung des Dosis- und Dosisrateneffektes und der Implementierung des Risikotransfers zwischen Bevölkerungen.

Bei der Entwicklung von ProZES gab es eine enge Zusammenarbeit mit den internationalen Experten Dr. Dale Preston (Hirosoft Int., USA) und den Entwicklern von IREP, Dr. Owen Hoffman und Dr. Iulian Apostoaei (beide von ORRISK Inc., USA). Es fanden mehrere Treffen statt, bei denen alle Konzepte und Modelldetails diskutiert wurden. Das Projekt wurde periodisch fachlich begleitet von der Arbeitsgruppe „Strahlenepidemiologische Tabellen“ des Risikoausschusses der SSK.

## 5. ERGEBNISSE

Das Programm ProZES wurde vollständig fertiggestellt mit benutzerfreundlicher graphischer Oberfläche. Die Zusammenhangswahrscheinlichkeit lässt sich für alle Krebsarten nach niedrig-LET-Strahlung berechnen sowie für Lungenkrebs nach Radon-Exposition. Ausnahmen sind Sekundärtumore, Krebsarten mit multipler Lokalisation und dem Plasmozytom, für das keine Strahlenwirkung in der LSS-Kohorte gefunden wurde. Die komplette Liste aller Krebsarten und die Gruppeneinteilung sind in Tabelle 1 aufgeführt.

**Tabelle 1: Krebsarten und Gruppeneinteilung**

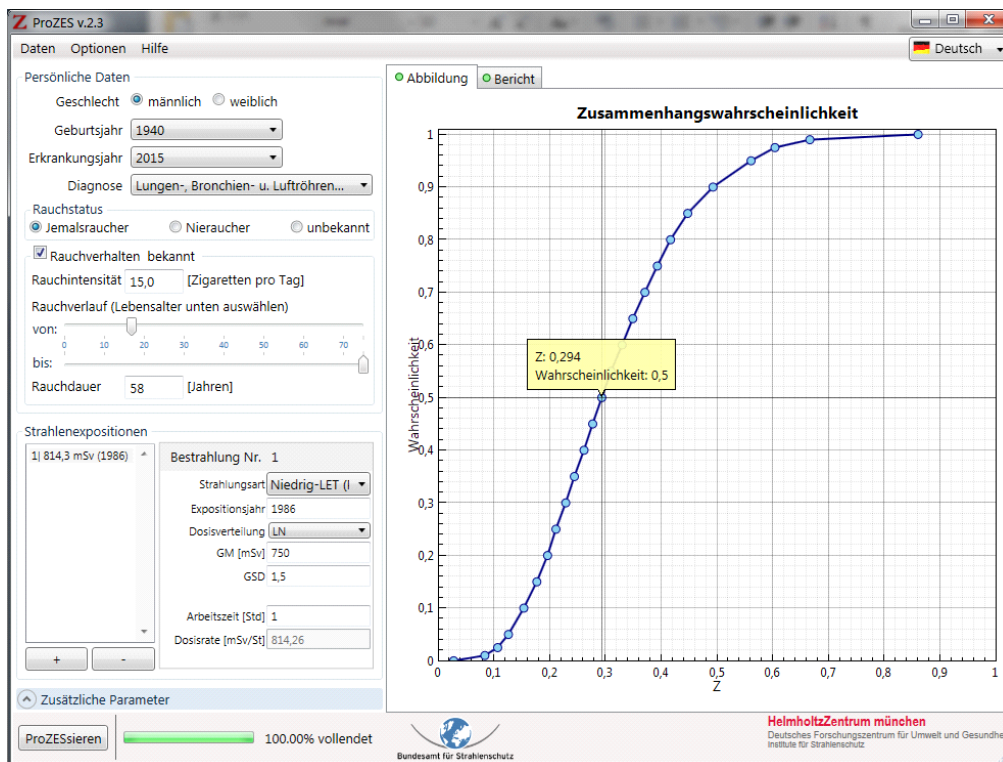
| Modell               | Krebstyp (ICD10-Code)                     |
|----------------------|-------------------------------------------|
| <b>Implementiert</b> |                                           |
| <b>STOMACH</b>       | Magen (C16)                               |
| <b>COLON</b>         | Dickdarm (C18)                            |
| <b>LUNG</b>          | Luftröhre, Lungen und Bronchien (C33,C34) |
| <b>BREAST</b>        | weibliche Brustdrüse (C50)                |
| <b>THYROID</b>       | Schilddrüse (C73)                         |

| Modell             | Krebstyp (ICD10-Code)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>DIG</b>         | Mundhöhle und Rachen (C00–C14), Speiseröhre (C15), Dünndarm (C17), Rektum (C19–C21), Leber (C22), Gallenblase, extrahepatische Gallenwege (C23,C24), Bauchspeicheldrüse (C25), sonstige und ungenau bezeichnete Verdauungsorgane, Retroperitoneum und Peritoneum (C26,C48)                                                                                                                                                                              |
| <b>REM</b>         | Nasenhöhle und Mittelohr, Nasennebenhöhle (C30,C31), Kehlkopf (C32), Thymus (C37), Herz und sonstige Brustorgane (C38,C39), Knochen und Gelenkknorpel (C40,C41), malignes Melanom (C43), Bindegewebe (C45–C47,C49), Hoden (C62), Nebenniere (C74), sonstige endokrine Drüsen, sonstige, ungenau bezeichnete Lokalisationen oder ohne Angaben (C75,C76,C80)                                                                                              |
| <b>GNF1</b>        | Gebärmutterhals (C53)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>GNF2</b>        | Gebärmutterkörper (C54), sonstige und nicht näher bezeichnete Teile des Uterus (C55), Eierstöcke (C56,C57), andere weibliche Geschlechtsorgane (C51,C52,C57,C58)                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>GNM</b>         | Prostata (C61), andere männliche Geschlechtsorgane (C60,C63)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>URI</b>         | Niere (C64), Nierenbecken und Harnleiter (C65, C66), Harnblase (C67), sonstige oder nicht näher bezeichnete Harnorgane (C68)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>BCNS</b>        | Auge (C69), Hirnhäute, Gehirn, Rückenmark, Hirnnerven und sonstiges zentrales Nervensystem (inkl. gutartige Tumoren, C70–C72, D32)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>SKIN</b>        | nicht-melanotischer Hautkrebs (C44)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>L1</b>          | akute lymphatische Leukämie (ALL, C91.0), prolymphozytäre Leukämie vom B-Zell-Typ (C91.3), lymphatische Leukämie, nicht näher bezeichnet (C91.9)                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>L2</b>          | Hodgkin-Lymphom (C81), non-Hodgkin-Lymphom (C82,C83,C85), peripheres und kutanes T-Zell-Lymphom (C84), bösartige immunoproliferative Krankheiten (C88), chronische lymphatische Leukämie vom B-Zell-Typ (CLL, C91.1), Haarzellenleukämie (C91.4)                                                                                                                                                                                                        |
| <b>L3</b>          | akute myeloische Leukämie (AML, C92.0), atypische chronische myeloische Leukämie (C92.2), Myelosarkom (C92.3), akute Promyelozyten-Leukämie (C92.4), akute myelomonozytäre Leukämie (C92.5), Monozytenleukämie (C93), sonstige Leukämie näher bezeichneten Zelltyps (C94), Leukämie nicht näher bezeichneten Zelltyps (C95), sonstige oder nicht näher bezeichnete bösartige Neubildungen des lymphatischen, blutbildenden und verwandten Gewebes (C96) |
| <b>L4</b>          | chronische myeloische Leukämie (CML, C92.1)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>AUSGENOMMEN</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>L5</b>          | Plasmozytom und bösartige Plasmazellen-Neubildungen (keine Hinweise auf eine Strahlenwirkung in der LSS-Kohorte)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>k.A.</b>        | sekundärer Krebs                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>k.A.</b>        | mehrere Lokalisationen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

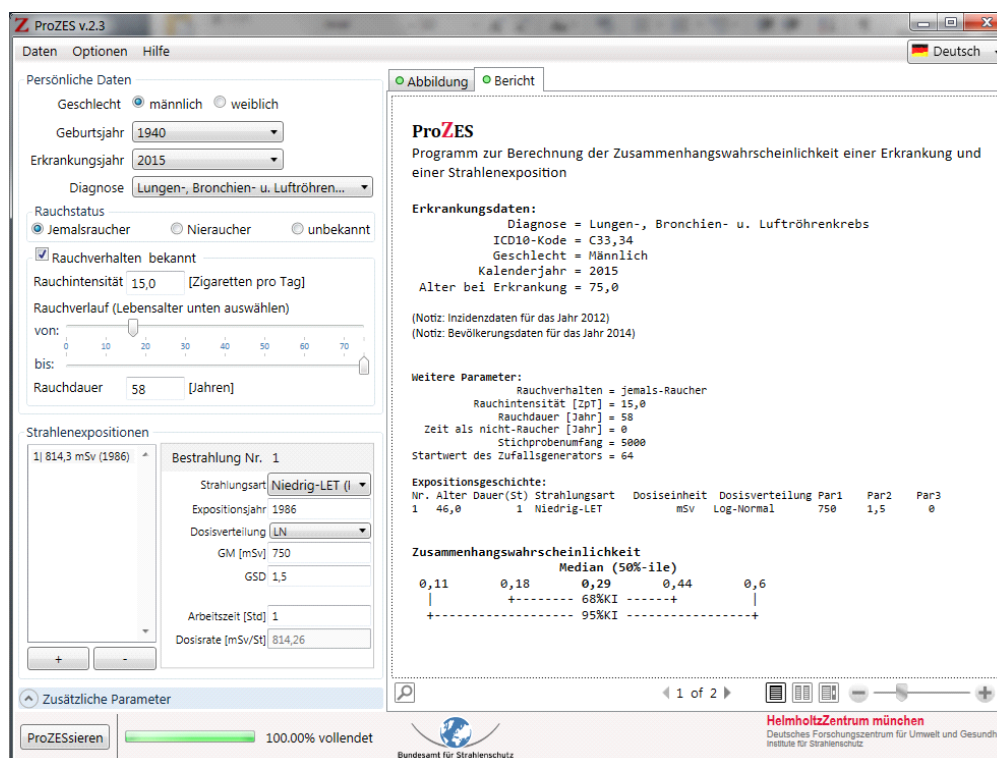
Im Laufe des Projektes wurde eine Reihe wissenschaftlicher Neu-Entwicklungen vorgenommen. Diese schließen z. B. Gruppierung von Organen, Entwicklung von Risikomodellen für einzelne und gruppierte Organe, Multi-Modell-Inferenz, Übertragung von Risiken auf die deutsche Bevölkerung und Abschätzung von Unsicherheiten ein. Eine detaillierte Darstellung findet sich im ausführlichen Abschlussbericht.

ProZES kann die simulierte Verteilung der Zusammenhangswahrscheinlichkeit in graphischer Form darstellen (Abbildung 1), oder die Werte und statistischen Eigenschaften zusammen mit den Eingabewerten ausgeben (Abbildung 2). Die Ergebnisse können in graphischer Form als PNG-Bild oder textbasiert als PDF-Dokument gespeichert werden. ProZES kann in deutscher und englischer Sprache ausgeführt werden, die Erweiterung auf weitere Sprachen ist prinzipiell möglich.

Mit ProZES wurde ein wissenschaftlich international führendes Programm erstellt, das die Zusammenhangswahrscheinlichkeit von Krebs nach Strahlenexposition berechnet. Dieses kann z. B. Gutachter bei der Bewertung von Entschädigungsklagen nach beruflicher Strahlenexposition unterstützen.



**Abbildung 1: Screenshot des ProZES Programms für die Berechnung der Zusammenhangswahrscheinlichkeit für Lungenkrebs (graphische Ausgabe). Ein spezifisches Rauchverhalten wurde vom Nutzer vorgegeben.**



**Abbildung 2: Screenshot des ProZES-Programms für die Berechnung der Zusammenhangswahrscheinlichkeit für Lungenkrebs (detaillierter Bericht). Ein spezifisches Rauchverhalten wurde vom Nutzer vorgegeben.**

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit strahlenbedingter maligner Erkrankungen im Einzelfall ist immer dann notwendig, wenn die Frage der Verursachung, wie bei den Erkrankungen um kerntechnische Anlagen herum oder für eine Kompensation von Berufskrankheiten, gestellt wird. Hierzu stellt das in dem Vorhaben entwickelte Programm ein wesentliches Hilfsmittel dar. Der Nutzen der Neuerstellung des strahlenepidemiologischen Tabellenwerks besteht darin, dass Entscheidungen im Einzelfall auf einer nachvollziehbaren Grundlage gefällt werden können, die dem aktuellen Stand der Wissenschaft entspricht.

|                                                                                                                                             |                                                  |                                                       |                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Thema</b><br>Weiterentwicklung der Internet-Informationsplattform "EMF Portal" und Ausbau zum WHO-Kollaborationszentrum                  |                                                  |                                                       |                                      |
| <b>Subject</b><br><i>Advancement of the internet information platform "EMF Portal" and development into a WHO-Collaboration Centre</i>      |                                                  |                                                       |                                      |
| <b>Kennzeichen</b><br>3612S70033                                                                                                            | <b>Beginn</b><br>01.07.2013                      | <b>Ende</b><br>31.12.2015                             | <b>Fördermittel</b><br>EUR 208.883,- |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Uniklinik RWTH Aachen, femu - Forschungszentrum für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit, Aachen |                                                  |                                                       |                                      |
| <b>Projektleitung</b><br>Dr. S. Driessen                                                                                                    | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. A. Dehos / AG-SG | <b>verantwortlich für den Text</b><br>Dr. S. Driessen |                                      |

## 1. ZIELSETZUNG

Das EMF-Portal ([www.emf-portal.org](http://www.emf-portal.org)) wurde 2005 mit finanzieller Unterstützung des Bundesumweltministeriums und des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) mit dem Ziel gegründet, wissenschaftliche Forschungsergebnisse und allgemeine Informationen zu den Wirkungen von elektromagnetischen Feldern auf die Gesundheit zu recherchieren, zu sammeln und öffentlich zugänglich zu machen. Hintergrund der Initiative war die Ende der 1990er Jahre aufkommende Diskussion zur elektromagnetischen Umweltverträglichkeit des Mobilfunks. Durch die transparente und umfassende Information über den aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand mit Hilfe einer öffentlichen und frei zugänglichen Internetseite in deutscher und englischer Sprache sollten u. a. kontrovers geführte Diskussionen in der Öffentlichkeit versachlicht und ein Beitrag zu einer objektiven Risikokommunikation geleistet werden.

Durch weitere finanzielle Unterstützung verschiedener Förderer<sup>1)</sup>, wie z. B. der Forschungsgemeinschaft Funk (FGF) und der Forschungsstelle für Elektropathologie (FfE), war es möglich, das Angebot des EMF-Portals stetig auszubauen, so dass der Datenbestand heute über 22 500 Publikationen und 5500 Zusammenfassungen einzelner wissenschaftlicher Studien umfasst (Stand: März 2016).

Mit Hilfe dieses Datenbestands ist es möglich, sowohl die Ergebnisse einzelner Studien online zur Verfügung zu stellen als auch verschiedene Trends in der Forschung zu erkennen. Gab es z. B. zu Beginn der Debatte Anfang der 2000er-Jahre noch verhältnismäßig wenige Studien (< 50 Neuveröffentlichungen/Jahr) zu den möglichen schädlichen Wirkungen von Mobilfunk-Strahlung auf die Gesundheit und biologische Systeme, so ist die Anzahl an wissenschaftlichen Studien zu dem Thema seit 2006 mit 80-100 Neuveröffentlichungen pro Jahr (vgl. Abbildung 1) auf unverändert hohem Niveau.

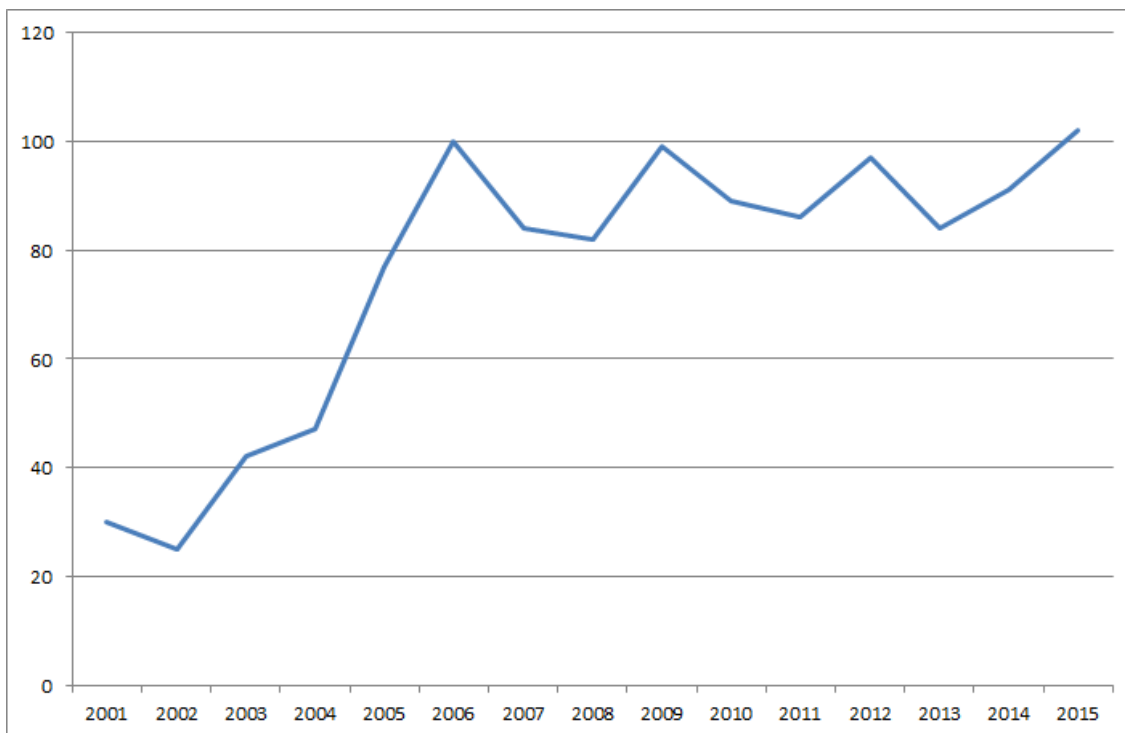
Insgesamt liefert das EMF-Portal mit seinem umfangreichen Datenmaterial die ideale Basis zur Bewertung der wissenschaftlichen Literatur zu den Wirkungen elektromagnetischer Felder. Bei der Bewertung des Internationalen Krebsforschungszentrums (IARC) zum Thema „Hochfrequenz und Krebs“ lieferte das EMF-Portal z. B. umfangreiche Literaturlisten mit relevanten Publikationen. Aber auch andere internationale Beratungsgremien und Forschergruppen, wie z. B. ARPANSA<sup>2)</sup>, Royal Society of Canada<sup>3)</sup> oder Health Council of the Netherlands<sup>4)</sup> greifen bei der Bewertung des aktuellen Sachstands auf die Recherche im EMF-Portal zurück.

<sup>1)</sup> <http://www.emf-portal.de/funding.php?l=g>

<sup>2)</sup> ARPANSA (2014): Review of Radiofrequency Health Effects Research - Scientific Literature 2000 - 2012. Technical Reports of ARPANSA 164: 1 – 76

<sup>3)</sup> Demers P, Findlay R, Foster KR, Kolb B, Moulder J, Nicol A-M, Prato F, Stam R (2014): Expert panel report on: A review of Safety Code 6 (2013): Health Canada's safety limits for exposure to radiofrequency fields. Royal Society of Canada, 2014 (Ottawa, Canada); 165 pages; ISBN: 978-1-928140-00-9

<sup>4)</sup> Health Council of the Netherlands, van Rhoon GC, Aleman A, Kromhout H, van Leeuwen FE, Savelkoul HFJ, Wadman WJ, van de Weerd DHJ, Zwamborn APM, Woutersen RA, Kelfkens G, Kreis IA, Lebre E, Pruppers MJM, Robijns J, Schutte RPR, van Rongen E (2014): Mobile phones and cancer. Part 2: Animal studies on carcinogenesis. Health Council of the Netherlands, 2014; 84 pages; ISBN: 978-94-6281-012-9



**Abbildung 1: Anzahl an Neuveröffentlichungen/Jahr experimenteller und epidemiologischer Studien (insgesamt n=1135) im Mobilfunk-Bereich im Verlauf der letzten 15 Jahre**

Das EMF-Portal ist seit 2011 Referenz-Datenbank der Weltgesundheitsorganisation (WHO). Seit 2015 wird im Rahmen eines Kooperationsprojektes mit dem Japan EMF Information Center (JEIC) an einer vollständigen Übersetzung aller Inhalte auch ins Japanische gearbeitet.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, das Angebot des EMF-Portals zu aktualisieren und auszubauen. Dabei wurden folgende Schwerpunkte gelegt:

- Es sollte ein umfassender Überblick über die Exposition der Bevölkerung bei niederfrequenten und hochfrequenten Feldern mit verlässlichen wissenschaftlichen Daten geliefert werden.
- Die wissenschaftlichen Daten zu den gesundheitlichen Wirkungen elektromagnetischer Felder sollten mit Übersichten und Grafiken so ergänzt und aufbereitet werden, dass die komplette Breite der Literatur im Bereich elektromagnetischer Umweltverträglichkeit übersichtlich dargestellt wird.
- Außerdem sollten spezifische Zusammenfassungen zu ausgewählten wichtigen Themen erstellt und
- allgemeine Grundlagen als Hintergrundinformation eingestellt werden.

Auf diese Weise sollte dem Informationsbedürfnis von Bürgerinnen und Bürgern im Bereich der gesundheitlichen Wirkungen elektromagnetischer Felder Rechnung getragen werden sowie ein Hilfsmittel bei der Grenzwertsetzung und Bewertung der gesundheitlichen Wirkungen elektromagnetischer Felder für nationale und internationale Expertengremien zur Verfügung gestellt werden.

*Hinweis: Es wird an einem Relaunch des EMF-Portals gearbeitet, der spätestens im April 2016 vollzogen wird. Von daher wird auf Abbildungen verzichtet, da diese dann nicht mehr aktuell sein werden. Alle im Folgenden beschriebenen Inhalte sind aber auf den Seiten des EMF-Portals ([www.emf-portal.de](http://www.emf-portal.de)) einzusehen.*

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Die neu erarbeiteten Informationsangebote ergänzen die bereits vorhandenen Übersichten, Grafiken, Zusammenfassungen und Hintergrundinformationen, so dass die komplette Breite der wissenschaftlichen Literatur und Informationen im Bereich der elektromagnetischen Umweltverträglichkeit übersichtlich dargestellt werden.

## **2.1 ERSTELLUNG VON ÜBERSICHTEN UND GRAFIKEN ZU THEMEN AUS DEM BEREICH DER NIEDERFREQUENTEN FELDER UND ERARBEITUNG VON ERLÄUTERNDEN UND ZUSAMMENFASSENDEN TEXTEN**

Für folgende Themen im Niederfrequenz-Bereich, insbesondere aus dem 50/60 Hz-Bereich, wurden Informationen zusammengestellt sowie Übersichten und Grafiken erarbeitet:

- Exposition der Bevölkerung durch niederfrequente Felder
- Epidemiologische Studien zu den Wirkungen niederfrequenter Felder, insbesondere zu neurodegenerativen Wirkungen sowie zu Wirkungen auf Kinder, insbesondere Leukämie im Kindesalter
- Tier- und zellexperimentelle Studien zu den Wirkungen niederfrequenter Netzfrequenz-Felder, insbesondere Untersuchungen im Zusammenhang mit der Krebsentstehung

## **2.2 ERSTELLUNG VON ÜBERSICHTEN UND GRAFIKEN ZU THEMEN AUS DEM BEREICH DER HOCHFREQUENTEN FELDER UND ERARBEITUNG VON ERLÄUTERNDEN UND ZUSAMMENFASSENDEN TEXTEN**

Für den Hochfrequenz-Bereich wurden Übersichten zur Exposition der Bevölkerung durch hochfrequente Felder erarbeitet und zusammengestellt.

## **2.3 ERARBEITUNG NEUER GRUNDLAGENTEXTE ZUM THEMA "ELEKTROMAGNETISCHE FELDER" INKLUSIVE BEARBEITUNG DER THEMATIK "RISIKOKOMMUNIKATION"**

Die bisher im EMF-Portal vorhandenen Grundlagentexte zu elektromagnetischen Feldern wurden vollständig überarbeitet, erweitert und an den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik angepasst. Ein Grundlagentext zur Risikokommunikation wurde ebenfalls integriert. Die in 2.1 und 2.2 erarbeiteten Übersichten und Grafiken wurden entsprechend integriert. Das gesamte Angebot wurde für englischsprachige Nutzer vollständig übersetzt.

# **3. DURCHFÜHRUNG**

## **3.1 ERSTELLUNG VON ÜBERSICHTEN UND GRAFIKEN ZU THEMEN AUS DEM BEREICH DER NIEDERFREQUENTEN FELDER UND ERARBEITUNG VON ERLÄUTERNDEN UND ZUSAMMENFASSENDEN TEXTEN**

### **3.1.1 Exposition der Bevölkerung durch niederfrequente Felder**

Zur Erfassung von Mess- oder Simulationswerten alltäglicher Expositionen durch elektromagnetische Felder steht im EMF-Portal eine Messwerte-Datenbank zur Verfügung (<http://www.emf-portal.de/exposource13/?l=g>). Diese wurde im Projektzeitraum kontinuierlich mit wissenschaftlich erhobenen Messwerten ergänzt und aktualisiert. Zur Abschätzung der Exposition der Bevölkerung durch niederfrequente Felder wurden Studien mit dosimetrischen Untersuchungen zu Feldquellen im persönlichen und häuslichen Bereich recherchiert und die entsprechenden Werte in die Datenbank eingearbeitet. Relevante Studien wurden sowohl innerhalb des EMF-Portals als auch über Medline oder die IEEE Xplore Digital Library recherchiert. Bei unzureichender Datenlage wurde die Suche auf das Internet ausgeweitet, um ggf. Forschungsberichte oder online gestellte Messdaten nationaler und internationaler Institutionen zu identifizieren. Relevante dosimetrische Daten wurden in die Datenbank mit Verweis auf die entsprechenden Referenzen aufgenommen. Auf diese Weise kann der Nutzer transparent nachvollziehen, aus welchen Quellen welche Daten gewonnen und extrahiert wurden und mit welcher Exposition der Bevölkerung bei den verschiedenen Feldquellen zu rechnen ist.

### **3.1.2 Epidemiologische Studien zu den Wirkungen niederfrequenter Felder, insbesondere zu neurodegenerativen Wirkungen sowie zu Wirkungen auf Kinder, insbesondere Leukämie im Kindesalter**

Alle im EMF-Portal vorliegenden epidemiologischen Studien im 50/60 Hz-Bereich (n=449, Stand: März 2016) wurden in Hinblick auf ihre untersuchten medizinischen Endpunkte sondiert und in insgesamt neun Obergruppen (z. B. Hirntumor, neurodegenerative Erkrankungen) kategorisiert. Für jede Studie wurden folgende Parameter in das datenbankbasierte Administrations-Tool aufgenommen:

- Studientyp

- Studiengruppe
- Beobachtungszeitraum
- Studienland
- medizinischer Endpunkt
- Expositionsparameter.

Anschließend wurde eine Struktur programmiert, um die Studien im Rahmen einer vorgefilterten Suche mit Hilfe einer grafischen Übersicht anzuzeigen.

### **3.1.3 Tier- und zellexperimentelle Studien zu den Wirkungen niederfrequenter Netzfrequenz-Felder, insbesondere Untersuchungen im Zusammenhang mit der Krebsentstehung**

Die gezielte Sondierung aller Publikationen im EMF-Portal ergab zu Projektbeginn, dass mehr als 1500 experimentelle Studien zu Tier- und Zellexperimenten (*in vivo* und *in vitro*) im Bereich 50/60 Hz vorlagen. Im Laufe der Projektlaufzeit wurden 1722 Studien als relevant eingestuft und dementsprechend in diesem Arbeitspaket berücksichtigt. Für alle Studien wurden die folgenden Daten extrahiert und in die Datenbank aufgenommen:

- Art des niederfrequenten Feldes und der Feldquelle bzw. des experimentellen Aufbaus
- Stärke der Exposition (magnetische Flussdichte und/oder elektrische bzw. magnetische Feldstärke)
- exponiertes System (*in vitro*: Zellen, Gewebe, Bakterien, Moleküle, Organellen etc.; *in vivo*: Tier, Mensch, Pflanze) und ggf. Spezies
- untersuchter Endpunkt.

Darüber hinaus wurde eine Struktur programmiert, um die Studien im Rahmen einer vorgefilterten Suche mit Hilfe von grafischen Übersichten anzuzeigen.

## **3.2 ERSTELLUNG VON ÜBERSICHTEN UND GRAFIKEN ZU THEMEN AUS DEM BEREICH DER HOCHFREQUENTEN FELDER UND ERARBEITUNG VON ERLÄUTERNDEN UND ZUSAMMENFASSENDE TEXTEN**

Es wurde wie unter 3.1 beschrieben vorgegangen, aber unter Berücksichtigung hochfrequenter Quellen.

## **3.3 ERARBEITUNG NEUER GRUNDLAGENTEXTE ZUM THEMA „ELEKTROMAGNETISCHE FELDER“ INKLUSIVE BEARBEITUNG DER THEMATIK „RISIKOKOMMUNIKATION“**

Das EMF-Portal bot zu Beginn dieses Projektes im Juli 2013 auf 43 Internetseiten Hintergrundinformationen zu den Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder in deutscher Sprache an. Graphiken und Bilder ergänzten das Informationsangebot. Diese Informationen wurden im Rahmen des Projektes auf Inhalt, Aktualität und Korrektheit überprüft, entsprechend überarbeitet und ergänzt. Das gesamte Angebot wurde außerdem neu strukturiert und ins Englische übersetzt und steht somit nun zweisprachig zur Verfügung. An der japanischen Übersetzung wird im Rahmen eines weiteren Projektes gearbeitet (vgl. Kapitel 1).

Das Kapitel „Risikokommunikation“ wurde neu erarbeitet.

# **4. ERGEBNISSE**

## **4.1 ERSTELLUNG VON ÜBERSICHTEN UND GRAFIKEN ZU THEMEN AUS DEM BEREICH DER NIEDERFREQUENTEN FELDER UND ERARBEITUNG VON ERLÄUTERNDEN UND ZUSAMMENFASSENDE TEXTEN**

### **4.1.1 Exposition der Bevölkerung durch niederfrequente und hochfrequente Felder**

Die Feldquellen wurden in acht Obergruppen zusammengefasst, die jeweils in unterschiedlich viele Untergruppen aufgeteilt wurden. Insgesamt gibt es derzeit Einträge zu 275 Feldquellen bzw. entsprechende Obergruppen und zur Erfassung der Messwerte wurden bisher 332 Referenzen (d. h. Studien, Forschungsberichte, Internetquellen) berücksichtigt. Im Folgenden sind die Gruppen mit ihren jeweiligen Feldquellen aufgelistet:

**Haushalt:** z. B. Babyfon, Beleuchtung (z. B. Leuchtstofflampe, Glühlampe, Halogenlampe), Bildschirm, Gartengeräte (z. B. Heckenschere, Rasenmäher), Hygiene und Pflege (z. B. Epilierer, Haartrockner, Rasierer, Zahnbürste), kabellose Leistungsübertragung, Küchen- und Haushaltsgeräte (z. B. Bügeleisen, Geschirrspülmaschine, Herd-Backofen, Induktionsherd, Kaffeemaschine, Staubsauger, Waschmaschine, Wasserkocher), Klimatisierung (z. B. Klimaanlage), Ladestationen, Mikrowellenherd, Uhren & Wecker, Unterhaltungselektronik (z. B. Headset, iPod, Radiogerät), Wärme & Heizung (z. B. Boiler & Durchlauferhitzer, Heizdecke), Wasserbett, Werkzeuge (z. B. Bohrmaschine, Schraubenzieher).

**Computer und Büro:** PC und Laptop, Drucker, Fax, Kopierer, Bleistiftspitzer.

**Mobilfunk und Funkanwendungen:** Radio und Fernsehen (Hörfunk, Antennenfernsehen), Mobiltelefon (GSM, LTE<sup>1)</sup>, UMTS), Mobilfunk-Basisstation (GSM, LTE, UMTS), W-LAN, Bluetooth, DECT, PLC<sup>2)</sup>, WiMax, ZigBee, Amateurfunk, CB-Funk, Radar-Systeme (Schiffsradar, Verkehrsradar, Wetterradar, Luftraumüberwachungsradar), Satellitenfunk, TETRA.

**Stromversorgung:** Hochspannungsfreileitung (bis 72,5 kV-Leitungen, 110 kV bis 150 kV-Leitung, 161 kV-Leitung, 200 kV bis 300 kV-Leitung, 345 kV-Leitung, 380 kV bis 440 kV-Leitung, 500 kV bis 765 kV-Leitung, HGÜ-Landkabel, Bahnüberleitung), Erd- und Seekabel (HGÜ<sup>3)</sup>-Seekabel, 10 kV bis 72,5 kV-Erdkabel, 72,5 kV bis 150 kV-Erdkabel, 220 kV-Erdkabel, 275 kV-Erdkabel, 380 kV bis 420 kV-Erdkabel), Umspannwerk, Windenergieanlage, Photovoltaik-Modul, Intelligentes Stromnetz.

**Sicherungs- und Identifikationssysteme:** elektronische Artikelsicherung (akusto-magnetisches System, Mikrowellen-System, elektromagnetisches Warensicherungssystem, Radiofrequenzsystem, RFID<sup>4)</sup>), Metall-detektor, Einbruchmeldeanlage, Zugsicherung.

**Fahrzeuge und Verkehrsmittel:** kabelloses Aufladegerät für E-Fahrzeuge, Schienenfahrzeug (Eisenbahn, Straßenbahn, U-Bahn, Magnetschwebbahn), Elektrofahrzeug (Elektroauto, Elektroschlepper), Hybrid-Fahrzeug (Vollhybrid-Auto, Mildhybrid-Auto, Hybrid-Bus, Hybrid-Lastkraftwagen), Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, Flugzeug, Zugsicherung.

Neben diesen sechs Obergruppen zur Abschätzung der Exposition der Bevölkerung wurden die folgenden beiden Obergruppen aus dem beruflichen Umfeld integriert, die aber nicht Bestandteil des Projektes waren und sich derzeit noch in der Bearbeitung befinden: „**Industrielle Anlagen & Geräte**“ (z. B. Aluminiumschmelzwerk, industrielle Öfen) sowie „**Medizinische Geräte**“ (z. B. MRT, Dentalgeräte, Diathermiegerät).

#### 4.1.2 Epidemiologische Studien zu den Wirkungen niederfrequenter Felder, insbesondere zu neurodegenerativen Wirkungen sowie zu Wirkungen auf Kinder, insbesondere Leukämie im Kindesalter

Die vorgefilterte Suche mit Hilfe interaktiver Grafiken stellt dem Nutzer folgende Übersichten und Informationen zu den Themen „Kinderleukämie“ und „neurodegenerative Erkrankungen“ zur Verfügung:

- Zu jedem Endpunkt kann der Nutzer zwischen einer Übersicht der Artikel in Form einer **Literaturliste** mit den bibliografischen Angaben und
- einer **Übersichtstabelle** mit allen wichtigen Parametern (z. B. Studientyp, Untersuchungszeitraum, Endpunkt, Expositionsparameter) wählen.
- Außerdem wurden jeweils zusammenfassende Texte mit einer Einführung in das Thema erstellt. Dabei wurden die wesentlichen Punkte in Form von **Fragen und Antworten** aufbereitet, z. B.:
  - Warum wird Kinderleukämie bzw. warum werden neurodegenerative Erkrankungen untersucht?
  - Was ist Kinderleukämie bzw. was sind neurodegenerative Erkrankungen?
  - Wie häufig tritt Kinderleukämie auf?
  - Welche Probleme treten bei der Durchführung epidemiologischer Studien auf?
  - Welche Forschung wird zu Kinderleukämie aktuell durchgeführt?
  - Wie sind die Studien jeweils zu bewerten?

Unter dem letzten Punkt wird auf relevante Stellungnahmen von Expertengremien sowie Reviews und Meta-Analysen verwiesen.

<sup>1)</sup> Long Term Evolution

<sup>2)</sup> Packet Loss Concealment

<sup>3)</sup> Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung

<sup>4)</sup> Radio Frequency Identification

Neu erscheinende Publikationen werden sukzessive in diese Struktur eingearbeitet. Die Grafiken und Tabellen sind somit immer aktuell.

#### **4.1.3 Tier- und zellexperimentelle Studien zu den Wirkungen niederfrequenter Netzfrequenz-Felder, insbesondere Untersuchungen im Zusammenhang mit der Krebsentstehung**

Alle 1722 experimentellen Studien zu Tier- und Zellexperimenten im Bereich 50/60 Hz werden nun im Rahmen einer vorgefilterten Suche übersichtlich angezeigt. Die Studien zu den Wirkungen magnetischer Felder (n=1433) und elektrischer Felder (n=289) werden separat dargestellt. Zu jedem Endpunkt erhält der Nutzer nach entsprechender Auswahl:

- eine Übersicht mit den zugehörigen Artikeln in Form einer einfachen **Literaturliste** und
- eine **Übersichtstabelle** mit allen wichtigen Parametern (bibliographische Daten inkl. Erscheinungsjahr, Endpunkt, Frequenz, Expositionsdauer und weitere Expositionsparameter).

Neu erscheinende Publikationen werden sukzessive in diese Struktur eingearbeitet. Die Grafiken und Tabellen sind somit immer aktuell.

## **4.2 ERSTELLUNG VON ÜBERSICHTEN UND GRAFIKEN ZU THEMEN AUS DEM BEREICH DER HOCHFREQUENTEN FELDER UND ERARBEITUNG VON ERLÄUTERNDEN UND ZUSAMMENFASSENDE TEXTEN**

Die Ergebnisse zu Mess- oder Simulationswerten alltäglicher Expositionen durch hochfrequente elektromagnetische Felder sind in Kapitel 4.1.1 "Exposition der Bevölkerung durch niederfrequente und hochfrequente Felder" zusammengefasst dargestellt.

## **4.3 ERARBEITUNG NEUER GRUNDLAGENTEXTE ZUM THEMA „ELEKTROMAGNETISCHE FELDER“ INKLUSIVE BEARBEITUNG DER THEMATIK „RISIKOKOMMUNIKATION“**

Es wurden zu den vier folgenden Oberthemen Informationen und Zusammenfassungen erarbeitet: Technik, Wirkungen, Grenzwerte und Risikokommunikation. Dabei wurden die Oberthemen ggf. in weitere Kapitel unterteilt. Alle Inhalte wurden gleichzeitig ins Englische übersetzt.

### **Technik**

- allgemeine Informationen, z. B. zu Begriffen wie Frequenz, Wellenlänge, elektromagnetisches Spektrum, geschichtlicher Rückblick
- statische Felder (0 Hz): natürlich vorkommende und technisch erzeugte statische Felder mit Beispielen (öffentlicher Schienenverkehr, Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ), Konverter-Stationen, MRT, usw.)
- Niederfrequenz (0,1 Hz - 1 kHz): Stromversorgung und Stromnetz, Versorgungsnetz, Hochspannungsfreileitung, Erdkabel, Umspannstation, Felder im Haushalt
- Zwischenfrequenz (1 kHz - 10 MHz): natürlich vorkommende und technisch erzeugte Felder im Zwischenfrequenzbereich mit Beispielen (Induktionskochherd, Elektrofahrzeug, kabellose Aufladegeräte für Elektrofahrzeuge)
- Hochfrequenz (10 MHz - 300 GHz): natürliche hochfrequente und technisch erzeugte elektromagnetische Felder mit Beispielen (Mobilfunk, Rundfunk-Sendeanlagen (Radio und Fernsehen), TETRA-Digitalfunk, Mikrowellenofen, usw.)

### **Wirkungen**

- allgemeine Informationen, z. B. zu Studientypen oder Bewertung
- Wirkungen statischer Felder (0 Hz)
- Wirkungen niederfrequenter Felder (0,1 Hz - 1 kHz) mit Beispielen (Elektrosensibilität, Neurodegenerative Erkrankungen, Krebs und Kinderleukämie, usw.)
- Wirkungen der Felder im Zwischenfrequenz-Bereich (1 kHz - 10 MHz)
- Wirkungen hochfrequenter Felder (10 MHz - 300 GHz) mit Beispielen (Krebserkrankungen (Hirntumoren und andere Tumor-Arten), Elektrosensibilität, Gehirnaktivität/EEG, Fertilität, usw.)

### **Grenzwerte**

- Festlegung der Grenzwerte

- Basisgrenzwerte
- Referenzwerte
- Grenzwerte in Deutschland (Allgemeinbevölkerung)
- Grenzwerte in Deutschland (berufliche Exposition)
- Grenzwerte im internationalen Vergleich

#### **Risikokommunikation**

- der Dialog in der Risikokommunikation
- Instrumente und Publikationen zur Risikokommunikation
- Risikowahrnehmung mit Publikationen
- Risikobewertung mit Publikationen
- Bewertungsprozess für gesundheitliche Wirkungen
- Risikomanagement

## **5. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE**

Das EMF-Portal steht als umfangreiche Informationsquelle zum Thema elektromagnetische Felder und ihre Wirkungen im Internet frei zur Verfügung. Es soll dazu beitragen, die Diskussion über mögliche gesundheitliche Auswirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder zu versachlichen und die Gründe für die Festlegung von Grenzwerten und Vorsorgemaßnahmen nachvollziehbar zu erklären. Die relativ hohen Zugriffszahlen für das EMF-Portal belegen eine hohe Akzeptanz vor allem bei beruflich mit der Materie befassten Personen. Die Bedeutung des Portals für die Risikokommunikation zeigt sich auch an der Kooperation mit dem Japan EMF Information Center (JEIC), die in eine vollständige Übersetzung ins Japanische führen wird.

Dieses Vorhaben hatte das vorrangige Ziel, die Nutzerfreundlichkeit für Experten zu verbessern, die die Forschungsergebnisse bewerten und daraus Empfehlungen zum Schutz der Bevölkerung und der beruflich exponierten Personen ableiten. Es wurden neue grafische Übersichten geschaffen, die die Informationen in geeigneter Form zusammenfassen und strukturieren. Die neuen Grundlagentexte dienen sowohl der Information der Laien als auch der aus beruflichen Gründen interessierten Personen.

Seinen Nutzen wird das Portal nur behalten, wenn es weiterhin mit neuen Veröffentlichungen auf dem aktuellen Stand gehalten wird.

**Themenbereich 08**  
**Nichtionisierende Strahlung**

***Subject area 08***  
***Non-ionising radiation***

|                                                                                                                                                                                          |                                                             |                           |                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Thema</b>                                                                                                                                                                             |                                                             |                           |                                                                                         |
| Analyse des öffentlichen Diskurses zu gesundheitlichen Auswirkungen von Hochspannungsleitungen - Handlungsempfehlungen für die strahlenschutzbezogene Kommunikation beim Stromnetzausbau |                                                             |                           |                                                                                         |
| <b>Subject</b>                                                                                                                                                                           |                                                             |                           |                                                                                         |
| <i>Analysis of public discourse on health effects of high voltage power lines - recommendations for radiation protection-related communication in current grid expansion</i>             |                                                             |                           |                                                                                         |
| <b>Kennzeichen</b><br>3614S80008                                                                                                                                                         | <b>Beginn</b><br>01.11.2014                                 | <b>Ende</b><br>31.10.2015 | <b>Fördermittel</b><br>EUR 331.397,-                                                    |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising                                                                                                       |                                                             |                           |                                                                                         |
| <b>Projektleitung</b><br>Prof. Dr. Dr. O. Kühne                                                                                                                                          | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>C. Egblomassé-Roidl / AG-SG 1.4 |                           | <b>verantwortlich für den Text</b><br>Dr. F. Weber, C. Jenal,<br>Prof. Dr. Dr. O. Kühne |

## 1. ZIELSETZUNG

Gegenstand des Forschungsvorhabens war eine diskurstheoretische Analyse zentraler Argumentationsmuster innerhalb des öffentlichen Diskurses zum Stromnetzausbau mit einem Schwerpunkt auf wahrgenommenen gesundheitlichen Auswirkungen von Hochspannungsleitungen unter Berücksichtigung verschiedener Sprechergruppen. Welche Relevanz nehmen Gesundheit und Strahlenschutz in bisher vorliegenden wissenschaftlichen Untersuchungen, in Kampagnen und Öffentlichkeitsarbeit, in Medien, bei unterschiedlichen Sprecherinnen und Sprechern und gerade auch auf lokaler Ebene ein? Inwiefern handelt es sich bei Gesundheitsfragen im Kontext des Stromnetzausbaus auch um einen fachspezifischen Diskurs, der gegebenenfalls nicht problemlos anschlussfähig an Diskursstränge von Lokal-Politikerinnen und -Politikern, Bürgerinnen und Bürgern und Bürgerinitiativen ist? Ganz grundlegend war auch danach zu fragen, welche Argumentationsmuster zentral verankert, welche dagegen nur als randständig nachzuzeichnen sind. Welche Sprecherinnen und Sprecher prägen den Diskurs? Welche Positionen sind zu unterscheiden? Zudem wurde danach gefragt, ob regionsspezifische und zeitliche Unterschiede bestehen. Gibt es Länder oder Regionen, in denen Widerstand besonders stark ausfällt oder spezifische Diskursstrukturen nachgezeichnet werden können? In den Mittelpunkt rückten Fragen nach der Konstitution bestimmter Deutungen und der Wirkmächtigkeit spezifischer Argumentationsmuster, die zur Machtentfaltung bestimmter Positionen führen. Ein Verständnis dieser Prozesse bildet die Grundlage dafür, Problemlagen bei Kommunikationsstrategien und Dialogprozessen in Richtung einer bestimmten Position zu verstehen und einzuordnen sowie gar stereotyp verlaufende Debatten in konstruktivere Richtungen zu lenken, um darüber eine gesundheitspolitische Aufklärung durch Handlungsempfehlungen für die strahlenschutzbezogene Kommunikation beim Stromnetzausbau aufbauen zu können.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Die einzelnen Zielsetzungen des Forschungsvorhabens leiteten sich aus den drei Arbeitspaketen (AP) ab.

- Im ersten Schritt (AP 1) stand die Aufarbeitung des aktuellen wissenschaftlichen Forschungsstandes zum Stromnetzausbau und „flankierenden“ Bereichen wie erneuerbare Energien im Vordergrund. Zudem sollten Zugänge der Öffentlichkeitsarbeit und Kampagnen gesundheitlicher Aufklärung zu elektrischen und magnetischen Feldern und Stromnetzausbau sowie bestehende Bürgerinitiativen im Kontext des Netzausbaus systematisiert werden.
- Im zweiten Schritt (AP 2) sollten zentrale Diskursstränge zum Stromnetzausbau ausdifferenziert werden. Welche Argumentationsmuster dominierten beziehungsweise dominieren den Diskurs? Welche Unterschiede lassen sich regional und nach Sprechergruppen nachzeichnen?
- Aufbauend auf den Ergebnissen der ersten beiden Arbeitspakete sollten schließlich Handlungsempfehlungen im Hinblick auf gesundheitliche Aufklärung beim Stromnetzausbau entwickelt werden (AP 3).

### 3. METHODIK

Zur Analyse des Diskurses zu gesundheitlichen Auswirkungen von Hochspannungsleitungen in wissenschaftlichen Veröffentlichungen (251 wurden insgesamt zusammengestellt und ausgewertet), Öffentlichkeitsarbeit und Kampagnen sowie innerhalb untersuchter Medien (Google-Suchergebnisse, Artikel aus Süddeutscher Zeitung und Focus, Talkshows), Interviews und zusammengestellter Dokumente erfolgte eine Triangulation quantitativer und qualitativer Methoden, die den Prämissen der Diskurstheorie von Ernesto Laclau und Chantal Mouffe folgen. Der Ansatzpunkt liegt in der Deutung von Diskursen als temporäre Fixierung von Bedeutung, die gerade dadurch hergestellt wird, dass vergleichbare Muster regelmäßig (re)produziert werden. Alternative Deutungsmöglichkeiten rücken so ins Abseits. Methodisch ist also darauf zu achten, Regelmäßigkeiten herauszuarbeiten, mit denen spezifische Deutungsmuster verfestigt werden. Um Sprecher im Diskurs, deren Positionen und Hegemonien abzubilden, wurden innerhalb der Analysebestandteile zitierte Sprecher und deren Sprecherpositionen ausdifferenziert und quantifiziert. Die Auswertungen fußen zentral auf Frequenzanalysen auf quantitativer Ebene sowie der Analyse narrativer Muster und einer bilddiskursanalytischen Untersuchung auf qualitativer Ebene.

Zur Identifikation räumlicher Schwerpunkte des Widerstandes wurden eine internet-basierte Online-Recherche und eine quantitative Auswertung inklusive einer kartographischen Darstellung vorgenommen. Um zu überprüfen, ob sich regionale und lokale Bezugnahmen von eher nationalen oder länderbezogenen unterscheiden, wurden vier Fallstudien analysiert. Ausgehend vom Argumentationsstrang „Stromgewinnung im Norden und Stromverbrauch im Süden“ wurden zwei Fallstudien aus Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen (Norddeutschland) sowie zwei aus Bayern (Süddeutschland) ausgewählt. Mit einem neopragmatisch-angewandten Zugriff wurden Handlungsempfehlungen abgeleitet und ein „Werkzeugkasten“ für Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Bundesamtes für Strahlenschutz entwickelt.

### 4. DURCHFÜHRUNG

Im Rahmen der Umsetzung des Forschungsvorhabens erfolgte zunächst eine Zusammenstellung digitaler Textkorpora wissenschaftlicher Veröffentlichungen als Grundlage für PC-gestützte quantitativ-lexikometrische Analysen. Anhand von Frequenzanalysen wurde ermittelt, wie absolut oder relativ häufig Wörter und Wortfolgen im Gesamtkorpus sowie in einem bestimmten Segment des Korpus vorkommen und damit konstitutiv für das jeweilige Korpus sind. Mittels der Analyse narrativer Muster wurde qualitativ textbasiert im Detail auf ausgewählte Argumentationsmuster geblickt, um die quantitativen Ergebnisse ergänzend zu rahmen und einzuordnen. Parallel wurden Zugänge der Öffentlichkeitsarbeit und Kampagnen gesundheitlicher Aufklärung nach Schwerpunkten systematisiert und Fallbeispiele untersucht. Bürgerinitiativen, die sich mit dem Stromnetzausbau auseinandersetzen, wurden ermittelt und ihre Ziele erfasst. Auf dieser Basis erfolgte eine regionale und argumentationsbezogene Strukturierung.

Zur Ausdifferenzierung von Diskurssträngen wurden Inhalte aktueller Google-Treffer sowie frei verfügbarer Online-Artikel der Süddeutschen Zeitung und des Focus zusammengestellt und ausgewertet. Darüber hinaus wurden Interviews mit Expertinnen und Experten mit Bundes- und Länderbezug geführt. Mit Rückgriff auf das erste Arbeitspaket wurden die vier Fallstudien identifiziert, die mit Zeitungs- und Internetauswertung sowie Interviews einer genaueren Analyse unterzogen wurden. Konkretisierte Handlungsempfehlungen wurden aus dem Ergebnis der Diskursanalyse zum Stromnetzausbau abgeleitet.

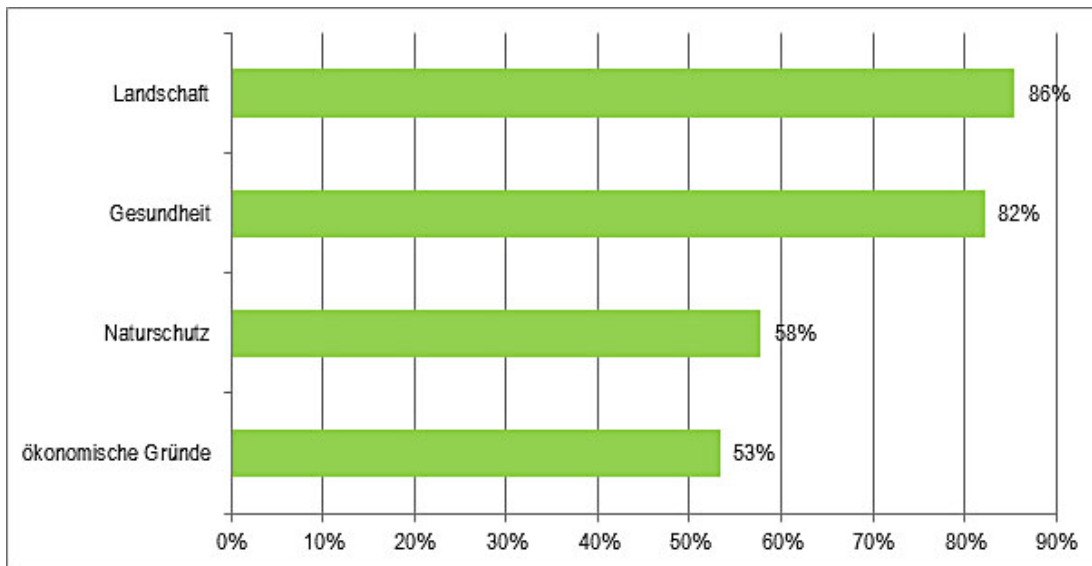
### 5. ERGEBNISSE

#### 5.1 DISKURSANALYSE: GESUNDHEITSBEZOGENE ARGUMENTATIONSMUSTER

Der politische Beschluss, bis zum Jahr 2022 alle deutschen Kernkraftwerke vom Netz zu nehmen, bleibt nicht folgenlos für die Struktur der deutschen und europäischen Stromversorgung. Hierzu wird in Deutschland der Ausbau erneuerbarer Energien als zentraler Baustein gesehen. Von vielen Sprecherinnen und Sprechern wird damit allerdings auch eine Veränderung bestehender Stromnetze, respektive ein umfänglicher Netzausbau verknüpft - und hieran entzündeten sich im Zuge eines Eingriffs in die routinisierte Welt Konflikte.

Die Diskursanalyse macht deutlich, dass unterschiedliche soziale Systeme und ihre spezifischen Logiken von entscheidender Bedeutung für die Beurteilung des Stromnetzausbaus sind. Während Wirtschaft und Politik sehr stark über technische sowie volks- und betriebswirtschaftliche Notwendigkeiten argumentieren und darüber den Netzausbau als zwingend erforderlich legitimieren, werden „drohende“ Veränderungen innerhalb der bisherigen „Lebenswelten“ von Bürgerinitiativen emotional und ästhetisch vielfach sehr stark negativ be-

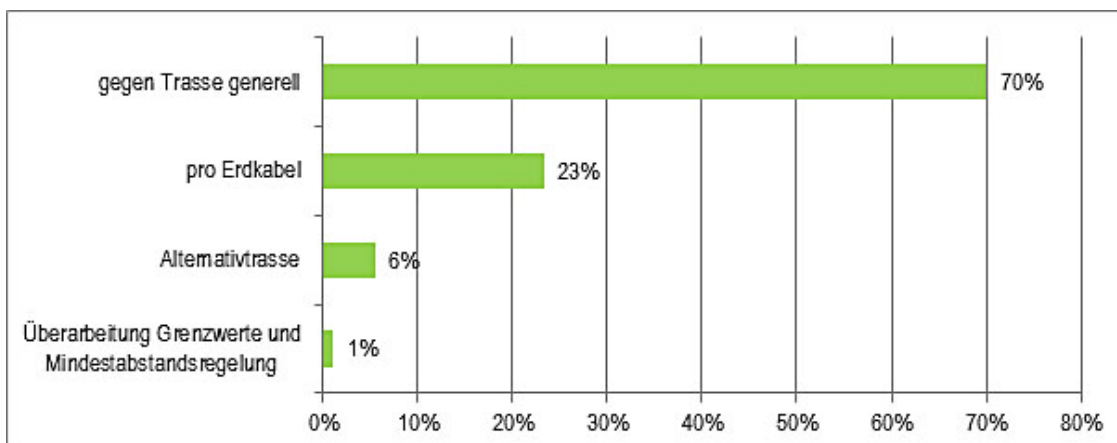
wertet und abgelehnt. Planungen werden von Gegnerinnen und Gegnern regelmäßig mit Verweisen auf Landschaft, Gesundheit, Naturschutz sowie Wirtschaft und Tourismus kritisiert. Als Argumente gegen den Bau der Stromtrassen werden von den 90 ermittelten Bürgerinitiativen zu mehr als 80 % landschafts- und raumbezogene Argumente angeführt (Abbildung 1). Gleich darauf folgt bereits das Thema Gesundheit und damit einhergehend die Befürchtung gesundheitlicher Beeinträchtigungen oder gar Schäden durch die von den Leitungen ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder. Mit Abstand folgen als weitere Beweggründe im Widerstand gegen den Netzausbau Naturschutz (bei mehr als 50 %) und ökonomische Argumente durch befürchtete Wertverluste von Grundstücken und einen negativen Einfluss auf den Tourismus (ebenfalls über 50 %). Naturschutz wird in der Regel eher als flankierendes Argument eingesetzt, oftmals eingebettet in das Argumentationsmuster „Schutz von Natur und Umwelt“.



Quelle: Erhebung und Darstellung des Projektteams.

**Abbildung 1: Argumente der Bürgerinitiativen (gesamt)**

Es werden entweder Freileitungen gegenüber Erdverkabelungen abgelehnt oder neue Leitungen als in Gänze ‚nicht erforderlich‘ bewertet. Eine Übersicht über die allgemein verfolgten Ziele der Bürgerinitiativen zeigt, dass annähernd drei Viertel der erfassten Initiativen den Bau der Stromtrassen generell zu verhindern versuchen, etwa ein Viertel eine Erdverkabelung anstreben, während eine Minderheit sich für eine Alternativtrasse beziehungsweise die Überarbeitung der geltenden Grenzwerte und Mindestabstandsregelungen einsetzt (Abbildung 2).



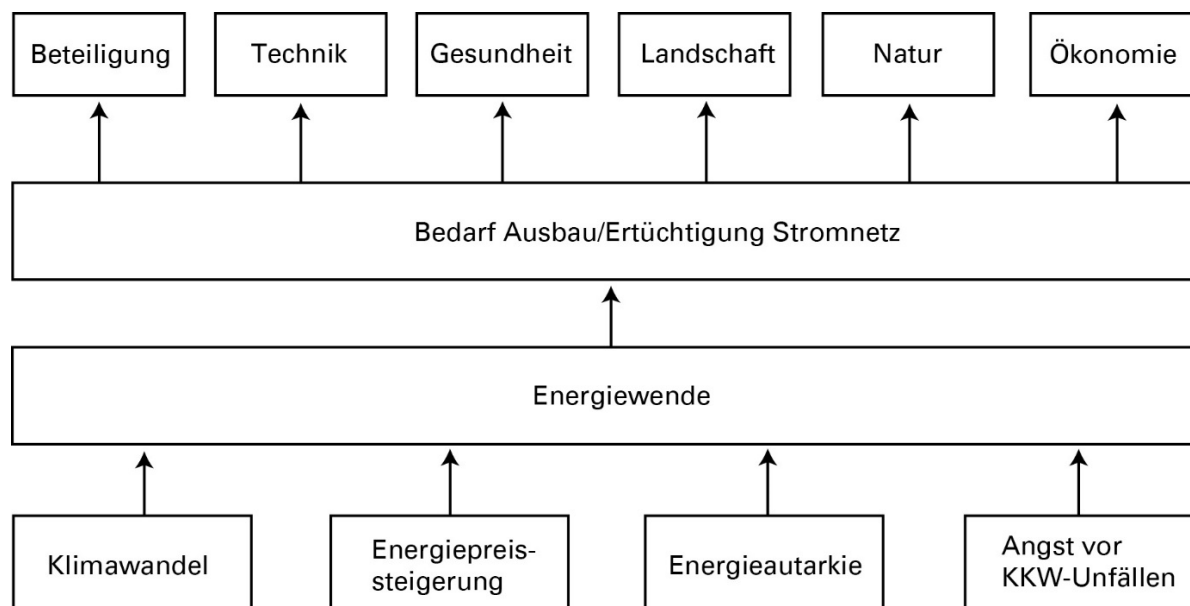
Quelle: Erhebung und Darstellung des Projektteams.

**Abbildung 2: Ziele der Bürgerinitiativen (gesamt)**

Innerhalb der gesundheitlichen Bezüge werden „potenziell“ mögliche Risiken hervorgehoben, wobei es bislang - so der Tenor untersuchter Veröffentlichungen - keine Studien gebe, die Gefahren zweifelsfrei belegten noch ausschließen. Die im System der Beweisführung begründete Tatsache, dass nichts zweifelfrei ausgeschlossen werden kann, scheint den Verfassern dieser Veröffentlichungen unbekannt zu sein. Technisch und rechtlich wird auf Grenzwerte Bezug genommen, bei deren Einhaltung Risiken minimiert würden. Eine gewisse uneindeutige Informationslage bleibt allerdings. Gesundheitsbezogene Diskursstränge sind innerhalb der massenmedialen Analysebestandteile der Google-Treffer, Süddeutsche Zeitung- und Focus-Artikel und der Talkshows diffus beziehungsweise nur begrenzt präsent. Im Zentrum stehen politische und wirtschaftsbezogene Argumentationsmuster um die Energiewende und eine tendenzielle Befürwortung des Stromnetzausbaus. Argumente um „Krebsrisiken“, „neurodegenerative Erkrankungen“ und „der Strahlenschutz im Zusammenhang mit Grenzwerten“ reihen sich in andere, bereits angeführte Bezugnahmen um Landschaft, Natur et cetera ein.

Während von einigen Interviewpartnerinnen und -partnern gesundheitsbezogene Befürchtungen um das allgemeine Krebsrisiko, Leukämie bei Kindern, weitere Erkrankungen oder ionisierte Raumladungswolken als für Bürgerinnen und Bürger entscheidend gerahmt werden, halten andere eher „Landschaftsverschandelung“ für zentral. Umfänglicherer Forschungsbedarf wird im Hinblick auf die Gleichstromübertragungstechnik konstatiert. Wissenschaftliche Erkenntnisse fehlten bislang noch - gleichzeitig besteht der Bedarf einer besseren Vermittlung zu bekannten Vor- und Nachteilen dieser Technik. Durchgehend werden Fragen zur Gesundheit und zum Strahlenschutz (re)produziert, so dass diese einen Teil des Aushandlungsprozesses bilden - ob machtvoll verankert oder eher als Subdiskurs, der grundsätzlich auch an Dominanz gewinnen könnte. Ebenfalls durchgehend werden bisherige Planungs- und Umsetzungsprozesse im Kontext des Stromnetzausbaus als problematisch bewertet, was sich in teilweise massiven Bürgerprotesten widerspiegelt. Übertragungsnetzbetreiber hätten einen Lernprozess durchmachen müssen, dass Bürgerinnen und Bürger stärker als bei früheren Trassenbauvorhaben einbezogen und beteiligt werden möchten. Dies zeigt sich gerade auch in den beiden norddeutschen Fallstudien „Keine 380kV-Freileitung am Teuto“ und „Delligsen in der Hilsmulde“, in denen nicht die Trassenplanungen als solche, sondern die Verfahren und die geplanten Freileitungen abgelehnt werden. Eine ausführlichere Diskussion sollte über die Erdverkabelung erfolgen - hier gerade auch mit dem Verweis auf Gesundheit und Strahlenschutz. In Bayern dagegen werden durch die Bürgerinitiativen „Pegnitz unter Strom“ und „Hormersdorf-Schnaittach“ die Planungen um die Gleichstrompassage Süd-Ost als gänzlich nicht erforderlich kritisiert. Die Gleichstrompassage Süd-Ost wird mit gesundheitlichen Auswirkungen in Beziehung gebracht - neben weiteren Argumenten um „Landschaftsverschandelung“, „Heimatverlust“ oder negativen wirtschaftlichen Auswirkungen (insbesondere die Befürchtung eines Wertverlustes der eigenen Immobilie). Elektromog, elektrische und magnetische Felder und Raumladungswolken (Korona-Effekte) werden zu ‚Ängsten‘, die nicht entkräftet werden, beziehungsweise zu „Risiken“, die nicht als „unter Umständen möglich“, sondern teilweise eher als „Fakt“ verankert werden. Dennoch Stromtrassen umsetzen zu wollen, wird „moralisch“ verwerflich gesehen.

Zusammenfassend bilden, ausgehend von Konsequenzen aus der Energiewende, die Bedarfsfrage des Stromnetzausbaus, Beteiligung, die eingesetzte Technik sowie Landschaft, Gesundheit, Natur und Wirtschaft zentrale Konfliktfelder, die innerhalb des Netzausbaus ausgehandelt werden (Abbildung 3) und sich in eher kognitive, emotionale sowie ästhetische Bewertungsmuster einreihen.



Quelle: Erhebung und Darstellung des Projektteams.

**Abbildung 3: Zusammenfassende Darstellung**

Als zentraler Knotenpunkt im gesamten Diskurs um den Netzausbau fungiert als Ausgangsbasis die „Energiewende“. An diese ist allerdings nicht nur in Verbindung mit dem Argument eines Nord-Süd-Stromtransports die Ausbau-Notwendigkeit von Stromnetzen anschlussfähig, sondern auch die genau entgegengesetzte Position: die der Zielsetzung einer Verhinderung neuer Stromtrassen, was sich besonders innerhalb der beiden bayerischen Fallstudien „Pegnitz unter Strom“ und Bürgerinitiative „Hormersdorf-Schnaittach“ zeigte: „Energiewende“ wird dort als „dezentrale, regionale Energiewende“ verstanden, die durch Stromtrassen quer durch Deutschland konterkariert würde. Zentrale Momente, die sich hier diskursiv an den Netzausbau anketten, sind ein befürchteter Braunkohlestromtransport und der EU-Stromhandel, der hierdurch befördert werden sollte.

Neuere politische Entwicklungen von Anfang Juli 2015 können nun so gedeutet werden, dass verschiedenen Kritikpunkten Rechnung getragen wird: Nicht länger Freileitungen, sondern Erdverkabelungen - obwohl teurer - werden zur politisch favorisierten Lösung für den SuedLink - also die, die vielfach von Bürgerinitiativen präferiert würde, da damit neben „Landschaftsschutz“ und „Immobilienwerterhalt“ gerade auch geringere „Gesundheitsrisiken“ verbunden werden. Die Gleichstrompassage Süd-Ost, an der sich besonders heftiger Widerstand entzündete, wie die beiden untersuchten Fallstudien, Zusammenschlüsse von Bürgerinitiativen und der Verein „Kommunen gegen die Gleichstrompassage“ zeigen, soll nun auch in Erdverkabelung erfolgen beziehungsweise über den bestehenden Ostbayernring durch Ertüchtigung dieser Trasse ermöglicht werden. Abzuwarten bleibt, ob die politische Durchsetzungsmacht ausreichen wird, um die Notwendigkeit wieder durchgehend zum hegemonialen Diskursbestandteil gerade in Bayern werden zu lassen. Wenn davon ausgegangen wird, dass „klassische“ Government-Züge einer Entscheidungs- und Durchsetzungsmacht top down heute nicht mehr „greifen“, sondern gerade auch Bürgerinnen und Bürger sowie Bürgerinitiativen „mitbestimmen“ (wollen), dann ergeben sich (weiterhin) sehr hohe Anforderungen an künftige Planungen.

## 5.2 KONFLIKTFELDER UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Für alle beschriebenen Konfliktfelder lassen sich - in neopragmatisch angewandt-wissenschaftlicher Herangehensweise - mögliche Handlungsempfehlungen ableiten.

Da gemäß den unterschiedlichen Systemlogiken gerade gesundheitsbezogene Aspekte unterschiedlich gerahmt beziehungsweise adressiert werden, sollte hier eine stärkere Perspektivenerweiterung forciert werden: Die von Politik und Wirtschaft sowie Sprecherinnen und Sprechern der Umsetzung des Netzausbaus bereitgestellten Informationen und Materialien sind für Laiinnen und Laien in Bezug auf Nachvollziehbarkeit und Transparenz nach wie vor tendenziell schwer rezipierbar. Hier besteht Handlungsbedarf, um ästhetische und emotionale Zugänge um eine kognitive Dimension zu erweitern.

Gesundheitsbezogene Aspekte werden in besonderer Weise von Vertreterinnen und Vertretern der Bürgerinitiativen vor Ort aufgegriffen und aufbereitet. Fachwissenschaftliche Erkenntnisse und emotionale Bezugnahmen sowie Befürchtungen und Sorgen können hier so ineinander übergreifen, dass eine Trennung bei der Informationsweitergabe an Dritte nicht mehr ersichtlich ist und damit Meinungen oder Befürchtungen eine Reproduktion als Fakten erfahren. Entsprechend könnte für gesundheitsbezogene Fragestellungen grundlegend eine noch umfänglichere Informationsarbeit insbesondere auf lokaler Ebene sinnvoll sein. Dies gilt im Hinblick auf neueste Erkenntnisse zum aktuellen Wissensstand beziehungsweise zu neu initiiertem Forschung, um Transparenz zu zeigen und einen Umgang mit vielfältigen Befürchtungen zu finden, die durch ihre Vielfalt in der Bevölkerung diverse Ängste auf- und ausbauen können (vgl. auch Tabelle 1). Hierzu zählen unter anderem auch konkrete Vergleiche zwischen elektrischen und magnetischen Feldern im Alltag gegenüber Freileitungen und Erdkabeln, um eine ‚Alltagseinschätzung‘ zu erreichen. Bestehende Grenzwerte werden vielfach als unzureichend im Verhältnis zu anderen Ländern bemängelt, was aber auch im Zusammenhang mit unterschiedlich gemessenen Grenzwerten in Beziehung steht: Unterschiede im europäischen Vergleich in Bezug auf Messung und Aussagekraft könnten noch transparenter aufbereitet werden.

**Tabelle 1: Handlungsempfehlungen zum Konfliktfeld „Gesundheit“**

| Öffentlichkeitsarbeit zum Thema Gesundheit                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                             |                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Inhalt                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Medium/Formate                                                              | Zielgruppen                                                                                              |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transparenz über unterschiedliche Grenzwerte und Messverfahren/Messungen</li> <li>• elektrische und magnetische Felder bei Hochspannungsleitungen im Vergleich zum häuslichen Alltag</li> <li>• elektrische und magnetische Felder und Abstände/Wohnumfeldschutz</li> <li>• Strahlung versus Felder</li> </ul> | Homepage eines unabhängigen Institutes (vergleichbar dem Thema Mobilfunk)   | Interessierte Öffentlichkeit, Vereine, Verbände, Initiativen                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Printmedien (Flyer, Broschüren, Infomappen et cetera)                       |                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Bürgermeisterklausuren                                                      | Lokale und regionale Entscheidungsträgerinnen und -träger                                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Dialogveranstaltungen vor Ort                                               | Interessierte Öffentlichkeit, Vereine, Verbände, Initiativen, Übertragungsnetzbetreiber, Politik, Medien |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Ortstermin zur vergleichenden Messung unterschiedlicher Strahlenbelastungen |                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Film                                                                        |                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Wanderausstellung                                                           |                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Lehrmaterial                                                                | Lehrerinnen und Lehrer, Schülerinnen und Schüler                                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Interaktives Planspiel                                                      | Schulen                                                                                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Comics                                                                      | Kinder                                                                                                   |
| • Identifikation konkreter (wahrgenommener) Ängste und Befürchtungen der Bürgerinnen und Bürger beziehungsweise der Bürgerinitiativen                                                                                                                                                                                                                   | Monitoring                                                                  | Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler                                                                 |

Quelle: Zusammenstellung und Darstellung des Projektteams.

Für Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter wurde ergänzend ein „Werkzeugkasten“ entwickelt, der unterschiedliche Instrumente zum Umgang mit identifizierten Problematiken innerhalb der analysierten Konfliktfelder bereitstellt. Hierzu zählen Hintergrundinformationen zu verschiedenen Intensitätsstufen der Beteiligung, unterschiedliche Handreichungen und Checklisten sowie Methoden zur Selbstreflexion.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens geben einen detaillierten Einblick in die Komplexität der Diskussionen um den Stromnetzausbau. Das Wissen über den Stellenwert der gesundheitsbezogenen Diskussionen im Stromnetzausbau sowie über die Dynamik und Verschachtelung von Diskursen unterstützt Information und Kommunikation. Sowohl die Aktivitäten des BfS im Bereich der Information - Internet, Broschüren, Multimedia - als auch der Kommunikation, wie z. B. die dialogorientierte Risikokommunikation, können besser gestaltet werden, wenn die Rahmenbedingungen und Erwartungen der Gesprächspartner und die Relevanz des The-

mas und seiner Funktion im gesamten Diskurs bekannt sind. Ansprüche und Erwartungen an Kommunikationssituationen können in der Vorbereitung und in der Kommunikation selbst entsprechend aktiv angepasst werden. Den entwickelten Werkzeugkasten können Vertreter und Vertreterinnen des BfS für öffentliche Auftritte nutzen, wie Informationsveranstaltungen, Podiumsdiskussionen, Bürgerversammlungen, etc. Auf Anfrage wird der Werkzeugkasten für BfS-externe Personen zur Verfügung gestellt.

|                                                                                                                                                                                                                                 |                                                             |                           |                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Thema</b><br>Internationaler Vergleich der rechtlichen Regelungen im nichtionisierenden Bereich                                                                                                                              |                                                             |                           |                                                                                                                     |
| <b>Subject</b><br><i>International comparison of the statutory regulations governing non-ionising radiation</i>                                                                                                                 |                                                             |                           |                                                                                                                     |
| <b>Kennzeichen</b><br>3614S80010                                                                                                                                                                                                | <b>Beginn</b><br>17.11.2014                                 | <b>Ende</b><br>17.08.2015 | <b>Fördermittel</b><br>EUR 121.499,-                                                                                |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Bietergemeinschaft (Kanzlei Becker Büttner Held (BBH), RA Stefan Missling; EM-Institut GmbH, Prof. Dr.-Ing. Matthias Wuschek) in Zusammenarbeit mit Prof. Dr.-Ing. Hans-Dieter Reidenbach |                                                             |                           |                                                                                                                     |
| <b>Projektleitung</b><br>Prof. Dr. S. Missling                                                                                                                                                                                  | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>C. Egblomassé-Roidl / AG-SG 1.4 |                           | <b>verantwortlich für den Text</b><br>Prof. Dr. S. Missling,<br>Prof. Dr. M. Wuschek,<br>Prof. Dr. H.-D. Reidenbach |

## 1. ZIELSETZUNG

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat die Kanzlei Becker Büttner Held (BBH) sowie die EM-Institut GmbH (Prof. Dr.-Ing. Matthias Wuschek) beauftragt, eine Analyse und vergleichende Bewertung der internationalen Regelungen zum Schutz der Allgemeinbevölkerung im gesamten Bereich der nichtionisierenden Strahlung zu erstellen. Zusätzlich wurde Prof. Dr.-Ing. Hans-Dieter Reidenbach als Unterauftragnehmer im Projekt tätig.

Da aktuell eine vollständige Übersicht zu den jeweiligen länderspezifischen Regelungen in den Bereichen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder (EMF) sowie optischer Strahlung (OS) fehlt, war die Erstellung eines wissenschaftlichen internationalen Vergleichs der rechtlichen Regelungen zu erarbeiten. Dazu sollten die internationalen Regelungen zum Schutz der Allgemeinbevölkerung vor nichtionisierender Strahlung in 54 vom BfS vorgegebenen Ländern (alle europäischen Staaten sowie Russland, Indien, China, USA, Kanada, Japan, Australien und Neuseeland) vergleichend untersucht werden. Die Situation in der Bundesrepublik Deutschland war zusätzlich in die Untersuchung einzubeziehen.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Zur Erstellung dieses internationalen Vergleichs war eine Auseinandersetzung mit den Regelungen im gesamten Bereich der nichtionisierenden Strahlung - bei EMF vor allem im Bereich der elektrischen Energieversorgungsanlagen und der Funkanlagen, bei OS nach Sichtung des Fragebogenrücklaufs vor allem im Bereich Laser, kosmetische Anwendungen und Solarien - durchzuführen. Es sollte untersucht werden, worin sich die deutschen Regelungen von den übrigen europäischen sowie den relevanten außereuropäischen Regelungen unterscheiden. Die derzeitigen ICNIRP-Leitlinien wurden in Bezug genommen.

Die gefundenen Unterschiede der Regelungen sollten herausgearbeitet und auf ihre technischen Aspekte sowie ihre rechtlichen Grundlagen hin überprüft werden. In einer abschließenden Analyse sollten die Regelungen in einem gegenüberstellenden Bericht dargestellt werden.

## 3. METHODIK

Methodisch war das Studienprojekt in zwei Arbeitspakete (AP 1 und AP 2) aufgeteilt.

### Arbeitspaket 1

Aufgabe des Arbeitspaketes 1 war die Recherche nach den Regelungen aus den abgefragten Ländern für den gesamten nichtionisierenden Bereich. Als erste Grundlage für die Datenerhebung dienten zwei Fragebögen, mit denen bei den in den einzelnen Ländern zuständigen Stellen der gesamte Bereich der nichtionisierenden Strahlung abgefragt wurde.

Der Fragebogen I befasste sich mit Regelungen zum Schutz der Allgemeinbevölkerung vor elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern (EMF) im Frequenzbereich 0 Hz bis 300 GHz. Dabei wurde ge-

zielt auch nach Regelungen zum Schutz der Allgemeinbevölkerung vor Feldern von ortsfesten Anlagen der elektrischen Energieversorgung sowie von ortsfesten Funksendeanlagen gefragt.

Der Fragebogen II befasste sich mit dem Schutz der Allgemeinbevölkerung vor optischer Strahlung aus künstlichen Quellen, d. h. im Wellenlängenbereich zwischen 100 nm und 1 mm (Ultraviolett bis Infrarot). Erfasst wurden damit auch der sichere Umgang mit Lasern, kosmetische Anwendungen optischer Strahlung und die Nutzung von Solarien. Zusätzlich erfasste der Fragebogen II den Schutz am Arbeitsplatz sowie Gesundheitschutz-Regelungen gegenüber Sonnenstrahlung.

Parallel zur Abfrage mittels der Fragebögen wurden umfangreiche Recherchen nach den einschlägigen Regelungen im Internet durchgeführt. Zur Erhöhung der Trefferwahrscheinlichkeit wurde dabei im Falle von EMF auch auf bekannte Daten aus vorhergehenden Übersichten, wie etwa einer Veröffentlichung der WHO zu dieser Thematik, zurückgegriffen. Zusätzlich wurde vorhandene Fachliteratur ausgewertet.

## **Arbeitspaket 2**

Die gefundenen Ergebnisse aus den verschiedenen Recherchen wurden jeweils dem betroffenen Bereich EMF oder OS zugeordnet. Anschließend erfolgte eine Auswertung der bestehenden Regelungen mit dem Fokus auf die zuvor beschriebene Aufgabenstellung. Neben einer ausführlichen Länderübersicht, die die Ergebnisse dieser Auswertung für jedes einzelne untersuchte Land beinhaltet, wurden die internationalen Regelungen hinsichtlich ihrer rechtlichen Tragweite und den (gegebenenfalls) enthaltenen Grenzwerten vergleichend untersucht. Als hinterlegter Maßstab wurden die in Deutschland geltenden rechtlichen Regelungen sowie die Empfehlungen der ICNIRP herangezogen.

## **4. DURCHFÜHRUNG**

### **4.1 DATENERHEBUNG MITTELS FRAGEBÖGEN, INTERNETRECHERCHE UND LITERATUR**

Die Fragebögen sowie ein erläuterndes Anschreiben wurden an ca. 200 Adressaten übersendet. Die Versendung der Fragebögen erfolgte ab dem 26.01.2015.

Parallel zur Versendung der Fragebögen wurden internationale Regelungen im Internet recherchiert. Dazu wurden auch von der WHO erhobene Daten ausgewertet und weitere vertiefende Recherchen nach den Originaltexten der nationalen Regelungen der in den Fokus genommenen Länder vorgenommen. Ebenfalls wurden Informationen aus bereits vorhandener Literatur geprüft und ausgewertet.

### **4.2 UMSETZUNG UND DARSTELLUNG IM ERGEBNISBERICHT**

Die Ergebnisse der Fragebögen, der Internetrecherchen sowie der Literatursauswertung wurden auf Richtigkeit und Vollständigkeit geprüft und sodann zur weiteren Aufarbeitung gespeichert.

Es sind zwei nach den Bereichen EMF und OS getrennte Ergebnisberichte erstellt worden, in denen die gewonnenen Daten und Informationen verarbeitet wurden.

Den Ergebnisberichten liegen die Regelungen von insgesamt 43 Ländern für den Bereich EMF und von 44 Ländern für den Bereich OS aus den 54 vom BfS vorgegebenen Ländern zu Grunde (plus Deutschland). Aus diesen Ländern lag Datenmaterial vor, welches in Umfang und Informationsgehalt als gut bis ausreichend für eine umfassende Auswertung zu bezeichnen war. Dies umfasste auch Länder, in denen gemäß den Angaben aus dem Fragebogen keine Regelungen zum Schutz der Allgemeinbevölkerung vorhanden waren und Internetrecherchen keine weiteren Erkenntnisse ergaben.

#### **4.2.1 Ergebnisbericht für den Bereich EMF**

Der Ergebnisbericht für den Bereich EMF setzt sich neben einem einleitenden Teil im Wesentlichen aus zwei Abschnitten zusammen; nämlich dem länderspezifischen Vergleich der Regelungen und Grenzwerte (Kapitel 2) und einer vergleichenden Zusammenfassung (Kapitel 3 und 4).

#### **Länderspezifische Darstellung**

Die gefundenen Regelungen wurden zunächst für die einzelnen Länder aufgearbeitet und im Einzelnen dargestellt. Neben der Darstellung zur allgemeinen Rechtslage wurden insbesondere zu den Punkten Anwendungsbereich der Regelungen, Zuständigkeit, geltende Grenzwerte sowie Kontrolle nähere Ausführungen gemacht.

## Vergleichende Zusammenfassung

Die vergleichende Zusammenfassung aus rechtlicher Sicht stellte die unterschiedlichen Regelungen zum Schutz der Allgemeinbevölkerung vor EMF dar. Hierbei wurden die regelmäßig durch Gesetze sowie darauf basierenden Durchführungsvorschriften (z. B. Verordnungen oder Verwaltungsvorschriften) erlassenen Schutzbestimmungen beschrieben. Es wurde gezeigt, wie die Regelungsgehalte sowie die Anwendungsbereiche der Schutzbestimmungen in den einzelnen untersuchten Ländern variieren. Im Besonderen wurde auf die Regelungen für Mobilfunkbasisstationen und Funksendeanlagen sowie Energieversorgungsanlagen eingegangen. Des Weiteren wurden die unterschiedlichen präventiven als auch repressiven Kontrollmaßnahmen zur Überwachung durch die zuständigen Stellen erläutert. Da in einigen Ländern bestimmten Personengruppen der Allgemeinbevölkerung das Recht eingeräumt wurde, die Einhaltung der Schutzbestimmungen durchzusetzen, wurde die Ausgestaltung dieses Rechts ebenfalls beleuchtet. Abschließend wurden mögliche Sanktionen bei Verstößen gegen die rechtlichen Bestimmungen vorgestellt.

Zusätzlich wurden auch länderspezifische Unterschiede bei der Expositionsermittlung herausgearbeitet und vergleichend gegenübergestellt.

Im Rahmen des quantitativen Vergleichs der Regelungen wurde unterschieden zwischen Regelungen zu niederfrequenten bzw. zu hochfrequenten Feldern sowie aus technischer Sicht bezüglich Regelungen zu Anlagen der Energieversorgung und Funksendeanlagen.

Die zahlenmäßigen Regelungen der einzelnen Länder wurden in entsprechenden Übersichtstabellen vergleichend gegenübergestellt. Zusätzlich wurden auch grafische Darstellungen (Säulendiagramme) erstellt, um die Unterschiede in den einzelnen Ländern anschaulich zu visualisieren. Den verschiedenen Tabellen können jedoch nicht nur die Grenzwerte zahlenmäßig entnommen werden, sondern es finden sich auch Informationen zu den Orten, an denen sie anzuwenden sind. Zudem wird für jedes Land angegeben, ob sich die Regelungen im Wesentlichen mit den aktuellen Empfehlungen von ICNIRP decken oder davon deutlich abweichen.

### 4.2.2 Ergebnisbericht für den Bereich OS

Der Ergebnisbericht für den Bereich OS ist neben einer allgemeinen Einleitung in vier Abschnitte geteilt: Länderspezifischer Vergleich der Grenzwerte zum Schutz der Allgemeinheit vor OS (Kapitel 2), Besonderheiten bei Regelungen zum Schutz gegen OS am Arbeitsplatz (Kapitel 3), Schutz vor Sonnenstrahlung (Kapitel 4) und vergleichende Zusammenfassung (Kapitel 5).

#### Länderspezifischer Vergleich der Grenzwerte

Die gefundenen Regelungen wurden zunächst ebenfalls länderspezifisch aufgearbeitet und unter dem jeweiligen Land dargestellt. Neben der Darstellung zur allgemeinen Rechtslage wurden im Bereich OS insbesondere zu den Bereichen Laser, kosmetische Anwendungen und Solarien nähere Ausführungen gemacht. Es wurden die jeweils zuständigen Stellen, geltenden Grenzwerte sowie Kontrollmaßnahmen herausgestellt.

#### Regelungen zum Schutz gegen OS bei der Arbeit

Von den Mitgliedstaaten der Europäischen Union waren die Vorgaben aus der Richtlinie 2006/25/EG, d. h. zu den Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch künstliche optische Strahlung, bis zum 27.04.2010 in Kraft zu setzen. Die entsprechenden Angaben aus den einzelnen Mitgliedstaaten wurden zusammenfassend dargestellt. Darüber hinaus wurden Besonderheiten bei den Umsetzungen unter anderem zu Laser-, UV- und Sonnenstrahlung dargestellt.

Weitere Angaben zu Regelungen am Arbeitsplatz aus Nicht-EU-Mitgliedstaaten wurden ebenfalls dargestellt.

#### Schutz vor Sonnenstrahlung

Soweit Angaben zum Schutz der Allgemeinbevölkerung vor Sonnenstrahlung im Fragebogen erfolgten, wurden diese dargestellt.

## Vergleichende Zusammenfassung

Daran schließt die vergleichende Zusammenfassung in rechtlicher und quantitativer Hinsicht an.

In der vergleichenden Zusammenfassung wurde aus rechtlicher Sicht zunächst auf die Schutzbestimmungen, basierend auf allgemeinen Gesetzen zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung, sowie den zum Teil bestehenden spezifischen Regelungen zum sicheren Umgang mit Lasern, zur Anwendung optischer Strahlung im Bereich der Kosmetik und zur Nutzung von Solarien eingegangen. Ebenfalls wurden die jeweiligen Zuständigkeiten und präventiven bzw. repressiven Kontrollen sowie Sanktionsmöglichkeiten aufgezeigt.

## **Quantitativer Grenzwertvergleich**

Die Regelungsbereiche zum Schutz der Allgemeinbevölkerung gegen optische Strahlung wurden in erster Linie bezüglich des Einsatzes z. B. von Laserprodukten als Laserpointer, von der Verwendung von Strahlungsquellen, die entweder Laserstrahlung oder inkohärente breitbandige optische Strahlung zu kosmetischen bzw. ästhetischen Zwecken emittieren, oder als UV-Strahlungsquellen in Solarien Verwendung finden, betrachtet.

Bei Laserstrahlung, die zur Anwendung in Laserpointern kommt, wurde herausgearbeitet, ob die Regelungen nach der internationalen Norm IEC 60825-1 bzw. der EN 60825-1 und deren nationaler Fassung klassifiziert wurden bzw. welche Unterschiede bestehen. Bei den kosmetischen Anwendungen von optischer Strahlung wurden die Regelungen darauf untersucht, ob z. B. besondere Erlaubnisse für bestimmte Berufsgruppen erforderlich sind. Die in Solarien verwendeten UV-Strahlungsquellen wurden entsprechend der internationalen Norm IEC 60335-2-27 bzw. EN 60335-2-27 hinsichtlich ihrer strahlenphysikalischen Angaben eingeordnet. Soweit Regelungen für Solarien in Europa betroffen waren, wurde untersucht, ob die Empfehlungen des „Wissenschaftlichen Ausschusses für Gebrauchsgegenstände (SCCP)“ der Europäischen Kommission vom Juni 2006 der Begrenzung der maximalen erythemwirksamen Bestrahlungsstärke von UV-Bestrahlungsgeräten auf  $0,3 \text{ W m}^{-2}$  herangezogen wurden. Ferner wurden erforderliche Geräteaufschriften bzw. Beschilderungen bei der Untersuchung berücksichtigt, wenn bei den UV-Bestrahlungsgeräten eine Leuchtdichte oberhalb von  $100\,000 \text{ cd/m}^2$  vorliegen kann.

## **5. ERGEBNISSE**

### **5.1 ERGEBNISSE ZU EMF**

#### **5.1.1 Ausgewertete Länder**

Im Bereich EMF wurden die Regelungen aus 54 Ländern ausgewertet. Zusätzlich wurden auch die aktuell geltenden Regelungen der Bundesrepublik Deutschland in den Vergleich einbezogen. Die Rücklaufquote des verschickten Fragebogens betrug etwa 46 % (25 von 54 verschickten Fragebögen wurden beantwortet).

#### **5.1.2 Ergebnisse Niederfrequenz**

Von den 55 betrachteten Ländern (inklusive Deutschland) liegen für 37 Länder (d. h. 67 %) Regelungen zum Schutz vor statischen bzw. niederfrequenten Feldern mit Zahlenangaben vor. Bei 18 Ländern konnten keine zahlenmäßigen Regelungen für den Niederfrequenzbereich gefunden werden. Die Mehrzahl der 37 Länder, aus denen zahlenmäßige Regelungen für Niederfrequenz vorliegen, regelt den Niederfrequenzbereich bis 10 MHz lückenlos. Allerdings existieren auch 13 Länder, bei denen nur einzelne Frequenzen im Niederfrequenzbereich (z. B. 16⅓ und 50 Hz) bzw. nur Teile des Niederfrequenzbereichs zahlenmäßig geregelt sind.

Insgesamt gesehen lässt sich für den Niederfrequenzbereich feststellen, dass sich die überwiegende Zahl der 37 Länder, für die quantitative Regelungen gefunden wurden, an den Empfehlungen von ICNIRP orientiert, wobei hierbei meist die Empfehlungen aus ICNIRP 1998 herangezogen werden und die überarbeiteten Werte aus ICNIRP 2010 bisher (noch) nicht allzu häufig Verwendung finden. Allerdings hat ein Teil dieser Länder den Niederfrequenzbereich nicht lückenlos zahlenmäßig geregelt.

Statische elektrische Felder sind aktuell nur in zwei Ländern geregelt (Lettland, Polen). Für statische Magnetfelder existieren entweder ebenfalls keine Regelungen (in 16 von 37 Ländern) oder es wurde der Referenzwert aus der EU-Ratsempfehlung übernommen (in 18 von 37 Ländern). Nur drei Länder haben davon abweichende Werte spezifiziert (Deutschland, Norwegen, Polen), wobei allein Norwegen sich auf die Empfehlung aus ICNIRP 2009 bezieht.

#### **5.1.3 Ergebnisse Hochfrequenz**

Von den 55 betrachteten Ländern (inklusive Deutschland) liegen für 43 Länder (d. h. 78 %) Regelungen zum Schutz vor hochfrequenten Feldern mit Zahlenangaben vor. Bei zwölf Ländern konnten keine zahlenmäßigen Regelungen für den Hochfrequenzbereich gefunden werden.

Die Mehrzahl der 43 Länder, aus denen zahlenmäßige Regelungen für Hochfrequenz vorliegen, regelt den Hochfrequenzbereich lückenlos (34 Länder). Dies bedeutet, dass für den gesamten Frequenzbereich der funktechnischen Anwendungen (also ab etwa 10 kHz) bis in den hohen Gigahertzbereich (300 GHz) Zahlenwerte zur Immissionsbegrenzung festgelegt sind. Nur in neun der 43 Länder ist der Hochfrequenzbereich nicht durchgehend zahlenmäßig geregelt.

22 Länder orientieren sich an den Empfehlungen aus ICNIRP 1998. 19 Länder haben komplett oder teilweise niedrigere Grenzwerte, und zwar Belgien, Bulgarien, China, Griechenland, Indien, Italien, Kanada, Kroatien, Liechtenstein, Litauen, Monaco, Montenegro, Niederlande, Polen, Russland, San Marino, Schweiz, Serbien und Slowenien. Zwei Länder (Japan und die USA) wenden etwas höhere Werte als ICNIRP 1998 an. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass der Unterschied zu den Grenzwerten dieser beiden Länder geringer ist als die bei Hochfrequenzimmissionen typisch vorhandene Messunsicherheit. Ähnliches gilt auch für einige Länder mit niedrigeren Grenzwerten.

#### 5.1.4 Ergebnisse juristischer Vergleich

Im Bereich der Hochfrequenz sehen 37 Länder in den geltenden Regelungen rechtlich verbindliche Grenzwerte vor; in sechs Ländern (Lettland, Niederlande, Rumänien, Schweden, Vereinigtes Königreich (UK) und Zypern) existieren lediglich Richtwerte oder Empfehlungen. In drei (Indien, Österreich und Frankreich) der untersuchten Länder bestehen zwar verbindliche Regelungen, die sich allerdings ausschließlich auf Immissionen beziehen, die durch Funksendeanlagen bzw. Mobilfunkbasisstationen verursacht werden.

Im Bereich der Niederfrequenz sehen die rechtlichen Regelungen in 27 Ländern verbindliche Grenzwerte vor; in 10 Ländern (Australien, Österreich, Finnland, Lettland, Malta, Niederlande, Rumänien, Schweden, Vereinigtes Königreich (UK) und Zypern) bestehen lediglich Richtwerte oder Empfehlungen.

Neben allgemein geltenden Immissionsgrenzwerten haben einige der untersuchten Länder auch sogenannte „Anlagegrenzwerte“ (Liechtenstein, Schweiz, Türkei) oder auch „Antennengrenzwerte“ (Belgien, Luxemburg) festgelegt. Anders als bei einem allgemeinen Immissionsgrenzwert werden bei einem Anlagegrenzwert nur die Immissionen, die durch die Signale von einem einzelnen Anlagenstandort ausgehen, betrachtet. Ein Antennengrenzwert bezieht sich hingegen nur auf Immissionen, verursacht durch eine einzelne Antenne.

Die untersuchten Bestimmungen zu Grenzwerten oder Richtwerten gelten generell an allen allgemein zugänglichen Orten. Darüber hinaus existieren in einigen Ländern auch Schutzkonzepte, die entweder verschiedene Zonen ausweisen oder Orte mit besonders sensibler Nutzung definieren und für diese spezielle Grenzwerte vorgeben. Insgesamt sieben der untersuchten Länder haben zum Schutz für sensible Orte („Orte mit empfindlicher Nutzung“, OMEN) niedrigere Grenzwerte festgelegt. Teilweise werden diese in Form der zuvor erwähnten Anlagegrenzwerte umgesetzt.

Der überwiegende Teil der untersuchten Länder sieht sowohl präventive als auch repressive Kontrollen für Nieder- und Hochfrequenzanlagen vor.

Präventive Kontrollen zur Einhaltung von Grenzwerten sind regelmäßig in Form von Genehmigungs- oder auch Anzeigeverfahren vorgesehen. Die Überprüfung im Genehmigungsverfahren erfolgt in der Regel, indem die vorgelegten technischen Unterlagen der geplanten Anlagen durch die zuständige Behörde geprüft werden. Dabei nimmt die Behörde üblicherweise Immissionsberechnungen zur Konformitätsprüfung vor.

Darüber hinaus sind Immissionsmessungen bei laufendem Anlagenbetrieb als repressive Kontrolle zu nennen. Diese werden regelmäßig durch staatliche Stellen bzw. durch private, zertifizierte Inspektoren bei bereits in Betrieb befindlichen Anlagen z. B. im Rahmen von Stichprobenkontrollen vorgenommen.

## 5.2 ERGEBNISSE ZU OPTISCHER STRAHLUNG

Für den Bereich optischer Strahlung betrug der Rücklauf der Fragebogenaktion ca. 46,3 %, d. h. aus 25 der gemäß Projektbeschreibung angefragten 54 Länder. Nach einer zusätzlichen umfangreichen Recherche konnten 44 Länder einer Kategorie mit einer für eine Bewertung ausreichenden Datenlage zugeordnet werden. Durch die Hinzunahme von vier weiteren Ländern, die darüber hinaus angefragt bzw. recherchiert wurden, erhöhte sich die Gesamtzahl auf 48 aus 62 Ländern, die in einen Ländervergleich einbezogen werden konnten.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass in 25 von 48 europäischen Staaten (einschließlich Deutschland), entweder überhaupt keine Regelungen für den Schutz der Allgemeinbevölkerung vor optischer Strahlung vorliegen oder aber nicht ermittelbar waren. Bei den außereuropäischen Staaten konnten in 7 von 15 Staaten keine Regelungen ermittelt werden. Es wurde außerdem festgestellt, dass in Ländern, in denen es Regelungen zum Schutz der Allgemeinbevölkerung vor optischer Strahlung gibt, die entsprechenden Regelungen dann oft nur in einzelnen Bereichen gelten.

Bei den vorliegenden Regelungen zum Schutz der Allgemeinbevölkerung vor optischer Strahlung konzentrieren sich diese auf den Einsatz von Lasereinrichtungen bzw. -produkten als Laserpointer, die Verwendung von Strahlungsquellen, die entweder Laserstrahlung oder inkohärente breitbandige optische Strahlung zu kosme-

tischen bzw. ästhetischen Zwecken emittieren, und auf solche, die als UV-Strahlungsquellen in Solarien Verwendung finden.

Betrachtet man dabei die in Europa vorliegenden Regelungen, so überwiegen diejenigen zu Solarien in 19 Ländern, gegenüber 14 zu Lasern, insbesondere Laserpointern, und demgegenüber sind lediglich in neun Ländern Europas solche für kosmetische oder vergleichbare Anwendungen vorgesehen.

### 5.2.1 Laserstrahlung

Es hat sich gezeigt, dass bei Lasern in der Regel Bezug genommen wird auf die jeweilige nationale Ausgabe der internationalen Norm IEC 60825-1 bzw. in Europa auf die nationale Ausgabe der inhaltsgleichen EN 60825-1. Allerdings beziehen sich die Angaben nicht alle auf ein und dasselbe Ausgabedatum, wodurch ein Vergleich der verschiedenen Länderangaben wenig sinnvoll wird, da sich mit den verschiedenen Ausgaben der Norm auch mitunter in Bezug genommene physikalische Daten, aber auch Grenzwertangaben, geändert haben bzw. haben können. Wenn ein Grenzwert speziell nur für Laserpointer angegeben wird, wird in der überwiegenden Zahl der Fälle 1 mW für die Laserleistung genannt bzw. die Laserklasse 2 für Laserpointer als Verbraucherprodukte für zulässig bezeichnet. Im Einzelfall kann für Laserpointer aber auch eine Beschränkung auf die Laserklasse 1M vorliegen, wenn es sich um Konsumgüter handelt. Es gibt darüber hinaus in manchen Ländern, und zwar sowohl in Europa als auch außerhalb Europas, auch sehr viele detailliertere Angaben bezüglich zulässiger Bestrahlung bzw. Bestrahlungsstärke. Dies gilt sowohl für die Expositionsdauer als auch die emittierte Wellenlänge. Sogar die Ausdehnung der Emissionsquelle, die sogenannte Quellengröße, wird in manchen Regelungen herangezogen. Dies ist insbesondere dann zu beachten, wenn die betreffende Regelung nicht nur für Laserpointer, sondern auch für andere Laseranwendungen, wie z. B. im Showbereich, gilt. Eine Übersicht hierzu findet sich in Tabelle 5.3.2 in Abschnitt 5 des Ergebnisberichts Teil II.

Hinsichtlich der Angaben zum Vorliegen einer Konformität zu ICNIRP Empfehlungen zu Laserstrahlung oder speziell zum ICNIRP-Statement zu Laserpointern finden sich zwar durchaus entsprechende Angaben, allerdings können daraus keine weiterreichenden bzw. verbindlichen Schlüsse gezogen werden, als dies anhand der Laserklassenangaben bzw. unter Bezugnahme einer maximalen Laserleistung nicht auch möglich wäre. Unbenommen bleibt allerdings, dass die Zuordnung der Lasereinrichtungen bzw. -produkte ihren Ursprung in den Empfehlung der ICNIRP hat, wobei die entsprechenden Leistungsdichte- bzw. Energiedichtewerte als sogenannte Bestrahlungsstärke- bzw. Bestrahlungswerte durch Annahme eines Bezugsblendendurchmessers, der z. B. im sichtbaren Spektralbereich dem Pupillendurchmesser des dunkeladaptierten Auges entspricht, in eine maximale Laserstrahlleistung für eine der Laserklasse zugeordnete Zeitbasis, entsprechend einer Expositionsdauer, umgerechnet wurde. Insofern werden die ICNIRP-Empfehlungen eingehalten, wenn gewisse Annahmen getroffen und erfüllt werden.

### 5.2.2 Solarien

Auch für UV-Bestrahlungsgeräte bzw. UV-Strahlungsquellen in Solarien wird europa- und auch weltweit in den untersuchten Ländern eine internationale Norm, nämlich die IEC 60335-2-27 bzw. die europäische Norm EN 60335-2-27 mit ihren nationalen Ausgaben im Zusammenhang mit strahlenphysikalischen Angaben bzw. Daten genannt. Dabei wird überwiegend eine Begrenzung auf eine maximale erythemwirksame Bestrahlungsstärke von  $0,3 \text{ W m}^{-2}$  angegeben. Ohne nähere Angabe der Expositionsdauer und des Wellenlängenbereichs ist in diesem Fall eine Übereinstimmungsüberprüfung mit den Empfehlungen der ICNIRP zur Ultraviolettstrahlung allerdings wenig sinnvoll, da ansonsten im Wesentlichen eine effektive Bestrahlung von  $30 \text{ J/m}^2$  im hier interessierenden Wellenlängenbereich in Bezug genommen werden müsste. Es finden sich aber durchaus auch über einen einzelnen Zahlenwert hinaus sehr viel weitergehende und detailliertere Angaben, wenn Wellenlängenbereiche und Kategorien bzw. Typen der UV-Strahlungsquellen in Betracht gezogen werden und in den betreffenden Regelungen aufgeführt sind. Außerdem muss bei allen entsprechenden Betrachtungen im Einzelfall auch der jeweilige Hauttyp Berücksichtigung finden, soweit dieser in Bezug genommen wurde. Im Hinblick auf eine mögliche Gefährdung, insbesondere der Augen, wird in der Regel dann, wenn eine Leuchtdichte von  $100\,000 \text{ cd/m}^2$  vorliegt, ein entsprechender Augenschutz entweder durch Verwendung einer Schutz- oder aber auch einer Sonnenbrille oft im Zusammenhang mit einem entsprechenden Gefährdungshinweis verknüpft. Ein Vergleich ist auch bei UV-Bestrahlungsgeräten unter anderem dadurch erschwert, dass unterschiedliche Normausgaben zu Grunde gelegt werden, wonach die Kategorieneinteilung sich unterscheiden kann und damit auch der Regelungsinhalt einen anderen Umfang erhält.

### 5.2.3 Kosmetische Anwendungen

Bei der Anwendung optischer Strahlung zu kosmetischen Zwecken liegt in den einzelnen Ländern keine einheitliche Betrachtung der Zuordnung der Berufsgruppen bzw. Tätigkeiten vor, denen der Einsatz entsprechender optischer Strahlungsquellen bzw. von Produkten zur Anwendung an der menschlichen Haut erlaubt

ist. Dies ist insofern nachvollziehbar, da bereits die Begrifflichkeit der kosmetischen Anwendung entweder ausschließlich einer medizinischen Anwendung zugeordnet wird, was nicht zuletzt durch die Bezugnahme der Norm IEC 60601-2-22 deutlich wird, oder aber nur Angaben zu den Laserklassen gemacht werden, wobei sich diese dann auf diejenigen der Klasse 3B und 4 beziehen, die derzeit in der Norm für medizinische, elektrische Geräte genannt werden. In einigen Ländern sind entweder überhaupt keine oder gegenwärtig keine Begrenzungen bzw. Grenzwerte festgelegt. Für andere als Laserstrahlungsquellen zu kosmetischen Zwecken liegen in den länderspezifischen Regelungen praktisch keine Angaben vor. Im Einzelfall finden sich aber auch sowohl für Laseranwendungen als auch für die Anwendung optischer Strahlung aus Nicht-Laserstrahlungsquellen sehr detaillierte Angaben, und zwar bezüglich Leistungs- bzw. Energiedichte unter Beachtung von Applikationsdauern und Wellenlängenbereichen. Ein Bezug zu ICNIRP-Empfehlungen kann in diesem Anwendungsbereich nicht gesehen werden, da bestimmungsgemäß Grenzwerte überschritten werden.

#### 5.2.4 Ergebnisse juristischer Vergleich

Insgesamt ist festzuhalten, dass der Schutz der Allgemeinheit vor optischer Strahlung in den begutachteten Ländern sehr unterschiedlich umgesetzt wurde. Einige der begutachteten Länder regeln den Schutz vor optischer Strahlung durch allgemeine Gesetze zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung mit darauf basierenden Durchführungsverordnungen, in denen die nähere Ausgestaltung geregelt ist. Andere Länder regeln lediglich bestimmte Bereiche der optischen Strahlung.

In zahlreichen Ländern bestehen spezifische Regelungen zum sicheren Umgang mit Lasern, zur Anwendung optischer Strahlung im Bereich der Kosmetik sowie zur Nutzung von Solarien. In der Mehrzahl der Länder wurden verbindliche rechtliche Regelungen erlassen. Darüber hinaus war aber festzustellen, dass - entweder neben oder anstelle von gesetzlichen Regelungen - in einigen Ländern Richtlinien oder Empfehlungen bestehen, um einen sicheren Umgang mit optischer Strahlung zu gewährleisten.

Präventive Kontrollmaßnahmen sind in unterschiedlichster Form umgesetzt und reichen von Genehmigungs- oder Lizenzverfahren über Anmeldepflichten für medizinische Helfer (z. B. für kosmetische Verwendung) bis zu erforderlichen Anmelde- und Erlaubnisverfahren (z. B. für Solarien).

Als häufigste repressive Kontrollmaßnahme sind Überprüfungen von betroffenen Einrichtungen mit entsprechenden optische Strahlung erzeugenden Geräten vorgesehen, welche von staatlichen Stellen bzw. Inspektoren durchgeführt werden. Als besondere repressive Kontrolle für Laser sind Marktüberwachungsmaßnahmen zu nennen.

## 6. UMSETZUNG DER ERGEBNISSE

Diese Sammlung von rechtlichen Regelungen im ganzen nichtionisierenden Bereich ist nahezu einmalig. Dieses umfangreiche Werk erfasst rechtliche Regelungen aus dem gesamten nicht-ionisierenden Bereich aus 60 Ländern, es lässt sich auch ablesen, wenn ein Bereich in einem Land nicht geregelt ist. Die in diesem Vorhaben erstellten Tabellen, die einen Überblick über diese Regelungen geben, können direkt in die Kommunikation mit eingebunden werden. Für eine genauere Betrachtung der einzelnen erfassten Länder dient der ausführliche Bericht, der in DORIS eingestellt ist. Dieser Bericht wird für die Risikokommunikation beim BfS (aber auch im BMUB) eingesetzt werden können.

Die Zusammenfassungen sowohl des Bereichs EMF als auch der Optik werden auf die jeweilige Seite des BfS als Kommunikationshilfe für z. B. Entscheider in Kommunen eingestellt.

Das BfS ist „Collaborating Centre of the WHO“ und dieser Beitrag stellt nach einer erfolgten englischen Übersetzung eine sehr gute Ergänzung der WHO-Seite zum Thema dar.



## **STATUSBERICHTE**

**der vom BfS begleiteten Strahlenschutz-Forschungsvorhaben des BMUB**

## ***STATUS REPORTS***

***of BfS supported BMUB radiation protection research projects***

### **Themenbereich 01**

**Natürliche Strahlenexposition**

### ***Subject area 01***

***Natural radiation exposure***

**Thema**

Methodische Untersuchungen zur Qualifizierung der VOC-Kammern zur Bestimmung der Radon-exhalationsrate von Bauprodukten, Los 1

**Subject**

*Systematic investigations on the use of VOC chambers for the determination of the radon exhalation rate of building products, lot 1*

**Kennzeichen**

3613S10021

**Beginn**

01.12.2013

**Ende**

31.05.2016

**Fördermittel**

EUR 104.960,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

**Projektleitung**

Dr. O. Jann

**Fachbetreuung BfS**

Dr. B. Hoffmann / SW 1.1

**verantwortlich für den Text**

Dr. M. Richter

## 1. ZIELSETZUNG

Materialemissionen (flüchtige organische Verbindungen) können mit Hilfe von Emissionsprüfkammern und -zellen unter praxisnahen und bereits normierten Prüfbedingungen bestimmt werden. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Durchführung systematischer Untersuchungen, um festzustellen, ob diese Methode auch für die Bestimmung der Radonexhalationsrate aus Bauprodukten unter Verwendung kalibrierter kommerziell erhältlichen Radonmessgeräte herangezogen werden kann.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Zu Beginn des Projekts wird eine Bestandsaufnahme infrage kommender Radonmessgeräte vorgenommen sowie deren Eignung getestet. Es werden insgesamt acht verschiedene Testmaterialien beschafft, von denen unterschiedlich starke Radonexhalationen zu erwarten sind. Diese werden auf relevante Materialcharakteristika (Nuklidkonzentration, Kornstruktur, Porosität, Feuchtegehalt) hin untersucht. Es werden ferner Tests durchgeführt, um die Einflüsse relevanter Prüfparameter wie Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit, Produktbeladung und Luftwechselrate in der Kammer auf die Radonexhalation festzustellen. Es wird ein Prüfprotokoll erstellt und das Verfahren abschließend einer Robustheitsuntersuchung unterworfen.

## 3. METHODIK

### 3.1 AUSWAHL UND BESCHAFFUNG VON BAUPRODUKTEN ALS VERSUCHSMATERIALIEN

In Absprache mit Herstellern sowie Experten des BfS und der BAM wurden folgende Materialien für die Versuche ausgewählt: zwei Lehme unterschiedlicher Dichten, Kalksandstein, zwei Betone aus verschiedenen Zementen mit unterschiedlichen Zuschlagstoffen, ein Leichtbeton, Gips und Granit. Dabei wurde darauf geachtet, dass sie in ihrer Art und Zusammensetzung realen Anforderungen entsprechen. Sie lagerten mindestens zwei Monate zur Konditionierung bei einer Temperatur von 23 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 %, bevor sie den Messungen zugeführt wurden.

### 3.2 MAßNAHMEN ZUR OPTIMIERUNG DER VOC<sup>1)</sup>-KAMMERN

Es ist beabsichtigt, sich bei den Versuchen insbesondere bez. Luftwechselrate und Produktbeladung im Wesentlichen an die Vorgaben der prEN 16516 zu orientieren. Ferner sollte die in der Fachliteratur und auch in der DIN ISO 11665 9 postulierte freie Radonexhalation gewährleistet werden.

<sup>1)</sup> volatile organic compounds

### 3.3 VERWENDETE RADONMESSTECHNIK

Von den getesteten Radonmesstechniken haben sich zwei Detektortypen als geeignet erwiesen, sensitiv im niedrigen Radonkonzentrationsbereich zu messen. Dabei handelt es sich um eine Ionisationskammer und eine Durchfluss-Szintillationszelle.

### 3.4 EINFLUSS VON TEMPERATUR UND RELATIVER LUFTFEUCHTIGKEIT AUF DIE MESSUNG

Diese Untersuchungen erfolgten in 1 m<sup>3</sup>-Emissionsprüfkammern und wurden an drei Baumaterialien (Lehm, Gips und Granit), die unterschiedliche Affinitäten zur Wasseraufnahme haben, bei folgenden Parametereinstellungen vorgenommen:

- Temperatur: 18, 20, 22, 23, 24, 28 °C, bei einer absoluten Feuchtigkeit von 10,3 g/m<sup>3</sup> (Tp.<sup>1)</sup> 12 °C)
- rel. Luftfeuchtigkeit (rF): 30, 45, 50, 70 % r.F., bei 23 °C

### 3.5 PROBENVORBEREITUNG

Bei Untersuchungen zur VOC-Emission aus Materialien werden i.d.R. die Schmalflächen und jene Seiten einer Probe versiegelt, die in der Realität nicht dem Innenraum zugewandt sind. Es soll untersucht werden, ob dieser im Allgemeinen auf die Materialfläche bezogene Ansatz für die Prüfung der eher massenspezifischen Radonexhalation notwendig und sinnvoll ist. Hierfür wird ein als radondicht geprüftes zweikomponentiges Epoxidharz an einem Granit verwendet.

### 3.6 ABSCHÄTZUNG DER BANDBREITE DER PARAMETEREINSTELLUNGEN

Hier werden unterschiedliche Kombinationen der für die Prüfung relevanten Parameter Luftwechsel, Beladung, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit eingestellt und untersucht, in welchen Einstellungsbereichen die niedrigsten Messunsicherheiten herrschen. Auf Grundlage einer Sensibilitätsanalyse soll eine Empfehlung für ein künftiges Messverfahren abgeleitet werden.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Zwei der insgesamt fünf Arbeitspakete konnten bereits abgeschlossen werden (AP 1: Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik, AP 2: Festsetzung und Umsetzung messtechnischer Voraussetzungen).

### 4.1 EINFLUSS VON TEMPERATUR UND RELATIVER LUFTFEUCHTIGKEIT AUF DIE MESSUNG

Um bei diesen Untersuchungen möglichst Normbedingungen einzuhalten, erfolgen Luftwechseleinstellung und Produktbeladung derart, dass sie einer flächenspezifischen Luftdurchflussrate von  $q = 0,5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$  für Wandmaterialien und  $q = 1,25 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$  für Boden- bzw. Deckenmaterialien entsprechen. Die flächenspezifische Luftdurchflussrate ist der Quotient aus Luftwechselrate und Kammerbeladung. Als Messgerät wurde eine Durchfluss-Szintillationskammer verwendet.

### 4.2 PROBENVORBEREITUNG

Diese Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen. Zunächst wird die Radondichtheit des Epoxidharzes an einer komplett bestrichenen Granitfliese durch Exhalationsmessung in einer Prüfkammer überprüft. Im folgenden Schritt wird nur eine teilbestrichene Fliese vermessen und die erhaltene Radonkonzentration mit der aus der Messung derselben Fliese im unversiegelten Zustand verglichen. Daraus soll die Notwendigkeit der Maßnahme geklärt werden.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 EINFLUSS VON TEMPERATUR UND RELATIVER LUFTFEUCHTIGKEIT AUF DIE MESSUNG

Im Bereich von  $(23 \pm 1) \text{ °C}$ , der nach prEN 16516 zulässig ist, ist die Temperaturabhängigkeit der Radonexhalationsrate vernachlässigbar. Auch ein größerer zulässiger Temperaturbereich wäre möglich. Bezüglich der Luftfeuchtigkeit ist bei allen Bauprodukten eine leichte negative Abhängigkeit der sich einstellenden Ra-

<sup>1)</sup> Taupunkt

donkonzentration von  $-0,1$  bis  $-0,15 \text{ Bq m}^{-3}$  (% rel. Luftfeuchtigkeit) $^{-1}$  erkennbar, die jedoch unter Berücksichtigung der Messunsicherheit nicht signifikant ist. Innerhalb des von der prEN 16516 festgelegten Bereichs von  $(50 \pm 5) \% \text{ r.F.}$  erscheint die Luftfeuchtigkeitsabhängigkeit der Radonexhalationsrate vernachlässigbar klein. Extreme Luftfeuchtigkeiten sollten jedoch vermieden werden.

## 5.2 PROBENVORBEREITUNG

Hierbei konnte bisher die Eignung des Epoxidharzes als Versiegelungsmaterial nachgewiesen werden. Die weiteren Untersuchungen dauern noch an.

## 5.3 ABSCHÄTZUNG DER BANDBREITE DER PARAMETEREINSTELLUNGEN

Eine abschließende Bewertung kann noch nicht abgegeben werden, da die Untersuchungen noch andauern. Es kann jedoch die Aussage getroffen werden, dass die flächenspezifische Luftdurchflussrate (Quotient aus der Luftwechselrate und der flächenspezifischen Beladung) im Gegensatz zu den Vorgaben der VOC-Prüfkammernorm begrenzt werden sollte, da jede Erhöhung zulasten der Messunsicherheit geht. Wie schon in Abschnitt 5.1 beschrieben, ist das Verfahren recht unempfindlich gegenüber Temperatur- und Luftwechseländerungen. Hier kann die prEN 16516 als Referenz dienen.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Das Projekt befindet sich in seiner letzten Phase. Die Untersuchungen zur Probenvorbereitung sowie zur Bandbreitenabschätzung der Prüfparameter werden zeitnah abgeschlossen und mit den Robustheitsuntersuchungen wird begonnen.

|                                                                                                                                         |                                                             |                                    |                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------|
| <b>Thema</b>                                                                                                                            |                                                             |                                    |                     |
| 4. Mortalitäts-Follow-Up der Kohorte von ca. 64 000 ehemaligen Wismutbeschäftigten zum Stichtag 31.12.2013                              |                                                             |                                    |                     |
| <b>Subject</b>                                                                                                                          |                                                             |                                    |                     |
| <i>Fourth follow-up of the mortality of the cohort of approximately 64 000 former Wismut employees at the appointed date 31/12/2013</i> |                                                             |                                    |                     |
| <b>Kennzeichen</b>                                                                                                                      | <b>Beginn</b>                                               | <b>Ende</b>                        | <b>Fördermittel</b> |
| 3613S10022                                                                                                                              | 01.08.2013                                                  | 31.05.2016                         | EUR 315.118,-       |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b>                                                                                                      |                                                             |                                    |                     |
| Mediveritas GmbH, München                                                                                                               |                                                             |                                    |                     |
| <b>Projektleitung</b>                                                                                                                   | <b>Fachbetreuung BfS</b>                                    | <b>verantwortlich für den Text</b> |                     |
| Dr. M. Toelg                                                                                                                            | PD Dr. M. Kreuzer, AG-SG 1.3<br>Dr. M. Schnelzer, AG-SG 1.3 | Dr. M. Toelg, E. Török             |                     |

## 1. ZIELSETZUNG

Das Bundesamt für Strahlenschutz führt eine Kohortenstudie an ca. 64 000 ehemaligen Beschäftigten der Fa. Wismut durch. Ziel ist die Abschätzung des Gesundheitsrisikos durch Strahlung, Staub und andere Noxen. Im Rahmen des UFO-Plans wurden bereits drei Mortalitäts-Follow-Ups zu den Stichtagen 31.12.1998, 31.12.2003 und 31.12.2008 durchgeführt. Im vorliegenden Vorhaben wird in einem vierten Mortalitäts-Follow-Up der Vitalstatus von 34 128 Kohortenmitgliedern der Wismut-Kohortenstudie zum Stichtag 31.12.2013 ermittelt und für verstorbene Personen die Todesursache eruiert. Der Follow-Up-Zeitraum der Kohortenstudie wird also um weitere 5 Jahre verlängert und ermöglicht dadurch Risikoanalysen zur strahleninduzierten Mortalität über einen im Vergleich zu anderen Bergarbeiterstudien sehr langen Zeitraum (1946-2013).

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das Follow-Up wird ohne Personenkontakte durchgeführt. Die notwendigen Informationen werden über offizielle Stellen (Einwohnermeldeämter (EMA), Gesundheitsämter, Kreisarchive, Zentralarchive, Standesämter) erhoben.

### 2.1 ERHEBUNG DES VITALSTATUS

Der Vitalstatus (d. h. die Information, ob Kohortenmitglieder noch leben oder verstorben sind) soll für 34 128 Personen ermittelt werden, darunter auch 1350 Sonderfälle, für die kein Vitalstatus aus dem letzten Follow-Up vorliegt.

### 2.2 ERHEBUNG DER TODESURSACHE FÜR VERSTORBENE

Für alle verstorbenen Personen der Kohorte werden Todeszeitpunkt und Todesursache ermittelt und die Todesursache nach ICD<sup>1)</sup> 10 verschlüsselt.

## 3. METHODIK

Um den Vitalstatus zu ermitteln, werden mit Hilfe der jeweils letzten im Rahmen des dritten Follow-Up ermittelten Adressen der Kohortenmitglieder die zuständigen Einwohnermeldeämter angeschrieben. Melden Einwohnermeldeämter Personen als „noch wie angegeben gemeldet“, wird diese Information in die Datenbank eingegeben und das Follow-Up ist für die betreffenden Personen abgeschlossen. Ist eine Person als „verzo-gen“ gemeldet, wird die neue Adresse in die Datenbank aufgenommen und das nun zuständige Einwohnermeldeamt angeschrieben. Der beschriebene Vorgang wiederholt sich so lange, bis eine aktuelle Adresse ermittelt oder die gesuchte Person als „verstorben“ gemeldet wird. Für die „Sonderfälle“ lässt sich der Vitalstatus über die Einwohnermeldeämter allein nicht ermitteln, es werden daher weitere Behörden (Kreisarchive/Stadtarchive, Standesämter) angeschrieben.

<sup>1)</sup> International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems

Bei von den EMA als „verstorben“ gemeldeten Personen werden, basierend auf den Angaben zu Sterbedatum und Sterbeort, die entsprechenden Gesundheitsämter mit der Bitte um Zusendung von Kopien der Todesbescheinigungen angeschrieben. Aus Gründen des Datenschutzes versenden die Gesundheitsämter die Belege ohne Namensangabe (stattdessen wird eine mitgeschickte Stichprobennummer übernommen) direkt an die Projektgruppe Wismut des Bundesamtes für Strahlenschutz. Vom BfS erfolgt eine Rückmeldung an den Auftragnehmer, für welche Stichprobennummern Totenscheine vorliegen, so dass die entsprechenden Personen dann in der Datenbank als „verstorben, Todesursache bekannt“ abgeschlossen werden können. Die Totenscheinkopien werden an das statistische Landesamt in Bad Ems verschickt, die Todesursachen werden dort nach ICD 10 verschlüsselt. Abschließend werden die ICD 10-Codes in die Datenbank eingestellt.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Vom Bundesamt für Strahlenschutz wurde am 30.07.2013 eine Access-Datenbank mit den Adressen von 34 128 im vierten Follow-Up zu bearbeitenden Personen an den Auftragnehmer übergeben, darunter 1350 „Sonderfälle“, für die kein Vitalstatus aus dem dritten Follow-Up vorlag. Nach Überführung der Daten in die Projektdatenbank und einer Aktualisierung der Anschreiben konnte im Oktober 2013 mit dem Versand der Formblattanfragen an die EMA und Landesämter („Sonderfälle“) begonnen werden. Im Januar 2014 folgte der Versand der EMA-Anfragen zu den Personen des Hauptkollektivs. Die von den Ämtern erhaltenen Daten wurden kontinuierlich in die Projektdatenbank eingegeben und ab April 2014 wurden auch die Gesundheitsämter bezüglich der Totenscheinkopien kontaktiert.

Die eingegangen anonymisierten Totenscheinkopien wurden an das statistische Landesamt in Bad Ems verschickt, wo die Todesursachen nach ICD10 verschlüsselt wurden.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 VITALSTATUS

Für 33 001 Personen (96,7 % aller Personen) konnte der Vitalstatus ermittelt werden. Von den Personen mit bekanntem Vitalstatus waren 4366 „verstorben“ (13,2 %), 28 635 Fälle (86,8 %) konnten als „lebend“ ermittelt und im Rahmen des vierten Follow-Up abgeschlossen werden. Für 1127 Personen konnte kein Vitalstatus festgestellt werden („nicht zu ermitteln“: 501 / „ins Ausland verzogen“: 53 / „unbekannt verzogen“: 573).

### 5.2 TODESURSACHE

Für alle 4366 als „verstorben“ gemeldeten Personen wurden Anfragen zu den Totenscheinen an die jeweils verantwortlichen Gesundheitsämter verschickt. Insgesamt 4138 Totenscheine gingen dem BfS zu. (94,8 % aller als verstorben gemeldeter Personen). Für 228 Personen konnten die zuständigen Ämter keine Totenscheinkopien zur Verfügung stellen (5,2 % aller als verstorben gemeldeter Personen). In den meisten Fällen war die Aufbewahrungsfrist abgelaufen (170 Personen), teilweise war der Totenschein laut Gesundheitsamt nicht vorhanden (45 Personen) oder die gesuchte Person war im Ausland verstorben (13 Personen).

Alle auf den 4138 Totenscheinen dokumentierten Todesursachen wurden bereits nach ICD-10 verschlüsselt.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Erhebung des Vitalstatus wurde bis zum Zeitpunkt der Berichterstellung bereits für alle 34 128 Personen komplett abgeschlossen. Der Abschlussbericht kann daher voraussichtlich zwei Monate früher als geplant vorgelegt werden.

|                                                                                                                                                                                                                                |                                                         |                           |                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>Thema</b>                                                                                                                                                                                                                   |                                                         |                           |                                                    |
| Erfassung der biokinetischen und dosimetrischen Unsicherheiten bei der Dosisermittlung nach Inkorporation von Uran und Radon-Folgeprodukten und deren Anwendung bei Bergbau-Arbeitern und Uran-Aufbereitern der WISMUT-Kohorte |                                                         |                           |                                                    |
| <b>Subject</b>                                                                                                                                                                                                                 |                                                         |                           |                                                    |
| <i>Evaluation of the biokinetic and dosimetric uncertainties on the dose assesement following intake of uranium and radon progeny, and their application to miners and millers of the WISMUT-cohort</i>                        |                                                         |                           |                                                    |
| <b>Kennzeichen</b><br>3615S12230                                                                                                                                                                                               | <b>Beginn</b><br>01.05.2015                             | <b>Ende</b><br>31.07.2017 | <b>Fördermittel</b><br>EUR 186.830,-               |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Karlsruher Institut für Technologie (KIT)                                                                                                                                                |                                                         |                           |                                                    |
| <b>Projektleitung</b><br>Dr. B. Breustedt                                                                                                                                                                                      | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. A. Giussani / AG-SG 2.3 |                           | <b>verantwortlich für den Text</b><br>Dr. W. Klein |

## 1. ZIELSETZUNG

Ein wichtiger und immer aktueller Punkt im Strahlenschutz ist das Verständnis der Strahlenwirkungen bei niedrigen Dosen und Dosisleistungen. Die WISMUT-Kohorte, die ausführliche Daten über Bergbau-Arbeiter und Uran-Aufbereiter der ehemaligen Wismut AG enthält, kann sehr wertvolle Informationen über die Risiken nach Inkorporation von Uran beitragen und Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen Organdosis und Endpunkten wie Tumorentstehung oder Mortalität ermöglichen. In den niedrigen Dosisbereichen ist die korrekte Bestimmung der Organdosen und der assoziierten Unsicherheiten wesentliche Voraussetzung für solche epidemiologische Studien.

Da die interne Dosis durch inkorporierte radioaktive Stoffe nicht gemessen, sondern nur mittels biokinetischer und dosimetrischer Modelle ermittelt werden kann, unterliegt sie deutlich größeren Unsicherheiten als die Dosis bei externer Exposition. Ziel des Vorhabens ist es, die biokinetischen Parameter der systemischen Modelle und die Parameter der dosimetrischen Modelle zu identifizieren, die am meisten zur Unsicherheit bei der Abschätzung der effektiven Dosis und der Organdosen nach Uranexposition für Bergbau-Arbeiter und Uran-Aufbereiter beitragen. Die Analyse ist auf Radon und seine Folgeprodukte auszuweiten, da diese Radionuklide eine erhebliche Exposition bei Bergmännern verursachen können. Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse können zusätzlich die Parameter und die Bestandteile der Modelle identifiziert werden, die am meisten zur Unsicherheit beitragen und deswegen in zukünftigen experimentellen Studien besser untersucht werden sollen.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Die Aufgabe ist in vier Arbeitspakete gegliedert. Das erste Paket befasst sich mit der Aufarbeitung des aktuellen Kenntnisstandes, die anderen drei Pakete decken die drei möglichen Expositionsquellen ab, die zu einer internen Dosis führen:

- Inhalation von Uran und anderen im Uranerzstaub vorhandenen langlebigen Radionukliden
- Inhalation von Radongas
- Inhalation von Radonfolgeprodukten.

In diesem Vorhaben sind die Unsicherheiten zu ermitteln, die durch die Anwendung der systemischen biokinetischen Modelle für die entsprechenden Radionuklide und der dosimetrischen Modelle bedingt sind. Die dabei betrachteten Zielorgane sind Leber, Niere, Herz, Magen, Dünndarm, Dickdarm (Colon) und rotes Knochenmark. Verwendet werden die aktuellsten Versionen der derzeit von ICRP in Überarbeitung befindlichen biokinetischen Modelle für Atemtrakt (HRTM), Verdauungstrakt (HATM) und die betrachteten Nuklide. Die für die Anwendung des HRTM benötigten Expositionsbedingungen und Absorptionsparameter sind je nach Tätigkeit und Expositionsquelle unterschiedlich.

### 3. METHODIK

Um die Kinetik radioaktiver Nuklide im menschlichen Körper zu beschreiben werden seit der Veröffentlichung von ICRP Publikation 30 im Jahr 1979 biokinetische Modelle im Kompartimentformalismus benutzt. Die einzelnen Organe/Gewebe, in denen sich der Stoff aufhält bzw. zwischen denen er transportiert wird, werden als kinetisch homogene Kompartimente betrachtet; d. h. jedes Teilchen, das in ein Kompartiment gelangt, steht sofort für den Weitertransport zur Verfügung (quasi eine instantane Durchmischung des Kompartimentinhaltes). Die Struktur eines Modells beschreibt die möglichen Stoffwechselfade für den betrachteten Stoff.

Die Lösung der zu den Kompartimentmodellen gehörenden Differentialgleichungssysteme erfolgt über Eigenwertanalyse. Durch die Notation in Vektor- und Matrixform lassen sich biokinetische Modelle durch nur zwei Variablen vollständig beschreiben: einen Spaltenvektor der Kompartimentinhalte sowie eine Transferkoeffizientenmatrix. Der Spaltenvektor enthält die Kompartimentinhalte. An ihm kann der Inhalt der Kompartimente zu jeder Zeit abgelesen werden. Falls Zuflüsse von außen vorhanden sind, können sie durch eine Zufuhrfunktion in einem eigenen Spaltenvektor dargestellt werden. Man erhält dann ein inhomogenes Differentialgleichungssystem. Die Transferkoeffizientenmatrix setzt sich aus den Stoffübergangskoeffizienten zusammen und spezifiziert die Geschwindigkeit, mit der der Transport des Stoffes von einem in ein anderes Kompartiment stattfindet. Um das Differentialgleichungssystem, welches das Zeitverhalten des Modells beschreibt, in Matrixschreibweise darzustellen, wird eine Kompartimentenmatrix aufgestellt. Diese erhält man aus der Transferkoeffizientenmatrix, indem man die Elemente der Hauptdiagonalen durch die negative Summe der Verluste des jeweiligen Kompartiments ersetzt. Als Lösung eines solchen linearen Differentialgleichungssystems erhält man eine Exponentialfunktion mit einer Matrix im Exponenten. Diese muss allgemein über eine Reihenentwicklung berechnet werden. Im Fall von Kompartimentenmatrizen kann das System alternativ durch eine Eigenwertzerlegung gelöst werden.

Zur Untersuchung der Auswirkungen von Variationen biokinetischer Modelle wurde ein Programm in C++ geschrieben, das biokinetische Modelle mit Hilfe der Eigenwertzerlegung lösen und die Ergebnisse statistisch auswerten kann. Für Monte-Carlo Simulationen werden durch gezielte statistische Variation der einzelnen Matrixelemente neue Systemmatrizen erstellt und gelöst. Für die Rauschverteilung der Eingangsparameter lassen sich verschiedene Verteilungsformen wählen. Jede der so erstellten Transferkoeffizientenmatrizen stellt in der Monte-Carlo Simulation ein Individuum dar. Durch Lösung vieler solcher Systeme können statistische Aussagen zu den Unsicherheiten getroffen werden. Zur Beschreibung der aus den MC-Simulationen erhaltenen Verteilungen der Ausgangswerte (z. B. Werte der Retentionsfunktionen) dienen Erwartungswert, Median, relative Standardabweichung und verschiedene Perzentile.

### 4. DURCHFÜHRUNG

#### 4.1 AUFSTELLEN DER KOMPARTIMENTENMATRIZEN

Die ICRP veröffentlicht für verschiedene Elemente Modelle für das systemische Verhalten nach deren Aufnahme ins Blut (systemische Modelle). Zusätzlich gibt es für den Atemtrakt, den Verdauungstrakt sowie Wunden generische Modelle, die durch geeignete Parametrisierung (d. h. Wahl der Transferkoeffizienten) für das betrachtete Nuklid angepasst werden. Durch die Kopplung der jeweiligen Modelle kann das Verhalten der Radionuklide von ihrer Aufnahme in den Körper bis zur Ausscheidung aus diesem beschrieben werden. Aktuell überarbeitet die ICRP ihr System zur internen Dosimetrie und wird eine Serie von Dokumenten zum Thema „Occupational Intakes of Radionuclides“ (OIR) veröffentlichen. Der erste Band, welcher die Grundlagen sowie ein überarbeitetes Modell des Atemtrakts beschreibt, wurde im Oktober 2015 veröffentlicht. Vier weitere Bände, welche die biokinetischen Modelle und weitere Informationen zu den Elementen enthalten, werden in Zukunft folgen. In diesem Projekt werden die aktuellen biokinetischen Modelle aus einem Textentwurf der ICRP (Stand: 27.05.2015) verwendet.

#### 4.2 KOPPLUNG DER MODELLE VERSCHIEDENER RADIONUKLIDE ÜBER DIE ZERFALLSREIHEN

Um nicht nur die Anzahl der Kernzerfälle der Mutternuklide, sondern die Gesamtanzahl der Zerfälle in den strahlenbiologisch relevanten Organen zu bestimmen, müssen für die WISMUT-Kohorte die biokinetischen Modelle der Radionuklide aus den natürlichen Zerfallsreihen von U-238 (Uran-Radium Reihe), U-235 (Uran-Actinium Reihe) und Th-232 (Thorium Reihe) miteinander gekoppelt und gelöst werden. Entgegen der bisherigen Annahme, dass die Folgeprodukte der Biokinetik des Mutternuklids folgen („shared kinetics“), muss nun generell davon ausgegangen werden, dass Tochternuklide ihre eigene Biokinetik besitzen („inde-

pendent kinetics“). Diese Annahme lässt sich jedoch auf Grund von strukturellen Unterschieden in den Modellen nicht immer direkt umsetzen. Fehlende Übergänge oder Kompartimente im Modell des Folgeprodukts müssen geeignet ergänzt werden. In den Texten der ICRP finden sich Hinweise zum entsprechenden Vorgehen bei den einzelnen Nukliden. Häufig werden dazu die Kompartimente für Weichgewebe ST0, ST1, ST2 modifiziert.

## 5. ERGEBNISSE

Im ersten Arbeitspaket wurden die Informationen zu den im Projekt benötigten Modellen (Struktur und Parameter) zusammengestellt. Dabei konnten einige Unstimmigkeiten im Entwurfstext der ICRP identifiziert werden. Die Modelle wurden in der oben beschriebenen Software umgesetzt und erste Rechnungen mit den unveränderten Modellen durchgeführt. Insgesamt zeigt sich, dass der Übergang von „shared kinetics“ (d. h. alle Folgeprodukte folgen dem biokinetischen Modell des Mutternuklides) zu „independent kinetics“ (d. h. jedes Folgeprodukt folgt seiner eigenen Kinetik) zu Problemen der Kopplung der Modelle führt. Die bei der Kopplung der Modelle einzelner Radionuklide zur Zerfallsreihe entstehenden Gesamtmatrizen sind dünn besetzt, d. h. außerhalb der direkten Umgebung der Hauptdiagonalen (Blockstruktur der Matrix) stehen nur Nullen. Außer den Übergängen innerhalb der Kompartimente eines Nuklides und zu den zugehörigen Kompartimenten des Tochternuklides finden keine weiteren Übergänge im Gesamtmodell statt. Bei der Kopplung der Modelle ergeben sich daher zusätzlich Probleme bei der numerischen Ermittlung der Eigenwerte der Kompartimentenmatrizen.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Modellrechnungen mit den ungestörten Modellen sollen plausibilisiert werden. Eine echte Validierung der Ergebnisse ist auf Grund fehlender Vergleichswerte nicht direkt möglich. Die numerischen Probleme werden durch Änderungen im verwendeten Programm und die Nichtberücksichtigung irrelevanter Nuklide in den Zerfallsreihen gelöst. Danach werden zunächst mit den implementierten Modellen die jeweiligen Retentionskurven für die Zielkompartimente berechnet. Anschließend werden die Modellparameter systematisch variiert und die sich daraus ergebenden Veränderungen der Retentionskurven bewertet und quantitative Aussagen über die statistischen Unsicherheiten der Retentionsfunktionen und der daraus berechneten Dosiswerte gewonnen. Eine Sensitivitätsanalyse der Modelle soll durchgeführt werden um den Einfluss einzelner Parameter auf die Unsicherheit der Modellvorhersage und der daraus berechneten Dosiswerte quantifizieren zu können.

**Thema**

Ermittlung von potenziellen Strahlenexpositionen durch Ableitungen aus NORM-relevanten Industriezweigen

**Subject**

*Determination of potential exposure to radiation due to discharges from NORM relevant industrial sectors*

**Kennzeichen**  
3615S12232

**Beginn**  
01.07.2015

**Ende**  
31.03.2017

**Fördermittel**  
EUR 119.190,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**  
IAF - Radioökologie GmbH, Radeberg

**Projektleitung**  
Dr. Chr. Kunze

**Fachbetreuung BfS**  
J. Dilling / SW 1.2

**verantwortlich für den Text**  
Dr. Chr. Kunze

## 1. ZIELSETZUNG

Im Zusammenhang mit der Umsetzung der EU-Grundnormenrichtlinie in nationales Recht wird mit dem Vorhaben „Ermittlung von potenziellen Strahlenexpositionen durch Ableitungen aus NORM-relevanten Industriezweigen“ auf den Teilaspekt der Ableitungen eingegangen. Dabei ist zunächst zu prüfen, ob die bisherigen Regelungen der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) für den Bereich NORM mit den Inhalten der Richtlinie 2013/59/Euratom konform sind oder ob es Bedarf für weitergehende Regelungen gibt.

Durch die Forderung der EU-Grundnormenrichtlinie, dass künftig die für Tätigkeiten geltenden Grenzwerte der Strahlenexposition auf die Summe der Dosisbeiträge aus allen Tätigkeiten anzuwenden sind, ergibt sich die Aufgabe, zunächst alle in Frage kommenden NORM-relevanten Industrien zu erfassen. Dann müssen die durch Ableitungen aus diesen Industrien verursachten Strahlenexpositionen für eine Einzelperson der Bevölkerung bewertet und jene Industrien identifiziert werden, die wegen der Ableitungen künftig bei der Ausgestaltung der strahlenschutzrechtlichen Regelungen nicht außer Acht gelassen werden können. In der Leistungsbeschreibung wird darauf verwiesen, dass wegen möglicher Mehrfachexpositionen auch Dosisbeiträge deutlich unterhalb von 1 mSv/a zu berücksichtigen sind. Als vorläufiges Kriterium (Arbeitsgrundlage) dafür wird in der Aufgabenstellung die jährliche effektive Dosis von 0,1 mSv genannt.

Außerdem ist zu prüfen, ob zusätzlich zu den in der Anlage XII der StrlSchV aufgeführten Rückständen weitere NORM-Rückstände zu beachten sind und ob neben den Strahlenexpositionen durch die Beseitigung oder Verwertung dieser Rückstände auch durch Ableitungen aus Anlagen und Einrichtungen der betreffenden Industrien Dosisbeiträge für die Bevölkerung zu erwarten sind, die wegen der o. g. Bedingungen für die Einhaltung der Dosisgrenzwerte für Tätigkeiten zu beachten sind.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das Vorhaben gliedert sich in drei Arbeitspakete (AP 1 bis AP 3), und zwar

- Identifizierung NORM-relevanter Industrien für Deutschland auf Grundlage von Anhang VI Richtlinie 2013/59/Euratom (AP 1)
- Identifizierung weiterer Industrien mit potenziell expositionsrelevanten Ableitungen auf der Basis des Altlasten-Branchenkatalogs aus dem Jahr 2014 und Bewertungen von Ableitungen des Kohlebergbaus, der Radonheilbäder und -stollen (AP 2)
- Bewertung der Strahlenexposition für die Bevölkerung durch Ableitungen mit der Luft und dem Wasser (AP 3)

Die Zielsetzungen der einzelnen Arbeitspakete sind in den folgenden Unterabschnitten beschrieben.

### 2.1 IDENTIFIZIERUNG NORM-RELEVANTER INDUSTRIEN FÜR DEUTSCHLAND (AP 1)

In einem ersten Bearbeitungsschritt sind die 16 Industriezweige des Anhangs VI der Richtlinie 2013/59/Euratom dahingehend zu prüfen, ob die aufgeführten Industriezweige in Deutschland von Relevanz sind. Dabei ist, ausgehend von der aktuellen Situation, auch eine Prognose für die künftige Entwicklung der aufgeführten

Industriezweige in Deutschland zu erstellen. Dies erfolgt auf der Basis einer Literaturstudie sowie unter Einbeziehung eigener Erkenntnisse des Auftragnehmers. Im Ergebnis von AP 1 wird die radiologische Relevanz für die einzelnen Industriezweige dargelegt.

## **2.2 IDENTIFIZIERUNG WEITERER INDUSTRIEN MIT POTENZIELL EXPOSITIONSRELEVANTEN ABLEITUNGEN UND BEWERTUNGEN VON ABLEITUNGEN DES KOHLEBERGBAUS, DER RADONHEILBÄDER UND -STOLLEN (AP 2)**

In AP 2 werden weitere Industriezweige mit potenziell expositionsrelevanten Ableitungen von NORM-Stoffen identifiziert. Dies erfolgt vor allem auf Basis des Altlasten-Branchenkatalogs, der die verschiedenen Branchen als „radiologisch altlastenrelevant“ (2R), „potenziell radiologisch relevant“ (1R bzw. 1R-S) oder „nicht radiologisch altlastenrelevant“ (0R) klassifiziert. Es werden diejenigen Branchen untersucht, die nicht bereits in AP 1 ausgeschlossen werden konnten. Zusätzlich wird eine Bewertung von Ableitungen für den Kohlebergbau und für Radonheilbäder und -stollen durchgeführt. Die Identifizierung der relevanten Industriezweige erfolgt wiederum auf Basis einer Literaturstudie sowie unter Einbeziehung eigener Erkenntnisse des Auftragnehmers.

Im Ergebnis von AP 2 werden insgesamt mindestens 15 und höchsten 20 Branchen hinsichtlich ihrer Ableitung von NORM-Stoffen bewertet werden.

## **2.3 BEWERTUNG DER STRAHLENEXPOSITION FÜR DIE BEVÖLKERUNG DURCH ABLEITUNGEN MIT DER LUFT UND DEM WASSER (AP 3)**

In AP 3 wird die zentrale Zielsetzung des Forschungsvorhabens umgesetzt, die darin besteht zu prüfen, ob relevante Strahlenexpositionen der Bevölkerung durch Ableitungen aus NORM-Industrien auftreten können. Da das Dosiskriterium von 1 mSv/a auch im Falle von Mehrfachexpositionen einzuhalten ist, sind auch Strahlenexpositionen im Bereich von 0,1 mSv/a bis 1 mSv/a zu berücksichtigen.

Eine strahlenschutzrechtliche Bewertung erfolgt für alle in Deutschland vorkommenden Industriezweige nach AP 1 und zudem für die relevanten Industriezweige nach AP 2 auf der Grundlage einer detaillierten und nachvollziehbaren Darstellung über die Verteilung natürlicher Radionuklide in den unterschiedlichen Stoffströmen von den Ausgangsstoffen zu den Endprodukten beziehungsweise Rückständen. Die Expositionsabschätzung erfolgt für Ableitungen mit der Luft und dem Wasser für alle relevanten Teilexpositionspfade.

# **3. METHODIK**

Die Methodik der Identifizierung von in Deutschland aktiven Industriezweigen unter AP 1 und AP 2 beruht auf Literaturrecherchen, die durch beim Auftragnehmer vorliegende Erfahrungen und Daten (insbesondere aus analysierten Proben und Gutachten bzw. vergleichbaren Aufträgen) unterstützt werden. Für die Fälle, für die darüber hinaus noch Klärungsbedarf besteht, werden Informationsquellen genutzt, die sich bei Datenerhebungen in verschiedenen Projekten in der Vergangenheit bewährt haben (die Industrie- und Handelskammern der 16 Bundesländer und die landes- bzw. bundesweit arbeitenden Industrieverbände). Weitere Informationsquellen sind unter anderem die Studie RP-135 der Europäischen Kommission sowie die auf Bundes- und Landesebene verfügbaren Datenbanken von BImSchG<sup>1)</sup>-Verfahren sowie Wasserrechtlichen Erlaubnissen.

Unter AP 3 werden vor allem die bei den jeweiligen Tätigkeiten eingesetzten Materialmengen und deren Aktivitätskonzentrationen und die anfallenden Rückstände, deren Mengen und Aktivitätskonzentrationen qualitativ bewertet, ebenso die Abwasser- und Abluftmengen. Ziel dieses Arbeitsschrittes ist eine Eingrenzung der Tätigkeiten auf jene, bei denen grundsätzlich die Möglichkeit besteht, dass über Ableitungen radioaktive Stoffe in einem Maße in die Umgebung abgeleitet werden, dass Strahlenexpositionen in einer Höhe entstehen können, die bei den künftig geltenden Bedingungen für die Einhaltung des Dosiskriteriums von einem Millisievert pro Jahr zu beachten sind. Für die Ableitungen erfolgt eine quantitative Abschätzung der Aktivitätsmengen. Grundlagen dafür sind die jeweiligen Aktivitätskonzentrationen und die für die Wege abgeschätzten Mengen, z. B. Abluft- oder Abwassermengen. Ergänzend dazu werden die Mengen der anfallenden Rückstände im Hinblick auf mögliche Freisetzungen von radioaktiven Stoffen bewertet, da auch die deponierten Rückstände über die Freisetzung radioaktiver Stoffe zu Strahlenexpositionen in der Umgebung der Betriebe beitragen können.

<sup>1)</sup> Bundes-Immissionsschutzgesetz

Bei der Bewertung der Strahlenexpositionen von Personen der Bevölkerung durch Ableitungen aus NORM-Industrien wird zunächst eine Bewertung unter Anwendung generischer Parameter und Szenarien durchgeführt.

#### **4. DURCHFÜHRUNG**

Die Durchführung erfolgt gemäß der in Abschnitt 3 beschriebenen Methodik. Bislang wurde AP 1 bearbeitet, jedoch noch nicht abgeschlossen.

#### **5. ERGEBNISSE**

Die zum Berichtszeitpunkt vorliegenden Ergebnisse deuten darauf hin, dass aus den in Anhang VI der Grundnormen-Richtlinie 2013/59/Euratom genannten Industriezweigen nur wenige von vornherein ausgeschlossen werden können. Die detailliertere Prüfung der radiologischen Relevanz von Ableitungen aus den Industriezweigen ist gegenwärtig in Bearbeitung. Eine abschließende Bewertung erfolgt im Zwischenbericht zu AP 1, der entsprechend dem Zeitplan des Vorhabens im April 2016 vorgelegt wird.

#### **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Die Aufgaben des AP 1 werden im Jahr 2016 fortgesetzt. Zudem wird im Laufe des Jahres mit der Bearbeitung des AP 2 begonnen.

|                                                                                                                                                                                                          |                                                          |                                                                                   |                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Thema</b><br>Erstellung einer Bioprobendatenbank der an Lungenkrebs verstorbenen Wismutarbeiter aus dem Wismut Pathologiearchiv                                                                       |                                                          |                                                                                   |                                      |
| <b>Subject</b><br><i>Establishment of a biobank based on the Wismut pathology archive of former Wismut workers who died of lung cancer</i>                                                               |                                                          |                                                                                   |                                      |
| <b>Kennzeichen</b><br>3614S10015                                                                                                                                                                         | <b>Beginn</b><br>01.01.2015                              | <b>Ende</b><br>30.09.2017                                                         | <b>Fördermittel</b><br>EUR 271.378,- |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Institut für Arbeitsmedizin und Prävention der DGUV, Institut der Ruhr-Universität Bochum (IPA)<br>Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI) |                                                          |                                                                                   |                                      |
| <b>Projektleitung</b><br>Dr. G. Johnen<br>Prof. Dr. T. Brüning                                                                                                                                           | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. M. Schnelzer / AG-SG 1.3 | <b>verantwortlich für den Text</b><br>Dr. A. Brik, Dr. G. Johnen,<br>Dr. D. Weber |                                      |

## 1. ZIELSETZUNG

In diesem Projekt sollen von männlichen Lungenkrebspatienten aus dem Wismut-Pathologiearchiv die Nukleinsäuren DNA und RNA aus den vorhandenen Formalin-fixierten Paraffin-eingebetteten (FFPE) Geweben, jeweils Tumor- und Nichttumorgewebe, für eine Bioprobenbank isoliert werden. Die verfügbaren Daten zur pathologisch-anatomischen Charakterisierung, die ermittelten Daten der isolierten Nukleinsäuren und die isolierte DNA und RNA sollen nach Abschluss des Projekts dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) übergeben und abschließend vom BfS in die vom Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Institut der Ruhr-Universität Bochum (IPA) entwickelte Datenbank (Projekt 3610S10002) integriert werden, um diese zukünftig für Forschungsfragen auf dem Gebiet des Strahlenschutzes zu verwenden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Im Pathologiearchiv befinden sich FFPE-Blöcke von insgesamt 937 männlichen Lungenkrebspatienten. 505 dieser Fälle wurden im Rahmen des vorangegangenen Projektes (3610S10002) bearbeitet. Dabei konnten 357 Fälle mit vorhandenen Paraffinblöcken und passenden Belegschnitten identifiziert werden. Die übrigen 432 theoretisch noch vorhandenen und bisher nicht bearbeiteten Fälle sollen in diesem Projekt bearbeitet werden. Hinzu kommen noch 201 Fälle (FFPE-Blöcke und soweit vorhanden entsprechende Belegschnitte), von denen im vorangegangenen Projekt (3610S10002) zwar DNA aber keine RNA isoliert wurde.

Im Einzelnen sollen in diesem Projekt folgende Punkte bearbeitet werden:

- Aktualisierung der Standard Operating Procedures (SOPs)
- Erfassung der noch vorhandenen und für eine Isolierung geeigneten FFPE-Blöcke
- Isolierung von DNA und RNA aus den Gewebeproben
- Erfassung der Qualitätsmerkmale von DNA und RNA in einer Datenbank
- Erfassung der verfügbaren medizinischen und epidemiologischen Daten
- Übergabe der isolierten DNA, RNA und der Probanden an das BfS.

## 3. METHODIK

Die Auswahl geeigneter FFPE-Blöcke sowie die Zusammenführung der verfügbaren und erhobenen Daten in einer Datenbank erfolgt in Abstimmung mit der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) durch das Kompetenzzentrum Epidemiologie des IPA. Die Isolierung, Qualitätsüberprüfung und Dokumenta-

tion der DNA und RNA erfolgt nach den aktualisierten SOPs<sup>1)</sup> im Kompetenzzentrum Molekulare Medizin des IPA.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Die SOPs für die Isolation von DNA und RNA werden aktualisiert. Die vorausgewählten Proben (FFPE-Blöcke und Belegschnitte) werden aus dem Wismut-Pathologiearchiv herausgesucht und anhand der Belegschnitte pathologisch-anatomisch als Tumor- und Nichttumormaterial klassifiziert. Dabei wird die grundsätzliche Eignung der FFPE-Blöcke für die Isolation von DNA und RNA hinsichtlich ausreichend vorhandenem Material von Tumor- und Nichttumorgewebe und möglichst geringer nekrotischer Bereiche bewertet. Falls sich Tumorgewebeproben als unbrauchbar erweisen, z. B. auf Grund von großen nekrotischen Bereichen, werden die Primärtumor-Proben durch Lungentumor-Metastasen äquivalent ersetzt.

Von den Fällen werden jeweils von Tumor- und Nichttumormaterial 3 µm-Belegschnitte für die Begutachtung und 10 µm-Schnitte für die Isolation von DNA und RNA angefertigt. Die DNA- und RNA-Isolation erfolgt gemäß der entsprechenden SOPs, wobei für die DNA zwei Isolationsansätze und für die RNA ein Isolationsansatz pro Gewebeprobe durchgeführt wird.

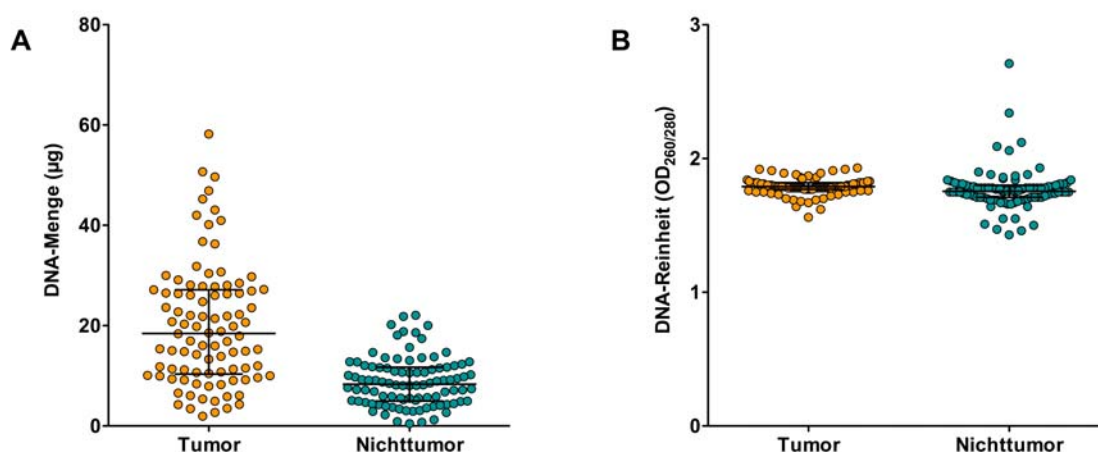
## 5. ERGEBNISSE

Im Berichtszeitraum konnten bis Ende 2015 von den 432 vorausgewählten Fällen zu 401 Fällen (> 90 %) ausreichendes Material in Form von FFPE-Blöcken, zum Teil mit den entsprechenden Belegschnitten, aus dem Wismut-Archiv entnommen werden.

Bisher wurden davon 242 Fälle pathologisch-anatomisch bewertet und 200 Fälle zeigten sich für die Isolierung von DNA und RNA geeignet. Somit lagen 400 Proben, bestehend aus Tumor- und Nichttumormaterial, vor.

Die DNA wurde bisher aus 188 Proben (Tumor- und Nichttumormaterial von 94 Fällen) isoliert. Die DNA-Menge (Summe aus zwei Isolationsansätzen) betrug im Median 11,28 µg (Interquartile Ranges (IQR) 6,81 µg - 20,00 µg). Die DNA-Reinheit (OD<sup>2)</sup> 260/280) betrug im Median 1,78 (Mittelwert aus zwei Isolationsansätzen) (IQR 1,74 - 1,81).

Es zeigten sich Unterschiede in der Ausbeute zwischen Tumormaterial mit 18,45 µg (10,35 µg - 27,16 µg) im Median und Nichttumormaterial mit 8,33 µg (IQR 4,96 µg - 11,72 µg) im Median (Abbildung 1A). Die DNA-Reinheit betrug im Tumormaterial 1,79 (IQR 1,77 - 1,82) im Median und im Nichttumormaterial 1,76 (IQR 1,71 - 1,80) im Median (Abbildung 1B).



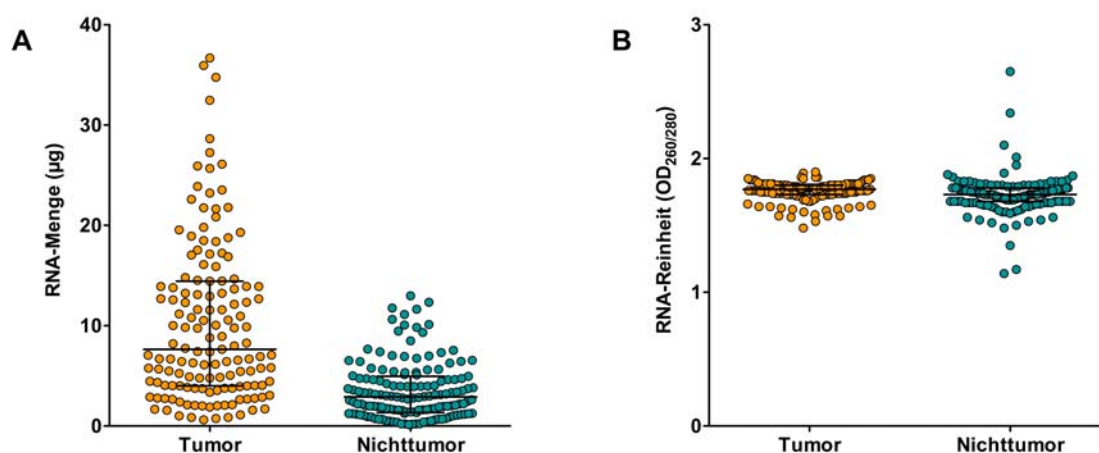
**Abbildung 1: DNA-Menge (A) und DNA-Reinheit (B) aus Tumor- und Nichttumormaterial. Die waagerechten Linien zeigen den Median und die Interquartile Ranges.**

<sup>1)</sup> standard operating procedure

<sup>2)</sup> optische Dichte

Die RNA wurde bisher aus 286 Proben (Tumor- und Nichttumormaterial von 143 Fällen) isoliert. Die RNA-Menge betrug im Median 4,56 µg (IQR 2,04 µg - 9,83 µg). Die RNA-Reinheit (OD 260/280) betrug im Median 1,75 (IQR 1,69 - 1,80).

Wiederum zeigten sich Unterschiede in der Ausbeute zwischen Tumormaterial mit 7,64 µg (IQR 4,00 µg - 14,43 µg) im Median und Nicht-Tumormaterial mit 2,91 µg (IQR 1,34 µg - 4,96 µg) im Median (Abbildung 2A). Die RNA-Reinheit betrug im Tumormaterial 1,77 (IQR 1,73 - 1,80) im Median und im Nicht-Tumormaterial 1,73 (IQR 1,68 - 1,78) im Median (Abbildung 2B).



**Abbildung 2: RNA-Menge (A) und RNA-Reinheit (B) aus Tumor- und Nichttumormaterial. Die waagerechten Linien zeigen den Median und die Interquartile Ranges.**

Weit gespreitete Mengen- und Reinheitsbereiche zeugen von der Abhängigkeit der Ergebnisse von der Gewebequalität, so führen höhere Anteile von nekrotischen Geweben in einigen Fällen zu geringen Ausbeuten an DNA und RNA.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Für den weiteren Verlauf des Projekts ist die Bearbeitung der noch ausstehenden Fälle geplant. Dies umfasst entsprechend die pathologisch-anatomische Begutachtung der Fälle und die Isolierung von DNA und RNA aus den geeigneten Tumor- und Nichttumorproben.

Für die Fälle, die sich nach der Begutachtung als nicht geeignet erweisen, werden noch vorhandene FFPE-Blöcke, ersatzweise auch mit Probenmaterial von Lungentumor-Metastasen, für eine erneute pathologisch-anatomische Begutachtung und anschließende Nukleinsäure-Isolierung aus dem Pathologiearchiv herausgesucht.



**Themenbereich 02**  
**Strahlenschutztechnik**

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

**Thema**

Entwicklung und Umsetzung von Konzepten zur Charakterisierung klinischer CT-Systeme unter Einbeziehung von Bildqualität und Dosis

**Subject**

*Development and implementation of concepts for characterisation of clinical CT systems considering image quality and dose*

**Kennzeichen**

3613S20007

**Beginn**

01.08.2014

**Ende**

31.07.2016

**Fördermittel**

EUR 248.805,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Centre Hospitalier Universitaire Vaudois, Institut de radiophysique, Lausanne, Schweiz

**Projektleitung**

Prof. Dr. F. R. Verdun

**Fachbetreuung BfS**

Dr. A. Schegerer / AG-SG 2.3

**verantwortlich für den Text**

Prof. Dr. F. R. Verdun  
Dr. A. Schegerer

## 1. ZIELSETZUNG

Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung von Konzepten zur Bewertung von CT-Systemen und deren klinischer Protokolle unter Einbeziehung von Bildqualität und Dosis. Die Konzepte sind an verschiedenen CT-Systemen, einschließlich von Systemen, bei denen die neuesten iterativen Bildrekonstruktionsmethoden zum Einsatz kommen, umzusetzen.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das Vorhaben besteht aus vier Arbeitspaketen.

### 2.1 AUFARBEITUNG DES STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK (AP 1)

Das erste Arbeitspaket des Projektes besteht darin, die unterschiedlichen physikalischen Ansätze zur Bewertung von Bildqualität von CT-Bildern darzustellen und zu bewerten. Schwerpunkt der Arbeit ist der Einsatz mathematischer Modelle, die das menschliche Sehvermögen, Details in Röntgenbildern (u. a. CT-Bilder) zu erkennen und damit deren Bildqualität bewerten zu können, wiederzugeben vermögen. Eine Erfassung der subjektiven Bewertung der Bildqualität von Röntgenbildern mit Hilfe der Betrachtermodelle erlaubt nun, die Bildqualität hinsichtlich der Beantwortung der medizinischen Fragestellung (z. B. Erkennen von Details) und der aufzuwendenden Dosis an objektiven Kriterien zu optimieren. Damit ermöglicht der Einsatz dieser mathematischen Modelle eine Beurteilung der Dosiseffizienz von CT-Protokollen und CT-Systemen anhand vereinheitlichter Protokolle.

### 2.2 WEITERENTWICKLUNG VON KONZEPTEN ZUR CHARAKTERISIERUNG VON CT-SYSTEMEN (AP 2)

Auf der Basis der Ergebnisse von AP 1 sind zwei unterschiedliche Konzepte zur Charakterisierung der Dosis-effizienz von CT-Systemen auszuwählen.

### 2.3 UMSETZUNG DER KONZEPTE (AP 3)

Die beiden Konzepte zur Bewertung der Dosiseffizienz sind auf eine Auswahl der auf dem Markt befindlichen CT-Scanner anzuwenden.

### 2.4 BEWERTUNG DER KONZEPTE (AP 4)

Abschließend erfolgt die Bewertung der vorgeschlagenen Konzepte.

## 3. METHODIK

### 3.1 LITERATURRECHERCHE

Eine umfassende Literaturübersicht wurde für AP 1 durchgeführt. Die Arbeit wurde durch weitere Ergebnisse der letzten Jahre ergänzt, welche auf mit nicht-linearen Rekonstruktionsalgorithmen kompatiblen Methoden basieren.

### 3.2 AUSWAHL DER CT-PROTOKOLLE

Der erste Teil dieses Arbeitspaketes bestand aus einer Befragung erfahrener Radiologen, um eine Liste möglichst vereinheitlichter CT-Protokolle zu erarbeiten, mit deren Hilfe die Dosiseffizienz verschiedener CT-Systeme untersucht werden soll. Zwei mathematische Betrachtermodelle wurden ausgewählt und derart weiterentwickelt, dass auch CT-Systeme untersucht werden können, die iterative Rekonstruktionstechniken einsetzen.

### 3.3 UMSETZUNG DER KONZEPTE

Zur Bestimmung der Dosiseffizienz von CT-Systemen wurden moderne CT-Scanner (mit mindestens 16 Detektorzeilen) ausgewählt.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 DURCHFÜHRUNG DER LITERATURRECHERCHE

Das erste Arbeitspaket des Projekts besteht aus einer Literaturübersicht über die unterschiedlichen Möglichkeiten der Bildqualitätsbeurteilung. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf mathematischen Betrachtermodellen („mathematical model observers“), da man mit dieser Methode die CT-Bildqualität zum Zweck des „CT Benchmarking“ und zur Optimierung klinischer CT-Protokolle beurteilen kann.

### 4.2 ERARBEITUNG EINER LISTE ZU UNTERSUCHENDER CT-PROTOKOLLE

Die Arbeit am ersten Teil des zweiten Arbeitspakets „Definition der Bildqualitätsanforderungen - Auswahl von CT-Protokollen“ begann im Herbst 2014. Der erste Teil dieses Arbeitspaketes bestand aus einer Befragung erfahrener Radiologen, um die Liste der CT-Protokolle zu erarbeiten, deren Untersuchung im Rahmen des Vorhabens geplant ist. Die Radiologen wurden darum gebeten, wissenschaftliche Publikationen vorzuschlagen, in denen die gewählten Protokolle durch schon optimierte und klinisch angemessene Parametersätze beschrieben sind.

Die ausgewählten Konzepte zur Charakterisierung der Dosiseffizienz von CT-Systemen wurden getestet und weiterentwickelt.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 ERGEBNISSE DER LITERATURRECHERCHE

Eine umfassende Literaturübersicht wurde aufbereitet und in einem Peer Review Journal publiziert (Phys Med. 2015; 31(8):823-43).

### 5.2 WEITERENTWICKLUNG VON KONZEPTEN ZUR CHARAKTERISIERUNG VON CT-SYSTEMEN

Die endgültige Zusammenstellung von sechs Protokollen zum „CT-Benchmarking“ wurde nach Diskussion mit einem Gremium aus Radiologen und Medizinphysikern sowie dem BfS definiert. Die ausgewählten Protokolle sind allgemein genug gehalten, damit alle verschiedenen, im Projekt involvierten CT-Einheiten charakterisiert werden können. Es ist vorgesehen, das Potential von Röhrenstrommodulationstechniken und der iterativen Bildrekonstruktion zu untersuchen.

Weiterhin wurden zwei Konzepte der mathematischen Betrachtermodelle weiterentwickelt, um die CT-Bildqualität zu charakterisieren. Das erste Konzept (Konzept 1) behandelt die Bewertung der Detektion von CT-Einheiten bei niedrigem Kontrast, der stark vom Bildrauschen beeinflusst wird. Dieses Konzept basiert auf

einem kanalisierten Hotelling Betrachtermodell (CHO - channelized hotelling observer), das im Bildraum angewandt wird. Das zweite Konzept (Konzept 2) behandelt die Bewertung der Erkennbarkeit von Bilddetails bei hohem Kontrast, die stark von räumlicher Bildauflösung abhängt. Dieses Konzept basiert auf einem „Non-Pre-Whitening-With-Eye-Function“ (NPWE)-Betrachtermodell im Fourierraum. Bei diesem Konzept wurde im Gegensatz zur üblichen Vorgehensweise die Modulationsübertragungsfunktion (MTF) mit einer modifizierten Funktion (TTF - Messung der MTF an mehreren „weichen“ Kanten) ausgetauscht, was den Einsatz iterativer Bildrekonstruktionstechniken erlaubt. Dieses modifizierte Konzept wird die Kombination mit herkömmlichen Methoden zur Bildqualitätsbeurteilung ermöglichen (Einsatz des Rauschleistungsspektrums und der Rauschübertragungsfunktion).

### 5.3 ANWENDUNG DES KONZEPTS

Die vorgeschlagene Konzepte kommen in 96 verschiedenen Messungen (6 Protokolle, 8 Einheiten, 2 Konzepte) zum Einsatz. Die acht zu testenden CT-Einheiten wurden ausgewählt. Die beiden Konzepte werden auf jeder CT-Einheit angewendet. Nahezu die Hälfte der Messungen wurden bereits durchgeführt.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Während des ersten Trimesters des Jahres 2016 ist die Fertigstellung des Arbeitspakets 3 geplant, indem zu den 96 zuvor beschriebenen Bedingungen die Charakterisierung von fünf unterschiedlichen Einheiten zweier CT-Modelle hinzugefügt wird. Zudem werden Messungen auf mindestens einer CT-Einheit in Deutschland durchgeführt. Ein wissenschaftlicher Beitrag wurde zur „4th International Conference on Image Formation in X-Ray Computed Tomography“ eingereicht, die vom 18. bis zum 22. Juli 2016 in Bamberg stattfindet.

|                                                                                                                                                                                                                                 |                                                     |                           |                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>Thema</b>                                                                                                                                                                                                                    |                                                     |                           |                                                    |
| Fortschreibung der Untersuchung und Bewertung der tätigkeitsbezogenen Strahlenexposition in Anlagen nach AtG, standortnahen Zwischenlagern für radioaktive Abfälle und nichtkerntechnischen Einrichtungen nach StrlSchV und RöV |                                                     |                           |                                                    |
| <b>Subject</b>                                                                                                                                                                                                                  |                                                     |                           |                                                    |
| <i>Update and evaluation of task-related exposure in nuclear facilities and other radiation relevant installations under the aspect of optimisation</i>                                                                         |                                                     |                           |                                                    |
| <b>Kennzeichen</b><br>3615S22301                                                                                                                                                                                                | <b>Beginn</b><br>01.11.2015                         | <b>Ende</b><br>30.09.2018 | <b>Fördermittel</b><br>EUR 372.735,-               |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln                                                                                                                         |                                                     |                           |                                                    |
| <b>Projektleitung</b><br>Dr. T. Stahl                                                                                                                                                                                           | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>L. Kammerer / AG-SG 2.4 |                           | <b>verantwortlich für den Text</b><br>Dr. T. Stahl |

## 1. ZIELSETZUNG

Ein erheblicher Teil der gesamten beruflichen Strahlenexposition in Deutschland entsteht während der 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 einem weiteren in 2015 erhält die mit den genannten Arbeiten einhergehende Strahlenexposition zusätzlich eine aktuelle Bedeutung für den radiologischen Arbeitsschutz in kerntechnischen Anlagen. Ebenso an Bedeutung gewinnt der Betrieb standortnaher Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente sowie für die Lagerung radioaktiver Abfälle aus Stilllegung und Abbau von Leistungsreaktoren.

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 Strahlenexposition erforderlich, die hinsichtlich des erforderlichen Datenmaterials über Daten der amtlichen Personendosimetrie hinausgehen.

Im Rahmen des Vorhabens werden frühere Untersuchungen zur tätigkeitsbezogenen beruflichen Strahlenexposition 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 Strahlenexposition 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 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. Weiterhin wird geprüft, ob und ggf. welche Möglichkeiten bestehen, entsprechende Erhebungen über tätigkeitsbezogene Expositionen in nichtkerntechnischen Einrichtungen durchzuführen und unter welchen Voraussetzungen solche Erhebungen durchgeführt werden können.

## 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 sollen Informationen und Daten, die für die Dokumentation und Auswertung der beruflichen Strahlenexposition in den Anlagen von Bedeutung sind, insbesondere unter dem Gesichtspunkt der durchgeführten Tätigkeiten für die Jahre 2014 bis 2016 erhoben, aufbereitet und in jährlichen Berichten dokumentiert werden. Die zu erhebenden Daten stammen aus der betrieblichen Dosimetrie der Anlagen und weisen einen Detailierungsgrad auf, der höher ist als derjenige der Daten der amtlichen Strahlenschutzüberwachung.

## 2.2 DATENANALYSE

Anhand der Daten sollen die Zusammenhänge zwischen der beruflichen Strahlenexposition und den sie beeinflussenden Faktoren untersucht und die Möglichkeiten der Reduktion der Strahlenexposition dargestellt werden. 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, sind hierbei Teilaspekte von durchgeführten Tätigkeiten in die Analyse einzubeziehen.

Die zu erfassenden Daten und ihre Auswertungen sollen frühere Daten und Auswertungen fortführen und einen Vergleich auf nationaler und internationaler Ebene (OECD und EU) ermöglichen. Deshalb wird bei der Datenerfassung und Aufbereitung eine international einheitliche Charakterisierung der Tätigkeiten angewendet. Internationale Zusammenarbeit und Informationsaustausch erfolgen insbesondere durch die Mitarbeit im ISOE.

## 2.3 OPTIMIERUNGSEMPFEHLUNGEN

Auf der Basis der erhobenen Daten und Analyseergebnisse sowie nationaler und internationaler Entwicklungen sollen 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 werden.

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 IAEA sind vorgesehen.

## 2.4 EINSATZ VON AUSLÄNDISCHEM FREMDPERSONAL

Unter Berücksichtigung der Erfahrungen aus der Sammlung und Analyse der Expositionsdaten sowie des gezielten Erfahrungsaustauschs auf nationaler und internationaler Ebene sollen Fragen im Zusammenhang mit dem Strahlenschutz ausländischen Fremdpersonals bearbeitet werden. Ziel ist es, Beiträge zu eindeutigen Vorgehensweisen beim Einsatz ausländischen Fremdpersonals in deutschen Kernkraftwerken zu leisten, die einen grenzüberschreitenden Strahlenschutz sicherstellen.

## 2.5 NICHT-KERntechnische EINRICHTUNGEN

Auf der Grundlage der Erfahrungen mit der Datenerhebung und -analyse in kerntechnischen Anlagen soll im Rahmen einer gesonderten Studie geprüft werden, welche Möglichkeiten bestehen, entsprechende Erhebungen über tätigkeitsbezogene Expositionen in nicht-kerntechnischen Einrichtungen nach StrlSchV und RöV durchzuführen und unter welchen Voraussetzungen solche Erhebungen durchgeführt werden können. Der Schwerpunkt liegt dabei auf ausgewählten dosisintensiven Anwendungen der Industrie (z. B. mobile Radiographie) und der Medizin (z. B. interventionelle Radiologie).

## 3. METHODIK

### 3.1 METHODIK ZUR UNTERSUCHUNG DER BERUFLICHEN STRAHLENEXPOSITION IN KERntechnischen ANLAGEN

Die Daten zur Fortschreibung der Zeitreihen für Kernkraftwerke werden mit Hilfe des Datenerfassungssystems des ISOE erhoben. Darüber hinaus werden für Teilbereiche die Daten aus weiteren Quellen und 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 Abschnitt 2.2 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.

### **3.2 METHODIK ZUR STUDIE IM BEREICH NICHT-KERntechnischer EINRICHTUNGEN**

Aufbauend auf einer Recherche zum aktuellen Sachstand der Strahlenexposition auf nationaler Ebene im Bereich der mobilen Radiographie und interventionellen Radiologie werden die Möglichkeiten einer Erhebung der Strahlenexpositionsdaten geprüft.

## **4. DURCHFÜHRUNG**

### **4.1 UNTERSUCHUNG DER BERUFLICHEN STRAHLENEXPOSITION IN KERntechnischen ANLAGEN**

Die Daten der kerntechnischen Anlagen eines Jahres werden jeweils im Folgejahr in den Anlagen erhoben. Für Kernkraftwerke in Betrieb und Stilllegung werden die ISOE-Datenerfassungssoftware und für die Anlagen der Ver- und Entsorgung standardisierte Datenerfassungsbögen eingesetzt, die im Rahmen früheren Datenerfassungen mit diesen Anlagen abgestimmt wurden. Darüber hinaus werden ergänzende Daten und Informationen erfasst und die jährlichen Betriebsberichte der Kernkraftwerke in Betrieb und Stilllegung ausgewertet.

## **5. ERGEBNISSE**

Die bislang vorliegenden Ergebnisse des Vorhabens werden nach der Struktur der Einzelzielsetzungen zusammengefasst.

### **5.1 DATENERHEBUNG UND DOKUMENTATION**

Im Jahr 2015 wurde die Sammlung der Daten für das Berichtsjahr 2014 weitestgehend abgeschlossen und Maßnahmen zur Sammlung der Daten zur Strahlenexposition in 2015 vorbereitet. Darüber hinaus wurde mit der Erstellung der nach Abschnitt 2.1 vorgesehenen Jahresberichte mit Übersichten über die berufliche Strahlenexposition in deutschen Kernkraftwerken im Jahr 2014 begonnen. Zu beachten ist, dass die Berichte nach Weisung des BMUB der Öffentlichkeit nicht zur Verfügung stehen.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Für das Jahr 2016 ist der Beginn der Datensammlung für das Berichtsjahr 2015 und die Fortführung der jährlichen Berichterstattung zur Strahlenexposition in kerntechnischen Anlagen, hier mit Schwerpunkt auf den Jahren 2014 und 2015, vorgesehen. Ebenso wird die Mitarbeit in den Gremien und Arbeitsgruppen des ISOE fortgesetzt. Insbesondere wird die Teilnahme an der im Frühjahr 2015 gegründete Expertengruppe, die sich speziell mit Fragestellungen der Stilllegung von Kernkraftwerken befasst (ISOE Working Group on Radiological Protection Aspects of Decommissioning Activities at Nuclear Power Plants - WG-DECOM) fortgeführt, um sowohl deutsche Erfahrungen in den internationalen Erfahrungsaustausch als auch umgekehrt internationale Erfahrungen in den deutschen Erfahrungsaustausch einzubringen.

**Thema**

Schaffung einer operationellen Infrastruktur zur Analyse von Spektren aus Halbleiterdetektoren mit mittlerer Energieauflösung

**Subject**

*Supply of an operational infrastructure for analysis of spectrum obtained with semiconductor detector of intermediate resolution*

**Kennzeichen**

3615S22530

**Beginn**

01.08.2015

**Ende**

31.07.2017

**Fördermittel**

EUR 194.979,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Envinet GmbH (Deutschland)

**Projektleitung**

Dr. Sascha Reinhardt

**Fachbetreuung BfS**

Dr. Ulrich Stöhlker / SW 2.4

**verantwortlich für den Text**

Dr. Sascha Reinhardt

## 1. ZIELSETZUNG

Aktuell führt das BfS spektroskopische Sonden ein, die zusätzlich zur Messung der Ortsdosisleistung (ODL) nuklidsspezifische Information liefern. Verfügbar sind bereits Systeme auf  $\text{LaBr}_3$ - bzw. auf  $\text{CdZnTe}$  (CZT)-Basis mit Energieauflösungen von ca. 2,5 bzw. 1,5 %. Ziel ist der Aufbau dieser Systeme insbesondere in der Nähe kerntechnischer Anlagen. Damit wird erreicht, dass in der Frühphase eines Unfallablaufs die relevanten Messinformationen zum freigesetzten Nuklidgemisch zeitnah bestimmt werden können. Damit wird sichergestellt, dass die Beiträge dominanter Radionuklide zur Exposition bereits während der Wolkendurchzugsphase zuverlässig abgeschätzt werden können und die Verfügbarkeit der wesentlichen Information zur optimierten Lagedarstellung und zum frühzeitigen Ergreifen von relevanten Maßnahmen gegeben ist.

Bei der sogenannten „Full Spectrum Analysis“ (FSA)-Methode wird das zu untersuchende, experimentell ermittelte Gamma-Spektrum mit Hilfe von gewichteten Referenzspektren rekonstruiert. Im Rahmen des Vorhabens 3612S20012 wurde gezeigt, dass das FSA-Verfahren insbesondere bei Verwendung von Detektorsystemen mit mittlerer Energieauflösung der klassischen Peakanalyse-Methode überlegen ist. Auf Grund dieser positiven Erfahrungen in der Anwendung der FSA-Methode soll das Verfahren wissenschaftlich weiter entwickelt werden, um eine inhaltliche operationelle Einsatzbereitschaft zu erreichen. Der Schwerpunkt liegt dabei in der Einführung automatisch/rekursiver Verfahren für die Energie-Rekalibrierung, in der Bestimmung der Umgebungsäquivalentdosisleistung ( $H^*(10)$ ) in Einheiten von  $\mu\text{Sv/h}$  aus dem Gesamtspektrum, in der automatisierten Vorauswahl der Referenz-Spektren und in der detektorspezifischer Generierung von Referenzspektren mit Monte-Carlo-Methoden. Damit soll eine optimierte Datenanalyseplattform geschaffen werden, um eine zeitnahe und wissenschaftlich fundierte Analyse der Daten spektrometrierender ODL-Sonden in einem möglichen Ereignisfall zu erreichen.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das Projekt ist aufgeteilt in sechs Arbeitspakete (AP), von denen das erste im Dezember 2015 abgeschlossen wurde. AP 2 ist gegenwärtig in Bearbeitung und soll im Februar 2016 abgeschlossen werden.

Die Reihenfolge der Arbeitspakete wurde abgeändert. Die Abfolge ist nun AP 4, AP 2, AP 1, AP 3, AP 5, AP 6.

### 2.1 AUTOMATISIERTE VERFAHREN ZUR VORAUSWAHL VON REFERENZ-SPEKTREN (AP 4)

Das automatisierte Verfahren zur Vorauswahl von Referenz-Spektren beinhaltet die:

- Peakanalyse des Spektrums mit Nuklidzuordnung für eine Vorauswahl an Referenzspektren
- Erweiterung der unterstützenden Formate mit N42.42.

### 2.2 AUTOMATISCH/REKURSIVES VERFAHREN FÜR DIE ENERGIE-REKALIBRIERUNG (AP 2)

Das automatisch/rekursive Verfahren für die Energie-Rekalibrierung beinhaltet die Feinjustage mit Hilfe der FSA-Methode ohne zusätzlichen Referenzstrahler.

### 3. METHODIK

Neben den in den einzelnen AP genannten Methoden finden über den gesamten Projektverlauf hinweg Meetings mit dem Auftraggeber statt, um erarbeitetes Wissen zu reflektieren und das weitere Vorgehen zu planen. AP 2 ist gegenwärtig in Bearbeitung und soll bis Ende Februar 2016 abgeschlossen sein. Es wird der aktuelle Stand dargestellt.

#### 3.1 AUTOMATISIERTE VERFAHREN ZUR VORAUSWAHL VON REFERENZ-SPEKTREN (AP 4)

Mittels einer Peakanalyse mit Nuklididentifikation wird das Spektrum schon auf potenzielle Nuklide untersucht. Das Ergebnis dieser Analysis kann dann zur Festlegung der Referenz-Spektren herangezogen werden.

#### 3.2 AUTOMATISCH/REKURSIVES VERFAHREN FÜR DIE ENERGIE-REKALIBRIERUNG (AP 2)

Da die Energiekalibrierung des Gammaskpektrums die Grundlage jeder weiteren quantitativen Analyse ist, ist das Ziel von AP 2, ein optimiertes Verfahren zu finden, um ein Spektrum nachträglich mit einer verbesserten Energiekalibrierung zu versehen. Die vorhandene Energieachse wird über zwei Methoden abgeändert. Einmal wird die Energieachse mit einem Faktor skaliert, wobei ein Faktor von 1 bedeutet, dass die vorhandene Energieachse beibehalten wird. Dass diese Methode auch auf der Qualität der vorhandenen Energiekalibrierung beruht und nur kleine Fehler in der Energiekalibrierung kompensieren kann, muss bewusst sein. Die zweite Methode basiert auf einer Peakanalyse (AP 4) und bietet die Möglichkeit, die Energiekalibrierung neu zu erstellen, wobei auch hier die vorhandene Energiekalibrierung gut genug sein muss, um Peaks im Spektrum zu Gammalinien von Nukliden zuordnen zu können.

### 4. DURCHFÜHRUNG

#### 4.1 AUTOMATISIERTE VERFAHREN ZUR VORAUSWAHL VON REFERENZ-SPEKTREN (AP 4)

Als Grundlage der Peakanalyse dient die Publikation von M. A. Mariscotti<sup>1)</sup>. Die notwendigen Parameter für die notwendige Peakanalyse (energieabhängige Auflösung des Detektors, Detektionseffizienz) kann vom Nutzer konfiguriert werden. Bei der anschließenden quantitativen Auswertung eines Peaks wird berücksichtigt, ob dieser im Bereich einer Comptonkante eines anderen Peaks liegt und die Funktion für den Untergrund entsprechend angepasst ist. Auch der Typ des Detektors wird in der Fitfunktion berücksichtigt (z. B. Gauss-Funktion für Szintillatoren und Berücksichtigung des Tailings bei CZT). Überlappen sich mehrere Peaks, wird eine Multiplett Analyse über die betroffenen Peaks durchgeführt. Basierend auf einem Vergleich Linienbreite Fit mit der erwarteten Linienbreite des Detektors wird auf mögliche nicht aufgelöste Peaks hingewiesen. Abschließend wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse erstellt mit mindestens folgenden Informationen:

- Peakfläche
- Peakbreite
- Peakgüte (Angaben reduziertes Chiquadrat, Mögliches nicht aufgelöstes Multiplett)
- Peakenergie und Peakkanal

Als Input wird der Datenformatstandard N42 unterstützt.

Die Ergebnisse der Peakanalyse werden mit einer Nuklidbibliothek abgeglichen, wobei eine nutzerspezifische Toleranz zwischen der Linienenergie in der Bibliothek und gemessener Peakenergie berücksichtigt wird. Ist die Detektionseffizienz des Detektors bekannt, kann diese auch bei der Nuklidzuordnung benutzt werden, um bei Nukliden mit mehreren Gammalinien zu prüfen, ob das Verhältnis der einzelnen Linien der Erwartung entspricht.

Die Implementierung des N42-Formats für Ein- und Ausgabe erfolgt nach ANSIN42.42-2006 und ANSIN42.42-2012. Für das XML-Format N42 wird libxml2 Bibliothek (<http://www.xmlsoft.org/>) verwendet, die die MIT<sup>2)</sup>-Lizenz verwendet und GPL<sup>3)</sup> kompatibel ist.

<sup>1)</sup> M. A. Mariscotti, Nuc. Inst. Met., 50 (1967) 309-320

<sup>2)</sup> Massachusetts Institute of Technology

<sup>3)</sup> General Public License

## 4.2 AUTOMATISCH/REKURSIVES VERFAHREN FÜR DIE ENERGIE-REKALIBRIERUNG (AP 2)

Von der Methode 1 wurden drei verschiedene Varianten (Variante 1 bis 3) getestet, wobei zwei Varianten auf historische Daten zurückgreifen. Einmal wird das Vorgängerspektrum zur Energiekalibrierung verwendet in der Annahme, dass dieses eine gültige Energiekalibrierung hat, und ein anderes Mal wird auf ein Standardspektrum zurückgegriffen, das durch Mittelung mehrerer Spektren aus einer Zeitreihe erstellt wurde. Das Ziel davon ist, auch die Anpassung der Energieachse zu beschleunigen, indem nicht alle Referenzspektren hierfür verwendet werden, sondern nur ein Teil bzw. ein Referenzspektrum.

Für die Methode 2 wird der Peaksuchalgorithmus aus AP 4 verwendet. Der Nutzer kann Gammalinien definieren, die er im Spektrum erwartet. Werden diese gefunden, wird abhängig von der Anzahl der gefunden Gammalinien das Energiespektrum skaliert bzw. komplett neu definiert.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 AUTOMATISIERTE VERFAHREN ZUR VORAUSWAHL VON REFERENZ-SPEKTREN (AP 4)

In AP 4 wurde ein Softwarepaket erstellt, das in der Sprache C verfasst ist und die GPL-Lizenz verwendet. Der Inhalt dieser Software ist eine Peakanalyse und Nuklidanalyse eines Gammaskpektrums. Das Programm kann Spektren im Format N42.42-2006 und N42.42-2012 lesen und schreiben.

### 5.2 AUTOMATISCH/REKURSIVES VERFAHREN FÜR DIE ENERGIE-REKALIBRIERUNG (AP 2)

Das Ergebnis ist, dass die Methode, die auf einer Skalierung der Energieachse beruht, zu einer Verbesserung führt, wobei die Variante 1 ein gutes Ergebnis liefert aber eine lange Berechnungszeit erfordert. Bei Variante 2 und Variante 3 zeigt sich, dass diese gut funktionieren, wenn das Spektrum z. B. ein normales natürliches Hintergrundspektrum ist. Ist das Spektrum durch ein Nuklid stark verändert, kann dies aber auch zu falschen Ergebnissen führen.

Die Methode, die auf eine Peaksuche basiert, liefert gute Ergebnisse, wenn Peaks über die gesamte Energieachse gefunden werden und auch ein zuverlässiger Fit des Peaks möglich ist. Insbesondere sind die Ergebnisse dann gut, wenn es einen Peak bzw. Information für den niederenergetischen Teil des Spektrums gibt (z. B. eine Röntgenlinie), so dass ein zuverlässiger Wert für den 0 bzw. 1 Kanal gefunden werden kann. Ansonsten sind größere Abweichungen möglich. Diese Methode hat den Vorteil, Nichtlinearitäten in der Energiekalibrierung besser auszugleichen.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Geplant ist AP 2 mit dem Zwischenbericht abzuschließen und mit AP 1 fortzufahren, da AP 4 als erstes durchgeführt wurde.

**Themenbereich 03**

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

***Subject area 03***

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

**Thema**

Validierung eines genomischen PCR-Verfahrens zum Nachweis von chromosomalen Translokationen zur Identifizierung prä-leukämischer Zellen bei Kindern - Pilotstudie

**Subject**

*Validation of a genomic PCR approach to detect chromosomal translocations to identify pre-leukaemic cells in children - pilot study*

**Kennzeichen**  
3614S30034

**Beginn**  
01.11.2014

**Ende**  
30.04.2015

**Fördermittel**  
EUR 75.277,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Universitätsklinikum Heinrich-Heine-Universität, Düsseldorf

**Projektleitung**  
Prof. Dr. A. Borkhardt  
Dr. U. Fischer

**Fachbetreuung BfS**  
Dr. S. Hornhardt / AG-SG 1.2

**verantwortlich für den Text**  
Prof. Dr. A. Borkhardt  
Dr. U. Fischer

## 1. ZIELSETZUNG

Die akute lymphoblastische Leukämie (ALL) bei Kindern ist gekennzeichnet durch das Auftreten wiederkehrender chromosomaler Translokationen. Die häufigste dieser Translokationen, die in 25 % der von B-Lymphozyten gebildeten ALLs im Kindesalter anzutreffen ist, führt zur Fusion der Gene ETV6 und RUNX1 zu dem chimären Transkriptionsfaktor ETV6-RUNX1. Diese Translokation scheint der erste Anstoß zu sein, damit sich eine normale hämatopoetische Vorläufer- oder Stammzelle in eine prä-leukämische Zelle umwandelt. Man geht davon aus, dass prä-leukämische Vorläufer-Zellen bereits in utero gebildet werden und über lange Zeit persistieren können, bevor sie durch eine sekundäre Mutation zum Ausbruch einer akuten Leukämie führen können. Diese sekundären Mutationen entstehen möglicherweise spontan oder durch Umwelteinwirkungen. In einer retrospektiven Studie konnte gezeigt werden, dass ETV6-RUNX1 positive, prä-leukämische Klone bereits in neonatalen Blutproben von Kindern vorhanden waren. Die Inzidenz dieser Zellen legte nahe, dass das Vorhandensein Leukämie-spezifischer Translokationen 100-fach höher sein könnte als die allgemeine Inzidenzrate für ALL ( $\approx 1$  in 2000). Dies würde bedeuten, dass ETV6-RUNX1 positive Klone natürlicherweise ausgelöscht werden bzw. durch weitere Faktoren zur Entwicklung von Leukämie führen können. Allerdings bestätigen neuere Untersuchungen diese Daten bisher nicht. Um die tatsächliche Inzidenz der prä-leukämischen ETV6-RUNX1-Translokation festzustellen, soll eine retrospektive, bevölkerungsbasierte Studie an Nabelschnurblutproben von 1000 gesunden Neugeborenen durchgeführt werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Ein geeignetes Screeningverfahren zur verlässlichen und sensitiven Detektion von chromosomalen Translokationen in klinischen Proben lange vor Ausbruch einer akuten Leukämie ist in dem vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) geförderten Projekt 3611S70019 „Nachweis von chromosomalen Translokationen durch genomische PCR zur Identifizierung prä-leukämischer Zellen bei Kindern - Pilotstudie zur Entwicklung und Validierung geeigneter Sonden“ mit der GIPFEL-Methode (genomische inverse PCR für die Erfassung von ligierten Bruchpunkten GIPFEL (engl.: genomic inverse PCR for evaluation of ligated breakpoints)) entwickelt worden. Ziel des aktuellen Projektes ist es, die Durchführbarkeit eines Screenings auf Basis der GIPFEL-Methode an Nabelschnurblutproben von Kindern zu erproben und eine Labor-übergreifende Standardisierung der Methode zu etablieren. Ein populationsbasiertes Screening soll im Hinblick auf die abzuschätzende Inzidenz prä-leukämischer Klone mit der Translokation ETV6-RUNX1 implementiert und mit Hilfe bestehender Krebsregister überprüft werden.

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

In einem ersten Bearbeitungsschritt soll der vorliegende Stand von Wissenschaft und Technik für die Zwecke des Vorhabens aufgearbeitet werden.

## 2.2 ETABLIERUNG DER GIPFEL-METHODIK AN NABELSCHNURBLUTPROBEN UND LABOR-ÜBERGREIFENDE STANDARDISIERUNG DER METHODIK

Die GIPFEL-Methode wurde an DNA-Proben etabliert, die aus Zellen des Knochenmarks von an Leukämie erkrankten Kindern bzw. aus Zellen des peripheren Blutes gesunder Spender isoliert wurden. Diese Methode soll auf kryokonserviertes Nabelschnurblut als Ausgangsmaterial übertragen werden. Der Nachweis der ETV6-RUNX1-Translokation soll an gesicherten ETV6-RUNX1-positiven Leukämieproben sowie an Negativproben (zum Ausschluss falsch-negativer und falsch-positiver Ergebnisse) etabliert und optimiert werden. Die Sensitivität des Nachweises soll experimentell abgeschätzt werden. Die Methodik soll in einer Weise standardisiert werden, die eine Übertragung auf andere Labore ermöglicht. Dies wird an einem Testset in dem kooperierenden unabhängigen Labor von Prof. Kjeld Schmiegelow (Abteilung für Kinder- und Jugendmedizin, Julian Marie Center, Rigshospitalet, Universitätskrankenhaus und Universität von Kopenhagen, Dänemark) überprüft werden.

## 2.3 SCREENING VON NABELSCHNURBLUTBANKPROBEN

Die GIPFEL-Methode zum Screening von humanen Nabelschnurblutproben von gesunden sowie im späteren Leben an Leukämie erkrankten Kindern soll an einer Kohorte aus  $\geq 1000$  Proben validiert werden. Die Validierung soll in enger Zusammenarbeit mit dem kooperierenden unabhängigen Labor von Prof. Dr. Kjeld Schmiegelow erfolgen und die Ergebnisse mit Hilfe des dänischen Krebsregisters überprüft werden.

## 3. METHODIK

Zur verlässlichen und hochsensitiven Detektion von niederfrequenten chromosomalen Translokationen in klinischen Proben wurde die GIPFEL-Methode entwickelt. Der Schlüsselschritt der Methode ist die Detektion eines, für jede Translokation charakteristischen, Ligationsproduktes, das nach Restriktionsspaltung und Religation von genomischer DNA entsteht und dessen Sequenz exakt und unabhängig von der genauen Lage des Bruchpunktes vorhergesagt werden kann. Damit werden kurze Amplikons möglich, die sich über SYBR-Green<sup>1)</sup>-basierte Methoden sehr genau quantifizieren lassen. Positive Ergebnisse können mittels Sanger-Sequenzierung validiert werden. Mittels dieser Methode kann sehr spezifisch eine präleukämische Zelle unter 10 000 normalen Zellen nachgewiesen werden, dies entspricht einer Sensitivität von  $10^{-4}$ . Die 100 %-ige Spezifität der Methode wird es ermöglichen, die in vorherigen Studien beschriebenen Inzidenzen der ETV6-RUNX1-Translokation in Nabelschnurblutproben von 1000 gesunden Neugeborenen zu bestätigen oder zu widerlegen.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 ETABLIERUNG DER GIPFEL-METHODIK AN NABELSCHNURBLUTPROBEN

In Abhängigkeit von der weiteren Verwendung werden Nabelschnurblutproben als vitale Zellen oder als nicht vitale Zellen kryokonserviert. Der Einfluss der Konservierungsmethode auf die Durchführbarkeit der GIPFEL-Methode wurde mit Hilfe der REH-Zelllinie, die positiv für die Translokation ETV6-RUNX1 ist, getestet. Gleiche Anzahlen dieser Zellen wurden nach üblichen Protokollen vital oder nicht-vital eingefroren. Die genomische DNA wurde extrahiert und die ETV6-RUNX1-Translokation mittels GIPFEL geprüft. Durch ein „Verdünnen“ von Translokationszellen mit nicht ETV6-RUNX1-positiven Zellen (HEK293-Zellen) wurde außerdem ein Einfluss der Konservierungsmethode auf die Sensitivität von GIPFEL überprüft. Zusätzlich wurde ein Testset von 300 kryokonservierten Nabelschnurblutproben mit der GIPFEL-Methode analysiert. Es wurde getestet, ob eine Anreicherung der gegebenenfalls Translokations-tragenden B-Zellen des Nabelschnurblutes mittels magnetischer Zellsortierung vor der Durchführung der GIPFEL-Methode deren Sensitivität erhöhen kann.

### 4.2 LABOR-ÜBERGREIFENDE STANDARDISIERUNG DER METHODIK

Zur Labor-übergreifenden Standardisierung der GIPFEL-Technik wurde eine Mitarbeiterin des Labors von Prof. Dr. Kjeld Schmiegelow in der Klinik für Kinderonkologie, Hämatologie und Klinische Immunologie (Medizinische Fakultät der Heinrich-Heine-Universität, Düsseldorf) in der GIPFEL-Methode geschult. Die Methode wurde so standardisiert, dass eine Übertragung auf andere Labore möglich ist. Dazu wurde das Protokoll

<sup>1)</sup> ein asymmetrischer Cyanin-Farbstoff zum Nachweis doppelsträngiger DNA

an verschiedenen, vergleichbaren Geräten getestet und die Parameter so formuliert, dass sie auf andere Plattformen übertragbar sind.

## **5. ERGEBNISSE**

### **5.1 ÜBERTRAGUNG DER GIPFEL-METHODE AUF KRYOKONSERVIERTES NABELSCHNUR-BLUT ALS AUSGANGSMATERIAL**

Die GIPFEL-Methode ließ sich auf Nabelschnurblut als Ausgangsmaterial übertragen. Die Methode der Konservierung des biologischen Materials sowie die Anreicherung von B-Zellen hatten keinen Einfluss auf die Sensitivität der Methode. Die erreichte Sensitivität des Nachweises von  $10^{-4}$  war vergleichbar mit der bisher an Leukämieproben und -zelllinien erzielten. Es wurden keine falsch-positiven Signale detektiert, daher war auch die Spezifität vergleichbar.

### **5.2 LABOR-ÜBERGREIFENDE STANDARDISIERUNG DER METHODIK**

Die GIPFEL-Methode wurde in dem unabhängigen Labor von Prof. Kjeld Schmiegelow an DNA der ETV6-RUNX1-positiven REH-Zelllinie sowie an DNA aus Nabelschnurblutproben „blind“ getestet. Es konnten GIPFEL-Ergebnisse unabhängig von der Laborplattform verlässlich reproduziert werden.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Die GIPFEL-Methode wurde in diesem Projekt an 300 humanen Nabelschnurblutproben validiert. Als Weiterarbeit ist geplant, diese Untersuchungen in enger Zusammenarbeit mit dem Labor von Prof. Dr. Kjeld Schmiegelow auf  $\geq 1000$  Nabelschnurblutproben von gesunden sowie im späteren Leben an Leukämie erkrankten Kindern auszudehnen und die Ergebnisse mit Hilfe des dänischen Krebsregisters zu überprüfen.

|                                                                                                                                                                                     |                                                  |                                                                 |                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Thema</b><br>Machbarkeitsstudie zum Aufbau einer Geburtskohorte und zur Überprüfung genetischer Prädisposition bei kindlichen Leukämien - Verbesserung der Teilnahmebereitschaft |                                                  |                                                                 |                                      |
| <b>Subject</b><br><i>Feasibility study for establishing a birth cohort and for testing genetic predisposition to childhood leukaemia</i>                                            |                                                  |                                                                 |                                      |
| <b>Kennzeichen</b><br>3614S30035                                                                                                                                                    | <b>Beginn</b><br>01.07.2015                      | <b>Ende</b><br>30.09.2016                                       | <b>Fördermittel</b><br>EUR 213.197,- |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Leibniz-Institut für Präventionsforschung und Epidemiologie - BIPS GmbH<br><b>Unterauftragnehmer / Kooperation:</b><br>Universität Bielefeld  |                                                  |                                                                 |                                      |
| <b>Projektleitung</b><br>Prof. Dr. H. Zeeb                                                                                                                                          | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. A. Dehos / AG-SG | <b>verantwortlich für den Text</b><br>S. A. Ernst, Dr. T. Brand |                                      |

## 1. ZIELSETZUNG

In der ersten Machbarkeitsstudie zu dieser Fragestellung wurde die grundsätzliche Durchführbarkeit einer Geburtskohorte in Deutschland festgestellt.

Wesentliche Ziele dieser Folgestudie sind:

- Erforschung der Akzeptanz, der Einstellungen und des Informed Consent Process in Bezug auf die Teilnahmebereitschaft an Geburtskohorten in verschiedenen Bevölkerungsgruppen (d. h. sozial benachteiligte Gruppen, Familien mit Migrationshintergrund), insbesondere in Bezug auf die Entnahme von biologischen Proben
- Untersuchung von Maßnahmen, welche die Teilnahmebereitschaft in den genannten Bevölkerungsgruppen erhöhen
- Planung und Durchführung einer Basiserhebung mit Einbindung von sozial benachteiligten Eltern-Kind-Paaren und Eltern-Kind-Paaren mit Migrationshintergrund.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Es wurden 5 Einzelziele definiert:

- Erhebung der möglichen Gründe für die (Nicht-) Teilnahme an einer Geburtskohorte mit Gewinnung von Nabelschnurblut
- Planung der Instrumente für eine gezielte Ansprache verschiedener ethnischer und sozialer Gruppierungen
- Übersetzung der Befragungsinstrumente in relevante Fremdsprachen
- Datenerhebung
- Datenanalyse und Erarbeitung von Empfehlungen für die gezielte Rekrutierung von Frauen aus verschiedenen ethnischen und sozialen Gruppen im Rahmen einer deutschen Geburtskohorte.

## 3. METHODIK

Zunächst wurde der relevante aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik aufgearbeitet sowie mögliche Gründe und Anreize für eine (Nicht-) Teilnahme an Geburtskohortenstudien erhoben.

- Systematische Literaturrecherche zu Anreizen und Gründen für eine (Nicht-) Teilnahme an Geburtskohortenstudien und zur Bereitschaft zur Abgabe von biologischen Proben (z. B. Nabelschnurblut) zu Forschungszwecken insbesondere in Bezug auf die Teilnahmebereitschaft in verschiedenen Bevölkerungsgruppen. Die Studienauswahl wurde limitiert auf deutsch- oder englischsprachige Publikationen und auf einen Publikationszeitraum, der die letzten zehn Jahre umfasst.

- Entwicklung eines Kurzfragebogens für Studienleiterinnen und Studienleiter anderer Geburtskohortenstudien in Deutschland zu spezifischen Erfahrungen in der Rekrutierung, insbesondere in Bezug auf die genannten Subgruppen
- Durchführung von Fokusgruppendifkussionen sowie Einzelinterviews mit
  - an der Rekrutierung beteiligten Personen (d. h. Projektmitarbeiterinnen der BaBi<sup>1)</sup>-Studie in Bielefeld sowie der vorangegangenen beiden Machbarkeitsstudien)
  - potenziellen Studienteilnehmerinnen der BaBi-Studie in Bielefeld (Zielpopulation)
  - Leistungsanbietern im Gesundheitswesen (z. B. Ärztinnen und Ärzte, Hebammen, Pflegepersonal)
- Auswertung der Kurzfragebögen für Nicht-Teilnehmerinnen aus LeuBiCo<sup>2)</sup> I und II (Non-Responder).

Außerdem wurde ein Ergänzungsantrag zum bestehenden Ethikantrag bei der Ethikkommission der Ärztekammer in Bremen gestellt sowie ein Datenschutzkonzept entwickelt.

Nachfolgend wurden Voraussetzungen für die Rekrutierung von werdenden Müttern, die Datenerhebung und -haltung geschaffen. Bestehende Instrumente aus den vorangegangenen Machbarkeitsstudien wurden in Kooperation mit Projektmitarbeiterinnen der Bielefelder BaBi-Studie weiterentwickelt (z. B. Fragebogen, Anschreiben, Website) und hinsichtlich einer kultursensiblen Ausrichtung überprüft. Parallel hierzu wurden die Kontakte zum Klinikpersonal wieder intensiviert und Kontakt zu niedergelassenen Gynäkologinnen und Gynäkologen sowie Hebammen aufgebaut, um die Ansprache von potenziellen Studienteilnehmerinnen vorzubereiten. Außerdem wurden für die kultursensible Rekrutierung über Angebote für Schwangere (z. B. Geburtsvorbereitungskurse) Community Researcher für die Ansprache von werdenden Eltern in die Studie eingebunden und geschult.

Durch die Kooperationspartner an der Uni Bielefeld wurde auf Basis der Erfahrungen aus der BaBi-Studie ein Expertenbericht zur Entwicklung der zielgruppensensiblen Studienunterlagen erstellt. Inhalte des Berichtes umfassen u. a. das Rekrutierungsvorgehen in der BaBi-Studie sowie die Entwicklung von zielgruppenspezifischen Studienmaterialien für Familien mit Migrationshintergrund.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Es wurden zwei Wege der Rekrutierung für die Einbindung werdender Eltern oder Mütter erarbeitet. Zum einen erfolgt die Rekrutierung von werdenden Eltern bzw. Müttern über Angebote für Schwangere, wie beispielsweise Geburtsvorbereitungskurse und Hebammensprechstunden. Die Ansprache und Information übernehmen geschulte Projektmitarbeiterinnen (Community Researcher). Zum anderen sprechen verschiedene Praxispartnerinnen und Praxispartner (Hebammen und niedergelassene Gynäkologinnen und Gynäkologen), die für die Unterstützung bei der Rekrutierung gewonnen werden konnten, potenzielle Studienteilnehmerinnen an und informieren über eine mögliche Studienteilnahme.

## 5. ERGEBNISSE

Die wesentlichen Voraussetzungen für die Datenerhebung wurden geschaffen. Die zu Beginn erarbeiteten Grundlagen wurden und werden insbesondere bei der Planung für die Erstellung der Erhebungsinstrumente (z. B. Informationsmaterialien) sowie der Rekrutierung von verschiedenen Bevölkerungsgruppen im Rahmen der Machbarkeitsstudie beachtet. Laut Ethikkommission der Ärztekammer Bremen sowie des betrieblichen Datenschutzbeauftragten des BIPS bestehen keine ethischen bzw. datenschutzrechtlichen Einwände gegen die Weiterführung eines solchen Projektes. Das Votum der Ärztekammer vom 08. August 2012 behält seine Gültigkeit.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Derzeit werden alle benötigten Instrumente durch ein entsprechendes Übersetzungsbüro in verschiedene Sprachen übersetzt. Die benötigten Instrumente umfassen: Anschreiben und Informationsmaterial (per E-Mail & postalisch, Studieninformation, Studienflyer), Fragebogen - webbasierte Version & Papierversion, mehrsprachige Einverständniserklärung zur Kontaktaufnahme, Einverständniserklärung zur Studienteilnahme so-

<sup>1)</sup> Gesundheit von Babys und Kindern in Bielefeld

<sup>2)</sup> Befragung von werdenden Eltern zu Lebensgewohnheiten und Gesundheit

wie Texte der Studien-Website. Die Phase der Datenerhebung wird ab Ende März/Anfang April 2016 durchgeführt. Die Datenanalyse und die Erarbeitung von Empfehlungen werden gemeinsam von den an der Machbarkeitsstudie beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, den Kooperationspartnern an der Uni Bielefeld, den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aus dem Feldarbeitsteam sowie weiteren Beteiligten und auf Basis der praktischen Erfahrungen vorgenommen. Die Ergebnisse und Erfahrungen aus den Rekrutierungen werden unter Einbeziehung der vorausgegangenen Rekrutierungen analysiert. Wesentliche Kriterien sind die Akzeptanz bei den Müttern und die Verlässlichkeit und Verwertbarkeit der erzielten Befragungsergebnisse für die Fragestellung der geplanten Geburtskohorte sowie der zeitliche und finanzielle Aufwand für die Rekrutierung und die notwendigen Follow-Up Erhebungen. Die Empfehlungen betreffen u. a. folgende Punkte:

- Empfehlungen für die gezielte Rekrutierung der verschiedenen ethnischen und sozialen Gruppen, einschließlich Aussagen zur Auswahl geeigneter Instrumente
- Überlegungen zu der Frage, wie groß die Anzahl bzw. der prozentuale Anteil der jeweiligen Gruppe bei der geplanten Geburtskohorte mindestens sein muss, um belastbare Aussagen machen zu können
- Überlegungen zu geeigneten „Belohnungsinstrumenten“ für verschiedene Beteiligengruppen
- zeitlicher und finanzieller Aufwand für die gezielte Rekrutierung schwierig zu erreichender Frauen.

Bei der Erarbeitung der Empfehlungen werden das Studienteam in Bremen sowie das Bielefelder Team der BaBi-Studie eng kooperieren und die Ergebnisse und Erfahrungen aus den zwei Studienorten für den Bericht nutzen.



**Themenbereich 04**

**Medizinische Strahlenexposition / Röntgenverordnung**

***Subject area 04***

***Medical radiation exposures / X-ray Ordinance***

|                                                                                                   |                                                 |                                                                  |                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Thema</b><br>Erfassung der Häufigkeit bildgebender Diagnostik im stationären Bereich           |                                                 |                                                                  |                                      |
| <b>Subject</b><br><i>Assessment of the frequency of diagnostic imaging in the hospital sector</i> |                                                 |                                                                  |                                      |
| <b>Kennzeichen</b><br>3613S20020                                                                  | <b>Beginn</b><br>01.04.2014                     | <b>Ende</b><br>31.12.2015                                        | <b>Fördermittel</b><br>EUR 335.735,- |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Deutsches Krankenhausinstitut e.V., Düsseldorf              |                                                 |                                                                  |                                      |
| <b>Projektleitung</b><br>Dr. M. Offermanns                                                        | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>C. Hahn / AG-SG 2.1 | <b>verantwortlich für den Text</b><br>Dr. M. Offermanns, C. Hahn |                                      |

## 1. ZIELSETZUNG

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, aktuelle Daten über die Häufigkeit bildgebender Untersuchungsverfahren im stationären Bereich in Abhängigkeit von der Untersuchungsregion und dem Alter der Patienten zum Zeitpunkt der Untersuchung sowie deren Geschlecht und möglichst auch deren Versicherungsstatus zu erheben.

Im Hinblick auf eine regelmäßige Übermittlung an das Bundesamt für Strahlenschutz ist die Extraktion der Daten aus bestehenden Datenbeständen zu prüfen und nach Möglichkeit dauerhaft zu etablieren.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Die im Folgenden aufgeführten Einzelzielsetzungen orientieren sich an den definierten Arbeitspaketen der Ausschreibung.

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

Zwischen den Ergebnissen der Vorgängerstudie<sup>1)</sup> und den Ergebnissen der Krankenhausstatistik<sup>2)</sup> bestehen erhebliche Abweichungen.

In einem ersten Bearbeitungsschritt geht es um die Feststellung, durch wen Operationscodes in den Krankenhäusern erfasst werden und ob es dabei zu einer Falscherfassung kommen kann. Im nächsten Schritt ist zu prüfen, ob Erhebung und Methodik der Krankenhausstatistik sowie die dort verwendete Datengrundlage einen Vergleich der beiden Auswertungen überhaupt zulassen.

### 2.2 ENTWICKLUNG MÖGLICHER METHODEN UND LÖSUNGSWEGE

Bei dieser Einzelzielsetzung geht es um die Ermittlung möglicher Methoden und Lösungswege der Datenlieferung der Krankenhäuser. Die Rahmenbedingungen sind, dass das Krankenhauspersonal durch die Datenlieferung möglichst wenig belastet sein soll und die Datenquelle möglichst vollständige Datensätze enthalten soll.

Zu klären ist, ob die in den Krankenhäusern vorhandenen EDV-Systeme zur Dokumentation radiologischer Daten im Hinblick auf Datenqualität und Datenverfügbarkeit geeignet sind, die erforderlichen Daten bereitzustellen.

### 2.3 AUSWERTUNGEN

Zielsetzung ist, dem Bundesamt für Strahlenschutz für Gesamtdeutschland repräsentative Daten über die Häufigkeit der bildgebenden Diagnostik zur Verfügung zu stellen.

<sup>1)</sup> Offermanns M, Müller U. Erfassung der Häufigkeit bildgebender Diagnostik, insbesondere strahlendiagnostischer Maßnahmen und der Altersverteilung der Patienten. BMU-2005-660, <http://www.bmu.de/N35717/>

<sup>2)</sup> Statistisches Bundesamt. Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG-Statistik) - Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten der Krankenhäuser (4-Steller). Fachserie 12 Reihe 6.4, <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Gesundheit/Krankenhaeuser/FallpauschalenKrankenhaus.html>

## 2.4 KONZEPTION EINES REGELMÄßIGEN DATENTRANSFERS

Auf Basis der vorherigen Arbeitsschritte ist ein Konzept zur Automatisierung der Datenextraktion und zur regelmäßigen Datenlieferung zu erstellen und mit dem Auftraggeber abzustimmen.

## 2.5 IMPLEMENTIERUNG DES REGELMÄßIGEN DATENTRANSFERS

Das abgestimmte Konzept ist zu implementieren und zu testen. Ergibt sich kein durchführbares Konzept, entfällt dieses Arbeitspaket.

## 3. METHODIK

Für das Projekt wurden verschiedene methodische Ansätze verwendet.

Für die „Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik“ erfolgte eine Literaturanalyse und Auswertung vorhandener Datenquellen.

Zur „Entwicklung möglicher Methoden und Lösungswege“ wurden Expertenworkshops, Repräsentativerhebungen und Sekundärdatenanalysen vorgenommen.

Bei der Einzelzielsetzung „Auswertungen“ wurden die erfassten empirischen Daten geprüft, zusammengefasst und z. T. hochgerechnet.

Für die „Konzeption eines regelmäßigen Datentransfers“ wurde eine gesonderte Erhebung bei Allgemeinkrankenhäusern durchgeführt.

## 4. DURCHFÜHRUNG

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

Zur Dokumentation, wie und durch wen Operationscodes in den Krankenhäusern erfasst werden, wurde eine händische Literaturrecherche in den einschlägigen Fachzeitschriften für den Zeitraum 2004 bis 2014 durchgeführt. Zu klären war, ob es dabei zu einer Falscherfassung kommen kann.

Für die Prüfung der Vergleichbarkeit von Krankenhausstatistik und Vorgängervorhaben wurden die methodischen Grundlagen der Krankenhausstatistik analysiert und mit der Methodik der Vorgängerstudie verglichen. Dazu wurden zunächst die beiden relevanten Kodierungssysteme, die „Gebührenordnung für Ärzte“ (GOÄ) und der „Operationen- und Prozedurenschlüssel“ (OPS), beschrieben. Daran schloss sich eine Gegenüberstellung der den beiden Auswertungen zu Grunde liegenden Datenquellen anhand der GOÄ-Ziffern bzw. der OPS-Codes an. Abschließend erfolgte eine Diskussion über die Vor- und Nachteile beider Systeme.

### 4.2 ENTWICKLUNG MÖGLICHER METHODEN UND LÖSUNGSWEGE

Zur Klärung der Datennutzbarkeit wurden Expertenbefragungen im Rahmen von zwei Workshops, zum einen für radiologisch tätige Krankenhausärzte, zum anderen für die IT-Verantwortlichen von Krankenhäusern, durchgeführt. Gegenstand beider Workshops waren die in den Krankenhäusern eingesetzten Radiologie-Informationssysteme (RIS).

Ausgehend von den Ergebnissen der Workshops wurden für die Erfassung der Daten der bildgebenden Diagnostik unterschiedliche Wege beschritten:

- Für die Allgemeinkrankenhäuser wurde auf Operationen und Prozeduren der fallpauschalenbezogenen Krankenhausstatistik zurückgegriffen. Diese Daten können auf der Website des Statistischen Bundesamtes kostenlos heruntergeladen werden. Darin nicht (vollständig) erfasst werden Leistungen des konventionellen Röntgens.
- Für die konventionelle Radiologie in den Allgemeinkrankenhäusern wurde auf die Daten aus dem sog. Kalkulationsverfahren<sup>1)</sup> zurückgegriffen. Insgesamt haben 26 Krankenhäuser sehr differenzierte Daten zur Verfügung gestellt.
- Für die Psychiatrischen Fachkrankenhäuser und die Rehabilitationskliniken liegen keine vergleichbaren

<sup>1)</sup> Die jährliche Pflege und Weiterentwicklung des zur Leistungsabrechnung stationärer Krankenhausleistungen verwendeten Fallpauschalen-Systems (German Diagnosis Related Groups, kurz G-DRG-System) basiert auf den Kosten- und Leistungsdaten einer Stichprobe deutscher Krankenhäuser. Im Rahmen des Kalkulationsverfahrens werden einzelfallbezogene Daten der Radiologie auf der Basis von GOÄ-Ziffern und OPS-Codes erfasst.

Datenquellen vor. Hier wurde eine schriftliche Befragung durchgeführt, die die Leistungsmengen - unterteilt nach GOÄ-Ziffern - zum Inhalt hatte.

### 4.3 AUSWERTUNGEN

Für die Allgemeinkrankenhäuser wurden die Daten aus der Vollerhebung des Statistischen Bundesamtes in den Bericht übernommen. Die Angaben der 26 Kalkulationskrankenhäuser wurden hochgerechnet und gewichtet, so dass geschlechts- und altersgruppenbezogene Daten vorliegen. Zur Validierung wurden die Ergebnisse der Hochrechnung mit den Ergebnissen der Krankenhausstatistik für die Bereiche, für die Informationen in beiden Datenquellen vorliegen, verglichen.

Für die Psychiatrischen Fachkrankenhäuser wurde eine Hochrechnung der Erhebungsdaten vorgenommen. Um eine nach Alter- und Geschlecht differenzierte Erfassung vornehmen zu können, wurde die Verteilung nach Alter und Geschlecht der Allgemeinkrankenhäuser zu Grunde gelegt.

Die Ergebnisse der Rehabilitationskliniken wurden ebenfalls hochgerechnet. Eine patientenbezogene Auswertung war vorgesehen. Aber lediglich 13 Einrichtungen wollten sich daran beteiligen. Das waren zu wenige Häuser, um damit Aussagen über die altersgruppen- und geschlechtsspezifische Verteilung der bildgebenden Diagnostik zu treffen. Hilfsweise wurde daher die Verteilung nach Altersgruppen und Geschlecht herangezogen, wie sie sich aus der Vorgängerstudie für das Jahr 2002 ergab.

### 4.4 KONZEPTION EINES REGELMÄßIGEN DATENTRANSFERS

Auf Basis der vorherigen Arbeitsschritte wurde geprüft, inwieweit eine Automatisierung der Datenextraktion zur regelmäßigen Datenlieferung an das Bundesamt für Strahlenschutz möglich ist. Die Kalkulationskrankenhäuser wurden hinsichtlich ihrer Teilnahme am Kalkulationsverfahren und ihrer Bereitschaft, dem Bundesamt für Strahlenschutz Daten zu liefern, befragt.

Eine automatisierte Softwarelösung war zum jetzigen Zeitpunkt nicht umsetzbar. Stattdessen wurden alternative Vorschläge für regelmäßige Aktualisierungen entwickelt.

### 4.5 IMPLEMENTIERUNG DES REGELMÄßIGEN DATENTRANSFERS

Eine Implementierung des regelmäßigen Datentransfers wurde nicht durchgeführt, da AP 4 kein durchführbares Konzept im Sinne der Leistungsbeschreibung ergab.

## 5. ERGEBNISSE

In der fallpauschalenbezogenen Krankenhausstatistik sind die Leistungen des konventionellen Röntgens nur in geringem Umfang erfasst, da sich der Aufwand für diese Leistungen normalerweise in der Diagnose oder in den anderen angewendeten Prozeduren widerspiegelt und daher gemäß den Deutschen Codier-Richtlinien nicht als OPS-Code verschlüsselt wird. Für die vollständig erfassten Bereiche stellt die Krankenhausstatistik jedoch eine Vollerhebung dar und ist einer Repräsentativerhebung mit anschließender Hochrechnung in jedem Fall vorzuziehen.

Für den Bereich der konventionellen Röntgendiagnostik wurde in den durchgeführten Workshops deutlich, dass die Daten der Radiologie-Informationssysteme routinemäßig nicht nutzbar sind. Stattdessen konnte auf die Daten der Kalkulationskrankenhäuser zurückgegriffen werden. Die Kalkulationsdaten sind fallbezogen und sehr differenziert. Die Erfassung der Leistungsdaten erfolgt nach einem einheitlichen Schema und garantiert so die Vergleichbarkeit der Daten. Die in den Kalkulationsdaten erfassten GOÄ-Ziffern sind geeignet, die in der Krankenhausstatistik fehlenden Bereiche zu ergänzen. Allerdings ist die Aufschlüsselung der GOÄ-Ziffern nach anatomischen Gesichtspunkten in vielen Fällen nicht oder nur unter Zuhilfenahme von Annahmen und Modellen möglich. Durch die Kombination von GOÄ-Ziffern und OPS-Codes mit ihren unterschiedlichen Systematiken ist eine tiefgegliederte Auswertung der Leistungszahlen nicht sinnvoll.

Auf dieser Basis wurden die Leistungen der bildgebenden Diagnostik in den stationären Einrichtungen für das Jahr 2012 ermittelt. Dabei zeigten sich zum Teil, insbesondere bei den Angiographien, erhebliche Differenzen zwischen Kalkulationsdaten (GOÄ-Ziffern) und Krankenhausstatistik (OPS-Codes). Die Ursache für die Abweichungen konnte noch nicht abschließend geklärt werden.

Tabelle 1 enthält zusammengefasst die vorläufigen Ergebnisse.

**Tabelle 1: Hochgerechnete Leistungen der bildgebenden Diagnostik**

| <b>Bildgebende Diagnostik</b> | <b>Allgemein-<br/>krankenhäuser</b> | <b>Psychiatrische<br/>Krankenhäuser</b> | <b>Rehaeinrich-<br/>tungen</b> | <b>insgesamt</b>  |
|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| Konventionelles Röntgen       | 23 452 690                          | 288 496                                 | 343 436                        | <b>24 084 622</b> |
| Computertomographie           | 4 709 274                           | 65 257                                  | 28 948                         | <b>4 803 479</b>  |
| Magnetresonanztomographie     | 1 696 235                           | 65 564                                  | 1 815                          | <b>1 763 614</b>  |
| Ultraschall                   | 758 161                             | 27 174                                  | 693 356                        | <b>1 478 691</b>  |
| <b>insgesamt</b>              | <b>30 616 360</b>                   | <b>446 491</b>                          | <b>1 067 555</b>               | <b>32 130 406</b> |

Im Bericht werden die Leistungen nach Alter, Geschlecht und GOÄ-Ziffern bzw., falls vorhanden, OPS-Codes differenziert dargestellt.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Leistungsdaten sollen die Grundlage zur Ermittlung von Häufigkeit und Dosis im stationären Bereich darstellen. Daher ist die Ursache für die gefundenen Abweichungen zu klären und, soweit möglich, zu beheben.

Grundsätzlich muss sowohl für die Abrechnungsdaten (OPS) wie auch für die Kalkulationsdaten (GOÄ) auf Grund ihrer Zweckbestimmung eine hohe Verlässlichkeit angenommen werden. Eine systematische Falscherfassung in den Krankenhäusern ist daher unwahrscheinlich, kann aber nicht ganz ausgeschlossen werden. Eine Validierung der beiden Datenquellen auf Einrichtungsebene könnte diese Frage klären.

Möglicherweise beruhen die Abweichungen auf Mängeln in der Stichprobenerhebung. Zur Klärung dieser Frage ist die Stichprobe auf Repräsentativität hinsichtlich weiterer Merkmale (z. B. Krankheitsspektrum, regionale Verteilung, Stichprobengröße) zu untersuchen.

Soweit möglich, ist der Bericht zu korrigieren. Davon abhängig ist über die weitere Vorgehensweise zum regelmäßigen Datentransfer zu entscheiden.

Bei den Psychiatrischen Fachkliniken sowie den Vorsorge- und Rehabilitationseinrichtungen wird im 1. Quartal eine Stichprobenerhebung durchgeführt. Ziel dieser Erhebung ist die Ermittlung der bildgebenden Diagnostik in diesen Einrichtungen.

**Thema**

Evaluation der Brustkrebsmortalität im deutschen Mammographie-Screening-Programm - Machbarkeitsstudie II

**Subject**

*Evaluation of the breast cancer mortality in the German mammography-screening-program - Feasibility study II*

**Kennzeichen**  
3614S40002

**Beginn**  
01.01.2015

**Ende**  
30.06.2016

**Fördermittel**  
EUR 413.755,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Institut für Epidemiologie und Sozialmedizin, Bereich Klinische Epidemiologie

**Projektleitung**  
Prof. H.W. Hense

**Fachbetreuung BfS**  
Prof. G. Brix / SG 2

**verantwortlich für den Text**  
Prof. H.W. Hense, Dr. A. Fuhs

## 1. ZIELSETZUNG

Ziel der Gesamtstudie ist es, den Einfluss des deutschen Mammographie-Screening-Programms (MSP) auf die Brustkrebsmortalität zu evaluieren. Die Machbarkeitsstudie I prüfte, ob die Zusammenführung von an verschiedenen Stellen vorliegenden Informationen aus dem Gesundheitssystem für eine Evaluation der Brustkrebsmortalität im deutschen MSP umsetzbar ist, um ausgewählte Daten in einer Datenzusammenführenden Stelle (DZS) zu verknüpfen und anonymisiert an eine beim BfS angesiedelte Evaluierende Stelle (ES) weiterzuleiten. Bei der Prüfung der Umsetzbarkeit ergaben sich in der Machbarkeitsstudie I in den vorgeschlagenen Studienarmen in verschiedenen Modellregionen neue, wesentliche Fragestellungen, die vor Beginn einer Hauptstudie innerhalb der Machbarkeitsstudie II zu beantworten sind.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Der Schwerpunkt liegt in der Machbarkeitsstudie II

- auf der Einbindung klinischer Daten sowie
- der Identifizierung und Berücksichtigung von Störfaktoren.

## 3. METHODIK

siehe oben Das Forschungsvorhaben wurde an einen Generalunternehmer (GU) vergeben, der seinerseits vier fachlich ausgewiesene Unterauftragnehmer (UA) verpflichtete:

- Der GU sichert über das Projektmanagement einen abgestimmten, konsistenten und koordinierten Ablauf des Vorhabens. Regelmäßige Telefonkonferenzen und Arbeitstreffen werden abgehalten und Berichte erstellt. Es wird die aktuelle Literatur zu Ergebnissen und Entwicklungen im Hinblick auf die Brustkrebsmortalität in bevölkerungsweiten Mammographie-Screening-Programmen regelmäßig gesichtet und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.  
In einer eigenen, unabhängigen Neuanalyse (Konfirmationsstudie) überprüft der GU in Zusammenarbeit mit dem Epidemiologischen Krebsregister (EKR) NRW auf Basis der Daten der gesamten NRW-Zielbevölkerung die Resultate der aus den Daten der Gesetzlichen Krankenversicherungen (GKV) erhaltenen Ergebnisse der Machbarkeitsstudie I. In den GKV-Daten war unter den Teilnehmerinnen schon kurz nach dem Mammographie-Screening eine erheblich geringere Gesamtmortalität festgestellt worden als bei den Nichtteilnehmerinnen, die nicht plausibel auf Screeningeffekte zurückgeführt werden kann (so genannter Selektionsbias).  
Darüber hinaus wird der GU sich mit der Ermittlung, Erstellung und Analyse eines Korrekturfaktors zur Ausbalancierung dieses Bias beschäftigen; dazu bereits in der Literatur verfügbare Ansätze müssen auf die Situation in Deutschland angepasst werden.
- Für das in der Machbarkeitsstudie II vom EKR NRW weiterentwickelte Datenschutzkonzept der Hauptstudie („Modell EKR NRW“) soll ein abschließendes positives Votum erzielt werden. Für die Aufgaben der

DZS und des zwischengeschalteten Pseudonymisierungsdienstes sollen geeignete Institutionen gefunden und die hierfür notwendigen Infrastrukturen geschaffen werden. Diese Aufgaben sind an einen 6-monatigen Haltepunkt im Gesamtvorhaben gebunden.

Innerhalb der technischen Umsetzung des Konzeptes soll das Modell neben Daten aus dem MSP, dem EKR NRW und der Kassenärztlichen Vereinigungen auf Daten der GKV ausgedehnt werden. Um zu verhindern, dass bis zum Beginn der Hauptstudie Daten verloren gehen, soll in der Machbarkeitsstudie II ein Vorgehen zur Datenerhaltung der Daten der Kassenärztlichen Vereinigungen in NRW abgestimmt werden. Parallel erfolgt die Fortsetzung und Testung der Entwicklung der Softwaremodule.

- Die Unterauftragnehmer Leibniz-Institut für Präventionsforschung und Epidemiologie - BIPS GmbH und das Forschungszentrum Ungleichheit und Sozialpolitik (SOCIUM, ehemals Zentrum für Sozialpolitik (ZeS)) der Universität Bremen erweitern den Ansatz „Modell GKV-Datennutzung“, der primär auf den Leistungs- und Diagnosedaten der GKV basiert, um weitere Datenjahre beteiligter Kassen und um die Einbindung der Daten einer neuen Krankenkasse.  
Zur Validierung der Resultate für die Gesamtmortalität sowie einzelner Todesursachen und zur Optimierung eines bereits entwickelten Algorithmus für die Todesursache Brustkrebs, soll eine Anreicherung der GKV-Daten für NRW mit Angaben zur Todesursache aus den Daten des EKR NRW erfolgen (Validierungsstudie).
- Klinische Daten sollen durch den Unterauftragnehmer Arbeitsgemeinschaft Deutscher Tumorzentren (ADT) in die Machbarkeitsstudie II für eine Begleitstudie integriert werden. Es ist vom Unterauftragnehmer ein Konzept zur datenschutzgerechten Übermittlung, Zusammenführung, Aufbereitung und Bereitstellung der zur Evaluation notwendigen Datensätze zu entwickeln. Eine prototypische Implementierung des Verfahrens soll an einem Register umgesetzt werden. Die im Datenschutz- und Datenflusskonzept beschriebenen Verfahren sollen dann in weiteren Klinischen Registern getestet werden.
- Nach 12 Monaten Laufzeit soll von allen Unterauftragnehmern ein vorläufiger Ergebnisbericht einschließlich eines Durchführungskonzepts erstellt werden, der Grundlage für die anschließende Hauptstudie sein soll. Zu Projektende wird von allen Kooperationspartnern ein Abschlussbericht erstellt.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Der GU koordiniert und steuert das Gesamtprojekt. Zu Beginn der Machbarkeitsstudie II fand in Münster ein Workshop mit geladenen Referenten zu den Themen Propensity Score, Komorbiditätsindizes und Korrekturfaktoren statt. Weitere Arbeitstreffen in Münster und Bremen widmeten sich offenen Fragen und der Diskussion von vorläufigen Ergebnissen und weiteren Arbeitsschritten zum Teilnahmebias. Darüber hinaus entwickelt der GU eigene Verfahren für einen im deutschen MSP nutzbaren Korrekturfaktor.

Im „Modell EKR NRW“ wurde das Datenschutzkonzept für die Hauptstudie fertiggestellt und zur abschließenden Prüfung der Bundesbeauftragten für den Datenschutz und die Informationsfreiheit (BfDI) und dem BfS vorgelegt. Außerdem lagen Letters of Intent von Institutionen vor, die sich bereit erklärten, den Betrieb des PSD und der DZS zu übernehmen.

Das Konzept zur Erhaltung der Daten bei den Kassenärztlichen Vereinigungen wurde entwickelt und getestet; die sich dabei ergebenden Probleme, die primär mit der Qualität der Adressdaten verbunden waren, wurden weitgehend gelöst.

Die Softwareentwicklungen für das Meldetool (SecuNym-RT), die DZS (SecuNym-DCC) und den PSD (SecuNym-PSS) haben sich nach Plan entwickelt. Die Datenabgleiche zur Validierungsstudie und die Konfirmationsstudie laufen wie geplant.

Im „GKV-Modell“ haben die bereits kooperierenden Kassen Daten aus weiteren Datenjahren (2012, 2013) bereitgestellt. Die AOK-Niedersachsen wurde als neue einzubeziehende Kasse mit in das Modell einbezogen.

Ein Konzept zum Datenfluss und Datenschutz zwischen BIPS, Kassen, Vertrauensstelle und EKR-NRW für die Validierungsstudie wurde in Abstimmung mit den Kassen und Behörden erstellt.

Die Programmierungen von Indizes (nach Charlson, Elixhauser und eigener Index) zur Adjustierung der Komorbidität zum Zeitpunkt der Teilnahmeentscheidung sind abgeschlossen. Die Arbeiten zum konventionellen Propensity Score-Verfahren wurden weiter verfeinert und validiert, wobei BIPS und SOCIUM in Absprache unterschiedliche Ansätze verfolgten. Ein high-dimensional Propensity Score-Verfahren (HDPS), das mehrere Hundert Variablen einzubeziehen vermag, wurde auf der Basis von Teilpopulation von Versicherten der BarmerGEK (SOCIUM) durchgeführt.

Auf Grund fehlender rechtlicher Grundlage war der notwendige Abgleich von Daten eines Klinischen Krebsregisters mit Daten aus dem Mammographie-Screening-Programm bisher nicht möglich. Hierfür ist die Umsetzung des Krebsfrüherkennungs- und -registergesetzes (KFRG) abzuwarten. Sobald für ein etabliertes Klinisches Krebsregister die rechtliche Grundlage geschaffen ist, kann das entwickelte Datenschutzkonzept der ADT fertiggestellt und einer datenschutzrechtlichen Überprüfung unterzogen werden. Das Datenschutzkonzept wurde der BfDI zur technischen Vorprüfung zugeleitet.

## 5. ERGEBNISSE

Die vom GU koordinierte Konfirmationsstudie bestätigte die Existenz eines ausgeprägten Teilnahmebias auch auf der Grundlage bevölkerungsbasierter Daten aus NRW.

Verfahren zu Korrekturfaktoren wurden nach Weiterentwicklung der traditionellen Ansätze mit inzidenz-basierten Mortalitätsraten für Brustkrebs entwickelt.

Das vom „Modell EKR NRW“ entwickelte Datenschutzkonzept für die Hauptstudie wurde durch die BfDI und BSI abschließend geprüft und aus datenschutzrechtlicher Sicht als hinreichend bewertet.

Die Verortung von DZS (Zentrum für Telematik und Telemedizin GmbH) und PSD ist fristgerecht erfolgt. Der Haltepunkt nach sechs Monaten wurde durch das BfS freigegeben. Die Softwareentwicklungen für das Meldetool (SecuNym-RT), die DZS (SecuNym-DCC) und den PSD (SecuNym-PSS) schreiten voran.

Die Verfahren zur Datenerhaltung werden aktiv mit der KV Westfalen-Lippe bearbeitet, die KV Nordrhein hat ihre Bereitschaft zur Mitarbeit erklärt.

Die Datenabgleiche mit den Daten von zwei großen Krankenkassen konnten Ende des Jahres 2015 durchgeführt werden. Die weiterführenden Analysen laufen.

Im „GKV-Modell“ konnten von kooperierenden Kassen Daten weitere Datenjahre (2012, 2013) integriert werden.

Die Datenabgleiche mit dem EKR NRW im Rahmen der Validierungsstudie wurde nach Zustimmung der beteiligten beiden Kassen und des Bundesversicherungsamt in die Wege geleitet.

Die Modelle mit Komorbiditäts-Indizes haben nicht dazu geführt, dass die Unterschiede in der Mortalität (Teilnahmebias) reduziert wurde.

Die Propensity Score-Modelle führten bisher zu einer deutlichen Abschwächung des Bias, eine völlige Adjustierung wurde aber nicht erreicht.

Ein neues Datenfluss- und Datenschutzkonzept zur Implementierung der Daten aus Klinischen Krebsregistern wurde entwickelt. Es wurde der BfDI zur technischen Vorprüfung zugeleitet.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

- Abschluss der Arbeiten zum Korrekturfaktor und Propensity Score als relevante Verfahren zur Bearbeitung des Selektionsbias; Durchführung der Validierungsstudie
- Verfestigung der prototypisch entwickelten Softwareverfahren und Prozesse, um die entwickelten Konzepte im Sinne des Aufbaus einer tragfähigen und belastbaren Infrastruktur an Simulationsdaten und Echtdateien zu testen
- Finalisierung und Erprobung des Datenschutzkonzeptes zur Einbindung der Daten Klinischer Krebsregister in Deutschland
- Erstellung eines Durchführungskonzeptes für die Hauptstudie
- Erstellung eines Abschlussberichts für die beiden Machbarkeitsstudien.

|                                                                                 |                                                      |                                                         |                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Thema</b><br>Verbesserung der Inhalationsdosimetrie am Arbeitsplatz          |                                                      |                                                         |                                      |
| <b>Subject</b><br><i>Improvement of the inhalation dosimetry at work places</i> |                                                      |                                                         |                                      |
| <b>Kennzeichen</b><br>3614S40015                                                | <b>Beginn</b><br>01.01.2015                          | <b>Ende</b><br>30.06.2017                               | <b>Fördermittel</b><br>EUR 301.126,- |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Helmholtz Zentrum München                 |                                                      |                                                         |                                      |
| <b>Projektleitung</b><br>Dr. J. Tschiersch                                      | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. D. Noßke / AG-SG 2.3 | <b>verantwortlich für den Text</b><br>Dr. J. Tschiersch |                                      |

## 1. ZIELSETZUNG

Die Inhalationsdosis bei der Exposition mit radioaktiv kontaminiertem Aerosol hängt außer von der Aktivität der vorhandenen Nuklide ganz wesentlich von deren physikalisch-chemischen Eigenschaften ab. Dies sind vor allem die Größenverteilung, die den Ort und die Stärke der Deposition im Atemtrakt bestimmt, und die Löslichkeit der Nuklide nach der Ablagerung im Atemtrakt, die den Transfer ins Blut und damit in andere Organe beeinflusst. Üblicherweise werden für Arbeitsplätze vordefinierte Aktivitätsgrößenverteilungen und Löslichkeiten angenommen und mit tabellierten Dosiskoeffizienten die Inhalationsdosis berechnet.

Die Inhalationsdosimetrie am Arbeitsplatz soll nun dahingehend verbessert werden, dass anstatt dieser fixen Werte individuell die Dosiskoeffizienten für verschiedene relevante Arbeitsplätze bestimmt werden. Dazu wird die Größenverteilung des radioaktiven Aerosols an den exponierten Arbeitsplätzen gemessen und die Löslichkeit der Radionuklide in simulierter Lungenflüssigkeit bestimmt.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Die Einzelziele des Vorhabens sind daher:

- die Bestimmung der Aktivitäts-Größenverteilung an Arbeitsplätzen, an denen eine Inhalation von aerosolgebundenen Radionukliden möglich ist
  - direkt durch größenklassifizierte Sammlung
  - retrospektiv aus Aerosolfilterproben einschließlich eines Vergleichs der beiden Methoden
- die Bestimmung der Löslichkeit von Radionukliden, die an diesen Arbeitsplätzen auftreten, aus Aerosolfilterproben
- die Berechnung individueller Dosiskoeffizienten aus diesen Parametern und damit eine Abschätzung der Exposition der an den Arbeitsplätzen Beschäftigten.

## 3. METHODIK

Die experimentellen Methoden zur Bestimmung der Aktivitätsgrößenverteilung (in situ und retrospektiv) sind in verschiedenen Vorhaben erfolgreich eingesetzt und in Publikationen im Detail beschrieben.

Zur direkten Größenklassifizierung stehen verschiedene Impaktortypen zur Verfügung. In der Umgebungsluft der Arbeitsplätze wird der Niederdruckimpaktor LPI 30 nach Prof. Berner (9-stufig, 0,06 - 16 µm, 1,7 m<sup>3</sup>/h), der Andersen Impaktor (6-stufig, 0,49 - 7,2 µm, 70 m<sup>3</sup>/h) und der IBP Impaktor (5-stufig, 0,56 - 29 µm, 1,05 m<sup>3</sup>/h) zum größenfraktionierten Sammeln eingesetzt. Es wurde zusätzlich ein personengetragener Impaktor vom Typ Marple Serie 298 (8-stufig, 0,52 - 21 µm, 2 l/min) beschafft. Die Proben jeder Impaktorstufe werden separat mittels Gamma-Spektrometrie vermessen. Dafür stehen empfindliche Detektoren (u. a. Bohrlochdetektoren) zur Verfügung.

Zusätzlich werden Aerosolfilterproben des Gesamtstaubs (70 bzw. 140 m<sup>3</sup>/h) an Arbeitsplätzen gesammelt und retrospektiv aus diesen Filterproben mit einer neu entwickelten Methode die Größenverteilung des radioaktiven Aerosols bestimmt.

Die Löslichkeit des radioaktiven Aerosols wird anhand der Aerosolfilterproben gemessen. Bei höheren Aktivitäten können auch die Impaktorproben genutzt werden. Die Proben werden eine definierte Periode in simulierter Lungenflüssigkeit getaucht und das Eluat wird anschließend gamma-spektrometrisch vermessen.

Die individuellen Inhalationsdosiskoeffizienten werden entsprechend der Messwerte von Löslichkeit und Größenverteilung nach dem Verfahren des ICRP-Atemtraktmodells berechnet. Dafür stehen die Standard-Software IMBA und ein selbst entwickelter Code zur Verfügung.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Das Vorhaben wurde entsprechend dem Arbeitsprogramm und Zeitplan gestartet mit der Abarbeitung der definierten Arbeitspakete (AP).

### 4.1 VORBEREITENDE PLANUNGEN UND FESTLEGUNGEN FÜR DAS VORHABEN (AP 1)

In AP 1 ist anhand von Literaturrecherche und eigener Erfahrung zu entscheiden über die Auswahl konkreter Arbeitsplätze, die durch partikelgebundene, luftgetragene Radionuklide potenziell exponiert werden. Die Auswahl wurde nach Relevanz und praktischen Möglichkeiten getroffen. Ferner wurde über die anzuwendende Methodik zu Messung von Aktivitätskonzentration, Größenverteilung und Löslichkeit der relevanten Radionuklide entschieden. Die Festlegungen wurden mit dem Auftraggeber abgestimmt. Das Arbeitspaket wurde mit einem Bericht abgeschlossen.

### 4.2 AMAD<sup>1)</sup>-MESSUNGEN UND FILTERPROBENSAMMLUNG (AP 2) UND AUSWERTUNG DER FILTERPROBEN (AP 3)

Entsprechend der Festlegung, Arbeitsprozesse am Bauplatz des neuen Containments für den Unfallreaktor von Tschernobyl („Shelter“) zu studieren, wurde ein Untervertrag mit dem ukrainischen Kooperationspartner PE „Institute of Radioecology“, Kiew, geschlossen. Der Kooperationspartner konnte zeitnah mit der Probenentnahme am Shelter beginnen. Es liegen Filter- und Impaktorproben vor. Mit der Analytik der Proben wurde begonnen: Gamma-spektrometrische Messungen von Filter- und Impaktorproben wurden durchgeführt, autoradiographische Untersuchungen von Filtern halfen Filterfragmente für die Löslichkeitsversuche zu identifizieren. Die zeitaufwendigen Löslichkeitsversuche dauern an.

Leider konnte das vorgesehen Personal nicht wie geplant für das Vorhaben eingestellt werden. Deshalb konnten die beiden anderen Arbeitsplatzbereiche noch nicht näher untersucht werden.

## 5. ERGEBNISSE

Das AP 1 wurde abgeschlossen. In AP 2 und AP 3 liegen erste Ergebnisse für Arbeitsplätze am Bauplatz des neuen Containments für den Unfallreaktor von Tschernobyl vor.

### 5.1 VORBEREITENDE PLANUNGEN UND FESTLEGUNGEN FÜR DAS VORHABEN (AP 1)

Die Festlegungen wurden in Abstimmung mit dem Auftraggeber getroffen. Von den als relevant bewerteten Arbeitsplätzen wurden die folgenden drei ausgewählt:

- Besonders viele Arbeitskräfte sind Expositionen bei der Verwendung von Schweißelektroden ausgesetzt, die mit Thoriumoxid dotiert sind. Die dabei abgeschätzten Expositionen liegen oft weit oberhalb von 1 mSv/a. Deswegen sollen Arbeitsplätze untersucht werden, bei denen solche Schweißelektroden eingesetzt werden.
- Ein Arbeitsgebiet, das in der Zukunft in Deutschland an Bedeutung zunehmen wird, ist der Rückbau von Kernkraftwerken. Deshalb sollen Arbeitsprozesse untersucht werden, die beim Rückbau signifikante Expositionen erwarten lassen.
- Eine Abschätzung, welche Arbeiten in kontaminierten Anlagen mit welchen potenziellen internen Expositionen verbunden sein können, kann auch für deutsche Arbeitskräfte Relevanz erhalten. Deshalb sollen solche Arbeitsprozesse am Bauplatz des neuen Containments des havarierten Reaktors von Tschernobyl in Zusammenarbeit mit einem ukrainischen Kooperationspartnern studiert werden.

<sup>1)</sup> aktivitätsbezogener Median des aerodynamischen Aerosolpartikeldurchmessers

Die drei gewählten Gebiete unterscheiden sich in ihren Expositionscharakteristika und umfassen Arbeitsplätze mit Grobstaub bzw. mit feinen Partikeln, mit eher löslichen bzw. unlöslichen Verbindungen sowie Arbeitsplätze in der kerntechnischen Industrie bzw. solche, in denen mit anderen radioaktiven Stoffen umgegangen wird.

## **5.2 AMAD-MESSUNGEN UND FILTERPROBENSAMMLUNG (AP 2) UND AUSWERTUNG DER FILTERPROBEN (AP 3)**

Ein erster Bericht über die durchgeführten Messungen und vorläufigen Analyseergebnisse des Kooperationspartners PE „Institute of Radioecology“, Kiew, liegt vor. Die Analysedaten sind umfangreich und werden im Hinblick auf verschiedene Arbeitsvorgänge systematisiert.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Die offenen Stellen werden ausgeschrieben und das entsprechende Personal rekrutiert. Damit können die Probenentnahme an den beiden anderen Arbeitsplatzbereichen, Schweißen mit Thoriumoxid dotierten Schweißelektroden und Rückbau von Kernkraftwerken, gestartet werden. Gleichzeitig kann mit der gammaspektrometrischen Analyse der Proben begonnen werden. Die Löslichkeitsversuche beim „Shelter“-Arbeitsplatz werden abgeschlossen und die Analysemethoden und -resultate der beteiligten Kooperationspartner Helmholtz Zentrum München und PE „Institute of Radioecology“ werden verglichen.

**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**  
3615S42320

**Beginn**  
03.08.2015

**Ende**  
30.06.2018

**Fördermittel**  
EUR 164.234,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.

**Projektleitung**  
Dr. B. Seidel

**Fachbetreuung BfS**  
Dr. A. Schegerer / AG-SG 2.3

**verantwortlich für den Text**  
Dr. B. Seidel

## 1. ZIELSETZUNG

Für die Ziele des Strahlenschutzes sind die Vorschriften des Atomgesetzes, der Strahlenschutzverordnung und der Röntgenverordnung durch Normen zu untermauern, um eine zielgerichtete, bundeseinheitliche Umsetzung zu gewährleisten.

Daneben sind bestehende, für den Vollzug wichtige Normen neuen Entwicklungen, die sich beispielsweise aus der Informationsverarbeitung und der Einführung digitaler Techniken ergeben, anzupassen. Die Normen präzisieren die durch Gesetze, Verordnungen, Verwaltungsvorschriften und Richtlinien vorgegebenen Regeln und geben Ausführungshinweise dazu.

Ziel des Vorhabens ist es, Normen für die Überwachung von Einrichtungen der medizinischen Radiologie hinsichtlich technischer Eigenschaften, Qualität und Strahlenschutz zu erstellen.

Das Vorhaben soll auch die Arbeiten zur Einflussnahme auf die europäische und internationale Normung im Bereich der Strahlenschutzverordnung und Röntgenverordnung erheblich verbessern. Nur so können wesentliche nationale Vorgaben frühzeitig eingebracht und durchgesetzt werden. Dies ist wegen der bindenden Wirkung dieser übernationalen Normung (ISO<sup>1)</sup>, IEC<sup>2)</sup>, CEN<sup>3)</sup>, CENELEC<sup>4)</sup>) von erheblicher nationaler Bedeutung und auch erforderlich, um die Ziele neuerer europäischer Vorgaben für den Strahlenschutz harmonisiert umzusetzen.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das Vorhaben beinhaltet Normungsarbeit auf den folgenden Teilgebieten:

- Qualitätssicherung nach RöV an Röntgeneinrichtungen
- Qualitätssicherung an Einrichtungen für die Nuklearmedizin
- Festlegung von Eigenschaften strahlentherapeutischer Einrichtungen
- Strahlenschutz für Patienten und Personal einschließlich baulicher Strahlenschutz
- Anforderungen an Verfahren zur Dosimetrie.

Die einzelnen Projekte einschließlich der terminlichen Zielsetzungen sind der Tabelle unter Abschnitt 5 zu entnehmen.

<sup>1)</sup> International Organization for Standards

<sup>2)</sup> International Electrotechnical Commission

<sup>3)</sup> Comité Européen de Normalisation

<sup>4)</sup> Comité Européen de Normalisation Électrotechnique

### 3. METHODIK

Nach der Richtlinie für Normenausschüsse des DIN vom September 2013 und der Geschäftsordnung des Normenausschusses Radiologie (NAR) vom 16.11.2000, insbesondere DIN 820-4 „Geschäftsgang“, ist der NAR zur Einhaltung eines festgelegten Arbeitsablaufes für Normungsprojekte verpflichtet.

### 4. DURCHFÜHRUNG

Die Normungsprojekte wurden nach den Grundsätzen der Normungsarbeit, die in den unter 3 „Methodik“ genannten Dokumenten niedergelegt sind, durchgeführt.

### 5. ERGEBNISSE

Die bisher erreichten Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1: Bisher erreichte Ergebnisse bei den Normungsprojekten**

| Nr. | Projektnummer | Titel                                                                                                                                                                                   | Stand                                                         |
|-----|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1   | DIN 6800-7    | Dosismessverfahren nach der Sondenmethode für Photonen- und Elektronenstrahlung - Teil 7: Zweidimensionale Dosimetrie                                                                   | Norm-Vorlage in Bearbeitung                                   |
| 2   | DIN 6809-6    | Klinische Dosimetrie - Teil 6: Anwendung hochenergetischer Photonen- und Elektronenstrahlung in der Teletherapie                                                                        | Bearbeitung der Norm-Vorlage im AK <sup>a</sup> abgeschlossen |
| 3   | IEC 60601-2-1 | Medical electrical equipment - Part 2-1: Particular requirements for the basic safety and essential performance of electron accelerators in the range 1 MeV to 50 MeV                   | Working draft in Bearbeitung                                  |
| 4   | IEC 62926     | Medical electrical equipment - Requirements for basic safety and essential performance of real time four-dimensional radiotherapy system                                                | Working draft in Bearbeitung                                  |
| 5   | DIN 6844-3    | Nuklearmedizinische Betriebe - Teil 3: Strahlenschutzberechnungen                                                                                                                       | Bearbeitung der Norm-Vorlage im AK abgeschlossen              |
| 6   | DIN 6855-1    | Konstanzprüfung nuklearmedizinischer Messsysteme - Teil 1: In-vivo- und In-vitro-Messplätze (IEC/TR 61948-1:2001, modifiziert)                                                          | AK gegründet                                                  |
| 7   | DIN 6858-2    | Qualitätsprüfung multimodaler Bildgebung - Teil 2: Konstanzprüfung SPECT/CT                                                                                                             | Norm-Vorlage in Bearbeitung                                   |
| 8   | DIN 6861-1    | Dosimetrie bei der Radionuklidtherapie - Teil 1: Allgemeines                                                                                                                            | Norm-Vorlage in Bearbeitung                                   |
| 9   | DIN 6868-16   | Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben - Teil 16: Dokumentation der klinischen Bildverarbeitungsparameter bei digitalen Röntgensystemen                          | zur Veröffentlichung als Norm-Entwurf frei gegeben            |
| 10  | DIN 6868-163  | Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben - Teil 163: Abnahme- und Konstanzprüfung nach RöV an Röntgeneinrichtungen für digitale mammographische Stereotaxie        | in Veröffentlichung als Norm-Entwurf                          |
| 11  | Normvorhaben  | Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben - Teil XX: Abnahme und Konstanzprüfung von Geräten zur Knochendichtemessung (DXA/ DEXA, dual-energy X-ray absorptiometry) | AK gegründet                                                  |
| 12  | Normvorhaben  | Qualitätssicherung von Prüfkörpern, die im Rahmen der Qualitätssicherung von Röntengeräten nach RöV eingesetzt werden                                                                   | AK gegründet                                                  |

| Nr. | Projektnummer | Titel                                                                             | Stand                        |
|-----|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 13  | Normvorhaben  | Austauschformat für QS-Parameter                                                  | AK gegründet                 |
| 14  | IEC 62958     | Methods for calculating Size Specific Dose Estimate (SSDE) on Computed Tomography | Working draft in Bearbeitung |

a. Arbeitskreis

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Weiterarbeit erfolgt in jedem Teilprojekt entsprechend den Grundsätzen der Normungsarbeit, wie sie insbesondere in der Richtlinie für Normenausschüsse und der DIN 820-4 „Geschäftsgang“ festgelegt sind. Die weiteren Schritte sind in den Arbeitsprogrammen der zuständigen Arbeitsausschüsse des NAR festgelegt.

**Themenbereich 05**  
**Radioökologie**

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

**Thema**

Fachliche Unterstützung des BfS bei der Erstellung von Referenzbiosphärenmodellen für den radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis von Endlagern - Quantitative Modellierung des Radionuklidtransports in der Biosphäre

**Subject**

*Supporting the Federal Office for Radiation Protection in the development of reference biosphere models for the radiological long-term safety assessment of nuclear waste repositories - Quantitative Modelling of the radionuclide transport in the biosphere*

**Kennzeichen**

3614S50010

**Beginn**

01.01.2015

**Ende**

31.08.2016

**Fördermittel**

EUR 81.777,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, Freiberg

**Projektleitung**

Dr. R. Kahnt

**Fachbetreuung BfS**

C. Willrodt / SW 1.6

**verantwortlich für den Text**

Dr. R. Kahnt, M. Schlegel,  
Dr. D. Mocker

## 1. ZIELSETZUNG

Bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen kann die Freisetzung von Radionukliden nicht vollständig ausgeschlossen werden. Mit Hilfe von Langzeitsicherheitsanalysen wird die potenzielle Strahlenexposition auf Mensch und Umwelt ermittelt, wobei die Belastung über verschiedene Expositionspfade erfolgen kann. Im Rahmen des Vorhabens 3609S50005 „Fachliche Unterstützung des BfS bei der Erstellung von Referenzbiosphärenmodellen für den radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis von Endlagern - Modellierung des Radionuklidtransportes in Biosphärenobjekten“ wurde mit Hilfe des hydrogeochemischen Modellierungsprogramms PHREEQC ein Mehrkomponentenmodell entwickelt, das in der Lage ist, die Speziations- und Sorptionseigenschaften eines in die Bodenmatrix eingetragenen Radionuklids abzubilden. Mit diesem Modell ist es möglich, den Übergang aus der Geosphäre in die Biosphäre zu beschreiben. Das vorhandene Modell soll aufgegriffen und um weitere endlagerrelevante Radionuklide ergänzt werden. Zudem soll eine Sensitivitätsanalyse erfolgen sowie das in PHREEQC enthaltene eindimensionale Ausbreitungsmodell erweitert und den Anforderungen des Vorhabens angepasst werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 ERWEITERUNG DES MODELLS UM WEITERE NUKLIDE

Das existierende Biosphärenmodell berücksichtigt die Nuklide Cs-137, U-238, Se-79 und Ni-63. Die in der Datenbank enthaltenen Konstanten sind zu prüfen und ggf. zu aktualisieren. Analog zu diesen Radionukliden sollen Am-241, Np-237, Pu-239, Ra-226 und I-129 im Modell implementiert werden. Die berechneten Kd-Werte für die Böden REFESOL 2 und 4 sind mit den Literaturwerten der IAEA-TECDOC 1616 und TRS 472 zu validieren.

### 2.2 ANWENDUNG DES MODELLS AUF REFERENZBÖDEN

Für 2 Referenzböden sowie mindestens einen detailliert beschriebenen Boden sind die Verteilungskoeffizienten der neu implementierten Nuklide zu berechnen, damit die Koeffizienten für Dosisberechnungen in den Referenzbiosphärenmodellen genutzt werden können. Für die Referenzböden ist eine Sensitivitätsanalyse der Verteilungskoeffizienten in Abhängigkeit von den wichtigsten Bodenparametern durchzuführen.

### 2.3 IMPLEMENTIERUNG EINES AUSBREITUNGSMODELLS

Das in PHREEQC implementierte eindimensionale Ausbreitungsmodell ist zu überarbeiten und zu erweitern. Zur Darstellung des Stofftransportes besteht die Möglichkeit, weitere Software zu koppeln, so dass nur chemische Berechnungen in PHREEQC durchgeführt werden. Ziel ist es, zwei Ausbreitungsszenarien darzustellen: Transport der Bodenlösung durch die ungesättigte Zone im Szenario „Beregnung“ und Transport durch den vollständig gesättigten Porenraum im Szenario „Grundwasseraufstieg“.

### 3. METHODIK

Die Erweiterung des Modells um weitere Nuklide erfolgt durch eine umfangreiche Recherche. Das weitere Vorgehen beruht auf der Integration des PHREEQC-Modells als Submodell von GoldSim. PHREEQC wird bei jedem Zeitschritt aufgerufen, während in GoldSim ohne viel Aufwand die Transportberechnungen durchgeführt werden. Außerdem lassen sich den Modellierungen innewohnende Unsicherheiten durch Monte-Carlo-Simulationen berücksichtigen. Die Einflüsse der Unsicherheiten eines Parameters können im Rahmen der Sensitivitätsanalyse in GoldSim ausgewertet werden.

### 4. DURCHFÜHRUNG

#### 4.1 ERWEITERUNG DES MODELLS AUF WEITERE NUKLIDE

Grundlage der Bearbeitung der Aufgabenstellung bestand in einer umfangreichen Datenrecherche. Hinzu kam eine Prüfung des bestehenden Modells und der Datenbank, die gegebenenfalls auf den aktuellen Stand gebracht wurde. Parallel wurde an der Verknüpfung des PHREEQC-Modells mit der Software GoldSim gearbeitet. Zum Abschluss der Aufgabenstellung wurden die Kd-Werte der neu implementierten Radionuklide modelliert und mit Literaturwerten verglichen.

#### 4.2 ANWENDUNG DES MODELLS AUF REFERENZBÖDEN

Mit der neu gestalteten Schnittstelle GoldSim/PHREEQC konnten die Kd-Werte der Radionuklide für die REFESOL - Böden 2 und 4 berechnet werden. Weiterhin sind verschiedene Sorptionsversuche mit den Radionukliden recherchiert und modelliert worden.

Die Sensitivitätsanalyse erfolgte anhand von zehn Bodenparametern. Deren Bandbreiten für mitteleuropäische Ackerböden wurden ermittelt. Mit der in GoldSim durchführbaren Sensitivitätsanalyse konnte der Einfluss der Parameter auf die Verteilungskoeffizienten der Nuklide bestimmt werden.

### 5. ERGEBNISSE

#### 5.1 ERWEITERUNG DES MODELLS AUF WEITERE NUKLIDE

Durch die umfangreiche Recherche konnte die chemische Datenbank des Modells aktualisiert und durch die Nuklide Am-241, Np-237, Pu-239, Ra-226 und I-129 ergänzt werden. Ein Vergleich der modellierten Kd - Werte mit Literaturwerten zeigte gute Übereinstimmungen. Die berechneten Verteilungskoeffizienten lagen innerhalb der Literaturspannen. Durch Aufbau der Schnittstelle mit GoldSim wurde ein Werkzeug geschaffen, das die Eingabe in PHREEQC vereinfacht und komplexe Sensitivitätsanalysen sowie die Implementierung eines sachgerechten Transportmodells erlaubt.

#### 5.2 ANWENDUNG DES MODELLS AUF REFERENZBÖDEN

Die Recherche nach Sorptionsversuchen war für jedes der hinzugefügten Nuklide erfolgreich. Darin enthaltene Datenlücken wurden durch plausible Annahmen gefüllt. Die anschließende Modellierung der Versuche erbrachte sehr gute Übereinstimmungen der modellierten mit den gemessenen Kd - Werten aller Nuklide.

Die Sensitivitätsanalyse lieferte klare Einflussgrößen auf die Verteilungskoeffizienten der Radionuklide. Die Kd-Werte von Am-241 und I-129 reagieren besonders sensitiv auf die Gehalte der ortsfesten und gelösten organischen Substanz. Die Actinoide Np-237 und Pu-239 zeigten deutliche Abhängigkeiten vom pH-Wert und dem Redoxpotential der Bodenlösung. Die höchste Sorptionsaffinität zeigten sie gegenüber Eisenoxiden. Der Verteilungskoeffizient des Ra-226 war besonders sensibel gegenüber dem pH-Wert. Die Sorbenten mit dem größten Einfluss waren Eisenoxide und organisches Material.

Die Sorption an Ton und die Kationenaustauschkapazität haben geringen Einfluss auf die Verteilung der untersuchten Radionuklide zwischen Bodenlösung und Festphase. Die Verteilungskoeffizienten der Radionuklide zeigten auch nur geringe Sensitivitäten gegenüber veränderten Nuklidkonzentrationen sowie Verdunstung bzw. Verdünnung.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Nach Abschluss der Validierungs- und Sensitivitätsarbeiten soll das Ausbreitungsmodell auf der Basis der Richardsgleichung sowie unter Einbeziehung von Wasserhaushaltsbetrachtungen in GoldSim implementiert werden. Ziel ist es, die zwei Szenarien „Beregnung“ und „Grundwasseraufstieg“ darzustellen. Das Szenario „Beregnung“ wird durch den ungesättigten vertikalen Transport von der Geländeoberfläche bis zur Pflugscharkante beschrieben. Hinzugezogen werden Effekte der Verdunstung und der Saugspannung durch die Pflanze, um die konkrete Belastung des Ackerbewuchses durch die Radionuklide zu erfassen. Das Szenario „Grundwasseraufstieg“ beschreibt den vertikalen Aufstieg des Grundwassers durch den gesättigten bzw. teilgesättigten Boden. Analog zum Szenario „Beregnung“ werden die Effekte Verdunstung und Saugspannung der Pflanze berücksichtigt.

|                                                                                                                                                                       |                                                      |                           |                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>Thema</b>                                                                                                                                                          |                                                      |                           |                                                         |
| Messtechnische und modellbasierte Abschätzung des Eintrags von I-131 in die OSPAR-Regionen auf Grund der nuklearmedizinischen Anwendungen von Radioiod in Deutschland |                                                      |                           |                                                         |
| <b>Subject</b>                                                                                                                                                        |                                                      |                           |                                                         |
| <i>Measurements and modelling of I-131 fluxes from nuclear medical applications in Germany into the OSPAR region</i>                                                  |                                                      |                           |                                                         |
| <b>Kennzeichen</b><br>3614S50015                                                                                                                                      | <b>Beginn</b><br>01.05.2015                          | <b>Ende</b><br>31.10.2017 | <b>Fördermittel</b><br>EUR 359.432,-                    |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Nuclear Control & Consult GmbH, Braunschweig                                                                                    |                                                      |                           |                                                         |
| <b>Projektleitung</b><br>Dr. R. Gellermann                                                                                                                            | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. Chr. Strobl / SW 1.4 |                           | <b>verantwortlich für den Text</b><br>Dr. R. Gellermann |

## 1. ZIELSETZUNG

Im Rahmen des 2011 bis 2013 durchgeführten Vorhabens „Messtechnische und theoretische Abschätzung des Eintrags von I-131 in die OSPAR-Regionen auf Grund der nuklearmedizinischen Anwendung von Radioiod in Deutschland“ wurde ein Modellansatz entwickelt, der eine Ermittlung der I-131-Frachten aus deutschen Oberflächengewässern in die OSPAR-Regionen ermöglicht. Dabei wurde festgestellt, dass eine Diskrepanz zwischen der theoretischen I-131-Einleitung und den tatsächlich festgestellten I-131-Frachten in Flüssen besteht. Ziel des hier berichteten Vorhabens ist es, weitere messtechnische Untersuchungen durchzuführen, um den Prozess und die möglichen Ursachen für die Rückhaltung und den Zerfall von I-131 zu prüfen und weitere Erkenntnisse zur Verbesserung des Modells zu gewinnen.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 TEILZIELE

- Klärung des Einflusses der Kläranlagentechnologie auf die Aktivitätsbilanzen von I-131 und I-129 in den Kläranlagen
- Quantifizierung von Transportprozessen und Eingrenzung von Bilanzverlusten anhand ergänzender Messungen von I-131 im Ablauf und im Nahbereich der Einleitstellen von Kläranlagen
- Klärung der Bilanzanteile von I-131 in Zuflüssen aus dem Ausland und aus großen Nebenflüssen von Elbe, Weser, Ems und Rhein auf die Gesamtfrachten an I-131
- Ermittlung weiterer Basisdaten für eine Bilanzierung der I-131-Einträge mittels des Bilanzmodells OSBIMO in die Nordsee.

### 2.2 ARBEITSPAKETE

Im Vorhaben sind die folgenden Arbeitspakete zu bearbeiten:

- Bilanzierung von I-131 und I-129 in Wasserproben von vier vom Forschungsnehmer auszuwählenden Kläranlagen, die für den Eintrag von Radioiod in den Nordostatlantik relevant sind (AP 1)
- Messungen zur Ermittlung der räumlichen Verteilung der Aktivitätskonzentration von I-131 im Nahgebiet der Einleitstellen von vier vom Forschungsnehmer auszuwählenden Kläranlagen, die für den Eintrag von Radioiod in den Nordostatlantik relevant sind (AP 2)
- Bestimmung der Frachten von I-131 in für die Bilanzierung relevanten Nebenflüssen und Übergangsstellen der Hauptgewässer ins deutsche Hoheitsgebiet (AP 3)
- Ermittlung von organisch gebundenem I-131 in Biofilmen / Algen und Bilanzierung der damit einhergehenden Frachten (AP 4)

### 3. METHODIK

Im Jahr 2015 war zur Vorbereitung der messtechnischen Untersuchungen mittels Literaturlauswertungen der Stand der Wissenschaft aufzuarbeiten und darauf aufbauend das geplante Untersuchungsprogramm zu präzisieren.

### 4. DURCHFÜHRUNG

#### 4.1 AUSWAHL GEEIGNETER KLÄRANLAGEN (AP 1)

Die in Deutschland üblichen Technologien der Abwasserreinigung in Kläranlagen wurden recherchiert und in Hinblick auf die Rückhaltung von Radioiod analysiert. Ergänzend wurden internationale Veröffentlichungen zu Radioiod in Kläranlagen ausgewertet. Dabei konnte gezeigt werden, dass in Deutschland geringere einwohnerbezogene Radioiodfrachten in Kläranlagen vorkommen als in einigen anderen Ländern.

Um im Abwasser von Kläranlagen mit hoher Wahrscheinlichkeit I-131 zu finden, muss eine statistisch hinreichende Zahl von Patienten im Einzugsbereich einer Kläranlage leben. Deshalb wurde die Auswahl auf Anlagen beschränkt, die etwa 100 000 oder mehr Einwohner entsorgen.

#### 4.2 FESTLEGUNG DES UNTERSUCHUNGSPROGRAMMS FÜR EINLEITSTELLEN VON KLÄRANLAGEN (AP 2)

Um das Ziel der Untersuchungen zu erreichen und Aussagen über mögliche bilanzrelevante Senken von Radioiod im Nahbereich der Einleitstellen zu identifizieren, ist es erforderlich, die I-131-Frachten im An- und Abstrom der Einleitstellen zu ermitteln. Die Analyse der Einmischprozesse von punktförmigen Einleitungen an der Uferseite eines Gewässers zeigte, dass die Abstromfahne relativ lange im Flussbett erkennbar bleibt. Bei der Probenentnahme kommt es daher darauf an, das Gewässerprofil so repräsentativ zu beproben, dass daraus auf die Verteilung der Fahne und die Frachten geschlossen werden kann. Für genaue Aussagen sind bei größeren Gewässern wie der Leine und der Unterelbe detailliertere Modelle nötig.

#### 4.3 UNTERSUCHUNG DER EINTRAGSPOTENTIALE UND AUSWAHL VON NEBENFLÜSSEN (AP 3)

Die deutschen Nebenflüsse der Hauptgewässer Elbe, Weser, Ems und Rhein wurden hinsichtlich ihrer Eintragspotentiale für I-131 in die Hauptgewässer untersucht. Auf der Grundlage der Kenngröße „Einwohner je Abfluss“ wurden Nebenflüsse mit hohen Eintragspotentialen von I-131 identifiziert. Bei der Auswahl der Nebenflüsse wurden Gewässerabschnitte, in denen es durch natürliche oder künstliche Stillgewässer zu einer Retardation der Abflüsse kommt und Einträge von I-131 abklingen können, berücksichtigt.

#### 4.4 LITERATURRECHERCHEN ZU BIOFILMBILDUNG UND PROBENENTNAHME

Die wissenschaftlichen Grundlagen der Biofilmbildung in Fließgewässern wurden zusammengestellt und es wurden Probenentnahmetechniken ermittelt.

### 5. ERGEBNISSE

#### 5.1 PROBENENTNAHMEPROGRAMM KLÄRANLAGEN

Ausgewählt wurden 4 Kläranlagen, von denen 2 unmittelbar für den Eintrag von Radioiod in den Nordatlantik relevant sind (Hamburg und Emscher Kläranlage Dinslaken). Eine der ausgewählten Kläranlagen (Gütersloh, Einzugsgebiet Ems) besitzt eine Aktivkohleeinheit zur finalen Reinigung. Die Kläranlage Hannover ist in Hinblick auf Technologie und Einwohnerzahl mit der bereits sehr intensiv untersuchten Kläranlage Bremen-Seehausen vergleichbar.

#### 5.2 PROBENENTNAHMEPROGRAMM EINLEITSTELLEN

Gute Voraussetzungen für repräsentative Probenentnahmen zur Ermittlung von Frachten im geforderten Nahbereich der Einleitstelle liegen bei der Kläranlage Gütersloh und der Emscher-Kläranlage Dinslaken vor. Bei der Einleitstelle der Kläranlage Hannover in die Leine ist eine Beprobung des Gewässerquerschnitts erst in Entfernungen von mehr als 1000 m von der Einleitstelle möglich. Ein Sonderfall ist die Einleitstelle der Klär-

anlage Hamburg. Für diese Einleitung in den Tidebereich der Unterelbe liegen aber Ergebnisse von Modelluntersuchungen zur Stoffausbreitung vor, auf die bei einer Auswertung von Messergebnissen zurückgegriffen werden kann.

### **5.3 IDENTIFIKATION VON NEBENFLÜSSEN**

Aus den Einzugsgebieten der in die Nordsee entwässernden deutschen Flüsse wurden die Nebenflüsse Saa-le (Flussgebiet Elbe), Aller (Flussgebiet Weser), Werse (Flussgebiet Ems) sowie Main, Ruhr und Lippe (Flussgebiet Rhein) ausgewählt. Die Auswahl erfolgte nach Relevanzkriterien wie Bevölkerungsanzahl, Durchflussmenge und Nähe von Ballungsgebieten zu der Mündung in das jeweilige Hauptgewässer.

### **5.4 IDENTIFIKATION VON PROBENENTNAHMESTELLEN FÜR BIOMASSEBEPROBUNG**

Die Methodik zur Probenentnahme von Biomasse wurde präzisiert. Eine Festlegung der Entnahmeorte im Nahbereich von Einleitstellen gemäß AP 2 konnte noch nicht abschließend erfolgen, da die Probenentnahmestellen der Nahfelduntersuchungen zunächst hinsichtlich ihrer Eignung für die Probenentnahme der Biomasse untersucht werden müssen.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Die Bearbeitung der weiteren Leistungen erfolgt wie geplant. Mit der Beprobung der Kläranlagen und Einleitstellen wird im Januar 2016 begonnen. Die Probenentnahmestellen für die Biomassebeprobung werden in den nahe der Einleitstellen gelegenen Flussabschnitten festgelegt.



**Themenbereich 06**  
**Notfallschutz**

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

**Thema**

Ergänzung der Quelltermdatenbank des Entscheidungshilfesystems RODOS für Freisetzen aus Brennelement-Lagerbecken in Kernkraftwerken

**Subject**

*Complement of the source term data bank of the decision support system RODOS for releases from spent fuel pools in nuclear power stations*

**Kennzeichen**  
3614S60033

**Beginn**  
06.10.2014

**Ende**  
31.12.2016

**Fördermittel**  
EUR 230.788,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

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

**Projektleitung**  
H. Löffler

**Fachbetreuung BfS**  
N. Zander / SW 2.2

**verantwortlich für den Text**  
H. Löffler

## 1. ZIELSETZUNG

Das Vorhaben zielt darauf ab, Freisetzen bei relevanten Unfallabläufen im BE<sup>1)</sup>-Becken als Input für das Rechenprogramm RODOS<sup>2)</sup> zu ermitteln. Ferner soll das für den Reaktorkern bestehende Rechenprogramm zur Quelltermprognose ergänzt werden, damit die Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen möglichen Quellterme aus dem BE-Lagerbecken während eines Unfallablaufes prognostiziert werden können.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 FESTLEGUNG DER ANFANGS- UND RANDBEDINGUNGEN

- Identifizierung der Anfangs- und Randbedingungen, mit denen bei der Analyse von Unfällen im BE-Becken zu rechnen ist
- Festlegung eines Satzes von relevanten Unfallabläufen im BE-Becken, der die möglichen Unfallentwicklungen weitgehend abdeckt

### 2.2 ERMITTLUNG VON QUELLTERMEN

- Ermittlung der Quellterme für die relevanten Unfallabläufe durch vier einzelne MELCOR<sup>3)</sup>-Simulationen sowie durch Übertragungen aus früheren Analysen
- Darstellung der Quellterme in einem für RODOS kompatiblen Format

### 2.3 QUELLTERMPROGNOSEWERKZEUG

- Anpassung des für den Reaktorkern bestehenden Rechenprogramms für Quelltermprognosen (z. B. die vom Nutzer zu gebenden Antworten), damit Unfallabläufe im BE-Lager erfassbar werden
- Entwicklung eines probabilistischen Netzwerkes, mit dem überschlägig Wahrscheinlichkeiten für Quellterme aus dem BE-Becken ermittelt werden können

## 3. METHODIK

### 3.1 FESTLEGUNG DER ANFANGS- UND RANDBEDINGUNGEN

Es werden Rahmenbedingungen innerhalb des BE-Beckens im Leistungsbetrieb sowie bei Revision ermittelt, die Einfluss auf den Störfallverlauf haben. Dabei werden insbesondere Ergebnisse aus dem früheren Vorhaben RS 1198 „Fortschrittliche Methoden und Werkzeuge für probabilistische Sicherheitsanalysen“ genutzt.

<sup>1)</sup> Brennelemente

<sup>2)</sup> realtime online decision support system

<sup>3)</sup> integraler Rechengode

Danach werden die auslösenden Ereignisse zusammengestellt, die möglicherweise zu Brennelementschäden im BE-Becken und zu möglichen signifikanten radiologischen Folgen für die Umgebung führen können.

## **3.2 ERMITTLUNG VON QUELLTERMEN**

Im Rahmen des BMWi-Vorhabens RS 1198 „Fortschrittliche Methoden und Werkzeuge für probabilistische Sicherheitsanalysen“ wurde je ein MELCOR-Eingabedatensatz für DWR<sup>1)</sup> und für SWR<sup>2)</sup> erstellt. Im vorliegenden Vorhaben werden vier zusätzliche Simulationen mit MELCOR durchgeführt. Darauf aufbauend werden plausible Abschätzungen für Quellterme bei andersartigen Ereignisabläufen vorgenommen.

## **3.3 QUELLTERMPROGNOSEWERKZEUG**

Für die schnelle Nutzung der ermittelten Quellterme aus einem BE-Becken in einer Lagebewertung wird auf der Basis bestehender Programmversionen für Unfälle im Reaktorkern eine Version für ein DWR-BE-Becken und eine Version für ein SWR-BE-Becken entwickelt. Deshalb werden in diesem Arbeitspaket u. a. die Wahrscheinlichkeiten der Quellterme und die darin eingehenden Aspekte plausibel abgeschätzt, wobei die Vorarbeiten aus dem Bericht „Fortschrittliche methodische Ansätze für die PSA<sup>3)</sup> der Stufe 2“ im Vorhaben RS 1198 „Fortschrittliche Methoden und Werkzeuge für probabilistische Sicherheitsanalysen“ genutzt werden.

# **4. DURCHFÜHRUNG**

## **4.1 FESTLEGUNG DER ANFANGS- UND RANDBEDINGUNGEN**

Die Anlagenzustände und die relevanten Ereignisabläufe wurden anhand der umfangreich verfügbaren Vorarbeiten (u. a. anhand einer PSA der Stufe 1) zusammengestellt.

## **4.2 ERMITTLUNG VON QUELLTERMEN**

Die vier MELCOR-Simulationen bis zur Ermittlung der Quellterme erfordern einen erheblichen rechentechnischen und zeitlichen Aufwand. Die Abschätzungen für weitere Abläufe und deren Quellterme geschehen anhand der umfangreich verfügbaren Vorarbeiten.

## **4.3 QUELLTERMPROGNOSEWERKZEUG**

Zeitabläufe bis zum Beginn von Brennstabschäden sind langdauernd und entscheidend für Zeitangaben der Quellterme. Deshalb werden besondere Module entwickelt, mit denen dieser Zeitverlauf besser erfasst werden kann. Das probabilistische Netzwerk wird unter Berücksichtigung der in der Anlage verfügbaren Informationen zum Zustand des Lagerbeckens entwickelt.

# **5. ERGEBNISSE**

## **5.1 FESTLEGUNG DER ANFANGS- UND RANDBEDINGUNGEN**

Die Rahmenbedingungen wurden systematisch in Vollbeladung, Teilbeladung und Normalbeladung sowohl für DWR als auch für SWR zusammengestellt. Dazu gehören u. a. auch der Gebäudezustand sowie die möglichen auslösenden Ereignisse. Es wurde festgestellt, dass Ereignisabläufe infolge eines Kühlmittelverlustes nicht zu unterstellen sind. Lediglich der Kühlungsausfall kommt als Auslöser in Betracht, wobei zwar verschiedene Ursachen in Frage kommen, die aber nicht zu signifikant anderen Abläufen führen.

## **5.2 ERMITTLUNG VON QUELLTERMEN**

Zum Berichtsdatum sind 3 von 4 MELCOR-Rechnungen so weit berechnet, dass Aussagen zu den Quelltermen abgeleitet werden können. Abschätzungen zu Quelltermen für zusätzliche Abläufe aus früheren Arbeiten liegen vor. Diese werden mit den neuen MELCOR-Resultaten zu einem kompletten Satz an Quelltermen zusammengestellt.

---

<sup>1)</sup> Druckwasserreaktor

<sup>2)</sup> Siedewasserreaktor

<sup>3)</sup> probabilistische Sicherheitsanalyse

### 5.3 QUELLTERMPROGNOSEWERKZEUG

Ein spezielles Modul zum Füllstandsverlauf im Becken ermöglicht die Berücksichtigung zwischenzeitlicher Bespeisungen sowie eine Anpassung der Prognose an den tatsächlichen Verlauf. Ein Satz von Quelltermen ist vorbereitet. Seine Programmierung und insbesondere seine Anpassung an den tatsächlichen Ereignisablauf sind im Gange. Im probabilistischen Netzwerk sind PSA-Daten eingepflegt. Die Oberfläche der Quelltermprognosesoftware wurde an die Bedingungen für Unfälle im Lagerbecken für den DWR und SWR angepasst.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Arbeit wird planmäßig weitergeführt. Die beiden DWR-MELCOR-Rechenfälle sind abgeschlossen und dokumentiert, die SWR-MELCOR-Rechenfälle laufen, die Analyse und Dokumentation dieser Ergebnisse steht noch aus.

Zur Fertigstellung der Quelltermprognosesoftware ist die Integration der DWR/SWR-MELCOR-Rechenergebnisse sowie der Quelltermabschätzungen in die Quelltermprognosesoftware geplant. Weiterhin müssen die probabilistischen Netzwerke für die DWR/SWR-Versionen fertiggestellt werden und die finalen QPRO<sup>1)</sup>-Versionen in Zusammenarbeit mit den Betreibern getestet werden.

---

<sup>1)</sup> Tool für Quelltermabschätzung

|                                                                                                                |                                                    |                                                                                 |                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Thema</b><br>Verifizierung des Dosismoduls DARTM (Dosis-Atmosphärisches-Radionuklid-Transportmodell)        |                                                    |                                                                                 |                                     |
| <b>Subject</b><br><i>Verification of the dose module DARTM (Dose-Atmospheric-Radionuclide-Transport Model)</i> |                                                    |                                                                                 |                                     |
| <b>Kennzeichen</b><br>3615S62542                                                                               | <b>Beginn</b><br>01.08.2015                        | <b>Ende</b><br>31.07.2016                                                       | <b>Fördermittel</b><br>EUR 66.616,- |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln        |                                                    |                                                                                 |                                     |
| <b>Projektleitung</b><br>H. Thielen                                                                            | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>H. Wildermuth / SW 1.4 | <b>verantwortlich für den Text</b><br>H. Wildermuth, H. Thielen,<br>E. Kümmerle |                                     |

## 1. ZIELSETZUNG

Das Ausbreitungsmodell ARTM<sup>1)</sup> zur Berechnung der Ausbreitung von Radionukliden in der Atmosphäre berechnet Konzentration, Deposition und Gammasubmersion in der Umgebung einer Quelle von Radionukliden, typischerweise einer kerntechnischen Anlage in einem Betriebsjahr. Um anhand der von ARTM ermittelten Konzentrations- und Depositionswerte sowie dem Wert für die Gammasubmersion die Äquivalentdosis von exponierten Personen zu berechnen, wurde im BfS das Dosisprogramm DARTM entwickelt.

Im Gegensatz zu ARTM ist DARTM noch nicht von unabhängigen Stellen verifiziert. Dies soll Inhalt dieses Vorhabens sein.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Die Verifizierung der Ergebnisse von DARTM erfolgt anhand von Vergleichsrechnungen. Dabei werden alle Teilpfade abgedeckt, die charakterisiert sind durch eine Auswahl typischer, in ARTM standardmäßig enthaltener Radionuklide und deren chemisch-physikalischer Form, Organe, Altersgruppen und Expositionspfade. Ergebnisdateien des als Zusatzprogramm im ARTM-Paket enthaltenen Radon-Postprozessors werden einbezogen. Das Forschungsvorhaben gliedert sich in drei Arbeitspakete, die im Folgenden beschrieben werden.

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

Der für die Bearbeitung des Vorhabens relevante Stand von Wissenschaft und Technik wird systematisch aufbereitet und um die im Projekt gewonnen Ergebnisse und Erfahrungen ergänzt. Die für das aktuelle Vorhaben relevanten Unterlagen sind die Programmbeschreibung, Modellbeschreibung und entsprechende Abschlussberichte zu ARTM der GRS, die Anleitung zur Dosisberechnung<sup>1\_07</sup> des BfS, die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung vom 28.8.2012 sowie Unterlagen und Berichte des FZJ<sup>2)</sup> zu den Modellen RAUMKA<sup>3)</sup> und AUSBRDOS<sup>4)</sup>.

Zusätzlich wird im AP 1 eine Verifikationsstrategie entwickelt und die erforderlichen Tools (Editor für die Datei MUL2011.DAT und eine Schnittstelle zwischen ARTM und AUSBRDOS) entwickelt.

### 2.2 VERGLEICHSRECHNUNGEN (AP 2)

Die Vergleichsrechnungen mit DARTM werden mit dem Dosismodul AUSBRDOS des Programmpakets RAUMKA des Forschungszentrums Jülich durchgeführt. Parallelrechnungen mit den in der GRS vorgehaltenen Modulen zur Dosisberechnung werden durchgeführt. Der Vergleich der Ergebnismerte als Verifizierung von DARTM umschließt zwei Teile.

<sup>1)</sup> atmosphärisches Radionuklid-Transportmodell

<sup>2)</sup> Forschungszentrum Jülich

<sup>3)</sup> Programme zur Berechnung der Radionuklidbelastung in der Umgebung kerntechnischer Anlagen

<sup>4)</sup> Ausbreitungsrechnung und Dosis

- Vergleich detaillierter Dosisausgaben an einer noch festzulegenden Anzahl an Referenzpunkten im Modellgebiet (Strategievorschl  g AP 1). Die Referenzpunkte decken den Bereich der Maximalwerte und einen Bereich der niedrigen Dosiswerte ab. Dabei werden alle Altersgruppen, alle Organe (inkl. effektiver Dosis), alle 9 Expositionspfade und die Nuklide H-3 (HTO), H-3 (elementar), H-3 (organisch), C-14 (Dampf), C-14 (CO<sub>2</sub>, organisch), Kr-85 (Edelgas), I-131 (elementar, I<sub>2</sub>), I-131 (organisch, CH<sub>3</sub>I), Cs-137 (lungengängig), Cs-137 (nicht lungengängig), Rn-222 (Radon), Po-218 (RFP<sup>1)</sup>), Bi-214 (RFP), Po-214 (RFP), Pb-214 (RFP), Pb-210 (RFP) und U-238 (lungengängig, ggf. nur teilweise) betrachtet. (1)
- Vergleich der berechneten Dosis der Referenzperson nach der Strahlenschutzverordnung. Dazu wird die Nuklidzusammensetzung nach Punkt 1 verwendet. Nuklidspezifische Betrachtungen entfallen hier. (2)

## 2.3 AUSWERTUNG (AP 3)

In einem Abschlussbericht werden die Dosisberechnungen gegenübergestellt und die Ergebnisse verglichen. Bei dieser Gegenüberstellung werden die Abweichungen in den einzelnen Dosisberechnungen für die einzelnen Nuklide/Pfade/Organe/Altersgruppen ersichtlich. Eventuelle Abweichungen bei der Identifizierung der Dosis der Referenzperson nach der Strahlenschutzverordnung werden ebenfalls dargestellt bzw. das in DARTM integrierte Verfahren nachvollzogen und verifiziert. Zum Abschluss des Vorhabens noch auftretende Abweichungen werden bewertet. Bereits während des Vorhabens erfolgte Änderungen an DARTM werden berücksichtigt. Aus der Zusammenstellung wird eindeutig hervorgehen, in welchen Teilexpositionspfaden Abweichungen auftreten, damit eine Überarbeitung von DARTM nach Abschluss des Vorhabens daraufhin erfolgen kann.

## 3. METHODIK

Zur Berechnung der Dosisbeiträge an den Referenzpunkten (Teilaufgabe 1) müssen die Dosisbeiträge getrennt nach Altersgruppen, Organ, Pfad und Nuklid berechnet werden. Für die Berechnung des Dosiswertes einer solchen Kombination werden die jeweils anderen Altersgruppen, Organe, Pfade und Nuklide durch das Nullsetzen der Dosisfaktoren ausgeblendet. Die Ergebnisse der DARTM-Rechnungen werden gemäß einer Dateinamenskonvention abgespeichert. Durch mehrfache Anwendung erhält man die gewünschte Aufspaltung.

Die Ausgabeschnittstelle in AUSBRDOS für die Dosiswerte wird so gestaltet, dass die separate Ausgabe für die jeweilige Altersgruppe, das Organ, den Pfad und das Nuklid erfolgt und dabei die Benutzung derselben Konvention für die Dateinamen zu Grunde liegt.

Die so berechneten Dosisfelder werden dann einzeln verglichen und für jeden dieser Vergleiche statistische Kennwerte (Maximum 1, Maximum 2, Mittelwert, Standardabweichung, maximale Abweichung, Abweichung im Maximum und Verschiebung des Maximums) ermittelt. Auf der Basis dieser Vergleiche werden dann entsprechende Tabellen und Grafiken generiert.

Für den Vergleich der berechneten Dosis der Referenzperson (Teilaufgabe 2) werden die Dosisbeiträge der einzelnen Nuklide in jedem Gitter summiert und spezifisch für den jeweiligen Pfad, die Altersgruppe und das Organ abgelegt. Die Maxima und deren Lage werden mit den Angaben in der Datei MaxRefperson1\_07-TB50.txt verglichen. Durch die anschließende Summierung über alle Pfade wird dann die maximale Dosis der Referenzperson durch die Angabe des Maximalwertes bei der Ausschöpfung des Grenzwertes für das Organ und die Altersgruppe ermittelt. Durch eine Summierung der Dosisbeiträge eines Nuklides an den Stellen der Maximalwerte eines Pfades können dann für diese Kombination von Altersgruppe und Organ die Beiträge der einzelnen Nuklide an dieser Gesamtdosis angegeben werden.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Die Durchführung der Arbeitspakete 1 bis 3 richtet sich nach der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Methodik.

---

<sup>1)</sup> Radonfolgeprodukt

## **4.1 AUFARBEITUNG DES FÜR DAS VORHABEN RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK, STRATEGIE (AP 1)**

Zu Beginn des Vorhabens werden die im Abschnitt 2.1 beschriebenen Unterlagen gesichtet und hinsichtlich ihrer Relevanz für die Aufgaben analysiert. Daraus wird der für das Vorhaben relevante Stand von Wissenschaft und Technik generiert.

Die Validierungsstrategie basiert auf der Durchführung von Einzelrechnungen durch die Ausblendung der anderen Pfade/Nuklide. Diese Einzelrechnungen werden dann verglichen. Durch dieses Verfahren kommt es zur Quantifizierung der Dosisbeiträge auch bei sonst nicht dominanten Pfaden/Nukliden. Zur Verfolgung dieser Strategie dient zum einen ein batch-fähiger Editor für die Datei mit den Dosiskonversionsfaktoren `mul2011.dat` des BfS. Zum anderen ermöglicht eine Schnittstelle der ARTM-Ausbreitungsrechnungen zum Dosismodell RAUMKA die Berechnung der Dosisbeiträge auf Basis der ARTM-Ergebnisse. Die Ausgabe der Dosiswerte erfolgt ebenfalls im `dmna`-Format von ARTM.

## **4.2 VERGLEICHSRECHNUNGEN (AP 2)**

### **4.2.1 Dosisbeiträge an den Referenzpunkten**

Für alle Kombinationen aus Altersgruppe, Organ, Pfade und Nuklid werden mit RAUMKA und DARTM einzelne Dateien mit den horizontalen Ergebnisfeldern erzeugt. Diese werden dann verglichen und für jedes dieser Felder statistische Kenngrößen erstellt.

### **4.2.2 Dosis der Referenzperson**

Hier werden die mit RAUMKA berechneten Dosisbeiträge der einzelnen Nuklide in jedem Gitter summiert und spezifisch für den jeweiligen Pfad, die Altersgruppe und das Organ abgelegt. Die Maxima und deren Lage werden anschließend mit den Angaben in der Datei `MaxRefperson1_07-TB50.txt` verglichen.

## **5. ERGEBNISSE**

### **5.1 AUFARBEITUNG DES FÜR DAS VORHABEN RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK, STRATEGIE (AP 1)**

Die inzwischen vorliegenden Ergebnisse des AP 1 wurden in einem separaten Bericht beschrieben. Hierin wird der Stand von Wissenschaft und Technik dargelegt, die Verifikationsstrategie erläutert und die entwickelten Tools beschrieben.

### **5.2 VERGLEICHSRECHNUNGEN (AP 2)**

Die Berechnungsverfahren und die zu benutzenden Parameter wurden zwischen GRS und dem Unterauftragnehmer FZ-Jülich festgelegt. Die Dateien mit den Rechenergebnissen von RAUMKA und DARTM wurden erzeugt. Eine erste Iteration mit den Vergleichsrechnungen wurde erstellt und dem Auftraggeber übersandt.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen werden mit dem BfS Anfang 2016 diskutiert. Aus den sich daraus ergebenden Festlegungen bei den Rechenverfahren und den Parametern wird eine abschließende Rechnung der Dosisbeiträge generiert. Diese Dosisbeiträge von RAUMKA und DARTM werden verglichen und DARTM - fall keine Abweichungen mehr vorliegen - für diese Teilaufgabe verifiziert.

Daran anschließend erfolgen die Vergleiche der ermittelten Werte für die Dosis der Referenzperson nach Abschnitt 4.2.2.

Abschließend wird ggf. DARTM auch für diese Teilaufgabe verifiziert und es werden die Ergebnisse des Forschungsvorhabens in einem Abschlussbericht dokumentiert.



**Themenbereich 07**

**Vorhaben mit allgemeiner Bedeutung für den Strahlenschutz**

***Subject area 07***

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

|                                                                                                                                       |                                                   |                                                      |                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Thema</b><br>Aktualisierung und Migration der Internet-Plattform STORE von der Uni Cambridge ans BfS                               |                                                   |                                                      |                                      |
| <b>Subject</b><br><i>Update and migration of the internet platform STORE from University of Cambridge to BfS</i>                      |                                                   |                                                      |                                      |
| <b>Kennzeichen</b><br>3613S70035                                                                                                      | <b>Beginn</b><br>16.12.2013                       | <b>Ende</b><br>29.02.2016                            | <b>Fördermittel</b><br>EUR 162.404,- |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>University of Cambridge, Cambridge, UK (Department of Physiology, Development and Neuroscience) |                                                   |                                                      |                                      |
| <b>Projektleitung</b><br>Prof. Dr. P. N. Schofield                                                                                    | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. B. Grosche / SG 1 | <b>verantwortlich für den Text</b><br>Dr. B. Grosche |                                      |

## 1. ZIELSETZUNG

Die Bestimmung des strahlenbedingten Risikos sowohl nach Expositionen mit ionisierender als auch nicht-ionisierender Strahlung macht es notwendig, Daten und biologisches Material, die in öffentlich finanzierten Vorhaben gewonnen wurden, der wissenschaftlichen Gemeinschaft für Analysen zur Verfügung zu stellen, die über die in den jeweiligen Vorhaben eigentliche Fragestellung hinaus gehen. Um dies zu ermöglichen wurden in den beiden EU-geförderten Vorhaben ERA-PRO<sup>1)</sup> und STORE<sup>2)</sup>, die beide unter Koordination des BfS durchgeführt wurden, entsprechende Archive erstellt. Während die Datenbank ERA, die aus ERA-PRO hervorgegangen ist, eine statische Datenbank ist, in die keine neuen Daten eingepflegt werden sollen, wurde in dem Vorhaben STORE eine gleichnamige flexible Internet-Plattform entwickelt, die es erlaubt, Daten in unterschiedlichen Formaten oder auch Verweise auf andernorts zur Verfügung stehende Daten und auf Archive biologischen Materials einzustellen. Für eine optimale Nutzung von STORE ist es notwendig, eine einheitliche und international anerkannte Nomenklatur zu verwenden.

Ziel des Vorhabens ist es, die Internet-Plattform STORE, die im Rahmen des genannten EU-Vorhabens von der Universität Cambridge entwickelt wurde, weiter zu entwickeln und schließlich von Cambridge auf Rechner des BfS zu migrieren, damit STORE langfristig der wissenschaftlichen Gemeinschaft zur Verfügung gestellt werden kann.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das Vorhaben ist in vier Arbeitspaketen gegliedert, die aufeinander aufbauen, aber sich teilweise in ihrer zeitlichen Abfolge überlappen. Die Arbeitspakete sind:

- Befragung relevanten Forschergruppen (AP 1)
- Standardisierung der verwendeten Nomenklatur (AP 2)
- DV-technische Umsetzung der Ergebnisse von AP 1 und AP 2 (AP 3)
- Migration von STORE zum BfS (AP 4)
- Präsentation von STORE und Durchführung von Nutzertrainings (AP 5).

### 2.1 BEFRAGUNG RELEVANTER FORSCHERGRUPPEN

Es ist durch Befragung relevanter Forschergruppen aus den Bereichen Strahlenepidemiologie und Strahlenbiologie zu erfassen und inhaltlich umzusetzen, welche Anforderungen und Wünsche hier hinsichtlich der Internet-Plattform bestehen.

### 2.2 STANDARDISIERUNG DER VERWENDETEN NOMENKLATUR

Es ist eine einheitliche, englischsprachige Nomenklatur zu entwickeln. Dies betrifft die Pathologie, die Benennung von Krankheitsdiagnosen und Begriffe der Strahlenbiologie. Bezüglich der Pathologie und der Benennung von Krankheiten ist auf die Nomenklatur zurückzugreifen, die in PATHBASE<sup>3)</sup> und in ERA entwickelt

<sup>1)</sup> Promotion of the European Radiobiological Archives

<sup>2)</sup> sustaining access to tissues and data from radiobiological experiments

wurde. Hinsichtlich der Strahlenbiologie ist ein offenes Nomenklatorsystem zu entwickeln, das erlaubt, die sich laufend erweiternden Bezeichnungen der Strahlenbiologie aufzunehmen.

## **2.3 DV-TECHNISCHE UMSETZUNG DER ERGEBNISSE VON 2.1 UND 2.2**

Die Ergebnisse aus 2.1 und 2.2 sind DV-technisch umzusetzen und die bereits bestehende Struktur von STORE ist entsprechend zu optimieren.

## **2.4 MIGRATION VON STORE ZUM BFS**

Die im Rahmen des Vorhabens weiterentwickelte Internet-Plattform STORE ist so zu erstellen, dass sie auf der IT-Umgebung des BfS eingesetzt werden kann. Die Möglichkeit einer Benutzerverwaltung ist zu realisieren.

## **2.5 PRÄSENTATION VON STORE UND DURCHFÜHRUNG VON NUTZERTRAININGS**

STORE ist auf relevanten internationalen Tagungen vorzustellen. Ferner sind bei Bedarf Trainings bei Nutzern durchzuführen.

# **3. METHODIK**

## **3.1 BEFRAGUNG RELEVANTER FORSCHERGRUPPEN**

Die spezifischen Bedürfnisse und die für Nutzer relevanten Informationen sowohl zum Inhalt als auch zur Benutzeroberfläche werden durch Interviews und durch Nutzer-Workshops erfasst. Die Ergebnisse werden in der Entwicklung von STORE berücksichtigt.

## **3.2 STANDARDISIERUNG DER VERWENDETEN NOMENKLATUR**

Da die Nutzer ihre Daten in annotierter Form einzugeben haben, muss Sorge dafür getragen werden, dass dieses Annotieren standardisiert erfolgt. Dazu ist die verwendete Nomenklatur, die in STORE verwendet und die auf der Benutzeroberfläche vorgegeben wird, so zu standardisieren, dass sie internationalen Begrifflichkeiten entspricht.

## **3.3 DV-TECHNISCHE UMSETZUNG DER ERGEBNISSE VON AP 1 UND AP 2**

Die Ergebnisse aus AP 1 und AP 2 werden kontinuierlich DV-technisch umgesetzt und in der abschließenden Fassung von STORE vollständig realisiert.

## **3.4 MIGRATION VON STORE ZUM BFS**

Nach Abschluss der Arbeiten zu AP 1-3 migriert STORE von der Universität Cambridge ans BfS. IT-seitige Vorgaben des BfS müssen dabei berücksichtigt werden.

## **3.5 PRÄSENTATION VON STORE UND DURCHFÜHRUNG VON NUTZERTRAININGS**

STORE und seine Funktionalitäten sind auf relevanten internationalen Tagungen vorzustellen. Dies kann durch Poster, Vorträge oder Workshops geschehen. Sollten Nutzer bei der Anwendung von STORE Unterstützung benötigen, so wird diese in Form von Trainingseinheiten vor Ort zur Verfügung gestellt.

# **4. DURCHFÜHRUNG**

Die Durchführung des Vorhabens erfolgt entsprechend den Arbeitspaketen, wobei AP 1-3 teilweise parallel durchgeführt werden, während AP 4 nach Abschluss der anderen Arbeitspakete erfolgt.

---

<sup>3)</sup> European mutant mouse pathology database

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 BEFRAGUNG RELEVANTER FORSCHERGRUPPEN

Im Jahre 2014 wurden Konsultationstreffen mit Wissenschaftlern von CREAL<sup>1)</sup>, Spanien, und bei PHE<sup>2)</sup>, Großbritannien, CEA<sup>3)</sup>, Frankreich, und NIRS<sup>4)</sup>, Japan, durchgeführt. 2015 wurden darüber hinaus Gespräche mit Wissenschaftlern aus dem Bereich der Radioökologie und der Zytogenetik (EU-Projekt RENEB<sup>5)</sup>) geführt, da auch hier der Wunsch besteht, STORE nutzen zu können.

### 5.2 STANDARDISIERUNG DER VERWENDETEN NOMENKLATUR

Die Arbeiten zur Standardisierung wurden weitestgehend 2014 abgeschlossen. Sie umfassten folgende Aspekte:

Die von Nature Publication Group (NPG) neu herausgegebene Zeitschrift Scientific data enthält einen Standard für die Beschreibung von Daten und Datensätzen, der mit dem in STORE verwendeten konvergiert. Da der NPG-Standard für Metadaten auch ORCID<sup>6)</sup>-IDs für Forscher enthält, wurden die Möglichkeit für diese IDs auch in STORE integriert. ORCID-IDs erlauben die zweifelsfreie Zuordnung von Forschern zu deren Daten. Dies ist für eventuelle Nachfragen zu einzelnen Datensätzen hilfreich.

Gemeinsam mit den Kuratoren von PATO, der Phenotype and Trait Ontology and the Units Ontology, wurde die in STORE verwendete Ontologie mit der allgemein gebräuchlichen Ontologie verglichen. Dabei wurde die von PATO verwendete Ontologie um Begrifflichkeiten aus dem Bereich der Strahlung ergänzt und eine Kongruenz zwischen den beiden Ontologien hergestellt, so dass die beschreibenden Metadaten, die in STORE verwendet werden, direkt aus PATO bezogen werden können. Die stellt eine weitest mögliche Standardisierung der Nomenklatur dar.

### 5.3 DV-TECHNISCHE UMSETZUNG DER ERGEBNISSE VON AP 1 UND AP 2

Die DV-technischen Umsetzung der Ergebnisse aus AP 1 und AP 2 wurde abgeschlossen. Die Benutzeroberfläche wurde entsprechend angepasst und neu gestaltet.

### 5.4 MIGRATION VON STORE ZUM BFS

Am 5. Mai 2015 fand eine Sitzung im BfS statt, auf der abschließend die IT-seitigen Anforderungen des BfS definiert wurden. STORE läuft jetzt zu Testzwecken auf dem BfS-Server.

### 5.5 PRÄSENTATION VON STORE UND DURCHFÜHRUNG VON NUTZERTRAININGS

Ende April 2015 wurde STORE auf einem Workshop des EU-Vorhabens DoReMi vorgestellt.

Am 4. Mai 2015 fanden in den Räumen des BfS eine Präsentation von STORE und ein Nutzertraining statt mit dem Ziel, STOREs Funktionalität sowie mögliche Verbesserungen zu diskutieren.

Ende Mai wurde STORE auf der ICRR-Tagung in Kyoto präsentiert. Am Rande dieser Tagung wurde der Workshop STAR2015 zur Nutzung von Archiven durchgeführt. STORE nahm hier eine herausgehobene Stellung ein. Außerdem wurde der Stand des Vorhabens mit den externen Beratern Gayle Woloschak (Chicago, USA) und Shin Saigusa (Chiba, Japan) diskutiert.

Am 9. Oktober 2015 wurde bei CIEMAT<sup>7)</sup>, Madrid, erfolgreich über die Möglichkeiten der Nutzung von STORE für die Radioökologie diskutiert.

Im November 2015 wurde STORE auf dem MELODI<sup>8)</sup>-Workshop in Neuherberg vorgestellt. Im Anschluss an den Workshop wurde STORE möglichen Nutzern aus dem Bereich der Zytogenetik vorgestellt. Dies geschah im Zusammenhang mit dem Vorhaben RENEB. Seitens RENEB wird ebenfalls eine Nutzungsmöglichkeit von STORE gesehen.

<sup>1)</sup> Centre de Recerca en Epidemiologia Ambiental

<sup>2)</sup> Public Health England

<sup>3)</sup> Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies

<sup>4)</sup> National Institute of Radiological Science

<sup>5)</sup> Realizing the European Network of Biodosimetry

<sup>6)</sup> Open Researcher and Contributor ID

<sup>7)</sup> Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

<sup>8)</sup> Multidisciplinary European Low Dose Initiative

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Testphase von STORE auf dem Server des BfS wird abgeschlossen und STORE wird dann der wissenschaftlichen Gemeinschaft vom BfS aus zur Verfügung gestellt werden.

Die sich bei der Durchführung des Vorhabens gezeigten Wünsche der Zytogenetik und der Radioökologie können in diesem Vorhaben selbst nicht berücksichtigt werden. Dies wird im Rahmen des EU-Vorhabens CONCERT<sup>1)</sup> geschehen.

---

<sup>1)</sup> European Joint Programme for the Integration of Radiation Protection Research

**Thema**

Überarbeitung der Strahlenschutzverordnung bez. der Regelungen zur Freigabe künstlicher radioaktiver Stoffe zur Umsetzung der neuen Euratom-Grundnormen in deutsches Recht - Konzept zur Umsetzung

**Subject**

*Revision of the radiation protection ordinance with respect to clearance of material with artificial contamination for the transposition of the new EURATOM Basic Safety Standards into German legislation - concept for implementation*

**Kennzeichen**

3614R03520

**Beginn**

01.09.2014

**Ende**

31.08.2016

**Fördermittel**

EUR 128.782,-

**Forschungs- / Auftragnehmer**

Brenk Systemplanung GmbH, Aachen

**Projektleitung**

Dr. S. Thierfeldt

**Fachbetreuung BfS**

Dr. R. Merk / SW 1.6

**verantwortlich für den Text**

Dr. S. Thierfeldt, Dr. R. Kunz

## 1. ZIELSETZUNG

Bedingt durch die im Dezember 2013 erfolgte Verabschiedung der neuen europäischen Grundnormen im Strahlenschutz (Euratom-Grundnormen, Richtlinie 2013/59/Euratom des Rates vom 5. Dezember 2013) wird sich in Deutschland eine Neustrukturierung des Strahlenschutzrechts ergeben. Die Thematik ist insofern besonders in Deutschland von Bedeutung, als sie zeitlich mit dem Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie zusammenfällt. Der Rückbau kerntechnischer Anlagen wird auch zu großen Mengen potenziell freigebbaren Materials führen. In den Euratom-Grundnormen ist für die Freigrenzen und die uneingeschränkte Freigabe ein gemeinsamer Wertesatz vorgesehen. Die Zahlenwerte basieren auf den Empfehlungen SR 44 (Safety Reports Series No. 44) und RS-G-1.7 (Safety Guide No. RS-G-1.7) der IAEA.

Deutschland hat mit den derzeitigen Regelungen in § 29 i. V. m. Anl. III und IV StrlSchV sehr detaillierte Regelungen zur zweckgerichteten Freigabe. Die Euratom-Grundnormen sehen neben den konkreten Regelungen für die uneingeschränkte Freigabe auch die Beibehaltung der zweckgerichteten Freigabe in den Mitgliedsstaaten vor. Dieses Forschungsvorhaben (FV) untersucht, ob die in Deutschland vorhandenen Regelungen zur zweckgerichteten Freigabe kompatibel sind mit den Vorgaben der Euratom-Grundnormen.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 PRÜFUNG DER FREIGABEWERTE DER ANL. III TAB. 1 SP. 10A STRLSCHV

In diesem Punkt wird geprüft, ob die bei der Freigabe von Metall zum Einschmelzen entstehenden Stoffe (Produktmetall sowie die Nebenprodukte Schlacke und Staub) in der in Abschnitt 1 beschriebenen Weise kompatibel zu den neuen Freigrenzen der Euratom-Grundnormen sind. Sofern Konflikte identifiziert werden, werden diese benannt und es wird untersucht, wie Kompatibilität wiederhergestellt werden kann.

### 2.2 WERTE ZUR UNEINGESCHRÄNKTEN FREIGABE VON BAUSCHUTT, BODENAUSHUB, BODENFLÄCHEN UND GEBÄUDEN

In diesem Punkt erfolgt eine analoge Prüfung zu Punkt 2.1 bez. der Kompatibilität der Materialien aus der Freigabe von Bauschutt und Bodenaushub unter Anwendung der Freigabewerte (FGW) nach Anl. III Tab. 1 Sp. 6 StrlSchV, der Freigabe von Bodenflächen unter Anwendung der Freigabewerte nach Anl. III Tab. 1 Sp. 7 StrlSchV und des Bauschutts, der aus dem Abriss von Gebäuden anfällt, die unter Anwendung der FGW nach Anl. III Tab. 1 Sp. 10 StrlSchV freigegeben wurden.

### 2.3 FREIGABE VON FLÜSSIGKEITEN

Gegenstand dieses letzten Punkts ist zunächst die Prüfung der Entwicklung abdeckender Szenarien für die Freigabe von Flüssigkeiten (im Unterschied zu Ableitungen im Sinne von § 44 StrlSchV). Im Unterschied zu den bestehenden Freigaberegungen gem. § 29 Abs. 2 StrlSchV für nicht-wässrige Flüssigkeiten sollen auch Flüssigkeiten auf Wasserbasis (wie z. B. verdünnte Säuren oder Laugen) betrachtet werden, da es hierbei zu

Aufkonzentrationen kommen kann. Sofern es gelingt, abdeckende Szenarien für solche Flüssigkeiten zu erstellen, erfolgt anschließend ein Vergleich von auf dieser Basis neu entwickelten abdeckenden FGW mit den neuen Freigrenzen der Euratom-Grundnormen.

### 3. METHODIK

#### 3.1 PRÜFUNG DER FREIGABEWERTE DER ANL. III TAB. 1 SP. 10A STRLSCHV

Zur Berechnung wird zunächst untersucht, für welche Radionuklide und unter welchen Bedingungen es bei Anwendung der FGW in Anl. III Tab. 1 Sp. 10a StrlSchV und sämtlicher in Anl. IV Teile A und G StrlSchV formulierten Randbedingungen zu einer Überschreitung der neuen Freigrenzen der Euratom-Grundnormen im Schmelzgut (Produkt) kommen kann. Hierbei wird in mehreren Stufen vorgegangen:

- Die FGW nach Sp. 10a werden direkt mit den neuen Freigrenzen für jedes Nuklid verglichen.
- Für die verbleibenden Nuklide wird der Vermischungsfaktor 1:10 nach Anl. IV Teil G Nr. 3 StrlSchV berücksichtigt.
- Für die verbleibenden Nuklide wird untersucht, ob ihre Aktivität als Bestandteil von Nuklidvektoren für die massenmäßig bedeutsamen Stoffströme der Freigabe aus Kernkraftwerken durch die Aktivität von Schlüsselnucliden begrenzt ist (Bsp.: Ni-63 kann seinen hohen Freigabewert nie ausschöpfen, da es mit Co-60 korreliert ist).
- Für dieselben Nuklide erfolgt bei Herkunft aus nach § 7 StrlSchV genehmigtem Umgang eine Untersuchung der maximal vorliegenden Massen und ein Vergleich mit den Grundannahmen des radiologischen Modells für die Exposition und der Ausschöpfung des Dosisrichtwerts 10  $\mu\text{Sv/a}$ .
- Für die immer noch verbleibenden Nuklide wird untersucht, welche Konservativitäten durch die Messverfahren gem. DIN 25457 Teile 1 und 4 entstehen. Derartige Konservativitäten führen dazu, dass der nominelle Ausschöpfungsgrad der FGW durch die real vorhandene Aktivität zwangsläufig deutlich unterschritten wird. Ist der sich ergebende Wert der real höchstens vorhandenen Aktivität niedriger als die Freigrenze, besteht für das betreffende Nuklid kein Konflikt.

Nach Durchlaufen dieses mehrstufigen Verfahrens kann entschieden werden, ob Nuklide existieren, für die ein Konflikt mit den neuen Freigrenzen auftreten könnte.

#### 3.2 WERTE ZUR UNEINGESCHRÄNKTEN FREIGABE VON BAUSCHUTT, BODENAUSHUB, BODENFLÄCHEN UND GEBÄUDEN

Für Bauschutt und Bodenaushub sowie Bodenflächen gem. Punkt 2.2 erfolgt eine völlig analoge Untersuchung, wie sie für Metallschrott in Punkt 3.1 dargestellt wurde, unter Einbeziehung der jeweiligen Randbedingungen nach Anl. IV Teile A, F bzw. E StrlSchV.

Auch für Gebäude zum Abriss bzw. für daraus hervorgehenden Bauschutt erfolgt eine analoge Untersuchung unter Einbeziehung der jeweiligen Randbedingungen nach Anl. IV Teil D und Umrechnung von flächenbezogen angegebenen FGW in massenbezogene Werte analog zur Formel in Anl. IV Teil E Nr. 5, so dass ein Vergleich der Werte überhaupt möglich ist.

#### 3.3 FREIGABE VON FLÜSSIGKEITEN

Die Aufstellung abdeckender Szenarien für (alle Arten von) Flüssigkeiten erfolgt analog zur Vorgehensweise in RP 65, RP 122 Teil 1 oder SR 44, indem versucht wird, einige wenige abdeckende Szenarien zu finden, die alle Expositionsmöglichkeiten (externe Bestrahlung, direkte und ggf. Sekundär-Ingestion, Inhalation und ggf. Hautkontamination) abdeckend beschreiben. Hierbei werden auch Aufkonzentrationen und Filtrationen berücksichtigt. Sofern ein solcher Szenariensatz erstellt werden kann, werden FGW auf Basis eines Richtwerts von 10  $\mu\text{Sv/a}$  für die effektive Individualdosis in gleicher Weise wie in den genannten Untersuchungen berechnet.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 PRÜFUNG DER FREIGABEWERTE DER ANL. III TAB. 1 SP. 10A STRLSCHV

Die Prüfung für den Satz der FGW der Anl. III Tab. 1 Sp. 10a StrlSchV zur Metallrezyklierung wurde durchgeführt. Hierbei wurde der - ggf. bei Aufgabenstellung und in der Anfangsphase des Vorhabens nicht ausreichend gewürdigte - Umstand berücksichtigt, dass SR 44 sowie RS-G-1.7 und somit auch die neuen Euratom-Grundnormen nicht davon ausgehen, dass die Nebenprodukte Schlacke und Staub aus dem Einschmelzvorgang je die berechneten Freigrenzen unterschreiten könnten. Vielmehr wird hierbei das jeweils individuelle Aufkonzentrationsverhalten aller Radionuklide in beiden Stoffen durch Auswertung der Massenteile im Schmelzprozess sowie der Partitionierungsfaktoren in vollem Umfang berücksichtigt und in die Modellierung bez. des Dosisrichtwerts  $10 \mu\text{Sv/a}$  einbezogen. Es ist somit aus den Szenarien in SR 44 sowie RS-G-1.7 intrinsischen Gründen nicht möglich zu zeigen, dass für alle Radionuklide die Aktivität in Schlacken und Stäuben die neuen Freigrenzen der Euratom-Grundnormen unterschreiten würde.

### 4.2 WERTE ZUR UNEINGESCHRÄNKTEN FREIGABE VON BAUSCHUTT, BODENAUSHUB, BODENFLÄCHEN UND GEBÄUDEN

Die Betrachtung und Modellierung der FGW für Bauschutt wurde unter Anwendung der in Punkt 3.2 genannten Methodik durchgeführt und abgeschlossen. Wegen der Gleichartigkeit der radiologischen Modelle erfolgte die Gruppierung der Arbeiten dabei wie folgt:

- Behandlung der uneingeschränkten Freigabe von Bauschutt und Bodenaushub sowie von Gebäuden gemeinsam mit der Freigabe von Gebäuden zum Abriss,
- Behandlung der Freigabe von Bodenflächen separat.

Beide Gruppen von Freigaben wurden in einem gemeinsamen Bericht behandelt. Die Vorgehensweise zur Bewertung erfolgte jeweils in einem mehrstufigen Prozess:

- Bauschutt und Gebäude: Zunächst wurden FGW für Radionuklide, für die in den Spalten 6, 8 und 10 keine FGW vorliegen, die aber für diese Freigabeoptionen relevant sind, anhand der identischen Szenarien ergänzt, die auch für die generische Berechnung verwendet wurden. Im nächsten Schritt wurden die Wertesätze der genannten FGW mit den neuen Freigrenzen unmittelbar verglichen. Geeignete Abklingzeiten wurden berücksichtigt. In einem weiteren Schritt wurden für diejenigen Radionuklide, für die nicht bereits im vorherigen Schritt Kompatibilität gezeigt werden konnte, berücksichtigt, dass diese nur in bestimmten maximalen Anteilen in Nuklidvektoren auftreten können oder aber in nur vergleichsweise geringen Mengen auftreten können.
- Bodenflächen: Die Vorgehensweise bestand analog derjenigen bei Bauschutt und Gebäuden aus der Ergänzung fehlender FGW, gefolgt von einem unmittelbaren Vergleich der Wertesätze und der Berücksichtigung weiterer Randbedingungen für diejenigen Radionuklide, für die nicht unmittelbar Kompatibilität gezeigt werden konnte.

### 4.3 FREIGABE VON FLÜSSIGKEITEN

Mit der Erstellung einer Übersicht von wässrigen Flüssigkeiten, die in die Modellierung einbezogen werden müssen, wurde begonnen. Auf dieser Basis wurde ebenfalls mit der Erstellung von hierfür geeigneten Szenarien begonnen.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 PRÜFUNG DER FREIGABEWERTE DER ANL. III TAB. 1 SP. 10A STRLSCHV

In dem in Punkt 3.1 genannten mehrstufigen Verfahren konnte dargestellt werden, dass für kein Radionuklid bei Freigabe unter Anwendung der FGW nach Anl. III Tab. 1 Sp. 10a StrlSchV ein Konflikt mit den neuen Freigrenzen besteht. Es sind daher aus radiologischer Sicht weder Anpassungen der FGW der Sp. 10a noch der Randbedingungen in Anl. IV Teil G notwendig.

### 5.2 WERTE ZUR UNEINGESCHRÄNKTEN FREIGABE VON BAUSCHUTT, BODENAUSHUB, BODENFLÄCHEN UND GEBÄUDEN

Für die Freigabe von Bauschutt und Gebäuden wurden folgende Ergebnisse ermittelt:

- Nach Betrachtung der beiden ersten Stufen des Vergleichs (direkter Vergleich sowie Berücksichtigung des Nuklidvektors) ergibt sich für die überwiegende Anzahl von 268 der insgesamt 311 betrachteten Radionuklide und Zerfallsreihen die Kompatibilität der FGW nach Anl. III Tab. 1 Sp. 6, 8 und 10 mit den neuen Freigrenzen nach Anh. VII Tab. A Euratom-Grundnormen.
- Für die restlichen lediglich 43 Radionuklide erfolgte im Rahmen der Stufe 3 des Vergleichs eine detaillierte Einzelfallbetrachtung. Hierbei konnte für alle Radionuklide Kompatibilität auf Grund verschiedener Argumentationslinien gezeigt werden.

Für Bodenflächen ergab sich für die überwiegende Anzahl der Radionuklide, für welche FGW in Anl. III Tab. 1 Sp. 7 StrlSchV existieren, unmittelbar Kompatibilität zu den neuen Freigrenzen nach Anh. VII Tab. A Euratom-Grundnormen. Für lediglich 3 Radionuklide gilt dies nicht unmittelbar. Für diese lässt sich die Kompatibilität über Rundungsbetrachtungen bzw. Berücksichtigung des Schlüsselnuklids Cs-137+ zeigen.

Es ergeben sich somit keine Widersprüche zwischen der Anwendung der Freigabewerte nach Anl. III Tab. 1 Sp. 6, 8, 7 und 10 StrlSchV und den neuen Freigrenzen nach Anh. VII Tab. A der Euratom-Grundnormen. Eine Einschränkung bei der Anwendung der genannten Freigabewerte ist daher auch zukünftig aus radiologischer Sicht nicht erforderlich.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Weiterarbeit in der verbleibenden Laufzeit des Vorhabens wird sich in Übereinstimmung mit dem Zeitplan auf die Betrachtung der Freigabe von Flüssigkeiten (Einzelziel 2.3) beziehen.

|                                                                                                                                               |                                                    |                                                 |                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Thema</b><br>Überarbeitung von technischen Strahlenschutznormen aus dem Bereich des Normenausschuss Materialprüfung (NMP)                  |                                                    |                                                 |                                      |
| <b>Subject</b><br><i>Revision of technical radiation protection standards in the range of the Materials Testing Standards Committee (NMP)</i> |                                                    |                                                 |                                      |
| <b>Kennzeichen</b><br>3614S70005                                                                                                              | <b>Beginn</b><br>02.12.2014                        | <b>Ende</b><br>30.09.2017                       | <b>Fördermittel</b><br>EUR 179.577,- |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>DIN Deutsches Institut e. V., Berlin                                                                    |                                                    |                                                 |                                      |
| <b>Projektleitung</b><br>V. Seibicke                                                                                                          | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>U. Häusler / AG-SG 2.6 | <b>verantwortlich für den Text</b><br>M. Treige |                                      |

## 1. ZIELSETZUNG

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

## 2. EINZELZIELSETZUNG

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

- Normen der Reihe DIN 25409: „Fernbedienungsgeräte zum Arbeiten hinter Schutzwänden“ (9 Teile)
- DIN 25483: „Verfahren zur Umgebungsüberwachung mit integrierenden Festkörperdosimetern“
- Normen der Reihe DIN 25488: „Komponenten für Heiße Zellen“ (2 Teile)
- Normen der Reihe DIN 54113: „Zerstörungsfreie Prüfung - Strahlenschutzregeln für die technische Anwendung von Röntgeneinrichtungen bis 1 MV“ (3 Teile)

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

## 3. METHODIK

Die zu prüfenden Normen werden existierenden Arbeitsausschüssen des DIN-Normenausschuss 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 4 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 vom 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 wird in folgenden Schritten durchgeführt:

1. Die Normen wurden den folgenden Arbeitsausschüssen zugeordnet:
  - Normen der Reihe DIN 25409 NA 062-07-62 AA „Strahlenschutzeinrichtungen“
  - DIN 25483 NA 062-07-63 AA „Radionuklidlaboratorien“
  - Normen der Reihe DIN 25488 NA 062-07-62 AA „Strahlenschutzeinrichtungen“
  - Normen der Reihe DIN 54113 NA 062-08-22 AA „Durchstrahlungsprüfung und Strahlenschutz“ bzw. NA 062-07-47 AA „Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) in der Kerntechnik“
2. Die Arbeitsausschusssitzungen werden durchgeführt (bis zu 3 Termine pro Jahr) und die vergebenen Aufgaben nachverfolgt. Je nach Beschluss werden Vorlagen für die Überarbeitung erstellt und dann als Manuskript zum Norm-Entwurf verabschiedet. In der Geschäftsstelle erfolgt dann die Drucklegung der Texte und Veröffentlichung als Norm-Entwurf.
3. Nach Ablauf der Einspruchsfrist wird die Einspruchsverhandlung durchgeführt. Sind alle Einsprüche behandelt, wird eine Vorlage zur Norm erstellt und als Manuskript zum Druck als Norm verabschiedet. In der Geschäftsstelle erfolgt die Schlussbearbeitung und die Drucklegung bzw. Veröffentlichung als Norm.
4. Auf den Sitzungen der Arbeitsausschüsse werden die internationalen Themen besprochen und in die Normüberarbeitung mit einbezogen.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 ZU DEN NORMEN DER REIHE DIN 25409

Der zuständige Ausschuss hat beschlossen, die Normen der Reihe DIN 25409 zu überarbeiten, da hier der Stand der Technik nicht mehr sichergestellt war. Die Norm-Entwürfe zu DIN 25409-1 bis DIN 25409-8 und zum Beiblatt 1 sind mit Ausgabedatum Februar 2015 (Erscheinungsdatum 2015-01-16) erschienen und die Einspruchsfrist endete am 2015-05-16. Die Einspruchssitzung wurde am 8. Juli 2015 durchgeführt. Die Dokumente (außer zu Teil 7) wurden mit den auf der Sitzung besprochenen Änderungen zur Veröffentlichung als Norm verabschiedet. Die Veröffentlichungsmanuskripte wurden erstellt und dem Obmann zur Freigabe zugeschickt. Die Freigabe erfolgte im Oktober 2015. Die Normen DIN 25409-1 bis DIN 25409-6 und DIN 25409-8 und das zugehörige Beiblatt DIN 25409 Beiblatt 1 wurden mit Ausgabe Dezember 2015 veröffentlicht.

DIN 25409-7 musste zurückgestellt werden, da sich ein Einspruch nicht ohne die Befragung weiterer Experten klären ließ. Die Verabschiedung zur Norm erfolgte auf schriftlichem Weg. Das Manuskript zur Norm wurde ohne weitere Verzögerung eingereicht und ist mit Ausgabe Januar 2016 erschienen.

Die Überarbeitung der Normen der Reihe DIN 25409 ist damit abgeschlossen.

### 5.2 ZU DER NORM DIN 25483

Die Norm wurde im zuständigen Arbeitsausschuss verteilt und es wurde um Stellungnahmen gebeten. Der Ausschuss hat beschlossen, die Norm zu überarbeiten, da sie nicht mehr den Stand der Technik darstellt.

Der Arbeitsausschuss traf sich zu seiner ersten Sitzung zu diesem Thema am 5. Februar 2015. Auf dieser Sitzung wurde das weitere Vorgehen zur Überarbeitung der Norm (Zeitplan, Projektpaten, zu erledigende Aufgaben der Experten und der Geschäftsstelle) festgelegt. Es wurde ebenfalls festgestellt, dass für eine Überarbeitung weitere Experten hinzugezogen werden müssen. Anfragen bei der DKE<sup>1)</sup> und NAR<sup>2)</sup> haben zur Meldung weiterer Experten geführt. Diese wurden zur 2. Sitzung am 12. Mai 2015 eingeladen. Auf der Sitzung wurden die wichtigsten Änderungen durchgesprochen. Eine AG sollte bis zur nächsten Sitzung (5. Oktober 2015) einen Text für den Norm-Entwurf erstellen, der dann zum Norm-Entwurf verabschiedet hätte werden können. Die AG hatte sich bereits zweimal getroffen, konnte aber am 5. Oktober keinen Änderungsentwurf vorlegen, da festgestellt wurde, dass die Überarbeitung tiefgreifender erfolgen muss als bisher geplant. Es sind weitere Treffen der AG erforderlich. Der Entwurf soll nun auf der Februar-Sitzung des Ausschusses vor-

---

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

<sup>2)</sup> Normenausschuss Radiologie

gestellt und verabschiedet werden. Damit wäre eine Veröffentlichung als Norm-Entwurf mit Ausgabe Mai 2016 möglich. Die Veröffentlichung der Norm wird dann für Ende 2016 geplant.

### **5.3 ZU DEN NORMEN DER REIHE DIN 25488**

Die beiden Normen der Reihe DIN 25488 standen im Jahr 2015 zur Überprüfung an und wurden in diesem Rahmen auf der Sitzung des Arbeitsausschusses NA 062-07-62 AA -Strahlenschutzeinrichtungen überprüft. Die entsprechenden Dokumente wurden zur Kommentierung verteilt. Die Beschlussfassung zum weiteren Vorgehen sollte auf der Sitzung am 8. Juli 2015 erfolgen. Da die Fertigstellung der Normenreihe DIN 25409 vorrangig behandelt wurde, war der Tagesordnungspunkt auf die nächste Sitzung (16. Dezember 2015) verschoben worden. Auf der letztgenannten Sitzung wurde beschlossen, den Teil 1 zu überarbeiten, zu Teil 2 ist die Entscheidung noch offen. Es wird derzeit diskutiert, die Inhalte von Teil 2 in den Teil 1 zu integrieren. Die Norm soll innerhalb von maximal 18 Monaten überarbeitet werden, ein Manuskript zum Norm-Entwurf liegt bereits vor. Der Norm-Entwurf sollte mit Ausgabe 2016-05 veröffentlicht werden. Die Veröffentlichung als Norm wird dann für Ende 2016 geplant.

### **5.4 ZU DEN NORMEN DER REIHE DIN 54113**

Auf der Sitzung des NA 062-08-22 AA - Durchstrahlungsprüfung und Strahlenschutz am 2. September 2014 wurde die Überarbeitung der Normenreihe beschlossen. Die Überarbeitung soll in Zusammenarbeit mit dem NAA 062-07-47 AA „ZfP in der Kerntechnik“ erfolgen unter Federführung des NA 062-07-47 AA. Auf der Sitzung des NA 062-07-47 AA am 18. Februar 2015 wurde das weitere Vorgehen zur Überarbeitung der Norm (Zeitplan, Projektpaten, zu erledigende Aufgaben der Experten und der Geschäftsstelle) festgelegt. Es wurde eine Arbeitsgruppe gegründet, die selbständig die Manuskripte für die anstehenden Norm-Entwürfe erarbeiten soll. Auf der Sitzung am 12.01.2016 wurde beschlossen, Teil 1 in der von der AG vorgeschlagenen Weise zu überarbeiten, das Manuskript für den Norm-Entwurf wird im Umlauf verabschiedet. Die Norm soll in maximal 18 Monaten überarbeitet werden. Ziel ist es den Entwurf zu Teil 1 mit Ausgabe Juni zu veröffentlichen. Der Teil 2 wird zurückgezogen, da dessen Inhalte in Teil 1 aufgehen werden. Für Teil 3 konnte noch kein weiteres Vorgehen beschlossen werden. Um die in dieser Norm angegebenen Werte bestätigen zu können, sind voraussichtlich einige Versuchsreihen durchzuführen. Hier wird im Ausschuss noch geklärt, inwieweit dies vom Ausschuss durchführbar ist.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Die Arbeiten zu DIN 25409 sind mit Veröffentlichung der 9 Teile abgeschlossen. Die Arbeiten an DIN 25483 und DIN 25488 werden fortgesetzt und entsprechende Veröffentlichungen für 2016 vorbereitet. Die Arbeiten an DIN 54113-1 werden fortgesetzt und die Veröffentlichung ist in 2016 geplant. Die Fortgang der Überarbeitung oder die Zurückziehung von DIN 54113-3 ist abhängig von den Ergebnissen der Untersuchungen zur Verlässlichkeit der in Teil 3 angegebenen Werte.

|                                                                                                                                                                                                               |                                                  |                           |                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <b>Thema</b>                                                                                                                                                                                                  |                                                  |                           |                                                                      |
| Überarbeitung der Strahlenschutzverordnung bez. der Freigrenzen von radioaktiven Stoffen zur Umsetzung der neuen EURATOM-Grundnormen in deutsches Recht                                                       |                                                  |                           |                                                                      |
| <b>Subject</b>                                                                                                                                                                                                |                                                  |                           |                                                                      |
| <i>Revision of the radiation protection ordinance with respect to the exemption values for radioactive substances for the transposition of the new EURATOM Basic Safety Standards into German legislation</i> |                                                  |                           |                                                                      |
| <b>Kennzeichen</b><br>3614S70051                                                                                                                                                                              | <b>Beginn</b><br>01.08.2014                      | <b>Ende</b><br>31.07.2017 | <b>Fördermittel</b><br>EUR 220.174,-                                 |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Brenk Systemplanung GmbH, Aachen                                                                                                                                        |                                                  |                           |                                                                      |
| <b>Projektleitung</b><br>Dr. S. Thierfeldt                                                                                                                                                                    | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. R. Merk / SW 1.6 |                           | <b>verantwortlich für den Text</b><br>Dr. S. Thierfeldt, Dr. R. Kunz |

## 1. ZIELSETZUNG

Auf Grund der im Dezember 2013 erfolgten Verabschiedung der neuen europäischen Grundnormen im Strahlenschutz (Euratom-Grundnormen) wird sich in Deutschland eine Neustrukturierung des Strahlenschutzrechts ergeben. In den Euratom-Grundnormen ist für die Freigrenzen und die Freigabewerte ein gemeinsamer Wertesatz vorgesehen, der auf den Empfehlungen Safety Guide RS-G-1.7 und Safety Report 44 (SR 44) der IAEA basiert. Für Radionuklide, für die in den Euratom-Grundnormen keine Freigrenzen bereitgestellt werden, sollen im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens (FV) solche in der gleichen Weise wie SR 44 der IAEA abgeleitet werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 BERECHNUNG NEUER FREIGRENZEN UND VERGLEICH

Da die Berechnung von Freigrenzen in SR 44 nur für solche Radionuklide erfolgte, für die auch in den gegenwärtigen Grundnormen der IAEA Freigrenzen existieren (im Wesentlichen der Satz von Freigrenzen der Empfehlung RP 65 der Europäischen Kommission), enthalten die neuen Euratom-Grundnormen ebenfalls nur Freigrenzen bzw. Freigabewerte für ca. 250 Radionuklide. Dieses FV erweitert den Satz von Freigrenzen bzw. Freigabewerten auf die vollständige Liste der Anl. III Tab. 1 StrlSchV (ca. 800 Radionuklide).

### 2.2 UNTERSUCHUNG VON FACHLICHEN RANDBEDINGUNGEN

Zu den fachlichen Randbedingungen gehört die Rolle der natürlich vorkommenden Radionuklide, die in SR 44 und RS-G-1.7 nur pauschal mit nicht auf Szenarien basierten Freigrenzen/Freigabewerten von 10 Bq/g bzw. 1 Bq/g aufgeführt sind, die Betrachtung des zweiten Szenariensatzes, der sog. „Low-probability“-Szenarien in SR 44, die Untersuchung der Behandlung verschiedener Stoffsorten, insbesondere flüssiger Abfälle, in den Szenarien, und die Behandlung der Tochternuklide bei der Berechnung der Freigrenzen/Freigabewerte.

### 2.3 ANALYSE DER KONSEQUENZEN EINER ANWENDUNG NEUER FREIGRENZEN

Die Analyse der Konsequenzen einer Anwendung neuer Freigrenzen bezieht sich insbesondere auf die Bewertung der Auswirkungen des neuen Satzes von Freigrenzen der Euratom-Grundnormen auf die Vollzugspraxis, d. h. wie sich der bisherige operationelle oder administrative Aufwand im Bereich der Industrie sowie der Medizin und Forschung darstellt und mit welchem Aufwand künftig zu rechnen wäre. Des Weiteren bezieht sich diese Analyse auf den Umgang mit Funden radioaktiver Stoffe im Sinne von § 71 StrlSchV.

### 2.4 PRÜFUNG DER DEN BISHERIGEN WERTEN ZU GRUNDE LIEGENDEN SZENARIEN

In diesem Rahmen wird die chronologische und fachliche Entwicklung der bisherigen Expositionsszenarien zu Freigrenzen und zur uneingeschränkten Freigabe zusammengetragen und erläutert. Analog wird die parallel verlaufende Entwicklung der rechtlichen Situation in Deutschland zusammengetragen. Die Expositions-

szenarien in diesem Zusammenhang werden mit denjenigen aus den SR 44 und RP 65 verglichen und es werden evtl. Inkonsistenzen herausgearbeitet. In diesem Fall wird geprüft, ob durch die Umsetzung der Euratom-Grundnormen Abhilfe geschaffen werden kann oder ob weitere Ergänzungen zu den Regelungen der EU-Grundnormen im neuen Strahlenschutzrecht erforderlich wären.

### **3. METHODIK**

#### **3.1 BERECHNUNG NEUER FREIGRENZEN UND VERGLEICH**

Die Berechnung des vollständigen Satzes von Freigrenzen erfolgt zur Sicherstellung der Kontinuität der Werte mit exakt denselben Szenarien, Parameterwerten und Randbedingungen, die auch in SR 44 angewendet wurden.

#### **3.2 UNTERSUCHUNG VON FACHLICHEN RANDBEDINGUNGEN**

Die in 2.2 genannten fachlichen Randbedingungen werden z. T. durch Vergleich von Szenarien und Parametern für die beiden Sätze von Szenarien, z. T. durch Untersuchung von erweiternden Szenarien für weitere Stoffsorten untersucht. Für die Diskussion des Begriffs „moderate quantities“ erfolgt eine Sichtung aller vorliegenden Primärliteratur sowie die Analyse der den betreffenden Szenarien zu Grunde liegenden Annahmen (Parameter).

#### **3.3 ANALYSE DER KONSEQUENZEN EINER ANWENDUNG NEUER FREIGRENZEN**

Zur Analyse der Konsequenzen einer Anwendung neuer Freigrenzen erfolgt die Abfrage der Auswirkungen der in 2.3 genannten Änderungen in verschiedenen Bereichen, in denen genehmigter Umgang mit Radionukliden erfolgt bzw. in denen eine Freistellung von einer solchen Genehmigung erfolgte. Insbesondere wird erfragt, ob sich die Notwendigkeit der Genehmigung bzw. die Freistellung auf Grund massenbezogener Freigrenzen oder der Freigrenzen für die Gesamtaktivität ergibt. Daneben werden die typischen Funde radioaktiver Stoffe im Sinne von § 71 StrlSchV analysiert und der Aktivitätsgehalt von Gegenständen des täglichen Bedarfs im Hinblick auf evtl. Überschreitungen der neuen Freigrenzen der Euratom-Grundnormen untersucht.

#### **3.4 PRÜFUNG DER DEN BISHERIGEN WERTEN ZU GRUNDE LIEGENDEN SZENARIEN**

Zu diesem Punkt erfolgen im Wesentlichen eine Durchsicht aller Szenarien und ein Vergleich der Parameterwerte, jeweils unter Berücksichtigung des Geltungsbereichs.

### **4. DURCHFÜHRUNG**

#### **4.1 BERECHNUNG NEUER FREIGRENZEN UND VERGLEICH**

Die Arbeiten zu Punkt 2.1 wurden vollständig durchgeführt. Ein vollständiger Satz von Freigrenzen/Freigabewerten liegt für alle ca. 800 Nuklide vor. Für sehr kurzlebige Radionuklide (Halbwertszeit im Bereich von Tagen und kürzer) wurde formal die Berechnung analog zu den Radionukliden mit längeren Halbwertszeiten durchgeführt. Da sich auf Grund der Annahmen zum radioaktiven Zerfall vor Beginn des jeweiligen Szenarios und während dessen Dauer allerdings für sehr kurzlebige Radionuklide keine sinnvollen Berechnungsergebnisse erzielen lassen, wurde in diesem Fall empfohlen, die bisherigen massenbezogenen Freigrenzen (Anl. III Tab. 1 Sp. 3 StrlSchV) anzuwenden.

Die Ergebnisse wurden nach verschiedenen Gesichtspunkten (führende Szenarien, Abhängigkeit von den Halbwertszeiten usw.) ausgewertet und in Berichtsform dargestellt.

#### **4.2 UNTERSUCHUNG VON FACHLICHEN RANDBEDINGUNGEN**

Die Untersuchungen zu Punkt 2.2 wurden begleitend zu der Berechnung des neuen Wertesatzes ebenfalls vollständig durchgeführt. Es handelt sich z. T. um notwendige Voraussetzungen für die Berechnung Freigrenzen/Freigabewerte (z. B. Festlegung der Vorgehensweise zur Einbeziehung von Tochternukliden, Umgang mit Radionukliden mit sehr kurzer Halbwertszeit usw.). Diese Randbedingungen wurden dargestellt und die Ergebnisse zu Punkt 2.2 wurden in einem Bericht gemeinsam mit denjenigen zu Punkt 2.1 zusammengestellt und an das BfS übergeben.

### 4.3 ANALYSE DER KONSEQUENZEN EINER ANWENDUNG NEUER FREIGRENZEN

Die Analyse der Konsequenzen einer Anwendung neuer Freigrenzen befasste sich mit der Zusammenstellung der Bedeutung von Freigrenzen in den gegenwärtigen Regelungen von StrlSchV und AtG, insbesondere bez. der Definition des Begriffes „radioaktiver Stoff“ gem. § 2 Abs. 2 AtG und Funden gem. § 71 StrlSchV sowie der Ausgestaltung von Genehmigungen insb. nach § 7 StrlSchV. Der Aktivitätsgehalt in Gegenständen und Stoffen im Alltag, insbesondere solchen, die die neuen Freigrenzen überschreiten, sowie die Vorgehensweise nach Funden von Aktivität in Schrotten, wurden detailliert dargestellt. Zur Diskussion um die mögliche Verwendung bzw. Verwertung von Schrott oder Produkten mit erhöhtem Aktivitätsgehalt, die seit ca. 1 Jahrzehnt in der Fachwelt stattfindet, wurden Lösungsansätze vorgestellt. Empfehlungen für die Ausgestaltung von Regelungen in Bezug auf Freigrenzen in einer Novellierung der Strahlenschutzgesetzgebung wurden erarbeitet.

### 4.4 PRÜFUNG DER DEN BISHERIGEN WERTEN ZU GRUNDE LIEGENDEN SZENARIEN

Zur Prüfung der den bisherigen Werten für die uneingeschränkte Freigabe und den Freigrenzen (RP 65) zu Grunde liegenden Szenarien auf Konsistenz und Vollständigkeit wurde zunächst die Wechselwirkung der gegenwärtigen rechtlichen Situation bei Freigrenzen und der uneingeschränkten Freigabe in Deutschland umrissen. Typische Expositionssituationen, auf die sich die Freigrenzen für „moderate amounts“ (RP 65, Anl. III Tab. 1 Sp. 2 und 3 StrlSchV) beziehen, und solche, auf denen die Freigabewerte für die uneingeschränkte Freigabe (Anl. III Tab. 1 Sp. 5 StrlSchV) beruhen, wurden dargestellt. Begründungen für den abdeckenden Charakter der abdeckenden Szenarien für die uneingeschränkte Freigabe wurden gegeben.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 BERECHNUNG NEUER FREIGRENZEN UND VERGLEICH

Die Berechnung der neuen Freigrenzen ist abgeschlossen (auf Grund des Umfangs kann die Tabelle hier nicht wiedergegeben werden). Die in SR 44 bereits vorhandenen Werte werden reproduziert. Alle anderen Werte beruhen auf demselben Rechenverfahren.

### 5.2 UNTERSUCHUNG VON FACHLICHEN RANDBEDINGUNGEN

Im Rahmen der bereits untersuchten Randbedingungen ist vor allem hervorzuheben, dass für Radionuklide mit kurzer Halbwertszeit die Anwendung der bisherigen massenbezogenen Freigrenzen notwendig ist, da keine sinnvollen Werte auf Basis der Szenarien nach SR 44 berechnet werden können. Für Radionuklide, die in SR 44 und RS-G-1.7 ausschließlich als „natürlich“ behandelt wurden, liegen nun ebenfalls auf der Basis von Szenarien vom Dosisrichtwert 10  $\mu\text{Sv/a}$  abgeleitete Werte vor.

### 5.3 ANALYSE DER KONSEQUENZEN EINER ANWENDUNG NEUER FREIGRENZEN

Die Konsequenzen der Anwendung der neuen Freigrenzen der Strahlenschutz-Grundnormen der EU zeigt, dass eine einfache Übernahme der neuen Werte für die bestehenden Werte nach Anl. III Tab. 1 Sp. 3 StrlSchV (d. h. vollständige Streichung der „alten“ Freigrenzen) bei Beibehaltung aller hierzu gültigen Regelungen zu unübersehbaren Konsequenzen im Strahlenschutzrecht führen würde. Der Begriff „radioaktiver Stoff“ und die hieraus folgenden Geltungsbereiche einzelner Regelungen, die Grenzen für Funde nach § 71 StrlSchV, aber auch Anforderungen im Transport und bei Lagerungen würden sich vollständig verschieben und Aktivitätsbereiche einbeziehen, für die diese Regelungen ursprünglich nicht konzipiert waren.

Die Absenkung der Freigrenzen im Hinblick auf § 71 StrlSchV würde zur Folge haben, dass eine große Anzahl von Stoffen und Gegenständen des Alltags diese Freigrenzenwerte überschreiten und somit einen Verlust an Rechtssicherheit mit sich bringen würde. Bei derartig niedrigen Aktivitäten ist allerdings weder ein messtechnischer Nachweis mit vertretbarem Aufwand möglich, noch ist ein Gewinn an Sicherheit oder eine Reduktion der Exposition der Bevölkerung hiermit verbunden.

Aktivitäten, die sich in Gegenständen des Alltags (metallischen Halbzeugen und Produkten) ergeben könnten, haben keinerlei Bezug zu den Szenarien für die Herleitung von Freigrenzen und sollten daher besser über Regelungen gem. Teil 4 der StrlSchV geregelt werden, die dafür bereits das notwendige Regelwerk weitgehend umfassen.

## 5.4 PRÜFUNG DER DEN BISHERIGEN WERTEN ZU GRUNDE LIEGENDEN SZENARIEN

Für die Szenarien für die Herleitung der bisherigen Freigrenzen (RP 65, Anl. III Tab. 1 Sp. 3 StrlSchV) wurde der Schluss gezogen, dass sie damals wie heute die Expositionen in Labors, der Industrie oder beim sonstigen Umgang mit radioaktiven Stoffen angemessen beschreiben und keiner Revision bedürfen. Sie sind allerdings nicht für große Mengen anwendbar, also beispielsweise nicht für Industriebetriebe o. ä., in denen große Lagerbereiche mit etlichen 100 Mg radioaktiver Stoffe existieren könnten. Dies ist allerdings auch explizit vom Geltungsbereich der Szenarien ausgeschlossen.

Die Szenarien zur Herleitung der Freigabewerte in Anl. III Tab. 1 Sp. 5 StrlSchV erfüllen die durch die SSK in ihrer Empfehlung „Ermittlung der Strahlenexposition“ (verabschiedet auf der 263. Sitzung am 12. September 2013) aufgestellten Anforderungen und Bewertungsgrundsätze und sind daher ebenfalls als adäquat zu bezeichnen.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Das Vorhaben wird im Januar 2016 wie geplant abgeschlossen. Zu allen Einzelzielen liegen Berichte vor, die abschließend nach Durchsprache zu einem Gesamtbericht zusammengeführt werden.

|                                                                                                 |                                                                |                           |                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Thema</b>                                                                                    |                                                                |                           |                                                                                 |
| Untersuchungen zur Strahlenexposition der Augenlinse von beruflich strahlenexponiertem Personal |                                                                |                           |                                                                                 |
| <b>Subject</b>                                                                                  |                                                                |                           |                                                                                 |
| <i>Studies on the radiation exposure of the eye lens of radiation-exposed workers</i>           |                                                                |                           |                                                                                 |
| <b>Kennzeichen</b><br>3613S40011                                                                | <b>Beginn</b><br>01.01.2014                                    | <b>Ende</b><br>30.06.2015 | <b>Fördermittel</b><br>EUR 118.202,-                                            |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Karlsruher Institut für Technologie (KIT)                 |                                                                |                           |                                                                                 |
| <b>Projektleitung</b><br>J. Strohmaier                                                          | <b>Fachbetreuung BfSL. Kammerer</b><br>L. Kammerer / AG-SG 2.4 |                           | <b>verantwortlich für den Text</b><br>J. Strohmaier, Chr. Naber,<br>L. Kammerer |

## 1. ZIELSETZUNG

In der europäischen Richtlinie 2013/59 EURATOM DES RATES vom 5. Dezember 2013 wurde der Organ-Äquivalentdosisgrenzwert für die Augenlinse bei beruflicher Strahlenexposition von 150 mSv auf 20 mSv im Kalenderjahr herabgesetzt. Zum Schutz von beruflich strahlenexponiertem Personal und um adäquat auf die Absenkung des Grenzwertes für die Schutzgröße der Augenlinse reagieren zu können, ist es notwendig, über genügend Kenntnisse und fundierte Daten über die Höhe der Strahlenexposition der Augenlinse zu verfügen. Im Rahmen dieser Untersuchung soll eine verbesserte Datenlage geschaffen sowie untersucht werden, für welche Berufsgruppen und welche Tätigkeiten eine höhere Strahlenexposition der Augenlinse auftreten kann und in welcher Größenordnung diese liegt.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Das Vorhaben ist in drei Arbeitspakete aufgeteilt.

### 2.1 AP1: AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Zunächst wurden wissenschaftliche Publikationen, die sich mit der Thematik Augenlinsendosimetrie befassen, zusammengetragen. Diese wurden katalogisiert und kategorisiert. Auch die bisher von amtlichen Messstellen ermittelten Dosiswerte für die Augenlinse wurden betrachtet und dienen als Grundlage für den bestehenden Kenntnisstand der Strahlenexposition unterschiedlicher Berufsgruppen. Anhand der Literaturrecherche und dem bestehenden Kenntnisstand wurden mindestens 8 Tätigkeiten identifiziert, bei denen potenziell eine höhere Strahlenexposition der Augenlinse und damit eine höhere Dosisbelastung zu erwarten ist. Für diese identifizierten Tätigkeiten wird eine realistische Abschätzung der Strahlenexposition der Augenlinse mittels einer Messkampagne durchgeführt.

Die Ermittlung der Augenlinsendosis erfolgt unter Berücksichtigung der SSK-Stellungnahme „Überwachung der Augenlinsendosis“ (Strahlenschutzkommission: Überwachung der Augenlinsendosis. Stellungnahme der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung, Bundesanzeiger Nr. 17 vom 01.02.2011) sowie neueren Erkenntnissen und Empfehlungen (Behrens, Dietze: „Monitoring the Eye Lens: which dose quantity is adequate?“ Phys. Med. Biol. 55 4047-4062, 2010).

### 2.2 AP2: EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG DER AUGENLINSENDOSIS FÜR AUSGEWÄHLTE TÄTIGKEITEN

Für die in AP 1 ermittelten Tätigkeiten wurden mindestens 6 Tätigkeiten aus dem Bereich der Medizin, mindestens 2 Tätigkeiten aus den Bereichen Forschung und Rückbau und mindestens eine Tätigkeit aus dem Bereich Industrie ausgewählt.

Die in AP1 identifizierten Personen erhielten Informationen und eine Einweisung zur Tragerichtung der Augenlinsendosimeter. Hierzu wurden Informationsschreiben und Protokollvorlagen zur Erhebung der Häufigkeit der Tätigkeiten erstellt sowie ein Plan für den Dosimeterwechsel.

Für die weitere Vorgehensweise wird zwischen der Strahlungsart am Expositionsort bzw. die mit der Tätigkeit verbunden ist, unterschieden. Wie der SSK-Stellungnahme zur „Überwachung der Augenlinsendosis“ zu entnehmen ist, spielen für die Augenlinsendosis vor allem Beta-Strahlung (Elektronenstrahlung mit geringer Eindringtiefe) und Photonen-Strahlung mit niedriger Energie eine Rolle. Die geeignete Messgröße zur Ermittlung der Augenlinsendosis ist die Augenlinsen-Personendosis  $H_p(3)$  bzw. die Oberflächen-Personendosis  $H_p(0,07)$  in der Einheit Sv bzw. mSv. Dabei ist zu beachten, dass die Oberflächen-Personendosis nur in Photonen-Strahlenfeldern eine gute Abschätzung liefert und nicht geeignet in Beta-Strahlenfeldern ist.

## 2.3 AP3: ERARBEITUNG VON EMPFEHLUNGEN ZUM SCHUTZ DER AUGENLINSE

Im Rahmen des AP3 soll eine Entscheidungsmatrix erstellt werden, anhand der Risikokollektive innerhalb der beruflich strahlenexponierten Personen identifiziert werden können. Für Berufsgruppen und Tätigkeiten, die auf Grund der Ergebnisse dieser Untersuchung als besonders exponiert eingestuft werden können, sollen Empfehlungen zum Schutz der Augenlinse veröffentlicht werden.

## 3. METHODIK

Das Verfahren zur „Ermittlung der Augenlinsen-Personendosis“ basiert auf dem langjährig angewandten Verfahren der Teilkörperdosimetrie „Bestimmung der Oberflächen-Personendosis mittels Fingerringdosimeter“ und wurde durch Modifikation entsprechend angepasst. Das verwendete Augenlinsendosimeter wurde im Festkörperdosimetrielabor des KIT entwickelt und zur experimentellen Ermittlung der Augenlinsendosis für das Arbeitspaket 2 eingesetzt. Die Dosimeter bestehen aus einem Detektor, einer Filterkombination und einer Umhüllung, die einerseits zur Halterung aber auch gleichzeitig zum Schutz vor Verschmutzungen dient. Als Detektoren werden Thermolumineszenzdetektoren (TLD) eingesetzt, die je nach Einsatzbereich paarweise über den Augen oder einzeln an der Schläfe, angebracht an einem Stirnband, getragen werden können. Dabei ist die Ausrichtung der Dosimeter am Stirnband zur Strahleneinfallrichtung möglich, um eine repräsentative Exposition zu gewährleisten. Neben der Optimierung des Dosimeters auf die Messgröße der Augenlinsen-Personendosis  $H_p(3)$  zeichnet sich das Dosimeter durch eine in einem weiten Energiespektrum relativ konstante Energieabhängigkeit aus. Bei Energien kleiner 100 keV ist das Dosimeter konservativ ausgelegt. Besonders im medizinischen Bereich kann von einem niederenergetischen Spektrum ausgegangen werden, da hier vor allem die Streustrahlung durch den Patienten und die Einrichtung die Augenlinsenexposition ausmacht.

Bei der Entwicklung wurde neben der akkuraten Dosismessung auch großes Augenmerk auf die Praktikabilität gesetzt, um eine hohe Teilnahmereitschaft zu erreichen. Dabei spielt der Tragekomfort und damit die Größe des Dosimeters, das Gewicht und die Flexibilität in Bezug auf die Ausrichtung des Dosimeters zur Strahleneinfallrichtung eine große Rolle sowie die Tatsache, dass die Teilnehmer durch das Dosimeter im Sichtfeld nicht behindert werden und das Dosimeter auch von Brillenträgern ohne Einschränkungen getragen werden kann. Neben der Befestigung am Stirnband kann das Dosimeter an einer Klammer befestigt an herkömmlichen Brillen oder Bleiglasbrillen getragen werden, um so die Abschirmung durch die Brille zu berücksichtigen.

Die Kalibrierung der Dosimeter erfolgt im akkreditierten Kalibrierlabor des KIT. Dabei werden die Dosimeter am ISO-Quaderphantom in der Messgröße  $H_p(3)$  mit einer definierten Dosis bestrahlt und anschließend ausgewertet. Für jeden Detektor wird ein individuelles Ansprechvermögen berücksichtigt.

## 4. DURCHFÜHRUNG

### 4.1 MESSKONZEPT

Zur Ermittlung der Augenlinsendosis ist ein dreistufiges Messkonzept vorgesehen.

In Stufe 1 werden wöchentlich personenbezogene Dosimeter ausgegeben, die von den Teilnehmern über die ganze Woche bei sämtlichen durchgeführten Tätigkeit getragen werden. Dies ist sinnvoll, um erste Erfahrungen bezüglich einer sinnvollen Mindestexposition der Dosimeter zu machen.

Der Aufwand für die Teilnehmer ist dabei vergleichsweise gering und sehr praktikabel, was die Akzeptanz der Messkampagne steigert. Dadurch soll eine hohe Datenmenge erreicht werden. Zudem wird in Stufe 1 eine möglichst realistische Abschätzung einer mittleren monatlichen Teilkörperexposition der Augenlinse erhoben. Insgesamt sollen die Messungen über mindestens vier Wochen erfolgen.

In Stufe 2 werden pro Institution mehrere Personen ausgewählt (abhängig von den Ergebnissen aus Stufe 1). Diesen Personen wird für jede Art von Tätigkeit ein zugeordnetes und entsprechend beschriftetes Dosimeter ausgehändigt. D. h. wenn ein Arzt beispielsweise sowohl Perkutane Transluminale Angioplastien (PTA) als auch Embolisationen durchführt, bekommt er für jede Tätigkeit ein eigenes Dosimeter. Der Expositionszeitraum wird abhängig von der Häufigkeit der durchgeführten Tätigkeiten festgelegt.

In Stufe 3 wird (abhängig von den Ergebnissen aus Stufe 2) pro Person eine Tätigkeit ausgewählt, die an unterschiedlichen Arbeitsplätzen durchgeführt wird. Pro Arbeitsplatz wird ein Dosimeter ausgegeben. D. h. wenn ein Arzt eine Tätigkeit in verschiedenen Operationsräumen durchführt, bekommt er für jeden OP ein eigenes Dosimeter. Auch hier wird der Expositionszeitraum abhängig von der Häufigkeit der durchgeführten Tätigkeiten festgelegt.

## **5. ERGEBNISSE**

Bisher liegen die Ergebnisse aus AP 1 vor. Für die Literaturrecherche wurden über 159 wissenschaftliche Paper und Veröffentlichungen zusammengetragen, die sich mit der Thematik Augenlinsendosis befassen und bis September 2014 publiziert wurden. Als Grundlage wurden die Veröffentlichungen des FP 7 Projekts ORAMED (Optimization of Radiation Protection of Medical Staff) herangezogen.

Auf Grundlage der Literaturrecherche wurden Tätigkeiten identifiziert, die bei den Teilnehmern im Rahmen des AP2 dosimetrisch überwacht werden. Die Messungen im Rahmen des AP2 sind derzeit im Gange.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Zunächst werden die Messungen in allen teilnehmenden Einrichtungen zu Ende geführt, um die Bewertung der Endergebnisse vorzunehmen und im Anschluss Empfehlungen für das exponierte Personal aussprechen zu können.

|                                                                                                                                       |                                                          |                                                |                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Thema</b>                                                                                                                          |                                                          |                                                |                                     |
| Untersuchung und Bewertung des Detrimentbegriffs im Strahlenschutz                                                                    |                                                          |                                                |                                     |
| <b>Subject</b>                                                                                                                        |                                                          |                                                |                                     |
| <i>Exploration and assessment of the concept of "detriment" in radiation protection</i>                                               |                                                          |                                                |                                     |
| <b>Kennzeichen</b><br>3615S72264                                                                                                      | <b>Beginn</b><br>01.08.2015                              | <b>Ende</b><br>31.01.2016                      | <b>Fördermittel</b><br>EUR 56.784,- |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Technische Hochschule Mittelhessen, Institut für Medizinische Physik und Strahlenschutz, Gießen |                                                          |                                                |                                     |
| <b>Projektleitung</b><br>Prof. Dr. J. Breckow                                                                                         | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. M. Schnelzer / AG-SG 1.3 | <b>verantwortlich für den Text</b><br>S. Emami |                                     |

## 1. ZIELSETZUNG

Die Internationale Strahlenschutzkommission ICRP definiert in ihren Empfehlungen ICRP 103 ein Maß für das strahleninduzierte Zusatzrisiko für stochastische Strahlenwirkungen, das so genannte „Detriment“ (Schadensmaß). Hierbei handelt es sich um eine mehrfach gewichtete Größe, in die neben den Risikokoeffizienten auch Wichtungsfaktoren eingehen, die unabhängig von der Strahlung sind. Im Rahmen des Vorhabens werden die zu Grunde liegenden Konzepte unter Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung strahlungsunabhängiger Gesundheitsparameter kritisch untersucht und bewertet. Es wird geprüft, ob es relevante alternative Konzepte gibt. Ziel ist es, die Voraussetzung zu schaffen, das Konzept an den aktuellen wissenschaftlichen Stand anzupassen.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Ziel des abgeschlossenen Arbeitspakets 1 war die Herausarbeitung der grundlegenden Konzepte, die zur Definition des Detriments geführt haben, sowie deren historische Entwicklung. Insbesondere wurde das Detriment als Funktion der verschiedenen Eingangsgrößen beschrieben und diskutiert.

Ziel des noch nicht abgeschlossenen Arbeitspakets 2 ist festzustellen, wie sich insbesondere die von Strahlung unabhängigen Eingangsgrößen seit der Festlegung in der ICRP-Veröffentlichung 103 verändert haben und inwiefern die dort getroffenen Annahmen auf die Situation in Deutschland zutreffen. Die Auswirkung eventueller Veränderungen und Unterschiede auf das Detriment werden bestimmt und diskutiert.

## 3. METHODIK

Es wird eine ausführliche Datenrecherche durchgeführt bezüglich der Gesundheitsdaten, die in das Detriment Eingang finden. Insbesondere werden Daten zur zeitlichen Entwicklung von Krebsraten für verschiedene Krebsarten bzw. Organe herangezogen. Datenquellen sind u. a. das Statistische Bundesamt, das Robert-Koch-Institut (RKI) in Berlin, das Saarländische Krebsregister sowie das National Cancer Institute und das Research Data Center der USA. Aus den Mortalitäts- und Inzidenzdaten werden jahresweise im Zeitraum von etwa 1980 bis 2012 und für 12 einzelne Krebsarten die Letalitätsfaktoren sowie der absolute und der mittlere Verlust an Lebenserwartung berechnet. Aus diesen Parametern wird das Detriment nach ICRP 103 bestimmt.

## 4. DURCHFÜHRUNG

Die Detriment-Berechnungen werden als zeitliche Entwicklung über mehrere Jahre dargestellt. Es werden die zeitlichen Änderungen diskutiert und bewertet. Insbesondere wird herausgearbeitet, ob es einen zeitlichen Trend gibt und wie stark er sich auf das Detriment auswirkt. Hieran schließt sich die für die Beurteilung des Strahlenrisikos wichtige Frage an, inwieweit sich strahlungsunabhängige Parameter in der Angabe des Detriments niederschlagen.

## 5. ERGEBNISSE

In einem Bericht wurden die grundlegenden Konzepte, die zur Definition des Detriments geführt haben, sowie deren historische Entwicklung herausgearbeitet. Insbesondere wurde das Detriment als Funktion der verschiedenen Eingangsgrößen beschrieben und diskutiert. Es wurde erläutert, welche Motive bestanden und weiterhin bestehen, ein Schadensmaß zu definieren, in das sowohl fatale („tödliche“) als auch nicht-fatale („nicht-tödliche“) Anteile des stochastischen Risikos eingehen. Das von der ICRP entwickelte Modell des Detriments und seine Parameter sowie dessen historische Entwicklung wurden eingehend dargestellt.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die in 4. beschriebenen Arbeiten werden abgeschlossen.

In anderen Umwelt- und Arbeitsschutzbereichen existieren ebenfalls Modelle, die in irgendeiner Form eine Schadensgewichtung enthalten. Diese Modelle werden beschrieben und dem Detriment-Modell der ICRP gegenübergestellt. Es wird untersucht, inwieweit Gemeinsamkeiten bzw. gemeinsame Ansätze bestehen und/oder worin sich diese vom ICRP-Konzept unterscheiden. Dabei wird das Ziel verfolgt, sowohl die Verfahren zum quantitativen Vergleich des Schadens für verschiedene Krebsarten bzw. Organe bei gleicher Noxe (z. B. Strahlung) zu beschreiben, als auch die Möglichkeit des quantitativen Vergleichs des Schadens durch verschiedene Noxen auszuloten.



**Themenbereich 08**  
**Nichtionisierende Strahlung**

***Subject area 08***  
***Non-ionising radiation***

|                                                                                                                                       |                                                          |                                                                                 |                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Thema</b>                                                                                                                          |                                                          |                                                                                 |                                      |
| Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf die Gehirnaktivität, Schlaf und kognitive Leistungsfähigkeit älterer Frauen    |                                                          |                                                                                 |                                      |
| <b>Subject</b>                                                                                                                        |                                                          |                                                                                 |                                      |
| <i>Effect of high frequency electromagnetic fields on brain activity, sleep and cognitive performance in elderly women</i>            |                                                          |                                                                                 |                                      |
| <b>Kennzeichen</b><br>3614S30012                                                                                                      | <b>Beginn</b><br>15.08.2014                              | <b>Ende</b><br>30.04.2016                                                       | <b>Fördermittel</b><br>EUR 349.143,- |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Kompetenzzentrum Schlafmedizin, Charité - Universitätsmedizin, Campus Benjamin Franklin, Berlin |                                                          |                                                                                 |                                      |
| <b>Projektleitung</b><br>Prof. Dr. H. Danker-Hopfe                                                                                    | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>PD Dr. B. Pophof / AG-SG 1.4 | <b>verantwortlich für den Text</b><br>Prof. Dr. H. Danker-Hopfe,<br>Dr. H. Dorn |                                      |

## 1. ZIELSETZUNG

Ziel des geplanten Forschungsvorhabens ist es, zu prüfen, ob hochfrequente elektromagnetische Felder, die von Mobilfunk-Endgeräten ausgehen, die Gehirnaktivität im Wachzustand und im Schlaf sowie die kognitive Leistungsfähigkeit von Frauen in fortgeschrittenem Erwachsenenalter (ab 60 Jahre) beeinträchtigen können. Bisher publizierte Effekte traten häufiger bei niedrigeren Frequenzen und höheren SAR-Werten auf, deswegen soll mit GSM (900 MHz, 2 W/kg) und TETRA (400 MHz, 6 W/kg) exponiert werden.

Es soll geklärt werden, welche physiologischen Änderungen bei zulässigen Expositionen auftreten, welcher Wirkungsmechanismus verantwortlich ist und welche individuellen Ausgangssituationen eine Empfindlichkeit fördern.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Zu untersuchen ist die nächtliche Schlafqualität sowie tagsüber die mittels Elektroenzephalographie gemessene Hirnaktivität und die kognitive Leistungsfähigkeit unter einer mehrstündigen Exposition mit simulierten Signalen der Endgeräte nach dem GSM- und dem TETRA-Standard. Das Schlaf-EEG<sup>1)</sup> soll als Modell für eine gut untersuchte und durch die Umgebung wenig beeinflusste Gehirnaktivität dienen. Um den Einfluss des Gebrauchs von Telefonen bzw. Funkgeräten kurz vor dem Schlafengehen auch zu erfassen, beginnt die Exposition 30 min vor dem Schlaf. Tagsüber werden während einer mehrstündigen Exposition die kognitive Leistungsfähigkeit (Reaktionszeiten, Gedächtnis, Wachsamkeit) und das Wach-EEG untersucht. Die Aufarbeitung der Literatur zum Thema, die Entwicklung der Expositionsanlage, die Einrichtung von Messplätzen sowie das Einholen eines Ethikvotums erfolgten in einem Pilotprojekt zu diesem Forschungsvorhaben.

### 2.1 DOSIMETRISCHE ANALYSE UND TECHNISCHE BETREUUNG DER EXPOSITIONSANLAGE

Die im Pilotprojekt zu diesem Forschungsvorhaben von der Firma Seibersdorf Labor GmbH entwickelte Expositionsanlage, die in diesem Projekt zum Einsatz kam, wurde dosimetrisch charakterisiert. Dazu zählen

- eine Basisdosimetrie und Unsicherheitsanalyse für die Expositionsanlage,
- eine Hirnregion-spezifische dosimetrische Analyse (inkl. thermischer Berechnungen) und
- eine messtechnische Erfassung der Hintergrundfelder am Probandenplatz.

Das Ergebnis liegt als Bericht vor. Darüber hinaus wird die Expositionsanlage bis zum Ende der Studiendauer technisch von der Seibersdorf Labor GmbH betreut und gewartet.

### 2.2 PROBANDENREKRUTIERUNG UND DATENERHEBUNG

Es sollten 20 Frauen im Alter von 60 bis 80 Jahren in die Studie eingeschlossen werden. Um an der Studie teilnehmen zu können, musste eine Probandin Rechtshänderin und Nichtraucherin sein, sie durfte keine Me-

<sup>1)</sup> Elektroenzephalogramm

dikamente einnehmen, die auf das zentrale Nervensystem wirken, sie durfte subjektiv keine Schlafstörung haben sowie keine psychische Erkrankung aktuell und in der Vorgeschichte. 15 Probandinnen haben die Studie abgeschlossen, fünf weitere werden die Datenerhebung voraussichtlich bis Ende Februar 2016 abgeschlossen haben.

### **3. METHODIK**

#### **3.1 EXPOSITION UND DOSIMETRIE**

Für die effiziente doppelt verblindete und randomisierte Befeldung der Probanden wurde eine Doppel-Expositionsanlage entwickelt. Diese Anlage erlaubt die parallele Befeldung des Probandenkollektivs an zwei unabhängigen Testplätzen, d. h., die gesamte Hardware der Anlage ist zweifach ausgeführt. Auch die zugehörige Steuer- und Monitoringsoftware ist zweifach (auf zwei unterschiedlichen Laptop Computern) vorhanden, wobei, zur Sicherstellung der Konsistenz des Befeldungsschemas, beide Softwaremodule aber auf einen zentralen Datensatz für die Zulosung und Speicherung der Expositionsdaten zugreifen. Die Befeldung der Probanden erfolgt mittels einer am Kopf der Probanden, im Bereich des Ohres, fixierten tragbaren Dual-Band Antenne, so dass die Expositionsbedingungen GSM und TETRA doppelblind appliziert werden können.

#### **3.2 REKRUTIERUNG UND UNTERSUCHUNG DER PROBANDEN**

Nach erfolgreichem Screening und Einschluss in die Studie durchlaufen alle Probandinnen drei Untersuchungsbedingungen (GSM 900 MHz, 2 W/kg; TETRA 6 W/kg; Sham) jeweils dreimal in zufälliger Reihenfolge (randomisiert). Für die Exposition wird eine speziell für dieses Projekt entwickelte, am Kopf zu tragende Antenne verwendet. Nach einer Gewöhnungsnacht und einem Gewöhnungstag verbringt jede Versuchsperson neun Nächte im Schlaflabor und absolviert an neun Vormittagen eine Reihe unterschiedlicher Konzentrations- und Gedächtnistests. Dabei wird gleichzeitig ein Elektroenzephalogramm (EEG) abgeleitet. Der Abstand zwischen den Testungen beträgt ca. eine Woche. Welche Expositionsbedingung an welchem Testtag bzw. in welcher Testnacht vorliegt, weiß weder die Versuchsperson noch die Person, welche die Tests bzw. die Nachtableitung durchführt, d. h. die Untersuchung erfolgt doppelblind. Alle Probandinnen durchlaufen alle Expositionsbedingungen (cross-over Design).

### **4. DURCHFÜHRUNG**

#### **4.1 PROBANDINNEN**

Die 20 gesunden Probandinnen müssen zwischen 60 und 80 Jahre alt sein. Die Gewöhnungsnacht, die gleichzeitig auch als Screeningnacht gilt, durfte keinen Anhalt für das Vorliegen einer schlafbezogene Atmungs- oder Bewegungsstörung ergeben. Die Person musste einen geregelten Schlaf-Wach-Rhythmus ohne Schichtdienst (bei denjenigen, die noch berufstätig waren) haben.

#### **4.2 ABLAUF DER STUDIE**

Während des Nachtschlafes werden die Gehirntätigkeit, Augenbewegungen, Muskelaktivität und Herzaktivität sowie in der Eingewöhnungsnacht auch die Atmung und Beinbewegungen erfasst. Daraus lassen sich Informationen zur Schlafstruktur, wie Anteile an Tiefschlaf, leichtem Schlaf und Traumschlaf sowie Zeit bis zum Einschlafen und Wachzeit in der Nacht ableiten. Zusätzlich wird das Auftreten besonderer Muster im Schlaf (z. B. Schlafspindeln) erfasst sowie die Zusammensetzung des Schlaf-EEGs nach verschiedenen Frequenzen.

In den Tagesuntersuchungen, die am Vormittag stattfinden, werden Tests zu verschiedenen Komponenten von Aufmerksamkeit und zum Arbeitsgedächtnis durchgeführt. Während der gesamten Untersuchungszeit wird die Gehirnaktivität mit einem EEG aufgezeichnet. Es werden die Testleistungen und die Gehirnaktivität bei der Durchführung bestimmter Aufgaben und im Ruhezustand ausgewertet.

Um eine gegenseitige Beeinflussung der EEG-Aufzeichnung und der Hochfrequenzexposition zu vermeiden, wurden die EEG-Geräte mit Filtern und Abschirmungen ausgestattet, und es wurden spezielle Messfühler zur Signalaufzeichnung entwickelt.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1 ERGEBNISSE DER DOSIMETRISCHEN CHARAKTERISIERUNG DER EXPOSITIONSANLAGE

Nach Konzeptionierung und Aufbau der Expositionsanlage sowie Validierung des Antennenmodells erfolgten umfangreiche numerische Berechnungen für die detaillierte Analyse und Unsicherheitsabschätzung bezüglich der Absorption im Kopf der Probanden. Als potenzielle Einflussgrößen wurden einerseits anatomische Variationen durch Verwendung zweier deutlich unterschiedlicher Kopfmodelle (Erwachsenenmodell „Ella“ als typisches weibliches Modell und das Modell des 14-jährigen Knaben „Louis“, Repräsentant einer sehr zierlichen erwachsenen Person) betrachtet. Beide Modelle stammen aus der Virtual Population der IT'IS Foundation, Schweiz, mit zusätzlicher Skalierung der Kopfgröße in anatomisch realistischen Bereichen, und andererseits Unsicherheiten bezüglich der dielektrischen Gewebeeigenschaften, Hautfeuchteschwankungen im Bereich der Antenne, Variationen der Antennenposition am Kopf, Einfluss der EEG-Elektroden, sowie Schwankungen des Antenneneingangsreflexionsfaktors. Die ermittelte resultierende Gesamtunsicherheit der Exposition (SAR 10 g im Gehirn) beträgt  $< \pm 40\%$  für TETRA Exposition und  $< \pm 45\%$  für GSM-900-Exposition.

Darüber hinaus wurden numerische Berechnungen der Gewebetemperaturerhöhungen zufolge der Exposition bzw. des Tragens der Antenne durchgeführt. An der Hautoberfläche (zwischen Antenne und Hautoberfläche) konnten die numerischen Berechnungen validiert werden. Die an der Hautoberfläche berechneten bzw. gemessenen Temperaturerhöhungen während der Exposition betrugen weniger als  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  (TETRA) bzw. weniger als  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (GSM-900). Im temporalen Kortex (Gehirnregion mit größter Absorption) lagen die berechneten Temperaturerhöhungen zufolge der Exposition bei weniger als  $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$  (TETRA) bzw.  $0,025\text{ }^{\circ}\text{C}$  (GSM900).

### 5.2 REKRUTIERUNG UND UNTERSUCHUNG DER PROBANDEN

Für die Studie haben sich insgesamt 116 Interessentinnen gemeldet. Davon haben 56 Frauen die Fragebögen ausgefüllt, die notwendig sind, um zu überprüfen, ob sie für eine Studienteilnahme geeignet sind. Die restlichen 60 hatten nach einem ausführlichen informierenden Telefongespräch entweder kein Interesse mehr oder sie erfüllten Kriterien, die mit einer Studienteilnahme nicht vereinbar waren. Nach Durchsicht der Fragebögen wurden 46 Frauen zur medizinischen Voruntersuchung eingeladen, 44 sind zur Gewöhnungsnacht aufgenommen worden, 33 von ihnen konnten nach der Gewöhnungsnacht in die Studie eingeschlossen werden. Fünf Probandinnen haben die Studie vorzeitig beendet.

Insgesamt hatten bis zum 31.12.2015 15 Probandinnen die Studie komplett durchlaufen.

## 6. GEPLANTE WEITERARBEIT

Die Datenerhebung wird im 1. Quartal 2016 abgeschlossen. Die erhobenen Daten werden einer Qualitätskontrolle unterzogen und unter Wahrung der Verblindung statistisch ausgewertet.

|                                                                                                                                                                                                                  |                                                      |                           |                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>Thema</b>                                                                                                                                                                                                     |                                                      |                           |                                               |
| Kosmetik, Wellness, Gesundheit - optische Strahlenquellen außerhalb der Medizin. Systematische Erfassung und Charakterisierung von Strahlenquellen und ihren Anwendungen im gewerblichen sowie im Heimbereich    |                                                      |                           |                                               |
| <b>Subject</b>                                                                                                                                                                                                   |                                                      |                           |                                               |
| <i>Cosmetics, wellness, health - non medical optical radiation sources. Systematic identification and characterisation of optical radiation sources and their applications in the professional and home area</i> |                                                      |                           |                                               |
| <b>Kennzeichen</b><br>3614S80007                                                                                                                                                                                 | <b>Beginn</b><br>01.01.2015                          | <b>Ende</b><br>31.10.2015 | <b>Fördermittel</b><br>EUR 115.192,-          |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Institut für Lasertechnologien in der Medizin und Messtechnik an der Universität Ulm                                                                                       |                                                      |                           |                                               |
| <b>Projektleitung</b><br>D. Russ                                                                                                                                                                                 | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. M. Asmuß / AG-SG 1.5 |                           | <b>verantwortlich für den Text</b><br>D. Russ |

## 1. ZIELSETZUNG

Immer häufiger werden Quellen optischer Strahlung vom ultravioletten bis zum infraroten Spektralbereich zu kosmetischen Zwecken oder im Wellnessbereich sowohl von kommerziellen Anbietern verwendet, aber auch für die Anwendung im Heimbereich angeboten. Ziel dieser Untersuchung ist die systematische Erfassung und Charakterisierung optischer Strahlungsquellen im Spektralbereich zwischen 100 nm und 1 mm und deren Anwendungen außerhalb der Medizin. Dabei soll besonderes Augenmerk auf Anwendungen gerichtet werden, die von Personen ohne medizinische Ausbildung durchgeführt werden. Die Anwendungen sollen beschrieben und mögliche Nebenwirkungen und Gefährdungen durch die Anwendung anhand wissenschaftlicher Publikationen bewertet und abgeschätzt werden. Die Geräte sollen, soweit es die verfügbaren technischen Daten zulassen, in Bezug auf die geltenden gesetzlichen Regelungen und Normen bewertet werden.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

### 2.1 SYSTEMATISCHE RECHERCHE DER ANWENDUNGEN UND DER EINGESETZTEN UND VERFÜGBAREN GERÄTE

Eine systematische Recherche unter Nutzung aller in Frage kommender Informationsquellen soll durchgeführt werden.

Auf dieser Recherche basieren:

- Erstellung eines Überblicks über Anwendungen und Einsatzbereiche optischer Strahlung am Menschen außerhalb der Medizin, verbunden mit einer Abschätzung der Relevanz im Hinblick auf die Strahlenexposition von Verbraucherinnen und Verbrauchern
- genaue und vollständige optische Charakterisierung eingesetzter Geräte und verwendeter optischer Strahlenquellen
- Einschätzung hinsichtlich der den Nutzern jeweils in Aussicht gestellten und auf Grund der physikalischen Gegebenheiten plausiblen Wirkungen
- Bewertung der Anwendungen im Hinblick auf die Einhaltung geltender Normen, Grenzwerte und Empfehlungen der Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) sowie der EU.

### 2.2 SYSTEMATISCHE RECHERCHE GESUNDHEITSRELEVANTER AKUTER UND CHRONISCHER WIRKUNGEN BEI ANWENDUNGEN VON OPTISCHEN STRAHLUNGSQUELLEN

In vielen Fällen ist der Übergang von kosmetischen und medizinischen Anwendungen optischer Strahlung fließend. Daher kann bei der Recherche gesundheitsrelevanter Wirkungen und Nebenwirkungen meist auf wissenschaftliche Publikationen zu den einzelnen Anwendungsgebieten in der Medizin zurückgegriffen werden.

In diesem Projektteil soll die Datenlage in vorwiegend gutachtergestützten wissenschaftlichen Zeitschriften recherchiert und mögliche Risiken für den Anwender oder Kunden dargestellt werden.

### **3. METHODIK**

#### **3.1 SYSTEMATISCHE RECHERCHE DER ANWENDUNGEN UND DER EINGESETZTEN UND VERFÜGBAREN GERÄTE**

Mit einer Recherche im Internet, einschlägigen Fachpublikationen und Messekatalogen sowie den Produktseiten bekannter Hersteller wurden die Anwendungen identifiziert, die im Bereich Kosmetik, Beauty, Wellness unter Anwendung von optischer Strahlung für gewerbliche und private Anwender angeboten und beworben werden. Basierend auf den Anwendungen wurden die jeweils für die Anwendung geeigneten Geräte recherchiert und charakterisiert. Dabei wurden, soweit dies möglich war, die Bedienungsanleitungen ausgewertet und die technischen Spezifikationen der Geräte aufgelistet. In Einzelfällen wurde der Hersteller oder einzelne Anwender auch telefonisch oder per E-Mail befragt.

#### **3.2 SYSTEMATISCHE RECHERCHE GESUNDHEITSRELEVANTER AKUTER UND CHRONISCHER WIRKUNGEN BEI ANWENDUNGEN VON OPTISCHEN STRAHLUNGSQUELLEN**

Für die Auswertung der Datenlage im Hinblick auf gesundheitsrelevante Nebenwirkungen der Anwendung optischer Strahlung wurde für die jeweiligen Anwendungen eine systematische Recherche der medizinischen Fachliteratur in den Literaturdatenbanken des amerikanischen National Institut of Health (PubMed) sowie der Literaturdatenbank Scopus durchgeführt. Daneben wurde noch die MAUDE-Datenbank der U.S. Food and Drug Administration (FDA) verwendet, in der von Anwendern Zwischenfälle bei der Verwendung von Geräten gemeldet werden können. Die bei der Recherche identifizierten Anwendungsfehler und Nebenwirkungen wurden auf die nicht medizinischen Anwendungen übertragen und bewertet.

### **4. DURCHFÜHRUNG**

Um einen umfassenden Überblick über die für das Projekt relevanten Anwendungen zu erhalten, wurde zunächst das Angebot von Kosmetikstudios, Anbietern von Wellnessprodukten und Tattoostudios umfassend recherchiert. Anschließend wurde für jede gefundene Anwendung eine Produktrecherche durchgeführt und die optische Spezifikation der Produkte möglichst vollständig erfasst. Anhand dieser Daten erfolgte eine Einschätzung des Gefährdungspotentials der optischen Strahlung durch den Vergleich mit relevanten Regularien und Normen. Auf Grund der Vielfalt der optischen Strahlenquellen wurden auch die Charakteristika und die Unterschiede der verschiedenen Strahlenquellen erläutert. Die beabsichtigte Wirkungsweise und Wechselwirkung der optischen Strahlung mit dem Gewebe wurde für jede Anwendung beschrieben. Abschließend wurden für jede Anwendung die Risiken und Nebenwirkungen sowie mögliche Anwendungsfehler recherchiert und beschrieben.

### **5. ERGEBNISSE**

Die Anwendungen optischer Strahlung lassen sich im Wesentlichen wie folgt gliedern:

- Lichttherapie
- Infrarotlampen und -kabinen
- Softlasertherapie/LLL<sup>1)</sup>-Akupunktur
- Hautverjüngung/Anti-Aging
- Lipolaser & Cellulite
- Tattoorentfernung, Permanentmakeup-Entfernung, Pigmententfernung
- Epilation mit Laser- oder Intense-Pulse-Light (IPL)

Für alle Anwendungen mit Ausnahme der Tattoorentfernung konnten Geräte speziell auch für den Heimgebrauch gefunden werden. Die meisten der Geräte der Anwendungen 1 und 2 konnten nicht vollständig charakterisiert werden, da meist spektrale Daten fehlten. Da nahezu alle Anwendungen eine physiologische oder

<sup>1)</sup> low level laser

physikalische Wirkung versprechen, überschreiten viele der Geräte für die Anwendungen 3-7 erwartungsgemäß die Expositionsgrenzwerte im Anwendungsareal zum Teil beträchtlich und sind meist auch entsprechend klassifiziert. Diese Grenzwerte sind für inkohärente bzw. kohärente künstliche optische Strahlung in der Optischen Strahlungsverordnung (OStrV) durch Verweis auf die Grenzwerte im Anhang I bzw. Anhang II der Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments festgelegt und sind als Grenzwerte im Arbeitsschutz zu verstehen.

Besonders kritisch im Hinblick auf die Nutzergefährdung werden dabei die Epilation, die Tattooentfernung sowie in einigen Fällen auch die Softlasertherapie eingeschätzt. Die dabei verwendeten Lichtleistungen bzw. -energien können selbst bei bestimmungsgemäßer Verwendung unter bestimmten Bedingungen, die vom medizinischen Laien meist nicht sicher beurteilt werden können, zu reversiblen thermischen oder kosmetischen Schäden bis hin zu schweren lokalen Verbrennungen mit Blasenbildung führen. Bei einer vorbestehenden, nicht erkannten dermalen Erkrankung, wie z. B. einem malignen Melanom, kann die Anwendung von optischer Strahlung hoher Leistungs- oder Energiedichte zu schweren gesundheitlichen Komplikationen führen.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Die Recherche und Interpretation der wissenschaftlichen Datenlage zu den Risiken und Nebenwirkungen der verschiedenen Anwendungen wird fertiggestellt.



## **Themenbereich 09**

### **Deutsches Mobilfunk Forschungsprogramm**

#### ***Subject area 09***

#### ***German Mobile Telecommunication Research Programme***

Im Deutschen Mobilfunk-Forschungsprogramm (DMF) ([www.deutsches-mobilfunk-forschungsprogramm.de](http://www.deutsches-mobilfunk-forschungsprogramm.de)) 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. Das DMF endete im Jahr 2008. Die Vorhaben in diesem Kapitel sind einzelne Folgeprojekte, die im Rahmen des sogenannten DMF II durchgeführt werden.

*The German Mobile Telecommunication Research Programme (DMF) ([www.deutsches-mobilfunk-forschungsprogramm.de](http://www.deutsches-mobilfunk-forschungsprogramm.de)) continued its research by systematically studying the effects of different uses of non-ionising radiation on man. The main emphasis of these research projects was in the fields of biology, epidemiology, dosimetry and risk communication. The Research Programme ended in 2008. The projects identified in this chapter are individual follow-up projects conducted within the scope of the so-called DMF II.*

|                                                                                                                                                                        |                                                  |                           |                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>Thema</b>                                                                                                                                                           |                                                  |                           |                                                        |
| Einfluss hochfrequenter Felder des Mobilfunks auf das blutbildende System in vitro: Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse                               |                                                  |                           |                                                        |
| <b>Subject</b>                                                                                                                                                         |                                                  |                           |                                                        |
| <i>Influence of high frequency electromagnetic fields of mobile communications on the hematopoietic system in vitro: Studies of the reproducibility of the results</i> |                                                  |                           |                                                        |
| <b>Kennzeichen</b><br>FM8863                                                                                                                                           | <b>Beginn</b><br>01.01.2015                      | <b>Ende</b><br>31.03.2016 | <b>Fördermittel</b><br>EUR 26.592,-                    |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Universität Würzburg                                                                                                             |                                                  |                           |                                                        |
| <b>Projektleitung</b><br>Dr. H. Hintzsche                                                                                                                              | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. A. Dehos / AG-SG |                           | <b>verantwortlich für den Text</b><br>Dr. H. Hintzsche |

## 1. ZIELSETZUNG

Im Bereich biologischer Wirkungen durch Mobilfunkfelder sind nach wie vor einige Aspekte nicht abschließend geklärt. Hierzu gehört insbesondere die Frage, ob Kinder möglicherweise empfindlicher auf diese Art Strahlung reagieren als Erwachsene. Es gibt Hinweise darauf, dass Kinder im Knochenmark des Schädels deutlich höheren Intensitäten ausgesetzt sind als Erwachsene. Dies ist von besonderer Bedeutung, da hier teilweise die Hämatopoese stattfindet. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Einfluss hochfrequenter Felder des Mobilfunks auf das blutbildende System in vitro (FM8851)“ wurde daher untersucht, ob Zellen des hämatopoetischen Systems in ihrer Struktur bzw. ihrer Funktion beeinflusst werden können. Es zeigten sich insgesamt keine relevanten Effekte, jedoch wurden bei einigen der untersuchten Endpunkte starke Streuungen beobachtet bzw. schwach signifikante Effekte gefunden. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens sollen für diese Endpunkte Wiederholungen durchgeführt werden, um die Datenlage diesbezüglich zu verbessern.

## 2. EINZELZIELSETZUNG

Konkret sollen die Untersuchungen analog zum Forschungsvorhaben FM8851 in HL<sup>1)</sup>-60-Zellen und in hämatopoetischen Stammzellen durchgeführt werden. Die Zellen werden dabei mit hochfrequenten Feldern in den für den Mobilfunk relevanten Frequenzbereichen GSM, UMTS, und LTE<sup>2)</sup> exponiert. Im Einzelnen werden Untersuchungen zur Differenzierung anhand der CD11b-Expression, zur Adhärenz und zur Genotoxizität anhand des Comet Assays durchgeführt.

## 3. METHODIK

### 3.1 EXPOSITION UND DOSIMETRIE

Die Expositionen werden in einer sogenannten Mikro-Transversal-Elektromagnetischen-Zelle ( $\mu$ TEM-Zelle) durchgeführt, die speziell für derartige Untersuchungen von der TU Braunschweig entwickelt wurde. Sie ist für alle verwendeten Frequenzen nutzbar. Konstante Zellkulturbedingungen werden dadurch gewährleistet, dass die  $\mu$ TEM-Zelle innerhalb eines Inkubators betrieben wird. Dabei wird der konvektionsbedingte Wärmeaustausch zwischen den Zellproben und der geregelten Inkubatoratmosphäre mittels eines Pumpenkreislaufes verbessert.

Zur Sicherung und Dokumentation der Qualität der Expositionsexperimente werden die Temperatur der  $\mu$ TEM-Zelle, die Temperatur am Ort der Probe sowie die Temperatur, die Luftfeuchte, der Druck und der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Inkubatoratmosphäre mindestens einmal pro Minute aufgezeichnet und in einem codierten Datensatz abgelegt. Die Hochfrequenzleistung wird am Ein- und Ausgang der Zelle ebenfalls einmal pro Minute gemessen und aufgezeichnet.

<sup>1)</sup> human promyelocytic leukemia cells

<sup>2)</sup> Long Term Evolution

Die Verblindung der Expositionen wurde durch eine selbstentwickelte Software zur Steuerung der gesamten Expositionsanlage gewährleistet. Diese wählt nach der Wahl von Zelltyp und Expositionsdauer zufällig einen Satz noch nicht verwendeter Expositionsparameter aus.

### **3.2 BIOLOGIE**

In diesem Forschungsvorhaben kommen HL-60-Zellen und hämatopoetische Stammzellen zum Einsatz. Für beide Zellsorten werden folgende Endpunkte verwendet:

- CD11b-Expression und Adhärenz
- Quantifizierung von DNA-Strangbrüchen mittels Comet Assay.

## **4. DURCHFÜHRUNG**

### **4.1 EXPOSITION UND DOSIMETRIE**

Der Versuchsaufbau wurde an der Universität Würzburg analog zum Forschungsvorhaben FM8851 verwendet. Die Durchführung wurde regelmäßig von der PTB überwacht. Die gespeicherten Daten wurden regelmäßig gesichert.

### **4.2 BIOLOGIE**

Zwei Replikate der Expositionen wurden komplett abgeschlossen. Das dritte Replikat wurde begonnen. Alle zugehörigen Negativ- und Positivkontrollen wurden durchgeführt.

## **5. ERGEBNISSE**

### **5.1 EXPOSITION UND DOSIMETRIE**

Der Versuchsaufbau an der Universität Würzburg funktionierte einwandfrei.

### **5.2 BIOLOGIE**

Alle Methoden wurden durchgeführt und führten insgesamt zu stabilen Ergebnissen.

## **6. GEPLANTE WEITERARBEIT**

Im weiteren Verlauf sollen die noch ausstehenden Expositionen durchgeführt werden und die entsprechenden Auswertungen erfolgen. Anschließend erfolgen die Entblindung und die Gesamt-Auswertung.



**2015 begonnene Forschungsvorhaben, zu denen noch keine Ergebnisse vorliegen**

***Research projects initiated in 2015 of which results are not available yet***

## 1. THEMENBEREICH 03 / STRAHLENBIOLOGIE - WIRKUNG VON IONISIERENDER STRAHLUNG, STRAHLENEMPFFINDLICHKEIT

### Thema

Identifizierung strahlenspezifischer Biomarker in Brusttumorpatienten - zu Grunde liegende molekulare Mechanismen der strahleninduzierten Mammakarzinogenese

### Subject

*Identification of radiation-specific biomarkers in breast cancer patients - basic molecular mechanisms of radiation-induced breast carcinogenesis*

### Kennzeichen

3615S32454

### Beginn

15.11.2015

### Ende

14.11.2017

### Fördermittel

EUR 273.208,-

### Forschungs- / Auftragnehmer

Helmholtz Zentrum München

### Projektleitung

Prof. Dr. H. Zitzelsberger

### Fachbetreuung BfS

U. Oestreicher / AG-SG 1.2

## ZIELSETZUNG / KURZBESCHREIBUNG

Die genauen Mechanismen, die zur Bildung von strahleninduzierten Tumoren führen, sind noch weitgehend ungeklärt.

Kenntnisgewinne über den genetischen Hintergrund strahleninduzierter Veränderungen in Brustzellen sowie über ihr Auftreten in Mammakarzinomen können zu einer Verbesserung der Abschätzung des Brustkrebsrisikos durch ionisierende Strahlung führen.

Das Ziel des FV besteht darin, strahleninduzierte Brustkrebsfälle anhand spezifisch veränderter Gen- oder Expressionsmuster erkennen zu können und dies an geeigneten Personenkollektiven zu validieren. Zudem soll anhand mechanistischer Untersuchungen die Rolle dieser Biomarker in der Strahlenkarzinogenese untersucht werden. Bisher wurden in zwei aufeinander abgestimmten Studien zu dieser Thematik in Kooperation zwischen der Abteilung Strahlenzytogenetik am Helmholtz Zentrum München (Leitung: Prof. Dr. Horst Zitzelsberger) mit dem Research Center for Radiation Medicine, Kiew ( Dr. Sergy Klymenko ) an Kollektiven von Brustkrebspatientinnen, die durch den Tschernobyl-Unfall entweder als Liquidatorinnen oder als Evakuierte aus hoch kontaminierten Gebieten bestrahlt wurden, und aus einem angepassten Kontrollkollektiv von Brustkrebspatientinnen aus der Ukraine entscheidende Grundlagen geschaffen und mögliche strahlenspezifische Marker auf Genom-, Chromosomen- und Expressionsebene in Tumorgewebe identifiziert.

An einem Kollektiv von Brustkrebspatientinnen aus der Mayak-Kohorte besteht jetzt die Möglichkeit die bisher gefundenen Ergebnisse zu überprüfen. Die Mayak-Kohorte beinhaltet frühere Arbeiterinnen der Plutoniumfabrikationsstätte Majak (Tscheliabinsk). Da für die Mayak-Arbeiterinnen genaue Dosisabschätzungen vorliegen, lassen sich auch hier Dosis-Wirkungs-Zusammenhänge untersuchen. Zudem besteht die Möglichkeit festzustellen, in wieweit im Normalgewebe von exponierten Personen eine genetische Prädisposition nachweisbar ist.

## 2. THEMENBEREICH 04 / MEDIZINISCHE STRAHLENEXPOSITION / RÖNTGEN-VERORDNUNG

|                                                                                                                                      |                                                      |                           |                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| <b>Thema</b>                                                                                                                         |                                                      |                           |                                      |
| Untersuchung des Brustkrebsrisikos nach Radioiodtherapie eines Schilddrüsenkarzinoms - Machbarkeitsstudie                            |                                                      |                           |                                      |
| <b>Subject</b>                                                                                                                       |                                                      |                           |                                      |
| <i>Assessment of breast cancer risk following radioiodine treatment for thyroid cancer among female, adolescents and young women</i> |                                                      |                           |                                      |
| <b>Kennzeichen</b><br>3615S42421                                                                                                     | <b>Beginn</b><br>01.11.2015                          | <b>Ende</b><br>30.06.2017 | <b>Fördermittel</b><br>EUR 228.583,- |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Universitätsklinikum Würzburg                                                                  |                                                      |                           |                                      |
| <b>Projektleitung</b><br>Prof. Dr. Reiners                                                                                           | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>A. Erzberger / AG-SG 2.1 |                           |                                      |

### ZIELSETZUNG / KURZBESCHREIBUNG

Ein mögliches Risiko der Strahlentherapie ist die Induktion von Zweittumoren. Im Besonderen geht es um die Induktion von Brustkrebs durch die Radioiodtherapie (RIT). Dazu vorliegende Ergebnisse aus Studien lassen keine eindeutige Aussage zu und sind in Teilen widersprüchlich.

Aus strahlenhygienischer Sicht ist eine systematische Erfassung von Brustkrebs als Folge einer RIT von besonderer Bedeutung, da die RIT eine gängige Form der Therapie bösartiger Schilddrüsentumoren und im gegebenen Fall auch gutartiger Erkrankungen der Schilddrüse ist. Derzeit werden in Deutschland bei gutartigen und bösartigen Schilddrüsenerkrankungen ca. 50 000 RIT pro Jahr durchgeführt (s. F. Grünwald, K.-M. Derwahl, Diagnostik und Therapie von Schilddrüsenerkrankungen. Frankfurt, Berlin 2014).

Demzufolge wurde 2011 ein Ressortforschungsvorhaben (3611S40006) initiiert mit dem Ziel, das Brustkrebsrisiko von Frauen, die als Kinder und Jugendliche radioiodtherapiert wurden, zu untersuchen. Im Verlauf dieser Studie wurden das Studiendesign festgelegt und geeignete Studienzentren und -kollektive für eine repräsentative Erhebung des Brustkrebsrisikos ausfindig gemacht. Innerhalb der Laufzeit des FVs konnten jedoch weder genügend Zusagen von den geeigneten Forschungseinrichtungen gewonnen werden, noch eine für eine repräsentative Erhebung ausreichende Anzahl an Teilnehmerinnen rekrutiert werden, die sich bereit erklärten, an einer langfristigen Studie teilzunehmen. Diese Schwierigkeiten konnten zwischenzeitlich überwunden werden, so dass nunmehr durch Zusagen verschiedener Studienzentren eine ausreichende Anzahl an möglichen Teilnehmerinnen (8070) zur Verfügung steht, um eine belastbare Abschätzung des Brustkrebsrisikos nach RIT ermitteln zu können. Bevor diese repräsentative Studie an mehreren Tausend Frauen initiiert wird, soll im vorliegenden Forschungsvorhaben ihre Machbarkeit an einem kleinen Kollektiv von Frauen erprobt werden.

### 3. THEMENBEREICH 05 / RADIOÖKOLOGIE

|                                                                                                         |                                                  |                           |                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| <b>Thema</b>                                                                                            |                                                  |                           |                                      |
| Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu radioaktiven Quellen und Gegenständen im Stahlschrott |                                                  |                           |                                      |
| <b>Subject</b>                                                                                          |                                                  |                           |                                      |
| <i>Orphan sources and radioactive materials in steel scrap (experimental and theoretical studies)</i>   |                                                  |                           |                                      |
| <b>Kennzeichen</b><br>3615S52320                                                                        | <b>Beginn</b><br>01.11.2015                      | <b>Ende</b><br>30.06.2017 | <b>Fördermittel</b><br>EUR 159.279,- |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Brenk Systemplanung GmbH, Aachen                                  |                                                  |                           |                                      |
| <b>Projektleitung</b><br>Dr. J. de Groot                                                                | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>Dr. R. Merk / SW 1.6 |                           |                                      |

#### ZIELSETZUNG / KURZBESCHREIBUNG

In Artikel 92 der Richtlinie 2013/59/Euratom (Euratom-Grundnormen) werden Anforderungen zur Entdeckung herrenloser Strahlenquellen gestellt. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Verbesserung der Entdeckung von herrenlosen Strahlenquellen und radioaktiven Gegenständen im Stahlschrott.

Dazu soll mittels Computersimulationen (Monte-Carlo-Simulationen) die Auffindbarkeit radioaktiver Quellen und Gegenstände im Stahlschrott theoretisch untersucht und diese Ergebnisse mittels experimenteller Untersuchungen an einem "echten" Stahlschrottcontainer zu realitätsnahen Bedingungen abgesichert werden. Mittels einer an Schrottplätze, Schmelzbetriebe, Stahlwerke, Warenumschlagsplätze und sonstige Betriebe des Schrottkreislaufs gerichteten Umfrage werden die realitätsnahen Messbedingungen ermittelt.

Zusätzlich werden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens noch die Möglichkeit und Notwendigkeit der Detektion von Neutronenstrahlung und der aktive Einsatz von Strahlung zur Auffindung radioaktiver Quellen und Gegenstände im Schrott bewertet. Die Bewertung der Detektion von herrenlosen Neutronenstrahlern soll auf Basis bereits erfolgter Funde geschehen. Auf Grund der für Deutschland nur sehr geringen Anzahl an dokumentierten Funden wird hierzu eine europaweite Anfrage an die jeweils zuständigen internationalen Behörden durchgeführt.

Abschließend werden Informationsmaterial und Leitlinien entsprechend Artikel 92 der Richtlinie 2013/59/Euratom für verschiedene Personengruppen erstellt. Diese dienen sowohl der Sensibilisierung für das etwaige Vorkommen herrenloser Strahlenquellen und die damit verbundene Gefahren als auch als Leitlinie für die durch Personen zu ergreifenden Maßnahmen, welche eine herrenlose Quelle vermuten oder Kenntnis von einer herrenlosen Strahlenquelle haben.

## 4. THEMENBEREICH 06 / NOTFALLSCHUTZ

|                                                                                                                                                                                                        |                                                |                           |                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| <b>Thema</b><br>Fortschreibung des Szenarienkatalogs für behördliche Notfallübungen und Durchführung von Schulungen für die Notfallorganisationen des BfS und des BMUB                                 |                                                |                           |                                      |
| <b>Subject</b><br><i>Extrapolation of the catalogue of exercise scenarios for emergency response planning by authorities and training courses for emergency response organisations of BfS and BMUB</i> |                                                |                           |                                      |
| <b>Kennzeichen</b><br>3615S62506                                                                                                                                                                       | <b>Beginn</b><br>13.10.2015                    | <b>Ende</b><br>31.08.2018 | <b>Fördermittel</b><br>EUR 327.441,- |
| <b>Forschungs- / Auftragnehmer</b><br>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln                                                                                                |                                                |                           |                                      |
| <b>Projektleitung</b><br>U. Büttner                                                                                                                                                                    | <b>Fachbetreuung BfS</b><br>N. Zander / SW 2.2 |                           |                                      |

### ZIELSETZUNG / KURZBESCHREIBUNG

Bei Ereignissen in grenznahen ausländischen Kernkraftwerken (KKW) ist die Notfallorganisation des Bundes (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, BMUB, und Bundesamt für Strahlenschutz, BfS) federführend für die radiologische Lagebewertung sowie Koordinierung von Aktivitäten der Länderbehörden zuständig. Daher soll in diesem Vorhaben das Spektrum von Übungsszenarien im bestehenden Szenarienkatalog unter Berücksichtigung weiterer spezifischer Ereignisabläufe in grenznahen ausländischen KKW erweitert und ergänzt werden. Somit soll eine fachlich fundierte Grundlage mit detailliert ausgearbeiteten und realitätsnahen Übungsszenarien in Bezug auf radiologisch relevante Ereignisse, die zur Steigerung der Effizienz der BMUB/BfS-Notfallorganisation beiträgt, erarbeitet werden.

Auf der Grundlage der erarbeiteten Szenarien wird im Rahmen des Vorhabens eine Übung der Notfallorganisationen BMUB/BfS vorbereitet, durchgeführt und ausgewertet. Die Übung wird die Aspekte der radiologischen Prognose sowie Diagnose anhand von simulierten Messungen umfassen.

Das im Vorhaben erworbene Wissen über die möglichen Ereignisabläufe in grenznahen ausländischen Anlagen sowie Grundlagen für die Stabsarbeit in behördlichen Notfallschutzorganisationen des BMUB und BfS werden in Schulungen für Stabsmitglieder des BMUB und des BfS weitergegeben.



# Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

## ERGEBNISSE

### Themenbereich 01

#### Natürliche Strahlenexposition

Untersuchung des Einflusses baulicher Energiesparmaßnahmen (energetische Sanierung, Passivbauweise) auf die Radonkonzentration in Innenräumen (Los 2) / **3611S10016**

- Abbildung 1:** Verlauf der Radonkonzentration vor und nach der Sanierung bei Messobjekt 2 8
- Abbildung 2:** Verlauf der Radonkonzentration und der Temperaturdifferenz am Beispiel von Messobjekt 1 9
- Abbildung 3:** Verlauf der Radonkonzentration und des Außendrucks bei Messobjekt 5 9
- Abbildung 4:** Modellierter Radonverlauf 10
- Abbildung 5:** Zeitgleicher Anstieg der Radonkonzentration und Abfall der CO<sub>2</sub>-Konzentration 11

Genomweite Analyse genetisch bedingter Strahlenempfindlichkeit in Wismut Bergarbeitern / **3614S10013**

- Abbildung 1:** Schematischer Laborprozess einer Genotypisierung auf der Illumina-Plattform 15
- Abbildung 2:** Überprüfung ausgewählter Proben auf Kontamination mittels der Software GenomeStudio: 16

### Themenbereich 02

#### Strahlenschutztechnik

Evaluierung neuer CT-Techniken und Bestimmung der mit ihnen erzielten Strahlenreduktion bei verschiedenen CT-Betreibern in Deutschland / **3613S20025**

- Tabelle 1:** Zur Ermittlung des Pixelrauschens herangezogene anatomische Strukturen 25
- Tabelle 2:** Auswahl der in der Literaturrecherche berücksichtigten Fachzeitschriften 27
- Tabelle 3:** Thematik der wissenschaftlichen Publikationen 27
- Tabelle 4:** Datenbestand der CT-Studie 28
- Tabelle 5:** Effektive Dosis unter den verschiedenen CT-Techniken (Perzentilen) 29
- Tabelle 6:** Relative Dosisreduktion (%) unter den einzelnen CT-Techniken 29

## Themenbereich 03

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

Entwicklung kardiovaskulärer Erkrankungen nach Strahlenexposition mit niedrigen Dosen / 3611S30022

- Abbildung 1:** Schematische Darstellung des Modells für Atherosklerose. 37
- Abbildung 2:** Darstellung der 12 verschiedenen Dosiswirkungsmodelle, die für die Analysen am ISS verwendet wurden. 38
- Abbildung 3:** ERR pro Dosis externer Gammastrahlung und 95 % Konfidenzintervalle für IHD-Inzidenz bei verschiedenen lag-Zeiten 39
- Abbildung 4:** ERR versus absorbierte Dosis der äußeren Gammabestrahlung für Inzidenz von IHD. 40
- Abbildung 5:** ERR für Inzidenz von zerebrovaskulären Erkrankungen für ein Alter von 60 Jahren. 40
- Abbildung 6:** Kanonische Pfadanalyse von verschiedenen regulierten Herzproteinen. 41
- Abbildung 7:** Die Mehrheit der deregulierten Proteine wird durch PPAR-alpha reguliert, einem Hauptregulator des Lipidmetabolismus im Herzgewebe. 42
- Abbildung 8:** Die veränderten Proteine kategorisiert in verschiedenen kardiotoxischen Gruppen. 42

## Themenbereich 04

### Medizinische Strahlenexposition / Röntgenverordnung

Analyse des Risikos für ischämische Herzerkrankungen in der kanadischen Fluoroskopie-Kohorte mit verschiedenen Dosis-Wirkungsmodellen / 3615S42221

- Abbildung 1:** Die im vorliegenden Projekt verwendeten 11 parametrischen Dosiswirkungsmodelle. 46
- Tabelle 1:** Ergebnisse aus den Modellanpassungen der 11 verwendeten Dosiswirkungsmodelle aus Abbildung 1 an die Daten für IHD-Mortalität aus der kanadischen Fluoroskopie-Kohorte. 46
- Abbildung 2:** Zusätzliches relatives Risiko, ERR, für IHD-Mortalität in der kanadischen Fluoroskopie Kohorte, aufgetragen gegen die absorbierte Dosis für die drei finalen nicht genesteten Modelle aus Tabelle 1 und für das MMI. 47
- Abbildung 3:** Zusätzliches relatives Risiko, ERR, für IHD-Mortalität in der kanadischen Fluoroskopie Kohorte (Zablotska et al. 2014) aufgetragen gegen die absorbierte Dosis bis 0.35 Gy für die drei finalen nicht genesteten Modelle aus Tabelle 1 und für das MMI. 48

## Themenbereich 06

### Notfallschutz

**Bewertung und Prognose der Weiterentwicklung eines radiologisch relevanten Ereignisses in einer kerntechnischen Anlage mit Hilfe der Abschätzung von Quelltermen auf Grundlage von Messdaten in der Umgebung / 33612S60026**

**Abbildung 1:** Module und Schnittstellen des Programmpaketes

53

**Abbildung 2:** Beispiel für die Ermittlung einer Cs-137 Deposition, ausgehend von einem Szenario mit sehr hoher Freisetzung . Die Beobachtungsorte sind durch schwarze Punkte gekennzeichnet.

55

**Abbildung 3:** Ergebnisse der Inversionsrechnung für eine Cs-137-Emission unter der Verwendung eines stärker abweichenden a priori-Quellterms.

56

## Themenbereich 07

### Vorhaben mit allgemeiner Bedeutung für den Strahlenschutz

**Quantitative Abschätzung des Strahlenrisikos unter Beachtung individueller Expositionsszenarien, Teil 2 / 3612S70030**

**Tabelle 1:** Krebsarten und Gruppeneinteilung

62

**Abbildung 1:** Screenshot des ProZES Programms für die Berechnung der Zusammenhangswahrscheinlichkeit für Lungenkrebs (graphische Ausgabe). Ein spezifisches Rauchverhalten wurde vom Nutzer vorgegeben.

64

**Abbildung 2:** Screenshot des ProZES-Programms für die Berechnung der Zusammenhangswahrscheinlichkeit für Lungenkrebs (detaillierter Bericht). Ein spezifisches Rauchverhalten wurde vom Nutzer vorgegeben.

64

**Weiterentwicklung der Internet-Informationsplattform "EMF Portal" und Ausbau zum WHO-Kollaborationszentrum / 3612S70033**

**Abbildung 1:** Anzahl an Neuveröffentlichungen/Jahr experimenteller und epidemiologischer Studien (insgesamt n=1135) im Mobilfunk-Bereich im Verlauf der letzten 15 Jahre

67

## Themenbereich 08

### Nichtionisierende Strahlung

**Analyse des öffentlichen Diskurses zu gesundheitlichen Auswirkungen von Hochspannungsleitungen - Handlungsempfehlungen für die strahlenschutzbezogene Kommunikation beim Stromnetzausbau / 3614S80008**

**Abbildung 1:** Argumente der Bürgerinitiativen (gesamt)

76

**Abbildung 2:** Ziele der Bürgerinitiativen (gesamt)

76

**Abbildung 3:** Zusammenfassende Darstellung

78

**Tabelle 1:** Handlungsempfehlungen zum Konfliktfeld „Gesundheit“

79

## STATUSBERICHTE

### Themenbereich 01

#### Natürliche Strahlenexposition

Erstellung einer Bioprobandatenbank der an Lungenkrebs verstorbenen Wismutarbeiter aus dem Wismut Pathologiearchiv / 3614S10015

**Abbildung 1:** DNA-Menge (A) und DNA-Reinheit (B) aus Tumor- und Nichttumormaterial. Die waagerechten Linien zeigen den Median und die Interquartile Ranges.

102

**Abbildung 2:** RNA-Menge (A) und RNA-Reinheit (B) aus Tumor- und Nichttumormaterial. Die waagerechten Linien zeigen den Median und die Interquartile Ranges.

103

### Themenbereich 04

#### Medizinische Strahlenexposition / Röntgenverordnung

Erfassung der Häufigkeit bildgebender Diagnostik im stationären Bereich / 3613S20020

**Tabelle 1:** Hochgerechnete Leistungen der bildgebenden Diagnostik

127

Erstellung und Überarbeitung von technischen Normen für den Strahlenschutz und die Qualitätssicherung in der medizinischen Radiologie / 3615S42320

**Tabelle 1:** Bisher erreichte Ergebnisse bei den Normungsprojekten

135

## 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                                                          |
| IAEA      | International Atomic Energy Agency                                            |
| ICNIRP    | International Commission on Non-Ionizing 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                                                 |
| WHO       | World Health Organization                                                     |
| WLAN      | wireless local area network                                                   |

## Kontaktadressen

Fragen nach näheren Informationen über die in diesem Programmreport genannten Projekte können an folgende Stellen gerichtet werden:

Bundesamt für Strahlenschutz  
Verwaltungsmäßige Bearbeitung der Ressortforschung AG-R  
Postfach 10 01 49  
D-38201 Salzgitter  
Tel.: (030) 18333 1520  
Fax.: (030) 18333 1525

Bundesamt für Strahlenschutz  
Fachbereich Strahlenschutz und Gesundheit  
Fachliche Koordinierung der Ressortforschung im Bereich Strahlenschutz AG-K  
Postfach 10 01 49  
38201 Salzgitter  
Tel.: (030) 18333-2119

## Bisher erschienene BfS-Schriften

---

### **BfS-SCHR-1/90**

*Warnecke, E.; Odoj, R.; Simon, R. (Editors)*

Requirements for Waste Acceptance and Quality Control.

Proceedings of the 2nd International Seminar on Radioactive Waste Products.

28 May - 1 June 1990, Research Centre Jülich, Federal Republic of Germany.

Salzgitter 1990

### **BfS-SCHR-2/91**

Sicherheitsreihe Nr. 6.

IAEO-Empfehlungen für die sichere Beförderung radioaktiver Stoffe. Ausgabe 1985.

(Diese Übersetzung enthält auch die von der IAEO im Nachtrag 1988 zu den Empfehlungen vorgenommenen Ergänzungen).

Salzgitter 1991

### **BfS-SCHR-3/91**

*Schüttmann, W.; Aurand, K.*

Die Geschichte der Außenstelle Oberschlema des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Biophysik Frankfurt am Main.

Salzgitter 1991

### **BfS-SCHR-4/91**

*Bornemann, O. (mit einem Beitrag von R. Fischbeck)*

Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrergebnissen.

Salzgitter 1991

### **BfS-SCHR-5/92**

*Herrmann, A.G.*

Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM).

Lösungszuflüsse in den Grubenfeldern Marie und Bartensleben: Stoffbestand, Herkunft, Entstehung. Eine Dokumentation.

Zweiter Bericht. Abschlußbericht für den Zeitabschnitt 1. Januar bis 31. Dezember 1991. Clausthal-Zellerfeld, den 29. Februar 1992.

Salzgitter 1992

### **BfS-SCHR-6/92**

Bestandsaufnahme IMIS-IT.

Seminar zum Projektstand IMIS am 3. Mai 1991.

Salzgitter 1992

### **BfS-SCHR-7/92**

Empfehlungen der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) 1987 - 1991 (Band 7).

Zusammengestellt von der RSK-Geschäftsstelle.

Salzgitter 1992

### **BfS-SCHR-8/92**

Radiologische Erfassung, Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten.

Abschlußbericht zum ersten Teilprojekt.

Salzgitter 1992

### **BfS-SCHR-9/93**

*Grosche, B.; Burkart, W. (Editors)*

Radiation epidemiology after the Chernobyl accident.

Proceedings of a workshop held at the Institute for Radiation Hygiene, Federal Office of Radiation Protection, Neuherberg, October 23-25, 1991

## Bisher erschienene BfS-Schriften

---

### **BfS-SCHR-10/93**

*von Borstel, L.E.*

Lösungen in marinen Evaporiten.

Salzgitter 1993

### **BfS-SCHR-11/93**

*Herrmann, A.G.*

Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM).

Lösungsvorkommen in den Grubenfeldern Marie und Bartensleben: Stoffbestand, Herkunft, Entstehung.

Eine Dokumentation.

Abschlußbericht für den Zeitabschnitt 1. Januar bis 31. Dezember 1992. Clausthal-Zellerfeld, den 29. Februar 1992.

Salzgitter 1993

### **BfS-SCHR-12/93**

IMIS-Statusgespräch.

Seminar zum Projektstand IMIS am 1. Februar 1993.

Salzgitter 1993

### **BfS-SCHR-13/94**

*Przyborowski, S.; Röhnsch, W.*

ICRP-Publikation 65

über den Schutz gegenüber Radon-222 in Wohnung und an Arbeitsplätzen und die Situation in der Bundesrepublik Deutschland.

Salzgitter, 1994

### **BfS-SCHR-14/95**

*Kammerer, L.; Peter, J.; Burkhardt, J.; Trugenberger-Schnabel, A.; Bergler, I.*

Umweltradioaktivität in der Bundesrepublik Deutschland 1992 und 1993. Daten und Bewertung.

Bericht der Leitstellen des Bundes und des Bundesamtes für Strahlenschutz.

Salzgitter, Dezember 1995

### **BfS-SCHR-15/96**

Solare terrestrische UV-Strahlung in Deutschland.

Meßergebnisse und strahlenhygienische Bewertung der Daten aus dem UV-Meßnetz des BFS/UBA für den Zeitraum Januar bis Dezember 1994.

Salzgitter, März 1996

### **BfS-SCHR-16/98**

*Kammerer, L.*

Umweltradioaktivität in der Bundesrepublik Deutschland 1994 bis 1995. Daten und Bewertung.

Bericht der Leitstellen des Bundes und des Bundesamtes für Strahlenschutz.

Salzgitter, März 1998

### **BfS-SCHR-17/98**

Radiologische Erfassung, Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten.

Abschlußbericht zum zweiten Teilprojekt.

Salzgitter, März 1998

### **BfS-SCHR-18/98**

*Sonnek, C.*

Die Euratom-Grundnormen für den Strahlenschutz 1996 und 1997.

Ausblick auf zukünftiges Strahlenschutzrecht in Deutschland.

Salzgitter, Juli 1998

## Bisher erschienene BfS-Schriften

---

### **BfS-SCHR-19/99**

Strahlenschutz und Sicherheit in der Medizin.

ICRP-Veröffentlichung 73.

Ein Bericht einer Arbeitsgruppe des Komitees 3 der Internationalen Strahlenschutzkommission.

Von der Kommission angenommen im März 1996.

Salzgitter, Mai 1999

### **BfS-SCHR-20/99**

WORKSHOP

Strahlenüberwachung von Arbeitsplätzen mit erhöhten Konzentrationen von Radon und Radonzerfallsprodukten und Qualitätssicherung der Überwachungsmessungen.

22. bis 24. Juni 1998, Berlin.

Salzgitter, November 1999

### **BfS-SCHR-21/00**

*Kammerer, L.*

Umweltradioaktivität in der Bundesrepublik Deutschland 1996 und 1997. Daten und Bewertung.

Bericht der Leitstellen des Bundes und des Bundesamtes für Strahlenschutz.

Salzgitter, Oktober 2000

### **BfS-SCHR-22/01**

*Ettenhuber, E.; Gehrcke, K.*

Radiologische Erfassung, Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten.

Abschlussbericht.

Salzgitter, März 2001

### **BfS-SCHR-23/01** (ist nicht als Druck erschienen, nur im Internet)

*Steinmetz, M.*

UV-Index in practical use

Proceedings of an International Workshop

Institute of radiation hygiene, Munich, Germany, December 4-7, 2000

Salzgitter, 2001

### **BfS-SCHR-24/02**

*Peter J.; Schneider G.; Bayer A.; Trugenberg-Schnabel A.*

High Levels of Natural Radiation and Radon Areas:

Radiation Dose and Health Effects

Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on High Levels of Natural Radiation and Radon Areas held in Munich, Germany on September 4 to 7 2000

Neuherberg, März 2002

### **BfS-SCHR-25/02**

*Brix, J.; Matthes, R.; Schulz, O.; Weiss, W.*

Forschungsprojekte zur Wirkung elektromagnetischer Felder des Mobilfunks.

Bundesamt für Strahlenschutz

21. und 22. Juni 2001

Salzgitter, Juni 2002

### **BfS-SCHR-26/02**

*Bruchertseifer, F.; Pohl, H.*

Fachgespräch

Begrenzung der Strahlenexposition als Folge von Störfällen bei kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen.

1. und 2. März 2001

Salzgitter, Juni 2002

## Bisher erschienene BfS-Schriften

---

### **BfS-SCHR-27/03**

*Trugenberger-Schnabel, A.; Peter J.;  
Kanzliwius, R.; Bernhard, C.; Bergler, I.*  
Umweltradioaktivität in der Bundesrepublik Deutschland 1998 bis 2001  
Daten und Bewertung  
Bericht der Leitstellen des Bundes und des Bundesamtes für Strahlenschutz  
Salzgitter, Januar 2003

### **BfS-SCHR-28/03**

*Walter, H.*  
2.Fachgespräch SODAR  
19. u. 20. März 2003  
Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz und Reaktorsicherheit  
Zusammenfassung der Vorträge  
Salzgitter, Juni 2003

### **BfS-SCHR-29/03**

*Bergler, I.; Bernhard, C.; Gödde, R.; Schmitt-Hannig, A.*  
Strahlenschutzforschung  
- Programmreport 2001 -  
Bericht über das vom Bundesamt für Strahlenschutz fachlich und verwaltungsgemäß begleitete  
Ressortforschungsprogramm Strahlenschutz des Bundesumweltministeriums  
Salzgitter, Juni 2003

### **BfS-SCHR-30/04**

*Lennartz, H.-A.; Mussel, Ch.; Thieme, M.*  
Beteiligung der Öffentlichkeit bei der Standortauswahl für die Endlagerung radioaktiver Abfälle  
Abschlussbericht  
Salzgitter, April 2004

### **BfS-SCHR-31/04**

*Weiß, D.; Bönigke, G.; Spoden, E.; Warnecke, E.*  
Übersicht zu stillgelegten kerntechnischen Anlagen in Deutschland und in Europa – Januar 2004  
Salzgitter, September 2004

### **BfS-SCHR-32/04**

*Bergler, I.; Bernhard, C.; Gödde, R.; Löbke-Reinl, A.; Schmitt-Hannig, A.*  
Strahlenschutzforschung  
Programmreport 2003  
Bericht über das vom Bundesamt für Strahlenschutz fachlich und administrativ begleitete  
Ressortforschungsprogramm Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und  
Reaktorsicherheit  
Salzgitter, Dezember 2004

### **BfS-SCHR-33/05**

*Hartmann, M.; Beyer, D.; Dalheimer, A.; Hänisch, K.*  
Ergebnisse der In-vitro-Ringversuche: S-35 in Urin sowie Am-241 und Pu-Isotope in Urin  
Workshop zu den In-vitro-Ringversuchen 2001 und 2002 der Leitstelle Inkorporationsüberwachung  
des BfS am 1. Juli 2003 im Bayerischen Landesamt für Umweltschutz, Kulmbach  
Salzgitter, Januar 2005

### **BfS-SCHR-34/05** (nur als CD vorhanden)

*Trugenberger-Schnabel, A.; Peter, J.; Kanzliwius, R.; Bernhard, C.; Bergler, I.*  
Umweltradioaktivität in der Bundesrepublik Deutschland  
Bericht der Leitstellen des Bundes und des Bundesamtes für Strahlenschutz  
Daten und Bewertung für 2002 und 2003  
Salzgitter, Juni 2005

## Bisher erschienene BfS-Schriften

---

### **BfS-SCHR-35/05** (nur als CD vorhanden)

*Bergler, I.; Bernhard, C.; Gödde, R.; Löbke-Reinl, A.; Schmitt-Hannig, A.*

Strahlenschutzforschung

Programmreport 2004

Bericht über das vom Bundesamt für Strahlenschutz fachlich und administrativ begleitete

Ressortforschungsprogramm Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Salzgitter, August 2005

### **BfS-SCHR-36/05** (nur als CD vorhanden)

*Steinmetz, M.*

200 Jahre solare UV-Strahlung

Geschichte und Perspektiven

Wissenschaftliches Kolloquium

Salzgitter, Oktober 2005

### **BfS-SCHR-37/05**

*Facharbeitskreis Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke*

Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke

Stand: August 2005

Salzgitter, Oktober 2005

### **BfS-SCHR-38/05**

*Facharbeitskreis Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke*

Daten zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke

Stand: August 2005

Salzgitter, Oktober 2005

### **BfS-SCHR-39/06**

*Borrmann, F.; Brennecke, P.; Koch, W.; Kugel, K.; Rehs, B.; Steyer, S.; Warnecke, E.*

Management of Decommissioning Waste in Germany

Contribution to the IAEA CRP on „Disposal Aspects of Low and Intermediate level Decommissioning Waste“! (T2.40.06)

Stand: August 2006

Salzgitter, Dezember 2006

### **BfS-SCHR-40/06**

*Bergler, I.; Bernhard, C.; Gödde, R.; Löbke-Reinl, A.; Schmitt-Hannig, A.*

Strahlenschutzforschung

Programmreport 2005

Bericht über das vom Bundesamt für Strahlenschutz fachlich und administrative begleitete

Forschungsprogramm Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Salzgitter, Dezember 2006

### **BfS-SCHR-41/07**

*Schkade, U.-K.; Arnold, D. <sup>\*)</sup>; Döring, J.; Hartmann, M.; Wershofen, H. <sup>\*)</sup>*

<sup>\*)</sup> *Physikalisch-Technische Bundesanstalt*

Gammastrahlungsmessung der spezifischen Aktivitäten natürlicher Radionuklide in Umweltproben

7. Vergleichsanalyse „Boden 2006“

Leitstelle für Fragen der Radioaktivitätsüberwachung bei erhöhter natürlicher Radioaktivität

Berlin, Dezember 2006

Salzgitter, Januar 2007

### **BfS-SCHR-42/07**

*Dushe, C.; Ettenhuber, E.; Gehrcke, K.; Kümmel, M.; Schulz, H. <sup>\*)</sup>*

<sup>\*)</sup> *IAF-Radioökologie GmbH Dresden*

Ein neues Verfahren zur Ermittlung der Radonexhalation großer Flächen

Salzgitter, Februar 2007

## Bisher erschienene BfS-Schriften

---

### **BfS-SCHR-43/07**

Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosis  
Teil 2: Ermittlung der Körperdosis bei innerer Strahlenexposition; Inkorporationsüberwachung  
(§§ 40, 41 und 42 Strahlenschutzverordnung)  
Rundschreiben vom 12.01.2007 RS II 3 – 15530/1 (GMBI 2007 S. 623)  
Salzgitter, September 2007

### **BfS-SCHR-44/07**

*Bernhard, C.; Gödde, R.; Löbke-Reinl, A.; Schmitt-Hannig, A.; Trugenberger-Schnabel, A.*  
Strahlenschutzforschung  
Programmreport 2006  
Bericht über das vom Bundesamt für Strahlenschutz fachlich und administrativ begleitete  
Forschungsprogramm Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und  
Reaktorsicherheit  
Salzgitter, Dezember 2007

### **BfS-SCHR-45/09**

urn:nbn:de:0221-2009011200  
*Bernhard-Ströl, C.; Gödde, R.; Hachenberger, Claudia, Löbke-Reinl, A.; Schmitt-Hannig, A.*  
Strahlenschutzforschung  
Programmreport 2007  
Bericht über das vom Bundesamt für Strahlenschutz fachlich begleitete und administrativ umgesetzte  
Forschungsprogramm Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und  
Reaktorsicherheit  
Salzgitter, Januar 2009

### **BfS-SCHR-46/09**

urn:nbn:de:0221-2009082120  
*Bernhard-Ströl, C.; Gödde, R.; Hachenberger, Claudia, Löbke-Reinl, A.; Schmitt-Hannig, A.*  
Strahlenschutzforschung  
Programmreport 2008  
Bericht über das vom Bundesamt für Strahlenschutz fachlich begleitete und administrativ umgesetzte  
Forschungsprogramm Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und  
Reaktorsicherheit  
Salzgitter, November 2009

### **BfS-SCHR-47/09**

urn:nbn:de:0221-2009082154  
Die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) von 2007  
ICRP-Veröffentlichung 103, verabschiedet im März 2007  
Deutsche Ausgabe  
Salzgitter, November 2009

### **BfS-SCHR-48/10**

urn:nbn:de:0221-201009153217  
*Bernhard-Ströl, C.; Gödde, R.; Hachenberger, Claudia, Löbke-Reinl, A.; Schmitt-Hannig, A.*  
Strahlenschutzforschung  
Programmreport 2009  
Bericht über das vom Bundesamt für Strahlenschutz fachlich begleitete und administrativ umgesetzte  
Forschungsprogramm Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und  
Reaktorsicherheit  
Salzgitter, November 2010

## Bisher erschienene BfS-Schriften

---

### **BfS-SCHR-49/11**

urn:nbn:de:0221-201111236640

*Bernhard-Ströl, C.; Gödde, R.; Hachenberger, Claudia, Löbke-Reinl, A.; Schmitt-Hannig, A.*

Strahlenschutzforschung

Programmreport 2010

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

Salzgitter, November 2011

### **BfS-SCHR-50/12**

urn:nbn:de:0221-2012120510259

*Beyermann, M.; Bünger, T.; Guttmann, A.; Schmidt, K.; Wershofen, H.; Winterfeldt, I.; Labahn, A.*

Ringversuch zur Bestimmung von Radon-222, Radium-226, Radium-228, Uran-238, Uran-234 und der Gesamt- $\alpha$ -Aktivität in Trinkwasser – Ringversuch 4/2012

Salzgitter, Dezember 2012

### **BfS-SCHR-51/13**

urn:nbn:de:0221-2013012210275

*Bernhard-Ströl, C.; Gödde, R.; Hachenberger, Claudia, Löbke-Reinl, A.; Schmitt-Hannig, A.*

Strahlenschutzforschung

Programmreport 2011

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

Salzgitter, Dezember 2012

### **BfS-SCHR-52/13**

urn:nbn:de:0221-2013110811124

*Bernhard-Ströl, C.; Gödde, R.; Hachenberger, Claudia, Löbke-Reinl, A.; Schmitt-Hannig, A.;*

*Trugenberger-Schnabel, A.*

Strahlenschutzforschung

Programmreport 2012

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

Salzgitter, Dezember 2013

### **BfS-SCHR-53/14**

urn:nbn:de:0221-2014010911155

*Schmitt-Hannig, A.; Peter, J.; Bernhard-Ströl, C.; Trugenberger-Schnabel, A.; Hachenberger, C,*

*Löbke-Reinl, A.; Schulte-Büttner, B.*

International Cooperation and Research

Report on International Cooperation and Research Activities at the Federal Office for Radiation Protection

Status 2013

Salzgitter, Januar 2014

### **BfS-SCHR-54/14**

urn:nbn:de:0221-2014081211479

*Schmitt-Hannig, A.; Gödde, R.; Löbke-Reinl, A.; Hachenberger, C.; Trugenberger-Schnabel, A.*

Strahlenschutzforschung

Programmreport 2013

Bericht über das vom Bundesamt für Strahlenschutz fachlich begleitete und administrativ umgesetzte Forschungsprogramm Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Salzgitter, September 2014

## Bisher erschienene BfS-Schriften

---

### **BfS-SCHR-55/14**

urn:nbn:de:0221-2015021712440

*Walter, H.; Gering, F.; Arnold, K.; Gerich, B.; Heinrich, G.; Welte, U. \*)*

*\*) Strahlenschutzkommission*

Simulation potentieller Unfallszenarien für den Notfallschutz in der Umgebung von Kernkraftwerken mit RODOS

Salzgitter, Dezember 2014

### **BfS-SCHR-56/15**

urn:nbn:de:0221-2015052612750

*Brendebach, B. \*); Imielski P. \*); Kühn, K.; Rehs, B.*

*\*) Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit*

Stilllegung kerntechnischer Anlagen in Europa

Stand: Dezember 2014

Salzgitter, Mai 2015

### **BfS-SCHR-57/15**

urn:nbn:de:0221-2015082013351

*Schmitt-Hannig, A.; Löbke-Reinl, A.; Peter, J.; Gödde, R.; Hachenberger, C.;*

*Trugenberger-Schnabel, A.*

Strahlenschutzforschung

Programmreport 2014

Bericht über das vom Bundesamt für Strahlenschutz fachlich begleitete und administrativ umgesetzte Forschungsprogramm Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Salzgitter, September 2015

### **BfS-SCHR-58/16**

urn:nbn:de:0221-2016022414011

*Arx, Cyrill von; Glaab, Hubert; Grimm, Christian; Martens, Reinhard; Päsler-Sauer, Jürgen;*

*Scheuermann, Walter; Schnadt, Horst; Schumacher, Peter; Torchiani, Silke; Walter, Hartmut;*

*Wilbois, Thomas*

Vergleich aktuell eingesetzter Modelle zur Beschreibung der atmosphärischen Ausbreitung radioaktiver Stoffe

Abschlussbericht zum Arbeitspaket AP 5500 der Arbeitsgruppe „Erfahrungsfluss Fukushima“ des Ausschusses „Notfallschutz“ der Strahlenschutzkommission

Salzgitter, Februar 2016

### **BfS-SCHR-59/16**

urn:nbn:de:0221-2016080114068

*Schmitt-Hannig, A.; Löbke-Reinl, A.; Peter, J.; Gödde, R.; Hachenberger, C.;*

*Trugenberger-Schnabel, A.*

Strahlenschutzforschung

Programmreport 2015

Bericht über das vom Bundesamt für Strahlenschutz fachlich begleitete und administrativ umgesetzte Forschungsprogramm Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Salzgitter, August 2016



# | Verantwortung für Mensch und Umwelt |

## Kontakt:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 (0)3018 333 0

Telefax: + 49 (0)3018 333 1885

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

E-Mail: [ePost@bfs.de](mailto:ePost@bfs.de)

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz