

## **Strahlenschutz und Medizin**

### **Patienten – Beschäftigte – Gesellschaft**

#### **Bericht über die Jahrestagung 2019 des Fachverbandes für Strahlenschutz**

Christian Streffer, Universitätsklinikum Essen, Christoph Reiners,  
Universitätsklinikum Würzburg, Franz Fehringer, BG ETEM, Köln

Die Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz 2019 fand vom 9. bis 12. September im Rudolf-Virchow-Zentrum (RVZ) des Universitäts-Klinikum Würzburg statt. Die Vorbereitung der Tagung wurde vom neu gegründeten AKMed durchgeführt und von dem AKS des FS unterstützt. Im Folgenden wird über wichtige Aspekte und Daten berichtet, die bei der Tagung mit dem Schwerpunkt „Strahlenschutz und Medizin – Patienten – Beschäftigte – Gesellschaft“ vorgetragen und diskutiert worden sind. Die einzelnen Themen werden entsprechend dem zeitlichen Tagungsablauf behandelt. Das Tagungsthema zeichnet sich dadurch aus, dass der höchste Betrag der „zivilatorischen Strahlenexposition“ der Menschen in Deutschland durch die Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe in der medizinischen Diagnostik und Therapie zustande kommt. Ferner gibt es für Patienten keine Dosisgrenzwerte, allenfalls Richtwerte. Der Arzt entscheidet mit Unterstützung des Medizinphysik-Experten auf der Basis seiner Kenntnisse über den Einsatz einer Maßnahme. Es gilt der Grundsatz „Do more good than harm“ (ICRP 2007).

Dieser Bericht stützt sich auf den Tagungsbericht STRAHLENSCHUTZ UND MEDIZIN - PATIENTEN – BESCHÄFTIGTE – GESELLSCHAFT, Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz 2019, von 9. bis 12. September 2019 Würzburg, ISSN 1013-4506 ISBN: 978-3-7406-0446-2, © by TÜV Media GmbH, TÜV Rheinland Group, Köln 2019.

#### **Eröffnung der Jahrestagung**

Die Tagung wurde durch den Tagungspräsidenten Professor Chr. Reiners am 9. September um 11 Uhr eröffnet. Nach Grußworten von dem MinDirig. Dr. Greipl, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Nukleare Sicherheit, dem Vizepräsidenten der Universität Würzburg Professor H. Einsele und dem Vorsitzenden des Fachverbandes Dr. Th. Steinkopff folgte die Verleihung der Hanns-Langendorff-Medaille an Professor R. Loose, Nürnberg für seine

Verdienste um den praktischen Strahlenschutz in der Medizin insbesondere der Radiologie.

Die Hanns-Langendorff-Medaille wird in Erinnerung an den bedeutenden Strahlenbiologen Hanns Langendorff seit 1992 durch die Hanns-Langendorff-Stiftung an herausragende Wissenschaftler aus dem In- und Ausland verliehen. Zunächst geschah dieses gemeinsam mit der früheren „Vereinigung deutscher Strahlenschutzärzte“ bzw. mit der Nachfolgeorganisation „Gesellschaft für Medizinischen Strahlenschutz“. Nach Auflösung dieser Gesellschaft erfolgt diese Verleihung erstmals mit dem Fachverband für Strahlenschutz.

Den Abschluss der Eröffnungssitzung bildete der spannende, hoch-interessante Vortrag des Astronauten (Kosmonauten) Professor R. Ewald. Ab 1990 gehört der promovierte Physiker Ewald zum Astronautenteam der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR). Von November 1990 bis März 1992 wurde er in Moskau zum Raumfahrer ausgebildet und im Februar 1997 erfolgte seine erste Raumfahrt mit dem Raumschiff Sojus TM-25. Seit dieser Zeit hat er für weitere Missionen trainiert und als „Crew Operations Manager“ wissenschaftliche Experimente auf den Raumflügen betreut. Herr Ewald berichtete lebhaft über seine Erfahrungen und ging auch auf gesundheitliche Probleme insbesondere Störungen im ZNS und mögliche Strahlenrisiken ein. Im Weltraum hat man es vor allem auch mit „schweren“ Ionen, also Hoch-LET Strahlung, zu tun, bei der viele Fragen hinsichtlich der Wirkung offen sind, einem Arbeitsfeld, dessen der Fachverband sich in Zukunft annehmen sollte.

### **Strahlenschutz in der Röntgendiagnostik und der interventionellen Radiologie**

Die wesentlichen Expositionen durch ionisierende Strahlen der Bevölkerung erfolgen durch die Anwendung von Verfahren mit ionisierenden Strahlen in diesem Bereich. Die Computertomographie (CT) ergibt den höchsten Beitrag (etwa 70%). Zwar nimmt die Dosis pro Untersuchung durch technische Verbesserungen ständig ab, aber die Frequenz an Untersuchungen nimmt zu (um etwa 6 % pro Jahr). Infolge der Abnahme der Dosis pro Untersuchung durch technische Fortschritte konnten die vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) seit 2003 ca. alle 7 Jahre veröffentlichten Diagnostischen Referenzwerte (DRW) reduziert werden. Es wurde vorgetragen, dass neben iterativen Rekonstruktionsverfahren auch die Nutzung der künstlichen Intelligenz Möglichkeiten bietet, das „Bildrauschen“ zu reduzieren, ohne den

Informationsgehalt der Schnittbilder zu vermindern. Es wurde ferner in einem weiteren Vortrag gezeigt, dass Monte Carlo Methoden die genaueste Methode bieten, um die Strahlenexpositionen von CT-Untersuchungen räumlich aufgelöst zu bestimmen und über diese Methode die Dosis zu optimieren. Schließlich wurde darauf hingewiesen, dass durch die neuen Regelungen zum Strahlenschutz Medizinphysik-Experten zwingend erforderlich sind, um derartige Optimierungen vorzunehmen.

Auch in Österreich haben die CT-Untersuchungen erheblich zugenommen; in den Jahren 2001 bis 2015 hat mehr als eine Verdopplung stattgefunden, obwohl die Zahl der CT-Geräte unverändert blieb. Dieser Befund war jedoch vom Alter der Patienten abhängig. Bei Kindern und Jugendlichen nahm die Frequenz an CT-Untersuchungen ab, da Ultraschall-Untersuchungen stärker zum Einsatz kamen. Als ein Grund für die Zunahme der CT-Gesamtzahl wurde der zunehmende Einsatz der Telemedizin vermutet. Der Einsatz von CT-Untersuchungen bei dem Verdacht auf eine Appendizitis hat andererseits zu einer insgesamt Abnahme der Appendektomien geführt, da durch diese Methode offensichtlich eine bessere Diagnostik erreicht wird.

Da die Strahlen-Expositionen in den ersten Jahren der CT-Untersuchungen erheblich war, ist aufgrund der Risikofaktoren, die aus epidemiologischen Untersuchungen, z.B. an den Überlebenden in Hiroshima und Nagasaki nach den Atombomben-Abwürfen, erhalten wurden, vermutet worden, dass die CT-Untersuchungen Krebs bei Kindern verursachen. Ab 2012 wurden Daten mit erhöhten Raten an Leukämien und Hirntumoren bei Kindern nach CT-Untersuchungen berichtet. Diese Studien sind wegen verschiedener methodischer Mängel kritisiert worden. Daher sind größere, internationale Studien angelegt worden, bei denen vor allem bessere Dosis-Ermittlungen vorgenommen werden. Ferner sollen länderspezifische Aspekte berücksichtigt werden. Es wurden die neuesten Ergebnisse, Einschränkungen und Stärken der laufenden europäischen Kohortenstudien und einer gepoolten europäischen Kohortenstudie vorgestellt. Die Studien-Zeiträume sind allerdings zu kurz, um abschließend ein Urteil abzugeben.

In einem weiteren Beitrag dieser Sitzung wurde berichtet, dass bei der Laser-Materialbearbeitung von Werkstücken unerwünschte Röntgenstrahlung entstehen kann. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) hat deren Dosisleistung und spektrale Verteilung erstmalig bestimmt. Es ergab sich eine Dosisleistung in Abhängigkeit vom bearbeiteten Material und dessen

Beschaffenheit in der Größenordnung von 1600 mSv/h bis 7300 mSv/h in der Strahlenschutzmessgröße  $H'(0,07)$  16 mSv/h bis 71 mSv/h in der Messgröße  $H'(3)$  und 1mSv/h bis 4mSv/h in der Messgröße  $H^*(10)$ , jeweils bezogen auf die Material-Bearbeitungszeit. Durch derart hohe Dosisleistungen würden Grenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen innerhalb weniger Minuten bis zu einer Stunde (für die lokale Hautdosis, abgeschätzt durch  $H'(0,07)$  und die Augenlinsendosis, abgeschätzt durch  $H'(3)$  innerhalb einiger Stunden) für die effektive Dosis des gesamten Körpers, abgeschätzt durch  $H^*(10)$  überschritten. Die spektrale Verteilung lag im Bereich von wenigen keV bis ca. 20 keV. Der große Unterschied ergibt sich durch die Konversion von Fluenz zu  $H^*(10)$ . Der Beitrag auf Grund von Photonen mit einer Energie oberhalb von 30keV ist stets vernachlässigbar (unterhalb 0,1%).

Schließlich wurde in einem sehr interessanten Vortrag ein Trainingssystem für die interventionelle Radiologie, speziell für Kathetereingriffe am Herzen und an peripheren Gefäßen vorgestellt. Es gibt Virtual Reality (VR)-Simulatoren, die in Analogie zur Simulation in der Luftfahrt arbeiten und ein virtuelles Katheter-Training erlauben. Es werden auf der Basis der Anatomie des simulierten Patienten, der Position des C-Bogen sowie der Einstellungen des Untersuchers das Dosis-Flächen-Produkt und die maximale Hautdosis kontinuierlich berechnet. Die fünfjährige Erfahrung hat ergeben, dass mit diesem Verfahren am Interdisziplinären Trainings- und Simulationszentrum (INTUS) der Universitätsklinik Würzburg essentielle dosisreduzierende Maßnahmen und damit ein interventionelles Arbeiten nach dem ALARA-Prinzip erlernt werden können.

### **Personendosimetrie und berufliche Strahlenexposition in der Medizin, insbesondere die Betrachtung der Augenlinse**

Die Herabsetzung des Dosis-Grenzwertes für die Augenlinse auf 20 mSv/a für beruflich strahlenexportierte Personen ist eine Herausforderung für die Dosismessung sowie für den Radiologen und Nuklearmediziner in der Praxis. Die Messgrößen  $H_p(3)$  und  $H'(3)$  dienen zur Abschätzung der Augenlinsen-Äquivalentdosis. Für die Kalibrierung von Dosimetern für  $H_p(3)$  ist das Wasser-Zylinderphantom einzusetzen. Dosimeter für  $H'(3)$  werden stets frei in Luft bestrahlt. Es sind Messvergleiche durchgeführt worden, um die verschiedenen Dosimeter-Bauarten zu vergleichen. Für Photonen-Strahlung sind die meisten Bauarten der Dosimeter geeignet. Dagegen können nur sehr wenige Dosimeter-Bauarten für Beta-Strahlung eingesetzt werden. Im letzteren Falle kommt es

zum Überschätzen sowie Unterschätzen der Dosis um mehrere Größenordnungen.

Trotz dieser klaren Aussagen hinsichtlich der Dosismessung ergeben sich erhebliche Probleme für die Personendosimetrie am Arbeitsplatz. Es werden verschiedene Messsysteme von den amtlichen Messstellen angeboten. Manche dieser Systeme sind jedoch schwer zu handhaben. Durch falsche Anwendungen insbesondere falsche Messorte können Messfehler bis zu einem Faktor 5 auftreten, sodass der Dosisgrenzwert schnell überschritten angezeigt werden kann. Von einer der Messstellen ist ein einfach zu handhabendes Dosimeter der Messgröße Hp(3) entwickelt worden. Dieses Dosimeter kann in die Strahlenschutzbrille integriert werden und ist daher optimal geeignet, die Dosis der Augenlinse zu messen. Offensichtlich werden die deutschen amtlichen Personendosis-Messstellen dieses Dosimeter für die Überwachung der Dosis der Augenlinse in Zukunft anbieten.

In dem folgenden Vortrag wurden nach Beschreibung der Biologie einer Bildung von Katarakten die Strahlenwirkungen in der Augenlinse dargelegt. Neuere Untersuchungen aus Hiroshima und Nagasaki, von Tschernobyl-Liquidatoren und Patienten nach Bestrahlung haben ergeben, dass kein Schwellenwert für die Katarakt-Bildung beobachtet wurde. Es ist daher unklar, ob dieser Effekt zu den stochastischen Effekten zu rechnen ist. Die ICRP hat infolgedessen empfohlen, den Dosisgrenzwert von 150 mSv/a auf 20 mSv/a zu reduzieren. Sowohl die IAEA als auch die EU Basic Safety Standards haben diese Empfehlung übernommen. Es stellt sich allerdings die Frage, ob damit das Risiko der Linsentrübung überschätzt wird.

In den beiden folgenden Vorträgen wurden die Probleme angesprochen, die sich für die Radiologie und die Nuklearmedizin durch den niedrigeren Dosisgrenzwert stellen. Diese Situation ist insbesondere für die interventionelle Radiologie eine große Herausforderung in der klinischen Praxis. Dieser ist mit einem konsequenten apparativen und personenbezogenen Strahlenschutz zu begegnen, um auch bei aufwendigen und zahlreichen Eingriffen Überschreitungen zu vermeiden. Wichtig sind gezielte Unterweisungen und Trainings sowie vor allem, stets die Strahlenschutzbrille zu tragen. „Der Anspruch eines größtmöglichen Schutzes der Augenlinse und die Wirklichkeit der täglichen klinischen Praxis klaffen jedoch vielerorts noch weit auseinander, sowohl im Bewusstsein der Anwender als auch in der verfügbaren Ausstattung der Kliniken.“ Stetige Information und Unterweisung sind also notwendig.

Hinsichtlich der Problematik in der Nuklearmedizin wurden Dosisabschätzungen für die Augenlinse durch Arbeiten mit den drei Radionukliden F-18, Tc-99m und I-131 vorgestellt. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse kam der Vortragende zu dem Ergebnis: „In der Nuklearmedizin können Strahlenexpositionen der Augenlinse von einigen Millisievert im Kalenderjahr auftreten, abhängig von den individuellen Expositionsbedingungen. Eine Überschreitung des Grenzwertes von 20 Millisievert im Kalenderjahr erscheint unwahrscheinlich.“ Das Tragen von Schutzbrillen wurde nicht für notwendig erachtet. In jedem Falle ist das Tragen von speziellen Schutzbrillen nicht notwendig.

### **Hauptvortrag: R. Loose Die Arbeit des Committee 3 (Protection in Medicine) der ICRP und Auswirkungen auf den Deutschen Strahlenschutz**

Es wurde die Entwicklung der Regelungen des Strahlenschutzes einschließlich für die Medizin dargelegt: beginnend mit der Zusammenstellung und Bewertung der Daten der Literatur durch die UNO-Kommission (UNSCEAR), deren Aufnahme und Verarbeitung zu Empfehlungen der ICRP führen, als Grundlage für die Regeln der Europäischen Kommission, die dann in gesetzliche Regeln der EU-Mitglieds-Länder einfließen. Schließlich wurden sechs neue, für die Medizin wichtige, verabschiedete und fünf vor der Verabschiedung stehende ICRP-Empfehlungen besprochen.

### **Aktuelle Regelungen und Empfehlungen im Strahlenschutz in Deutschland, Österreich und in der Schweiz.**

In der ersten Sitzung zu diesem Thema wurde von Vertretern der zuständigen Ministerien der drei Länder wesentliche Änderungen auf der Basis der ICRP Publikation 103 und der daraus folgenden EU Richtlinie (für Deutschland und Österreich sowie bedingt für die Schweiz) vorgetragen. Es wurde auf die stärkere Bedeutung des Medizinphysik-Experten mit ihrer über die Strahlentherapie hinausgehende Kompetenz, auf Verordnungen zur Früherkennung und auf Radon sowie auf noch kommende weitere Verordnungen hingewiesen. Diagnostische Methoden mit höheren Expositionen >5 mSv (CT) sowie die interventionelle Radiologie werden stärker in den Fokus genommen. In der Schweiz wird ein Schwerpunkt auf klinische Audits gelegt.

In der zweiten Sitzung zu diesem Thema wurden von den „Strahlenschutz-Philosophen“ des FS kritische Anmerkungen zu Neuerungen der ICRP gemacht.

In diesem Zusammenhang werden eine mangelnde Begründung der Grenz- und Richtwerte, die Empfehlungen zum Schutz der Umwelt, zu Radon und zum Grenzwert für die Augenlinse angeführt. Der praktische Strahlenschutz sollte stärker im Vordergrund stehen. In einem Beitrag aus dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz wurde die Einführung des geforderten neuen Systems zur Meldung eines bedeutsamen Vorkommnisses diskutiert. Dieses System wird jetzt auf den medizinischen Bereich ausgeweitet. Die Daten werden von einer neuen zentralen Stelle beim Bundesamt für Strahlenschutz erfasst. Der Strahlenschutzverantwortliche hat bedeutsame Vorkommnisse unverzüglich an die zuständige Behörde der Länder zu melden. Neue Regelungen fordern, dass in Österreich Angaben zur Patientendosis Teil des radiologischen Befundes sein müssen. Die wissenschaftlichen radiologischen Gesellschaften haben zu diesem Thema Empfehlungen verfasst, die mit dem Bundesministerium für Arbeit, Soziales, Gesundheit und Konsumentenschutz (BMASGK) akkordiert werden. Die in diesen Empfehlungen enthaltenen Dosisangaben beziehen sich auf Röntgenaufnahmen, Dual-Röntgen-Absorptiometrie, Mammographie, Computertomographie und Nuklearmedizin.

Abschließend wurde vom TÜV Süd unter Hinweis auf den Missbrauch von radioaktiven Stoffen (z.B. Goiania, Litvinenko) ein Regelwerk für den Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD) vorgestellt, um ein Sicherungsregime beim Umgang mit und bei der Beförderung von radioaktiven Stoffen sicherzustellen.

### **Natürliche Radioaktivität**

In dieser Sitzung wurden die Expositionen und Wirkung des Radon diskutiert, das den höchsten Beitrag zur Strahlenexposition aus natürlichen Quellen liefert. Im ersten Vortrag wurde durch einen Vertreter des BMU klargestellt, dass aufgrund des neuen Strahlenschutzgesetz für die Radonaktivitätskonzentration in der Luft von Aufenthaltsräumen und an Arbeitsplätzen jeweils ein Referenzwert von 300 Becquerel pro Kubikmeter im Jahresmittel gilt. Es ist unter Beteiligung der Bundesländer ein Radonmaßnahmenplan erarbeitet worden. Dieser Plan dient der Information über die Strategie zur Verringerung der Exposition durch Radon in Deutschland. Es wurden angesprochen die Bereiche: Erhebung des Radonvorkommens in Deutschland, Maßnahmen für bestehende Gebäude und Neubauten mit Aufenthaltsräumen, Radon an Arbeitsplätzen und Forschung zu Radon.

In einem folgenden Beitrag wurde ein Messprotokoll beschrieben, um die Radonkonzentration in großen Gebäuden abzuschätzen. Mit diesem Protokoll wurden Daten und Erfahrungen über die Quellen und Ausbreitung des Radons in zwei großen Gebäuden gesammelt. Es ergab sich, dass die üblichen Konzepte, die höchsten Radonkonzentrationen in den tiefen Geschossen zu erwarten, zur Unterschätzung der Radonkonzentration führen. Den Baustoffen und damit der Freisetzung des Radons kommt bei großen Gebäuden eine starke Bedeutung zu. Es wurden Verfahren entwickelt, um diese Freisetzung zu berücksichtigen. Mit der neuen Regelung der Radonkonzentration für das Jahresmittel ist eine Überschreitung des Richtwertes deutschlandweit in einer Zahl von Gebäuden zu erwarten. Es muss daher nach Schutzmaßnahmen gesucht werden. Eine günstige Maßnahme ist die Lüftung. Es wurde ein Radonmonitor entwickelt, der drahtlos in Lüftungsanlagen eingebunden werden kann. Diese Anlage wurde in einem Gebäude mit sehr hohen Radonkonzentrationen bei verschiedenen Außentemperaturen erprobt, die Radonkonzentration konnte etwa um den Faktor 10 gesenkt werden. Die beschriebenen Regelungen zum Radon machen es notwendig, Radonvorsorgegebiete zu ermitteln. Derartige Daten sind für das Bundesland Hessen erhoben und vorgestellt worden. Es wird angestrebt, die Messmethoden zu optimieren und zeitlich zu verkürzen.

Es folgten Berichte über biologische sowie epidemiologische Untersuchungen. Es ist beachtenswert, dass die Behandlung von chronisch-entzündlichen und degenerativen Erkrankungen mit Radon-Expositionen erfolgt, wie sie in etwa gleichen Größenordnungen bei der Bevölkerung auftreten. Die Ergebnisse an Patienten zeigen eine verbesserte Funktionalität der Gelenke, die wahrscheinlich auf osteoimmunologische Prozesse beruhen. Andererseits treten bei Experimenten mit Mäusen bei diesen Radon-Expositionen erhöht DNA-Schädigungen in den Zellen der Lunge auf. Es ist allgemein bekannt, dass erhöhte Radon-Expositionen bei Bergarbeitern aber auch bei der allgemeinen Bevölkerung vermehrt zu Lungenkrebs führen. Bei Rauchern und auch bei Ex-Rauchern ist dieses Risiko besonders hoch. Die epidemiologischen Studien ergeben eine lineare Dosis-Wirkungs-Beziehung für Lungenkrebs. Es ergibt sich aus den Studien ein Risikofaktor für das zusätzlich relative Risiko (ERR) von 0,16 pro  $100 \text{ Bq m}^{-3}$ . Auf dieser Basis werden in Deutschland pro Jahr etwa radonbedingte 1900 Todesfälle abgeschätzt.



## Arbeitsmedizin und Strahlenschutz

Für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie A gilt, dass jährlich eine ärztliche Vorsorge-Untersuchung stattfinden muss. Bei Strahlen-Unfällen stehen „deterministische“ Effekte im Vordergrund. Es sollen derartige Effekte vermieden bzw. bei höheren Strahlendosen je nach Höhe der Dosen sollte ambulant oder stationär behandelt werden. Zu Strahlendosen  $<1$  Gy wurden Studien vorgetragen, um mit Biomarkern eine Risiko-Abschätzung zu erreichen. Es wurden zytogenetische Methoden (dizentrische Chromosomen, Translokation, Mikronuklei) hinsichtlich des Zeitaufwandes, Empfindlichkeit und Genauigkeit beschrieben. Es wurde darüber hinaus auf neuere molekularbiologische Methoden hingewiesen, die weiterentwickelt werden müssen. Ferner wurde die Dekorporierung von Radionukliden angesprochen.

In einem weiteren Beitrag wurde mitgeteilt, dass in der Schweiz eine generelle, jährliche ärztliche Vorsorge-Untersuchung nicht mehr stattfindet. Im medizinischen Bereich findet eine ärztliche Untersuchung beim Antritt einer neuen Stelle statt, jährliche weitere Untersuchungen sind nicht notwendig. Bei Beschäftigten in Kernkraftwerken ist die jährliche Untersuchung, in anderen Betrieben alle zwei Jahre notwendig. In den Jahren 2000 bis 2015 haben etwa 159.000 Untersuchungen stattgefunden. Es gab 21 Meldungen für eine Berufskrankheit, von denen 5 Fälle anerkannt wurden.

Der nächste Beitrag ging auf die Kriterien ein, nach denen in Deutschland eine Krankheit als Berufskrankheit anerkannt werden kann, die ursächlich durch die berufliche Einwirkung ionisierender Strahlung entstanden ist. Die rechtliche Grundlage ist das Sozialgesetzbuch VII. Bei deterministischen Schäden, die nach hohen Strahlenexpositionen auftreten, ist ein Zusammenhang relativ einfach nachzuweisen. Sehr viel schwieriger ist ein solcher Nachweis bei stochastischen Strahlenschäden, z. B. Krebs oder Leukämie. Zum einen kann keine dieser Erkrankungen ausschließlich durch ionisierende Strahlung ausgelöst werden und zum Zweiten ist jeder Mensch auch im privaten Bereich ionisierender Strahlung ausgesetzt. In diesen Fällen gilt es, eine Verursachungswahrscheinlichkeitsrechnung durchzuführen. Eine Anerkennung nach Sozialrecht wird ausgesprochen, wenn unter Abwägung aller möglichen Krankheitsursachen mehr für als gegen einen Zusammenhang mit der beruflichen Strahlenexposition spricht. Eine reine Möglichkeit des Zusammenhangs ist nicht ausreichend.

## **Hauptvortrag H.-G. Menzel „Größen und Einheiten in der Strahlenschutzdosimetrie“**

Die Energiedosis ist die grundlegende Messgröße der Dosimetrie ionisierender Strahlen, für die es Primärstandards für einige Materialien gibt. Der Zusammenhang zwischen Energiedosis und biologischen Wirkungen ist allerdings nicht eindeutig und hängt von der Art und Energie der Strahlen ab. Diesem, mit dem Begriff Strahlenqualität umschriebenen Phänomen, wird in der Praxis durch Verwendung von Wichtungsfaktoren für die Energiedosis Rechnung getragen. Im Strahlenschutz werden, basierend auf experimentellen Ergebnissen von Untersuchungen zur relativen biologischen Wirksamkeit (RBW) und biophysikalischen Überlegungen, Strahlenwichtungsfaktoren ( $w_R$ ) verwendet. Zur Abschätzung des stochastischen Gesamtrisikos werden wegen der unterschiedlichen Strahlenempfindlichkeit einzelner Organe und Gewebe Gewebewichtungsfaktoren eingeführt. Diese Faktoren sind gemittelt für beide Geschlechter und alle Altersgruppen. Daher ist die dann resultierende Effektive Dosis ( $E$ ) nicht geeignet das individuelle Risiko zu ermitteln, sie kann nur zur Abschätzung des Risikos für Gruppen von Personen dienen, sie ist also nur „Risiko bezogen“. Da die für die Festlegung von Grenzwerten und für die Optimierung gesetzlich vorgeschriebene Strahlenschutzgröße  $E$  nicht messbar ist, werden für die externe Strahlung operationelle Größen benutzt. Der Vortrag ging auf den konzeptionellen und geschichtlichen Hintergrund der Entwicklung dieses Konzepts ein und diskutierte die von ICRU und ICRP vorgeschlagenen neuen Definitionen für die operationellen Messgrößen einschließlich der möglichen Auswirkungen auf den praktischen Strahlenschutz. Abschließend wurde betont: „ICRU hat den Entwurf (bedingt) zur Veröffentlichung genehmigt. ICRP entscheidet bei dem nächsten Treffen über Genehmigung. Nach der Veröffentlichung als gemeinsamer Bericht müssen die vorgeschlagenen neuen Definitionen erst (und nur dann) in die Praxis umgesetzt werden, nachdem die Empfehlungen in potentielle neue IAEA und EU Basic Safety Standard übernommen werden, nachdem nationale Gesetze und Regelungen entsprechend verabschiedet werden“.

### **Aktuelles aus der Strahlenbiologie**

Seit langem wird nach Möglichkeiten gesucht, die individuelle Strahlenempfindlichkeit zu bestimmen. Klinische Daten vor allem aus der Strahlentherapie zeigen, dass es erhebliche Unterschiede bei den

Strahlenreaktionen gibt. Vor allem der erste Beitrag dieser Sitzung beschäftigte sich mit dieser Problematik. Danach ist die individuelle Strahlenempfindlichkeit der meisten Menschen polygenetisch bedingt. Ein polygenetischer Phänotyp beruht auf dem Zusammenwirken von mehreren Risikoallelen mit geringer Penetranz. Ein wichtiger Punkt ist, dass strahlenbedingte Schäden zufällig verteilt sind. Die Suche nach prädiktiven Tests war bisher nicht erfolgreich; diese Aussage bezieht sich auch auf molekularbiologische Tests hinsichtlich DNA-Schäden.

In einem zweiten Beitrag ging es darum, mit Hilfe einer Früh- und Hochdurchsatzdiagnostik zwischen nicht, gering und stark strahlenexponierten Personen mit einem später auftretenden hämatologischen akuten Strahlensyndrom (HARS) unterscheiden zu können. Es wird die Genexpressionsanalyse als Hochdurchsatz-Diagnostikum verwendet, um eine Aussage über den Schweregrad des HARS anstelle einer Dosisabschätzung sowie über die Notwendigkeit einer Hospitalisierung machen zu können. Es wurden Änderungen der Genexpression für eine Reihe von vorher identifizierten Genen mittels Gentyptisierungen untersucht. Die Vorhersage der Schweregrade sowie die Identifizierung der Individuen, welche hospitalisiert werden müssen, konnte mit einer Übereinstimmung von 90-97% erreicht werden.

Aus demselben Institut wurde über Untersuchungen von Genexpressionen nach Einwirkung von EMF-Feldern berichtet. Es wurden mögliche zelluläre Reaktionsmuster von MikroRNAs in menschlichen Blutzellen nach Kurzzeitexpositionen (0 bis 90 Minuten) mit 900 MHz EMF untersucht. Insgesamt wurden Blutproben von 5 Personen in Hinsicht auf die Expression von MikroRNAs getestet. Es ergaben sich erste Hinweise auf individuelle Unterschiede hinsichtlich der Reaktion auf EMF-Expositionen. Es werden weitere Untersuchungen unternommen, wobei nicht-thermische Effekte von Bedeutung sein können.

Schließlich wurde über immunologische Untersuchungen bei Patienten mit einer SIRT-Therapie (selective internal radiotherapy) wegen maligner Erkrankungen der Leber mit Y-90 berichtet. Es sollte die immunologische Funktion mit dem Auftritt von DNA-Doppelstrangbrüchen (DSB) in Zusammenhang gebracht werden. Die Untersuchungen zeigten, dass die reduzierte Immun-Antwort durch spezifische Antikörper nicht gesteigert werden konnte.

## Strahlenschutz in der Radioonkologie

Die optimierte Tumorthherapie durch ionisierende Partikel (Protonen, „schwere“ Ionen) nimmt zunehmend Raum ein. In dem ersten Beitrag dieser Sitzung wurden zwei Aspekte behandelt: Die Dosimetrie sekundärer Neutronen und die Aktivierung von Messing-Aperturen durch Protonen hoher Energien. Es wurden die Messmethoden für Neutronen unterschiedlicher Energien beschrieben. Kollimierende Aperturen aus Messing werden genutzt, um Strahlenfelder mit einem scharfen Dosisabfall zu erreichen. Protonen-induzierte Kernreaktionen können dabei Radionuklide verursachen. Die kurzlebigen Isotope  $^{63}\text{Zn}$  und  $^{60,62}\text{Cu}$  sind die größten Aktivitäten direkt nach der Bestrahlung. Unter den langlebigen Isotopen, welche die Abklingzeit bestimmen, liefern  $^{57,58}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ , und  $^{54}\text{Mn}$  den größten Beitrag zur Radioaktivität und damit zur Dosis.

In modernen Einrichtungen der Radioonkologie werden Hybridgeräte klinisch eingesetzt, die Magnetresonanztomographie (MRT) und Strahlentherapie-Geräte zur Magnetresonanz-geführten Strahlentherapie (MRgRT) vereinen. Damit kann auf räumliche Veränderungen der Zielstrukturen durch Atembewegungen, Darmperistaltik oder Füllzustände von Hohlorganen reagiert werden. Durch das Magnetfeld von 0,35 bis 1,5 T werden die im Gewebe entstehenden Sekundär-Elektronen abgelenkt und die Energiedeposition ändert sich. Diese Bedingungen und damit notwendige Korrekturen wurden erläutert. Unter Einsatz von cine-MRT können zeitaufgelöste zweidimensionale Schichtbilder erzeugt werden und es kann die Bestrahlung abgebrochen werden, wenn der Tumor sich aus dem Hoch-Dosisfeld heraus bewegt. Auch ortsgenaue Kenntnisse der Dosisvorbelastung können und müssen bei der Strahlentherapie berücksichtigt werden, sodass die Anpassung der Bestrahlungs-Planung erheblich verbessert werden kann.

Im folgenden Vortrag wurden die physikalischen Grundlagen von Teilchen-Therapieanlagen vorgestellt unter Berücksichtigung der Reichweite der ionisierenden Teilchen (Protonen, Ionen der Elemente He, C, N, O und Neon-Ionen) im Gewebe. „Die Erzeugung von Strahlung bei der Abbremsung der Ionen in Materie durch Kern-Kern Stöße wird als räumliche Dosisverteilung (Hauptanteil ist Neutronenstrahlung) für die Beispiele eines hochenergetischen Kohlenstoffionenstrahls, der in Graphit gestoppt wird und eines hochenergetischen Protonenstrahls, der in Gewebe-äquivalentem Material abgebremst wird, dargestellt.“ Die Teilchen werden für die Therapie in der Tiefe auf erhebliche Energien (Protonen: 220 MeV; C-Ionen: 430 MeV) beschleunigt.

Schließlich wurden zwei Beispiele für Abschirmungen präsentiert: ein Bestrahlungsraum der Marburger Ionentherapieanlage und der Beschleunigerbunker mit Zyklotron und Degradier (Abbremsvorrichtung für Protonen) der Dresdener Protonentherapieanlage.

Nach diesen Beiträgen zu physikalischen Grundlagen und Dosimetrie moderner Strahlentherapie-Anlagen folgten zwei Vorträge zur klinischen Radioonkologie zunächst der konventionellen Therapie und dann zur Therapie mit schweren Ionen. Aufgrund des heutigen hohen Entwicklungsstandes des Strahlenschutzes an den konventionellen Therapie-Anlagen haben die Beschäftigten im allgemeinen keine messbaren Strahlen-Expositionen, während die Patienten notwendigerweise hohe, möglichst gut auf den Krebs fokussierte Strahlendosen erhalten müssen. Es gibt daher auch keine Dosisgrenzwerte für die Patienten. Es liegt in der Expertise des behandelnden Arztes und des Medizinphysik-Experten, die Strahlendosis festzulegen und einen effektiven Schutz des Patienten vor unnötiger Strahlung zu gewährleisten. Dieses wird durch eine sorgfältige Planung und Durchführung der Therapie erreicht. Auch hier wurde die Herausforderung betont, bei der Therapieplanung die Bewegung der Organe zu beachten.

Die Therapie mit „schweren Ionen“ (überwiegend Kohlenstoff-Ionen) ermöglicht es, durch gute Planung im Körper tiefliegende und sehr resistente Tumoren mit herausragender Präzision zu erreichen. Das um den Tumor liegende Gewebe kann besser geschont werden. Dieses gilt in besonderem Maße für Tumoren im Zentralnervensystem, am Rückenmark, am Sehnerv oder dem Darm. Insbesondere bei Kindern und Jugendlichen hat diese Präzision eine hohe Bedeutung. Die Ionen-Strahlung mit ihrem hohen LET führt zu DNA-Schäden, die sich nicht oder nur sehr schwer reparieren lassen, sodass Tumorzellen mit einer starken Repair-Kapazität, die mit Photonen (niedrigem LET) nicht geschädigt werden, durch schwere Ionen abgetötet werden. Allerdings ist der apparative Aufwand relativ hoch und die Schwerionentherapie damit teuer. In den Jahren 1997 – 2008 wurden durch die Heidelberger Klinik 440 Patienten bei der Deutschen Gesellschaft für Schwerionen (GSI) in Darmstadt mit Kohlenstoff-Ionen und seit 2009 am Heidelberger Ionenstrahltherapiezentrum (HIT) mehr als 5.000 Patienten behandelt.

## Strahlenschutz in der Nuklearmedizin

In einem ersten Vortrag wurden Aspekte des Strahlenschutzes bei PET/CT behandelt. Die Kombination von der Positronen Emissions Tomographie (PET) und der röntgenologischen Computer Tomographie (CT) hat ein starkes Potenzial in der Diagnostik entwickelt. Es wurden Aspekte des Strahlenschutzes für die Patienten, die Beschäftigten sowie das Pflegepersonal, den Transportdienst und Begleitpersonen vorgetragen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Kombination der beiden Technologien. Daraus resultieren für den Patienten Strahlendosen in Höhe von etwa 1 – 5 mSv. Hinsichtlich der Exposition der Mitarbeiter ist die Exposition durch das CT unerheblich. Die Exposition bei der PET fällt durch die Radioaktivität im Patienten ins Gewicht, da mit jedem Betazerfall zwei (hochenergetische) Vernichtungsquanten (511 keV) entstehen, die im Patienten kaum geschwächt werden und darüber hinaus gegebenenfalls noch Gammastrahlung aus der Zerfallskaskade zur Exposition beiträgt. Die resultierende Strahlenexposition für die Mitarbeiter ist, normiert auf die applizierte Aktivität, erheblich höher als bei vergleichbaren Technetium-99m Aktivitäten. Die Ganzkörper Strahlenexposition der Mitarbeiter bei der Betreuung der Patienten ist gradlinig abzuschätzen und wird durch die Personendosimetrie zuverlässig erfasst. Ungünstiger und schwerer zu ermitteln ist der Vergleich bei der Handhabung mit der Aktivität (Aufziehen der Spritze). Hier ist es grundsätzlich möglich, dass eine signifikante Exposition der Hände durch  $\beta$ -Strahlung erfolgt. „Für die strahlenüberwachten Mitarbeiter am PET/CT ergeben sich folgende Forderungen: 1.) Ausreichende Personalausstattung, um eine Konzentration der Strahlenexposition auf wenige Mitarbeiter zu vermeiden. 2.) Anhaltend konsequente Beachtung der Regeln zur Minimierung der Strahlenexposition 3.) Strahlenschutz Überwachung mit  $\beta$ -empfindlichen Dosimetern. 4.) Tragen der Fingerringdosimetern an der richtigen Stelle.“ Bei Personen außerhalb des Kontrollbereiches können Expositionen auftreten, die bei  $<1$  mSv pro Jahr liegen.“

In einem weiteren Beitrag wurde berichtet über die Inkorporationsüberwachung der Beschäftigten bei Arbeiten mit Lu-177 maskierten Pharmaka, die für die Therapie von Prostata-Karzinomen und neuroendokrinen Tumoren eingesetzt werden. Lu-177 hat eine physikalische Halbwertszeit von 9,6 Tagen. Bei seinem radioaktiven Zerfall werden  $\beta$ -Partikel mit einer Energie von 498 keV freigesetzt. Bei jedem Therapiezyklus werden 7,4 GBq der Radioaktivität verabreicht. Ab einer Jahresdosis von 1 mSv ist eine regelmäßige Inkorporationsüberwachung im Ganzkörperzähler notwendig. Es wurden

Abschätzungen der Strahlendosen nach Inkorporation von Lu-177 bei 250 Applikationen pro Jahr vorgestellt .

In einem weiteren Bericht wurde zu den Strahlenexpositionen der Beschäftigten in einer nuklearmedizinischen Universitätsklinik Stellung bezogen. Die Mehrheit der Mitarbeiter wird mit den üblichen Personen-Dosimetern überwacht. Häufig finden beim Umgang mit  $\beta$ -Strahlern Messungen mit Fingerringdosimetern und beim Umgang mit Jod-131 in der Therapie Überwachung im Ganzkörperzähler statt. Die höchsten Strahlenexpositionen treten in der Radiochemie auf. Haut- und Fingerdosen bis hin zur Grenzwertüberschreitung sind möglich, wenn die notwendigen Schutzmaßnahmen nicht konsequent eingehalten werden.

Mit einem abschließenden Beitrag dieser Sitzung wurde deutlich gemacht, dass es in der Radiochemie einige Besonderheiten hinsichtlich des Strahlenschutzes gibt. So können Strahlenschutzrecht und Arzneimittelrecht einander entgegenstehen. Bei der Luftführung im Labor gibt es entgegengesetzte Regelungen. Bei Testung der Sterilität und anderer externen Analytik treten Probleme auf. Die physikalische Halbwertszeit spielt eine wichtige Rolle hinsichtlich der Dauer solcher Tests. Die Exposition des Gesamtkörpers kann durch Abschirmung niedrig gehalten werden. Bei Teilkörperexpositionen (Hände, Kopf) können jedoch Probleme auftreten. Dieses gilt insbesondere für den erniedrigten Grenzwert für die Augenlinse. Vielfältige Schwierigkeiten treten beim Abfallmanagement auf.

### **Kommunikation mit dem Patienten zum Strahlenrisiko**

Die Richtlinie EURATIOM 2013//59 enthielt bereits die Forderung, dass Personen, an denen ionisierende Strahlen oder radioaktive Stoffe angewendet werden, vor der Anwendung über das Strahlenrisiko zu informieren sind. Mit der Novelle der Strahlenschutzverordnung von 2018 wurde diese Forderung in deutsches Recht umgesetzt (§124). In Österreich wird diese schon seit längerem praktiziert. Patienten nehmen Radioaktivität und Strahlenrisiken in der Regel als bedrohlich wahr. Im Kontext mit dem Nutzen medizinischer Maßnahmen und einer ausreichenden Information des Patienten können diese Ängste und Vorbehalte jedoch meist relativiert werden. In der Sitzung wurde ein graphisches Informationstool vorgestellt, das es in einfacher Art und Weise erlaubt, den Patienten über effektive Dosen bei den wichtigsten radiologischen

und nuklearmedizinischen Untersuchungen im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition zu informieren.

### **Entwicklungen in der physikalischen Dosimetrie**

Die Sitzung wurde eingeleitet mit einem Vortrag über die Tätigkeit von EURADOS (European Radiation Dosimetry Group). Es handelt sich um die Kooperation von wichtigen europäischen wissenschaftlichen Gruppen, die sich mit dem bedeutenden Gebiet der Dosimetrie vorwiegend auf den Strahlenschutz ausgerichtet befassen. Es finden gemeinsame Treffen mit Austausch von Mess-Methoden zur Harmonisierung, z.B. zur Harmonisierung der Personendosimetrie statt. Es werden Vergleichsmessungen durchgeführt. Es werden Kurse zur Aus- und Weiterbildung von Nachwuchswissenschaftlern vorgenommen und Forschungsprogramme miteinander geplant.

Nanopartikel (NP) von schweren Elementen erhöhen die biologische Wirkung einer Photonenstrahlung. Es wird angenommen, dass dieser Effekt durch die lokale Dosis-Erhöhung um die NPs verursacht wird. Um die Dosis-Erhöhung zu ermitteln, werden häufig Geometrien bei der Monte Carlo (MC) Rechnung eingesetzt, bei denen das Sekundärpartikelgleichgewicht nicht sichergestellt ist. In dem Beitrag wurde eine Methode vorgestellt, um durch Korrekturen der fehlerhaften MC-Simulationen diese Fehler zu bereinigen. Die Messungen und Rechnungen wurden an Gold-NPs vorgenommen.

Mit einem abschließenden Vortrag wurde die Bestimmung der Strahlendosis bei Radionuklid-Therapien, speziell für Radiojod-Therapien bei Schilddrüsenerkrankung und für Lu-177-Peptid-Therapien bei neuroendokrinen Tumoren, präsentiert. Sehr oft erfolgen diese Therapien ohne eine Dosimetrie, weil die Messung der Aktivitätskinetik ein großer Aufwand ist. Es wurde gezeigt, dass die Abschätzung der Dosis mit hinreichender Genauigkeit durch eine Retentions-Messung erfolgen kann, wenn die Biokinetik bekannt ist. Dieses gelingt besonders in Geweben und Organen, wenn das biokinetische Verhalten des Radio-Pharmakons bekannt ist sowie eine mono-exponentielle Abnahme und die Halbwertszeit der Substanz bekannt sind.

### **Hauptvortrag: J. Schüz Recommendations on Long-term Thyroid Health Monitoring after Nuclear Accidents (TM-NUCPROJECT)**

Eine erhöhte Rate an Schilddrüsenkrebs durch Radionuklide des Jods vor allem bei Kindern und Jugendlichen ist gut belegt. Dieses hat sich besonders nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl gezeigt. Infolgedessen hat es nach dem Reaktor-



Unfall in Fukushima Daiichi, Japan sehr rasch ein starkes Screening der Schilddrüse bei 300.000 Kindern gegeben, sodass die Frage gestellt worden ist: Wie sinnvoll ist ein solches Vorgehen? Mit dieser Problematik setzte sich der Referent auseinander und wies in interessanter Weise auch auf diese Problematik bei anderen Screening-Verfahren, wie Prostata- und Brust-Krebs hin. Die International Agency for Research on Cancer (IARC) hat daher eine Experten-Kommission gebildet, diese Problematik zu untersuchen. Die Arbeitsgruppe ist zu zwei Empfehlungen gekommen: „Empfehlung 1: Die Expertengruppe spricht sich gegen organisiertes Schilddrüsen-Screening nach Nuklearunfällen aus.“ „Entscheidend ist die Rekrutierung ohne jegliche individuelle Dosisabschätzung, z.B. eine Definition der Zielbevölkerung allein darüber innerhalb bestimmter administrativen Grenzen wohnhaft zu sein.“ „Empfehlung 2: Die Expertengruppe empfiehlt ein Programm für eine Überwachung von Hochrisiko-Individuen anzubieten.“ „Als Hochrisiko-Individuen definiert die Expertengruppe Personen, die im Kindes- oder Jugendalter oder bereits in utero Strahlendosen der Schilddrüse mit Dosen von 100-500 mSv oder mehr exponiert waren.“

### **Allgemeiner und medizinischer Notfallschutz**

In dem ersten Vortrag dieser Sitzung wurden wissenschaftliche Ergebnisse des Instituts für Radiobiologie der Bundeswehr zur Diagnostik und Therapie der akuten Strahlenkrankheit (ASK) dargestellt. Es wurde über Fortschritte bei den Methoden zum Screening auf molekularbiologischer Ebene und Optimierung von Verfahrensabläufen berichtet, um einen großen Durchsatz von Proben bei größeren Unfällen zu erreichen. Die Entwicklung von Gensignaturen für die Erkennung der Schwere einer möglichen ASK wurde als ein Beispiel genannt. So konnte gezeigt werden, dass 1.000 Proben mit Hilfe der Molekularbiologie innerhalb 30 Stunden für eine Triage durchgesetzt wurden. Eine Forschungsgruppe arbeitet daran, um vor-Ort Diagnostik durchzuführen und damit sehr früh Therapie-Entscheidungen einzuleiten.

Aus demselben Institut wurde über die Entwicklung eines Patienten-Dokumentationstools für Notfallsituationen berichtet. Dieses Tool ermöglicht neben der Dokumentation der persönlichen Daten auch die Aufnahme medizinischer Daten wie Anamnese, Vitaldaten und körperliche Untersuchungsbefunde. Ferner können strahlenspezifische physikalische Messwerte, frühe Blutbildveränderungen eingegeben werden, sodass frühe, grobe Dosis-Abschätzungen ermöglicht werden. Diese Daten ermöglichen eine

frühere Entscheidungshilfe, ob eine Hospitalisierung notwendig ist. Dieses Tool wurde bereits in Medizinischen A-Schutz Übungen erfolgreich erprobt. Beim „urgent approach“ wird eine sofortige Behandlung aller möglicherweise kontaminierter Personen durchgeführt, während beim „precautionary approach“ erst nach bestätigter Kontamination die Behandlung einsetzt. Der Antidot-Bedarf ist bei dem „urgent approach“ unvergleichlich höher als beim „precautionary approach“, sodass dieser Letztere bei großen Szenarien notwendig sein wird.

Im nächsten Referat wurde das EU-Programm Interreg V EMR vorgestellt. Es handelt sich um grenzüberschreitende Projekte aus dem Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE). Das „International Knowledge and Information Centre for Public Safety“ (IKIC), hat nationale und internationale Gefahrenabwehr- und Notfallausbildungsprogramme in der Euregio Maas-Rhein (Deutschland, Belgien, Niederlande) als Fokus. Das Projekt hat zum Ziel, bei Krisen und Katastrophen den Bürgern und Rettungspersonal Ausbildung und Informationen anzubieten bzw. leicht zugänglich zu machen. Das Forschungszentrum Jülich führt praktische Übungen durch als Vorbereitung auf nukleare Unfälle und Störfälle. U.a. sollen Grundlagen geschaffen werden, damit die Messergebnisse der Einsatzkräfte der drei Staaten vergleichbar sind.

Mit Hilfe von DNA-Reparatur-Marker enthaltenden Foci im Zellkern können DNA Doppelstrangbrüche (DSBs) nach relativ niedrigen Strahlen- Expositionen gemessen werden. In dieser Studie wurden die Nullwerte, d.h. die Anzahl der Foci ohne Strahlenexposition, in Leukozyten von gesunden Probanden sowie Patienten vor Radionuklidtherapie analysiert und mit den entsprechenden Foci-Werten nach ex-vivo- und in-vivo-Bestrahlung verglichen. Es wurde untersucht, ob sich dadurch ein Grenzwert für eine Strahlenexposition festlegen lässt, sodass zukünftig ohne Kenntnis des Nullwerts (z.B. in einem Strahlenunfall-Szenario) Strahlenexpositionen identifiziert bzw. ausgeschlossen werden können. Zur Bestimmung der Nullwertverteilung wurden 45 Blutproben von 10 Probanden, sowie 16 Blutproben von Prostatakrebs-Patienten vor Verabreichung von 6 GBq Lu-177-PSMA analysiert. Bei 95% der Probanden lag der Nullwert unterhalb von 0,5 Foci/Zelle, bei 91% lag er unterhalb von 0,4 Foci/Zelle. Nach einer einstündigen ex-vivo-Bestrahlung in Lösung mit den Nukliden Lu-177, Tc-99m, Ga-68 und Y-90 und einer resultierenden Energiedosis von 50 mGy im Blut lagen die Werte für DSB Foci in 15 Proben in allen Fällen oberhalb von 0,5 Foci/Zelle. Bei Lu-177PSMA Patienten lagen 94% der Nullwerte unterhalb von 0,5 Foci/Zelle, 69% lagen unterhalb von 0,4 Foci/Zelle. 24 h nach

Therapiebeginn, bei Energiedosen im Blut von 71 mGy bis 129 mGy, lagen die Foci-Werte noch bei  $>0,5$  Foci/Zelle, mit Ausnahme eines Patienten (6%). Daher kann als Grenzwert, ab dem eine Exposition von mindestens 50 mGy Energiedosis im Blut wahrscheinlich ist, für dieses Labor 0,5 Foci/Zelle festgelegt werden. Auch 24h nach einer Strahlenexposition kann der Assay noch zum Nachweis dienen. Diagnostische Anwendungsmöglichkeiten bei Strahlenunfällen wurden diskutiert.

### **Offene Themen**

In dieser Sitzung ist eine Reihe von unterschiedlichen, interessanten Themen behandelt worden. Da Parallel-Sitzungen stattfanden und keiner der Autoren an dieser Sitzung teilgenommen hat, wird der Bericht weitgehend auf die Abstracts gestützt. Weitergehende Informationen sind zu diesen Themen in dem eingangs genannten Tagungsbericht zu finden.

Der erste Beitrag befasste sich mit der Weiterbildung speziell in der Radiochemie. Das von der EU in HORIZON 2020 geförderte Projekt MEET-CINCH setzt als Nachfolger von CINCH I und CINCH II die Reihe von EU-Projekten fort, mit denen dem Rückgang an qualifiziertem Personal im Bereich der Radiochemie hinsichtlich eines effizienten Strahlenschutz entgegengewirkt werden soll. Die Konzepte dazu sind vielfältig und beziehen sich sowohl auf Schüler und Studierende als auch auf berufsbegleitende Weiterbildungsmaßnahmen. In diesem Artikel werden zwei Ansätze aus dem MEET-CINCH Projekt detaillierter beschrieben, nämlich der Einsatz von Interaktiven Bildschirmexperimenten (IBE) und die Entwicklung eines virtuellen Radionuklidlabors in Hinsicht auf den Strahlenschutz.

Ein klares Konzept zur Formulierung einer klinischen Fragestellung anstelle einer Symptombeschreibung, die nosologische Einordnung des klinischen Bildes und die konsequente Nutzung von Orientierungshilfen (z. B. durch die Strahlenschutz-kommission oder American College of Radiology Appropriateness Criteria) sind aus pragmatischer Perspektive ein rascher Weg, um zur richtigen Indikation, technischen Durchführung und Dosisinformation (z. B. in Form von „Relative Radiation Levels (RRL)“ zu kommen.

Auf der Grundlage von Daten aus der Prüfung von Strahlenalarmen in Anlagen der Abfallwirtschaft wird gezeigt, dass nuklearmedizinisch genutzte Radionuklide vor allem im Hausmüll bei Müllverbrennungsanlagen detektiert werden. Das häufigste im Abfall vorgefundenen medizinisch genutzte

Radionuklid ist I-131. Seit 2016 ist ein deutlicher Anstieg der Detektion von Lu-177 festzustellen. Eine Abschätzung der effektiven Dosis für Beschäftigte eines kommunalen Entsorgungsbetriebes ergab eine Jahresdosis von 1,5  $\mu\text{Sv}$  aus der Kontamination durch I-131. Die einwohnerbezogene Gesamtaktivität von I-131 im Hausmüll wurde mit  $6,8 \times 10^{-3}$  kBq je Einwohner und Jahr abgeschätzt. Die relativ geringen Halbwertszeiten sind hinsichtlich der Strahlenexpositionen zu beachten.

Das „Centre for Advanced Laser Applications“ (CALA) in Garching bei München beherbergt Experimente, bei denen durch einen Hochleistungslaser Elektronen, brillante Röntgenstrahlung, Protonen und Ionen erzeugt werden. Erforscht wird zudem deren Anwendung zur Biomedizinischen Bildgebung und Strahlentherapie. Die Strahlungs-Bunches, welche mit 1 Hertz durch die 3 Peta-Watt-Laseranlage erzeugt werden, bestehen aus mehreren Teilchenspezies hoher Intensität sowie Energie und sind kurz (im Bereich von Nanosekunden). Dies stellt neue Herausforderungen an den Strahlenschutz. Unter anderem da elektronische persönliche Dosimeter für gepulste Strahlung nicht zugelassen sind, werden Simulationen der Dosisleistung benötigt. CALA wurde im Monte-Carlo Code FLUKA modelliert. Das Modell beinhaltet die fünf Experimentier-Bunker, Wände, Beton-Tore, Vakuumkammern, Laserdurchführungen, Strahlrohre, magnetische Spektrometer, „Beamdumps“ sowie eine Experimentierhalle für Röntgenexperimente. Als Quellterme wurden Elektronen ( $<5$  GeV), Protonen ( $<200$  MeV),  $^{12}\text{C}$  ( $<400$  MeV/u) und  $^{197}\text{Au}$  ( $<10$  MeV/u) simuliert. Die Energiespektren, Strahldivergenzen und Bunch-Ladungen sind aus neuesten experimentellen Ergebnissen extrapoliert. Die räumliche Teilchenfluenz und Dosisleistung wurde für jede Teilchenspezies in 3D ausgewertet. Die simulierten Dosisleistungen erreichen  $\sim 278$   $\mu\text{Sv/ns}$  ( $=1$  GSv/h) in einem Beamdump. Dosisleistung außerhalb des aktiven Bunkers tritt durch mehrfach gestreute Sekundärneutronen, durch Rohrdurchführungen in den Bunkerwänden, durch welche die Laserpulse in die Bunker gebracht werden sowie durch Strahlrohre für Röntgenstrahlung auf. Durch die Verwendung von Beamdumps in den Bunkern und an den Strahlrohren zur Experimentierhalle, Strahlenschutzturen, Magneten, baulicher Abschirmung und Vorgaben zur Betriebszeit bleiben die Dosisleistungen in und außerhalb von CALA unterhalb der Entwurfsspezifikationen ( $<2.5$   $\mu\text{Sv/h}$  für Überwachungsbereiche,  $<7.5$   $\mu\text{Sv/h}$  punktuell) und den gesetzlichen Grenzwerten ( $<6$  mSv/a für Überwachungsbereiche). Im Probebetrieb soll zudem die Einhaltung von  $<1$

mSv/a in den Überwachungsbereichen nachgewiesen werden, damit auf eine Körperdosisermittlung verzichtet werden kann.

Das Ziel der Bachelorarbeit des Vortragenden war es, ein didaktisches Instrument zur Vermittlung dosimetrischer Begriffe im Strahlenschutz zu entwickeln. Die methodische Verarbeitung wurde in Form eines „Exit-Spiels“ realisiert, wobei die Spielenden einen (gedachten) Raum durch Lösen verschiedener Rätsel verlassen müssen. Die Zielgruppe sind Studierende, die bereits eine Strahlenschutz-Vorlesung an einer Universität besucht haben. Das Wissen zu dosimetrischen Begriffen im Strahlenschutz, soll auf verschiedene Herangehensweisen getestet und gefestigt werden. Zu jedem behandelten Thema existiert ein Rätsel, was es zu lösen gilt. Am Ende des Spiels erhalten die Studierenden ein Feedback zu ihrer Leistung, welches von der benötigten Zeit und der Anzahl der Fehler abhängig ist. Das Spiel ermöglicht eine spielerische und anschauliche Auseinandersetzung mit Dosisgrößen im Strahlenschutz.

### **Poster**

Neben den drei Hauptvorträgen und 59 weiteren Vorträgen wurden 12 Poster zu verschiedenen Themen präsentiert:

Auswertung epidemiologischer Daten zum Strahlenrisiko: mehr als nur statistische Routine?

Raumluftüberwachung für die Ra223/Th227 -Therapie und Produktion

Comet Assay analysis of DNA strand breaks in human cells after exposure to the DNA-incorporated Auger Electron Emitter Iodine-125

Miniszint, ein neuartiges Mehrzweck-Strahlenmess-System für Forschung, Lehre und Praxis im Labor, Haus und Gelände

Discrimination of different radiation qualities using gene expression data

Strahlenexposition des Personals bei der Brachytherapie von Augentumoren

Induction of specific chromosomal rearrangements by targeting sensitive genomic loci using 125I-labeled Triplex-Forming oligonucleotides

Nutzung von portablen Gammaskpektrometern zur mobilen Ganzkörpermessung

Sicherheitsaspekte bei der technischen Realisierung und Verwendung eines neuartigen modularen, mobilen Laserrettungsgeräts

Baulicher Strahlenschutz bei mobilen Sanitätseinrichtungen der Bundeswehr

Sichere Durchführung von Hochdosistherapien des Nebennierenkarzinoms mit [131I]MAZA

Targeting human sodium iodide symporter by PET: A Comparison of [18F]fluorotetrafluoroborate with [124I]iodide

### **Abschlusssitzung**

In der Abschlusssitzung erfolgte die Bekanntgabe und Auszeichnung mit dem Rupprecht-Maushart-Preis 2019 an: 1. Preis Florian Mentzel, 2. Preis Janina Susanna Dakovic.

Florian Mentzel wurde die Auszeichnung zuerkannt für seine Masterarbeit "Empirical Simulation of Glowcurves for Multivariate Analysis in the TL-DOS Project"

Den zweiten Platz belegte punktgleich Janina Susanna Dakovic für ihre Masterarbeit "Inhibition of CDKN1A in PHA-stimulated Lymphocytes after Radiation Exposure as a Tool for Accelerating the Cell Cycle".

Es folgten Ansprachen des Tagungspräsidenten Prof. Dr. Dr. h.c. Christoph Reiners und des Präsidenten des Fachverbands für Strahlenschutz Dr. Thomas Steinkopff.

Abschließend hat Dr. Jörg Feinhals zur nächsten Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz vom 28.09. bis 02.10.2020 in Aachen mit dem Motto "Strahlenschutz und Entsorgung" eingeladen.