Karlsruher Institut für Technologie

Abschlussbericht

BfS-Vorhaben (FKZ): 3613S40011

Untersuchungen zur Strahlenexposition der Augenlinse von beruflich strahlenexponiertem Personal

Berichtsdatum: 05. Mai 2017

J. Strohmaier,
C. Naber

KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzdarstellung des Vorhabens ... 1

1.1 Einleitung ... 1
1.2 Aufgabenstellung ... 1
1.3 Planung und Ablauf ... 1

2 Arbeitspaket 1 ... 2

2.1 Literaturrecherche (MS 1.1) ... 2
2.2 Untersuchungen der Augenlinsendosis im medizinischen Bereich ... 4
2.3 Amtlich ermittelte Dosiswerte für die Augenlinse ... 5
2.4 Identifizierte Tätigkeitsbereiche (MS 1.2) ... 7
2.5 Datensammlung (MS 1.2) ... 9

3 Arbeitspaket 2: Experimentelle Ermittlung der Augenlinsendosis für ausgewählte Tätigkeiten ... 9

3.1 Planung und Ablauf (MS 2.1a) ... 9
3.2 Informationsveranstaltungen ... 10
3.3 Begehungen der Arbeitsplätze ... 10
3.4 Messkonzept - Kerntechnischer Bereich ... 12
3.5 Messkonzept - Medizinischer Bereich ... 13
3.5.1 Phase 1 ... 13
3.5.2 Phase 2 ... 14
3.5.3 Phase 3 ... 15

4 Methodik (MS 2.1b) ... 15

4.1 Messgröße ... 15
4.2 Repräsentativer Messort ... 16
4.3 Dosimeterbeschreibung ... 17
4.4 Eignung des Dosimeters ... 19
4.5 Kalibrierung ... 21
4.6 Messtechnik ... 24

5 Ergebnisse ... 25

5.1 Kerntechnischer Bereich ... 25
5.2 Medizinischer Bereich ... 28
5.2.1 Phase 1 ... 28
5.2.2 Phase 2 ... 31

6 Arbeitspaket 3: Empfehlungen zum Schutz der Augenlinse ... 34

6.1 Entscheidungsmatrix (MS 3.1) ... 34
6.1.1 Fliegendes Personal ... 34
6.1.2 Kerntechnischer Bereich ... 35
6.1.3 Medizinischer Bereich ... 35
6.2 Empfehlungen zum Schutz der Augenlinse (MS 3.2) ... 36

7 Zusammenfassung und Ausblick ... 37

Abkürzungsverzeichnis

BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
DFP	Dosisflächenprodukt
$E_{\beta,max}$	Beta-Maximalenergie
E_{ph}	Photonenenergie
FDL	Festkörperdosimetrielabor
$H^*(10)$	Umgebungs-Äquivalentdosis
$H_p(0,07)$	Oberflächen-Personendosis
$H_p(10)$	Tiefen-Personendosis
$H_p(3)$	Augen-Personendosis
ICRP	International Commission on Radiological Protection
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
MS	Meilenstein
mSv	Millisievert
N	Kalibrierfaktor
ORAMED	Optimization of Radiation Protection of Medical Staff
PDR	Personendosisregister
PMMA	Polymethylmethacrylat
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
ROI	Region of Interest
SSK	Strahlenschutzkommission
TLD	Thermolumineszenzdetektor

Abkürzungen medizinischer Eingriffe

ANG	Angiographie
CA	Koronarangiographie
CAT	Katheter legen
CHA	Cholangioskopie
CT	Computer Tomographie
CTO	chronisch verschlossene Koronargefäße
DL	Durchleuchtungen
DSA	Digitale Subtraktionsangiographie
EMB	Embolisation
EP	Elektrophysiologische Untersuchung
ERCP	Endoskopisch retrograde Cholangiopankreatikographie
NRAD	Neuroradiologische Untersuchung
PCNL	Perkutane Nephrolithotomie
PET	Positronen-Emissions-Tomographie
PM/ICD	Implantation von Herzschrittmacher, implantierbare Defibrillatoren
PTA	Perkutane transluminale Angioplastie
PTCA	Perkutane transluminale koronare Angioplastie
RFA	Radiofrequenzablation
RSO	Radiosynoviorthese
SIRT	Selektive Interne Radiotherapie
TIPS	Transjugulärer Intrahepatischer Portosystemischer Shunt

1 Kurzdarstellung des Vorhabens

1.1 Einleitung

Die Strahlenempfindlichkeit von Organen und Geweben kann unter anderem durch epidemiologische Studien beurteilt und bestimmt werden. Neueren wissenschaftlichen Erkenntnissen zufolge wurde die Strahlenempfindlichkeit für die Augenlinse bislang unterschätzt. Das Risiko eine Katarakt infolge einer Strahlenexposition zu erleiden, ist bereits bei einer niedrigeren Dosis höher, als bisher angenommen wurde. Aufgrund dieser Erkenntnisse sprach die International Commission on Radiological Protection (ICRP) die Empfehlung aus, den bisherigen Grenzwert für die Schutzgröße der Augenlinse für beruflich strahlenexponiertes Personal von 150 mSv im Jahr auf 20 mSv im Jahr zu senken [ICRP 2012]. Dieser Empfehlung wurde in der Richtlinie 2013/59 EURATOM DES RATES vom 5. Dezember 2013 [RL 2013] nachgekommen. Die Richtlinie ist eine Rechtsakte ohne Gesetzescharakter und ist von den europäischen Mitgliedsstaaten bis zum 6. Februar 2018 durch innerstaatliche Rechts- und Verwaltungsvorschriften umzusetzen.

1.2 Aufgabenstellung

Zum Schutz von beruflich strahlenexponiertem Personal und um adäquat auf die beabsichtigte 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. Derzeit liegen dem BMU/BfS nur vereinzelte Daten über die Strahlenexposition der Augenlinse von medizinischen Berufsgruppen bei unterschiedlichen Expositionsbedingungen vor.

Im Rahmen dieser Untersuchung soll eine verbesserte Datenlage geschaffen werden sowie untersucht werden, für welche Berufsgruppen und welche Tätigkeiten eine höhere Strahlenexposition der Augenlinse auftreten kann und in welcher Größenordnung diese liegt.

1.3 Planung und Ablauf

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 für dieses Vorhaben betrachtet und dienten als Grundlage für den bestehenden Kenntnisstand der Strahlenexposition unterschiedlicher Berufsgruppen. Basierend auf der Literaturrecherche und dem bestehenden Kenntnisstand wurden mindestens 8 Tätigkeiten identifiziert, bei denen potentiell eine höhere Strahlenexposition der Augenlinse und damit eine höhere Dosisbelastung zu erwarten war. Für diese identifizierten Tätigkeiten wurde eine realistische Abschätzung der Strahlenexposition der Augenlinse mittels einer Messkampagne durchgeführt.
Die Ermittlung der Augenlinsendosis erfolgte unter Berücksichtigung der SSK-Stellungnahme „Überwachung der Augenlinsendosis“ [SSK 2010] sowie neueren Erkenntnissen und Empfehlungen [BEH 2013].

2 Arbeitspaket 1

2.1 Literaturrecherche (MS 1.1)

Für die Literaturrecherche wurden über 160 wissenschaftliche Paper und Veröffentlichungen zusammengetragen, die sich mit der Thematik Augenlinsendosis befassen und bis Februar 2016 publiziert wurden. Als Grundlage wurden die Veröffentlichungen des FP 7 Projekts ORAMED (Optimization of Radiation Protection of Medical Staff) herangezogen. Das ORAMED-Projekt befasste sich mit der Optimierung der Strahlenschutzmaßnahmen für das medizinische Personal, insbesondere im Bereich der interventionellen Radiologie und entwickelte einen Prototypen eines Dosimeters für die Messgröße $H_p(3)$, sowie ein geeignetes Phantom zur Kalibrierung des Dosimeters. Die im Rahmen des ORAMED-Projekts gewonnenen Erkenntnisse und Entwicklungen wurden als aktueller Stand von Wissenschaft und Technik angesehen und für das aktuelle Vorhaben „Untersuchungen zur Strahlenexposition der Augenlinse von beruflich strahlenexponiertem Personal“ berücksichtigt.
Über Online-Recherchen und die Suche in anerkannten Wissenschaftsjournals wurde der anfängliche Literaturkatalog von 111 Fachartikeln auf 167 erweitert. Die zusammengetragenen Fachartikel liegen als PDF-Dateien vor und sind in der Excel-Datei Literaturkatalog.xls katalogisiert. Der Literaturkatalog bietet eine übersichtliche Darstellung und ermöglicht eine schnelle Suche der 167 Fachartikel nach Autor, Titel, Journal oder auch nach der Thematik. Des Weiteren können alle frei zugänglichen Publikationen direkt über den Literaturkatalog geöffnet werden.

Alle Fachartikel wurden thematisch kategorisiert. So lassen sich über eine einfache Filterfunktion schnell alle Publikationen zu einem bestimmten Thema anzeigen. Die Kategorien sind unterteilt in die Themen *„Kalibrierung“*, *„Medizinischer Bereich“*, *„Medizin / Korrelation zu Patientendosen“*, *„Empfehlungen zur Überwachung“*, *„Grenzwerte für die Augenlinse“*, *„Retrospektive Dosimetrie“*, *„Abschirmung“*, *„Konversionskoeffizienten“*, *„Simulation“* und *„Review“*.

Die Grafik in Abbildung 1 zeigt die prozentuale Aufteilung der Themen des Literaturkatalogs. Hier ist deutlich zu sehen, dass sich mit 36 % die meisten Publikationen thematisch mit dem medizinischen Bereich befassen. Drei weitere relativ große Themenbereiche befassen sich mit der Kalibrierung von geeigneten Augenlinsen-Dosimetern (13%), mit Monte-Carlo-Simulationen (12%) der Dosisverteilung im Auge und speziell in der Augenlinse und mit Empfehlungen zur Überwachung der Dosis der Augenlinse (12%).

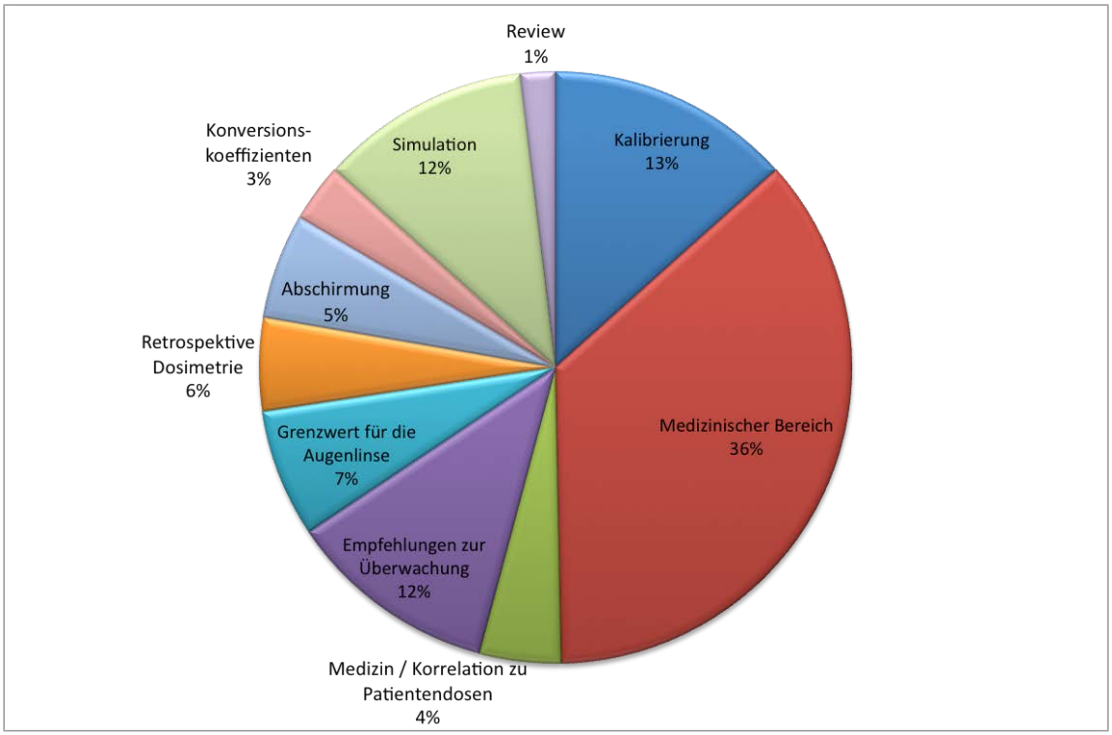


Abbildung 1 Thematische Verteilung aller Publikationen des Literaturkatalogs.

Wie bereits erwähnt, ist der Großteil der Fachartikel des Literaturkatalogs dem medizinischen Bereich zuzuordnen. Eine Vielzahl der publizierten Studien befasste sich thematisch unter anderem auch mit der Ermittlung von Teilkörperdosiswerten für medizinisches Personal bei unterschiedlichen medizinischen Eingriffen. Die Studien umfassten auch Ermittlungen von Dosiswerten für die Augenlinse. Diese Studien

wurden in verschiedenen Ländern unter unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt. Mit 77% stammen die meisten Publikationen jedoch aus Deutschland und aus den europäischen Mitgliedsstaaten (Frankreich, Belgien, Schweiz, Griechenland, Polen und Slowakei) des ORAMED-Projekts. Da ein großer Anteil von den bisher publizierten Ergebnissen für die Augenlinsendosis in Deutschland ermittelt wurde, ist hier eine gute Datenbasis geschaffen. Zudem kann von einem gewissen Strahlenschutzstandard ausgegangen werden und die Daten können als repräsentativ angesehen werden.

2.2 Untersuchungen der Augenlinsendosis im medizinischen Bereich

Eine neuere und sehr umfangreiche Studie von Häusler, Czarwinski, Brix [HÄU 2009] untersuchte unter realen Arbeitsbedingungen in 14 verschiedenen Krankenhäusern in Deutschland die Strahlenexposition von medizinischem Personal. Die Studie konzentrierte sich auf die Strahlenexposition bei der Durchführung von neun medizinischen Eingriffen im Bereich der interventionellen Radiologie. Dazu wurden Ärzten und OP-Assistenten Dosimeter mit Thermolumineszenzdetektoren (TLD) an Stirn, Hals, Armen und Händen, Oberkörper, Hüfte, Knie und Füßen angebracht. Die Messgröße, in der die Dosiswerte ermittelt wurden, war $H_p(0{,}07)$. Wider Erwarten liegen im Vergleich zu internationalen Studien [Vañ 2008], [VAN 2011] die hier ermittelten Dosiswerte für die Augenlinse weit unter einem Millisievert pro Prozedur. Als Maximalwert wurde eine Dosis von 240 µSv/Prozedur und als Median eine Dosis von 2,4 µSv/Prozedur, gemittelt über alle medizinischen Eingriffe, ermittelt. Die Ergebnisse werden mit einer guten Umsetzung der Strahlenschutz-Maßnahmen in Deutschland begründet. Jedes Krankenhaus, in dem die Untersuchungen stattfanden, verfügte über stationäre und oder mobile Abschirmvorrichtungen.

Die Bestimmung der Augenlinsendosis in [HÄU 2009] wurde sowohl für den operierenden Arzt, als auch für die OP-Assistenten durchgeführt Die ermittelten Dosiswerte für die Augenlinse für den Arzt sowie für die OP-Assistenten sind in Boxplot-Diagrammen dargestellt. Die Spannweite beider Boxplots ist übereinstimmend. Sowohl für die Ärzte als auch für die Assistenten sind 90 % aller ermittelten Werte kleiner als 100 µSv/Prozedur. Bei den Ärzten wurden sehr viele niedrige Dosiswerte ermittelt, woraus sich ein Median von 2,4 µSv/Prozedur ergab und einige wenige hohe Dosiswerte, die den Mittelwert auf ca. 20 µSv/Prozedur erhöhten. Aus der Publikation ließen sich keine Rückschlüsse ziehen, ob die wenigen hohen

Dosiswerte einem bestimmten medizinischen Verfahren oder unvorhergesehenen Komplikationen zuzuschreiben waren.
Für die OP-Assistenten ergab sich ein sehr ähnliches Boxplot-Diagramm. Im Vergleich zu der Dosisverteilung für die Ärzte lag der Median der Dosisverteilung für die OP-Assistenten mit 18,2 µSv/Prozedur deutlich höher. Diese Daten zeigen, dass sich die Dosisermittlung bei der bevorstehenden Messkampagne nicht nur auf die Ärzte konzentrieren sollte, sondern auch das assistierende medizinische Personal berücksichtigt werden musste.
Die in der Studie angegebenen Dosiswerte pro Prozedur wurden gemittelt über die medizinischen Eingriffe PTA, PTCA, ANG, CT, EP, NRAD, CHA, CAT und TIPS. Durch die Angabe der gemittelten Dosiswerte über alle Prozeduren lassen sich keine Rückschlüsse auf die Dosisverteilung eines einzelnen medizinischen Eingriffs ziehen. Eine solche Dosisverteilung ist von großem Interesse um die Strahlenexposition der Augenlinse in Abhängigkeit des medizinischen Eingriffes einschätzen zu können. Jedoch liegt hier die Schwierigkeit in der praktischen Dosisermittlung. Da das medizinische Personal in der Regel mehrere verschiedene Eingriffe am Tag durchführt, müsste für jede Art des medizinischen Eingriffs das jeweilige zugeordnete Dosimeter getragen werden. Dies würde einen sehr hohen Verwaltungs-, Koordinierungs- und Zeitaufwand mit sich bringen, der die bereits geringe Akzeptanz, Dosimeter zu tragen, bei den Ärzten noch weiter senken würde. Ein solches Vorgehen wäre auch in der eventuell folgenden routinemäßigen Überwachung nicht praktikabel. Um trotzdem abschätzen zu können, in welcher Größenordnung sich die Strahlenexposition der Augenlinse bei den einzelnen Eingriffen bewegt, sollen im Rahmen dieses Projektes ausgewählte Ärzte und OP-Assistenten über einen Zeitraum von wenigen Tagen durch Personal des KIT begleitet werden, das den administrativen Teil der Überwachung übernimmt, so dass die Klinikroutine so wenig wie möglich gestört wird. Die daraus resultierenden Dosiswerte sollten dann Aussagen über den Dosisbeitrag einzelner medizinischer Eingriffe zulassen.

2.3 Amtlich ermittelte Dosiswerte für die Augenlinse

Bereits seit mehreren Jahren führen die amtlichen Messstellen in Deutschland Messungen zur Abschätzung der Augenlinsendosis durch. Die Landesanstalt für Personendosimetrie und Strahlenschutzausbildung (LPS) in Berlin, die Personendosismessstelle der Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz

(PDMB) in Berlin und das Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen (MPA) in Dortmund überwachen routinemäßig für über 100 Personen die Augenlinsendosis. Die Ergebnisse der amtlichen Überwachung zeigen eher niedrige Dosiswerte. Für nahezu 95 % aller Messwerte wurde eine Dosis von 0 mSv ermittelt [ENG 2013]. Insgesamt wurden im Zeitraum Januar 2005 bis März 2014 929 Augenlinsendosiswerte an das Personendosisregister (PDR) übermittelt, die gleich oder größer 1 mSv sind. Die Häufigkeitsverteilung dieser Werte in Abbildung 2 zeigt, wie auch die Untersuchung von Häußler, Czarwinski, Brix [HÄU 2009], dass der Großteil der ermittelten Augenlinsendosiswerte in einem niedrigen Dosisbereich liegt und nur wenige einzelne hohe Dosiswerte auftreten.

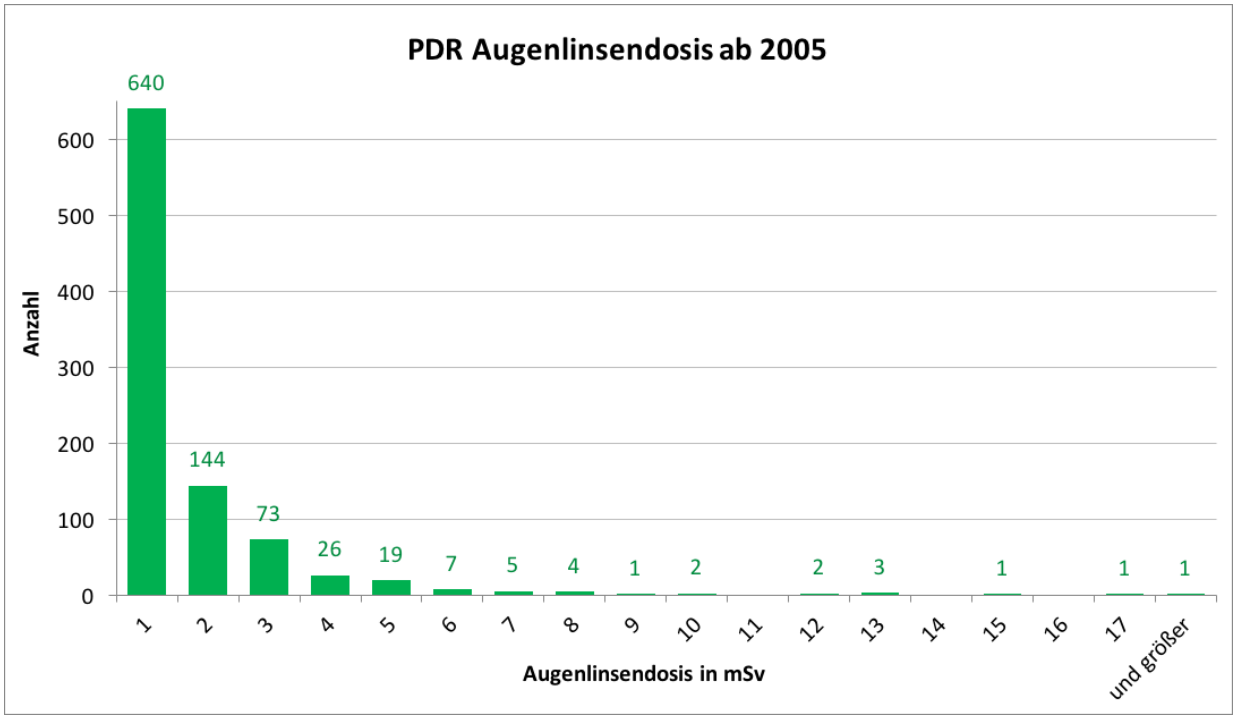


Abbildung 2 Histogramm der amtlich ermittelten Augenlinsendosis von 2005 bis 2014.

Die in Abbildung 2 dargestellten Dosiswerte wurden in den Bereichen Medizin, kerntechnische Anlagen und sonstige Tätigkeiten ermittelt. Der höchste, im PDR aufgeführte Dosiswert liegt bei 131 mSv und stammt aus der personenbezogenen Tätigkeitskategorie „sonstige Tätigkeiten“. Wie in Abbildung 3 dargestellt, stammen die Dosiswerte für die Augenlinse im PDR hauptsächlich aus der Medizin, insbesondere aus der Röntgendiagnostik, Durchleuchtung und dem Aufnahmebetrieb.

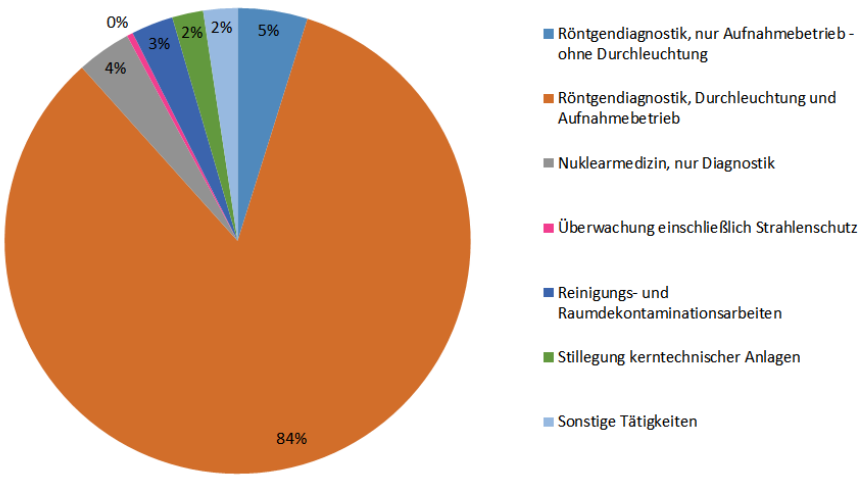


Abbildung 3 Prozentuale Verteilung der gemeldeten Augenlinsendosiswerte für die Tätigkeitskategorien im PDR.

2.4 Identifizierte Tätigkeitsbereiche (MS 1.2)

Für die experimentelle Bestimmung der Augenlinsendosis wurden in der vorangehenden Literaturrecherche Tätigkeitsbereiche identifiziert, bei denen eine höhere Strahlenexposition für die Augenlinse zu erwarten ist und potentiell die Möglichkeit besteht, einen Grenzwert von 20 mSv im Jahr zu überschreiten. Für diese Untersuchung wurde fliegendes Personal als unkritische Berufsgruppe eingestuft. Hier kann von einer homogenen Ganzkörper-Strahlenexposition, und damit von einer guten Korrelation zwischen der Augenlinsendosis und der effektiven Dosis ausgegangen werden.

Dies ist im medizinischen Bereich nicht der Fall. Hier ist eine Korrelation zur amtlich ermittelten Tiefen-Personendosis aufgrund von stark variierenden Expositionsbedingungen, inhomogenen Strahlenfeldern und der Verwendung von Bleischürzen, unwahrscheinlich. Ein wichtiges Kriterium für die Auswahl der Verfahren war die Häufigkeit der Anwendung der einzelnen Verfahren, da die Dosis linear mit der Häufigkeit ansteigt. Hierzu lieferte die Untersuchung „Radiation exposure of medical staff from interventional x-ray procedures: a multicentre study" [HÄU 2009] eine Verteilung der gängigen angewandten Verfahren in Deutschland. Unter der Annahme, dass die Häufigkeitsverteilung repräsentativ ist, wurden die drei häufigsten Verfahren (PTA, PTCA und ANG) ausgewählt. Weiterhin zeigten die Ergebnisse der ORAMED Studie [VAN 2011], dass potentiell höhere Dosiswerte für die Verfahren PM/ICD, EMB, RFA und CA zu erwarten sind. Die Radiofrequenzablation (RFA) ist in Deutschland ein eher selten durchgeführter Eingriff. Dementsprechend wurde die RFA bei der

experimentellen Bestimmung der Augenlinsendosis nicht berücksichtigt und dafür durch die Verfahren TIPS und Gallengangseingriffe ersetzt. Die Verfahren TIPS und Gallengangseingriffe wurden aufgrund der Einschätzung vieler Ärzte gewählt. Diese vermuteten bei der Durchführung der Verfahren eine erhöhte Strahlenexposition der Augenlinse.

Im Bereich der Nuklearmedizin gab es nur wenige Veröffentlichungen, die die Strahlenexposition der Augenlinse untersuchten. In diesem Bereich war es notwendig weitere Daten zu erheben, um erste Einschätzungen treffen zu können. Im Fokus standen hier Tätigkeiten mit relevanten Radionukliden und einer häufigen Durchführung. Relevant für die Augenlinsendosis sind hochenergetische Beta-Strahler ($E_{\beta,Max}$ > 700 keV) wie Yttrium-90, Rhenium-168 sowie Positronenemitter wie beispielsweise Flour-18 und Gallium-68 [SZE 2014]. Diese Radionuklide finden Anwendung bei der SIRT, RSO und der PET Untersuchung.

Aus dem nicht medizinischen Bereich wurden zunächst Reinigungs- und Dekontaminationsarbeiten für die Messkampagne ausgewählt, weil hier eine höhere Strahlenexposition für die Augenlinse erwartet wurde. Für diesen Bereich war eine Korrelation zwischen Augenlinsendosis und der Ganzkörperdosis zu untersuchen. Eine zusammenfassende Darstellung der für die Messkampagne identifizierten und ausgewählten Tätigkeiten ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1 Tabellarische Auflistung identifizierter Tätigkeiten, die mit der Messkampagne untersucht wurden.

Bereich	**Tätigkeiten**	**Abkürzung**	**Beschreibung**
Interventionelle Radiologie / Kardiologie	Implantation von Herzschrittmacher, implantierbare Defibrillatoren	PM/ICD	
	Transjugulärer Intrahepatischer Portosystemischer Shunt	TIPS	Künstliche Verbindung zwischen Pfortader und Lebervene
	Embolisation	EMB	Künstlicher Verschluss von Blutgefäßen
	Perkutane transluminale Angioplastie	PTA	Verengung oder Verschließung von Blutgefäßen
	Perkutane transluminale koronare Angioplastie	PTCA	Aufweitung von Herzkranzgefäßen
	Angiographie	ANG	Darstellung von Gefäßen
	Koronarangiographie	CA	Darstellung der Herzkranzgefäße
	Gallengangseingriffe	Galle	

Bereich	Tätigkeiten	Abkürzung	Nuklid	$E_{\beta,Max}$ in MeV
Nuklearmedizin	Selektive Interne Radiotherapie	SIRT	^{90}Y	2,3
	Radiosynoviorthese	RSO	^{186}Re	1,1
			^{90}Y	2,3
	Präparation Positronen-Emissions-Tomographie	PET	^{18}F	E_γ = 511 keV
			^{68}Ga	1,9 E_γ = 511 keV
Bereich	**Tätigkeiten**	**Abkürzung**		
Kerntechnische Anlagen	Reinigungs- und Raumdekontaminationsarbeiten	DECONT		

2.5 Datensammlung (MS 1.2)

Zur Durchführung der experimentellen Bestimmung der Augenlinsendosis für die in Kapitel 2.4 identifizierten Tätigkeiten konnten 5 Institutionen gewonnen werden. Dabei handelte es sich um 4 Kliniken und 1 Kernkraftwerk im Rückbau. Insgesamt nahmen 74 Personen an der Untersuchung teil. Zu den Teilnehmern zählen 26 Fach-/ Oberärzte, 34 Assistenzärzte und medizinisches Personal und 14 Facharbeiter im Bereich Dekontaminationstätigkeiten.

Für die Untersuchung standen 21 unterschiedliche Arbeitsplätze in den Kliniken zur Verfügung. Im Kernkraftwerk lagen ebenfalls unterschiedliche Arbeitsplätze vor, die jedoch räumlich nicht eindeutig abgegrenzt waren. Da diese leider nicht begangen werden konnten und vor allem aus organisatorischen Gründen wird der gesamte Bereich als ein Arbeitsplatz gewertet.

3 Arbeitspaket 2: Experimentelle Ermittlung der Augenlinsendosis für ausgewählte Tätigkeiten

3.1 Planung und Ablauf (MS 2.1a)

Ziel der Messungen im Rahmen des zweiten Arbeitspaketes war es, einen möglichst repräsentativen Dosiswert für die Augenlinse über ein Kalenderjahr abschätzen sowie die Dosisrelevanz einzelner Tätigkeiten bestimmen bzw. verifizieren zu können. Im Rahmen der Dosisermittlung sollten persönliche, tätigkeitsbezogene sowie räumliche Einflüsse untersucht werden.

Da sich die Expositionsbedingungen im kerntechnischen Bereich sehr stark zum medizinischen Bereich unterscheiden, wurden für diese Bereiche individuelle

Messkonzepte geplant und entwickelt. In den nachfolgenden Kapiteln 3.4 und 3.5 werden die Messkonzepte detailliert beschrieben.

3.2 Informationsveranstaltungen

Um eine möglichst hohe Akzeptanz der Messkampagne zu erreichen, wurden im Rahmen der Begehungen auch Informationsveranstaltungen für die Teilnehmer durchgeführt. Hierbei wurden in einem Vortrag der Hintergrund und die Motivation für diese Studie umfassend erläutert sowie ausführlich über das geplante Messkonzept gesprochen. In jeder Einrichtung konnte ein Ansprechpartner gewonnen werden, der das Festkörperdosimetrielabor administrativ vor Ort unterstützte und die Koordination der Augenlinsendosimeter übernahm. Bei den Informationsveranstaltungen konnten die Teilnehmer entsprechend Ihrer Erfahrungen Einfluss auf die Planung nehmen. Gleichzeitig wurden Personendaten aufgenommen, die zur späteren Ergebnisanalyse notwendig waren. Folgende Daten wurden zur eindeutigen Identifikation von den Teilnehmern erhoben: Name, Vorname und Geburtsdatum. Im kerntechnischen Bereich wurde nach Firma, Tätigkeitsbeschreibung, geschätzter Stundenzahl der durchgeführten Tätigkeit pro Woche, verwendete PSA oder Abschirmung im Kopfbereich und nach den Hauptnukliden gefragt. Im medizinischen Bereich wurden Daten zur Funktion, Tätigkeiten, geschätzter Anzahl der Prozeduren pro Tätigkeit pro Monat und Angaben zur PSA oder Abschirmung im Kopfbereich erfragt. Im Rahmen einer Informationsveranstaltung haben Ärzte darauf hingewiesen, dass im Bereich der Unfallchirurgie eine erhöhte Strahlenexposition auch für die Augenlinse zu erwarten ist. In diesem Bereich ist die Planung der Eingriffe wie auch die optimale Einstellung der Röntgenanlagen, die unter anderem patientenabhängig ist, erschwert. So werden nicht selten in diesem Bereich mehrere Röntgenaufnahmen eines Patienten gemacht. Ebenso führt die schnelle Reaktion des Personals, die in der Unfallchirurgie gefordert ist, dazu, dass in der Praxis PSA und mobile Abschirmeinrichtungen nicht immer Anwendung finden.

3.3 Begehungen der Arbeitsplätze

Vor Beginn der Messkampagnen wurden die in Frage kommenden Arbeitsplätze begangen, um sich einen Eindruck über die Verhältnisse vor Ort, wie beispielweise dem baulichen Strahlenschutz sowie der vorhandenen persönlichen Schutzausrüstung machen zu können. Die Daten der Arbeitsplatzbegehung wurden tabellarisch aufgezeichnet und teilweise mit Fotoaufnahmen dokumentiert.

Hierbei wurde festgestellt, dass der bauliche Strahlenschutz in der Regel ausreichend ausgelegt war. Am häufigsten kamen Röntgenanlagen in der „unter Tisch“-Anordnung vor. Ebenso waren in allen Kliniken Bleiglasbrillen und in den meisten Fällen auch mobile Abschirmvorrichtungen vorhanden.
Im kerntechnischen Bereich konnten einzelne Arbeitsplätze aus organisatorischen Gründen nicht begangen werden, so dass für diese Untersuchung der gesamte Kontrollbereich als ein Arbeitsplatz gezählt wurde.

Tabelle 2 Daten der Arbeitsplatzbegehung im medizinischen Bereich

Klinik-kürzel	Raumbe-zeichnung	Bau	Röntgenanlage	Anordnung	baulicher StrlSch	PSA vor Ort	Tätigkeiten	Bemerkung
A	E119	605	Philips Allura	unter Tisch	Untertisch-Bleischutz; Bleiglas-scheibe mit Bleilamellen	Bleiwesten	Angio	70 kV Betrieb
A	"Schockraum "	505	CT	unter Tisch	keiner	keine		
A	E409	505	CT	über Tisch	keiner	Bleiwesten		
A	EG, E110	505	Siemens Axma 1373	unter Tisch	Untertisch-Bleischutz; Bleiglas seitlich; Bleilamellen		Angio	Anschaffung 2008
A	HK1, 2. OG R. 2119	605		unter Tisch	keiner	Bleiglas, Bleiwesten, Bleiglasbrille (Oberarzt)		
A	HK2, 2. OG, R 2121	605		unter Tisch	mobile Abschirmung	Bleiglasbrillen		
A	E415	505	Philips Integris	unter Tisch				"Alte Anlage" selten genutzt
A	NukMed Labor							
H	CT1 R 097	R	Somatom Sensation	Rund CT	keiner; Aufenthalt hinter dem Gehäuse	Bleiwesten	Intervent. CT Eingriffe, Biopsien, Wirbelsäulen-untersuchungen	
H	R 089	R	Siemens Axiom Artis	C-Bogen unter Tisch	Bleiglas-scheiben	keine	Angio, Durchleuchtungen	
H	R 151	R	Siemens Artis Zee	Biplanar, 2 Röhren, unter Tisch, frei beweglich	Bleiglas-scheiben, Bleilamellen	Bleiwesten / Bleiglasbrillen	Angio	Position des Arztes rechts zur Röhre

Klinik-kürzel	Raumbe-zeichnung	Bau	Röntgenanlage	Anordnung	baulicher StrlSch	PSA vor Ort	Tätigkeiten	Bemerkung
H	R152	R	Siemens Artis Zee*	unter Tisch	Bleiglas-scheiben	Bleiwesten / Bleiglasbrillen	Angio	
H	NukMed Labor							
B	212		Philips Diagnostic 76 plus	über Tisch	–	Bleiwesten	Magen-Darm-Trakt Untersuchungen	Arzt frontal zur Röhre/ Patienten
B	Angio Raum		Philips Mulitdiagnostic 3	unter Tisch	Bleilamellen	Bleiwesten	PTA Gefäße Embolisation	Arzt frontal zur Röhre/ Patienten
S	Raum 210 HKL II	B2	Siemens Atris Zee	unter Tisch	Bleiglas-scheiben, Bleilamellen	Bleischürzen	Notfälle	Bleibrillen vorhanden aber kaum getragen
S	HKL I Raum 206	B2	Siemens Atris Zee	unter Tisch	Bleiglas-scheiben, Bleilamellen	Bleischürzen		
S	EPU-Labor	B2	Siemens Atris Zee	unter Tisch	Bleiglas-scheiben, Bleilamellen	Bleischürzen		
S	Raum 203 Hybridlabor	B2	Siemens Atris Zee	unter Tisch	Bleiglas-scheiben, Bleilamellen	Bleischürzen	Angio	
S	Raum 207 Angio-OP	B2	Philips Allura	unter Tisch	Bleiglas-scheiben, Bleilamellen	Bleischürzen	Angio konventionell	

3.4 Messkonzept - Kerntechnischer Bereich

Geplant war zunächst, die Teilnehmer im kerntechnischen Bereich mit Dosimetern für eine Überwachungszeit von 7 Tage über insgesamt 10 Wochen auszustatten. Bei der Informationsveranstaltung zeigte sich jedoch, dass die zu erwartenden Messwerte in einem Bereich von wenigen µSv liegen würden. Daher wurde die Überwachungszeit auf 14 Tage über insgesamt 20 Wochen verlängert. In Protokollen wurde für jeden Überwachungszeitraum von den Teilnehmern eine genaue Tätigkeitsbeschreibung mit Datum, Startzeit, Endzeit und der betrieblich ermittelten Dosis mittels aktiven Dosimetern bei jedem Kontrollbereichsaufenthalt dokumentiert. Als zu untersuchende Tätigkeiten wurden Dekontaminations- Inspektions- und Wartungstätigkeiten spezifiziert. Da in diesem Bereich mit offenen radioaktiven Stoffen umgegangen wird, wurde das Augenlinsendosimeter mit einer weiteren Umhüllung zum Schutz vor

Kontamination ausgestattet. Dies wurde bei der Kalibrierung der Dosimeter berücksichtigt.
Im Vorfeld der Messkampagne erwies sich die Suche nach geeigneten Teilnehmern in diesem Bereich als schwierig. Da die dosisrelevanten Tätigkeiten in der Regel von Fremdfirmenpersonal durchgeführt werden, war der organisatorische und administrative Aufwand höher als im medizinischen Bereich. Auch die doppelte Überwachungszeit, die zugunsten der Messergebnisse verlängert wurde, führte zu einer zeitlichen Verzögerung des Endes der Messkampagne.

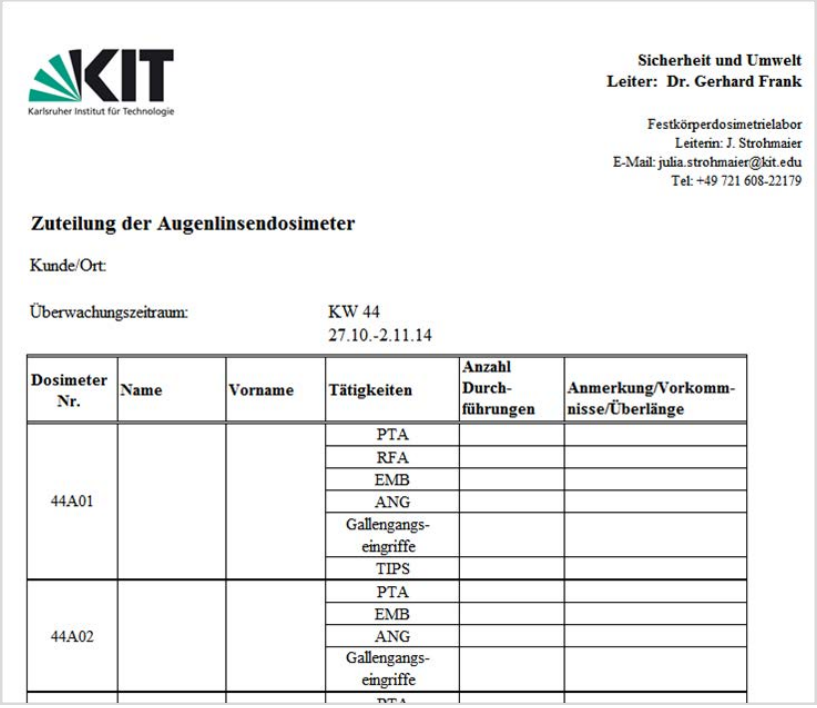
3.5 Messkonzept - Medizinischer Bereich

Um einzelne Einflussfaktoren auf die Augenlinsendosis zu untersuchen, wurde im medizinischen Bereich ein Drei-Phasen-Konzept angedacht. Der persönliche Einfluss auf die Augenlinsendosis, wie beispielsweise die Größe des Arztes, das Alter und die Erfahrung sowie die richtige Verwendung von PSA sollten bei den ersten Übersichtsmessungen in Phase 1 untersucht werden. Bei den Teilnehmern, bei denen höhere Augenlinsendosiswerte ermittelt wurden, sollte in Phase 2 die Dosisermittlung tätigkeitsspezifisch erfolgen. In der darauffolgenden Phase 3 sollten für die dosisrelevanten Tätigkeiten jeweils für die unterschiedlichen Untersuchungsräume Augenlinsendosimeter ausgegeben werden. Somit sollte in der letzten Phase der Einfluss der Einrichtung am Arbeitsplatz untersucht werden.

3.5.1 Phase 1

In dieser Phase der Untersuchung lag der Fokus darauf, einen über alle Tätigkeiten gemittelten Dosiswert zu ermitteln, der einer durchschnittlichen Exposition der Augenlinse der jeweiligen Person entspricht. Hierzu erhielt das teilnehmende Krankenhauspersonal ein Dosimeter pro Person und Kalenderwoche. Das Dosimeter sollte bei allen durchgeführten Tätigkeiten getragen werden. Um erste Aussagen über die Dosisrelevanz der einzelnen Tätigkeiten treffen zu können, wurden diese sowie die Anzahl dieser Tätigkeit in der Woche und eventuelle Anmerkungen wie Vorkommnisse oder Überlänge dokumentiert (siehe Abbildung 4). Nach Ablauf einer Arbeitswoche wurden die Dosimeter gewechselt. Diese Prozedur wurde über insgesamt vier Wochen durchgeführt. In dieser Phase sind die Übersichtsmessungen repräsentativ

für die Routinetätigkeiten der Teilnehmer und dienen zur Hochrechnung auf Monats- und Jahreswerte.



Karlsruher Institut für Technologie

Sicherheit und Umwelt
Leiter: Dr. Gerhard Frank

Festkörperdosimetrielabor
Leiterin: J. Strohmaier
E-Mail: julia.strohmaier@kit.edu
Tel: +49 721 608-22179

Zuteilung der Augenlinsendosimeter

Kunde/Ort:

Überwachungszeitraum: KW 44
27.10.-2.11.14

Dosimeter Nr.	Name	Vorname	Tätigkeiten	Anzahl Durch-führungen	Anmerkung/Vorkomm-nisse/Überlänge
44A01			PTA		
			RFA		
			EMB		
			ANG		
			Gallengangs-eingriffe		
			TIPS		
44A02			PTA		
			EMB		
			ANG		
			Gallengangs-eingriffe		

Abbildung 4 Zuteilungsprotokoll Phase 1

3.5.2 Phase 2

Nach der Auswertung der Ergebnisse und der Protokolle aus Phase 1 wurden aus jeder Klinik die Personen mit den höchsten Dosiswerten ausgewählt. An dieses Personal wurde dann pro Kalenderwoche und Tätigkeit je ein Dosimeter sowie ein zusätzliches Dosimeter für den Fall eines Verlustes oder für unvorhergesehene Tätigkeiten ausgegeben. Um Verwechslungen zu vermeiden, wurden die Dosimeter eindeutig mit der Tätigkeit beschriftet. Außerdem fand eine Farbcodierung in der Hinsicht statt, dass jeder Tätigkeit eine andere Farbe zugeordnet wurde. Ziel dieser Messkampagne war es, die anfallenden Dosen einzelnen Tätigkeiten zuordnen zu können. Neben Datum und Raum wurde auch das Dosisflächenprodukt mitdokumentiert, um in der späteren Auswertung prüfen zu können, ob eine Korrelation zwischen Dosisflächenprodukt und der Augenlinsendosis besteht. Entgegen der anfänglich geplanten Messdauer von vier Wochen wurde diese auf acht Wochen ausgedehnt (s. Phase 3).

Abbildung 5 Zuteilungsprotokoll Phase 2

3.5.3 Phase 3

In den meisten teilnehmenden Kliniken wurden gleiche Tätigkeiten in mehreren Räumen durchgeführt. Diesem Umstand geschuldet sah die Planung vor, den an Phase 2 Beteiligten zusätzlich zu den Dosimetern pro Tätigkeit ebenfalls Dosimeter für die einzelnen Räume, in denen die Tätigkeiten durchgeführt wurden, zur Verfügung zu stellen. Auf diesem Weg sollte der Einfluss des Arbeitsplatzes, wie beispielsweise durch die Spezifikationen der Röntgenröhre (Typ, Aufbau, Alter, etc.) und den baulichen Strahlenschutz, ermittelt werden.

Im Verlauf der ersten Phasen zeigte sich jedoch, dass sich der Einfluss des Arbeitsplatzes nicht einzeln betrachten ließ, da der Einfluss des Patienten als Streukörper deutlich höher war. Daher wurde beschlossen, die zweite Phase anstatt der ursprünglich geplanten vier Wochen für acht Wochen durchzuführen. Dadurch konnte die Anzahl der tätigkeitsbezogenen Dosiswerte verdoppelt werden.

4 Methodik (MS 2.1b)

4.1 Messgröße

Speziell für die Augenlinsendosis definierte die ICRU die Messgröße Augenlinsen-Personendosis $H_p(3)$, die jedoch in der Praxis bislang keine Anwendung fand, da zur

Überwachung die Messgrößen $H_p(10)$ und $H_p(0{,}07)$ nach dem damaligen Stand der Wissenschaft als ausreichend galten.

Teilkörperdosimeter in der Messgröße $H_p(0{,}07)$ werden seit vielen Jahren von den Messstellen eingesetzt. Hierfür sind bereits die Verfahren zur Dosisbestimmung, zur Kalibrierung und Qualitätssicherung für die Routine erarbeitet worden. Die Messgröße ist die Oberflächen-Personendosis $H_p(0{,}07)$ in der Einheit Sv bzw. mSv und ist definiert als die Äquivalentdosis in 0,07 Millimeter Tiefe im Körper an der Tragestelle des Personendosimeters [StrlSchV Anlage VI]. Sie ist unabhängig von der Art der Strahlung und dient zur Abschätzung der lokalen Hautdosis. In Photonen-Strahlenfeldern liefert diese Messgröße ebenfalls eine gute Abschätzung der Augenlinsendosis. Die Publikationen von Behrens [BEH 2010] und [BEH 2013] zeigen, dass Dosimeter in der Messgröße $H_p(0{,}07)$ nur dann eine gute Abschätzung für die Augenlinsendosis liefern, wenn sie am Quader- oder Zylinderphantom kalibriert werden und wenn sie in reinen Photonen-Strahlenfeldern eingesetzt werden. In Beta- und Misch-Strahlenfeldern eignen sich diese Dosimeter nicht, da Überschätzungen bis zu einem Faktor von 550 auftreten können [BEH 2010]. Dosimeter in der Messgröße $H_p(10)$ sind gänzlich ungeeignet, da sie die Augenlinsendosis unterschätzen. Diese Erkenntnisse wie auch die Stellungnahme der Strahlenschutzkommission [SSK 2010] führten zu dem Schluss, dass für diese Untersuchung nur die Messgröße $H_p(3)$ in Frage kommt. Die damit verbundene Dosimeterentwicklung und das Verfahren zur Kalibrierung werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

4.2 Repräsentativer Messort

Es ist naheliegend, dass ein Dosimeter zur Ermittlung der Augenlinsendosis in der Nähe des Auges getragen werden sollte. Damit kann gewährleistet werden, dass das Dosimeter denselben Expositionsbedingungen ausgesetzt ist. Dosimeter, die an der Stirn oder an Stirnbändern über den Augen getragen werden können, eignen sich zu diesem Zweck gut. Grundsätzlich sollte das Dosimeter an der Stelle getragen werden, an der die höchste Exposition zu erwarten ist. Im Bereich der interventionellen Radiologie sind Augenlinsendosimeter an der Stirn auf der zur Röntgenanlage gerichteten Seite zu tragen [BOR 2011], [HÄU 2009]. Weiterhin ist zu beachten, dass bei dem Einsatz von Strahlenschutzbrillen (Bleiglas-Brillen) das Dosimeter zur korrekten Ermittlung der Äquivalentdosis hinter dem Bleiglas getragen werden müsste.

Für die experimentelle Ermittlung der Augenlinsendosis in Arbeitspaket 2 sollten die Augenlinsendosimeter immer zur Strahlenquelle hin ausgerichtet werden. Ist keine definierte Einfallsrichtung identifizierbar, sollte das Dosimeter mittig auf der Stirn getragen werden. Bezüglich dem Tragen von Strahlenschutzbrillen oder Visieren wurden keine Vorgaben gemacht. So konnte sich ein Bild geschaffen werden, wie etabliert das Tragen von solcher persönlichen Strahlenschutzausrüstung in der Praxis ist. In den Fällen, in denen Strahlenschutzbrillen oder Visiere zum Einsatz kamen, wurde das Dosimeter hinter dem Bleiglas getragen und dies im Protokoll vermerkt.

4.3 Dosimeterbeschreibung

Zur Durchführung der experimentellen Untersuchung wurden folgende Kriterien für das Augenlinsendosimeter festgelegt. Es soll akkurat in der Messgröße $H_p(3)$ sowohl in Photonen- als auch in Beta-Strahlenfeldern messen können. Da zum aktuellen Stand der Entwicklung keine Leistungsmerkmale für $H_p(3)$-Dosimeter definiert waren, wie sie in DIN EN 62387-1:2012 für $H_p(0{,}07)$- und $H_p(10)$-Dosimeter zu finden sind, wurde sich an den Leistungsmerkmalen für $H_p(0{,}07)$-Dosimeter orientiert. Es ist zu empfehlen, die Leistungsmerkmale für $H_p(3)$-Dosimeter zukünftig zu definieren. Weiterhin soll das Dosimeter keine Vorzugsrichtung besitzen, um eine Fehlerquelle bezüglich der Ausrichtung beim Tragen zu vermeiden. Es soll den Träger im Sichtfeld nicht beeinträchtigen und an einer flexiblen Tragevorrichtung angebracht sein, so dass es sowohl für Brillenträger, wie auch Maskenträger im Dekontaminationsbereich geeignet ist. Da es ein solches Dosimeter bislang nicht auf dem Markt gibt, war die Entwicklung des Prototyps für ein Augenlinsendosimeter notwendig. Dieser Prototyp des Augenlinsendosimeters beruht auf dem Fingerringdosimeter, welches seit vielen Jahren im Festkörperdosimetrielabor des KIT eingesetzt wird und die Bestimmung der Dosis lässt sich ohne allzu großen Aufwand in das Routine-Auswerteverfahren mit qualitätssichernden Maßnahmen implementieren.

Das Dosimeter wurde symmetrisch konzipiert, so dass es keine richtungsabhängige Orientierung zeigt. Somit konnte eine Fehlerquelle durch das inkorrekte Tragen in Bezug auf die Vorzugsrichtung ausgeschlossen werden. Auf diesen Punkt wurde bei der Entwicklung großen Wert gelegt, um dem teilnehmenden Personal den Umgang mit dem Dosimeter möglichst einfach zu gestalten.

Als Detektormaterial wurde ein TLD vom Typ LiF:Mg,Ti eingesetzt. Dieser Detektortyp besitzt über einen weiten Energiebereich ein konstantes Energieansprechvermögen

(Abbildung 6) und hat den Vorteil gegenüber anderen Detektortypen, dass im niederenergetischen Bereich, insbesondere im Energiebereich von Röntgenstrahlung, kein Unteransprechvermögen auftritt und somit ein konservatives Messkonzept möglich ist.

Das Energieansprechvermögen, wie in Abbildung 6 gezeigt, erzielt man durch eine mehrschichtige Filterkombination, die zur Energiekompensation dient und das Überansprechvermögen im niederenergetischen Bereich senkt.

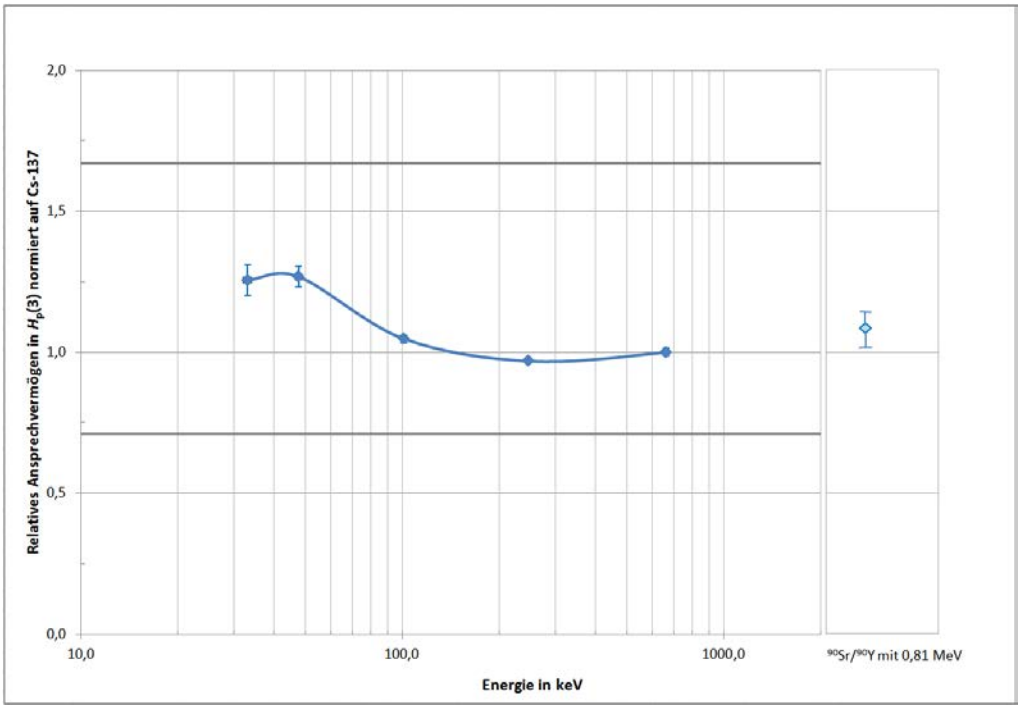


Abbildung 6 Energieabhängigkeit des Augenlinsendosimeters für Photonen und das Ansprechvermögen für die mittlere Energie von $^{90}Sr/^{90}Y$.

Zur Umhüllung des Detektors und der Filterkombination wurde derselbe Schrumpfschlauch gewählt, wie er bereits im Verfahren der Teilkörperdosimetrie mit Fingerringen etabliert ist. In Bereichen, in denen mit offenen radioaktiven Stoffen umgegangen wird, dient der Schrumpfschlauch als Kontaminationsschutz. Dies gilt gleichermaßen für biologische Kontaminationen aus dem medizinischen Bereich und jegliche weiteren Verschmutzungen. Getragen wird das Dosimeter an einem Stirnband (siehe Abbildung 7). Bei der Auswahl des Stirnbandes wurde auf den Tragekomfort, Hautverträglichkeit, Größenverstellbarkeit und unterschiedliche Farben geachtet, um die Akzeptanz des Dosimeters zu verbessern.

Abbildung 7 Zwei Augenlinsendosimeter am Stirnband zur experimentellen Untersuchung.

Die eindeutige Kennzeichnung der Dosimeter wurde durch verschiedenfarbige Labels vorgenommen. Für die experimentelle Untersuchung im Rahmen dieser Studie wurden Buchstaben- und Zahlenkombinationen verwendet. Für Routineanwendungen des Dosimeters ist die eindeutige Kennung mittels QR-Code und Datenbankanbindung denkbar.

4.4 Eignung des Dosimeters

Der im September 2015 von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt durchgeführte Messvergleich für Augenlinsendosimeter zeigt, dass der Prototyp des Augenlinsendosimeters weitestgehend zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Die Ergebnisse sind graphisch in Abbildung 8 dargestellt. Die Fehlerbalken entsprechen der einfachen Standardabweichung von vier Messwerten.

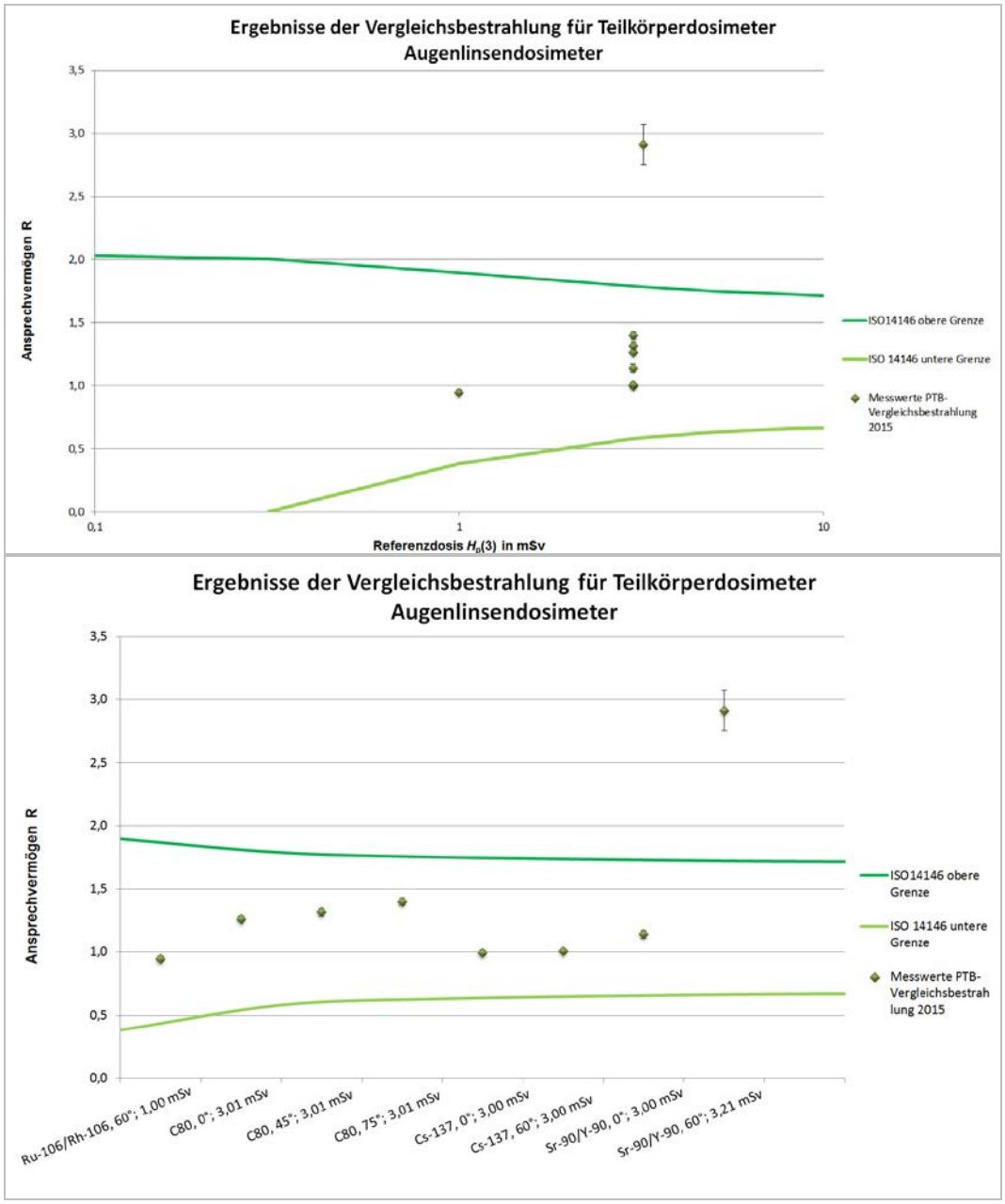


Abbildung 8 Oben: Mittleres Ansprechvermögen bezogen auf die Referenzdosis $H_p(3)$
Unten: Mittleres Ansprechvermögen bezogen auf unterschiedliche Bestrahlungsbedingungen (Strahlenqualität, Winkel, Dosis).

In dieser Darstellung wurden zwei Messwerte nicht berücksichtigt, da die Referenzdosis einmal kleiner der Nachweisgrenze und einmal sogar kleiner der Erkennungsgrenze war. Aufgrund des hohen Bestrahlaufkommens und der zeitlichen Begrenzung für die Durchführung der Bestrahlungen war es, nach Aussagen der PTB, nicht möglich, eine höhere Referenzdosis zu erzielen. Hierbei handelt es sich um die Bestrahlungen mit ^{85}Kr bei einem Winkel von 0° und einer Referenzdosis von 0,03 mSv bzw. 0,00075 mSv. Der Prototyp des KIT-Augenlinsendosimeters erreichte bei diesen beiden Bestrahlungen ein mittleres Ansprechvermögen von 9,6 mit einer

relativen Standardabweichung von 36% bzw. 14 und einer rel. Standardabweichung von 39%. An dieser Stelle ist nochmals hervorzuheben, dass eine so geringe Referenzdosis, die unterhalb der Nachweisgrenze liegt, ungeeignet ist, um das Ansprechvermögen aussagekräftig bestimmen zu können.

Des Weiteren zeigt das Augenlinsendosimeter bei Bestrahlungen mit einer $^{90}Sr/^{90}Y$-Quelle und einem Winkel von 60° ein Überansprechvermögen um den Faktor 2,9. Bei der frontalen Bestrahlung mit $^{90}Sr/^{90}Y$ und 0° liegt das Ansprechvermögen bei 1,14. Das zeigt, dass die Abmessungen des Kombinationsfilters zu gering sind und für einen Routinegebrauch eine weitere Optimierung notwendig ist. Für die Erhebungsmessungen im Rahmen dieser Studie wird das Überansprechvermögen berücksichtigt.

Die aufgeführte Trompetenkurve wurde nach folgender Formel aus dem aktuellen Entwurf der ISO 14146 [ISO 14146] errechnet:

Obere Grenze:

$$1{,}67 \times \left(1 + \frac{H_0}{4 \times H_0 + H_p(3)}\right) \tag{1}$$

Untere Grenze:

$$0{,}71 \times \left(1 - \frac{2 \times H_0}{H_0 + H_p(3)}\right) \tag{2}$$

Dabei entspricht $H_p(3)$ der bestrahlten Dosis und H_0 der niedrigsten Dosis, unterhalb derer 100% Abweichung zulässig sind. Entsprechend der Publikation von Behrens [BEH2016] wurde für H_0 = 0,03 mSv angenommen.

4.5 Kalibrierung

Zu der Thematik Kalibrierung ergab die Literaturrecherche zahlreiche Publikationen. Viele Empfehlungen, wie auch erforderliche Daten wurden erarbeitet, so dass die Kalibrierung unproblematisch in der Praxis umgesetzt werden konnte. Entsprechend der Ganzkörperdosimeter und der Teilkörperdosimeter, wie beispielsweise dem Fingerringdosimeter, muss auch für das Augenlinsendosimeter der Rückstreuanteil durch die tragende Person berücksichtigt werden. Ein neues Zylinderphantom wurde im Rahmen der ORAMED-Studie zu Kalibrierzwecken von Augenlinsendosimetern

entwickelt [GUA 2011]. Das Phantom ist ein mit Wasser gefüllter PMMA-Zylinder mit einem Durchmesser von 20 cm, einer Höhe von 20 cm und der Wandstärke von 0,5 cm PMMA.

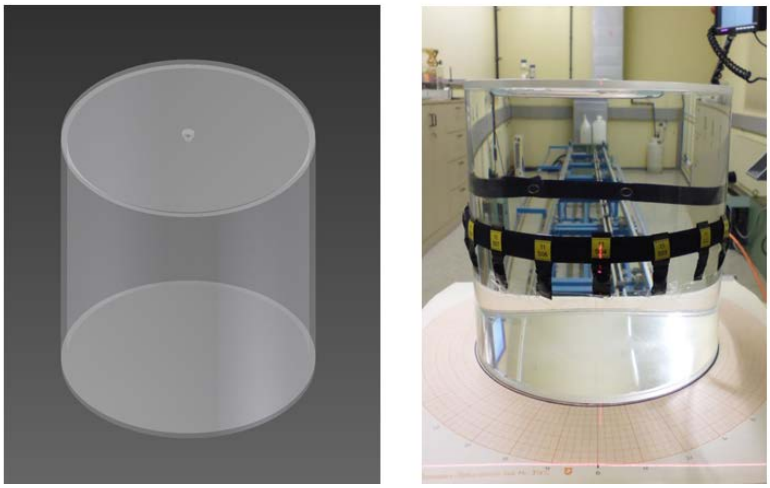


Abbildung 9 Fertigungsmodell des Zylinderphantoms (links). Bestrahlungen in Abhängigkeit des Winkels am realen Zylinderphantom (rechts).

Die Winkelabhängigkeit des Augenlinsendosimeters wurde in der Entwicklungsphase in ±15° Schritten bis zu einem Strahleneinfallswinkel von 90° am Zylinderphantom überprüft. Die Bestrahlungen erfolgten im Kalibrierlabor des KIT, welches nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 akkreditiert ist. Es zeigte sich jedoch, dass in der Praxis der Aufbau, wie er in Abbildung 9 gezeigt ist, nur auf den ersten Blick eine Vereinfachung bringt und nicht zu empfehlen ist. Durch die runde Form des Phantoms ergeben sich zu große Abweichungen vom Bezugspunt des Dosimeters zum Referenzpunkt im Strahlenfeld. Der korrekte Aufbau für Kalibrierbestrahlungen am Zylinderphantom ist in Abbildung 10 dargestellt.

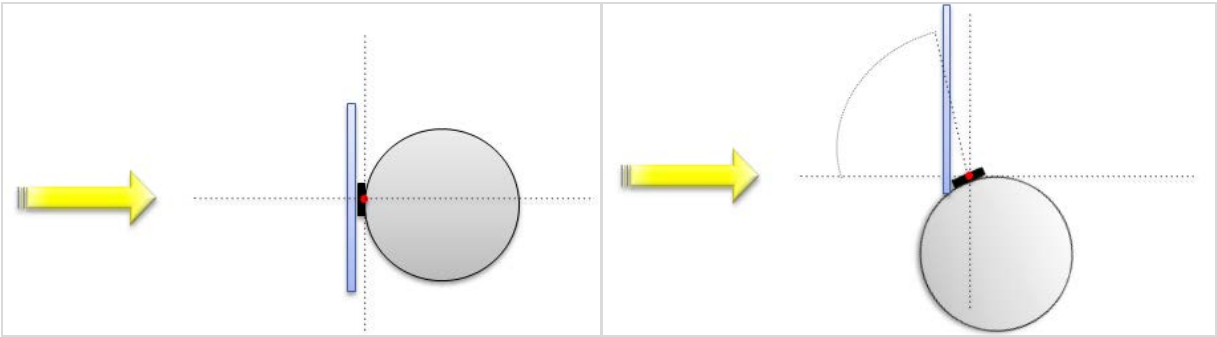
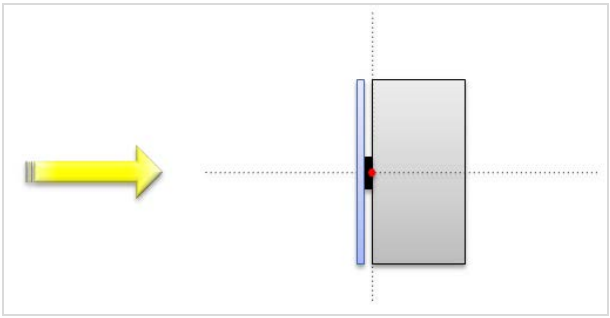


Abbildung 10 Schematischer Aufbau der Kalibrierbestrahlung mit einem Strahleneinfallswinkel von 0° (links) und einem Strahleneinfallswinkel von 75° (rechts) am Zylinderphantom.

Die Strahleneinfallsrichtung ist durch den gelben Pfeil dargestellt. Das Dosimeter (schwarzes Rechteck) ist am Zylinderphantom befestigt und wird entsprechend dem gewünschten Winkel zwischen der Vorzugsrichtung des Dosimeters und der Strahleneinfallsrichtung ausgerichtet. Der rote Punkt stellt den Bezugspunkt dar, welcher in Übereinstimmung mit dem Referenzpunkt (Mitte des Fadenkreuzes) zu bringen ist. Der Referenzpunkt zeichnet sich dadurch aus, dass an diesem Punkt im Strahlenfeld die entsprechende Äquivalentdosisleistung oder die Kermaleistung bekannt ist. In blau dargestellt ist die Aufbauplatte, welche direkt ohne Abstand am Dosimeter angebracht wird und zur Aufrechterhaltung des Sekundärelektronen-gleichgewichts dient. In weiteren Untersuchungen zeigte sich, dass das ISO-Quaderphantom bei Winkeln < 75° ebenfalls zu Bestrahlungen von $H_p(3)$-Dosimetern eingesetzt werden kann. Das ISO-Quaderphantom wird bei Bestrahlungen von $H_p(10)$-Dosimetern routinemäßig eingesetzt. Vorteil des Quaderphantoms ist, dass es bereits bei den meisten Kalibrierlaboratorien routinemäßig in Verwendung ist und nicht erst angeschafft werden muss. Zudem erfolgen Kalibrierbestrahlungen in der Regel bei einem Winkel von 0°, so können mehrere Dosimeter mit einer Bestrahlung kalibriert werden. In Abbildung 11 ist eine Aufnahme des Aufbaus für Kalibrierbestrahlungen, der sich in der Praxis bewährt hat, gezeigt.



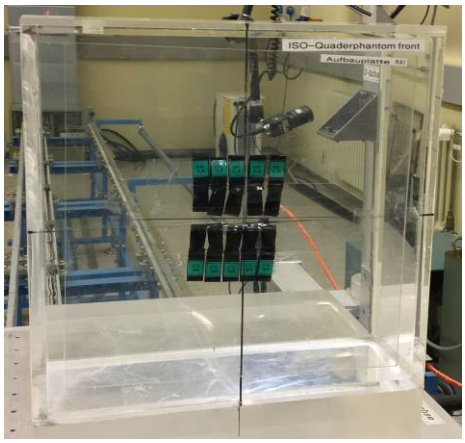


Abbildung 11 Schematischer Aufbau der Kalibrierbestrahlung bei 0° (links) und Aufnahme des praktisch bewährten Aufbaus für Kalibrierbestrahlungen (rechts) am Quaderphantom.

Die Personen-Äquivalentdosis in 3mm Gewebetiefe wurde aus der im Kalibrierfeld bekannten Luftkerma nach folgender Formel bestimmt:

$$\left(H_{\mathrm{p}}(3)\right)_{\mathrm{R}} = \left(K_{\mathrm{a}}\right)_{\mathrm{R}} \cdot h_{\mathrm{pK}}(3;\mathrm{R};\alpha) \tag{3}$$

$(H_p(3))_R$: Personen-Äquivalentdosis in 3mm Tiefe für die Strahlenqualität R
$(K_a)_R$: Kerma in Luft bei der Strahlenqualität R
$h_{pK}(3;R;\alpha)$: Konversionskoeffizient von Kerma zur Personenäquivalentdosis in 3 mm Tiefe für die Strahlenqualität R und den Winkel α

Die erforderlichen Konversionskoeffizienten für die Messgröße $H_p(3)$ sowohl am Quaderphantom wie auch am neuen Zylinderphantom und den Referenz-Strahlenqualitäten wurden ebenfalls von Behrens publiziert [BEH 2011, BEH 2012].
Bei der Durchführung der experimentellen Ermittlung der Augenlinsendosis wurde bei jeder Auswertung ein chargenspezifischer Kalibrierfaktor bestimmt. Für den mittleren Kalibrierfaktor ergab sich N = 0,000809 mit einer gemittelten einfachen Standardabweichung von 1,8%.

4.6 Messtechnik

Die Auswertung der Detektoren erfolgte im Festkörperdosimetrielabor des KIT. Zur Vorbereitung werden die Detektoren aus dem Schrumpfschlauch und der Filterkombination genommen und in einem Ofen bei 100 °C zum Löschen instabiler Lumineszenzanteile vorbehandelt. Bei der Auswertung wird ein bewährtes Verfahren angewendet, bei dem die Detektoren in einem Auswertegerät mit einer Heizrate von 10°C/s erhitzt werden und das dabei ausgesandte Licht, welches proportional zu der im Detektor absorbierten Energie durch ionisierende Strahlung ist, zeit- bzw. temperaturaufgelöst gemessen, als sogenannte Glowkurve dargestellt und digitalisiert abgespeichert wird. Im eingegrenzten Bereich der „*Region of Interest*“ (ROI) wird das Integral der Lichtanzeige bis einschließlich Glowpeak Nr. 5 (siehe Abbildung 12) gebildet, welches zur Dosisermittlung dient. Für jeden Detektor wird ein individuelles Ansprechvermögen berücksichtigt. Durch einen Regenerierungsvorgang, bei dem die Detektoren über insgesamt 6 Stunden mit einem definierten Heizprofil temperaturbehandelt werden, kann die Dosisinformation vollständig gelöscht werden. Die Regenerierung wird vor jedem erneuten Einsatz durchgeführt.

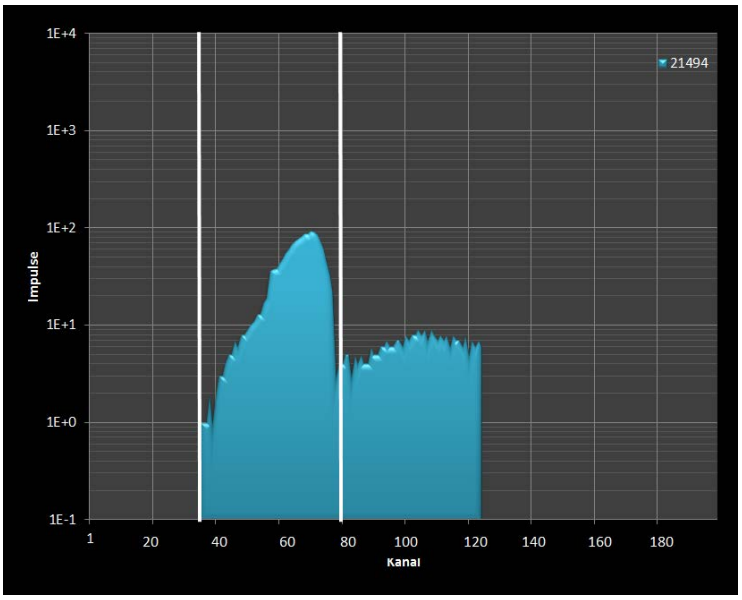


Abbildung 12 Glowkurve eines TLD vom Typ LiF:Mg,Ti mit dem Haupt-Glowpeak Nr. 5 von Kanal 36 bis Kanal 80. Zwischen den beiden weißen Begrenzungen liegt die *ROI*.

5 Ergebnisse

5.1 Kerntechnischer Bereich

In der zweiwöchigen Messphase mit jeweils 10 Wiederholungen wurden von den Teilnehmern jeder Einsatz im Kontrollbereich in vorgefertigten Protokollvorlagen dokumentiert. Dazu wurden kurze Tätigkeitsbeschreibungen, die Aufenthaltsdauer, wie auch die betrieblich mit aktiven Dosimetern ermittelte Ganzkörperdosis festgehalten. Die Dosisverteilung der ermittelten Werte für die Augenlinsendosis liegt hier, wie bereits vorher vermutet, in einem niedrigen Dosisbereich. Für die in Abbildung 13 dargestellte Verteilung wurden nur Datensätze berücksichtigt, die bei Aufenthalten im Kontrollbereich erhoben wurden.

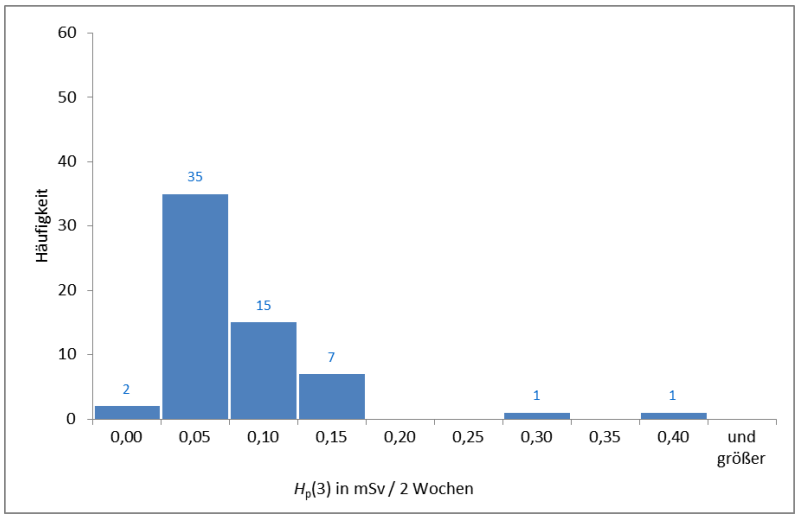


Abbildung 13 Häufigkeitsverteilung der im kerntechnischen Bereich ermittelten Werte für die Augenlinsendosis und einer Überwachungszeit von 2 Wochen.

Der maximale $H_p(3)$ Messwert lag bei 0,38 mSv / 2 Wochen und wurde bei der Tätigkeit „Filterwechsel“ ermittelt. Neben dem Filterwechsel konnten auch „Inspektionstätigkeiten am Abwasserbehälter“ als Tätigkeiten mit einer höheren Strahlenexposition für die Augenlinse identifiziert werden. Diese Tätigkeiten könnten bis zum Erreichen des neuen Grenzwertes jedoch 50 Mal (Filterwechsel) bis 70 Mal (Inspektionsarbeiten) im Jahr von einer Person durchgeführt werden. Da die Messwerte generell niedrig waren, wurde kein konkreter Handlungsbedarf festgestellt. Jedoch kann durch einen optimierten Personaleinsatz (z.B. Rotation) die Augenlinsendosis einzelner Personen minimiert werden. Ebenfalls könnte durch das Tragen von Bleiglasbrillen eine Dosisreduzierung um Faktor 10 erzielt werden.

Weiterhin zeigt die Datenanalyse, dass zwischen der Anzeige des aktiven Dosimeters in $H_p(10)$ und des Augenlinsendosimeters in $H_p(3)$ eine relativ gute Korrelation festgestellt werden konnte.

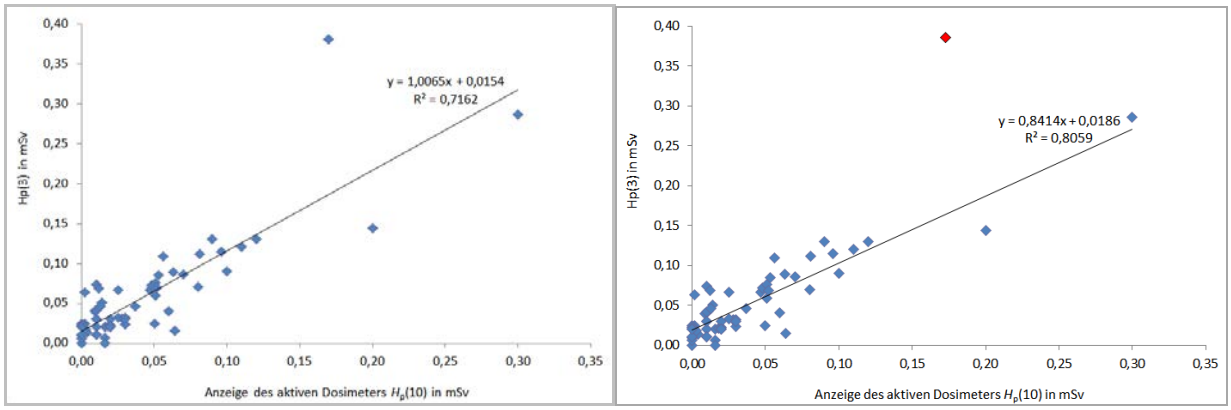


Abbildung 14 Korrelation zwischen der gemessenen Augenlinsendosis und der Anzeige des aktiven Dosimeters aller Messwerte (links) ausgenommen des Messwertes (in Rot) für die Tätigkeit „Filterwechsel“ (rechts).

Abbildung 14 zeigt die Messwerte der Augenlinsendosis und die zugehörige betrieblich ermittelte Ganzkörperdosis. Ein Messpunkt zeigte einen signifikant höheren Messwert für die Augenlinse, als das aktive Dosimeter anzeigte. Dieser Punkt ist in der Abbildung 14 rechts Rot dargestellt und wurde bei der Tätigkeit „Filterwechsel“ erhoben. Die Überproportionalität lässt sich dadurch erklären, dass sich die Person beim Filterwechsel mit dem Kopf näher an der Strahlenquelle befand, als mit dem Oberkörper und damit das Augenlinsendosimeter einen repräsentativeren Messwert für die Strahlenexposition der Augenlinse wiedergibt. Unter Nichtberücksichtigung des Filterwechsels lässt sich eine starke Korrelation mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0{,}806$ feststellen. Das bedeutet, dass elektronische Personendosimeter zur Abschätzung der Augenlinsendosis, bei Tätigkeiten im kerntechnischen Bereich mit Ausnahme der Filterwechsel generell geeignet sind.

Um den besseren Vergleich zur amtlichen Dosimetrie ziehen zu können, wurde die Dosis für die Augenlinse der einzelnen Teilnehmer zu kumulierten Monatswerten zusammengefasst und in Abbildung 15 dargestellt. Bei dieser Verteilung wurden alle gemessenen Werte berücksichtigt, inklusive der Werte der arbeitsfreien Wochen. Für jeden Teilnehmer konnten insgesamt fünf kumulierte Monatswerte ermittelt werden, über deren Mittel die Hochrechnung auf einen Jahreswert erfolgte. Diese Hochrechnung basiert auf der Annahme, dass die Daten bei realistischen Routinetätigkeiten erhoben wurden und berücksichtigt arbeitsfreie Tage. Die Werte (Tabelle 3) zeigen, dass im kerntechnischen Bereich die Strahlenexposition für die Augenlinse als nicht kritisch angesehen werden kann und bei keinem Teilnehmer eine Überschreitung des neuen Grenzwertes von 20 mSv/a zu erwarten ist.

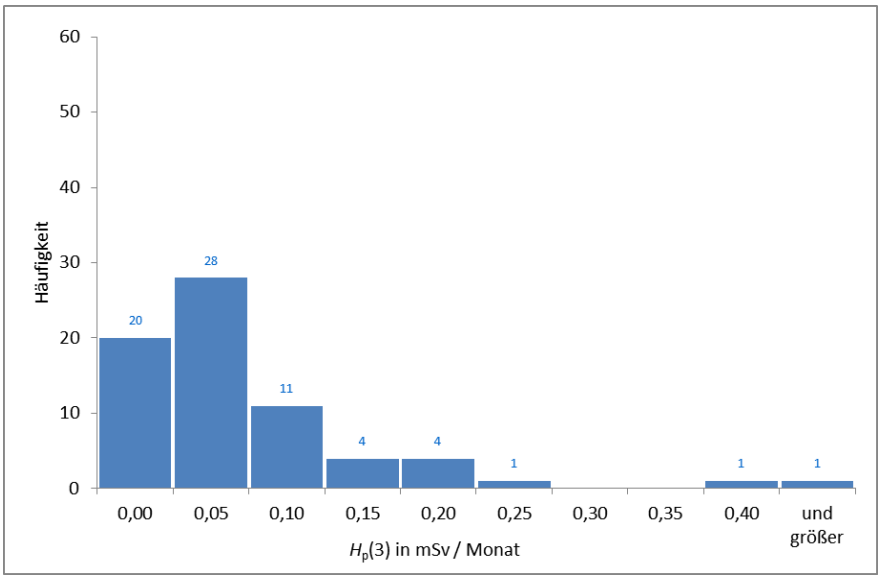


Abbildung 15 Häufigkeitsverteilung der im kerntechnischen Bereich ermittelten Werte für die Augenlinsendosis kumuliert zu Monatswerten mit einem Maximalwert von 0,41 mSv/Monat.

Tabelle 3 Hochrechnung der jährlichen Augenlinsendosis $H_p(3)$ in mSv der Teilnehmer aus dem kerntechnischen Bereich.

Teilnehmer	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
$H_p(3)$ in mSv/a	0,64	0,56	0,89	0,77	0,79	0,29	0,27	0,14	0,54	0,11	0,15	0,29	1,58	1,95

5.2 Medizinischer Bereich

5.2.1 Phase 1

Die in Phase 1 ermittelten Werte wurden als repräsentative Übersichtsmessungen erhoben. Daher wurden alle Tätigkeiten einer Routinearbeitswoche berücksichtigt. In allen Kliniken wurde diese Phase über insgesamt vier Wochen durchgeführt und die Einzelwerte zu kumulierten Monatswerten zusammengefasst. Die Dosisverteilung dieser kumulierten Monatswerte ist in Abbildung 16 dargestellt. Der Median dieser Verteilung liegt bei 0,20 mSv pro Monat und der maximal ermittelte Dosiswert wurde mit 8,52 mSv im Monat gemessen. Auf dieser Datenbasis ergab die Hochrechnung auf eine jährliche Augenlinsendosis bei einem Drittel der Teilnehmer Werte, die größer als 20 mSv waren.

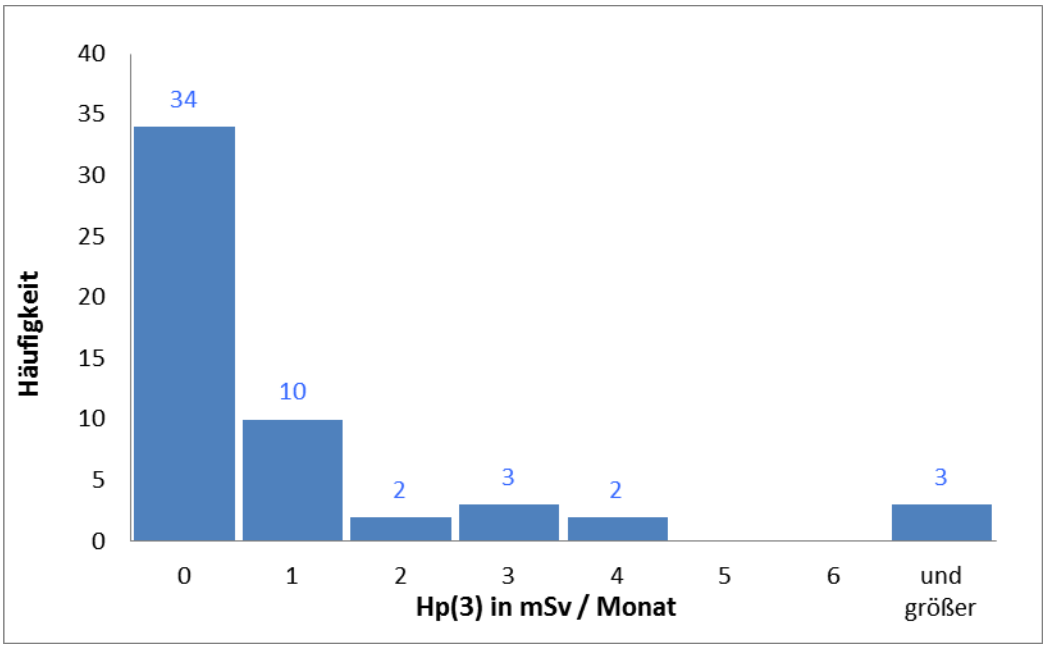


Abbildung 16 Häufigkeitsverteilung der kumulierten Wochenwerte über alle Tätigkeiten in Phase 1 der experimentellen Untersuchung mit einem Maximalwert von 8,52 mSv/Monat.

Abbildung 17 zeigt die Dosisverteilung der in Phase 1 der Untersuchung ermittelten Werte für die einzelnen Kliniken aufgeschlüsselt. Das dargestellte Boxplot-Diagramm beinhaltet alle gemessen Werte, vom Minimum bis zum Maximum und ist so gewählt worden um auch die höheren Dosiswerte zu berücksichtigen und diese in der Verteilung nicht als Ausreißer auszuschließen. Die Box spannt sich vom 25%-Quantil bis zum 75%-Quantil auf. Der Median wird durch die Querlinie in der Box dargestellt. Der untere Teil der Box beinhaltet das 25%-Quantil bis zum 50%-Quantil, welches dem Median entspricht. Die Spannweite der Daten wird durch die außerhalb der Boxen nach unten und oben zeigenden Antennen dargestellt. Dabei verläuft die untere Antenne vom Minimum bis zum 25%-Quantil und die obere Antenne vom 75%-Quantil bis zum Maximum. Die Abbildung 17 zeigt, dass die Verteilungen sich für jede Klinik unterscheiden und man nicht davon ausgehen kann, dass mit steigender Anzahl der Prozeduren, die in einer Klinik durchgeführt werden, auch der Median der Dosiswerte höher liegt. So ist der Median für Klinik B bei deutlich weniger Prozeduren höher als der Median bei Klinik A. Für Klinik A liegen 75% aller Werte zwischen 0 mSv und 0,21 mSv pro Woche. Auch die Spannweite mit den maximal ermittelten Werten unterscheidet sich für jede Klinik. In kleineren Kliniken, in denen viele routinierte Eingriffe durchgeführt werden, konnte eine geringere Spannweite beobachtet werden,

als in größeren Unikliniken, in denen seltenere und komplizierte Eingriffe übernommen werden.

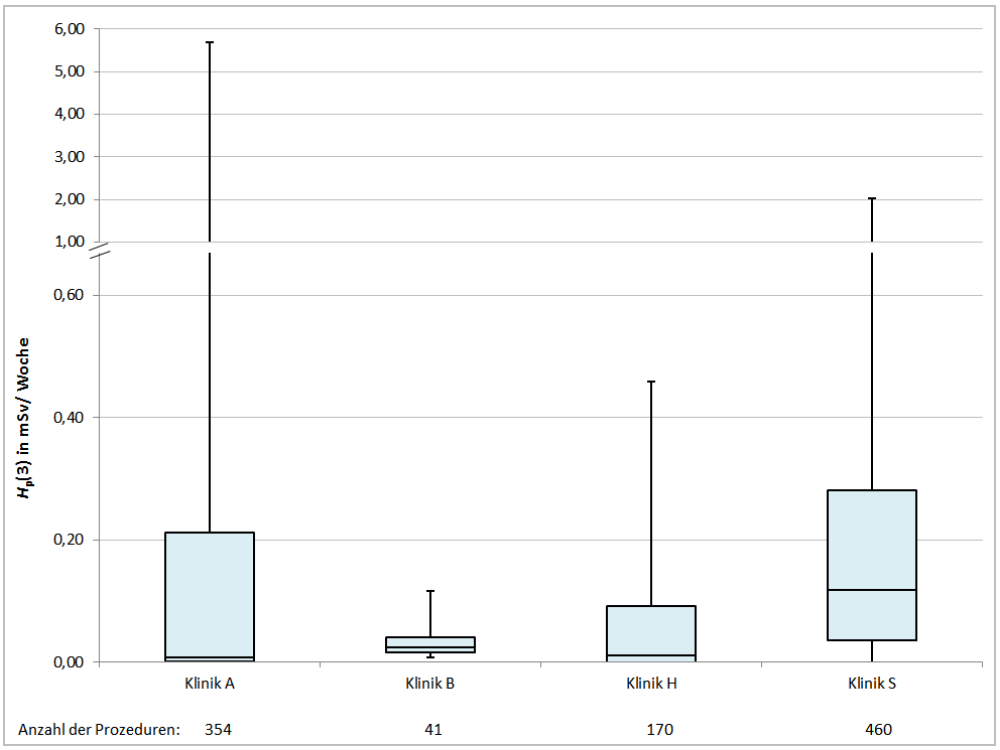


Abbildung 17 Bloxplot-Diagramm der Dosisverteilung als $H_p(3)$ in mSv pro Woche für die einzelnen Kliniken und alle Routinetätigkeiten der Phase 1 der experimentellen Untersuchung

Am Ende der Messphase erhielten alle Teilnehmer ihre Messergebnisse wie auch die teilnehmerspezifische Dosisverteilung mit Erläuterung. Eine solche Dosisverteilung in anonymisierter Form ist in Abbildung 18 für die Kliniken A und S dargestellt. Aus der Verteilung ist zu erkennen, dass zwischen der Strahlenexposition der Augenlinse und der Funktion des medizinischen Personals keine Verbindung erkannt wurde. So kann man nicht davon ausgehen, dass ein Oberarzt generell durch seine Funktion einer höheren Strahlenexposition der Augenlinse ausgesetzt war, als ein Assistenzarzt oder Medizinisch-technischer Radiologieassistent.

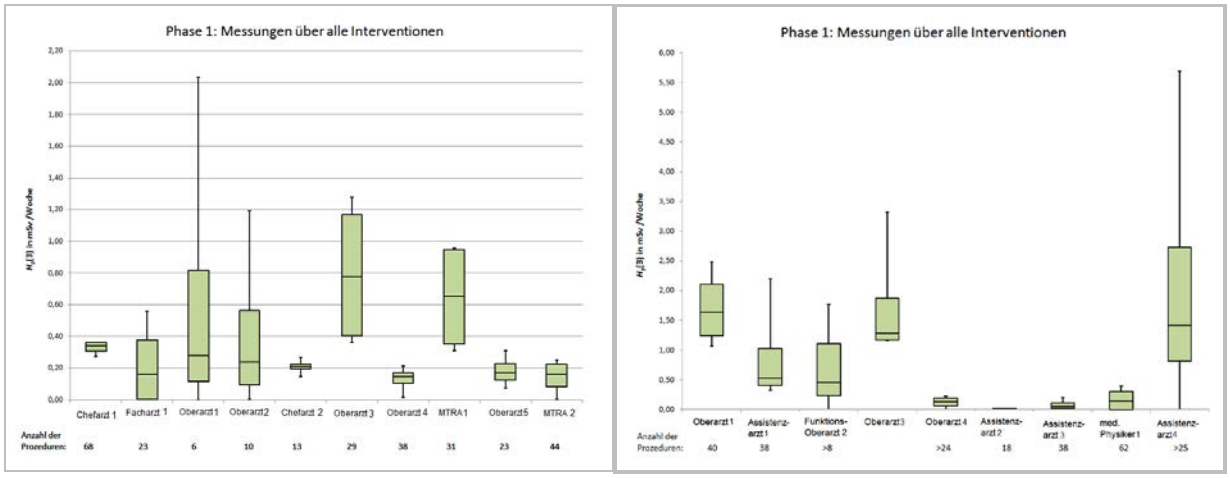


Abbildung 18 Dosisverteilung für die einzelnen Teilnehmer in Abhängigkeit ihrer Funktion

5.2.2 Phase 2

Die Fragestellung, ob gewisse Tätigkeiten oder Interventionen zu einer höheren Strahlenexposition der Augenlinse führen und als dosisintensivere Interventionen identifiziert werden können, wurde in Phase 2 untersucht. Hierfür wurden tätigkeitsspezifische Messungen für ausgewählte Tätigkeiten nach Tabelle 1 durchgeführt. Die entsprechende tätigkeitsspezifische Dosisverteilung über alle Kliniken ist in Abbildung 19 dargestellt. Der Maximalwert trat bei der Embolisation auf und lag bei 1,12 mSv pro Prozedur. Aus dem Diagramm ist zu erkennen, dass bei der Embolisation, bei Gallengangseingriffen, TIPS und CTO-Interventionen eine höhere Strahlenexposition der Augenlinse festgestellt wurde und besonders für die Tätigkeiten in der Interventionellen Radiologie (ANG, PTA, EMB, Galle und TIPS) sehr große Spannweiten und Maximalwerte pro Prozedur gemessen wurden. Im Bereich der Kardiologie ist die Strahlenbelastung für die Augenlinse dagegen eher gering. Bei der Intervention CA/PTCA sind 75% der Werte kleiner 0,01 mSv pro Prozedur, vereinzelt traten jedoch höhere Messwerte bis zu 0,28 mSv pro Prozedur auf. Bei CTO-Interventionen liegt der Median bei 0,02 mSv pro Prozedur und 75% aller Werte liegen zwischen 0,02 mSv und 0,13 mSv pro Prozedur.

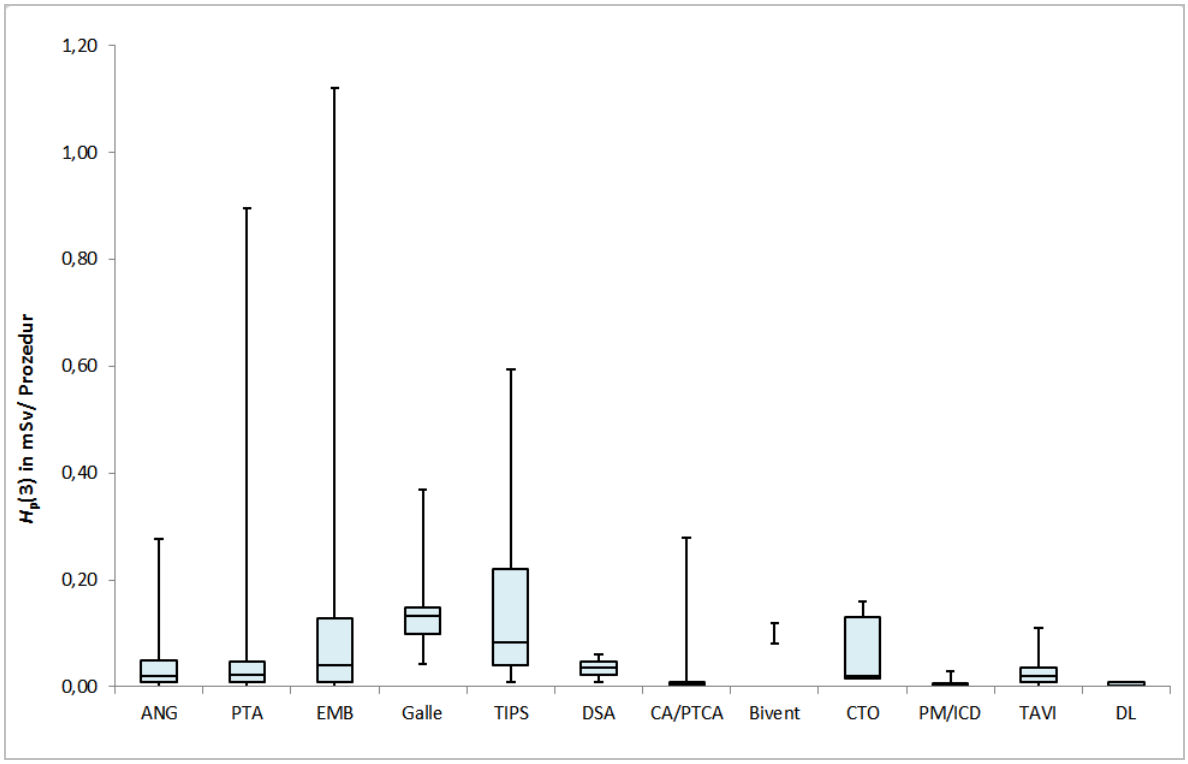


Abbildung 19 Boxplot-Diagramm der Dosisverteilung als $H_p(3)$ in mSv pro Prozedur in Abhängigkeit ausgewählter Tätigkeiten

Im Bereich der Nuklearmedizin wurden Dosimeter nuklidspezifisch für folgende Radionuklide ausgegeben: ^{18}F, ^{68}Ga, ^{99m}Tc, ^{90}Y und ^{177}Lu. Die Dosimeter wurden für alle Tätigkeiten in Bezug auf ein Nuklid getragen und die zugehörigen Tätigkeiten wie Routinemessungen, Präparation, Applikation, etc. in den entsprechenden Protokollen dokumentiert. Die Überwachungszeit betrug eine Woche mit insgesamt 10 Wiederholungen. Bei Routinemessungen und der Präparation trugen die Teilnehmer in der Regel immer Schutzbrillen und das Augenlinsendosimeter dahinter. Dementsprechend wurden in diesem Bereich niedrige Dosiswerte ermittelt. Der Median über alle Messungen liegt hier bei 0,01 mSv pro Woche. Der Maximalwert von 0,47 mSv pro Woche wurde bei einer Applikation und dem Radionuklid ^{90}Y gemessen. Hierbei trug der Teilnehmer keine Strahlenschutzbrille. Die leicht erhöhten Dosiswerte traten bei der Synthese von ^{68}Ga (0,20 mSv/ Woche) und bei der Applikation von ^{90}Y auf.

Das Thema „Double dosimetry“ wurde auf Fachkonferenzen häufig im Zusammenhang mit der Abschätzung der Augenlinsendosis erwähnt. Double dosimetry findet in den Bereichen der interventionellen Radiologie und Kardiologie

Anwendung. Dabei trägt das medizinische Personal zwei Dosimeter, eins unter der der Bleiweste und eins darüber. In der Regel handelt es sich dabei um zwei in der Messgröße $H_p(10)$ anzeigende Dosimeter. Über einen bestimmten Algorithmus wird aus den Messwerten beider Dosimeter die Effektive Dosis abgeschätzt. Es zeigt sich, dass in der Praxis kein einheitlicher Algorithmus empfohlen wird, sondern eine Vielzahl von Algorithmen verwendet wird. Bislang wurde noch kein einheitliches Verfahren zur Berechnung der Effektiven Dosis mittels double dosimetry geregelt [CHU 2014]. In der Praxis wird weiterhin der Messwert eines Dosimeters zur Abschätzung der Effektiven Dosis herangezogen. In Bezug auf die Augenlinsendosis wird versucht, eine Korrelation zwischen dem $H_p(3)$-Messwert und dem $H_p(10)$-Messwert des Dosimeters, das über der Bleiweste getragen wurde, herzustellen. Im Rahmen dieser Untersuchung konnte eine solche Korrelation nicht analysiert werden, da zum einen nur wenige einzelne Ärzte double dosimetry betrieben und zum andern die amtlich ermittelten $H_p(10)$-Messwerte nicht zur Verfügung standen. Sollte überhaupt eine Korrelation zur Augenlinsendosis bestehen, so ist das Verfahren mittels double dosimetry wahrscheinlich das geeignete. Hierbei sollte nur beachtet werden, dass das zweite Dosimeter nicht am Rumpf über der Bleiweste getragen wird, sondern näher am Kopf, beispielsweise über dem Schilddrüsen-Bleikragen.

Weiterhin wurde untersucht, ob zwischen der Augenlinsendosis und der Anzahl der Interventionen oder dem Dosisflächenprodukt ein Zusammenhang besteht. Die Daten dieser Korrelationen sind der Abbildung 20 zu entnehmen. Es ist deutlich zu erkennen, dass zwischen der Augenlinsendosis und der Anzahl der durchgeführten Interventionen keine Korrelation besteht.

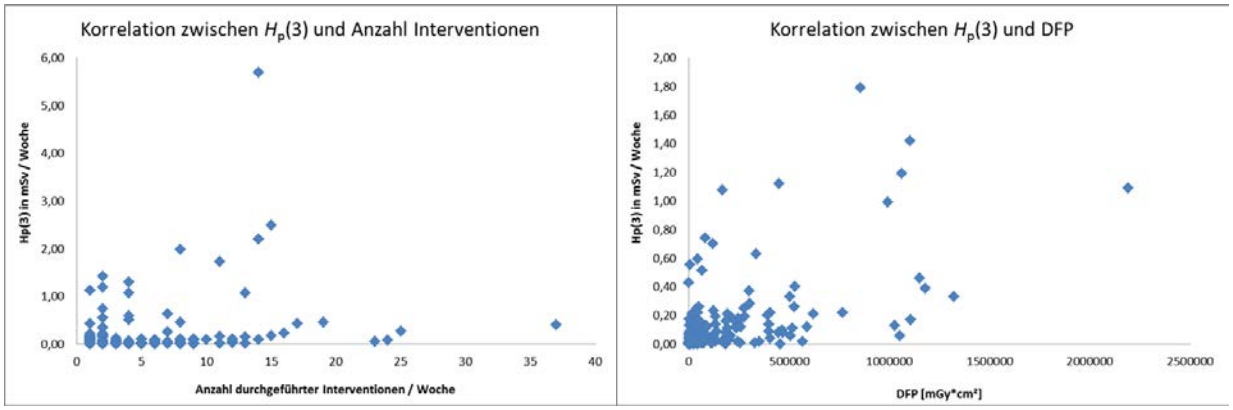


Abbildung 20 Korrelation zwischen der ermittelten Dosis und Anzahl der Interventionen bzw. DFP.

Auch zwischen der Augenlinsendosis und dem Dosisflächenprodukt konnte keine Korrelation festgestellt werden. Hier sind viele weitere Einflussfaktoren zu berücksichtigen, wie beispielsweise die Position des Personals während des Eingriffs, die Körpergröße, die Erfahrung, der Patient als Streukörper, die Einrichtung am Arbeitsplatz und weitere Faktoren. Die Einflussfaktoren sind miteinander so verzahnt, dass die Abschätzung der Augenlinsendosis über einfache Korrelationen nicht möglich es. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass das Messen der Augenlinsendosis im Rahmen einer Überwachung unerlässlich ist.

6 Arbeitspaket 3: Empfehlungen zum Schutz der Augenlinse

6.1 Entscheidungsmatrix (MS 3.1)

Ein Ziel des Projektes war es, eine Entscheidungsmatrix zu erstellen, anhand derer Risikokollektive innerhalb der Gruppe beruflich strahlenexponierter Personen identifiziert werden können. Im Rahmen der Erarbeitung der Matrix stellte sich heraus, dass es aufgrund der unterschiedlichen Eingangsparameter innerhalb der einzelnen Tätigkeitsbereiche unumgänglich war, mehrere Matrizes zu erstellen. Das Risiko wird definiert als: “Das mehrmalige Durchführen der anhand der Matrix bewerteten Tätigkeit kann zu einer Überschreitung des Jahresgrenzwertes für die Augenlinse führen“.

6.1.1 Fliegendes Personal

Für fliegendes Personal wurde auf das Erstellen einer Matrix verzichtet. Hier ist davon auszugehen, dass aufgrund des homogenen kosmischen Strahlenfeldes eine starke Korrelation zwischen der Augenlinsendosis und der Effektiven Dosis besteht. Die Einhaltung der gesetzlichen Dosisgrenzwerte wird mittels Berechnungen und entsprechendem Personaleinsatz seit Jahren erfolgreich praktiziert. Mit Einhaltung des Grenzwertes der Effektiven Dosis ist auch die Einhaltung der einzelnen Grenzwerte für die Organdosen gewährleistet. Über diese Berechnungen ist das Risiko gut abzuschätzen und unterliegt kaum Schwankungen, da die Eingangsparameter (z.B. Flughöhe, Flugdauer, Flugstrecke etc.) in der praktischen Umsetzung kaum variiert werden können. Gründe hierfür sind die entstehenden Kosten, eine Erhöhung der Umweltbelastung oder die Belange der Flugsicherheit. Eine Darstellung als Entscheidungsmatrix wird hier als nicht zielführend angesehen.

6.1.2 Kerntechnischer Bereich

Für den kerntechnischen Bereich wurden fünf Kriterien definiert.
Die Gewichtung des Risikos wird anhand der Farbe ausgedrückt. Eine Bewertung des Risikos anhand der Matrix ist wie folgt vorzunehmen:
Liegt mindestens eine Eigenschaft aller betrachteten Kriterien im gelben Bereich vor, so ist das Risiko der Augenlinse durch eine Strahlenexposition als „mittleres Risiko“ anzusehen. Wenn alle Eigenschaften der betrachteten Kriterien im grünen Bereich liegen, so ist das Risiko der Augenlinse durch eine Strahlenexposition als „geringes Risiko“ anzusehen.

Tabelle 4 Entscheidungsmatrix für den kerntechnischen Bereich.

Kriterium	Eigenschaft	
Abstand zur Strahlenquelle	**groß**	**klein**
Expositionsdauer	**kurz**	**lang**
Ortsdosisleistung	**gering**	**hoch**
Energie der Strahlung im Direktstrahlenfeld	**niedrig**	**hoch**
Strahlenart	**Alpha, Beta < 700 keV, Neutronen**	**Photonen, Beta > 700 keV**

6.1.3 Medizinischer Bereich

Für den medizinischen Bereich wurde eine Matrix mit insgesamt acht Kriterien aufgestellt. Die beiden Kriterien „Tragen von Strahlenschutzbrillen“ und „Einsatz von Bleiglasscheiben/Bleilamellen“ sind für die Strahlenarten Alpha, Beta < 700 keV und Neutronen nicht anwendbar, da diese Strahlenarten nicht zur Augenlinsendosis beitragen und das Risiko durch eine Abschirmung sich weder erhöht, noch verringert.
Die Gewichtung des Risikos erfolgt analog zur vorhergehenden Matrix. Die Bewertung des Risikos anhand der Matrix ist wie folgt vorzunehmen:
Liegt mindestens eine Eigenschaft aller betrachteten Kriterien im roten Bereich vor, so ist das Risiko der Augenlinse durch eine Strahlenexposition als „hohes Risiko“ anzusehen. Falls mindestens eine Eigenschaft aller betrachteten Kriterien im gelben Bereich vorliegt, so ist das Risiko der Augenlinse durch eine Strahlenexposition als

„mittleres Risiko“ anzusehen. Wenn alle Eigenschaften der betrachteten Kriterien im grünen Bereich liegen, so ist das Risiko der Augenlinse durch eine Strahlenexposition als „geringes Risiko“ anzusehen.

Tabelle 5 Entscheidungsmatrix für den medizinischen Bereich.

Kriterium	Eigenschaft	
Abstand zur Strahlenquelle	**groß**	**klein**
Expositionsdauer	**kurz**	**lang**
Ortsdosisleistung	**gering**	**hoch**
Energie der Strahlung im Direktstrahlenfeld	**niedrig**	**hoch**
Aufbau der Röntgenanlage	**Unter-Tisch**	**Über-Tisch**
Strahlenart	**Alpha, Beta < 700 keV, Neutronen**	**Photonen, Beta > 700 keV**
Tragen von Strahlenschutzbrillen*	**ja**	**nein**
Einsatz von Bleiglasscheiben/Bleilamellen*	**ja**	**nein**

* nur relevant bei Photonen- und Beta-Strahlenfeldern mit einer maximalen Energie größer 700 keV.

6.2 Empfehlungen zum Schutz der Augenlinse (MS 3.2)

Im kerntechnischen Bereich wurden zwei Tätigkeiten identifiziert, bei denen eine leicht erhöhte Augenlinsendosis festgestellt wurde. Dabei handelt es sich um „Filterwechsel“ und „Inspektionsarbeiten am Abwasserbehälter“. Sofern sich eine Exposition aufgrund der vorliegenden Gegebenheiten nicht vermeiden lässt, wird zur Minimierung der Augenlinsendosis von einzelnen Personen empfohlen, das Personal in Rotation für diese Tätigkeiten einzusetzen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigten, dass im medizinischen Bereich Messungen der Augenlinsendosis im Rahmen der Überwachung als sinnvoll erachtet werden können. Hierzu ist es notwendig, geeignete Augenlinsendosimeter in der Messgröße $H_p(3)$ zu entwickeln und für die Überwachung einzusetzen. Für die $H_p(3)$-Dosimeter sollten analog zu den Dosimetern für $H_p(10)$ und $H_p(0{,}07)$ die Leistungsmerkmale erarbeitet und in den entsprechenden Normen definiert werden. Ein geeignetes Verfahren zur Bestimmung der Augenlinsendosis sollte ebenfalls in

einer Norm beschrieben werden. Weiterhin sollten regelmäßige Vergleichsbestrahlungen für $H_p(3)$-Dosimeter angeboten werden.

Für ein Drittel der Teilnehmer aus dem medizinischen Bereich ergab die Hochrechnung Werte, die größer als 20 mSv/a waren, wobei der Großteil der Probanden angab, keine Schutzbrille getragen zu haben. Hier wird aus Strahlenschutzsicht das größte Optimierungspotential gesehen. Generell waren Strahlenschutzbrillen in den einzelnen Einrichtungen vorhanden, allerdings wurden diese in der Regel nicht verwendet. Ein standardisiertes Dosimetriesystem, welches integrierbar oder bereits in Strahlenschutzbrillen integriert ist, wird als sehr sinnvoll erachtet. Dies ist zum einen für die Messstellen von Vorteil, da Parameter wie beispielsweise der Bleigleichwert der Strahlenschutzbrille ermittelt und als konstanter Abschirmfaktor verwendet werden kann.

Die feste Integration in der Brille dazu führt, dass die Dosimeter richtig angewendet getragen werden. Eine Fehlpositionierung des Dosimeters ist somit ausgeschlossen. Unter Berücksichtigung einer entsprechenden Kalibrierung kann davon ausgegangen werden, dass die Augenlinsendosis repräsentativ erfasst wird.

Zum anderen ist ein integriertes Dosimetriesystem für das medizinische Personal praktikabler und würde wahrscheinlich zu einer Erhöhung der Tragequote der Strahlenschutzbrillen führen.

Zugleich sollte durch geeignete Unterweisungen eine erhöhte Sensibilisierung des klinischen Personals in Bezug auf das Risiko einer Schädigung der Augenlinse durch die Einwirkung ionisierender Strahlung herbeigeführt werden. Somit könnte auch die Motivation, Strahlenschutzbrillen oder Visiere zu tragen, erhöht werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im ersten Arbeitspaket dieser Untersuchung wurde ein Literaturkatalog mit 167 wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum Thema Strahlenbelastung der Augenlinse zusammengetragen. Auf Basis der Literaturrecherche wurden Tätigkeiten im medizinischen und kerntechnischen Bereich identifiziert, bei denen eine höhere Strahlenexposition der Augenlinse potentiell auftreten könnte. Im zweiten Arbeitspaket wurde die Strahlenexposition für die Augenlinse für die identifizierten Tätigkeiten experimentell untersucht. Vor Beginn dieser experimentellen Untersuchung war es notwendig, ein geeignetes Dosimeter, welches in der geeigneten Messgröße für die

Augenlinse anzeigte, zu finden. Da in Beta- und in Mischstrahlenfeldern, wie sie beispielsweise in der Nuklearmedizin vorkommen, nur $H_p(3)$ eine gute Abschätzung der Augenlinsendosis liefert, wurde für die experimentelle Untersuchung $H_p(3)$ als geeignete Messgröße festgelegt. Der Prototyp eines Dosimeters zur Ermittlung der Augenlinsendosis in der Messgröße $H_p(3)$ wurde entwickelt und getestet. Dabei wurde großen Wert auf die Praktikabilität und die Akzeptanz für das Dosimeter gelegt, um möglichst viele Teilnehmer an der Studie und somit möglichst viele Messwerte gewinnen zu können. Auch die akkurate Dosisbestimmung in Beta- und Photonenstrahlenfeldern war ein wichtiger Punkt. Die Eignung des Dosimeters wurde durch eine Vergleichsbestrahlung, welche von der PTB durchgeführt wurde, überprüft. Die Ergebnisse zeigten, dass in hochenergetischen Beta-Strahlenfeldern und einem Strahleneinfallswinkel von 60° ein Überansprechvermögen von Faktor 3 auftritt. Dies ist dadurch zu erklären, dass für den Energiekompensationsfilter zu geringe Abmessungen angenommen wurden und hier noch Optimierungspotential besteht. Für alle anderen getesteten Energie- und Winkelkombinationen zeigt das Dosimeter zufriedenstellende Ergebnisse und wurde als geeignetes Dosimeter angesehen.

Ein neu definiertes Zylinderphantom, welches zu Kalibrierzwecken von Augenlinsendosimetern eingeführt wurde, war zur Bestimmung der Winkelabhängigkeit des Prototyps notwendig. Jedoch zeigte sich, dass für die Routinekalibrierung, welche bei einem Winkel von 0° durchgeführt wird, sich der Rückstreuanteil durch das Zylinderphantom und das ISO-Quaderphantom vernachlässigbar unterscheiden. Das ISO-Quaderphantom bietet zudem den Vorteil, dass auf der planen Oberfläche mehr Dosimeter positioniert und gleichzeitig bestrahlt werden können. Zusammenfassend kann man sagen, dass für Routinekalibrierungen das bisher eingesetzte ISO-Quaderphantom auch für Augenlinsendosimeter geeignet ist und das Zylinderphantom nicht zwingend notwendig ist.

Zur Durchführung der experimentellen Untersuchung wurde jeweils ein angepasstes Messkonzept für den kerntechnischen und den medizinischen Bereich erarbeitet. Die Messwerte zeigten im kerntechnischen Bereich eine Dosisverteilung mit niedrigen Werten. Bei zwei Tätigkeiten („Filterwechsel“ und „Inspektion am Abwasserbehälter“) wurden leicht erhöhte Dosiswerte ermittelt. Jedoch zeigte die Hochrechnung auf die jährliche Dosis, dass im kerntechnischen Bereich keine Grenzwertüberschreitungen zu erwarten sind. Zwischen der Augenlinsendosis und der Ganzkörperdosis, ermittelt mit betrieblichen aktiven Dosimetern, konnte bis auf die Tätigkeit „Filterwechsel“ eine

starke Korrelation festgestellt werden. So kann die Strahlenexposition der Augenlinse für die meisten Tätigkeiten im kerntechnischen Bereich mit aktiven Dosimetern gut abgeschätzt werden.

Für den medizinischen Bereich wurde ein Zwei-Phasen-Messkonzept erarbeitet. Dabei wurden im ersten Schritt Übersichtsmessungen über alle Tätigkeiten in einer Routinearbeitswoche durchgeführt. Die Hochrechnungen auf der Grundlage der in Phase 1 ermittelten Dosiswerte ergab bei einem Drittel der Teilnehmer eine jährliche Augenlinsendosis größer 20 mSv.

In der Interventionellen Radiologie, wie auch in der Kardiologie wurden Tätigkeiten identifiziert, bei denen eine höhere Strahlenexposition der Augenlinse auftrat. Dazu zählen die Eingriffe „Embolisation“, „Gallengangseingriff“, „TIPS“ und „CTO“. Bei diesen Eingriffen, wie auch bei der „Angiografie“, „PTA“ und „CA/PTCA“ wurde eine sehr hohe Schwankungsbreite in der Verteilung ermittelt. Bei der Durchführung dieser Eingriffe traten in 25% der Fälle sehr hohe Messwerte pro Prozedur auf. Es konnten keine Korrelationen zwischen der Augenlinsendosis und der Anzahl der Interventionen wie auch zwischen der Augenlinsendosis und dem Dosisflächenprodukt ermittelt werden. Aufgrund dieser Ergebnisse wird es als sinnvoll erachtet, die Augenlinsendosis im Rahmen einer regelmäßigen Überwachung zu messen.

Aus den Messungen in der Nuklearmedizin konnte die Y-90 Applikation und die Ga-68 Synthese als Tätigkeiten mit höherer Strahlenexposition für die Augenlinse identifiziert werden.

Die Auswertung der Protokolle und die Befragung der Teilnehmer ergab, dass die ausliegenden Strahlenschutzbrillen, bis auf wenige Ausnahmen, nicht getragen wurden. Als Grund hierfür wurde oft das Gewicht der Brillen und die Impraktikabilität angegeben. Für den medizinischen Bereich wird daher eine Sensibilisierung des medizinischen Personals bezüglich der Strahlenexposition der Augenlinse empfohlen. Auf die Verwendung von Schutzausrüstung (z.B. das Tragen von geeigneten Strahlenschutzbrillen oder Bleiglas-Visieren) sollte Wert gelegt werden. Bei der Strahlenschutzbrille ist auf einen gegebenen Seitenschutz zu achten. Zur Überwachung der Augenlinsendosis wird ein in die Strahlenschutzbrille integriertes oder integrierbares Dosimetriesystem als sehr sinnvoll erachtet. Insbesondere bei den Tätigkeiten, bei denen eine höhere Strahlenexposition für die Augenlinse in dieser Untersuchung festgestellt wurde, sollte über eine kombinierte Anwendung von verschiedenen Abschirmungen die Minimierung der Augenlinsendosis erzielt werden.

Die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten sollten entsprechend den Gegebenheiten vor Ort ausgewählt werden. Da in den meisten Fällen die Röntgenröhre als Untertisch-Aufbau vorkam, empfiehlt es sich für diesen Fall eine Kombination aus Bleiglasscheibe mit Bleilamellen zur Abdeckung des Patienten und die Strahlenschutzbrille. Auch Bleidecken, die auf den Patienten gelegt werden, minimieren die Streustrahlung.

Ein wesentlicher Bereich, auf den von einigen Ärzten hingewiesen wurde, war die Unfallchirurgie und Orthopädie. Diese Bereiche konnte in der laufenden experimentellen Untersuchung dieser Studie nicht mehr berücksichtigt werden. Mittels mobiler C-Bogen-Technik sind intraoperative Durchleuchtungen in diesem Bereich sehr häufig. Dabei werden nicht selten mehrfach Durchleuchtungen durchgeführt, so dass eine unnötige und hohe Strahlenexposition insbesondere auch für die Augenlinse angenommen wird.

Literaturverzeichnis

BEH 2010 Behrens, Dietze: „Monitoring the Eye Lens: which dose quantity is adequate?“ Phys. Med. Biol. 55 4047-4062, 2010 und Corrigendum Phys. Med. Biol. 56 511, 2011.

BEH 2011 Behrens: „Air Kerma To Dose Equivalent conversion coefficients Not Included In ISO 4037-3“. Radiation Protection Dosimetry Vol. 147 No. 3, 373-379, 2011.

BEH 2012 Behrens: „Air kerma to $H_p(3)$ conversion coefficients for a new cylinder phantom for photon reference radiation qualities“. Radiation Protection Dosimetry 151(3), 450-455, 2012.

BEH 2013 Behrens: „Monitoring the Eye Lens“. IRPA13-Contribution: TS7e.3 (http://www.ptb.de/en/org/6/63/f_u_e/ts7e_3.pdf), 10.03.2014.

BEH2016 Behrens et al: „Intercomparison of eye lens dosemeters”. Radiation Protection Dosimetry (2016), pp. 1–7, März 2016.

BOR 2011 Bordy, Gualdrini, Daures, Mariotti: „Principles for the design and calibration of radiation protection dosemeters für operational and protection quantities for eye lens dosimetry”. Radiation Protection Dosimetry (2011) Vol. 144, No. 1-4, pp. 257-261, 2011.

CHU 2014 V. Chumak et al: „Optimization of the double dosimetry algorithm for interventional cardiologists”. Radiation Physics and Chemistry 104 (2014) 51-54, Januar 2014.

ENG 2013 Engelhardt: „Praktische Augenlinsendosimetrie aus Sicht einer Messstelle“. 274. PTB-Seminar, 2013.

GUA 2011 G. Gualdrini et al.: „A new cylindrical phantom for eye lens dosimetry development”. Radiation Measurements 46 (2011) 1231e1234, August 2011.

HÄU 2009 Häusler, Czarwinski, Brix: „Radiation exposure of medical staff from interventional x-ray procedures: a multicentre study“. Eur Radiol(2009) 19: 2000-2008, European Society of Radiology, 2009.

ICRP 2012 ICRP, 2012 ICRP „Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context”. ICRP Publication 118. Ann. ICRP 41(1/2).

ISO 14146 International Organization for Standardization: „Radiological protection − criteria and performance limits for the periodic evaluation of dosimetry services.” Current Draft of ISO 14146, 2015.

ISO 4037-3 International Organization for Standardization: „X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy − Part 3: Calibration of area and personal dosemeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence”. ISO 4037-3, Juni 1999.

RiPhyKo Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosen- Teil1: Ermittlung der Körperdosis bei äußerer Strahlenexposition (§§40, 41, 42 StrlSchV; §35 RöV), 2013.

RL 2013 Richtlinie 2013/59/Euratom des Rates vom 5. Dezember 2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung und zur Aufhebung der Richtlinien 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom und 2003/122/Euratom, 2013.

SSK 2006 Strahlenschutzkommission (SSK): „Berechnungsgrundlage für die Ermittlung von Körperdosen bei äußerer Strahlenexposition“. SSK-Band 43, 2. überarbeitete Auflage, Hoffmann GmbH – Fachverlag, Berlin 2006.

SSK 2009 Strahlenschutzkommission (SSK): „Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Strahleninduzierte Katarakte“. Verabschiedet in der 234. Sitzung der SSK am 14.05.2009, Bonn.

SSK 2010 Strahlenschutzkommission (SSK): „Überwachung der Augenlinsendosis Stellungnahme der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung“. Verabschiedet in der 240. Sitzung der SSK am 02.02.2010, Bonn.

StrlSchV Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV). BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die durch Artikel 8 des Gesetzes vom 26. Juli 2016 (BGBl. I S. 1843) geändert worden ist.

SZE 2014 Szermerski, Bruchmann, Freudenberg, Andreeff, Geworski: „Exposition der Augenlinse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen aus nuklearmedizinischer Anwendung“. Wissenschaftliches Programm-Poster Hannover Nuklearmedizin 2014.

Vañ 2008 Vañó, Gonzales, Fernández, Haskal: „Eye lens exposure to radiation in interventional suites: caution is warranted”. Radiology Volume 248 (3) 945-53, September 2008.

VAN 2011 Vanhavere, Carinou, Domienik: „Measurements of eye lens doses in interventional radiology and cardiology: Final results of the ORAMED project”. Radiation Measurements 46 (211) 1243-1247, August 2011.