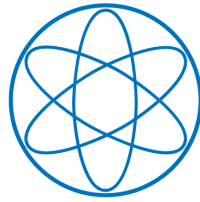


PHYSIK-DEPARTMENT



**Lumineszenzuntersuchungen an körpernah
getragenen Gegenständen für die
Notfalldosimetrie**

Dissertation von

Michael Hans Discher

geboren am 28.05.1985 in Heidenheim an der Brenz





TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Experimentalphysik E12

**Lumineszenzuntersuchungen an körpernah
getragenen Gegenständen für die
Notfalldosimetrie**

Michael Hans Discher

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Physik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr. J. Leo van Hemmen (i. R.)

Prüfer der Dissertation:

1. Hon.-Prof. Dr. Herwig G. Paretzke
2. Univ.-Prof. Dr. Stefan Schönert

Die Dissertation wurde am 29.01.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Physik am 07.05.2015 angenommen.

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit experimentellen und theoretischen Untersuchungen zur Optimierung von Displaygläsern aus handelsüblichen Mobiltelefonen als körpernah getragene Notfalldosimeter. Die Erkenntnisse aus Laborbestrahlungen konnten in einem Feldexperiment hinsichtlich der Verwendbarkeit und Zuverlässigkeit validiert werden. Des Weiteren konnten die experimentellen Ergebnisse mittels Strahlentransportrechnungen bestätigt werden. Die Dosisbestimmung mithilfe persönlicher Gegenstände erweist sich als eine rasche und robuste Methode im Falle eines radiologischen Unfalls.

Abstract

This thesis deals with experimental and theoretical investigations to use display glasses from normal mobile phones as individual emergency dosimeters which are carried close to the body. The results from irradiations in a laboratory were validated in a realistic field experiment with respect to usability and reliability. Furthermore, radiation transport calculations were carried out using realistic geometries, their results agree with the experimental results. Dose estimation with the help of such personal items could be demonstrated to be a rapid and robust method in case of a radiological incident.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einführung	1
1.2	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	3
2	Grundlagen	5
2.1	Grundlagen der Lumineszenzdosimetrie	5
2.1.1	Lumineszenz im Allgemeinen	5
2.1.2	Methodik und Anwendungen der stimulierten Lumineszenz	6
2.1.3	Beschreibung der Lumineszenz mit dem Bänder-Modell	7
2.2	Voraussetzungen und dosimetrische Eigenschaften von Notfalldosimetern	11
2.3	Vorstellung potenzieller Notfalldosimeter	13
2.3.1	Chipkarten	13
2.3.2	Elektronische Bauteile auf einer Platine	14
2.3.3	Displayglas	15
2.3.4	Andere Materialien	17
3	Messinstrumente und Strahlenquellen	19
3.1	Aufbau des Risø Lumineszenzmessgeräts	19
3.1.1	Komponenten der Messapparatur	20
3.2	Aufbau des LEXSYG Messgeräts	24
3.2.1	Komponenten der Messapparatur	25
3.3	Strahlenquellen	28
3.3.1	Röntgenanlagen PTW/Yxlon MG165 und MG320	28
3.3.2	Buchler Gammakalibrator OB 20	28
3.3.3	Gammacell 220 II	29
4	Experimentelle Untersuchungen	31
4.1	Verbesserung der Nachweisgrenze für Displaygläser	31
4.1.1	Reduzierung des Nulldosissignals durch Ätzen	31

4.1.2	Einfluss des Ätzens auf unbestrahlte und bestrahlte Glasproben	33
4.1.3	Variation des intrinsischen Hintergrundsignals und Bestimmung der Nachweisgrenze	34
4.1.4	Bestrahlungsversuche an extrahierten Glasproben	35
4.2	Thermolumineszenz Emissionsspektrometrie von Displayglas	37
4.2.1	Thermolumineszenz Emissionsspektrum zweier unterschiedlicher Displayglastypen	37
4.2.2	Spektrum einer vorgebleichten Probe	39
4.2.3	Spektrum einer unbestrahlten Probe	40
4.3	Dosimetrische Eigenschaften von Borosilikatglas (Kategorie B)	41
4.4	Bestimmung der Energie- und Richtungsabhängigkeit von Displayglas	44
4.4.1	Energieabhängigkeit von Displayglas	44
4.4.2	Richtungsabhängigkeit von Displayglas	46
4.5	Signalfadingfunktion und Variabilität von Displayglas	49
5	Strahlentransportrechnungen	51
5.1	Grundlagen der Strahlentransportrechnung	51
5.1.1	Beschreibung der Photonenquellen	52
5.1.2	Bestimmung der absorbierten Dosis	52
5.1.3	Geometrie und Spezifizierung des Materials	53
5.2	MCNP Simulationen einfacher Versuchsdurchführungen	55
5.3	Erstellung eines Mobiltelefon-Modells zur Verifizierung experimenteller Daten	56
5.3.1	Photonenenergie- und Winkelabhängigkeit eines Glases aus einem Mobiltelefon	56
5.3.2	Effekte der Bestrahlungsbedingungen auf die Energieabhängigkeit	58
5.4	Diskussion der Ergebnisse aus der Simulation	59
5.4.1	Veränderungen der Materialkonstanten und weitere Unsicherheitsquellen	59
5.4.2	Winkelabhängigkeit	60
5.4.3	Trageposition des Mobiltelefons	61
6	Einsatz der entwickelten Methoden in einem Feldexperiment	63
6.1	Hintergrundinformationen und Ziel des Feldexperiments	64
6.2	Vorbereitungen des Feldexperiments	65
6.3	Chronologischer Ablauf	70
6.4	Experimentelle Ergebnisse	71
6.4.1	Referenzwerte mit EPDs, LUXEL Dosimeter und Referenzgläsern	71
6.4.2	Displayglas als Notfalldosimeter	72
6.4.3	Diskussion der Ausreißer	74

6.4.4	Vergleich der Dosisabschätzungen zweier strahlenempfindlicher Komponenten ein und desselben persönlichen Gegenstands	76
6.5	Ergebnisse der Strahlentransportrechnungen	77
6.5.1	Geometriemodell des Experiments	77
6.5.2	Simulationsdetektoren zur Dosisbestimmung	78
6.5.3	Beschreibung der Ir-192 Gammaquelle	79
6.5.4	Ergebnisse der Simulation	79
7	Zusammenfassung und Ausblick	85
	Literaturverzeichnis	88
	Abbildungsverzeichnis	101
	Tabellenverzeichnis	103
A	Berechnungen	105
A.1	Berechnungen der Nachweisgrenze für Displayglas	105
A.2	Berechnungen des Massen-Energieabsorptionskoeffizient	107
B	Gamma-Emission von Ir-192	109
C	Materialspezifikationen verwendet in der MCNP Simulation	111

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Einführung

Die Verwendung radioaktiver Isotope bietet weltweit vielfältige Vorteile in der Medizin, der Forschung und der Industrie. Beim Gebrauch dieser Materialien sind Vorsichtsmaßnahmen, hohe Sicherheitsstandards und gesetzliche Strahlenschutzregelungen notwendig, um die Strahlenbelastung der Bevölkerung und Umwelt zu begrenzen. Aller Sicherheitsmaßnahmen zum Trotz ereigneten sich in der Vergangenheit immer wieder schwere Unfälle mit Strahlungsquellen, wie durch unkontrollierte Freisetzung radioaktiver Nuklide aus havarierten kerntechnischen Anlagen. Daraus folgten schwerwiegende Konsequenzen für Mensch und Umwelt, wie beispielsweise im März 2011 in Fukushima (Japan) oder im April 1986 in Tschernobyl (damalige Sowjetunion).

Die im Jahr 1957 gegründete Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) ist laut ihres Primers „das weltführende Forum für wissenschaftliche und technische Zusammenarbeit zur friedlichen Nutzung der Kerntechnik. [...] Wenn ein nuklearer Notfall eintritt, ist das Störfall- und Notfallzentrum der IAEO in Bereitschaft, um rund-um-die-Uhr die Hilfe und Unterstützung durch Spezialisten zu koordinieren.“ (Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) (2014a))

Die Organisation ermittelt Hintergrundinformationen über die Unfallursache und bewertet den Unfallhergang. Außerdem koordiniert die IAEO notwendige Krisenmechanismen einschließlich der medizinischen Behandlung und der Dosisrekonstruktion, sowie die öffentliche Kommunikation. Anschließend teilt die IAEO die gewonnenen Erkenntnisse mit nationalen Behörden und Organisationen, die für den Strahlenschutz zuständig sind (Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) (2012)).

Laut IAEO gab es in der Vergangenheit weltweit zivile Strahlenunfälle durch falschen Umgang oder durch unbefugte Entwendung radioaktiver Präparate, bei denen es zu erheblicher Kontamination und damit verbundenen Folgen für Umwelt und Gesundheit kam. Solche radiologische Unfälle ereigneten sich beispielsweise im Jahr 2000 in Samut Prakarn (Thailand), 1998 in Istanbul (Türkei), 1994 in Tammiku (Estland) oder 1987 in Goiânia (Brasilien). Ebenfalls wird von radiologischen Unfällen berichtet, die durch Defekte an industriell eingesetzten Strahlenquellen ausgelöst wurden, wie beispielsweise im Jahr 2005 in Nueva Aldea (Chile), 2002 in Cochabamba (Bolivien), 1999 in Yanango (Peru) oder 1996 in Gilan (Iran).

(Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) (2012))

Zudem stellen terroristisch motivierte Anschläge, bei denen konventionelle Sprengsätze mit radioaktiver Beiladung benutzt werden, eine ernsthafte Bedrohung für die Bevölkerung dar. Durch die Explosion wird radioaktives Material weiträumig in der Umgebung verteilt und damit die Umwelt und Personen mit radioaktivem Material kontaminiert.

Bei einem radiologischen Unfall ist es für die medizinische Erstversorgung wichtig, die Strahlendosis einer exponierten Person zu bestimmen, um im Bedarfsfall eine sofortige medizinische Behandlungen einleiten zu können (Del Rosario Perez et al. (2010); Rojas Palma C. [edit.], et al. (2009)). Dabei ist vom medizinischen Gesichtspunkt aus der Dosisbereich zwischen 1 und 6 Gy von Relevanz, um Strahlensyndrome zu prognostizieren und die Therapiewahl für einen Patienten festlegen zu können (Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (2014a)).

Da Menschen in der Regel kein Personendosimeter bei sich tragen, wird mithilfe existierender Techniken der retrospektiven Dosimetrie die Strahlungsdosis bestimmt. Es gibt sowohl biologische Techniken (Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) (2001)), wie die Analyse von Mikrozellkernen oder die Analyse von Chromosomenschäden auf DNA-Ebene (dizentrische Chromosomenanalyse), als auch physikalische Verfahren, wie die Elektronenspinresonanz oder die thermisch und optisch stimulierte Lumineszenz (International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) (2002)).

Jede Technik der retrospektiven Dosimetrie besitzt unterschiedliche Eigenschaften und damit verbundene Vor- und Nachteile. Dazu gehören beispielsweise die Möglichkeit zur Automatisierung, die Limitierung des Zeitintervalls nach der Exposition und der gesamte Zeitaufwand zur Bestimmung der Dosis (Ainsbury et al. (2011)).

Die retrospektiven Methoden werden stetig weiterentwickelt und sind besonders nützlich, da sie das Potential besitzen, wichtige Daten für die Dosisrekonstruktion in Gebieten und Orten bereitzustellen, an denen Strahlenüberwachungsmessungen nicht vorhanden sind. Durch die integrierte absorbierte Dosis ermöglichen sie nach einem radiologischen Unfall die Messung und Bewertung einer Ortsdosis, die beispielsweise aus Baumaterialien wie Ziegel und Keramiken aus Gebäuden bestimmt werden kann.

Um die Höhe der individuellen Strahlenexposition abschätzen zu können, wird die physikalische Dosimetrie an persönlichen, am Körper getragenen Gegenständen durchgeführt, die sich als sogenannte retrospektive Notfalldosimeter eignen. Mithilfe dieser kann die Strahlendosis physikalisch ermittelt werden und muss dadurch nicht allein am klinischen Erkrankungsbild des Unfallopfers abgeschätzt werden (Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (2014b)). Damit wird eine Entscheidungshilfe für das medizinische Strahlenunfallmanagement geschaffen.

Die Strahlenexposition nach einem radiologischen Massenunfall kann von sehr niedrig bis lebensbedrohlich reichen. Für die Durchführung einer Triage mit einer sehr hohen Anzahl von Opfern geraten die Messkapazitäten der einzelnen nationalen Dosimetrielabore an ihre Grenzen. Deshalb gewinnt die internationale Vernetzung von Laboren an Bedeutung, um in einem radiologischen Notfall Messkapazitäten zu bündeln und die Effizienz zu erhöhen.

Diese Problematik wurde erstmals in dem EU Sicherheitsprojekt MULTIBIODOSE¹ aufgegriffen, in dem eine Reihe physikalischer und biodosimetrischer Werkzeuge entwickelt, angepasst und für die Dosisabschätzung in einem Massenunfall geprüft wurde. Das Hauptziel

¹Das Akronym MULTIBIODOSE steht für engl. Multi-disciplinary biodosimetric tools to manage high scale radiological casualties (www.multibiodose.eu).

war es, sowohl die Geschwindigkeit der Analyse als auch die Gesamtkapazität der beteiligten europäischen Dosimetrielabore zu optimieren. Während des Projektes wurde ein Leitfaden für Behörden des Strahlen- und Notfallschutzes als Informationsquelle über die Möglichkeiten und Limitierungen der dosimetrischen Triagemöglichkeiten entwickelt. (Jaworska et al. (2014)).

Diese Maßnahmen wurden von dem EU Projekt RENE^B² weiterverfolgt, das bis Ende des Jahres 2015 läuft. Das Ziel dieses Projektes ist eine nachhaltige Etablierung eines europäischen Netzwerks der physikalischen und biologischen Dosimetrie mit Laboren und Organisationen aus 16 Ländern, „um das Europäische Notfallmanagement bei Strahlenunfällen so schnell und effektiv wie möglich zu unterstützen“ (Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (2014c)).

1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung und praktische Untersuchung eines körpernah getragenen Gegenstands wie das Mobiltelefon als Notfalldosimeter. Im Fokus dieser Arbeit stehen die Untersuchungen der Displaygläser von Mobiltelefonen zur Ergänzung etablierter retrospektiver Dosisbestimmungsmethoden. Durch ein realistisches Feldexperiment soll die Verwendung des Mobiltelefons als Notfalldosimeter und die durch Laborbestrahlungen getestete Methode verifiziert werden.

In dieser Arbeit werden zunächst die theoretischen Grundlagen der Lumineszenzdosimetrie, sowie die Voraussetzungen für Notfalldosimeter analysiert und vorgestellt. Weiter werden die Messinstrumente und Bestrahlungsquellen beschrieben, die für Experimente und Untersuchungen verwendet wurden. Diese Experimente zur Charakterisierung eines Notfalldosimeters werden im weiteren Verlauf erläutert. Darauf aufbauend werden theoretische Simulationen zur Strahlentransportrechnung für die hier vorliegenden komplexen Geometrien durchgeführt. Die praktische Anwendbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse wurden in einem Feldexperiment getestet, welches gleichfalls durch entsprechende Strahlentransportrechnungen für die Abschirmungen ergänzt wurde. Zuletzt werden die Ergebnisse zusammengefasst und Schlussfolgerungen gezogen.

²Das Akronym RENE^B steht für engl. Realizing the European Network of Biodosimetry (www.reneb.eu).

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Grundlagen der Lumineszenzdosimetrie

In diesem Kapitel werden die physikalischen Grundlagen der Lumineszenzdosimetrie behandelt. Weiter werden die Voraussetzungen und dosimetrischen Eigenschaften von Notfalldosimetern in Kapitel 2.3 beleuchtet.

2.1.1 Lumineszenz im Allgemeinen

Manche Festkörper besitzen die Eigenschaft, einen Teil der Anregungsenergie ionisierender Strahlung zu speichern und diese Energie als Lichtemission wieder abzugeben. Die durch Energiezufuhr verursachte Emission wird dem physikalischen Phänomen der Lumineszenz zugeschrieben (Riehl (1971), Seite 1). Die emittierte Energie ist charakteristisch für das absorbierende Material und hängt nicht von der Bestrahlungsart ab. Die Emission kann dabei im infraroten, im sichtbaren und im ultravioletten Bereich des Frequenzspektrums stattfinden. In Tabelle 2.1 wird eine allgemeine Typisierung der Lumineszenz¹ aufgezeigt (McKeever (1985), Seite 2 f.).

Name	Anregungsart
Radiolumineszenz ¹	Absorption von α -Strahlung, β -Strahlung, γ -Strahlung bzw. Röntgenstrahlung
Photolumineszenz	Absorption von Licht (z.B. UV Strahlung)
Kathodolumineszenz	Elektronenstrahl (z.B. Anregung der Leuchtschicht einer Braunschen Röhre)
Tribolumineszenz	mechanische Energie (z.B. durch Reibung)
Elektrolumineszenz	Zufuhr von elektrischer Energie (in einem E-Feld)
Bio-/Chemolumineszenz	Zufuhr von biologischer/chemischer Energie
Sonolumineszenz	Schallwellen

Tabelle 2.1: Unterschiedliche Anregungsarten der Lumineszenz.

¹Der Begriff Radiolumineszenz wird in der Literatur seit jüngerer Zeit auch für die während der Bestrahlung auftretende Lumineszenz verwendet (Yukihara und McKeever (2011), Seite 4).

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit ist die Anregung durch ionisierende Strahlung relevant, da die Anregung durch Absorption von β -Strahlung, γ -Strahlung bzw. Röntgenstrahlung geschieht.

Eine allgemeine Unterteilung der Lumineszenz wird in McKeever (1985) anhand der charakteristischen Zeit τ_c aufgezeigt, welche die Zeit zwischen Anregung und Auftreten der Lumineszenz ist. Es wird zwischen Fluoreszenz und Phosphoreszenz unterschieden. Als Fluoreszenz wird ein spontaner Prozess mit $\tau_c < 10^{-8}$ s bezeichnet, der fast simultan zur Absorption geschieht und unabhängig von der Temperatur ist. Als Phosphoreszenz hingegen wird ein zeitlich verzögerter Prozess bezeichnet, der stark temperaturabhängig ist und in einer feineren Unterteilung in Short-Period ($10^{-8} < \tau_c < 10^{-4}$ s) und Long-Period ($\tau_c > 10^{-4}$ s) gegliedert ist. Die Lumineszenz, die für die Dosimetrie von Bedeutung ist, lässt sich wegen der relativ großen charakteristischen Zeit τ_c in der Long-Period der Phosphoreszenz einordnen, da sich die Zeitspanne zwischen wenigen Minuten und Jahrmilliarden belaufen kann (McKeever (1985), Seite 3).

2.1.2 Methodik und Anwendungen der stimulierten Lumineszenz

Durch entsprechende Energiezufuhr wird für geeignete Materialien die Lumineszenz ausgelöst. Dies kann sowohl optisch, als auch thermisch erfolgen. Je nach Methode bezeichnet man die Stimulation basierend auf der Art der Energiezufuhr thermische (stimulierte) Lumineszenz (TL)² oder optisch stimulierte Lumineszenz (OSL).

Die ersten Untersuchungen an lumineszierenden Materialien wurden Mitte des 20. Jahrhunderts anhand der Thermolumineszenz-Methode für dosimetrische Anwendungen durchgeführt (McKeever und Moscovitch (2003)). Bei der Thermolumineszenz wird die Emission von Licht eines Festkörpers durch Erhitzen der Probe thermisch ausgelöst. Bei diesem Stimulationsprozess wird zusätzlich Wärmestrahlung durch das Erhitzen des Probematerials emittiert, die mit dem Planckschen Strahlungsgesetz beschrieben wird. Die Wärmestrahlung wird als thermischer Hintergrund bezeichnet und von der eigentlichen Thermolumineszenzmessung abgezogen. Deshalb wird nach jeder TL-Messung eine zweite Messung für die Bestimmung des thermischen Hintergrunds durchgeführt. Aus der Differenz der beiden Messungen lässt sich das tatsächliche durch Strahlung induzierte TL-Signal berechnen. Die Thermolumineszenz kann, nach vorheriger Anregung, nur einmalig ausgelöst werden. Das bedeutet, dass das Material nach einer TL-Messung nicht erneut Licht emittieren kann, beispielsweise indem man es abkühlen lässt und es später wieder erhitzen würde (Chen und McKeever (1997), Seite 3).

Ein Vorteil der Thermolumineszenz-Methode ist die generierte Ausleuchtcurve (engl. glow curve) bei der TL-Messung, die als eine Art Qualitätssicherung und Kontrolle herangezogen werden kann, um eine eventuelle Fehlfunktion des Auslesegeräts oder des Dosimeters zu identifizieren (McKeever und Moscovitch (2003)). Ebenfalls können anhand der Ausleuchtcurve zusätzliche Informationen über das Probematerial herausgelesen werden.

²Der korrekte Begriff thermisch stimulierte Lumineszenz hat sich in der Literatur nicht durchgesetzt. Stattdessen hat sich die verkürzte Bezeichnung Thermolumineszenz eingebürgert. Die Bezeichnung ist strenggenommen nicht korrekt, da nicht die Anregung, sondern die Stimulation der Lumineszenz thermisch erfolgt. Dennoch wird in dieser Arbeit die übliche Bezeichnung Thermolumineszenz übernommen.

Die zweite Methode zur Auslösung der Lumineszenz ist die optische Stimulation der Probe. Der Ursprung der dosimetrischen Anwendung reicht in die Mitte der fünfziger und sechziger Jahre zurück (McKeever und Moscovitch (2003)). In Tabelle 2.2 sind die Methoden aufgeführt, die sich prinzipiell durch die Frequenz der von außen zugeführten, stimulierenden Strahlung unterscheiden, um die Lumineszenz auszulösen.

Methode	Stimulationsart
Optisch stimulierte Lumineszenz (OSL)	Licht aus dem sichtbaren Bereich des Spektrums (blau, grün)
Infrarot stimulierte Lumineszenz (IRSL)	infrarotes Licht

Tabelle 2.2: Licht-induzierte Stimulationsverfahren für die Lumineszenz-Untersuchung.

Der Vorteil der OSL-Methode im Vergleich zur TL-Methode ist die relativ schnelle Auslesegeschwindigkeit, welche das Auslesen vor allem bei einer großen Anzahl anfallender Dosimeter deutlich beschleunigt. Da das Material nicht erhitzt werden muss, ist die Methode mit geringerem Energieaufwand verbunden. Dies besitzt den weiteren Vorteil, dass das zu untersuchende Material durch die Hitzeeinwirkung nicht verändert oder irreversibel zerstört werden kann. Die Ausleseparameter einer OSL-Untersuchung können so gewählt werden, dass das Signal nicht vollständig ausgelesen wird, um gegebenenfalls eine spätere OSL-Messung an derselben Probe mit angepasster Stimulationsstärke durchzuführen (McKeever und Moscovitch (2003)). Eine Schwierigkeit der OSL-Methode ist jedoch die Trennung des eigentlichen Lumineszenzsignals von der optischen Anregung. Dies wird mit ausgewählten optischen Filtern bewerkstelligt, die jedoch das messbare OSL-Emissionsspektrum wiederum einschränken.

Die beiden vorgestellten Lumineszenzmethoden werden in vielen wissenschaftlichen Disziplinen, wie der Archäologie, Geologie, Medizin, Festkörperphysik, Biologie oder Chemie, angewendet. Eine der Hauptanwendungen ist die Datierung von Proben, wie Sedimenten, Keramiken oder Gläsern. Strahlenschäden im Material werden auf natürliche Weise durch die kosmische Höhenstrahlung und natürliche Strahlung primordialer Radionuklide des Untergrunds (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K etc.) hervorgerufen (Hering (1999), Seite 78 f.). Die akkumulierte Dosis wird durch die Lumineszenzmethode bestimmt. Diese ermöglicht für kulturwissenschaftliche Untersuchungen die zeitliche Einordnung einer Probe in eine Kulturepoche (Aitken (1998), Seite 7). Zusätzlich ist die Methode auch ein fälschungssicheres Verfahren für die Echtheitsprüfung von Keramiken, Plastiken und anderen Kunstgegenständen (Hering (1999), Seite 80).

2.1.3 Beschreibung der Lumineszenz mit dem Bänder-Modell

Um die Vorgänge der Lumineszenz zu beschreiben, wird das Energie-Bändermodell eines Festkörpers herangezogen. Dieses aus der Festkörperphysik stammende Prinzip dient zur theoretischen Beschreibung elektronischer Energiezustände in einem idealen Einkristall. Dabei spalten sich die quantifizierten Energieniveaus der Elektronen eines einzelnen Atoms bei der Anordnung der Atome im Festkörper zu den sogenannten Energie-Bändern auf und es entsteht die typische Bandstruktur des Festkörpers (Gross und Marx (2004), Seite 279 ff.).

Das Modell wird anhand von vier unterschiedlichen Materialien (Halbleiter, Isolator, Metall und Halbmetall) in Abbildung 2.1.1 graphisch skizziert. Als Valenzband wird das oberste, besetzte Band, als Leitungsband wird hingegen das unterste, unbesetzte Band bezeichnet. Eine energetisch verbotene Zone befindet sich zwischen den beiden Energiebändern, die diese voneinander trennt und wird als Bandlücke E_{Gap} bezeichnet (Gross und Marx (2004), Seite 280).

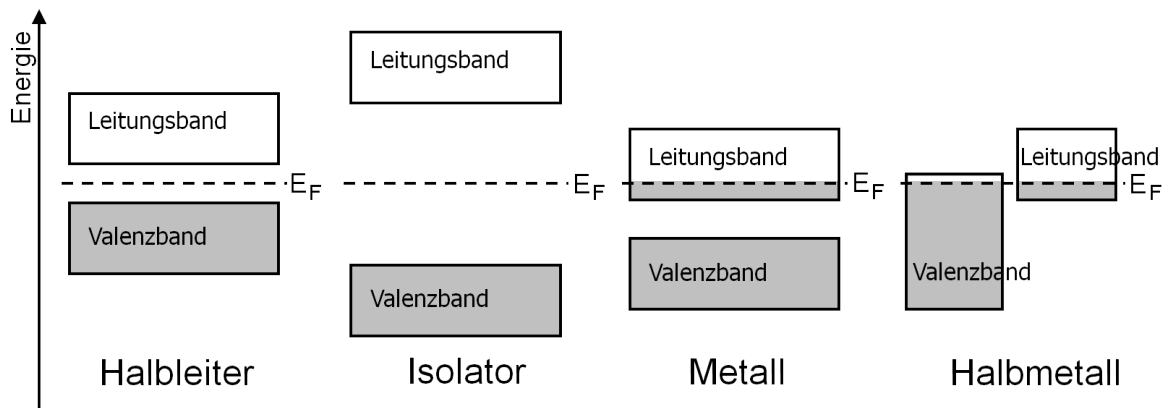


Abbildung 2.1.1: Energie-Bändermodell von Halbleiter, Isolator, Metall und Halbmetall mit eingezeichnetem Fermi-Niveau. Bei Isolatoren und Halbleitern befindet sich die Fermi-Energie E_F in der Bandlücke E_{Gap} zwischen Leitungsband und Valenzband (adaptiert aus Gross und Marx (2004), Seite 299).

Die Energiegröße der Bandlücke wird in der Regel in Elektronenvolt (eV) angegeben. Im Grundzustand am absoluten Temperaturnullpunkt $T = 0$ K sind die Elektronenzustände unter Berücksichtigung des Pauli-Prinzips bis zur Fermi-Energie E_F (auch Fermi-Niveaus genannt) aufgefüllt, welche als die höchste besetzte Energie bezeichnet wird. Die Fermi-Energie trennt die besetzten von den unbesetzten Elektronenzuständen. Die Lage der Fermi-Energie und die Größe der Bandlücke sind für die elektrischen und optischen Eigenschaften eines Festkörpers entscheidend. Dadurch lässt sich ein Festkörper grundsätzlich als Halbleiter, Isolator, Halbmetall oder Metall klassifizieren (Gross und Marx (2004), Seite 298 ff.).

Im Allgemeinen gehören die Materialien, die Lumineszenz aufweisen, zur Gruppe der Halbleiter und Isolatoren. Das Leitungsband (LB) ist unbesetzt, da die Fermi-Energie E_F oberhalb des besetzten Valenzbands (VB), aber innerhalb der Bandlücke liegt.

Wie anfangs erwähnt, beschreibt das Bändermodell einen idealen Kristall mit perfekter, periodischer Anordnung und unendlicher Ausdehnung. Das Modell kann auf reale Kristalle ausgedehnt werden, indem man das Modell leicht modifiziert.

Kristallfehler, die bei realen Kristallen vorkommen, wirken als Fallen bzw. Haftstellen (engl. traps) für freie Ladungsträger. Diese Fallen bilden im verbotenen Bereich der Bandlücke E_{Gap} zwischen Valenz- und Leitungsband zusätzliche energetische Zustände, die als metastabile Zustände bezeichnet werden. Sie dienen zur Ladungsspeicherung und sind für die Beschreibung der Lumineszenz von Bedeutung.

Gemäß McKinlay (1981) können die Defekte in drei Kategorien unterteilt werden:

- intrinsische oder thermische Defekte (Versetzungen der Gitterstruktur, Zwischengitteratome, Leerstellen³, etc.)
- extrinsische Defekte oder ersetzte Ionen (Verunreinigungen, Dotierung mit Fremdatomen, etc.)
- strahlenbedingte Defekte (Exposition mit hoher Strahlungs-dosis, etc.)

Eines der einfachsten Modelle zur Beschreibung der Lumineszenz ist das „eine Falle und ein Rekombinationszentrum Modell“. Es besteht aus einer einzigen Falle und einem dazugehörigen Rekombinationszentrum im verbotenen Bereich der Bandlücke. Dieses allgemeine Modell dient als Basis für Thermolumineszenz-Theorien und ist hilfreich bei der Interpretation vieler Lumineszenzbeobachtungen (Bos (2007)). In Abbildung 2.1.2 wird das Modell mit einer spezifischen Elektronenfalle N und einem dazugehörigen Rekombinationszentrum RZ (auch Aktivator-Term genannt (Chen und McKeever (1997), Seite 5) erklärt.

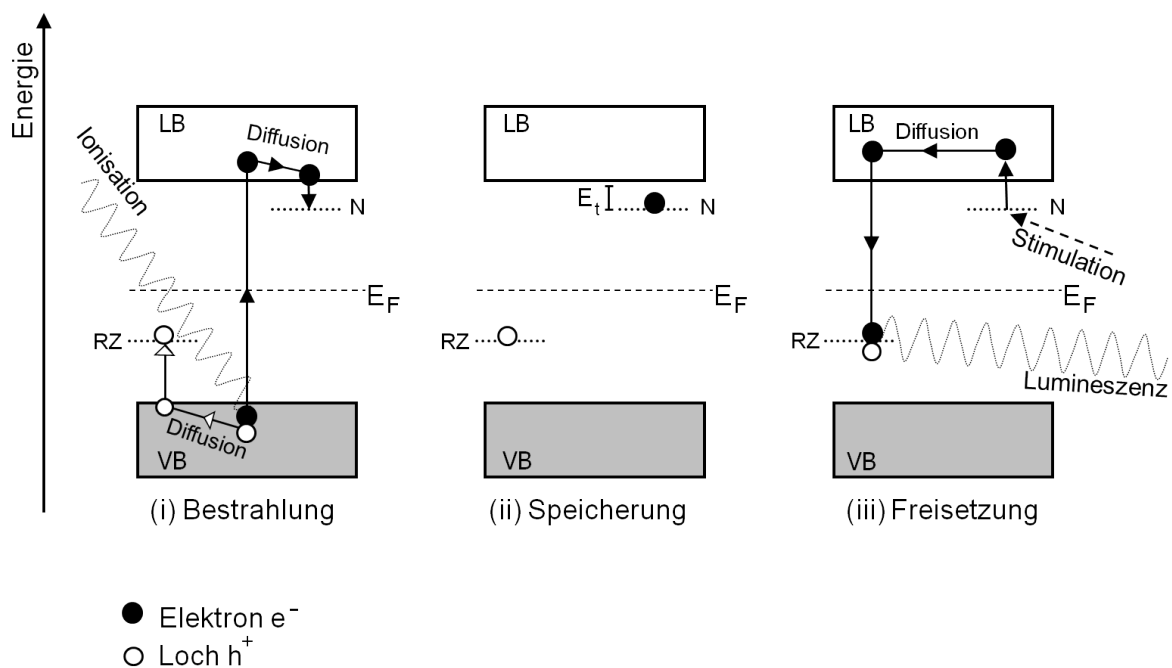


Abbildung 2.1.2: Gesamtprozess der Lumineszenz als einfaches Modell aufgeteilt in drei Stufen: (i) äußere Bestrahlung, (ii) Speicherung als metastabiler Zustand und (iii) Freisetzung aus der Falle. Die Abkürzung N bezeichnet eine Elektronenfalle der Energietiefe E_t , Fermi-Energie E_F und RZ ein Rekombinationszentrum (adaptiert aus Aitken (1998), Seite 14).

³Für die Leerstellen gibt es zusätzlich eine feinere Unterscheidung: Ist das Gitteratom anstatt auf seinem normalen Platz auf einem Zwischengitterplatz und eine Leerstelle bleibt übrig, so spricht man von einem *Frenkel-Defekt* (Gross und Marx (2004), Seite 27 ff.). Wenn der Gitterpunkt im Vorfeld unbesetzt ist, handelt es sich um einen *Schottky-Defekt* (ebd.).

In einem kristallinen Halbleiter oder Isolator befinden sich bei Raumtemperatur alle Elektronen im Grundzustand im Valenzband. Ein Elektron e^- wird durch Absorption von Strahlung bzw. eines Photons mit der Energie $E = h\nu > E_{\text{Gap}}$ angeregt und in das Leitungsband angehoben. Bei geladenen Teilchen geschieht die Abgabe der Energie, je nach Masse, Ladung und Energie des Teilchen, hauptsächlich über Anregung und Ionisation, bei Photonen hauptsächlich über den Photoeffekt, Comptonstreuung und Erzeugung von e^-e^+ Paaren (Yukihara und McKeever (2011), Seite 20 f.). Bei der Ionisation eines Elektrons e^- verbleibt ein freies positives Loch h^+ im Valenzband zurück. Dieses stellt ein fehlendes Elektron im Valenzband dar und wird als ein virtuelles, positives Teilchen bezeichnet. Um insgesamt die Ladungsneutralität zu bewahren, treten die Ladungsträger immer paarweise auf. Im Leitungsband kann sich das angeregte Elektron nach einem Thermalisierungsprozess diffusiv bewegen. Analog gilt das für das Loch h^+ im Valenzband.

Im einfachsten Fall können die generierten Ladungsträger innerhalb kürzester Zeit wieder direkt (sog. Band-zu-Band Rekombination) oder indirekt (sog. Band-zu-Bandmitte Rekombination) unter Berücksichtigung und Einhaltung von Energie und Impulserhaltung rekombinieren. Dabei unterscheidet man zwischen strahlender und nichtstrahlender Rekombination. Bei der strahlenden Rekombination wird ein Photon emittiert, im Gegensatz zur nichtstrahlenden Rekombination, bei der ein oder mehrere Phononen (Gitterschwingungen) emittiert werden (McKeever (1985), Seite 32 ff.).

Eine Elektronenfalle N mit einer bestimmten Energietiefe E_t wird durch intrinsische bzw. extrinsische Defekte gebildet und ist anziehend für Elektronen, da sie sich nahe unterhalb des Leitungsbandes befindet⁴. Sobald das Elektron sich dieser Falle nähert, wird es dort eingefangen und verweilt im metastabilen Zustand für eine mittlere Zeit τ . Dabei können laut Pauli-Prinzip aufgrund des Elektronenspins maximal zwei Elektronen einen solchen Energiezustand besetzen (Aitken (1998), Seite 15). Analog wird auch das Loch im Rekombinationszentrum⁵ RZ eingefangen. Da sich die Fermi-Energie E_F unterhalb des Energieniveaus der Falle und oberhalb des Rekombinationszentrums befindet, stellen die gefangenen Ladungsträger einen Ungleichgewichtszustand dar (Bos (2007)).

Die Wahrscheinlichkeit für einen Ladungsträger aus dem metastabilen Zustand in den Grundzustand überzugehen wird mit der Arrhenius Gleichung beschrieben. Sie bestimmt die Wahrscheinlichkeit $p(T)$ pro Zeiteinheit in Abhängigkeit der Temperatur T (Randall und Wilkins (1945)):

$$p(T) = s \cdot \exp\left[-\frac{E_t}{k_B \cdot T}\right]. \quad (2.1.1)$$

Dabei bezeichnet E_t die Energietiefe (eV) der Falle, k_B die Boltzmann-Konstante ($8,617 \cdot 10^{-5}$ eV/K), T die absolute Temperatur (K) und s den Frequenzfaktor (Hz). Im einfachen Model ist der Frequenzfaktor konstant und steht im Zusammenhang mit der lokalen Gitterschwingungsfrequenz in der Größenordnung $10^{12} - 10^{14}$ Hz (Bos (2007)). Anschaulich gibt der Frequenzfaktor s die Anzahl der Versuche eines gefangenen Elektrons pro Sekunde an,

⁴Man bezeichnet einen Defekt als Falle, der oberhalb der Fermi-Energie E_F liegt, im Grundzustand leer ist und dadurch eine potenzielle Elektronenfalle darstellt (McKeever (1985), Seite 41).

⁵Als Rekombinationszentrum wird ein Defekt bezeichnet, der unterhalb der Fermi-Energie E_F liegt, im Grundzustand mit Elektronen aufgefüllt ist und dadurch eine potenzielle Lochfalle darstellt (McKeever (1985), Seite 41).

2.2. Voraussetzungen und dosimetrische Eigenschaften von Notfalldosimetern 11

um mithilfe eines Phonons (Gitterschwingung) aus der Falle zu entkommen. Die mittlere Verweilzeit $\tau(T)$ eines in der Falle gefangenen Ladungsträgers lässt sich aus dem Kehrwert der Wahrscheinlichkeit $p(T)$ berechnen (McKeever (1985), Seite 42):

$$\tau(T) = p(T)^{-1}. \quad (2.1.2)$$

Um das eingefangene Elektron aus der Falle durch Stimulation zu befreien, muss Energie entweder in Form von Licht bei der OSL-Methode oder durch Wärme bei der TL-Methode zugeführt werden. Dabei muss der Betrag der zugeführten Anregungsenergie mindestens dem energetischen Abstand der Falle zum Leitungsband entsprechen, um das in der Falle befindliche Elektron zurück in das Leitungsband anzuregen.

Anschließend kann das Elektron mit dem Loch h^+ im Rekombinationszentrum RZ unter Einhaltung von Energie- und Impulserhaltung rekombinieren. Diese Rückkehr in den Grundzustand ist mit der Emission von Lichtquanten gekoppelt (Bos (2007)). Die Intensität der Photonenemission und damit das Lumineszenzsignal ist proportional zur Anzahl der gefangenen Elektronen und damit proportional zur absorbierten Dosis. Diese Eigenschaft macht man sich in der Dosimetrie zu nutze.

Das einfache Lumineszenz-Modell „eine Falle und ein Rekombinationszentrum“ bezieht Effekte nicht mit ein, die bei einer realen Lumineszenzmessung vorkommen. Aufgrund von Abweichungen der Kristallgitterperiodizität im Vergleich zu einem perfekten Kristallgitter gibt es in der Realität zusätzlich eine Vielzahl von Fallen mit unterschiedlichen Energieniveaus. Aufgrund von Oberflächen können ebenfalls Fallen entstehen, da diese eine Unterbrechung des periodischen Potenzials bewirken und somit die Anzahl der Fallen innerhalb des verbotenen Energiebereichs erhöht werden kann (McKeever (1985), Seite 23). Weiter ist das Schema der Energie-Bänder eines kristallinen Festkörpers ein anschauliches Hilfsmodell für das Verständnis des Lumineszenzphänomens. Jedoch sind komplexe Mechanismen zur Lumineszenzbeschreibung im Detail noch nicht gut genug verstanden und untersucht (Aitken (1998), Seite 15).

2.2 Voraussetzungen und dosimetrische Eigenschaften von Notfalldosimetern

Die generellen Voraussetzungen für die Eignung von Komponenten für die Notfalldosimetrie werden in diesem Kapitel vorgestellt. Abbildung 2.2.1 erläutert die Voraussetzungen für Notfalldosimeter.

Die Grundvoraussetzung für die Materialkomponente, die als Notfalldosimeter herangezogen werden kann, ist die Klassifizierung des Festkörpermaterials als Halbleiter oder Isolator. Der Grund liegt in der Energie-Bandstruktur eines Festkörpers zur Speicherung der Dosisinformation (siehe Kapitel 2.1.3).

Ein potenzielles Notfalldosimeter sollte von einem Großteil der Bevölkerung im täglichen Leben bei sich getragen werden (sog. Allgegenwärtigkeit). Weiter sollte ionisierende Strahlung ein messbares Signal im Material bewirken, das eindeutig und reproduzierbar mit der Strahlenexposition zusammenhängt.

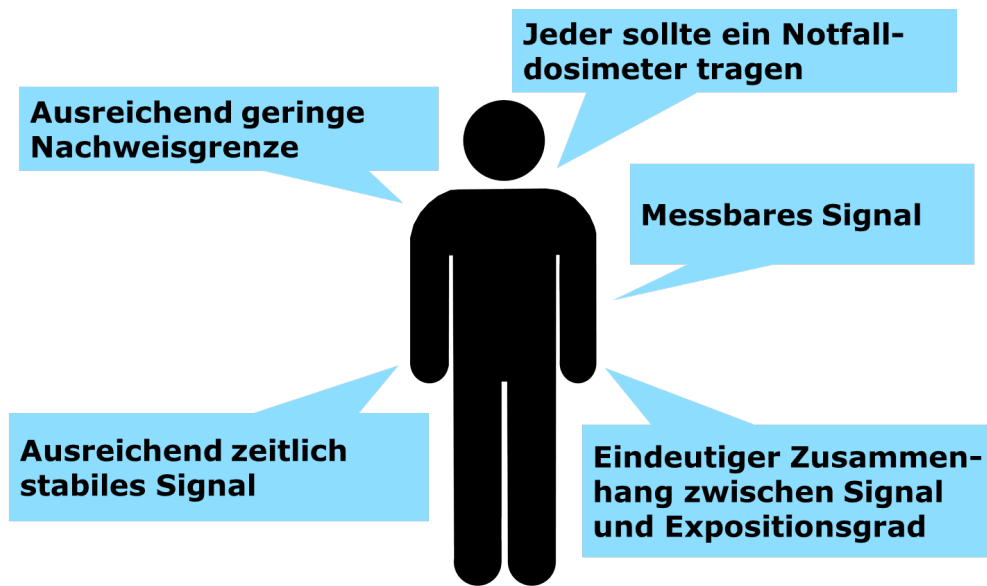


Abbildung 2.2.1: Grafische Darstellung der Voraussetzungen für Notfalldosimeter (eigene Darstellung).

Ein Teil der während der Exposition von radioaktiver Strahlung absorbierten Energie muss im Material für eine bestimmte Zeit gespeichert bleiben (Bos (2007)). Das bedeutet, dass ein messbares Signal hinreichend zeitlich stabil sein muss, um nach einem Strahlenunfall die Dosisinformation in einem Zeitraum von einigen Wochen bis zu mehreren Monaten auslesen zu können. Treten Instabilitäten auf, so muss der Zusammenhang zwischen Signalabnahme und Zeitdauer seit der Exposition quantifizierbar sein, um eine entsprechende Dosisrekonstruktion durchführen zu können.

Die Auslesemethode sollte eine ausreichend geringe Nachweisgrenze besitzen und einen ausreichenden dynamischen Dosisbereich abdecken, um einerseits Dosen für stochastische Strahlenspätfolgen (0,1-2 Gy) und andererseits Dosen für deterministische Gesundheitseffekte (2-10 Gy) quantifizieren zu können. Wünschenswert ist beispielsweise ein linearer Zusammenhang zwischen absorbierter Dosis und Signal im Dosisbereich von einigen mGy bis zu 10 Gy. Um diese Voraussetzungen für ein Material zu überprüfen, müssen dosimetrische Eigenschaften des Signals untersucht und evaluiert werden. Diese materialspezifischen Eigenschaften lauten:

- Untersuchung des dosisinduzierten Signals, wie beispielsweise Besonderheiten der Signalform
- Untersuchung eines möglichen Hintergrundsignals, des sogenannten Nulldosissignals
- Untersuchung der optischen Stabilität des Signals
- Untersuchung der Langzeitstabilität des Signals
- Untersuchung des Dosisansprechverhaltens (Korrelation zwischen Signal und Strahlenexposition)

- Untersuchung der Reproduzierbarkeit des Signals
- Untersuchung der Dosis-Nachweisgrenze der Methode
- Untersuchung von Photonenenergie- und Winkelabhängigkeit eines Notfalldosimeters

Nach der Untersuchung der dosimetrischen Eigenschaften von Notfalldosimetermaterialien kann ein Messprotokoll entwickelt werden, um eine unbekannte Unfalldosis (Expositionsdosis) einer exponierten Probe zu bestimmen.

2.3 Vorstellung potenzieller Notfalldosimeter

Vorausgegangene Untersuchungen haben gezeigt, dass für die Dosisbestimmung im Falle eines Unfalls mit ionisierender Strahlung auf unterschiedliche persönliche Gegenstände als Notfalldosimeter zurückgegriffen werden kann. Damit ist es möglich, die Strahlenexposition einer Person zu bestimmen, falls kein Personendosimeter vorhanden ist. In den folgenden Kapiteln werden anhand der durchgeführten Literaturrecherche dosimetrische Eigenschaften und entwickelte Messprotokolle vorgestellt, die stark vom jeweiligen Material abhängen, welches zur Dosisrekonstruktion benutzt wird. Diese Untersuchungen stammen aus unterschiedlichen internationalen Lumineszenzlaboren.

2.3.1 Chipkarten

Frühere Untersuchungen haben Chipkarten als Notfalldosimeter identifiziert (Pascu et al. (2013); Pradhan et al. (2013); Wiegand (2012); Woda et al. (2012); Cauwels et al. (2010); Woda und Spöttl (2009); Göksu (2003)).

In Woda und Spöttl (2009) wurden die dosimetrischen Eigenschaften kontaktbehafteter Chipkarten-Module des Herstellers Infineon Technologies AG im Detail untersucht. Ein Messprotokoll wurde vorgestellt, um die höchste Strahlenempfindlichkeit und das niedrigste Nulldosissignal bei gleichzeitiger Verringerung der Nachweisgrenze zu erhalten. Das SAR (Single-Aliquot Regeneration) Protokoll mit Testdosisnormierung wird bei einer OSL-Messung bei Raumtemperatur für 300 s ohne Vorheizvorbehandlung angewendet. Bei einer Vielzahl beliebiger Chipkarten mit unterschiedlichen Modultypen, wie Bank-, Krankenversicherungs-, Kredit- und SIM-Karten, ergaben weiterführende Untersuchungen, dass mehr als 60 % der untersuchten Chips eine transparente Umhüllung mit günstigen dosimetrischen Eigenschaften aufwiesen. Für eine Messung unmittelbar nach der Bestrahlung wird eine Nachweisgrenze zwischen 3-20 mGy abgeschätzt. Eine Variabilität in der Fadingrate wird auf ca. 28 % im 95 % Vertrauensintervall ermittelt.

Ein Zwei-Stufen-Ausleseprotokoll wurde getestet, in dem innerhalb einer Messzeit von drei Minuten eine erste grobe Abschätzung der Dosis bestimmt wird. Anschließend kann ein zweites, ausführliches Protokoll für eine genauere Dosisabschätzung mit derselben Probe durchgeführt werden. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass eine beliebige Chipkarte mit einer transparenten Umhüllung möglicherweise für die Notfalldosimetrie nach einem radiologischen Unfall mit ausreichender Genauigkeit und als schnelle Triagemethode verwendet werden kann.



Abbildung 2.3.1: Vorstellung der wichtigsten Notfalldosimeter, die im Lumineszenzlabor des Helmholtz Zentrums München untersucht werden.

2.3.2 Elektronische Bauteile auf einer Platine

Widerstände, die auf der Platine eines Mobiltelefons angebracht sind, zeigen gute dosimetrische Eigenschaften. Untersuchungen wurden von vielen Laboren durchgeführt (Bassinnet et al. (2014a); Mrozik et al. (2014a); Pascu et al. (2013); Pradhan et al. (2013); Ekendahl und Judas (2012); Fiedler und Woda (2011); Bassinet et al. (2010a); Inrig et al. (2010); Beerten et al. (2009); Inrig et al. (2008)). Der Keramikkörper aus Al_2O_3 , aus dem ein Widerstand hauptsächlich besteht, wird mit zwei OSL-Messprotokollen ausgelesen, die innerhalb des in der Einleitung erwähnten FP7-Projektes MULTIBIDOSE entwickelt und optimiert wurden. Die Messprotokolle sind entweder auf Genauigkeit oder auf schnelle Auslesegeschwindigkeit optimiert, um den Probendurchsatz zu erhöhen. Im schnellen Protokoll werden Messungen bei Raumtemperatur und ohne Vorheizen durchgeführt. Dagegen werden die Proben im vollständigen Protokoll für 10 s bei 120°C vorgeheizt und die Messungen bei 100°C durchgeführt. Bei beiden Messprotokollen ist eine kurze OSL-Messung von 30 s mit einer einzigen Kalibrationsdosis von 5 Gy integriert.

Das OSL-Signal der Widerstände weist ein ausgeprägtes Signalfading in Abhängigkeit der La-

gerungszeit auf, weshalb eine Korrektur notwendig ist. Die Variabilität der Fadingrate wurde für über 60 verschiedene Mobiltelefone und ebenfalls für beide vorgestellte Messprotokolle untersucht. In der Unsicherheit der Dosisabschätzung ist die Variabilität der bedeutendste Faktor und beträgt etwa 20 % für das vollständige bzw. 40 % für das schnelle Protokoll. Beide Protokolle sind durch einen internen Blindtest unter den Projektpartnern und einen Ringversuch durch das EURADOS Netzwerk (www.eurados.org), bestehend aus 11 europäischen und einem US Labor, validiert worden (Bassinet et al. (2014a)).

2.3.3 Displayglas

In den letzten Jahrzehnten wurden kommerzielle Gläser, Natron-Kalkgläser, Gläser von Armbanduhren und Touchscreengläser mit Thermolumineszenz und Elektronenspinresonanz (ESR) Methoden untersucht (Fattibene et al. (2014); Marrale et al. (2012a,b); Moffatt et al. (2012); Longo et al. (2012); Bartolotta et al. (2011); Narayan et al. (2008); Teixeira et al. (2008); Wu et al. (1998, 1995)).

Displaygläser von Mobiltelefonen wurden ebenfalls erforscht (Bassinet et al. (2014b); Mrozik et al. (2014b); Trompier et al. (2011); Bassinet et al. (2010b)).

Speziell die dosimetrischen Eigenschaften wurden in der Diplomarbeit (Discher (2011)) und der daraus resultierenden Veröffentlichung (Discher und Woda (2013)) im Detail untersucht. Das Display eines Mobiltelefons ist aus zwei Glasplatten aufgebaut, die sensitiv zu ionisierender Strahlung sind. Die absorbierte Dosis im Material wird mithilfe einer TL-Messung bestimmt. Bei jeder Glasprobe ist vor einer Bestrahlung ein intrinsisches Nullsignal vorhanden, das nicht optisch bleichbar ist und sich nach einer Messung nicht reproduzieren lässt. In der Untersuchung von über 80 unterschiedlichen Gläsern zeigte sich, dass das hintere Displayglas ein Nullsignal mit geringerer Intensität als das vordere Glas besitzt und sich somit besser für die Dosisbestimmung eignet.

Eine Kategorisierung der über 80 untersuchten Displaygläser von unterschiedlichen Mobiltelefonen kann anhand der charakteristischen Form der strahleninduzierten TL-Ausleuchtcurve, gemessen im blauen Detektionsfenster, durchgeführt werden. Glaskategorie A zeigt eine symmetrische TL-Kurve mit einer Peaktemperatur von ca. 200°C (siehe Abbildung 2.3.2a). Glaskategorie B weist eine asymmetrische TL-Kurve mit einer Peaktemperatur von ca. 100°C auf. Glaskategorie C zeigt eine sehr breite TL-Kurve mit Peaktemperaturen von über 200°C und Glas der Kategorie D, das nur bei alten, monochromatischen Displays entdeckt wurde, weist eine sehr geringe Strahlensensitivität auf.

Vorläufige ESR Messungen von Displaygläsern aus den vier Kategorien lassen einen möglichen Rückschluss auf die chemische Zusammensetzung der Gläser zu (Wieser (2013), pers. Kommunikation). Glasproben der Kategorie A werden als Kalk-Aluminiumsilikatgläser, Glasproben der Kategorien B und C als Borosilikatgläser und Glasproben der Kategorie D als Natron-Kalkgläser klassifiziert. Für die weiteren Untersuchungen wurden Displaygläser der Kategorien A und C aufgrund der günstigen dosimetrischen Eigenschaften im Detail weiterverfolgt.

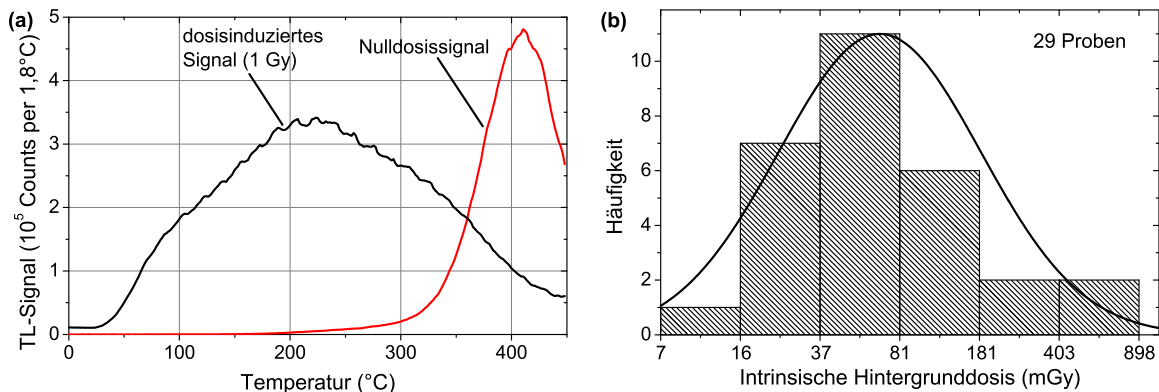


Abbildung 2.3.2: (a) Exemplarische Messung des Nulldosissignals (rote Linie) im Vergleich mit dem dosisinduzierten TL-Signal von 1 Gy (schwarze Linie) gemessen an einem Glas der Kategorie A. Das Nulldosissignal limitiert den Integrationsbereich zu hohen Temperaturen für die Dosisbestimmung. (b) Histogramm der Hintergrunddosis von 29 unterschiedlichen Glasproben der Glaskategorie A, gemessen mit dem Protokoll „500 s Vorbleichen mit blauen LEDs“. Aus der angepassten log-normalen Verteilung wird die Nachweisgrenze auf 340 mGy berechnet (adaptiert aus Discher und Woda (2013)).

Das Signal ist zeitlich nicht stabil, was zur Folge hat, dass das Signalfading mit einer Fadingkurve für Displayglas korrigiert werden muss. Für die Dosisbestimmung ist deshalb die Kenntnis der Expositionszeit zur Korrektur des Fadings von Bedeutung. Ebenfalls ist das Signal optisch bleichbar. Aufgrund der technischen Funktion sind Displaygläser dem Licht ausgesetzt, wie zum Beispiel der Hintergrundbeleuchtung des Displaybildschirms oder auch externen Lichtquellen, wie Sonnen- bzw. Umgebungslicht. Dies muss für die Entwicklung eines geeigneten Messprotokolls zur Dosisbestimmung berücksichtigt werden, da in einem Notfall die Kenntnis des Bleichgrades eines Displays unbekannt ist.

Das Messprotokoll „500 s Vorbleichen mit blauen LEDs“ hat sich als ein geeignetes Protokoll herausgestellt, um die Dosimetrie am schwer bleichbaren Restsignal des TL-Signals durchzuführen. Das Bleichen hat den zusätzlichen Effekt, dass im Vergleich zu einer unbehandelten Probe ein stabileres TL-Signal isoliert wird.

Für die Dosisbestimmung wird nicht die ganze TL-Leuchtkurve, sondern ein optimierter Temperaturbereich herangezogen. Der Temperaturbereich zwischen 100-250°C hat sich als geeigneter Integrationsbereich erwiesen, da unter 100°C das Signalfading deutlich ins Gewicht fällt und oberhalb von 250°C das Nulldosissignal stark an Einfluss gewinnt.

Die Nachweisgrenze der Methode unmittelbar nach Bestrahlung wurde mit dem Messprotokoll „500 s Vorbleichen mit blauen LEDs“ auf 340 mGy abgeschätzt und wird hauptsächlich vom intrinsischen Nullsignal beeinflusst. Das Nullsignal wurde im relevanten Integrationsbereich in eine entsprechende Dosis (Hintergrunddosis) umgerechnet und kann für die Auswahl der untersuchten Glasproben als eine log-normale Verteilung der Hintergrunddosis beschrieben werden (siehe Abbildung 2.3.2b). Eine weitere dosimetrische Eigenschaft ist der lineare Zusammenhang zwischen der absorbierten Dosis im Material und dem dosisinduzierten TL-Signal.

Mithilfe eines Dosisbestimmungstests (Dose-Recovery-Test) wird die unbekannte Unfalldosis (Expositions-dosis) einer exponierten Probe bestimmt. Bei diesem Test wird zunächst das

Unfalldosissignal gemessen und anschließend die Unfalldosis über eine Regressionsgerade mithilfe von Kalibrationsmessungen mit unterschiedlichen Dosen berechnet. Mit realitätsnahen Bestrahlungsversuchen von intakten Mobiltelefonen werden das Messprotokoll und die Dosisbestimmungsmethode erfolgreich validiert.

Die Dosisbestimmung am Displayglas ist ein zusätzlicher Untersuchungsansatz für die retrospektive Dosimetrie und kann mit anderen Untersuchungen von Chipkarten, Widerständen, Kapazitäten und Induktoren aus Mobiltelefonen herangezogen und kombiniert werden.

2.3.4 Andere Materialien

Eine intensive Literaturrecherche wurde durchgeführt, um das Spektrum unterschiedlicher Materialien, die sich als Notfalldosimeter eignen, aufzuzeigen. Beispielsweise können Silikate, die aus Staub oder von der Oberfläche persönlicher Gegenstände und Pflanzen extrahiert werden (Della Monaca et al. (2013); Bortolin et al. (2011, 2010)), oder auch Trocknungsmittel, bestehend aus SiO_2 , zur Aufnahme von Feuchtigkeit und Flüssigkeiten in Handtaschen, Arzneimittelpackungen oder Fahrzeugen des Rettungsdienstes (Geber-Bergstrand et al. (2014)) für die Notfalldosimetrie herangezogen werden. Ebenfalls wurde eine systematische Untersuchung persönlicher Gegenstände, wie Münzen und Geldscheine, Schuhsohlen und Plastikkarten für die Eignung als Notfalldosimeter durchgeführt (Sholom und McKeever (2014)).

In mehreren Veröffentlichungen wurde gewöhnliches Haushaltssalz (NaCl) als Notfalldosimeter untersucht (Christiansson et al. (2011); Ekendahl und Judas (2011); Bernhardsson et al. (2009)). In unterschiedlichen Publikationen (Ekendahl et al. (2013); Veronese et al. (2010); Bailiff et al. (2002)) wurden Zahnkeramiken von Prothesen und Zahnfüllungen analysiert.

Das weite Feld zeigt, dass alltägliche Gegenstände, die sich nahe am Körper befinden, das Potenzial als Notfalldosimeter aufzeigen.

Kapitel 3

Messinstrumente und Strahlenquellen

In diesem Kapitel werden die Messinstrumente vorgestellt, mit denen die experimentellen Daten aufgenommen wurden. Das Lumineszenzlabor des Institutes für Strahlenschutz ist mit vier Risø Lumineszenzmessgeräten ausgestattet, die in dem dänischen Lumineszenzforschungslabor in Roskilde (Dänemark) entwickelt wurden und sich als bewährte Messinstrumente für routinierte TL- und OSL-Untersuchungen etabliert haben. Im Rahmen dieser Arbeit werden Lumineszenzmessungen mit dem Modell Risø TL-DA-12 und zwei kombinierten TL/OSL-Messgeräten Risø TL/OSL-DA-15-I und TL/OSL-DA-15-II durchgeführt. Die TL/OSL-Messgeräte besitzen die Möglichkeit, optisch und thermisch stimulierte Lumineszenzmessungen durchzuführen (siehe Kapitel 3.1). Für tiefergehende Untersuchungen im Bereich der Lumineszenzforschung wurde im Jahr 2012 das sehr flexibel einsetzbare Lumineszenzmessgerät LEXSYG der Firma Freiberg Instruments angeschafft. Dieses Gerät besitzt die Besonderheit, neben TL- und OSL-Messungen, ein TL-Spektrum aufzunehmen (siehe Kapitel 3.2). Im Allgemeinen besteht ein Lumineszenz-Messgerät aus drei Einheiten:

- Bestrahlungseinheit für Kalibrationsbestrahlungen
- Stimulationseinheit (thermisch und optisch)
- Aufzeichnungseinheit des Lumineszenzsignals

In Kapitel 3.3 werden die benutzten Röntgen- und Gammaquellen beschrieben, die zur Bestrahlung der Proben in der Bestrahlungseinrichtung des Helmholtz Zentrums München und dem zugehörigem Sekundär-Standarddosimetrielabor (SSDL) verwendet wurden.

3.1 Aufbau des Risø Lumineszenzmessgeräts

Das kombinierte TL/OSL-Messgerät Modell Risø TL/OSL-DA-15 mit der eingebauten Bleichereinheit wird für die Messuntersuchungen mit Vorbleichen der Glasprobe eingesetzt. Das Risø TL-DA-12 mit einem unterschiedlichen Detektionsaufbau wird ausschließlich für TL-Messungen verwendet. In Abbildung 3.1.1 werden die einzelnen Komponenten der Risø Messapparatur dargestellt, welche im nächsten Kapitel genauer beschrieben werden.

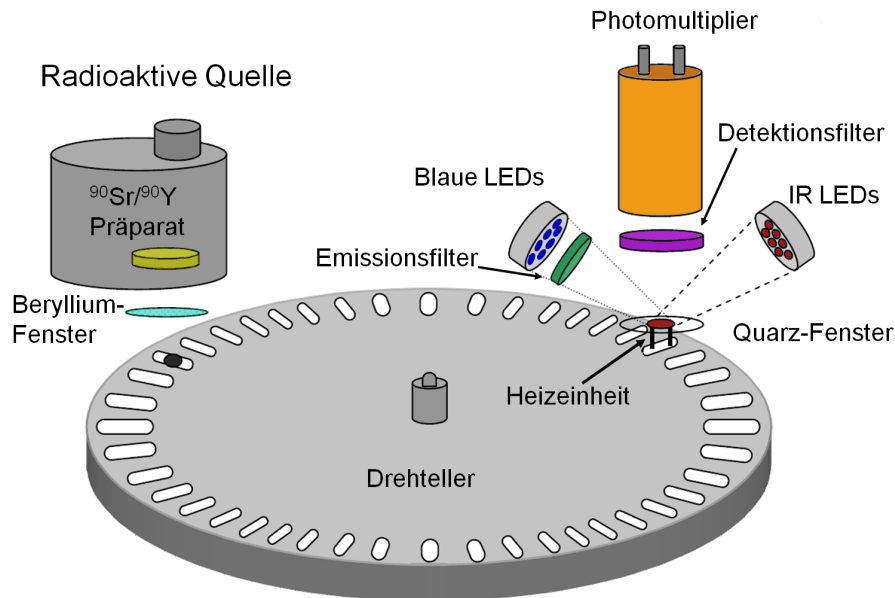


Abbildung 3.1.1: Schematischer Aufbau der Messkomponenten eines Risø TL/OSL-Messgeräts (adaptiert und bearbeitet aus Risø Danmarks Tekniske Universitet (2008)).

3.1.1 Komponenten der Messapparatur

Die Risø Lumineszenzmessgeräte, deren Komponenten nachfolgend vorgestellt werden, gleichen sich vom Aufbau und Messprinzip.

Probemesskammer und Proben-Drehteller

Die Probemesskammer lässt sich mithilfe eines bewegbaren Deckels abschließen. Die Probemesskammer wird über ein Gasventil mit Stickstoff durchströmt, um eine Stickstoffatmosphäre für die TL-Messung zu erschaffen. In der Messkammer befindet sich der herausnehmbare Proben-Drehteller mit bis zu 24 bzw. 48 Probenpositionen (siehe Abbildung 3.1.2). Dieser wird computergesteuert mit einem Motor angetrieben. Ein Schrittmotor und eine interne Optoelektronik ermöglichen dem System, die Position des Drehtellers und einer bestimmten Probe zu bestimmen. Auf den Drehteller werden rostfreie Stahleinsätze (Cups) eingesetzt, auf welche die Probe abgelegt wird. Der Innendurchmesser eines Cups beträgt 9 mm und limitiert die Abmessung der zu untersuchenden Probe. Aus diesem Grund besitzen die untersuchten Glasproben eine Dimension von ca. 5 x 5 mm².



Abbildung 3.1.2: Bestückter Proben-Drehteller (entnommen aus Discher (2011)).

Radioaktive Quellen

Eine umschlossene radioaktive $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ -Quelle, die abgeschirmt auf dem Deckel des Messsystems angebracht ist, wird zur Betabestahlung verwendet. ^{90}Sr zerfällt über einen β^- -Zerfall zu ^{90}Y mit einer Halbwertszeit von $t_{1/2} = 28,79$ a und einer maximalen Zerfallsenergie von 0,55 MeV (100 %). ^{90}Y zerfällt wiederum über einen β^- -Zerfall zum stabilen ^{90}Zr mit einer Halbwertszeit von $t_{1/2} = 64,00$ h mit einer maximalen Zerfallsenergie von 2,28 MeV (99,99 %) (Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) (2014b)).

Die abgeschirmte Quelle besitzt eine Öffnung direkt über der darunterliegenden Probe, wobei der Schließ- und Öffnungsmechanismus automatisiert über Druckluft gesteuert wird. Für die räumliche Trennung befindet sich ein Beryllium-Fenster zwischen Strahlungsquelle und der Probemesskammer. Die radioaktiven Quellen der vorgestellten Geräte unterscheiden sich von der Aktivität bzw. Dosisleistung wie folgt:

- Risø TL-DA-12:
Aktivität 555 MBq (Kalibrationsdatum laut Etikett an der Quelle: 22.01.1993)
Dosisleistung $4,6 \pm 0,5$ mGy/s (Kalibrationsdatum 05.08.2002)
- Risø TL/OSL-DA-15-I:
Aktivität 1,48 GBq (Kalibrationsdatum laut Etikett an der Quelle: 24.05.1989)
Dosisleistung $44,2 \pm 2,0$ mGy/s (Kalibrationsdatum 11.01.2013)
- Risø TL/OSL-DA-15-II:
Aktivität 740 MBq (Kalibrationsdatum laut Etikett an der Quelle: 13.05.2004)
Dosisleistung $28,6 \pm 1,3$ mGy/s (Kalibrationsdatum 11.01.2013)

Die Betaquellen für das Risø TL/OSL-DA-15-I und das Risø TL/OSL-DA-15-II wurden mit jeweils drei Displaygläsern kalibriert, die am SSDL mit einer Dosis in Luft (Cs-137) von 1000 mGy bestrahlt worden sind. Die Unsicherheit aus den drei unabhängigen Quellenkalibrationsmessungen wird auf 4,5 % berechnet. Die Betaquelle des Risø TL-DA-12 wurde mit Quarzkörnern (Korngröße 140-200 μm Durchmesser) kalibriert. Eine Unsicherheit der kalibrierten Dosisleistung von 10 % wird angenommen, da sich zwar der Hauptbestandteil von Glas (SiO_2) mit den Quarzkörnern deckt, sich jedoch die mittlere Dichte der Quarzkörner und Luft im Gegensatz zum kompakten Glas geringfügig unterscheidet.

Photomultiplier

Zur Aufzeichnung des Lumineszenzsignals ist der Photomultiplier als Detektor die grundlegende Komponente des Messgeräts. Der Detektor besteht aus einer lichtempfindlichen bialkali Photokathode (Thorn-EMI 9235Q) und einem nachgeschalteten Sekundärelektronenvervielfacher in einem evakuierten Glaskolben. Über den äußeren Photoeffekt wird das Licht zu einem elektrischen Signal in der Photokathode umgewandelt. Die dabei entstehenden Photoelektronen werden in einem elektrischen Feld beschleunigt und treffen auf weitere Elektroden, die sogenannten Dynoden. Dabei entstehen Sekundärelektroden, die der Verstärkung des Signals dienen. Für die Elektronenvervielfachung ist eine Hochspannung nötig. Die Photomultiplier stammen von der amerikanischen Firma Products for Research, Inc., wobei sich der Detektionsbereich laut Herstellerangaben mit einer Quanteneffizienz bis zu 30 % zwischen 160 und 630 nm erstreckt (ET Enterprises (2014)).

Detektionsfilter

Zwischen Probe und dem Photomultiplier befindet sich die Detektionsfiltereinheit. Die optische Eigenschaft des Filters wird so gewählt, dass zur Detektion nur ein ausgewählter Wellenlängenbereich den Photomultiplier erreicht. Um das Stimulationslicht bei einer OSL-Messung zu blockieren, werden geeignete Filter verwendet, die das spektrale Detektionsfenster festlegen. Bei TL-Messungen werden passende Infrarot-Filter zur Reduzierung der thermischen Wärmestrahlung beim Erhitzen der Probe benutzt. Folgende Filter und Filterkombinationen werden in den Lumineszenzgeräten eingesetzt:

- Risø TL/OSL-DA-15-I und TL/OSL-DA-15-II:
UV transmittierender Filter (Hoya U-340)
Transmissionsbereich: 290-370 nm
- Risø TL-DA-12:
blau transmittierender Filter (Schott BG12)
Transmissionsbereich: 300-580 nm
oder
Filterkombination aus Wärmeschutzfilter (HA03) und Langpassfilter (Schott OG530)
Transmissionsbereich: 530-630 nm
oder
nur Wärmeschutzfilter (HA03)
Transmissionsbereich: 300-630 nm

Thermisches Stimulationssystem

Zur thermischen Stimulation der Probe befindet sich direkt an der Position unterhalb des Photomultipliers eine fest installierte Heizeinheit, die aus einer Heizleiterlegierung mit hohem spezifischen elektrischen Widerstand besteht. Die Aufheizung erfolgt resistiv durch das Heizelement. Eine lineare Heizrate von Raumtemperatur bis zu einer maximalen Temperatur von 700°C kann über eine elektronische Steuerung der Temperaturregelung und Temperaturkontrolle gewährleistet werden. Die Heizeinheit besitzt ebenfalls die Funktion, die Probe auf die Messposition anzuheben. Ein kontinuierlicher Stickstoffdurchfluss kühlt das Heizsystem und die Probe nach einer TL-Messung wieder ab. So wird das Heizelement vor Oxidation bei hohen Temperaturen durch die Reduzierung des Sauerstoffgehalts in der Messkammer geschützt. Für den Großteil der Messungen wird für das Messprotokoll eine lineare Heizrate von 2°C/s benutzt und die Glasproben bis zu einer maximalen Temperatur von 450°C aufgeheizt.

Optisches Stimulationssystem (beim kombinierten Messgerät Risø TL/OSL-DA-15)

Um eine Probe optisch zu stimulieren, wird eine Vielzahl an licht-emittierenden Dioden (LEDs) eingesetzt. Die Beleuchtungsstärke und Beleuchtungszeit werden variabel über eine elektronische Steuerung eingestellt. Als Stimulationsquellen dienen ringförmig angebrachte infrarote und blaue LEDs mit folgenden Eigenschaften laut Herstellerangaben (Risø Danmarks Tekniske Universitet (2008)):

- infrarote LEDs:
Anzahl: 21 Stück
insg. maximale Leistung ca. 135 mW/cm² (an der Position der Probe)
Wellenlängenbereich: ca. 800-900 nm
Maximum an Strahlungsleistung bei einer Wellenlänge von $\lambda = 875$ nm
- blaue LEDs mit vorgeschaltetem Emissionsfilter im grünen Bereich:
Anzahl: 28 Stück
insg. maximale Leistung ca. 40 mW/cm² (an der Position der Probe)
schmaler Wellenlängenbereich
Maximum an Strahlungsleistung bei einer Wellenlänge von $\lambda = 470$ nm

Ein Emissionsfilter direkt vor den blauen LEDs minimiert den Anteil des direkt gestreuten Lichts aus der Stimulationsquelle, der das Detektorsystem erreichen würde. Durch die eingebaute Filterkombination vor dem Photomultiplier muss gewährleistet werden, dass Photonen der optischen Stimulation von den Photonen der Lumineszenz getrennt werden. Deshalb wird für die blaue Stimulation ein entsprechender UV transmittierender Filter verwendet. Das optische Stimulationssystem dient im Messprotokoll hauptsächlich der gezielten Bleichung einer Probe, welche anschließend über eine TL-Messung untersucht wird.

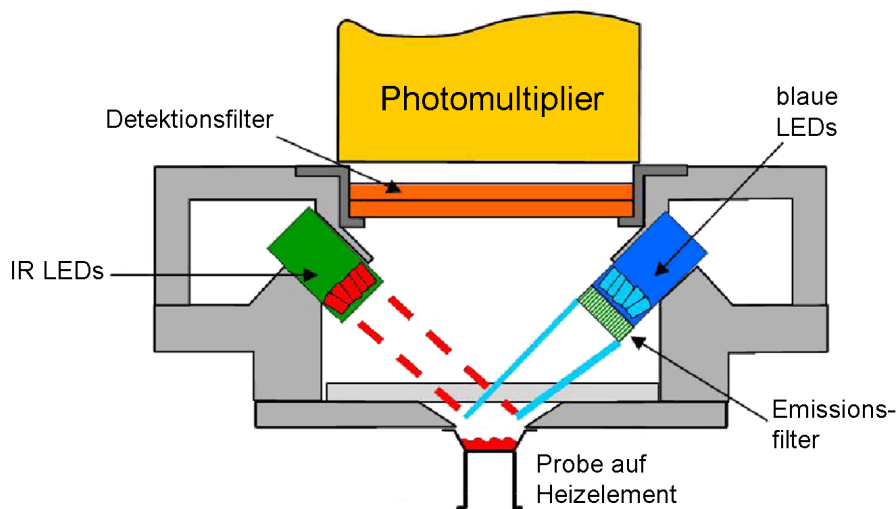


Abbildung 3.1.3: Die schematische Abbildung des thermischen und optischen Lumineszenz-Stimulationssystems der kombinierten TL/OSL-Einheit mit einem Heizelement für die thermische Stimulation, sowie blauen und infraroten LEDs für die optische Stimulation einer Probe (adaptiert aus Risø Danmarks Tekniske Universitet (2008)).

Aufzeichnungscomputer und Messungssoftware

Das Signal des Photomultipliers wird mit einem Computer aufgezeichnet, verarbeitet und gespeichert. Dieser Computer dient ebenfalls als Schnittstelle zwischen dem Kontrollprogramm, das zum Erstellen eines Messablaufs benutzt wird, und der Steuerungsbox, welche das Messgerät überwacht (MiniSys). Die Daten werden als .dat und als .dsu Dateien gespeichert, die speziell für die Auswertungssoftware abgestimmt sind. Dabei ist zu beachten, dass bei einer .dsu Datei das thermische Hintergrundsignal, der thermische Background, vom aufgezeichneten Signal abgezogen ist, bei einer .dat Datei hingegen nicht.

Als Kontrollprogramm wird für das kombinierte Messgerät TL/OSL-DA-15 ein „Sequence-Editor“ benutzt, mit dem sich eine Messprozedur programmieren lässt. Im TL-Messgerät TL-DA-12 benötigt man ein ähnliches DOS gestütztes Programm, in dem die Messsequenzen erstellt werden. Unabhängig von dem jeweiligen Messgerät dient das Programm „Analyst“ zur graphischen Visualisierung der Messungen und zum Export in andere Darstellungsprogramme, wie Microsoft Excel oder Origin.

3.2 Aufbau des LEXSYG Messgeräts

Das LEXSYG Messgerät wird für Lumineszenzmessungen, ähnlich dem Risø Messgerät, und als Instrument für die fundamentale Forschung vielseitig eingesetzt. Ein schematischer Aufbau des Messgeräts, entnommen aus Richter et al. (2013), zeigt die Komponenten der Messapparatur in Abbildung 3.2.1. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das LEXSYG Messgerät

hauptsächlich für spektrale TL-Messungen benutzt. Der Vollständigkeit halber werden alle Komponenten der Messapparatur im folgenden Kapitel vorgestellt.

3.2.1 Komponenten der Messapparatur

Die einzelnen Komponenten und Einheiten des LEXSYG Lumineszenzmessgeräts werden in den folgenden Kapiteln erläutert. Als Referenzen dienen die Betriebsanleitung des Messgeräts (Freiberg Instruments GmbH (2012b)), sowie die beiden Veröffentlichungen Richter et al. (2014) und Richter et al. (2013).

Probemesskammer und Proben-Drehteller

Der Proben-Drehteller wird computergesteuert mit einem Motor angetrieben und besitzt 80 Probepositionen. Die zu messende Probe wird pneumatisch vom Drehteller auf einen computergesteuerten Probetransportarm gesetzt und in die Messkammer transportiert. Dies besitzt den Vorteil, dass der Proben-Drehteller von der Probemesskammer getrennt ist und deshalb im laufenden Messbetrieb an der Proben Lade- und Entnahmeposition bestückt werden kann.

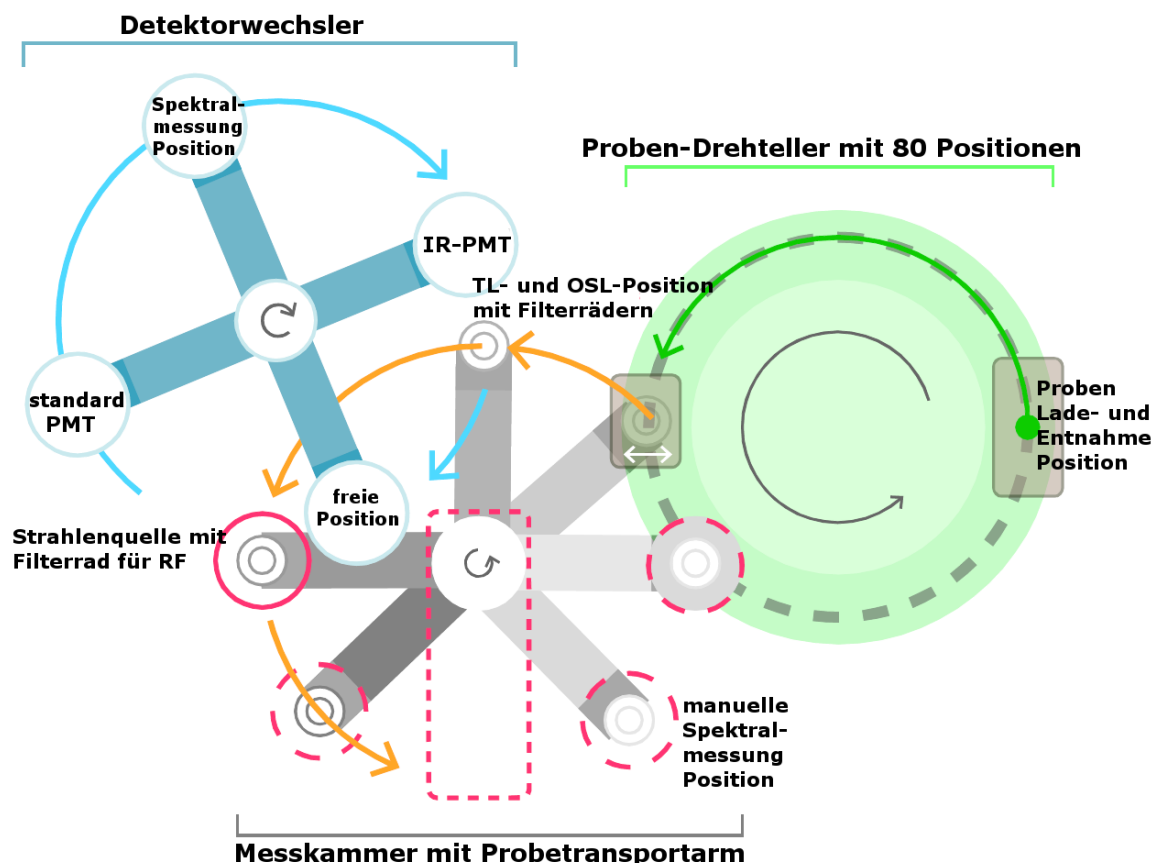


Abbildung 3.2.1: Der schematische Aufbau des LEXSYG Messgeräts zeigt die einzelnen Komponenten und Messpositionen (entnommen aus Richter et al. (2013) und adaptiert auf die vorhandene LEXSYG Konfiguration).

Auf dem Drehteller werden Einsätze (Cups) aus rostfreiem Stahl eingesetzt, auf die eine Probe abgelegt wird. Der Innendurchmesser eines Cups beträgt 8 mm und limitiert die Abmessung der zu untersuchenden Probe. Die Probemesskammer wird vor Beginn einer Messung über eine Vakuumpumpe evakuiert und mit Stickstoff geflutet. Die Stickstoffatmosphäre in der Messkammer schützt das Heizelement des Messgerätes vor Oxidation bei hohen Temperaturen durch die Reduzierung des Sauerstoffgehalts in der Messkammer.

Radioaktive Quelle

Eine radioaktive $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ umschlossene Ringquelle, die in der Probemesskammer eingebaut ist, wird zur Betabestahlung verwendet. Die Ringquelle hat den Vorteil, dass während der Bestrahlung die Radiofluoreszenz gemessen werden kann Richter et al. (2012). Ein Schließ- und Öffnungsmechanismus wird automatisiert über Druckluft gesteuert, um die Probe an der Bestrahlungsposition des Geräts zu bestrahlen. Im Zertifikat der Ringquelle wird die Homogenität des Strahlenfelds auf ca. 5 % für den 8 mm Durchmesser der Bestrahlungsfläche angegeben Freiberg Instruments GmbH (2012a).

Die eingebaute radioaktive Quelle besitzt folgende Aktivität bzw. kalibrierte Dosisleistung:

- LEXSYG:
Aktivität 760 MBq (Kalibrationsdatum laut Etikett an der Quelle: 15.11.2012)
Dosisleistung $25,47 \pm 1,15$ mGy/s (Kalibrationsdatum 11.01.2013)

Die Betaquelle des LEXSYG Messgeräts wurde mit 3 Displaygläsern kalibriert, die am SSDL mit einer Dosis in Luft (Cs-137) von 1000 mGy bestrahlt worden sind. Die Unsicherheit aus den drei unabhängigen Messungen der Quellenkalibration wird auf 4,5 % berechnet.

Detektionseinheiten

Das LEXSYG Messgerät besitzt einen beweglichen Detektorwechsler mit bis zu vier Detektorpositionen zur Aufzeichnung des Lumineszenzsignals. An einem Platz ist ein Thorn-EMI 9235Q Photomultiplier mit einer bialkali Photokathode (Products for Research, Inc.) eingebaut, der zu den Risø Messgeräten identisch ist. Ein Hamamatsu H7421-40 Photomultiplier wird mit einer thermoelektrisch- bzw. luftgekühlten GaAsP Photokathode für die rottemperföndliche Detektion zwischen 300 und 720 nm verwendet (Hamamatsu (2014)). Die Messungen mit dem rottemperföndlichen Detektor sind im Rahmen dieser Arbeit an einem LEXSYG System im Labor des Herstellers Freiberg Instruments GmbH durchgeführt worden.

Eine Besonderheit des LEXSYG Messgeräts ist die spektrale Messung des Lumineszenzsignals. Das Lichtsignal wird über eine optische Glasfaser in das spektrale Detektorsystem eingekoppelt. Das Detektorsystem besteht aus einem Shamrock 163 Spektrometer und einer Andor Technology iDus 420 Series CCD Kamera, die thermoelektrisch auf eine Temperatur von -80°C geköhlt wird. Die Spektralmessungen werden in einem Bereich zwischen 240 und 750 nm mit einer Auflösung von 0,5 nm (entsprechen 1024 Pixel) und einer frei wählbaren Temperaturauflösung aufgezeichnet. Zur Wellenlängenkalibration wurde eine Quecksilberdampfampe benutzt. Für die durchgeführte Spektralmessung wird eine Temperaturauflösung von 40°C mit einer linearen Heizrate von $2^\circ\text{C}/\text{s}$ bis zu einer maximalen Temperatur von 400°C gewählt.

Die Spektrometereinheit besitzt eine deutlich reduzierte Empfindlichkeit gegenüber Messungen mit dem Photomultiplier, da erstens das Lumineszenzsignal auf vielen Pixel der Kamera aufgeteilt wird und zweitens die Glasfaser bei der Lichteinkopplung eine geringe numerische Apertur aufweist. Deshalb sind hohe Strahlendosen für die spektrale Messung des Lumineszenzsignals nötig. Der CCD Chip der Kamera detektiert durch entsprechend lange Belichtungszeiten ebenfalls Peaks, die aus kosmischer Strahlung stammen. Über eine eigens geschriebene Software können die aufgezeichneten Spektren bezüglich dieser Peaks bereinigt werden.

Detektionsfiltereinheit

Im LEXSYG Messgerät sind zwei automatische Filterwechselräder mit jeweils 6 Filterpositionen eingebaut, um das Detektionsfenster softwaregesteuert einzustellen. Das TL- und OSL-Signal kann mit einer festgelegten Kombination von Glasfiltern (Schott KG3, Schott BG3, Schott BG25, Schott BG39 und Hoya U-340) und unterschiedlichen Interferenzfiltern (280 nm, 330 nm, 380 nm, 410 nm, 475 nm und 620 nm) über einen weiten Wellenlängenbereich untersucht werden.

Thermische Stimulationseinheit

Zur thermischen Stimulation der Probe befindet sich direkt auf dem Probetransportarm ein Heizelement. Somit ist eine thermische Stimulation an jeder Position in der Messkammer möglich, wie z.B. an der optischen Stimulationsposition oder der Bestrahlungsposition in der Messkammer. Das Heizelement besteht aus einer metallbeschichteten, dielektrischen Heizplatte und kann mit einer einstellbaren Heizrate bis zu einer maximalen Temperatur von 700°C erhitzt werden. Die Temperatur der Heizplatte wird mit einem Pyrometer (Strahlungsthermometer) kontrolliert und aufgezeichnet. Durch ein geschlossenes Stickstoffgas-Strömungssystem kann die Abkühlung der Heizplatte gesteuert werden. Ebenfalls können lineare Heiz- und Kühlraten, sowie auch nicht-lineare zeitliche Heiz- und Kühlfunktionen implementiert werden.

Optische Stimulationseinheit

Die optische Stimulation wird im LEXSYG Messgerät mit Lichtquellen im unterschiedlichen Wellenlängenbereich durchgeführt.

Für die Stimulation im infraroten Wellenlängenbereich (850 ± 3 nm) ist eine Laserdiode mit einer homogenen Ausleuchtung eines Probedurchmessers von 8 mm bis zu einer optischen Leistung von 400 mW/cm² verbaut. Blaue Stimulation (445 ± 5 nm) erfolgt ebenfalls mit einer Laserdiode mit einer optischen Leistung von maximal 100 mW/cm². Für die grüne Stimulation (525 ± 20 nm) sind hochleistungsfähige licht-emittierende Dioden (LEDs) mit einer optischen Leistung von 40 mW/cm² eingebaut.

Die Integration einer Photodiode für jede einzelne Diode ermöglicht eine Rückkopplung der Leistungskontrolle. Dies gewährleistet eine Kontrolle der optischen Einheit des Stimulationssystems. Die Beleuchtungsstärke und Beleuchtungszeit der jeweiligen Stimulationsquelle werden elektronisch mit der Kontrollsoftware gesteuert.

Aufzeichnungscomputer und Messungssoftware

Das aufgezeichnete Lumineszenzsignal wird mit dem gemessenen Temperaturverlauf als Rohdatei auf dem Aufzeichnungs- und Steuerungscomputer gespeichert. Bei einer Spektralmessung wird eine Rohdatei aus dem Signal der CCD Kamera und der dazugehörigen Temperatur erstellt. Zur graphischen Visualisierung der Spektralmessungen können beispielsweise mit dem Programm „Surfer“ eine dreidimensionale Ansicht und ein Konturschaubild erstellt werden.

3.3 Strahlenquellen

Das Sekundär-Standarddosimetrielabor (SSDL) des Helmholtz Zentrums München reproduziert die Kalibrationsbedingungen, die vom deutschen Primär-Standarddosimetrielabor in Braunschweig festgelegt sind. Die Anforderungen an die Strahlenqualität sind nach ISO-Norm, sowie für Strahlentherapie und Röntgendiagnostik gemäß entsprechender Norm erfüllt (Research Unit Medical Radiation Physics and Diagnostics (2014)). Das SSDL ist Mitglied des Netzwerks von Sekundär-Standarddosimetrielaboren innerhalb der weltweiten Organisationen WHO (Weltgesundheitsorganisation, engl. World Health Organization) und IAEO (Internationale Atomenergie-Organisation). Die in dieser Arbeit benutzten Strahlenquellen am SSDL werden in den folgenden Kapiteln ausführlich vorgestellt.

3.3.1 Röntgenanlagen PTW/Yxlon MG165 und MG320

Im SSDL sind zwei Röntgenquellen (X-Ray Quellen) bis zu einer maximalen Röhrenspannung von 160 kV und 320 kV vorhanden. Über ein automatisiertes Filterwechselrad können unterschiedliche Filtrierungen der Röntgenstrahlung ausgewählt werden. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden die Strahlenqualitäten der N-Serie laut ISO-Norm (ISO 4037-3 (1999); ISO 4037-1 (1996)) benutzt. Die erhaltenen Dosisraten in Luft hängen von der Entfernung und der Filtrierung ab. Unter einem Referenzabstand von 80 cm wurden Kalibrationsmessungen zur Ermittlung der Dosis in Luft für jede Strahlenqualität (N-30 bis N-300) für festgelegte Röhrenspannungen und Stromstärken durchgeführt. Die Messungen wurden mit einem Typ 10001 Unidos Elektrometer verbunden mit einer Typ M 23361 Ionisationskammer mit Volumen 30 cm^3 durchgeführt, die vom Hersteller PTW Freiburg stammen und in der PTB Braunschweig kalibriert worden sind. Die Bestrahlungszeit der Röntgenbestrahlung wird über einen Bleishutter gesteuert und kann mit einem Monitorkammer System (PTW TM 786 Kammer und UNIDOSwebline Elektrometer) kontrolliert werden.

3.3.2 Buchler Gammakalibrator OB 20

Die Buchlerquelle besitzt fünf umschlossene Gammaquellen des Radionuklids Co-60 ($E_{\text{mittel}} = 1250 \text{ keV}^1$) und sieben umschlossene Gammaquellen des Radionuklids Cs-137 ($E_{\text{mittel}} = 662 \text{ keV}^1$) mit unterschiedlichen Aktivitäten und Dosisleistungen. Über ein Kontrollgerät wird die Bestrahlungszeit eingestellt und die Gammaquelle ausgewählt, die pneumatisch auf

¹Die mittlere Energie bezieht sich laut ISO 4037-1 (1996) auf die mittlere Energie gemittelt über das Fluenzspektrum

die Bestrahlungsposition transportiert wird. Nach Ablauf der Bestrahlungszeit wird die Gammastrahlung mit einem Shutter aus Blei abgeschirmt und die Gammaquelle wieder in die abgeschirmte Position transportiert. Die Unsicherheit der Dosisbestrahlung in Luft wird auf ca. 1 % angegeben (Greiter (2013), pers. Kommunikation).

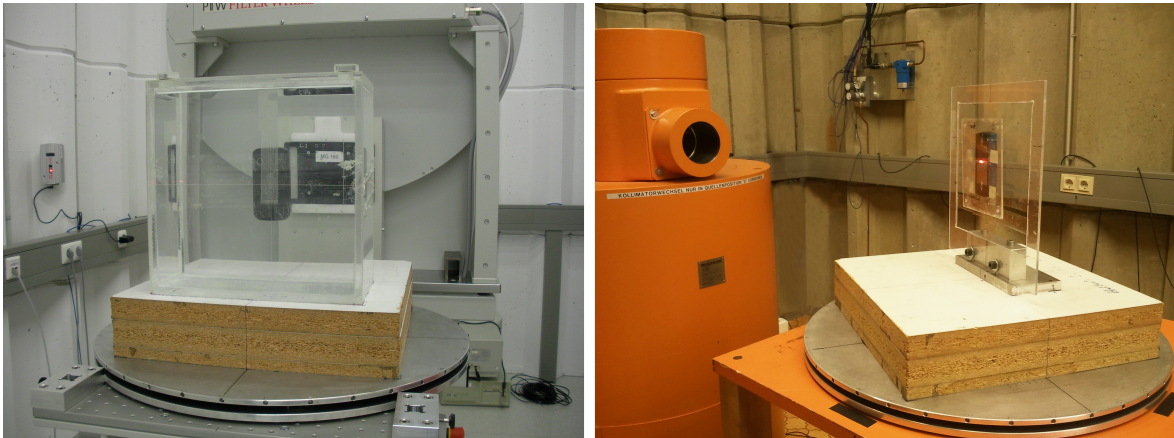


Abbildung 3.3.1: Röntgenanlage zur Bestrahlung eines Mobiltelefons, fixiert an einem ISO-Wasserphantom nach ISO 4037-3 (1999) (links). Buchleranlage OB 20 zur Gammabestrahlung (Co-60 oder Cs-137) eines Mobiltelefons, bestrahlt frei in Luft mit einer Plexiglasplatte zur Einhaltung des Sekundärelektronen-Gleichgewichts (entnommen aus Discher et al. (2014a)).

3.3.3 Gammacell 220 II

Am Gammacell 220 II werden Hochdosisbestrahlungen von 1 kGy für Glasproben durchgeführt, die für spektrale TL-Messungen appliziert wurden. Das Radionuklid Co-60 mit einer Aktivität von 960 TBq (kalibriert im Oktober 1987) wird in einer abgeschlossenen Gammabestrahlungskammer eingesetzt. Die Kammer besitzt eine Höhe von 20,6 cm und einen Durchmesser von 15,2 cm. Im Zentrum der Bestrahlungskammer beträgt die Dosisrate 11,6 Gy/min (Kalibrationsdatum: 30.04.2013). Zur Gammabestrahlung wird eine Halterung, bestehend aus zwei Plexiglasplatten mit einer Dicke von 3 mm zur Einhaltung des Sekundärelektronen Gleichgewichts benutzt, um die Glasproben zwischen den beiden PMMA² Platten im Zentrum der Kammer zu fixieren.

²PMMA steht für Polymethylmethacrylat (Plexiglas) und dient der Einhaltung des Sekundärelektronen-Gleichgewichts bei der Bestrahlung von Gammastrahlung. Die Dicke der Aufbauschiicht wird entsprechend nach ISO 4037-3 (1999), Tabelle 14, gewählt.

Kapitel 4

Experimentelle Untersuchungen

4.1 Verbesserung der Nachweisgrenze für Displaygläser

Die dosimetrischen Eigenschaften von Displayglas wurden im Detail bezüglich der Signalstabilität, Bleichbarkeit und des Signalansprechverhaltens in Discher und Woda (2013) untersucht. Ein geeignetes Protokoll wurde entwickelt und unter realistischen Bedingungen getestet. Wie in Abbildung 2.3.2 in Kapitel 2.3.3 ersichtlich, ist die Herausforderung bei einer TL-Messung einer bestrahlten Glasprobe das sogenannte Nulldosissignal. Dieses überlagert als nicht-strahleninduziertes Hintergrundsignal das strahleninduzierte Signal und verfälscht somit die Dosisinformation. Das Nulldosissignal wird bei der ersten TL-Messung oder beim Ausheizen einer Probe im Ofen mit entsprechend hoher Temperatur irreversibel gelöscht. Trotz der Optimierung des Temperaturintegrationsintervalls der TL-Ausleuchtcurve trägt es signifikant zur Nachweisgrenze von ca. 340 mGy bei. Eine messtechnische Nachweisgrenze von ungefähr 10 mGy kann jedoch für thermisch ausgeheizte Proben erreicht werden.

Das Ziel der Untersuchung ist die Entwicklung einer Methode, mit der das nicht-strahleninduzierte Nulldosissignal minimiert und damit die Nachweisgrenze verbessert werden kann. Um die Glasoberfläche und ebenfalls die auf das Displayglas aufgebrachte TFT-Struktur zu entfernen, werden Glasproben mit konzentrierter Flußsäure (HF, 40 %) geätzt. Flußsäure ist eine toxische, anorganische Substanz und besitzt die Eigenschaft, Glas aufzulösen (DGUV (2014); BASF (2012)). Der Effekt des Ätzens mit konzentrierter Flußsäure wird in den folgenden Kapiteln mit Displayglasproben systematisch untersucht.

4.1.1 Reduzierung des Nulldosissignals durch Ätzen

Der Einfluss der Ätzdauer wurde mit unterschiedlichen Proben untersucht, die aus einem Displayglas entnommen wurden. Mit ansteigender Ätzdauer wurden ein Gewichtsverlust und eine starke Reduzierung des Nulldosissignals beobachtet. Um den Effekt der Signalreduzierung systematisch zu untersuchen, wurden die TL-Leuchtkurven der Aliquote auf die Probenmasse normiert, um den Gewichtsverlust durch das unterschiedlich lange Ätzen zu kompensieren. Das Ergebnis zeigt, dass das Nulldosissignal hauptsächlich aus der Oberfläche bzw. aus der oberen Glasschicht stammt, die durch das Ätzen entfernt wurde. Im Gegensatz dazu stammt das strahleninduzierte Signal aus dem gesamten Glasmaterial.

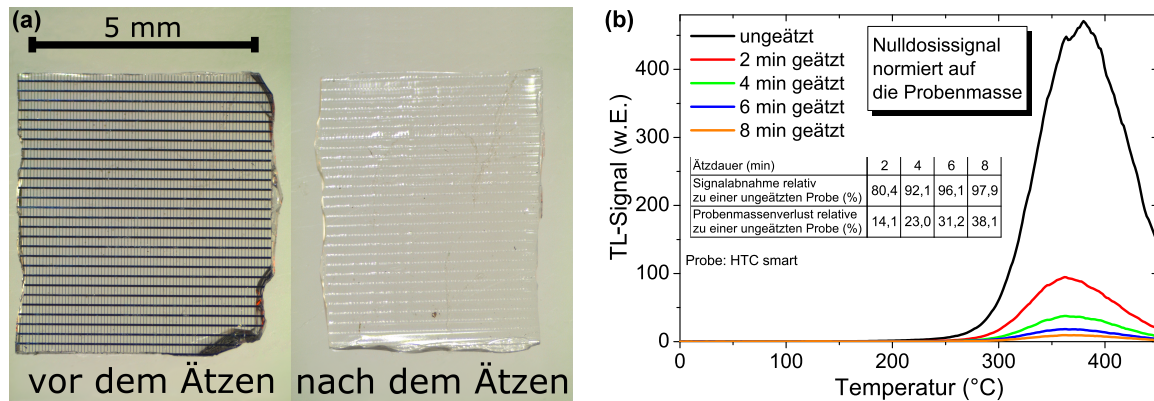


Abbildung 4.1.1: (a) Vergrößertes Bild einer Glasprobe, hinteres Displayglas mit TFT-Struktur, vor und nach dem Ätzen mit konzentrierter Flusssäure. Die geätzte Probe erscheint nach dem Behandlungsschritt völlig transparent. (b) Vergleich des Nulldosissignals mit Variation der Ätzdauer. Die fünf Proben wurden aus der gleichen Displayglasplatte extrahiert und die Ätzdauer entsprechend variiert. Die TL-Intensität der Ausleuchtcurve wird aufgrund des Massenverlusts durch das Ätzen auf die Probenmasse normiert. Der Tabelleneinschub zeigt die relative Signalabnahme des Nulldosissignals und den relativen Probenmassenverlust in Abhängigkeit der Ätzdauer in Bezug auf eine nicht geätzte Glasprobe (adaptiert aus Discher et al. (2013)).

Die Abnahme des Nulldosissignals abhängig zur Ätzdauer wurde für das Integrationsintervall 0-450°C relativ zu einer ungeätzten Glasprobe berechnet. Ein linearer Zusammenhang ($R^2 = 0,997$) wurde zwischen dem Probenmassenverlust und der Ätzdauer herausgefunden. Der hauptsächliche Verlust des Nulldosissignals wurde innerhalb der Ätzdauer von 4 min festgestellt. Diese Ätzdauer ist ausreichend, um die TFT-Struktur abzulösen und einen Teil der Glasoberfläche abzuätzen. Nach der chemischen Behandlung ist die Glasprobe vollkommen transparent (siehe Abbildung 4.1.1). Für längere Ätzdauern ist der Nutzen der Signalreduzierung verhältnismäßig klein und wird durch den ansteigenden Gewichtsverlust ausgeglichen, der eine Reduzierung der Strahlensensitivität zur Folge hat. Eine Ätzdauer von 4 min wurde als optimaler Kompromiss zwischen Reduzierung des Hintergrundsignals, Sensitivität und Probenaufbereitungszeit gewählt, um einen höheren Durchsatz im Falle eines radiologischen Unfalls zu erreichen.

Mit einer Reihe von 28 unbehandelten und geätzten Proben wurde die Reduzierung des Nulldosissignals mit der einheitlichen Ätzdauer von 4 min untersucht. Für jede Probe wurde zunächst das Nulldosissignal gemessen. Anschließend erfolgte nach einer Bestrahlung von 1 Gy im TL-Gerät eine Kalibrationsmessung. Das Nulldosissignal wurde für jede Probe auf das 1 Gy Signal normiert, um den Grad der Signalreduzierung im Integrationsintervall 100-250°C bei verschiedenen Proben vergleichen zu können. Die Intensität des Nulldosissignals nimmt durch die chemische Ätz-Vorbehandlung der Glasproben mit HF deutlich ab. Der Grad der Reduzierung im untersuchten Integrationsintervall ist nicht für jede Probe gleich und wird in Kapitel 4.1.3 näher untersucht. Die Reduzierung des Nulldosissignals ermöglicht ein potenzielles Verschieben des festgelegten Integrationsbereiches zu höheren Temperaturen hin, indem das Signal signifikant stabiler ist und weniger Signalfading aufweist (Discher (2011)).

4.1.2 Einfluss des Ätzens auf unbestrahlte und bestrahlte Glasproben

Um den zusätzlichen Probenaufbereitungsschritt des Ätzens genauer zu untersuchen, gilt es festzustellen, ob das Ätzen einen Einfluss auf das strahleninduzierte Dosissignal besitzt oder ob ein neues TL-Signal durch das Ätzen generiert wird. Für die Untersuchung wurden Glasprobenstücke aus unterschiedlichen Displays entnommen und in einem Ofen für 10 min bei einer Temperatur von 500°C ausgeheizt, um das intrinsische Nulldosissignal zu löschen.

Zunächst wurden 10 unbestrahlte Proben benutzt, um eine mögliche Generierung eines TL-Signals zu untersuchen. Jede einzelne Glasprobe wurde für 4 min geätzt und anschließend wurde eine TL-Messung durchgeführt. Die TL-Messungen aller 10 Glasproben zeigen, dass durch den Ätzprozess kein zusätzliches TL-Signal generiert wird (siehe blaue Linie in Abbildung 4.1.2).

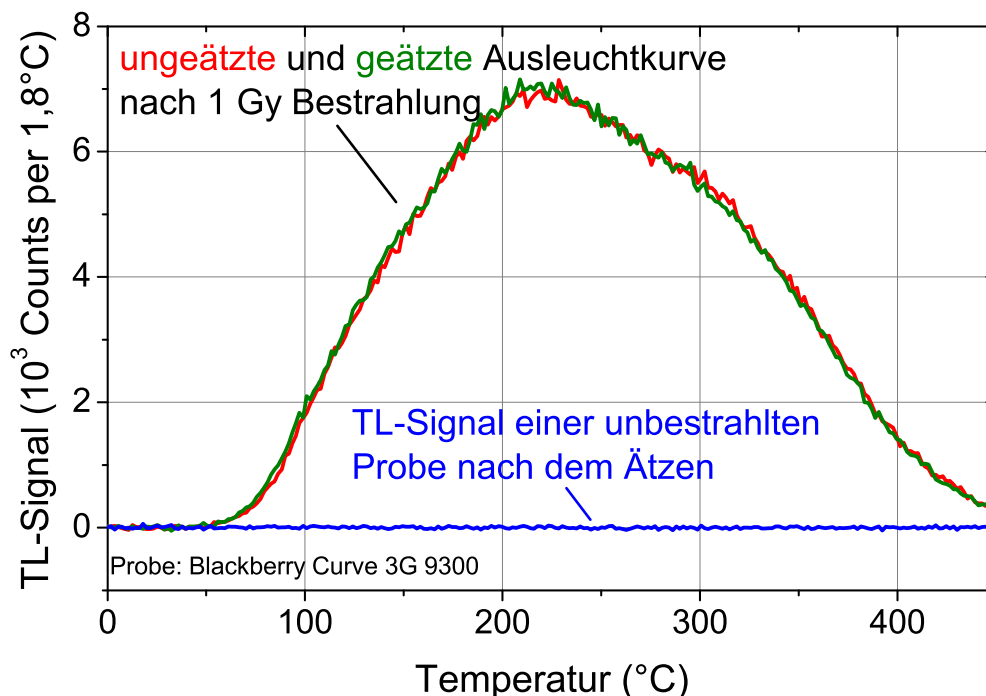


Abbildung 4.1.2: Einfluss des Ätzens auf das TL-Signal: Ausleuchtcurve einer ungeätzten (rote Linie) und geätzten (grüne Linie) Glasprobe, eine Stunde nach Bestrahlung gemessen. Die Form und die Intensität des TL-Signals erscheinen sehr ähnlich und es ist kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Leuchtcurven erkennbar. Zusätzlich ist das TL-Signal einer unbestrahlten, geätzten Probe dargestellt (blaue Linie), um einen möglichen Generierungseffekt, verursacht durch das Ätzen, auszuschließen (adaptiert aus Discher et al. (2013)).

Der Einfluss des Ätzens auf bestrahlte Proben wurde mit weiteren 10 Glasproben getestet. Zunächst wurden diese Proben mit einer Dosis von 1 Gy bestrahlt und anschließend geätzt. Eine TL-Messung wurde nach einer zeitlichen Verzögerung zwischen Bestrahlung und Messung von 1 h durchgeführt. Eine zweite Bestrahlung jeder Glasprobe von 1 Gy und eine TL-Messung mit einer Verzögerung von 1 h erfolgten erneut – dieses Mal ohne zuvor die Proben zu ätzen. Durch das Einhalten der gleichen zeitlichen Verzögerung können die Ausleuchtcurven beider

Messungen direkt miteinander verglichen werden, ohne das Signalfading berücksichtigen zu müssen. Die strahleninduzierten TL-Ausleuchtkurven von derselben geätzten und ungeätzten Glasprobe zeigen keinen signifikanten Unterschied (siehe rote und grüne Linie in Abbildung 4.1.2). Somit besitzt das Ätzen keinen Einfluss auf die im Glas gespeicherte Dosisinformation.

4.1.3 Variation des intrinsischen Hintergrundsignals und Bestimmung der Nachweisgrenze

Um die Variation des intrinsischen Hintergrundsignals zu bestimmen, wurden Glasproben verschiedener Displaygläser untersucht. Die Hintergrunddosis wurde aus dem jeweiligen Nulldosissignal und einer anschließenden Kalibrationsmessung für jede einzelne Glasprobe bestimmt. Die Messungen wurden mit dem Messprotokoll „500 s Vorbleichen mit blauen LEDs“ durchgeführt, das in Discher und Woda (2013) entwickelt wurde, wobei blaue Leuchtdioden des TL/OSL-Messgerätes benutzt wurden. Für die Untersuchung wurden jeweils 28 geätzte und ungeätzte Glasproben unterschiedlicher Mobiltelefondisplays entnommen.

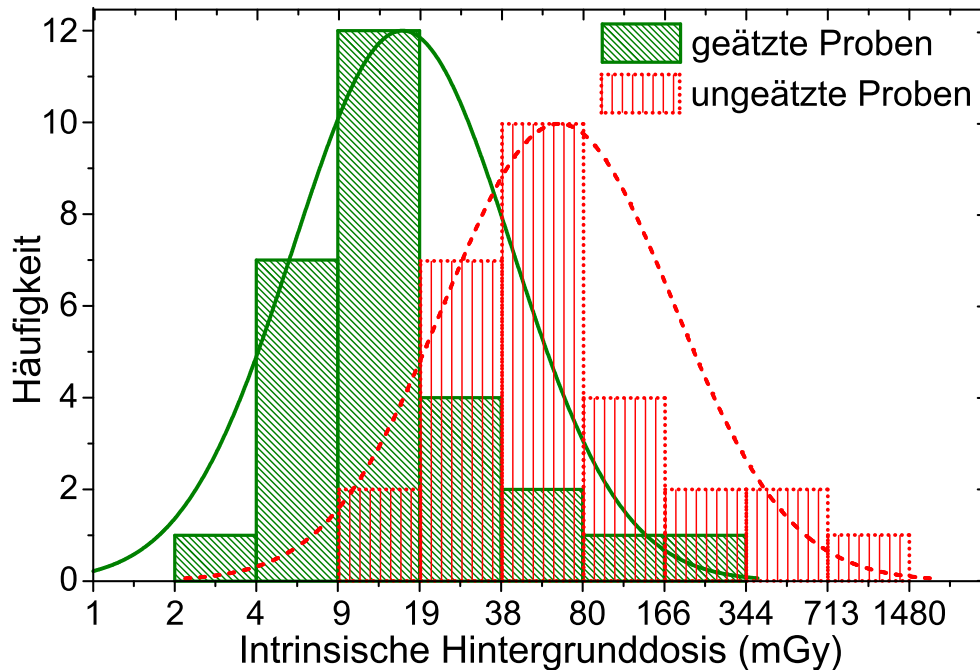


Abbildung 4.1.3: Histogramme der Verteilung der berechneten Hintergrunddosis von 28 ungeätzten (rot) und 28 geätzten (grün) Glasproben aus verschiedenen Mobiltelefondisplays. Die Werte der x-Achse sind logarithmisch skaliert. Eine Gaußsche Verteilungsfunktion wird als Orientierungslinie für beide angenäherte, logarithmische Normalverteilungen angezeigt. Das Maximum ist jeweils auf die maximale Häufigkeitsanzahl normiert. Die Form der beiden Verteilungen hängt stark von der Anzahl der Klassen und der gewählten Klassenbreite ab und wird hier nur zur Verdeutlichung angezeigt (adaptiert aus Discher et al. (2013)).

Für jede Glasprobe wurde eine signifikante Reduzierung des Nulldosissignals durch das Ätzen festgestellt. Verglichen zu ungeätzten Proben beträgt diese Reduzierung zwischen 45 und 95 %. Die Verteilung der intrinsischen Hintergrunddosis für die untersuchten geätzten und ungeätzten Glasproben kann als eine logarithmische Normalverteilung angenähert werden und ist in Abbildung 4.1.3 gezeigt.

Der Vergleich beider Verteilungen zeigt eine deutliche Verschiebung zu geringeren Hintergrunddosen und eine leichte Verschmälerung der approximierten Verteilungsfunktion durch den Ätzprozess. Die Parameter der logarithmischen Normalverteilungsfunktion sind in Tabelle 4.1 angegeben.

	Ungeätzte Proben	Geätzte Proben
Zentrum (Mittelwert der ln Werte)	4,161	2,768
Breite (Standardabweichung der ln Werte)	1,029	0,976
Median Hintergrunddosis (mGy)	64	16
Standardabweichung der Hintergrunddosis (mGy)	149	32
Bestimmungsgrenze L_C (mGy)	50	13
Nachweisgrenze L_D (mGy)	340	76

Tabelle 4.1: Parameter der logarithmischen Normalverteilung der Hintergrunddosis, sowie berechnete Bestimmungs- und Nachweisgrenze von geätzten und ungeätzten Proben (adaptiert aus Discher et al. (2013)).

Die Nachweisgrenze unmittelbar nach Bestrahlung hängt hauptsächlich von der intrinsischen Hintergrunddosis ab. Die Bestimmungsgrenze L_C und die Nachweisgrenze L_D werden nach Currie (1999) bestimmt, wobei für die Berechnung auf Anhang A.1 verwiesen wird. Die berechneten Werte sind ebenfalls in Tabelle 4.1 gezeigt.

Im Vergleich zur ungeätzten Probengruppe ($L_D = 340$ mGy) ist die Nachweisgrenze der geätzten Probengruppe ($L_D = 76$ mGy) um ungefähr einen Faktor vier kleiner. Der zusätzliche Probenaufbereitungsschritt des Ätzens führt folglich zu einer deutlichen Erniedrigung der Nachweisgrenze und damit zu einer Verbesserung der Dosisrekonstruktion.

4.1.4 Bestrahlungsversuche an extrahierten Glasproben

Um die verbesserte Probenaufbereitungsmethode zu überprüfen, wurden extrahierte Glasproben mit der eingebauten Strahlenquelle des Thermolumineszenz-Messgerätes mit einer Unfalldosis von 248 mGy bestrahlt. Nach der Bestrahlung wurden die Glasproben mit der Hintergrundbeleuchtung eines präparierten Mobiltelefons für 4 h durchleuchtet und auf diese Weise gebleicht, um die Benutzung eines Mobiltelefons zu simulieren. Somit wurde das entwickelte Protokoll unter realistischen Bedingungen getestet.

Die Dosimetrie wurde an der schwer bleichbaren Komponente des TL-Signals durchgeführt, wobei das entwickelte Messprotokoll „500 s Vorbleichen mit blauen LEDs“ (Discher und Woda (2013)) eingesetzt wurde. Eine Dosisbestimmung wurde jeweils für geätzte und ungeätzte Glasproben von vier unterschiedlichen Mobiltelefondisplays mit einer Verzögerung von 28 h zwischen Bestrahlung und TL-Messung durchgeführt.

Die Berücksichtigung des Signalfadings nach 28 h und die Korrektur der Hintergrunddosis wurden für alle Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse in Abbildung 4.1.4 zeigen, dass für die gewählte Unfalldosis von 248 mGy Schwierigkeiten bei der Dosisbestimmung für die ungeätzten Proben auftreten, da dieser Wert unterhalb der Nachweisgrenze dieser Proben liegt. Eine große Variation der gemessenen Unfalldosis wird festgestellt und in drei von vier Fällen sind die gemessenen Werte nicht signifikant von Null verschieden.

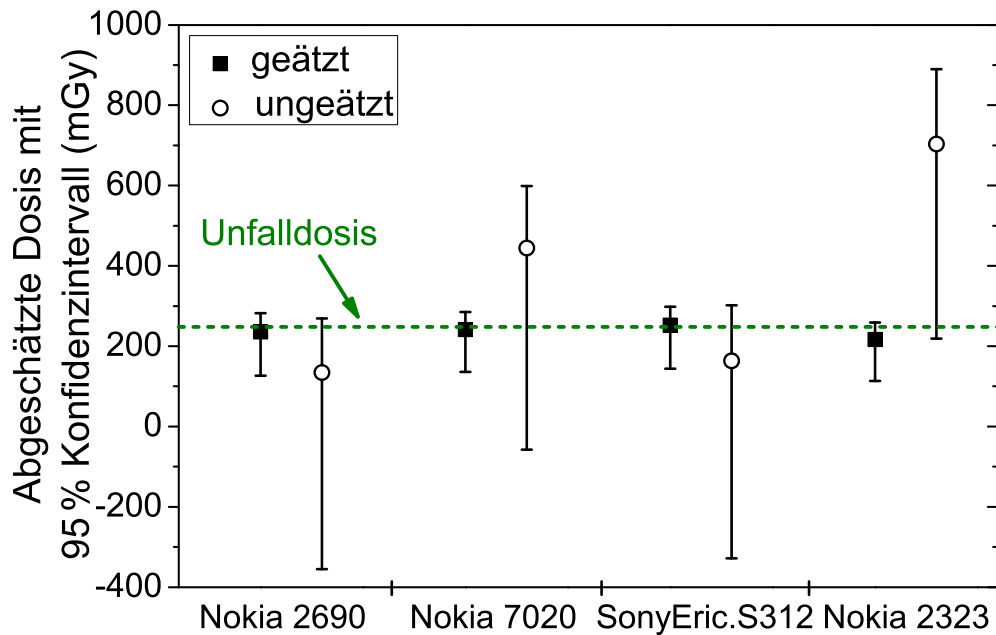


Abbildung 4.1.4: Ergebnis der Bestrahlungsversuche an extrahierten Glasproben. Die Dosisbestimmung wurde mit geätzten (Quadratsymbol) und nicht geätzten (Kreissymbol) Glasproben von vier verschiedenen Mobiltelefonen durchgeführt. Die Unsicherheiten entsprechen der oberen und unteren Grenze des 95 % Konfidenzintervalls. Die gegebene Unfalldosis von 248 mGy ist mit einer grünen gestrichelten Linie eingezeichnet (adaptiert aus Discher et al. (2013)).

Dagegen ist die Dosisbestimmung für geätzte Proben erfolgreich, da sich der Wert der Unfalldosis oberhalb der reduzierten Nachweisgrenze für geätzte Proben befindet. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass das Ätzen von Gläsern den Vorteil besitzt, Unfalldosen unterhalb der Nachweisgrenze für ungeätzte Glasproben (340 mGy) mit einer verbesserten Präzision bestimmen zu können.

4.2 Thermolumineszenz Emissionsspektrometrie von Displayglas

Bei der Untersuchung von mehr als 80 Displayglasproben unterschiedlicher Mobiltelefone wurde eine Kategorisierung anhand der Leuchtkurve des strahleninduzierten TL-Signals durchgeführt (Discher und Woda (2013)).

Für einen speziellen Glastype (Glas Kategorie A, Kalk-Aluminiumsilikatglas) wurden die dosimetrischen Eigenschaften im Detail untersucht. Für einen weiteren Glastype (Glas Kategorie B, Borosilikatglas) wurden die dosimetrischen Eigenschaften aufgrund einer zu geringen Strahlensensitivität, gemessen im blauen bzw. ultravioletten Emissionsbereich, nicht vollständig untersucht. Beide Glastypeen werden jedoch in modernen Mobiltelefonen verbaut und könnten ein hilfreiches Werkzeug für die retrospektive Notfalldosimetrie sein.

Die Emissionsspektren der unterschiedlichen Glastypeen wurden untersucht, um die bis dahin benutzte Filtrierung zur TL-Detektion zu überprüfen. Anhand der Ergebnisse wurden die dosimetrischen Eigenschaften der Glas Kategorie B in einem optimierten Detektionsfenster neu bewertet (siehe Kapitel 4.3).

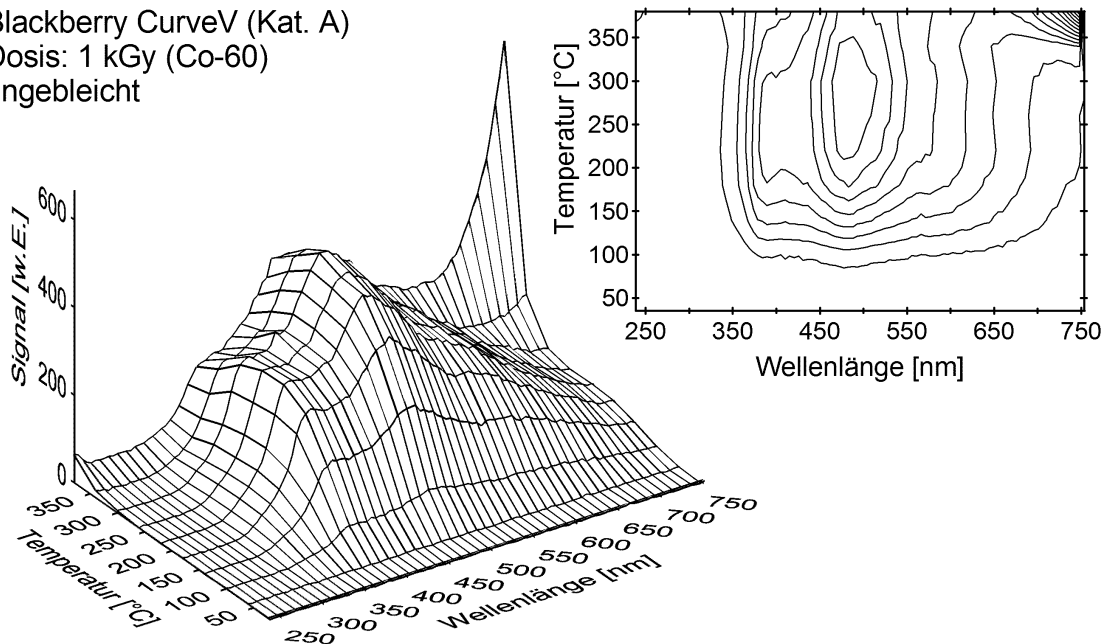
4.2.1 Thermolumineszenz Emissionsspektrum zweier unterschiedlicher Displayglastypen

Für die Spektralmessung werden hohe Dosen benötigt, wozu das Co-60 Gammacell II verwendet wurde (siehe Kapitel 3.3.3 für die Vorstellung des Gammacells).

Das Thermolumineszenz Emissionsspektrum wurde für zwei unterschiedliche Displayglastypen (Kategorie A und B) aufgezeichnet und charakterisiert. Die TL-Spektren sind in Abbildung 4.2.1 zu sehen. Für die Glasprobe aus Kategorie A (Blackberry Curve 3G 9300) zeigt das TL-Spektrum zwei Emissionspeaks bei den Wellenlängen von ca. 380 und 465 nm im Temperaturbereich zwischen 200 und 300°C. Eine breite Signalschulter kann bis zur maximal aufgezeichneten Wellenlänge von 750 nm mit einem möglichen Peak zwischen 590 und 600 nm beobachtet werden. Hingegen zeigt das TL-Emissionsspektrum von Glaskategorie B (Samsung M3510) einen ausgeprägten Peak um 605 nm bei einer Temperatur von 150°C und zwei kaum erkennbare Peaks bei Wellenlängen von 380 und 465 nm.

Die Ähnlichkeit der aufgezeichneten Peakwellenlängen für beide Glastypeen deutet an, dass dieselben Defekte im Rekombinationsprozess für beide Materialien involviert sein könnten, jedoch mit einer unterschiedlichen relativen Intensität des jeweiligen Emissionsbandes.

Blackberry CurveV (Kat. A)
Dosis: 1 kGy (Co-60)
ungebleicht



Samsung M3510V (Kat. B)
Dosis: 1 kGy (Co-60)
ungebleicht

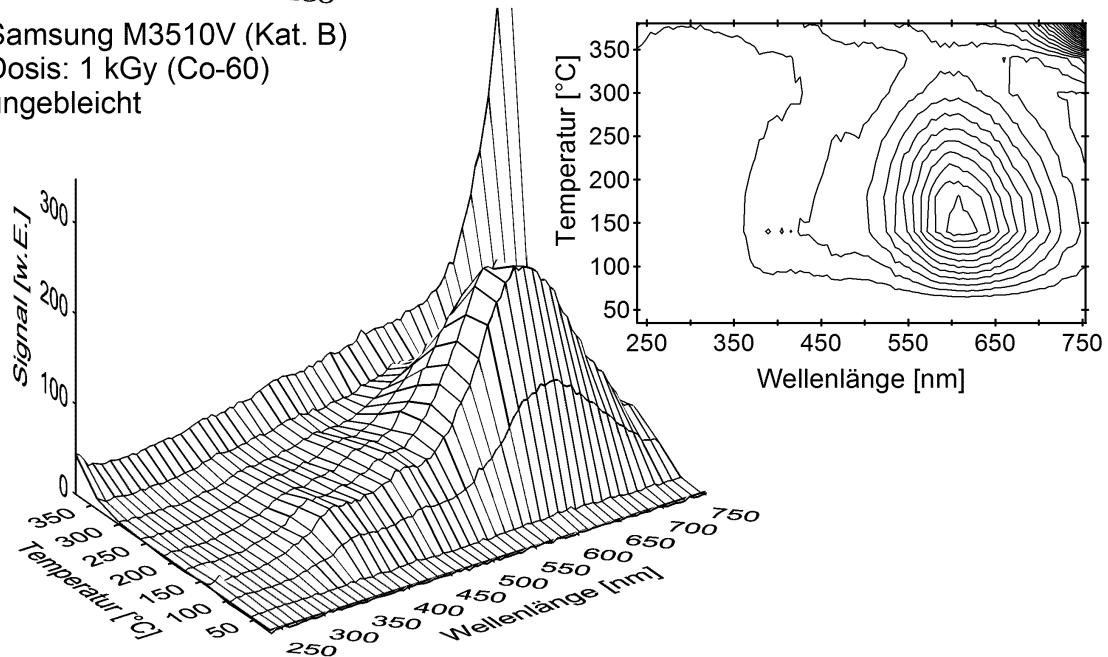
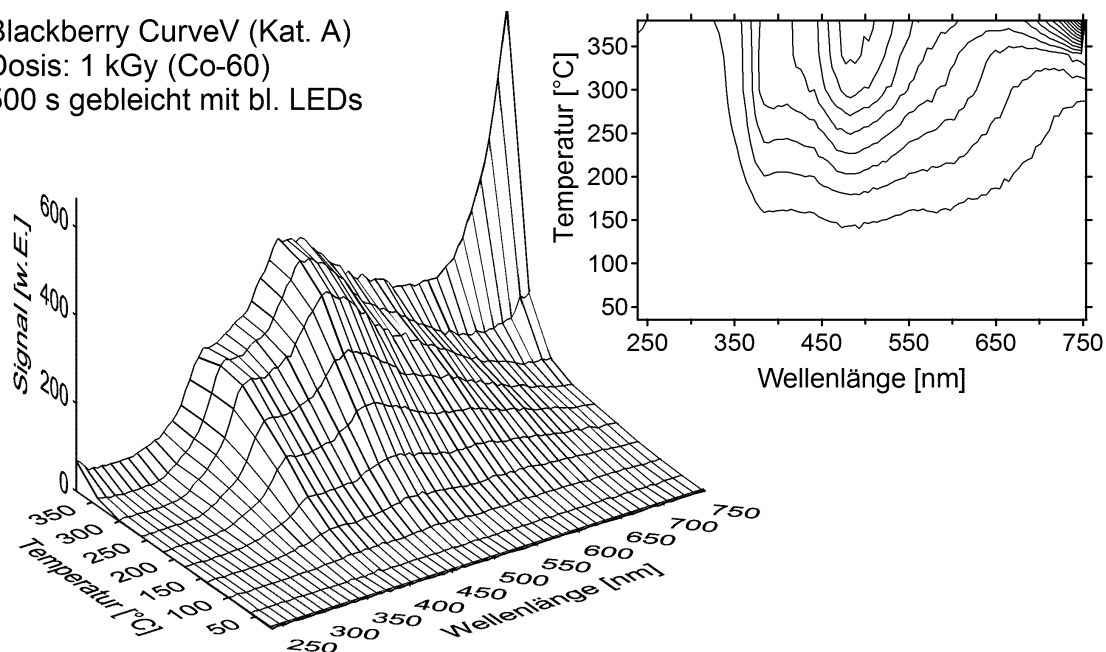


Abbildung 4.2.1: TL-Spektrum einer mit 1 kGy bestrahlten Glasprobe der Kategorie A (Kalk-Aluminiumsilikatglas, oben). Zwei Emissionspeaks bei etwa 380 und 465 nm können identifiziert werden. TL-Spektrum einer Glasprobe der Kategorie B (Borosilikatglas, unten). Ein ausgeprägtes Emissionsmaximum wird bei einer Wellenlänge um 605 nm bei einer Temperatur von etwa 150°C beobachtet (adaptiert aus Discher und Woda (2014)).

Blackberry CurveV (Kat. A)
Dosis: 1 kGy (Co-60)
500 s gebleicht mit bl. LEDs



Samsung M3510V (Kat. B)
Dosis: 1 kGy (Co-60)
30 s gebleicht mit bl. LEDs

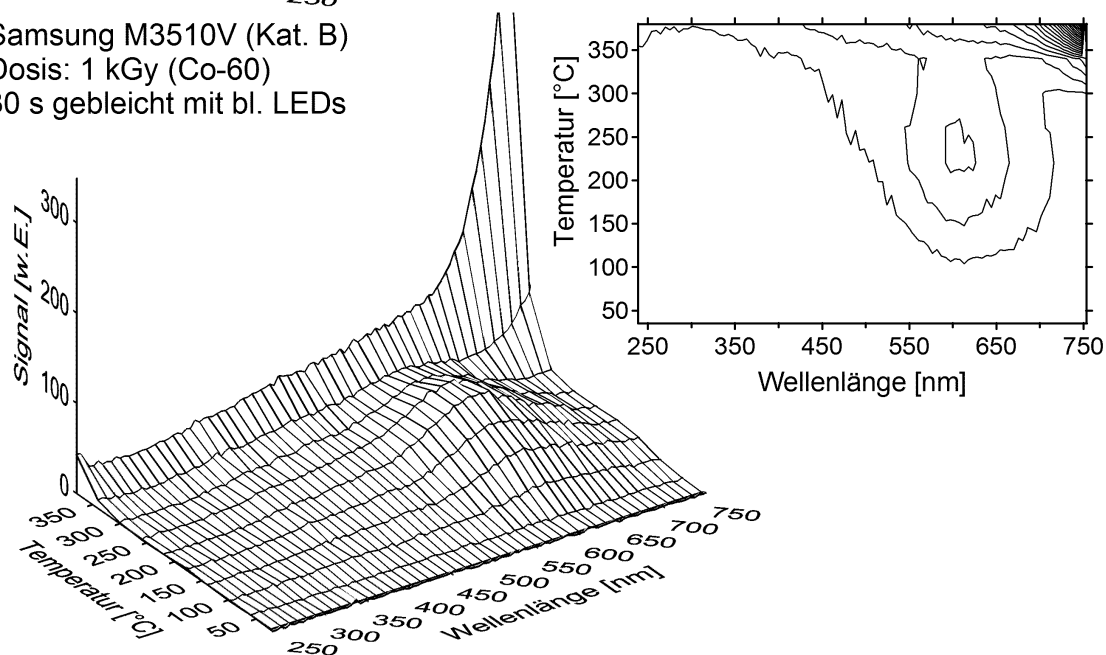


Abbildung 4.2.2: Gebleichtes TL-Spektrum einer mit 1 kGy bestrahlten Glasprobe der Kategorie A (Kalk-Aluminiumsilikatglas, oben) und der Kategorie B (Borosilikatglas, unten). Verschiebung der Temperaturmaxima zu höheren Temperaturen und eine Reduzierung des TL-Signals im unteren Temperaturbereich werden für beide Proben beobachtet (adaptiert aus Discher und Woda (2014)).

4.2.2 Spektrum einer vorgebleichten Probe

Das Messprotokoll für Displaygläser, entwickelt in Discher und Woda (2013), beinhaltet ein optisches Vorbleichen vor jeder TL-Messung. Damit wird der Anteil an besetzten Fallen

geleert, der von Hintergrund LEDs der Bildschirmbeleuchtung des Mobiltelefons und von externen Lichtquellen, wie dem Tageslicht, beeinflusst wird. Um den Effekt des Vorbleichens auf das Emissionsspektrum zu untersuchen, wurde für beide Displayglas Kategorien (A und B) dieselbe Dosis wie bei der Untersuchung in vorherigem Kapitel appliziert (siehe Abbildung 4.2.2). Ein Vorbleichen der Proben vor der TL-Spektralmessung für 30 bzw. 500 s im Messgerät wurde mit den blauen LEDs des Messgeräts durchgeführt. Das TL-Spektrum zeigt für beide Glastypeen eine Verschiebung der Temperaturmaxima zu höheren Temperaturen und eine Reduzierung des TL-Signals im unteren Temperaturbereich. Das Ergebnis stimmt mit den Beobachtungen der herkömmlichen TL-Messungen von Displayglas der Kategorie A überein (Discher und Woda (2013)). Die relativen Intensitäten der Emissionsbänder ändern sich jedoch nicht und es wird kein neues Emissionssignal durch das Vorbleichen generiert.

4.2.3 Spektrum einer unbestrahlten Probe

Das Thermolumineszenz Emissionsspektrum einer unbestrahlten Glasprobe wurde als Summe von vier Aliquote aus demselben Displayglas bestimmt. Das von der Wärmestrahlung herrührende Signal wurde mit einer zweiten Messung bestimmt und für jede TL-Spektralmessung korrigiert. Bei einer Temperatur von über 300°C zeigt das TL-Spektrum des intrinsischen Nulldosissignals einer unexponierten Glasprobe ein ähnliches Spektrum mit Emissionspeaks bei Wellenlängen von ca. 380 und 465 nm wie eine bestrahlte Probe (siehe Abbildung 4.2.3). Somit ist es unmöglich, das strahleninduzierte TL-Signal anhand geeigneter optischer Filter vom intrinsischen Hintergrundsignal zu trennen.

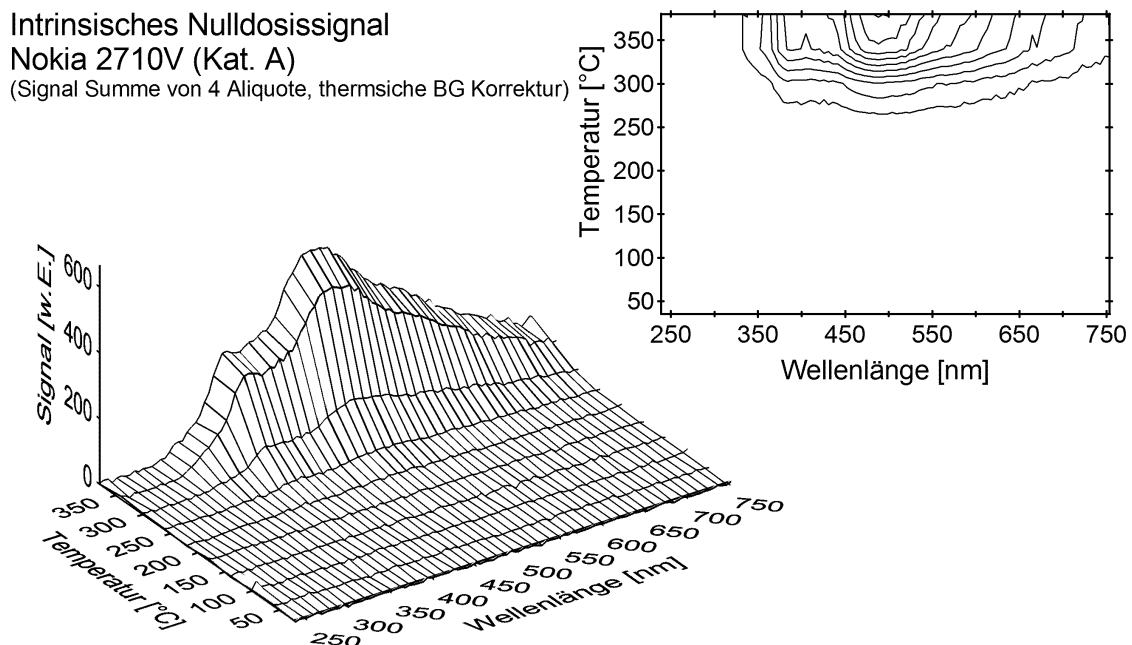


Abbildung 4.2.3: TL-Spektrum einer unexponierten Glasprobe (Kategorie A). Das intrinsische Null-dosissignal besitzt im TL-Spektrum ähnliche Wellenlängenpeaks wie das Spektrum einer bestrahlten Probe für Temperaturen $> 300^{\circ}\text{C}$ (adaptiert aus Discher und Woda (2014)).

4.3 Dosimetrische Eigenschaften von Borosilikatglas (Kategorie B)

Aufgrund der Ergebnisse der Messung des TL-Emissionsspektrums wurde das Detektionsfenster für Borosilikatgläser (Kategorie B) optimiert. Dazu wurde das Detektionsfenster mit einer Kombination aus Langpassfilter (Schott OG530) und Hitze absorbierendem Filter (HA03) gewählt, um ein Detektionsfenster im Wellenlängenbereich von 530-630 nm zu erhalten. Die dosimetrischen Eigenschaften von Borosilikatglas konnten so im optimierten Detektionsfenster neu bewertet werden.

Der Vergleich einer ungebleichten TL-Messung im UV-Bereich (Hoya U-340) mit einer ungebleichten Messung im neu gewählten Detektionsfenster zeigt eine Verschiebung des Peaks zu höheren Temperaturen von ca. 80°C auf ca. 150°C mit einer gleichzeitigen Verbreiterung der TL-Ausleuchtkurve (siehe Abbildung 4.3.1a).

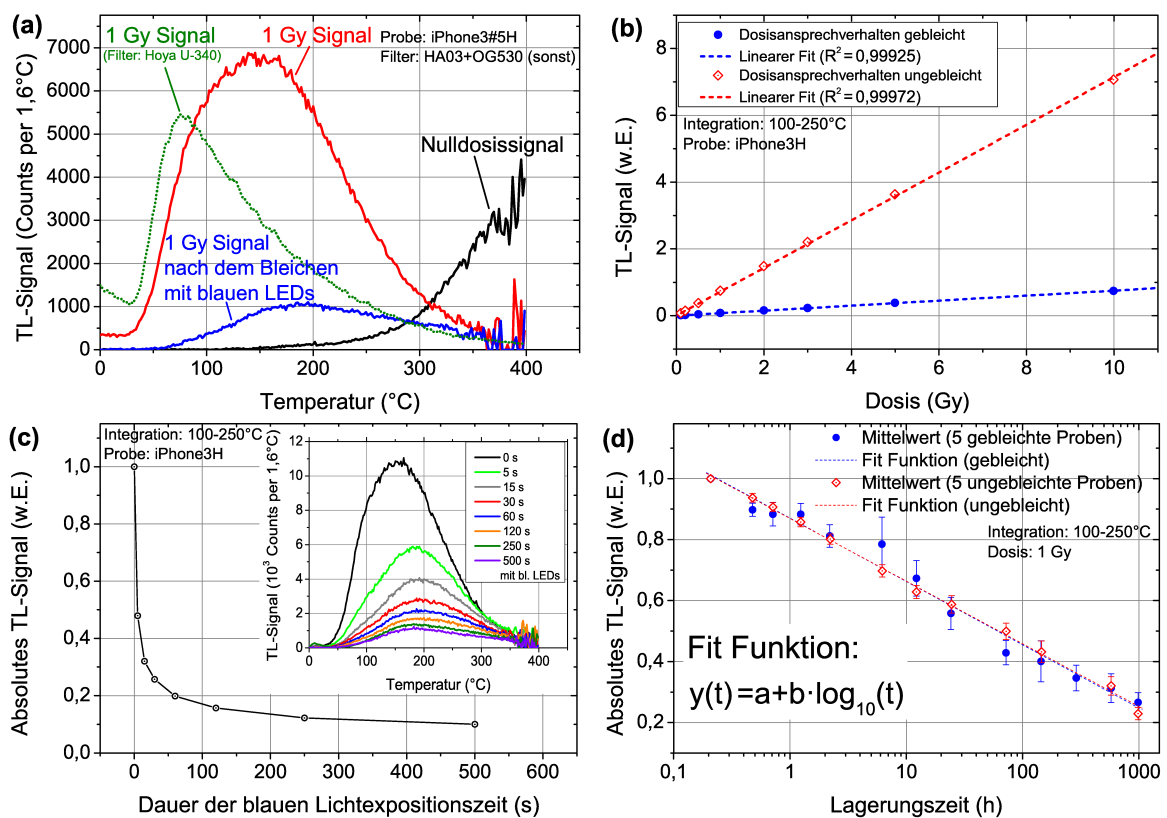


Abbildung 4.3.1: Untersuchungen der dosimetrischen Eigenschaften von Glas der Kategorie B im optimierten 530-630 nm Detektionsfenster: (a) TL-Ausleuchtkurven des intrinsischen Nulldosissignals, des strahleninduzierten Dosissignals von 1 Gy (ungebleicht und vorgebleicht) und repräsentativ des 1 Gy Signals, gemessen im UV-Detektionsfenster (Hoya U-340), (b) Dosisansprechverhalten des TL-Signals mit unterschiedlichen Messprotokollen (ungebleicht und vorgebleicht), (c) optische Stabilität des TL-Signals gebleicht mit den blauen LEDs des Messgerätes, (d) thermische Stabilität des TL-Signals mit unterschiedlichen Messprotokollen (ungebleicht und vorgebleicht) (adaptiert aus Discher und Woda (2014)).

Zusätzlich wurde ein vorgebleichtes TL-Signal mit einer Vorbleichzeit von 500 s mit blauen LEDs aufgezeichnet. Für beide Protokolle (ungebleicht und vorgebleicht) wurde das Dosisansprechverhalten im neu gewählten Detektionsfenster bestimmt (siehe Abbildung 4.3.1b). Es wird ein lineares Verhalten zwischen Dosis und TL-Signal im ausgewählten Integrationsbereich 100-250°C festgestellt. Beide Messprotokolle (ungebleicht und vorgebleicht) wurden anschließend im Dosisbereich zwischen 100 mGy und 10 Gy getestet.

Die optische Stabilität des TL-Signals wurde für Borosilikatglas (Glas Kategorie B) in Abbildung 4.3.1c neu bewertet. Verglichen mit Kalk-Aluminiumsilikatglas (Glas Kategorie A) ist die Abnahme des integrierten Signals mit steigender Lichtexpositionszeit bei einer Ausleuchtzeit von 500 s mit blauen LEDs um einen Faktor zwei stärker ausgeprägt (Discher und Woda (2013)). Bei der Messung der unterschiedlichen Bleichzeiten wurde jeweils die gleiche Zeitspanne zwischen Bestrahlungsende und TL-Messung gewählt, um den Effekt des Signalfadings auszuschließen. Dabei zeigen die TL-Ausleuchtcurven eine stärkere Intensitätsabnahme im Niedertemperaturbereich nach der ersten optischen Stimulation von 5 s als im höheren Temperaturbereich der Kurve. Dies führt zu einer leichten Verschiebung der gesamten Ausleuchtcurvenform mit einer Peaktemperatur von 150°C für eine ungebleichte Probe zu ungefähr 190°C für eine gebleichte Probe. Mit ansteigender Bleichdauer (> 5 s) ist eine gleichmäßige Abnahme der Ausleuchtcurve zu beobachten.

Ebenfalls wurde die thermische Stabilität des TL-Signals mithilfe einer Lagerungskurve in Abbildung 4.3.1d bestimmt. Dabei wurden erneut die beiden Protokolle ungebleicht und gebleicht mit 500 s blauen LEDs miteinander verglichen. Die Lagerungskurve wurde jeweils mit fünf Glasproben bestimmt, wobei der Mittelwert und die Standardabweichung für jeden einzelnen Lagerungspunkt berechnet wurden. Eine Abnahme des TL-Signals mit ansteigender Lagerungszeit von mehreren Minuten bis 42 Tage wird für das Integrationsintervall 100-250°C beobachtet. Die Lagerung erfolgte lichtgeschützt im Dunkeln und bei Raumtemperatur.

Das Ergebnis ist eine nahezu gleiche Fadingrate für ungebleichte und vorgebleichte Glasproben. Dies unterscheidet sich deutlich von den Beobachtungen der Glasproben aus Glaskategorie A. Das Messprotokoll mit Vorbleichen reduzierte die Fadingrate bei einer Lagerungsdauer von 1000 h signifikant um einen Faktor zwei (Discher und Woda (2013)). Das Signalfading $y(t)$ abhängig von der Lagerungszeit t der Gläser der Kategorie B kann mit folgendem funktionalen Zusammenhang beschrieben werden:

$$y(t) = a + b \cdot \log_{10}(t). \quad (4.3.1)$$

Die beiden freien Parameter a und b berechnen sich für die gebleichte Fadingkurve mit $a = 0,870 \pm 0,015$ und $b = -0,208 \pm 0,009$ bei $R^2 = 0,97956$ und unterscheiden sich nicht signifikant zu den Parametern der ungebleichten Fadingkurve.

Mit einem Glasprobensatz von 13 Gläsern der Kategorie B wurde eine Verteilung der intrinsischen Hintergrunddosis untersucht (siehe Abbildung 4.3.2). Die intrinsische Hintergrunddosis wurde aus dem Nulldosissignal mit einer Kalibrationsmessung bestimmt, wobei das Messprotokoll „500 s Vorbleichen mit blauen LEDs“ benutzt wurde.

Die Messungen wurden mit geätzten und ungeätzten Glasproben mithilfe des Standardphotomultipliers des Risø Messgeräts (Thorn-EMI 9235Q mit Detektionsfenster von 530-630 nm) und mit sechs ungeätzten Glasproben mithilfe eines rotempfindlichen Photomultipliers

(Hamamatsu H7421-40 mit einem Detektionsfenster von 530-720 nm) durchgeführt und verglichen. 11 der 13 ungeätzten Glasproben zeigen im Detektionsfenster von 530-630 nm eine intrinsische Dosis von weniger als 600 mGy. Jedoch zeigen die verbleibenden zwei Proben eine relativ hohe Hintergrunddosis. Das Ergebnis für die geätzten Gläser bestätigt die Beobachtungen an Gläsern der Kategorie A, dass das Ätzen der Gläser mit konzentrierter Flußsäure (HF, 40 %) für 4 min das intrinsische Hintergrundsignal signifikant reduziert, wobei die Dosisinformation nicht beeinflusst wird (siehe Ergebnisse in Kapitel 4.1, Abbildung 4.1.2).

Aufgrund der geringen Anzahl von nur 13 Messungen kann mit dem im Anhang A.1 beschriebenen Ansatz nur eine grobe Abschätzung der Nachweisgrenze erfolgen. Für ungeätzte Proben wird eine Nachweisgrenze von ungefähr 1370 mGy berechnet, für geätzte Proben hingegen wird die Nachweisgrenze auf ungefähr 210 mGy bestimmt. Es sind jedoch mehr Messungen an einem größeren Satz unterschiedlicher Displaygläser der Kategorie B nötig, um die Nachweisgrenze für Glasproben der Kategorie B verlässlich abzuschätzen.

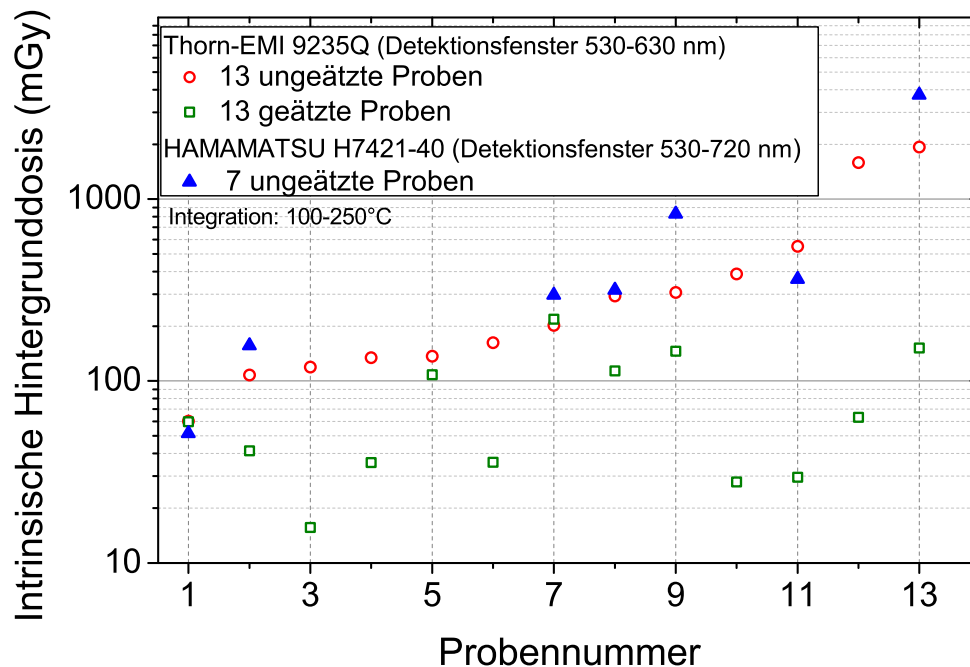


Abbildung 4.3.2: Untersuchungen der intrinsischen Hintergrunddosis von Glasproben der Kategorie B (ungeätzt und geätzt). Vergleichsmessungen wurden mit einem rottempfindlichen Photomultiplier durchgeführt (adaptiert aus Discher und Woda (2014)).

4.4 Bestimmung der Energie- und Richtungsabhängigkeit von Displayglas

Die Untersuchungen von Displayglas als Notfalldosimeter (Discher und Woda (2014); Discher et al. (2013); Discher und Woda (2013)) fokussierten sich im Wesentlichen auf die Dosisbestimmung im Material. Die Dosis in Luft oder die Ganzkörperdosis eines Unfallopfers, welches das Mobiltelefon bei sich trägt, kann jedoch signifikant unterschiedlich sein. Dies war der Anlass zur Untersuchung der Richtungs- und Photonen-Energieabhängigkeit von Displayglas als Notfalldosimeter. Dabei wurden Mobiltelefone derart präpariert, um eine Glasprobe mittig aus dem hinteren Displayglas zur Bestrahlung einzusetzen und zur Messung zu entnehmen.

4.4.1 Energieabhängigkeit von Displayglas

Das relative Detektoransprechverhalten wurde mithilfe eines Nokia 5250 Mobiltelefons (Glas Kategorie A) unter einem Einfallswinkel von 0° (frontal, antero-posterior (AP) Bestrahlung gemäß International Commission on Radiological Protection (ICRP) (2010)) mit zwei unterschiedlichen Expositionsgeometrien bestimmt: Bestrahlung des Mobiltelefons fixiert an einem ISO-Wasserphantom (ISO 4037-3 (1999)) und Bestrahlung des Mobiltelefons frei in Luft.

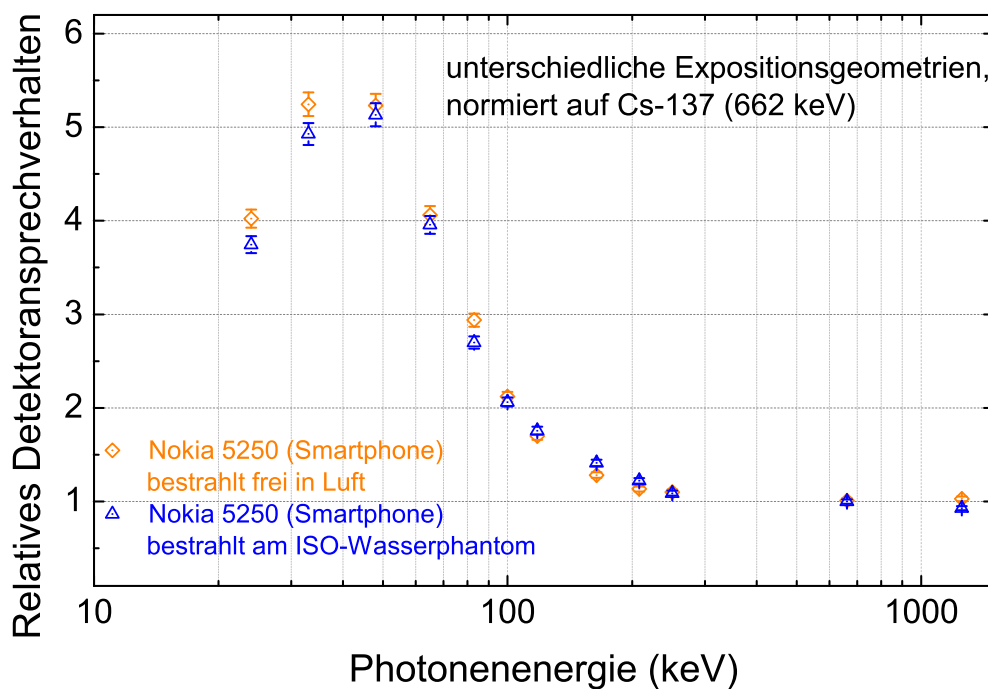


Abbildung 4.4.1: Relatives Detektoransprechverhalten mit unterschiedlichen Expositionsgeometrien normiert auf Cs-137 (662 keV). Die Kurven zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen der Bestrahlung am ISO-Wasserphantom und der Bestrahlung des Mobiltelefons frei in Luft (adaptiert aus Discher et al. (2014a)).

Die Bestrahlungen wurden am SSDL des Helmholtz Zentrums München durchgeführt (siehe Details der Bestrahlungsanlagen in den Kapiteln 3.3.1 und 3.3.2). Zur Gammabestrahlung wurden die Cs-137 ($E_{\text{mittel}} = 662 \text{ keV}$) und die Co-60 ($E_{\text{mittel}} = 1250 \text{ keV}$) Quellen benutzt. Die Röntgenbestrahlungen wurden an den Anlagen PTW/Yxlon MG165 und MG320 mit der ISO-Strahlenqualität der N-Serie¹ durchgeführt (ISO 4037-1 (1996)).

Es wurde kein signifikanter Unterschied der Photonen-Energieabhängigkeit, normiert auf Cs-137, zwischen den beiden Expositionsgeometrien in Abbildung 4.4.1 festgestellt. In beiden Fällen nimmt das Ansprechverhalten für niedrige Photonenenergie bis zu einem Faktor von 5,2 zu und fällt für eine Energie von $< 30 \text{ keV}$ ab. Das Abfallen ist erklärbar durch Absorptionseffekte der obersten Schichten des Mobiltelefons, die sich vor dem Displayglas befinden.

Dieses Ergebnis der Energieabhängigkeit zeigt einen deutlichen Unterschied zu den Ergebnissen für Widerstände auf der Platine, die von Ekendahl und Judas (2012) und Dürr (2011) beobachtet wurden. In diesen Studien wurde eine maximale Überschätzung für niedrige Photonenenergien um einen Faktor von 2,5 und ein stärkerer Signalabfall für niedrige Photonenenergien beobachtet.

Das relative Detektoransprechverhalten wurde als Funktion der Photonenenergie für drei unterschiedliche Mobiltelefone untersucht (Abbildung 4.4.2). Die Mobiltelefone stammten von unterschiedlichen Herstellern (Nokia, Samsung), sowie aus unterschiedlichen Mobiltelefongenerationen (einfaches Mobiltelefon oder Smartphone) und wurden in unterschiedliche Displayglaskategorien (Kategorie A und B) klassifiziert. Trotz der Unterschiede im Aufbau der untersuchten Mobiltelefone und der möglichen Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung, welche sich in der unterschiedlichen Kategorisierung ausdrückt, zeigt sich ein ähnlicher Verlauf der Energieabhängigkeit für die drei untersuchten Proben (siehe Abbildung 4.4.2).

Für einen qualitativen Vergleich der Ergebnisse wurde der relative Massen-Energieabsorptionskoeffizient für Displayglas zu Luft berechnet. Dieser wurde mithilfe der Glaszusammensetzung, die für Glaskategorie A mit einer EDX Messung (energiedispersive Röntgenspektroskopie) bestimmt wurde, und mit Tabellenwerten aus der Literatur (Hubbell und Seltzer (2004)) berechnet. Die Grundlagen zur Berechnung dieses Koeffizienten werden im Anhang A.2 vorgestellt. Der prinzipielle Verlauf der berechneten Werte stimmt mit den experimentell bestimmten Daten überein. Da die Reduktion durch Abschirmungseffekte nicht berücksichtigt wurde, ist eine Abweichung bei niedrigen Energien zu erkennen.

¹N-Serie steht in der ISO-Norm für die Abkürzung der Strahlenqualität der schmalen Luft-Kermarate Serien (engl. narrow air kerma rate series). Sie wird mit dem eingestellten Spannungspotenzial der filtrierten Röntgenstrahlung angegeben.

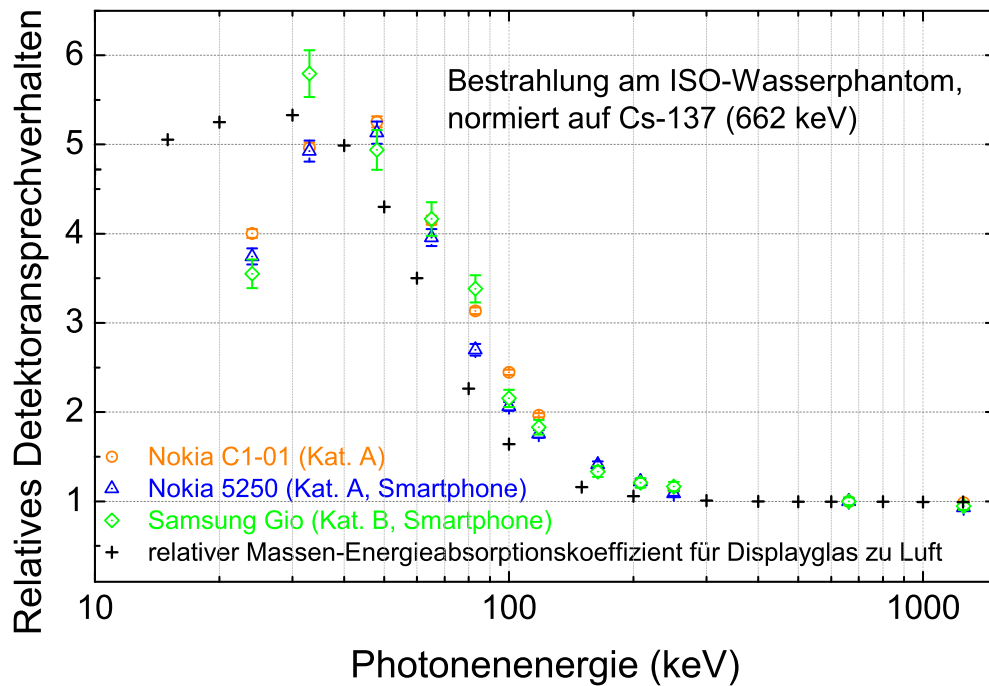


Abbildung 4.4.2: Relatives Detektoransprechverhalten normiert auf Cs-137 (662 keV) für drei untersuchte Mobiltelefone, die ein ähnliches Ansprechverhalten zeigen. Die Daten wurden mit dem relativen Massen-Energieabsorptionskoeffizienten für Displayglas zu trockener Luft verglichen, berechnet nach Hubbell und Seltzer (2004), und zeigen eine prinzipielle Übereinstimmung (adaptiert aus Discher et al. (2014a)).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Displayglas eine ausgeprägte Energieabhängigkeit mit einer Überschätzung um einen Faktor fünf für niedrige Photonenenergien < 150 keV besitzt. Für den Vergleich der absorbierten Dosis im Material mit der absorbierten Dosis in Luft oder weichem Gewebe sollte deshalb das Detektoransprechverhalten für Displayglas bei Bestrahlungen mit niedriger Energie berücksichtigt werden. Aufgrund der vergleichbar geringen Anzahl untersuchter Mobiltelefone ist es nicht möglich zu entscheiden, ob die Energieabhängigkeit von Displayglas universell für jede Displayglasprobe anwendbar ist oder ob es eine signifikante Variabilität der chemischen Zusammensetzung des Displayglases gibt. Hinweise dazu sind in der Veröffentlichung in Bassinet et al. (2014b) erkennbar, in welcher für extrahierte Displaygläser eine Überschätzung um einen Faktor von 10-11 für niedrige Photonenenergien bei 50 keV festgestellt wurde.

4.4.2 Richtungsabhängigkeit von Displayglas

Zunächst galt es festzustellen, ob die Richtungsabhängigkeit von Displayglas als spiegelsymmetrisch angenommen werden kann. Die Annahme wird dadurch begründet, dass erstens die Proben mittig im Displaybildschirm eingesetzt und entnommen werden und zweitens das Display des Mobiltelefons einen symmetrischen Aufbau relativ zur mittigen Drehachse besitzt. Für die Untersuchung wurde das Mobiltelefon Nokia 5250 eingesetzt und mit der Cs-137 Quelle bestrahlt.

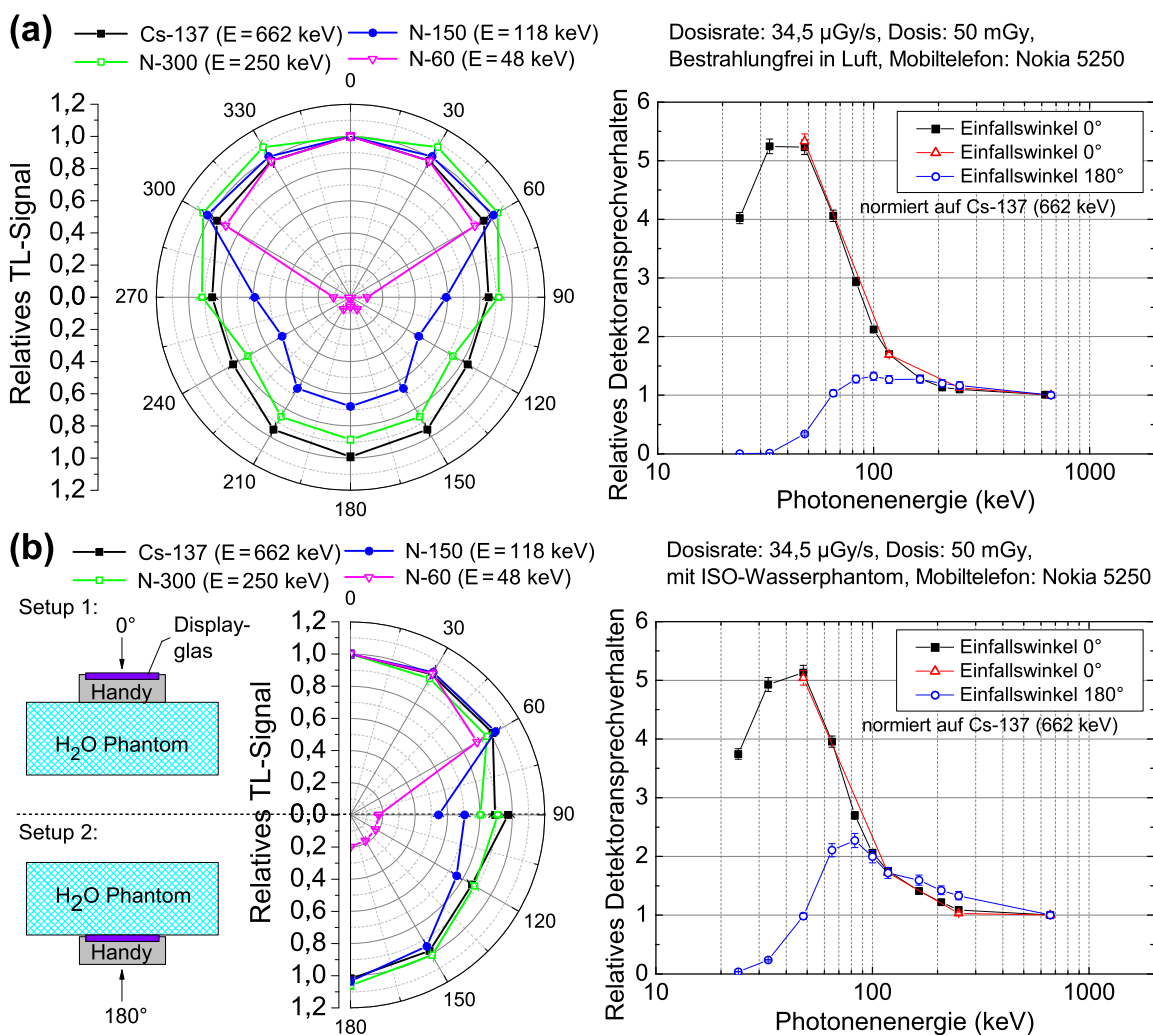


Abbildung 4.4.3: Richtungsabhängigkeit von Displayglas für ein Mobiltelefon bestrahlt frei in Luft (a) und bestrahlt an einem ISO-Wasserphantom (b). Die Daten für die Richtungsabhängigkeit wurden auf die Frontalbestrahlung bei einem Einfallswinkel von 0° für jede Photonenenergie normiert. Die Bestrahlungen mit dem Wasserphantom wurden mit zwei verschiedenen Aufbauvarianten durchgeführt, die als Zeichnungen dargestellt sind: Setup 1 zeigt die Frontalbestrahlung des Displayglases (Einfallswinkel zwischen 0° und 90°). Setup 2 beschreibt die rückseitige Bestrahlung des Displayglases, wobei das Displayglas in Richtung des Wasserphantoms zeigt (Einfallswinkel zwischen 90° und 180°). Zusätzlich sind die Auswirkungen auf die Photonen-Energieabhängigkeit des Detektors für einen Einfallswinkel von 0° und 180° für die unterschiedlichen Bestrahlungsbedingungen dargestellt. Die schwarzen Symbole im oberen und unteren rechten Bereich geben die Daten der frontalen Bestrahlungen aus Abbildung 4.4.1 wieder, die roten Symbole sind Messwiederholungen zum Vergleich und die blauen Symbole stammen aus Daten der rückseitigen Bestrahlungen (adaptiert aus Discher et al. (2014a) und Discher et al. (2014b)).

Die Winkelabhängigkeit wurde zwischen 0° und 360° in 30° Schritten gemessen. Die experimentellen Werte wurden zwischen 180° und 360° mit den duplizierten Werten der entsprechenden Winkel zwischen 0° und 180° verglichen. Der Vergleich zeigt, dass die Annahme einer

Achsensymmetrie zur mittigen Drehachse gerechtfertigt ist. Dieser Ansatz wird für die weiteren Messungen übernommen, da die Anzahl der nötigen zeitaufwendigen Messungen dadurch verringert werden kann. Die Richtungsabhängigkeit von Displayglas wurde, wie für die Energieabhängigkeit im vorherigen Kapitel, mit zwei verschiedenen Expositionsgeometrien frei in Luft und mit einem ISO-Wasserphantom durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 4.4.3a und b gezeigt.

Für die Bestrahlung frei in Luft zeigt die Richtungsabhängigkeit von Displayglas folgendes Ergebnis (Abbildung 4.4.3a): Für die drei höchsten untersuchten Energien bewegt sich die Variation des Ansprechverhaltens des Detektors zwischen 16 % für Cs-137 und 51 % für N-150 ($E_{\text{mittel}} = 118 \text{ keV}$). Für die niedrigste Energie N-60 ($E_{\text{mittel}} = 48 \text{ keV}$) wird ein starker Abschirmungseffekt durch die Rückseite des Mobiltelefons, verursacht durch den Mobiltelefon-Akku, zwischen den Bestrahlungswinkeln 90° und 270° beobachtet.

Bestrahlungen am ISO-Wasserphantom zur Untersuchung der Richtungsabhängigkeit wurden unter zwei verschiedenen Aufbauvarianten bzw. Setups durchgeführt: Für Einfallswinkel zwischen 0° und 90° wurde das Mobiltelefon an der Hinterseite eines Wasserphantoms fixiert (Setup 1). Für die verbleibenden Einfallswinkel zwischen 90° und 180° wurde das Mobiltelefon in Setup 2 umgedreht und mit der Vorderseite fixiert, wobei die Displayseite nun in Richtung Wasserphantom zeigte. Dieser Aufbau simuliert, dass der Displaybildschirm zum Körper des Trägers zeigt. Die Variation des Detektoransprechverhaltens für Bestrahlungen mit dem ISO-Wasserphantom liegt zwischen 13 % für die Cs-137 Bestrahlung und 82 % für die N-60 ($E_{\text{mittel}} = 48 \text{ keV}$) Bestrahlung (siehe Abbildung 4.4.3b).

Die Auswirkungen auf die Photonen-Energieabhängigkeit werden abhängig von den Bestrahlungsbedingungen, wie frontale gegen rückseitige Bestrahlungen und Bestrahlungen mit ISO-Wasserphantom gegen Bestrahlungen frei in Luft untersucht. Für frontale Bestrahlungen frei in Luft und mit dem ISO-Wasserphantom ist die Energieabhängigkeit für Displayglas fast gleich (siehe Abbildung 4.4.1 für den direkten Vergleich). Die Auswirkung der Rückstreuung auf die Photonen-Energieabhängigkeit vom ISO-Wasserphantom kann für frontale Bestrahlungen in Setup 1 aufgrund der abschirmenden Wirkung der Rückseite des Mobiltelefons vernachlässigt werden.

Im Fall der rückseitigen Bestrahlung frei in Luft weist die Photonen-Energieabhängigkeit einen leichten Anstieg um einen Faktor von 1,3 für Energien um 80 keV auf und fällt für niedrigere Photonenenergien fast auf Null ab. Für die rückseitige Bestrahlung mit dem Wasserphantom in Setup 2 zeigt die Ansprechkurve einen maximalen Peak von einem Faktor von etwa 2,3 für Energien um 80 keV gefolgt von einem Abfall für niedrigere Photonenenergien. Die unterschiedliche relative Detektorantwort rührt von der Kombination aus Abschirmung durch das Mobiltelefon und Rückstreuung des ISO-Wasserphantoms her. Verglichen zu der Bestrahlung frei in Luft (siehe offene blaue Symbole in Abbildung 4.4.3a, rechts) wird der Abschirmungseffekt der Rückseite des Mobiltelefons in Setup 2 durch den Rückstreueffekt des Wasserphantoms zum Teil wieder aufgehoben (siehe offene blaue Symbole in Abbildung 4.4.3b, rechts). Die Messwiederholungen (rote Symbole) geben eine gute Reproduzierbarkeit der Messung wieder.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Richtungsabhängigkeit für Displayglas bezogen auf die Dosis in Luft und unabhängig von der Expositionsgeometrie innerhalb eines Einfallswinkels von $\pm 60^\circ$ ausreichend flach ist (Bestrahlung frei in Luft oder mit ISO-Wasserphantom).

Weiter wird ein starker Abschirmungseffekt von niedrigen Photonenenergien beobachtet und die Photonen-Energieabhängigkeit ist für rückseitige Bestrahlungen des Mobiltelefons von der Bestrahlungsbedingung abhängig.

4.5 Signalfadingfunktion und Variabilität von Displayglas

Displaygläser zeigen ein Signalfading abhängig von der Zeitdauer bei der Lagerung in Dunkelheit und bei Raumtemperatur (Discher und Woda (2013)). Deshalb ist es für die Dosisbestimmung notwendig, das Signalfading mit einer Lagerungskurve zu korrigieren. Mithilfe einer Lagerungskurve wird die thermische Stabilität eines TL-Signals bestimmt. Sie gibt an, wie stark das dosisinduzierte TL-Signal nach einer verstrichenen Zeit im Verhältnis zu einem ungelagerten TL-Signal im selben Integrationstemperaturbereich abgenommen hat. Dabei wird das TL-Signal bestrahlter Proben mit unterschiedlicher Lagerungsdauer mithilfe des gewählten Messprotokolls gemessen. Das Signalfading wurde in Discher und Woda (2013) für eine Glasprobe der Kategorie A bis zu einer Lagerungszeit von 113 Tagen bestimmt und mit 17 Glasproben aus unterschiedlichen Mobiltelefondisplays für vier ausgewählte Lagerungszeiten überprüft.

Um die vorhandene Lagerungskurve aus Discher und Woda (2013) zu erweitern, wurde die Variabilität der Fadingrate für 20 Displaygläser der Kategorie A aus unterschiedlichen Mobiltelefonen bestimmt. Eine vollständige Lagerungskurve mit Lagerungszeiten bis zu 400 Tagen in Dunkelheit und bei Raumtemperatur wurde mit dem Messprotokoll „500 s Vorbleichen mit blauen LEDs“ für geätzte und ungeätzte Glasproben aufgenommen, um zu überprüfen, ob der Vorbehandlungsschritt des Ätzens eine Auswirkung auf das Signalfading besitzt. Ebenfalls wurde in der erweiterten Untersuchung getestet, ob das Signalfading dosisabhängig ist.

In Abbildung 4.5.1 ist die Ausprägung des Fadings nach der jeweiligen Lagerungszeit dargestellt. Von den neu durchgeführten Fadinguntersuchungen der 20 Glasproben sind jeweils die Mittelwerte und die zugehörigen Standardabweichungen, sowie die Messungen der einzelnen Glasprobe und die ermittelte Fitfunktion aus Discher und Woda (2013) dargestellt. Die neu erhobenen Daten zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messungen der einzelnen Glasprobe. Darüber hinaus kann beim Vergleich von geätzten und ungeätzten Proben kein signifikanter Unterschied im Fadingverhalten des TL-Signals festgestellt werden. Ebenso ist kein signifikanter Unterschied des Fadingverhaltens zwischen bestrahlten Proben mit 1 Gy oder der fünffachen Dosis erkennbar.

Eine Fitfunktion wurde durch die Gesamtheit der erhobenen Daten berechnet, wobei angelehnt an Discher und Woda (2013), eine generalisierte hyperbolische Funktion mit zwei freien Parametern a und b benutzt wurde:

$$y(t) = \frac{1}{(1 + a \cdot t)^b}. \quad (4.5.1)$$

Die Parameter berechnen sich zu $a = 9,06 \pm 3,20$ und $b = 0,111 \pm 0,009$, wobei eine direkte Gewichtung der Unsicherheit bei der Berechnung der Parameter integriert wurde. Für die Signalfadingfunktion $y(t)$ wurde mit einer analytischen Berechnung, ausgehend von den Unsicherheiten der Parameter a und b , eine absolute Unsicherheit von $\Delta y(t > 1 \text{ Tag}) > 0,031$ bzw. $\Delta y(t < 21 \text{ Tagen}) < 0,033$ bestimmt.

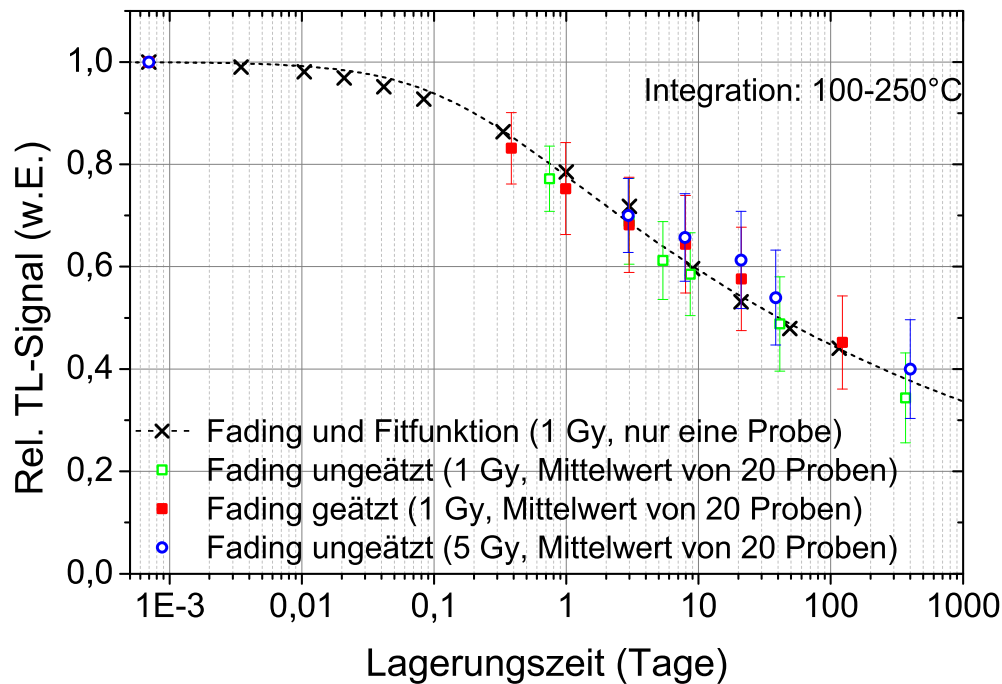


Abbildung 4.5.1: Signalabnahme durch Fading bei unterschiedlicher Lagerungszeit. Die eventuelle Auswirkung durch das Ätzen der Glasproben und eventuelle Dosisabhängigkeit auf das Fadingverhalten des TL-Signals wurde mit 20 unterschiedlichen Displayglasproben untersucht. Mit einer Fitfunktion kann das Signalfading korrigiert werden.

Im Mittel wird von dem Datensatz der 20 untersuchten Displaygläser als Variabilität ein Wert der Standardabweichung von 8,7 % berechnet. Dies ist, verglichen zur vorläufigen Abschätzung der Variabilität von 7,0 % in Discher und Woda (2013) geringfügig höher. Im Vergleich zur analytischen Berechnung der Unsicherheit der Signalfadingfunktion $y(t)$ ist dieser Wert jedoch deutlich höher. Bei der Untersuchung der Fadingkurven für jede einzelne Glasprobe gibt es systematisch höhere und niedrigere Fadingraten. Die Unsicherheit der Fadingkorrektur aus der mittleren Standardabweichung der Fadingwerte wurde konservativ auf $\Delta F = 0,087$ bestimmt. Diese beinhaltet den systematischen Fehler, der bei der Verwendung der Lagerungskurve zur Fadingkorrektur eines beliebigen Mobiltelefons auftritt.

Zusammengefasst zeigt die Untersuchung der Signalfadingfunktion und Variabilität von Displayglas, dass der Vorbehandlungsschritt des Ätzens keine signifikante Auswirkung auf das Signalfading besitzt und das Fadingverhalten innerhalb der Unsicherheiten von der applizierten Dosis unabhängig ist.

Kapitel 5

Strahlentransportrechnungen

Die Strahlentransportrechnungen wurden mit dem Monte Carlo N-Particle-Transport-Code MCNP Version 5 (X-5 Monte Carlo Team (2003a,b)) durchgeführt, der von der Institution Los Alamos National Laboratory entwickelt wurde und vom Radiation Safety Information Computational Center vertrieben wird.

Das Softwarepaket wird weitreichend für die Simulation spezifischer Anwendungen der Strahlenphysik, wie die Simulation von Kernprozessen, Fragestellungen des Strahlenschutzes und der Dosimetrie oder zur Optimierung von Detektor- und Beschleunigerdesigns verwendet (Dunn und Shultis (2012); Shultis und Faw (2011)).

In Kapitel 5.1 werden zunächst die Grundlagen der Strahlentransportrechnung erläutert und die Photonenquellen, Geometrien und Spezifizierungen des Materials beschrieben. In der Simulation wurden im ersten Schritt Bestrahlungen an extrahierten Glasproben durchgeführt und im zweiten Schritt ein detailliertes Modell eines Mobiltelefons konstruiert, mit dem durchgeführte Experimente verifiziert wurden. Dieses Kapitel erläutert die Umsetzung eines realistischen Geometriemodells eines generalisierten Mobiltelefons mit dem Ziel, experimentelle Daten zu verifizieren, die in Kapitel 4.4 und in Discher et al. (2014a) gezeigt wurden.

5.1 Grundlagen der Strahlentransportrechnung

Die Strahlentransportrechnung stellt für komplexe dreidimensionale Problemstellungen ein theoretisches Experiment dar, bei dem der Zustand (Ort, Energie und Bewegungsrichtung) eines willkürlich ausgewählten Teilchens auf seinem Weg durch das Medium verfolgt wird (Dörschel et al. (1992)). Die Simulation beginnt zunächst mit der Ermittlung des Anfangszustands des Teilchens (ebd.). Mithilfe bestimmter Algorithmen (Zufallszahlengeneratoren) wird der Ort der ersten Wechselwirkung bestimmt, der von der freien Weglänge des Teilchens und seiner Energie abhängt, wobei der weitere Verlauf der Lebensgeschichte des Teilchens von der Art der Wechselwirkung abhängt (ebd.). Für Wechselwirkungen von Photonen mit Materie sind hauptsächlich drei Effekte abhängig von der Photonenenergie von Bedeutung: der Photoeffekt, der Compton-Effekt und die Paarbildung (X-5 Monte Carlo Team (2003a)). Liegt ein Streuprozess vor, wird nach der Wechselwirkung der neue Zustand des Teilchens ermittelt, indem die Energie und Richtung des Teilchens nach der Streuung aus dem Energie- und Impulserhaltungssatz berechnet wird.

Die Monte Carlo Transportrechnung wird solange schrittweise weitergeführt, bis der Teilchenweg einerseits durch Absorption beendet wird oder andererseits das Teilchen die Geometrieumgebung verlässt und für die Simulation irrelevant wird. Anschließend wird die Lebensgeschichte eines neuen Teilchens simuliert. Dieser numerische Prozess wird bis zu einer gewählten maximalen Anzahl an Teilchen wiederholt.

Mithilfe einer Vielzahl an berechneten Teilchenwegen können bestimmte Energie- und Richtungsintervalle der Flussdichte oder daraus abgeleitete Größen in einem bestimmten interessierenden Volumen, beispielsweise in der Detektorzelle, ermittelt werden (Dörschel et al. (1992)).

5.1.1 Beschreibung der Photonenquellen

Für die Simulation der Cs-137 Gammaquelle wurde eine kollimierte, monoenergetische Punktquelle mit einem Öffnungshalbwinkel von $9,92^\circ$ und einer Photonenenergie von 0,662 MeV implementiert¹.

Die Röntgenstrahlenquelle wird als kollimierte Quelle mit einem Öffnungshalbwinkel von $9,92^\circ$ und einem Photonen-Energiespektrum in der Simulation approximiert. Das Photonen-Energiespektrum der N-Serie (N-30 bis N-300 nach ISO 4037-1 (1996)) wurde als Histogramm mit einer Energieauflösung von 0,5 keV übernommen. Mithilfe des Programms „SpekCalc V1.0“ (Poludniowski et al. (2009)) wurden die jeweiligen Zentralachsen-Spektren für jede Filterspezifikation nach der ISO-Norm berechnet. Die Filtrierung kann mit den relevanten Filtermaterialien (Al, Cu, Sn) ausgewählt werden. Das Programm beinhaltet keine Spezifikation des Elements Blei (Pb). Jedoch werden bei der Filtrierung für die Strahlenqualitäten N-200, N-250 und N-300 jeweils Pb-Schichten eingesetzt. Um das Problem zu lösen, wurden die Spektren für Al-, Cu- und Sn-Schichten mit dem Programm berechnet und anschließend für die Pb-Filterschicht anhand der Schichtdicke und des Massenabschwächungs-Koeffizienten μ/ρ gemäß Hubbell und Seltzer (2004) korrigiert.

Die berechneten Photonen-Energiespektren der N-Serie wurden jeweils mit gemessenen Spektren aus dem GSF-Bericht S 560 (Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, München) verglichen und zeigen eine qualitativ gute Übereinstimmung (Seelentag et al. (1979)).

5.1.2 Bestimmung der absorbierten Dosis

In MCNP5 wird die absorbierte Dosis pro Quellenteilchen gemittelt über das Volumenelement in einer Detektorzelle als F6 Tally bezeichnet. Diese wird aus dem Weglängen-Schätzer (engl. track length estimator) berechnet.

In einem ersten Durchlauf wurde die Energiedeposition in einem Glasstück des Mobiltelefons simuliert. In einem zweiten Durchlauf wurde die Dosis in Luft an derselben Position des Glasstückes ermittelt, wobei alle Materialien zu Luft geändert wurden. Die Ergebnisse werden entsprechend als $F6_{\text{Glas}}$ bzw. $F6_{\text{Luft}}$ bezeichnet.

¹Die Buchlerquelle Cs-137 besitzt ein kollimiertes Strahlenfeld mit einem Durchmesser von 35 cm bei einem Abstand von 1 m. Der Öffnungshalbwinkel des Strahlenfeldes kann folgendermaßen berechnet werden: $\varphi = \tan^{-1}(0,5 \cdot 0,35 \text{ m}/1 \text{ m}) = 9,92^\circ$. Der gleiche Öffnungswinkel wurde ebenfalls für die Röntgenquelle herangezogen (Greiter (2014)).

Gemäß Eakins et al. (2008) und Eakins (2009) hängt das Ansprechverhalten eines Detektors $R(\alpha, E)$, normiert auf die Photonenenergie von Cs-137 (662 keV), von der Energie E und dem Einfallswinkel α ab und wird mit den absorbierten Dosen $F6_{\text{Glas}}$ bzw. $F6_{\text{Luft}}$ berechnet:

$$R(\alpha, E) = \frac{F6_{\text{Glas}}(\alpha, E) / F6_{\text{Luft}}(0, E)}{F6_{\text{Glas}}(0, Cs) / F6_{\text{Luft}}(0, Cs)}. \quad (5.1.1)$$

Für ein Energieansprechverhalten eines Detektors $R_{\text{Energie}}(0, E)$ mit einem konstanten Einfallswinkel $\alpha = 0^\circ$ (frontal, antero-posterior (AP) Bestrahlung gemäß International Commission on Radiological Protection (ICRP) (2010)) wird Gleichung 5.1.1 zu:

$$R_{\text{Energie}}(0, E) = R(0, E) = \frac{F6_{\text{Glas}}(0, E) / F6_{\text{Luft}}(0, E)}{F6_{\text{Glas}}(0, Cs) / F6_{\text{Luft}}(0, Cs)}. \quad (5.1.2)$$

Die Winkelabhängigkeit eines Detektors bei konstanter Energie $R_{\text{Winkel}}(\alpha, E = \text{konst.})$ wird auf das Ansprechverhalten bei der Frontalbestrahlung $\alpha = 0^\circ$ normiert. Dabei erhält man ausgehend von Gleichung 5.1.2 die sogenannte Anisotropie-Funktion:

$$R_{\text{Winkel}}(\alpha, E) = \frac{R(\alpha, E)}{R(0, E)} = \frac{F6_{\text{Glas}}(\alpha, E)}{F6_{\text{Glas}}(0, E)}. \quad (5.1.3)$$

Die Ergebnisse der Simulation werden als Dosis pro Quellenteilchen angegeben. Um die simulierten Ergebnisse mit dem Experiment zu vergleichen, muss die Anzahl der Teilchen berechnet werden. Mit der Quellenaktivität² A und der Expositionsdauer t kann die Anzahl der Teilchen N wie folgt berechnet werden: $N = A \cdot t$.

Die gesamte akkumulierte Dosis D ist gegeben als:

$$D = F6 \cdot N. \quad (5.1.4)$$

Die Unsicherheit (1σ) der simulierten Ergebnisse stammt von der statistischen Unsicherheit der Simulation und der Unsicherheit der Quellenaktivität von 2 % (Greiter (2014), pers. Kommunikation) ab. Die Unsicherheit aus der Geometrie wurde nicht integriert, jedoch wird die Unsicherheit der Materialkomposition separat in Kapitel 5.4.1 diskutiert.

5.1.3 Geometrie und Spezifizierung des Materials

Die Geometrie in der Simulation wird mit rechteckigen Zellen angenähert. Für das Experiment mit den extrahierten Gläsern ist das Target ein Glasdetektor ($0,5 \times 0,5 \times 0,04 \text{ cm}^3$) zwischen zwei PMMA Platten mit den Dimensionen $15 \times 15 \times 0,3 \text{ cm}^3$. Eine PMMA Box gefüllt mit Wasser und den Dimensionen gemäß der ISO-Norm (ISO 4037-3 (1999)) stellt das Wasserphantom für die durchgeführten Experimenten dar.

²Die aktuelle Quellenaktivität A der Cs-137 Quelle wird mit der Dosisrate in Luft $\dot{D}=1981,023 \text{ mGy/h}$ (24.09.2013) und dem Konversionskoeffizient $\Gamma = 8,807 \cdot 10^{-2} \frac{\text{mGy m}^2}{\text{h GBq}}$ für Cs-137 im Gleichgewicht der Folgeprodukte aus Tschurlovits et al. (1992) über die Beziehung $A = \frac{\dot{D}}{\Gamma}$ berechnet. Die Wahrscheinlichkeit für den Kernübergang, die aus dem Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) (2007) Bericht entnommen werden kann, ist in dem Luft-Kerma Konversionskoeffizient Γ enthalten.

Die Geometrie eines im Experiment verwendeten Mobiltelefons (Nokia 5250) wurde durch einen Aufbau aus rechteckigen, aufeinandergestapelten Platten unterschiedlicher Materialien und Dimensionen angenähert. Eine dreidimensionale Gitternetzansicht und Seitenansicht, sowie eine offen geschnittene Seitenansicht der Geometrie des Mobiltelefons sind in Abbildung 5.1.1 gezeigt.

Die Elemente des Mobiltelefons sind im Einzelnen (inkl. jeweiliger Dicke): Touchscreen-Modul (1,6 mm) mit einer 100 nm dicken ITO (Indium-Zinnoxid) Beschichtung auf der Rückseite, Displaymodul aus zwei identischen Glasplatten (vorderes und hinteres Glas, jeweils 0,5 mm), Aluminiumabdeckung (0,5 mm), Aluminiumoxid-Keramikschiicht, welches die Keramikkörper der elektronischen Bauteile repräsentiert (0,5 mm), Leiterplatte (1,0 mm), Akku-Batterie (4,0 mm) und Kunststoffabdeckung aus Polyamid (1,0 mm). Die Abmessungen der Elemente wurden an dem auseinandergebauten Mobiltelefon Nokia 5250 abgemessen. Ein kleines Glasstück mittig auf der hinteren Displayglasplatte mit den Dimensionen $0,5 \times 0,5 \times 0,05 \text{ cm}^3$ stellt den Detektor dar. Für alle Simulationen ist der simulierte Bereich ein kubischer Raum mit den Dimensionen $200 \times 200 \times 350 \text{ cm}^3$, der mit trockener Luft gefüllt ist.

Die chemische Zusammensetzung und die mittlere Materialdichte wurden aus unterschiedlichen Datenblättern der Hersteller, Veröffentlichungen und Lehrbüchern entnommen. Die Zusammensetzung und Dichte des Materials sind mit der jeweiligen Referenzquelle im Anhang C zu finden (siehe Tabellen C.1 und C.3). Die Glaszusammensetzung des Detektors wird aus Discher et al. (2014a) übernommen, die mithilfe einer EDX (energiedispersive Röntgenspektroskopie) Messung bestimmt wurde.

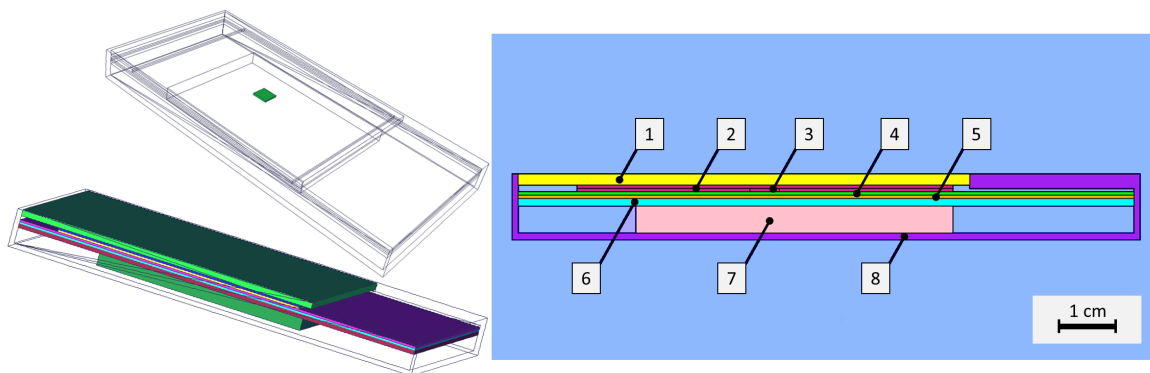


Abbildung 5.1.1: 3D Gitternetzansicht, offene Seitenansicht und geschnittene Seitenansicht der simulierten Geometrie des Mobiltelefons. Die Gitternetzdarstellung zeigt die genaue Lage der Detektorzelle. Die offene Seitenansicht zeigt die gestapelten Komponenten im Inneren des Mobiltelefons bei entnommener Kunststoffabdeckung. Die geschnittene Seitenansicht zeigt die Elemente des Mobiltelefons: (1) Touchscreen-Modul, (2) Display-Modul mit vorderem und hinterem Displayglas, (3) Glasdetektor als rechteckiges Stück aus dem hinteren Displayglas, (4) Aluminiumabdeckung, (5) Aluminiumoxid-Keramikschiicht der elektronischen Bauteile, (6) Leiterplatte, (7) Akku-Batterie und (8) Polyamid-Kunststoffabdeckung (adaptiert aus Discher et al. (2014b)).

5.2 MCNP Simulationen einfacher Versuchsdurchführungen

In einer einfachen Versuchsdurchführung wurde der Abstand zwischen Detektor und Strahlenquelle für die Berechnung der absorbierten Dosis im Glasdetektor und der Dosis in Luft variiert. Der Abstand lag zwischen 80 cm und 250 cm und bezog sich auf die Distanz des Quellenursprungs zur Vorderseite des Glasdetektors. Der Versuch wurde experimentell an der Buchleranlage mit einer Cs-137 Quelle durchgeführt. Als Glasdetektor diente ein $0,5 \times 0,5 \times 0,04 \text{ cm}^3$ großes Displayglasstück, das sich zwischen zwei PMMA Platten mit den Dimensionen $15 \times 15 \times 0,3 \text{ cm}^3$ befand. Der gleiche Versuchsaufbau wurde mit MCNP simuliert.

Wie zu erwarten folgen die experimentellen und simulierten Ergebnisse dem Dosis-Abstandsquadratgesetz (siehe Tabelle 5.1).

Abstand (cm)	eingestellte Dosis in Luft (mGy)	simulierte Dosis in Luft (mGy)	gemessene absorbierte Dosis (mGy)	simulierte absorbierte Dosis (mGy)
80	516 ± 10	526 ± 11	550 ± 31	525 ± 11
100	330 ± 7	336 ± 7	335 ± 19	335 ± 7
150	147 ± 3	148 ± 3	152 ± 9	148 ± 3
200	83 ± 2	83 ± 5	83 ± 5	83 ± 2
250	53 ± 1	53 ± 1	53 ± 3	53 ± 1

Tabelle 5.1: Ergebnisse des Experiments und der Simulation.

Die experimentellen Ergebnisse, wie die eingestellte Dosis in Luft und die absorbierte Dosis im Glasdetektor, stimmen innerhalb der Unsicherheit von 1σ gut mit den entsprechenden simulierten Ergebnissen überein. Zur Berechnung der simulierten Ergebnisse wurde die Gleichung 5.1.4 benutzt.

Der Rückstreueffekt wurde unter Verwendung des ISO-Wasserphantoms untersucht. Der Abstand zwischen Quelle und Glasdetektor wurde auf 100 cm eingestellt. Die eingestellte Dosis in Luft betrug $330 \pm 7 \text{ mGy}$. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.2 gezeigt.

	gemessene absorbierte Dosis (mGy)	simulierte absorbierte Dosis (mGy)
mit ISO-Wasserphantom	373 ± 22	368 ± 8
ohne Phantom, frei in Luft	335 ± 19	335 ± 7
Verhältnis	1,11	1,10

Tabelle 5.2: Ergebnisse des Experiments mit dem ISO-Wasserphantom und der Simulation.

Die gemessenen und simulierten Ergebnisse stimmen innerhalb einer Standardabweichung gut überein. Im Falle einer Bestrahlung mit einem Wasserphantom wird die absorbierte Dosis durch die Rückstreueffekte um etwa einen Faktor von 1,1 im Vergleich zu einer Bestrahlung frei in Luft ohne Wasserphantom erhöht.

5.3 Erstellung eines Mobiltelefon-Modells zur Verifizierung experimenteller Daten

5.3.1 Photonenenergie- und Winkelabhängigkeit eines Glases aus einem Mobiltelefon

Die Ergebnisse der simulierten Photonen-Energieabhängigkeit des Mobiltelefons und der Vergleich der experimentellen Daten aus Discher et al. (2014a), vorgestellt in Kapitel 4.4, sind in Abbildung 5.3.1 dargestellt. Die Bestrahlungen wurden frei in Luft mit der Röntgenquelle der N-Serien Strahlenqualität (N-30 bis N-300) und einer monoenergetischen Cs-137 Gammaquelle ($E = 662 \text{ keV}$) durchgeführt. Die Photonen-Energieabhängigkeit wurde auf Cs-137 normiert. Die simulierten Ergebnisse wurden gemäß Gleichung 5.1.2 berechnet. Für eine qualitative Interpretation und zum Vergleich der simulierten und experimentellen Ergebnisse ist das Verhältnis des Massen-Energieabsorptionskoeffizienten von Displayglas zu trockener Luft, das mit Tabellenwerten von Hubbell und Seltzer (2004) berechnet wurde, in der Abbildung mit eingetragen. Die Kurven für simulierte und experimentelle Ergebnisse folgen dem gleichen Trend.

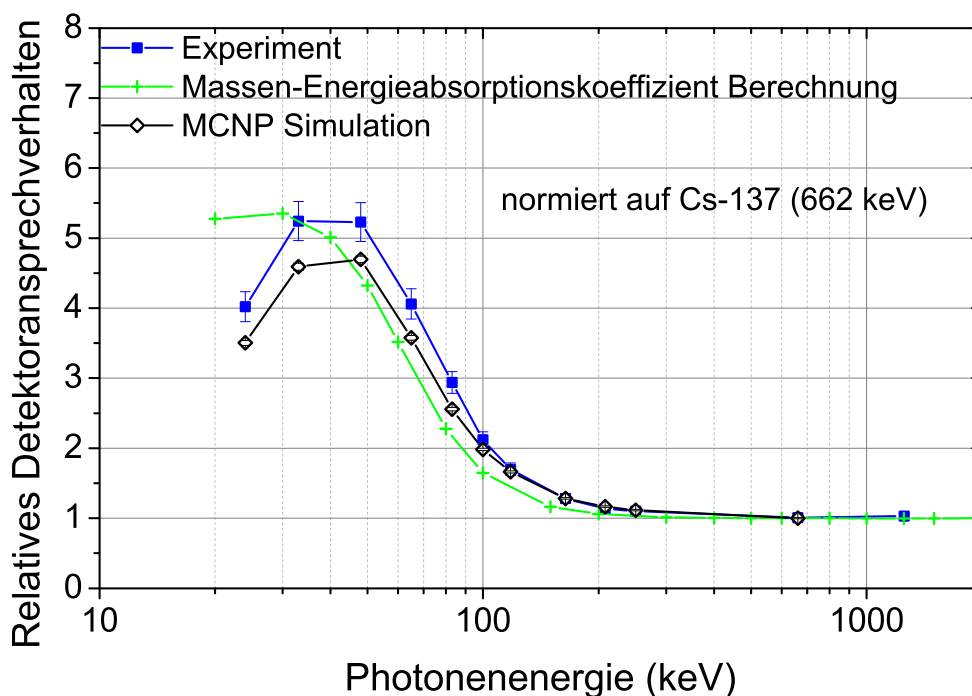


Abbildung 5.3.1: Vergleich zwischen einer simulierten und einer gemessenen Photonen-Energieabhängigkeit einer Displayglasprobe normiert auf Cs-137 (662 keV). Die experimentellen Bestrahlungen wurden mit Röntgenquellen der N-Serien Strahlenqualität (N-30 bis N-300) und einer monoenergetischen Cs-137 Gammaquelle ($E = 662 \text{ keV}$) durchgeführt. Die simulierten und gemessenen Ergebnisse sind in einer vernünftigen Übereinstimmung mit dem berechneten Verhältnis des Massen-Energieabsorptionskoeffizienten von Displayglas zu trockener Luft. Zur besseren Übersicht wurden die Datenpunkte mit Linien verbunden (adaptiert aus Discher et al. (2014b)).

Ausgehend von der Energie von Cs-137 (662 keV) zeigen beide Datensätze einen Wert um eins bis zu einer Energie von etwa 200 keV. Eine maximale Überschätzung des Detektoransprechverhaltens von etwa einem Faktor fünf wird für Energien um 40 keV beobachtet. Verglichen mit den experimentellen Ergebnissen wird für die Simulation eine geringe Unterschätzung von 10-13 % im Peakbereich der Kurve festgestellt. Das Verhältnis der Massen-Energieabsorptionskoeffizienten folgt dem Trend der Ergebnisse, ohne den Abfall bei niedrigsten Energien von etwa 25 keV zu reproduzieren.

Die Winkelabhängigkeit des Displayglases als eine Funktion des Einfallswinkels α wurde frei in Luft bestimmt und mit den simulierten Ergebnissen verglichen (siehe Abbildung 5.3.2). Vier verschiedene Quellenkonfigurationen wurden in Betracht gezogen: drei Energien aus der N-Serie (N-60 mit einer mittleren Energie von $E_{\text{mittel}} = 48$ keV, N-150 mit $E_{\text{mittel}} = 118$ keV und N-300 mit $E_{\text{mittel}} = 250$ keV (ISO 4037-1 (1996))), sowie eine monoenergetische Cs-137 Gammaquelle ($E = 662$ keV). Mit diesen Energien konnte ein Überblick über die gesamte N-Serie ausgewertet werden. Die simulierten Ergebnisse wurden mit der Gleichung 5.1.3 berechnet.

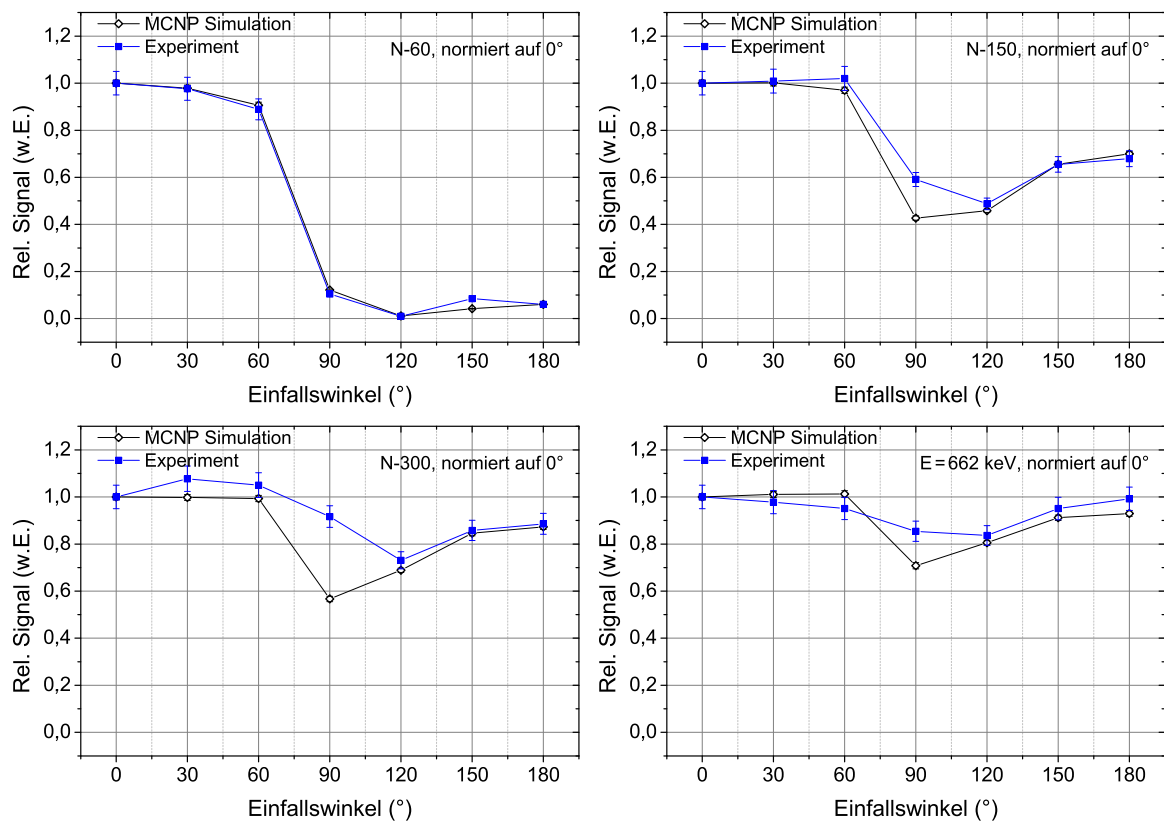


Abbildung 5.3.2: Der Vergleich zwischen der simulierten und der gemessenen Winkelabhängigkeit einer Displayglasprobe mit drei Röntgenspektren der Strahlenqualität N-60, N-150 und N-300 und eine monoenergetische Cs-137 (662 keV) Gammaquelle zeigt eine vernünftige Übereinstimmung. Die Daten werden auf das Ansprechen auf 0° (frontal Bestrahlung) normiert. Zur besseren Übersicht wurden die Datenpunkte mit Linien verbunden (adaptiert aus Discher et al. (2014b)).

Die Ergebnisse der Winkelabhängigkeit wurden normiert auf das Ansprechverhalten bei einem Winkel von 0° (frontale Bestrahlung). Die Ergebnisse der Simulation sind in der Regel in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Werten. Ein flaches Detektoransprechverhalten im Hinblick auf Dosis in Luft wird innerhalb $\alpha \pm 60^\circ$ sowohl im Experiment als auch in der Simulation beobachtet.

Für die niedrigste untersuchte Photonenenergie (N-60) wird ein starker Abschirmungseffekt für rückseitige Bestrahlungen des Mobiltelefons korrekt wiedergegeben. Lediglich für einen streifenden Einfallswinkel von 90° wird die Abschirmung durch das Mobiltelefon für die Röntgenquellen der Strahlenqualitäten N-150, N-300 und für die monoenergetische Cs-137 Gammaquelle geringfügig durch die Simulation überschätzt.

5.3.2 Effekte der Bestrahlungsbedingungen auf die Energieabhängigkeit

Die Energieabhängigkeit eines frei in Luft bestrahlten Mobiltelefons wurde im vorherigen Kapitel gezeigt. In diesem Kapitel werden verschiedene Bestrahlungsbedingungen und die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Photonen-Energieabhängigkeit untersucht. Der Vergleich der Bestrahlungsbedingungen umfasst: frontal gegen rückseitige Bestrahlung bzw. rückseitige Bestrahlungen mit ISO-Wasserphantom gegen Bestrahlungen frei in Luft.

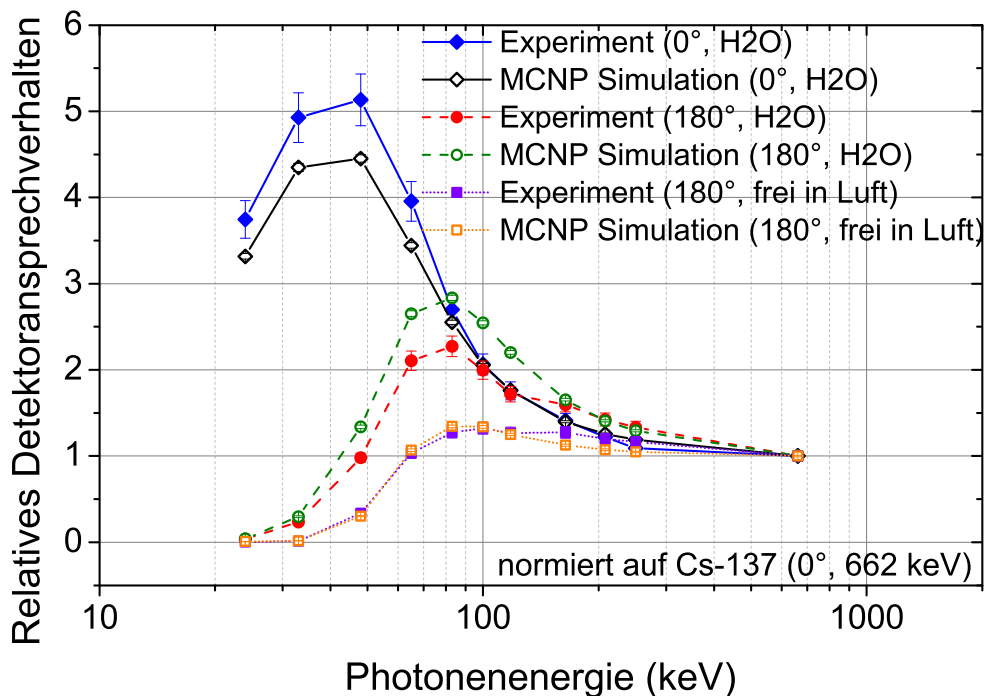


Abbildung 5.3.3: Photonen-Energieabhängigkeit für Bestrahlungen mit einem ISO-Wasserphantom (Einfallswinkel 0° und 180°) oder frei in Luft (Einfallswinkel 180°). Die Messungen wurden mit den jeweiligen MCNP Simulationen verglichen. Zur besseren Übersicht wurden die Datenpunkte mit Linien verbunden (adaptiert aus Discher et al. (2014b)).

Wie in Kapitel 4.4, Abbildung 4.4.1 experimentell beobachtet, ist die Energieabhängigkeit für Displayglas für frontale Bestrahlungen (0°) frei in Luft und mit dem ISO-Wasserphantom fast gleich. Im Fall der rückseitigen Bestrahlung (180°) wurden Unterschiede der Photonen-Energieabhängigkeit zwischen Bestrahlungen frei in Luft und Bestrahlungen mit dem ISO-Wasserphantom beobachtet, wobei die Kombination aus Abschirmung durch das Mobiltelefon und Rückstreuung des ISO-Wasserphantoms zu einer unterschiedlichen relativen Detektorantwort führt (siehe in Kapitel 4.4, Abbildung 4.4.3).

Die Auswirkung der Bestrahlungsbedingungen auf die Photonen-Energieabhängigkeit kann ebenfalls durch Simulationen verifiziert werden. Die Photonen-Energieabhängigkeit wurde für Bestrahlungen mit einem ISO-Wasserphantom (Einfallswinkel 0° und 180°) oder frei in Luft (Einfallswinkel 180°) berechnet. Der Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit den simulierten Ergebnissen in Abbildung 5.3.3 zeigt, dass für die jeweilige Bestrahlungskonfiguration die MCNP Simulation dem Trend der Versuchsdurchführung folgt.

5.4 Diskussion der Ergebnisse aus der Simulation

5.4.1 Veränderungen der Materialkonstanten und weitere Unsicherheitsquellen

Die Materialdefinitionen für die durchgeführte Simulation wurden aus Tabellen der Literatur oder aus Datenblättern entnommen (siehe Anhang C, Tabellen C.1 und C.3). Es ist jedoch unklar, ob diese vollständig den im Mobiltelefon verwendeten Materialien entsprechen. Daher wurden die möglichen Variationen in der Dichte und der Materialzusammensetzung des Displayglases als Strahlendetektor untersucht. Beim Erhöhen oder Verringern der Dichte des Glases um 10 % zeigt sich für Photonenenergien von weniger als 65 keV ein Unterschied in der Photonen-Energieabhängigkeit von kleiner als 3 %, wobei der Unterschied für höhere Photonenenergien geringer ausfällt.

Bei der Variation der Konzentration von Kalzium, dem schwersten Element im Displayglas-Detektor, zeigt die Photonen-Energieabhängigkeit einen stärkeren Effekt (siehe Abbildung 5.4.1). Beim Erhöhen oder Verringern des Gewichtsprozentsatzes von CaO von 5 % in der Glaszusammensetzung, wobei der Unterschied mit der SiO₂-Konzentration kompensiert wird, zeigen sich Unterschiede von 8-12 % für Photonenenergien unter 100 keV und Unterschiede von 1-7 % für höhere Energien.

In Abbildung 5.4.1 ist gezeigt, dass sich bei einer Erhöhung der CaO-Konzentration um 5 % die experimentelle und simulierte Kurve fast überlappen. Da schwere Elemente Strahlung bei niedriger Energie stärker absorbieren, könnte dies ein Hinweis darauf sein, dass die Konzentration schwerer Elemente (wie Kalzium) in der Glaszusammensetzung höher ist als ursprünglich für die Simulation angenommen.

Laut Eakins (2009) neigt die MCNP5 Simulation dazu die akkumulierte Dosis durch Photonen unterhalb einer Energie von 0,1 MeV bis zu 10 % zu unterschätzen, während die Vorgängerversion MCNP4 korrekte Ergebnisse liefert. In der Publikation wird vorgeschlagen, die standardmäßige MCNP5 Photonenquerschnitt-Bibliothek MCPLIB04 mit der älteren MCP-LIB02 Bibliothek zu vergleichen. Die MCPLIB02 Bibliothek, die im Jahr 1993 veröffentlicht

und in MCNP4 benutzt wurde, bezieht sich auf die ENDF/B-IV³ Bewertung für Photonenquerschnitte unter 10 MeV (X-5 Monte Carlo Team (2003a)). Für die neuere MCPLIB04 Bibliothek, die im Jahr 2002 veröffentlicht wurde und standardmäßig im MCNP5 Code verwendet wird, wurden Photonenquerschnittsdaten durch neuere Bibliotheken auf der Grundlage der ENDF/B-VI.8 Berechnungen ersetzt (ebd.). Die Änderung der Bibliotheken verändert die Ergebnisse der Simulationen nur um wenige Prozent (1-4 % für $E < 0,1$ MeV) und hat somit keinen nennenswerten Einfluss.

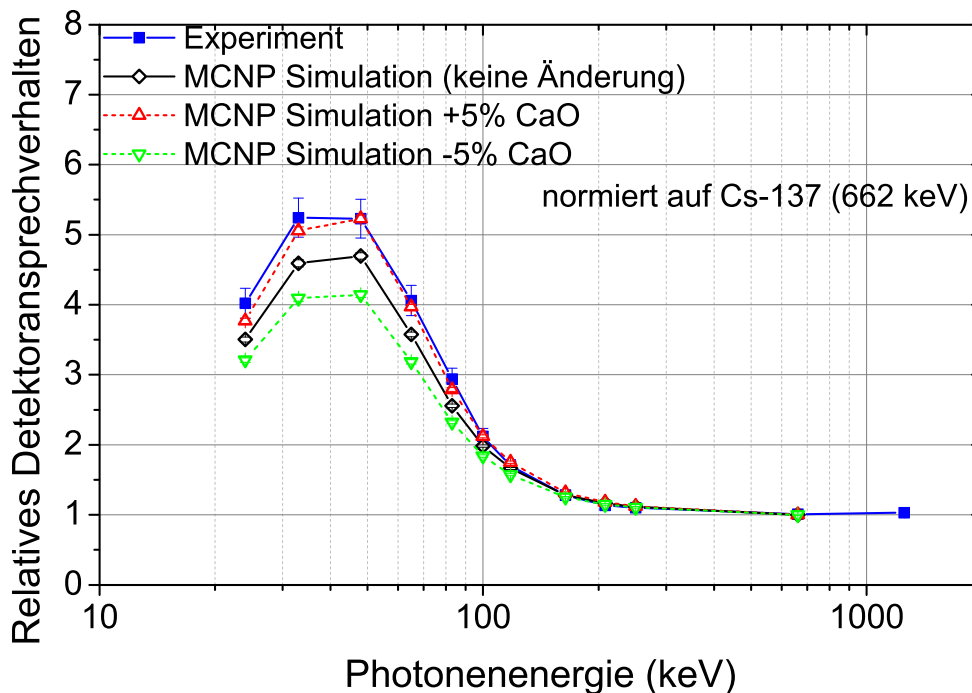


Abbildung 5.4.1: Variation des CaO-Gehalts des Glasdetektors und Auswirkung auf die Photonen-Energieabhängigkeit. Die daraus resultierende Photonen-Energieabhängigkeit einer Displayglasprobe ist normiert auf Cs-137 (662 keV). Der CaO-Gehalt der Glaszusammensetzung besitzt einen Einfluss auf die simulierten Ergebnisse. Zur besseren Übersicht wurden die Datenpunkte mit Linien verbunden (adaptiert aus Discher et al. (2014b)).

5.4.2 Winkelabhängigkeit

Die Ergebnisse in Abbildung 5.3.2 zeigen, dass die Absorption der Strahlung durch das Mobiltelefon mit zunehmender Photonenenergie weniger ins Gewicht fällt. Der Unterschied des relativen Signals zwischen vorderseitiger Bestrahlung ($0-90^\circ$) und rückseitiger Bestrahlung ($90-180^\circ$) nimmt deshalb mit größeren Photonenenergien ab.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Werten. Lediglich für einen streifenden Einfallswinkel von 90° wird die Abschirmung durch das Mobiltelefon geringfügig durch die Simulation überschätzt. Nicht alle Komponenten des Mobiltelefons wurden in das Geometriemodell integriert und beispielsweise wurden die viel-

³Die Abkürzung ENDF steht für engl. Evaluated Nuclear Data File.

fältigen Kleinteile auf der Leiterplatte als ein massiver Al_2O_3 -Block zu einer vereinfachten Komponente zusammengefasst.

In der Realität können kleine Hohlräume innerhalb des Mobiltelefons, die nicht in der Simulation integriert wurden, zu einer geringeren Abschirmung der Strahlung führen. Dieser Effekt ist vermutlich für streifende Einfallswinkel von 90° am deutlichsten ausgeprägt und könnte die geringfügigen Abweichungen der Ergebnisse in Abbildung 5.3.2 erklären.

5.4.3 Trageposition des Mobiltelefons

Soll das Mobiltelefon als Notfalldosimeter verwendet werden, zeigt Abbildung 5.3.3, dass die Kenntnis, an welcher Position das Mobiltelefon während der Expositionszeit getragen wurde, wesentlich für eine Beurteilung der Messergebnisse ist. Die üblichen Tragepositionen sind in der vorderen oder hinteren Hosentasche direkt am Körper oder in Taschen nahe am Körper. Das Experiment und die Simulationen, die in Kapitel 5.2 vorgestellt werden, zeigen die Auswirkungen auf die absorbierte Dosis durch ein vorhandenes Wasserphantom bei einer Cs-137 Gammabestrahlung. Verglichen mit einer Bestrahlung frei in Luft beträgt die Dosisüberschätzung bei einer extrahierten, vor dem Wasserphantom bestrahlten Glasprobe etwa 10 %. Diese Überschätzung wird durch die Rückstreuung des Wasserphantoms erklärt. Bei der frontalen Bestrahlung einer Glasprobe innerhalb des Mobiltelefons zeigt sich eine Dosisüberschätzung jedoch nicht, da die Rückseite des Mobiltelefons (Batterie) die Rückstreuung des Wasserphantoms absorbiert. Dies gilt für jene Energien, die in Abbildung 5.3.3 untersucht worden sind.

Bei rückseitigen Bestrahlungen hingegen zeigt sich für das Displayglas ein deutlich unterschiedliches, relatives Detektoransprechverhalten. Dies kommt durch die Kombination zweier Effekte zustande: erstens durch die Abschirmung der Rückseite des Mobiltelefons und zweitens durch die Rückstreuung des Wasserphantoms. Dies impliziert, dass für eine individuelle Korrektur der deponierten Dosis neben dem Photonenspektrum auch die Trageposition und die Orientierung des Mobiltelefons im Strahlenfeld eine wichtige Rolle spielen. Diese zusätzliche Information sollte nach einem radiologischen Unfall individuell protokolliert werden. Ist jedoch die Trageposition des Mobiltelefons nicht bekannt, so ist eine Zunahme der Unsicherheiten in der Dosisabschätzung zu berücksichtigen.

Kapitel 6

Einsatz der entwickelten Methoden in einem Feldexperiment

Im Rahmen des europäischen Sicherheitsprojektes CATO (<http://www.cato-project.eu>) wurde ein Feldexperiment durchgeführt. Das CATO Projekt mit einem gesamten Projektbudget von 14,1 Mio. Euro und einem Konsortium, bestehend aus 25 europäischen Partnern, wurde am 01. Januar 2012 mit einer Laufzeit von 3 Jahren begonnen. Das Konzept des Projektes ist eine Vereinigung einer breiten Palette von Kompetenzen, darunter verschiedene Interessengruppen, Technologieanbieter und führende Sicherheitsexperten (CATO Project (2014)). Als wissenschaftlicher Projektteil wurde in einer Arbeitsgruppe eine sogenannte „proof-of-concept“ Demonstration eingegliedert, wovon das CATO Feldexperiment ein Teil ist.

Zusätzlich wurde ein Laboringvergleich für die Unfalldosisbestimmung im Feldexperiment integriert, in dem unterschiedliche Labore beteiligt waren, die der Plattform EURADOS (<http://www.eurados.org>) angehören. In diesem Ringvergleich wurden Proben für die Notfalldosimetrie unter realistischen Bedingungen bestrahlt und an die beteiligten Labore verschickt, welche die Messungen durchführten und die Ergebnisse an den Koordinator des Laboringvergleichs übermittelten. Die Zusammenfassung der Ergebnisse wurde in der EURADOS Arbeitsgruppe WG10 – Retrospektive Dosimetrie diskutiert und soll anschließend veröffentlicht werden.

Das Feldexperiment wurde vom 2.-5. Juni 2014 auf dem Gelände einer Militärkaserne des österreichischen Bundesheeres an der westlichen Stadtgrenze von Salzburg durchgeführt. Die Logistik wurde vom Projektpartner der Universität Salzburg in enger Kooperation mit dem Bundesheer bereitgestellt. Als wissenschaftliche Partner waren, neben der Universität Salzburg (PLUS) und dem Helmholtz Zentrum München (HMGU), weitere CATO Projektpartner vor Ort, wie Wissenschaftler des belgischen Nuklear-Forschungszentrums (SCK-CEN) und des tschechischen Instituts für Strahlenschutz (SÚRO). Zusätzlich waren weitere Wissenschaftler als projekt-externe Experten am Feldexperiment beteiligt, wie aus der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO), vom deutschen Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) und vom österreichischen Amt der Salzburger Landesregierung.

6.1 Hintergrundinformationen und Ziel des Feldexperiments

Das durchgeführte Feldexperiment war angelehnt an den radiologischen Unfall 2002 in Cochabamba, Bolivien (Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) (2004)). Eine industriell eingesetzte Ir-192 Radiographie-Gammaquelle wurde als Fracht im Gepäckraum eines Linienernbusses von Cochabamba zur bolivianischen Hauptstadt La Paz transportiert. Aufgrund eines Defekts und unsachgemäßer Handhabung der Strahlenquelle wurden während der achtstündigen Busreise 55 Passagiere unbewusst ionisierender Strahlung ausgesetzt.

Der Vorfall wurde der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) gemeldet, woraufhin eine Kommission den Hergang und Verlauf des radiologischen Unfalls untersuchte. Zur experimentellen Abschätzung der Dosis wurde ein Experiment von einem Team der IAEO zur Unfallrekonstruktion durchgeführt. In dieser Rekonstruktion wurde dieselbe Ir-192 Quelle, jedoch nicht derselbe Bus, benutzt. Im Experiment wurden 10 Wasserkanister an ausgewählten Sitzplatzpositionen eingesetzt, die als Phantome den menschlichen Torso simulierten. An jedem Wasserkanister wurden vier amtliche Thermolumineszenzdosimeter oberhalb und unterhalb, sowie links und rechts des Wasserkanisters befestigt, um die Ganzkörperdosis des Buspassagiers abzuschätzen. Da die Position der Strahlenquelle im Gepäckraum des Busses unbekannt war, wurde als wahrscheinlichste Position das mittlere Fach des Gepäckraumes ausgewählt. Der Abstand zwischen Quelle und dem darüber befindlichen Wasserphantom beläuft sich auf ca. 1,15 m.

Als höchste gemittelte Dosis einer Sitzplatzposition gibt die IAEO Unfallrekonstruktion einen Wert von 185 mGy an. Diese Position befand sich sehr nahe an der Quelle, wohingegen ein Dosimeter einen maximalen Wert von 500 mGy aufwies (Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) (2004)). Die weiter ermittelten Dosiswerte an ausgewählten Sitzplatzpositionen nehmen mit steigendem Abstand zu dieser Position ab. Dies ist erklärbar durch das Dosis-Abstandsquadrat Gesetz.

Das im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Feldexperiment hatte folgendes Ziel:

Ein radiologischer Unfall wurde unter kontrollierten Bedingungen unter der Einhaltung der lokalen Strahlenschutzgrenzen rekonstruiert. Als Vorlage diente die IAEO Rekonstruktion des bolivianischen Unfalls, wobei neu entwickelte Methoden der Notfalldosimetrie zum Einsatz kamen. Diese neuen Dosisbestimmungsmethoden werden im Falle eines Unfalls mithilfe persönlicher Gegenstände durchgeführt, die körpernah von Personen getragen werden. Zu solchen persönlichen Gegenständen zählen beispielsweise das Mobiltelefon oder Chipkarten im Geldbeutel, die in Kapitel 2.3 vorgestellt wurden. Die neu entwickelten Methoden für die Notfalldosimetrie sollten auf die Verwendbarkeit und Zuverlässigkeit unter realen Bedingungen getestet und validiert werden. Etablierte sowie amtliche Personendosimeter wurden als individuelle Referenzdosimeter in den Versuchsaufbau integriert, um später Referenzdosiswerte für die Auswertung zu erhalten. Mit der zusätzlichen Integrierung des EURADOS Laborringvergleichs und der Aktivierung europäischer Labore für die Notfalldosimetrie wurden retrospektive Dosimetriemethoden im breiten Rahmen getestet. Außerdem generierte das Projekt dadurch zusätzliche Aufmerksamkeit auf europäischer Ebene.

6.2 Vorbereitungen des Feldexperiments

Vorbereitung der Umgebung des Feldexperiments

Für das Feldexperiment wurde ein Bereich der Militärkaserne des österreichischen Bundesheeres weiträumig abgesperrt. Dieser Bereich umfasste einen Radius von 200 m, in dem sich keine bewohnten Gebäude der Kaserne oder zivile Gebäude befinden. Die lokalen Strahlenschutzregeln sind in der ÖNORM S 5265-2 (2006) festgeschrieben und geben die Rahmenbedingungen für das Feldexperiment an. Die maximale Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ außerhalb des festgelegten Kontroll- und Überwachungsbereiches ist in der ÖNORM S 5265-2 (2006) bei einem ortsveränderlichen Betrieb der Strahlenquelle auf $H^*(10) = 10 \mu\text{Sv pro Tag}$ ¹ festgeschrieben.

Um die lokalen Strahlenschutzgesetze einzuhalten und die Gammastrahlung außerhalb des abgesperrten Bereiches zu reduzieren, wurde eine Erdwallanlage aufgeschüttet. Der Querschnitt eines Erdwalls kann als gleichschenkliges Trapez mit einer aufgeschütteten Höhe von mindestens 2,5 m und einer Grundseite von ca. 6 m beschrieben werden (Lettner (2013), pers. Kommunikation). An der Seite des Erdwalls, der in Richtung der angrenzenden zivilen Gebäude ausgerichtet war, wurde ein höherer und breiterer Wall mit einer Höhe von ca. 4 m und einer Grundseite von ca. 9 m integriert (ebd.).

Abbildung 6.2.1 zeigt die Parkposition des Busses. Ursprünglich sollte der Bus um 90° gedreht auf der umschlossenen Fläche des Erdwallbunkers geparkt werden, jedoch war dies aufgrund des durch Starkregen aufgeweichten Bodens am Tag des Experiments nicht möglich. Kurzerhand wurde vom Militär eine Behelfsstraße aus Aluminiumplatten verlegt und der Bus mit dem Heckmotor zur Einfahrt des Erdwallbunkers geparkt. Die Einfahrt wurde zusätzlich mit standardisierten Frachtcontainern abgeschirmt.



Abbildung 6.2.1: Bus in Parkposition im Erdwallbunker mit Seitenansicht (links) und Hinteransicht (rechts)

¹Laut ÖNORM S 5265-2 (2006) ist die Grundlage der Dosisbeschränkung das Konzept, das pro Einsatz der Strahlenquelle eine nicht-beruflich strahlenexponierte Person maximal ein Hundertstel des für sie zutreffenden Dosisgrenzwertes von 1 mSv pro Jahr erhalten darf. Weiter müssen in der Strahlenschutzdokumentation die festgelegten Abstände, die gemessenen Ortsdosisleistungen, die Art der Überwachung und die tatsächlichen Strahlzeiten dokumentiert werden.

Vorbereitung des Busses und Positionierung der Strahlenquelle

Der INTEGRO Bus des Herstellers Mercedes Benz wurde vom österreichischen Militär für das Feldexperiment bereitgestellt und besitzt 51 Sitzplätze, die eindeutig und einheitlich mit Aufklebern durchnummeriert wurden (EvoBus GmbH (2007)). Auf den Sitzen wurden an ausgewählten Positionen mit Wasser gefüllte Kunststoffkanister aus Polyethylen (chemische Abkürzung PE-HD) mit den Dimensionen $30 \times 25 \times 43 \text{ cm}^3$ (BxTxH) platziert.

Die Wasserkanister simulierten annähernd den menschlichen Torso, ähnlich wie es in der bolivianischen Unfallrekonstruktion der IAEO durchgeführt wurde. Zusätzlich wurden vier anthropomorphe Phantome integriert, wobei eines zur Bestimmung des Dosisgradienten und der Organdosen mit Thermolumineszenzdosimetern (TLDs) des belgischen Projektpartners SCK-CEN ausgestattet wurde.



Abbildung 6.2.2: Innenansicht des Busses (links) und Wasserkanister zur Simulation des menschlichen Torsos (rechts).

Die Strahlenquelle ist eine Ir-192 Gammaquelle, die industriell zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung eingesetzt wird und eine Halbwertszeit von 73,83 Tagen besitzt (aus Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) (2014b)). Zwei Quellen mit unterschiedlichen Aktivitäten wurden für das Experiment eingesetzt. Die Aktivität der stärkeren Quelle beträgt $1,505 \text{ TBq}$ und jene der schwächeren Quelle 688 GBq , jeweils mit einer Unsicherheit von 20 % (Stettner (2014), pers. Kommunikation). Beide Aktivitäten beziehen sich auf das Bezugsdatum vom 28.05.2014. Die Quellen stammen vom österreichischen Forschungslabor Seibersdorf Laboratories, das über entsprechende Genehmigungen für Transport und Handhabung der Gammaquellen verfügt.

Die Herstellung des Ir-192 Isotops erfolgt durch Neutronenaktivierung in Kernreaktoren. Das stabile Isotop Ir-191 wird durch die Absorption eines Neutrons zu Ir-192 aktiviert (vereinfachte Darstellung der Kernreaktion: $\text{Ir-191} (n, \gamma) \text{Ir-192}$). Eine weitere Produktionsart ist die Herstellung aus Os-192 (vereinfachte Darstellung: $\text{Os-192} (d, 2n) \text{Ir-192}$ (aus Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) (2014b)). Das aktivierte Ir-192 zerfällt durch Beta-minus-Emission (95,13 %) zu angeregten Niveaus von Pt-192 und durch Elektronen-Einfang (4,87 %) zu angeregten Niveaus von Os-192 (aus Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) (2014b)). Die Gamma-Emissionen durch den Zerfall sind im Anhang B in Tabelle B.1 angegeben.

Der umschlossene Iridiumstrahler ist in Form einer 2 mm großen Tablette in einem Halter eingeschweißt und in einem verschließbaren Arbeitsbehälter untergebracht, der als Schutzbehälter für den sicheren Umgang, die sichere Lagerung und den sicheren Transport des Strahlers dient (ÖNORM S 5265-2 (2006)).

Mithilfe eines Bowdenzuges wird der Iridiumstrahler mechanisch durch ein Führungsrohr oder Ausfahrtschlauch aus dem abgeschirmten Behälter bewegt. Das Endstück des Ausfahrtschlau-ches wurde im Gepäckraum des Busses an einem Dreibeinhalter sehr nahe an der Decke des Gepäckfaches fixiert (siehe Abbildung 6.2.3).



Abbildung 6.2.3: Fixierung des Endschlauchs der Quelle im Gepäckraum des Busses (links) und Behälter mit Kennzeichnung der eingesetzten Ir-192 Quelle (rechts).

Die Wahl der Position hatte zwei Gründe: Erstens wurde eine ausreichend hohe absorbierte Dosis oberhalb der Nachweisgrenze der Notfalldosimeter mit dem Dosis-Abstandsquadratgesetz abgeschätzt und zweitens wurde ein „worst case“ Bestrahlungsszenario simuliert, in welchem sich die Quelle sehr nah an den Sitzplätzen der Buspassagiere befindet.

Die Position der Strahlenquelle mit dazugehörigen Abständen ist in Abbildung 6.2.4 eingezeichnet. Ebenfalls ist in dieser Abbildung die Position der Wasserkanister bzw. der anthropomorphen Phantome im Sitzplatzplan eingezeichnet. Vier anthropomorphe Phantome wurden so platziert, dass sie sich nah an der Strahlenquelle befanden und zwar auf den Positionen P21, P22, P26 und P30. An P21, der Position sehr nahe an bzw. fast oberhalb der Quelle, wurde das Phantom des belgischen Projektpartners SCK-CEN platziert, das mit TLDs zur Bestimmung des Dosisgradienten und der Organdosen ausgestattet wurde.

Um Abschirmungseffekte eines Passagiers durch die danebensitzende Person nachzustellen wurden bei mehreren Sitzplatzreihen beide Sitzplätze mit Wasserkanistern ausgestattet. Zusätzliche Wasserkanister wurden entlang der Ursprungsachse zur Quelle positioniert, um den durch das Dosis-Abstandsquadratgesetz zu erwartenden raschen Abfall mit steigendem Abstand zur Quelle der absorbierten Dosen zu untersuchen.

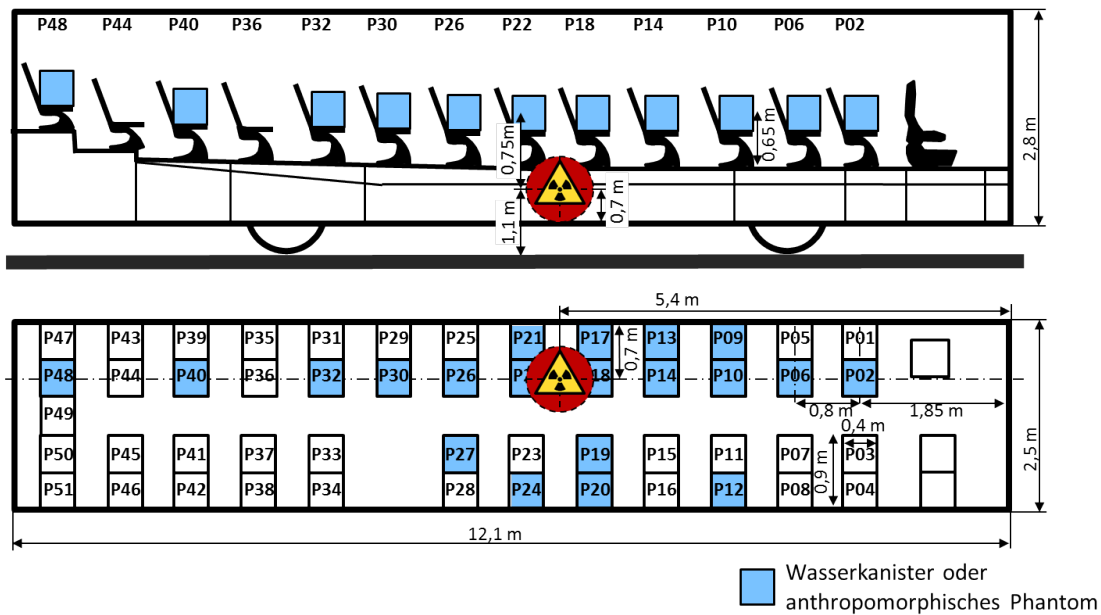


Abbildung 6.2.4: Busplan mit Positionen der Wasserkanister, anthropomorphen Phantome, Strahlenquellenposition und wichtigen Dimensionen des Busses. Der Busplan wurde aus der Serienbeschreibung des Busses erstellt (eigene Darstellung nach EvoBus GmbH (2007)).

Ausstattung der Wasserkanister und Phantome mit Notfalldosimetern und zusätzlichen Referenzdosimetern

Die Wasserkanister und Phantome wurden mit Notfalldosimetern und zusätzlichen Referenzdosimetern ausgestattet, in dem diese mit Klebeband an unterschiedlichen Positionen fixiert wurden. Als Notfalldosimeter wurden Mobiltelefone und Chipkarten benutzt, die in Kapitel 2.3 vorgestellt wurden. Die Notfalldosimeter wurden an den Kanistern mittig und an den Phantomen auf Leistenhöhe angebracht. Für das Experiment wurden Mobiltelefone unterschiedlicher Hersteller (Nokia, Samsung, HTC, Sony Ericsson) benutzt, um ein realistisches Szenario nachzustellen. Nahe der Mobiltelefone und an weiteren Positionen der Kanister und Phantome wurden amtliche Personendosimeter angebracht, um einen Referenzdosiswert für die jeweilige Sitzplatzposition zu erhalten. Dazu wurden elektronische Personendosimeter (EPD), sowie TL- und OSL-Dosimeter verschiedener Projektpartner verwendet. Im Gegensatz zu den Notfalldosimetern, welche die absorbierte Dosis im Material anzeigen, geben die amtlichen Personendosimeter die Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ in Sievert (Sv) an einer bestimmten Trageposition an.

Abbildung 6.2.5 (links) zeigt einen mit angebrachten Notfalldosimetern (Mobiltelefone und Chipkarten) und Referenzdosimetern (amtliche Personendosimeter) ausgestatteten Wasserkanister. In der rechten Abbildung ist repräsentativ ein anthropomorphes Phantom des belgischen Projektpartners SCK-CEN gezeigt, an welchem neben den Referenzdosimetern verschiedene Mobiltelefone auf Leistenhöhe angebracht wurden, die im EURADOS Laborringvergleich Verwendung fanden. Ebenfalls sind mittig auf dem Torso die TLDs zur Messung des Dosisgradienten erkennbar (unter den weißen Klebestreifen).



Abbildung 6.2.5: Notfalldosimeter und Referenzdosimeter, wie elektronische Personendosimeter, TL- und OSL-Dosimeter fixiert an unterschiedlichen Positionen am Wasserkanister (links) und am anthropomorphen Phantom (rechts).

Zusätzlich wurden die Notfalldosimeter präpariert, um für jedes Mobiltelefon Referenzdosiswerte zum späteren Vergleich der Ergebnisse zu erhalten. LUXEL Dosimeter bestehen aus kohlenstoff-dotiertem Aluminiumoxid ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$) und werden vom amerikanischen Hersteller Landauer als OSL-Dosimeter hergestellt (Landauer Inc. (2005)). Da die LUXEL Dosimeter aus demselben Basismaterial wie die Keramikkörper der elektronischen Bauteile auf der Platine bestehen, wurden diese als Referenzdosimeter für die absorbierte Dosis innerhalb des Mobiltelefons herangezogen. Die LUXEL Dosimeter wurden innerhalb des Mobiltelefons nahe der Platine eingesetzt, was den zusätzlichen Vorteil hatte, dass die Dosimeter vor Umgebungslicht, welches die Dosisinformation beeinträchtigen würde, geschützt waren. In Abbildung 6.2.6 ist das mittig im Mobiltelefon eingesetzte LUXEL Dosimeter mit einer blauen Umrandung markiert.

Um einen Referenzdosiswert für das Material der Displaygläser zu erhalten, wurden auf jedem Bildschirm eines Mobiltelefons drei Referenzgläser angebracht. Die Dimensionen der einzelnen Referenzglasstücke betragen jeweils ca. $5 \times 5 \text{ mm}^2$. Diese Glasstücke wurden vor dem Experiment im Ofen für 10 min bei 500°C ausgeheizt, um das intrinsische Nulldosissignal zu löschen (siehe Kapitel 2.3.3). Die Referenzgläser stammen aus einem Ersatzdisplayglasmodul (Nokia 5250). Mit einem Satz, bestehend aus 24 Glasstücken, wurden sie vor dem Experiment auf ihre Reproduzierbarkeit getestet, wobei die Schwankung im Mittel 3,5 % betrug. Die orangefarbenen Kreise in Abbildung 6.2.6 zeigen die drei Referenzglasstücke, die mit gleichmäßigem Abstand auf der Mittellinie des Displaybildschirms angebracht sind.

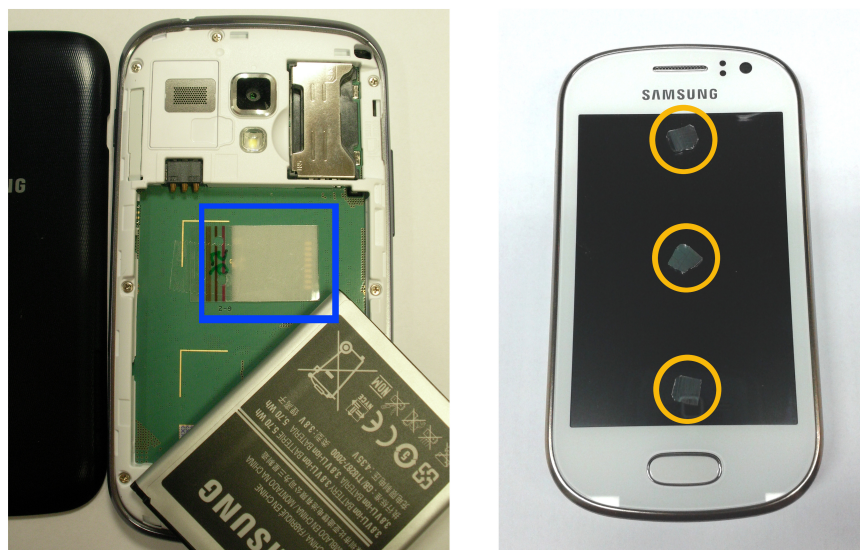


Abbildung 6.2.6: Mobiltelefone mit Referenzdosimetern. LUXEL Dosimeter fixiert auf der Platine des Mobiltelefons (links) und drei Referenzglasstücke angebracht am Displaybildschirm des Mobiltelefons (rechts).

6.3 Chronologischer Ablauf

Von 2. bis 5. Juni 2014 fanden vier Bestrahlungen statt. Am 2. Juni wurden die Wasserkanister im Bus platziert und zwei kurze Probebestrahlungen mit der schwächeren Quelle² (688 GBq) von jeweils 30 min durchgeführt. Um ein sofort auswertbares Ergebnis der Dosisverteilung im Bus zu erhalten, wurden nur die elektronischen Personendosimeter, deren Messanzeige unmittelbar abgelesen werden kann, an den Wasserkanistern angebracht. Die Probebestrahlung diente zum Vergleich der zuvor mit dem Dosis-Abstandsquadrat abgeschätzten Dosisraten und zur Überprüfung, ab welcher Sitzplatzposition die Nachweisgrenze der Methode der Dosisbestimmung anhand der Notfalldosimeter erreicht wurde. Zusätzlich wurden durch die Probebestrahlung drei Sitzplatzpositionen für den EURADOS Laborringvergleich festgelegt, die in die Dosiskategorien hohe (Position P22), mittlere (Position P26) und niedrige Dosis (Position P30) klassifiziert wurden.

Am 3. und 4. Juni wurden jeweils zwei achtstündige Bestrahlungen mit der starken Quelle² (1,505 TBq) durchgeführt. Dazu wurden die vier anthropomorphen Phantome innerhalb des Busses platziert und 17 Notfalldosimeter an den ausgewählten Positionen angebracht. Ebenfalls wurden die zusätzlichen Notfalldosimeter des EURADOS Laborringvergleichs auf die drei ausgewählten Sitzplatzpositionen verteilt. Am letzten Bestrahlungstag des Feldexperiments wurde der Cochabamba Unfall realitätsgetreu rekonstruiert. Dazu wurden erneut alle 17 Positionen mit Notfalldosimetern ausgestattet und die Bestrahlung mit der schwächeren Quelle durchgeführt.

²Die angegebene Aktivität bezieht sich jeweils auf das Bezugsdatum vom 28.05.2014

6.4 Experimentelle Ergebnisse

6.4.1 Referenzwerte mit EPDs, LUXEL Dosimeter und Referenzgläsern

Referenzdosiswerte für die ausgewählten Sitzplatzpositionen wurden mit aktiven und passiven Dosimetern bestimmt. Dazu wurden der Messwert des elektronischen Personendosimeters (EPDs), der des im Mobiltelefon integrierten LUXEL Dosimeters und die Messwerte der auf der Oberfläche des Bildschirms angebrachten Referenzgläser herangezogen. Das LUXEL Dosimeter gibt die absorbierte Dosis im Al_2O_3 Material innerhalb des Mobiltelefons an. Dahingegen geben die Referenzgläser die absorbierte Dosis im Glasmaterial des Mobiltelefons an. Beide Dosimeter beziehen sich auf die Einheit Gy (absorbierte Energie pro Masse). Die EPDs zeigen als Messwert die Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ in Sv an. Diese Äquivalentdosis ist eine messtechnisch definierte Dosisgröße des Strahlenschutzes und dient als Vergleichswert für die Auswertung des Experiments.

Im Anschluss an die Feldexperimente wurden die LUXEL Dosimeter aus dem Mobiltelefon entnommen und für die OSL-Messung in drei gleichgroße Stücke geschnitten. Die Bestimmung der Dosis erfolgte mit einem Messprotokoll mit drei Dosis-Kalibrationspunkten. In die gesamte Unsicherheit der Messung fließt die Unsicherheit aus der Quellenkalibration³ und der Standardabweichung der drei unterschiedlichen Messungen ein. Als Endergebnis werden der Mittelwert aus den drei unabhängigen Messungen und die zugehörige Unsicherheit angegeben. Das Endergebnis der Referenzgläser wurde aus dem Mittelwert von drei unabhängigen Dosisbestimmungsmessungen berechnet. Jeweils drei Dosis-Kalibrationspunkte und das TL-Protokoll „500 s Vorbleichen mit blauen LEDs“ wurden zur Bestimmung der absorbierten Dosis der Referenzgläser herangezogen. In die Unsicherheit der Dosisbestimmung gehen der Messfehler, die Unsicherheit der Quellenkalibration³ von 4,5 % und eine konstante Signalfading-Unsicherheit⁴ von 7 % ein.

Die Ergebnisse der Referenzdosimeter sind in Abbildung 6.4.1 dargestellt. Auf der x-Achse des Schaubilds ist die Sitzplatzposition aufgetragen. Für die Zuordnung der Sitzplatzposition relativ zur Strahlenquelle, die sich nahe der Position P22 befand, wird auf die Draufsicht in Abbildung 6.2.4 verwiesen.

Der Vergleich der drei Referenzwerte der Dosimeter einer Sitzplatzposition fällt unterschiedlich aus, je nach relativem Abstand zur Quelle (P22). Einerseits ist ein homogenes Ergebnis der Referenzwerte bei Sitzplatzpositionen feststellbar, die weiter von der Strahlenquelle entfernt sind, wie beispielsweise an den Positionen P09, P10, P40 oder P48. An diesen Positionen ist der Unterschied zwischen den drei Referenzdosimetern recht klein.

Andererseits ist ein sehr heterogenes Ergebnis der Referenzwerte an den Positionen sehr nahe an der Quelle feststellbar, wie beispielsweise an den Positionen P18, P21 und P22. An diesen Positionen spielt der genaue Abstand zwischen Quelle und Detektor eine wesentliche Rolle und ist anhand der Unterschiede zwischen den Referenzwerten deutlich erkennbar. Die Positionierungsunterschiede der Referenzdosimeter entstehen durch die unterschiedlichen Positionen beim Anbringen auf die Phantome.

³Die Unsicherheit der Quellenkalibration resultiert aus der Kalibration der integrierten Betaquellen des Lumineszenzmessgeräts auf die Dosiskalibration in Luft der SSDL Cs-137 Gammaquelle.

⁴Die Signalfading-Unsicherheit stammt aus der vorläufigen Abschätzung der Variabilität in Discher und Woda (2013) und ist für homogene Glasproben der Referenzdosimeter eher als zu konservativ abgeschätzt.

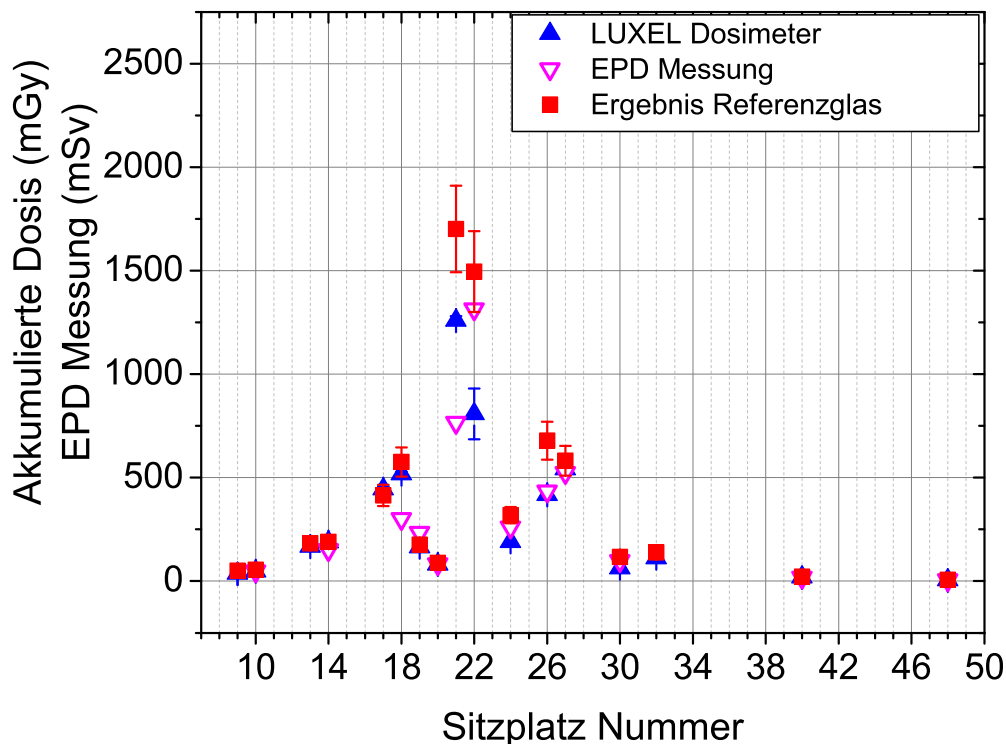


Abbildung 6.4.1: Ergebnis der Referenzdosimeter und Referenzgläser für den Versuchstag mit der stärkeren Quelle.

6.4.2 Displayglas als Notfalldosimeter

Displayglasproben wurden als Notfalldosimeter aus den Mobiltelefonen entnommen. Um das vorhandene Nullsignal zu verringern, wurden die Proben geätzt (siehe Kapitel 4.1). Das TL-Protokoll „500 s Vorbleichen mit blauen LEDs“ des Lumineszenzmessgeräts wurde zur Bestimmung der absorbierten Dosis verwendet. Im Messprotokoll sind drei Dosis-Kalibrationspunkte integriert, um das gemessene TL-Signal in eine absorbierte Dosis umzurechnen. Das Ergebnis wird bezüglich des Signalfadings entsprechend der Zeitdauer zwischen Exposition im Feldexperiment und Messung im Labor und bezüglich der Hintergrunddosis korrigiert. Die Unsicherheiten beider Korrekturgrößen fließen in die Unsicherheit des Ergebnisses ein. Zur Qualitätskontrolle wurden aus jedem Mobiltelefondisplay drei Aliquote entnommen und gemessen. Als Ergebnis werden der Mittelwert und das gemittelte 95 % Konfidenzintervall herangezogen. In Abbildung 6.4.2 werden die Ergebnisse vom Displayglas als Notfalldosimeter mit den Ergebnissen der Referenzdosimeter verglichen.

Der Vergleich zeigt, dass die Ergebnisse des Displayglases für 15 der 17 unterschiedlichen Mobiltelefone sehr gut mit den Referenzwerten übereinstimmen. Auf den Positionen P32 und P40 wird eine deutlich zu hohe absorbierte Dosis bestimmt. Diese Ausreißer werden im folgenden Kapitel diskutiert.

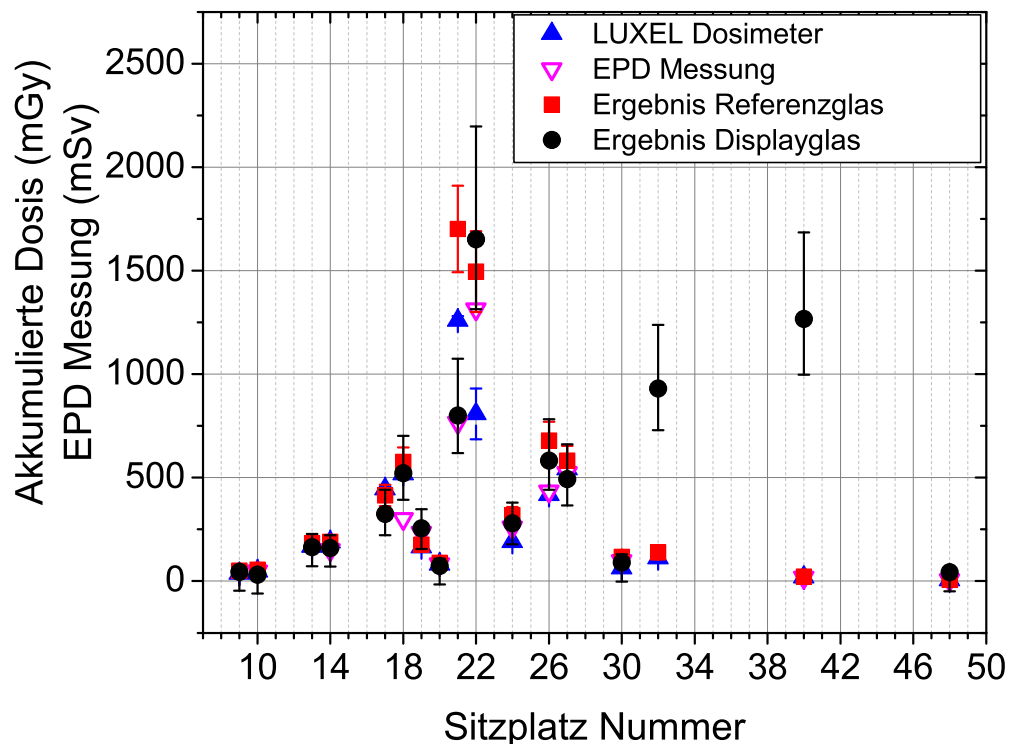


Abbildung 6.4.2: Ergebnisse der Referenzdosimeter, der Referenzgläser und der Displaygläser als Notfalldosimeter für den Versuchstag mit der stärkeren Quelle.

Eine weitere Möglichkeit, die gewonnenen Ergebnisse des Feldexperiments grafisch übersichtlich darzustellen, ist der direkte Vergleich der gemessenen Dosis im Displayglas mit den Dosiswerten der beiden Referenzdosimeter.

In Abbildung 6.4.3a ist das Ergebnis der Displayglasproben gegen das Ergebnis der LUXEL Dosimeter und in Abbildung 6.4.3b gegen die Referenzgläser aufgetragen.

In beiden Schaubildern orientieren sich die Werte an der ersten Winkelhalbierenden, die im Schaubild gestrichelt eingezeichnet ist. Ebenfalls ist die Nachweisgrenze von 130 mGy für die Dosisbestimmung angegeben.

Liegt der beste Schätzer der absorbierten Dosis unterhalb dieser Nachweisgrenze, so kann innerhalb des 95 % Konfidenzbereichs keine direkte Aussage getroffen werden, ob die Probe bestrahlt worden ist oder nicht. In einem solchen Fall kann das Ergebnis jedoch für die Abschätzung einer oberen Dosisgrenze herangezogen werden. Die beiden Ausreißermessungen an den Positionen P32 und P40 sind deutlich in den beiden Abbildungen zu erkennen. Die Diskussion dieser Messungen wird im folgenden Kapitel durchgeführt.

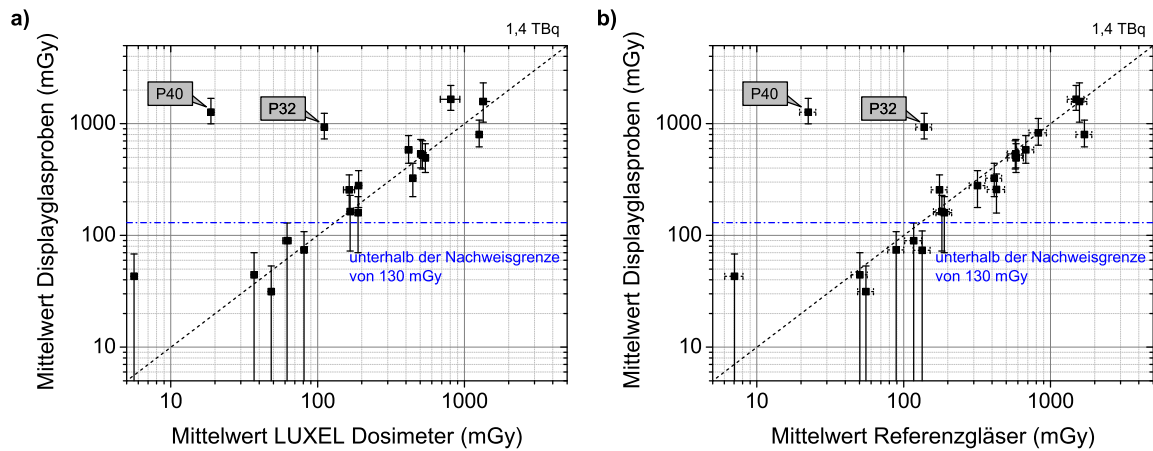


Abbildung 6.4.3: Vergleich der Ergebnisse der Referenzdosimeter, der Referenzgläser und der Displaygläser als Notfalldosimeter für den Versuchstag mit der stärkeren Quelle.

In Abbildung 6.4.4 werden die Ergebnisse für den Versuchstag mit der schwächeren Quelle dargestellt. Anhand der Referenzwerte werden 6 Proben als Ausreißer an den Positionen P10, P18, P22, P32, P40 und P48 klassifiziert.

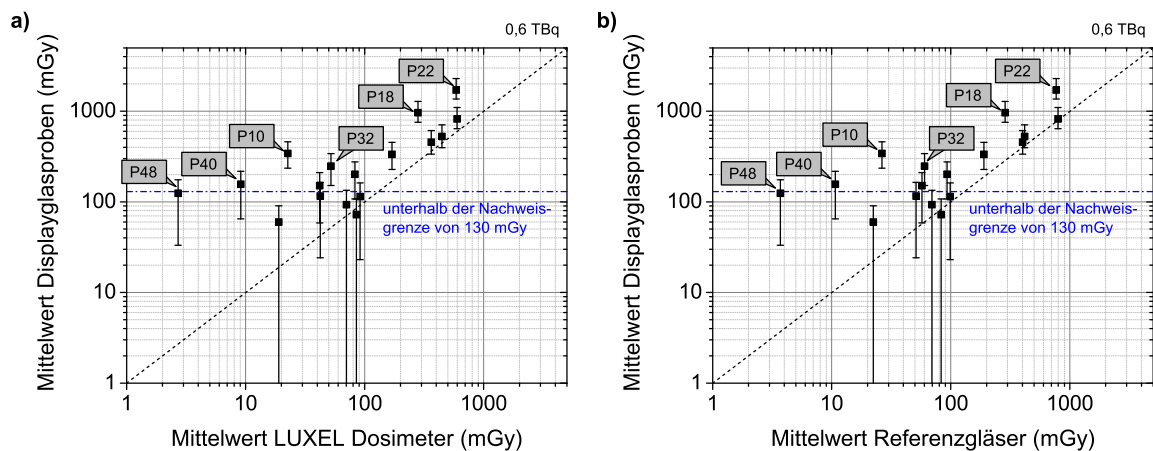


Abbildung 6.4.4: Vergleich der Ergebnisse der Referenzdosimeter, der Referenzgläser und der Displaygläser als Notfalldosimeter für den Versuchstag mit der schwächeren Quelle.

6.4.3 Diskussion der Ausreißer

Die Klassifizierung der Ausreißer wird dadurch begründet, dass erstens mit dem Dosis-Abstandsquadratgesetz eine so hohe absorbierte Dosis nicht erwartet wird⁵ und dass zweitens die gemessenen Dosen signifikant von den Referenzdosiswerten abweichen. Dies wird durch das Ergebnis anderer Notfalldosimeter, wie der Widerstände und der Chipkarten, welches

⁵Das Dosis-Abstandsquadratgesetz kann hier als obere Grenze der maximal möglichen Dosis angesehen werden, da die tatsächlichen Dosen durch Abschirmung geringer ausfallen können (siehe auch Abbildung 6.5.3)

für die relevanten Sitzplatzpositionen mit den Referenzdosimetern übereinstimmt, gestützt (Woda (2014), pers. Kommunikation bzw. siehe nächstes Kapitel). Die genaue Untersuchung der TL-Messungen zeigte, dass das Verhältnis des Nulldosissignal-Peaks zum Peak des strahleninduzierten Signals ungewöhnlich hoch bzw. höher als bei allen bis dahin untersuchten Proben ist. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Hintergrunddosis für diese Proben höher ausfällt als in der Verteilung in Abbildung 4.1.3 angenommen. Damit wird mit dem beschriebenen Auswerteverfahren selbst im Rahmen der abgeschätzten Unsicherheit eine zu geringe Hintergrunddosis abgezogen, was zu der beobachteten Überschätzung führt. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass in der Voruntersuchung die Anzahl der untersuchten Proben nicht erschöpfend war und nicht der volle Umfang einer Verteilung der Nulldosis mit den 28 untersuchten Proben erfasst worden ist. Deshalb wurde eine zusätzliche Methode zur Qualitätssicherung in der Dosisbestimmung entwickelt, um solche Fälle kennzeichnen bzw. herausfiltern zu können.

Für die Dosisbestimmung wird generell der Integrationsbereich zwischen 100 und 250°C benutzt (Discher und Woda (2013)). Die ungenutzte Information im höheren Temperaturbereich des TL-Signals zwischen 300 und 450°C kann zur Methode für die Qualitätssicherung in der Dosisbestimmung herangezogen werden. Hier ist das strahleninduzierte Signal gegenüber dem ursprünglichen Integrationsbereich von 100-250°C reduziert oder bleibt zumindest annähernd konstant, während in der Regel das Nulldosissignal am ausgeprägtesten ist. Demnach kann die aus diesem Temperaturbereich berechnete Dosis einer exponierten Probe als obere Abschätzung der möglichen Hintergrunddosis dienen. Berechnet man die Verteilung der Hintergrunddosis für den höheren Temperaturbereich aus den 28 unexponierten, geätzten Proben, die in Kapitel 4.1, in Abbildung 4.1.3 vorgestellt wurden, so gibt der Vergleich dieser Verteilung mit der Abschätzung der Hintergrunddosis der unbekannt Probe eine Entscheidungshilfe, ob die Hintergrunddosis auch für den letztlich für die Dosimetrie relevanten Temperaturbereich von 100-250°C durch die Verteilung erfasst wird oder nicht.

Ähnlich wie in Kapitel 4.1.3 kann die Verteilung der Hintergrunddosis im höheren Temperaturbereich durch eine log-normale Verteilung mit den Parametern $\mu = 5,83095$ und $\sigma = 0,70003$ angenähert werden. Zur Beurteilung des Messergebnisses der unbekannt Probe kann ein festgelegter Schwellenwert der Hintergrunddosis, je nach gewählten p-Quantil herangezogen werden⁶. Die Schwelle wird über das p-Quantil einer logarithmischen Normalverteilung über die Beziehung $D_{\text{Schwelle}} = \exp[\mu + p \cdot \sigma]$ berechnet (Jörß und Handke (2014); Müller (1991)). Für die im Feldexperiment identifizierten Ausreißer ist das Ergebnis dieser Analyse in Tabelle 6.1 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass nicht alle Ausreißer mit den benutzen Werten des p-Quantils korrekt klassifiziert werden konnten. Dies ist dadurch begründet, dass das Verhältnis von Hintergrunddosis berechnet im höheren Temperaturbereich zu Hintergrunddosis im relevanten Temperaturbereich berechnet von 100-250°C nicht für alle Proben gleich groß ist (siehe Details zur Untersuchung des Nulldosissignals in Discher und Woda (2013)).

⁶Die p-Werte sind in der Standardliteratur tabelliert und können beispielsweise online entnommen werden (Brandt (1970)).

p-Quantil	p-Wert	Schwelle der Hintergrunddosis (mGy)	Ausreißer positiv	Falsche Klassifizierung
0,900	1,2816	836	6 von 8	3
0,950	1,6449	1078	5 von 8	2
0,975	1,9600	1343	4 von 8	1
0,980	2,0537	1435	4 von 8	0
0,990	2,3263	1736	3 von 8	0
0,999	3,0902	2964	2 von 8	0

Tabelle 6.1: Ergebnisse der Ausreißerklassifizierung mit einer Schwelle der Hintergrunddosis.

Bei der Anwendung der Ausreißerklassifizierung auf die Gesamtheit aller 34 durchgeführten Displayglas-Messungen tauchen falsche Klassifizierungen als Nebeneffekt auf, die von der Überschätzung der Hintergrunddosis stammen. Aus diesem Grund kann anhand der Auswahl des p-Quantils ein Kompromiss aus der Erfassung von Ausreißern und Vermeidung falscher Klassifizierungen erfolgen. Aus Tabelle 6.1 würde beispielsweise für die hier untersuchten Proben ein p-Quantil von 0,980 geeignet erscheinen, wobei die zugehörige Schwelle der Hintergrunddosis 1435 mGy beträgt.

6.4.4 Vergleich der Dosisabschätzungen zweier strahlenempfindlicher Komponenten ein und desselben persönlichen Gegenstands

Der Vergleich der Dosisabschätzung ist unter Verwendung zweier unabhängiger Komponenten, wie Displayglas und Widerstände, die aus demselben Mobiltelefon entnommen wurden, in Abbildung 6.4.5a für die stärkere Quelle und in Abbildung 6.4.5b für die schwächere Quelle gezeigt. Für einen direkten Vergleich werden die Daten als eine Funktion der Sitzplatznummer dargestellt.

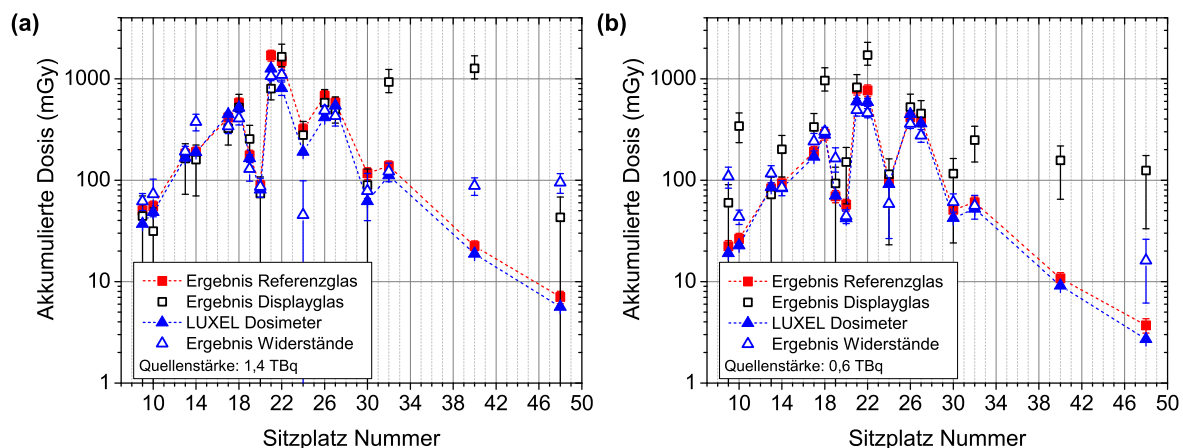


Abbildung 6.4.5: Vergleich der Dosisabschätzung mit zwei unterschiedlichen Komponenten eines gleichen Mobiltelefons (Displayglas und Widerstände) und zugehörige Referenzdosimeter (Referenzglas und LUXEL Dosimeter), für den Versuchstag mit der stärkeren (a) und schwächeren Quelle (b).

Diese Daten sind eine Kombination aus den Ergebnissen der Referenzdosimeter (siehe Abbildung 6.4.1), der Displaygläser (siehe Abbildung 6.4.2) und der Widerstände⁷. Wie bereits in Abbildung 6.4.1 zu sehen ist, zeigen beide Referenzdosimeter (Referenzgläser und LUXEL Dosimeter) ähnliche Ergebnisse in Bezug auf die tatsächlich absorbierte Dosis an.

Weist eine der beiden Methoden der Dosisabschätzung eine starke Über- oder Unterschätzung auf, liefert die andere Methode ein Ergebnis nahe am Referenzwert, was darauf hinweist, dass sich in der ersten Messung ein Fehler befinden kann. Selbst wenn, wie es bei einem wahren Unfallszenario der Fall ist, die tatsächliche Dosis unbekannt ist, führt in der Regel die starke Abweichung zweier Messergebnisse zu ein und derselben Größe einer genaueren Überprüfung des Sachverhalts. Diese Überprüfung kann dazu führen, dass der wahre Ausreißer identifiziert wird (beispielsweise anhand der vorgestellten Methode für Displayglas im vorherigen Kapitel) oder dass zumindest eine deutliche Reduzierung des Grades der Über- oder Unterschätzung durch die Mittelung der Dosisergebnisse erreicht wird.

Ein solcher Multi-Parameter-Ansatz erhöht somit deutlich die Genauigkeit und Robustheit der Dosisbestimmungsmethode anhand persönlicher Gegenstände.

6.5 Ergebnisse der Strahlentransportrechnungen

Um die experimentellen Ergebnisse zu verifizieren, wurden Strahlentransportrechnungen mit dem Monte Carlo Code MCNP durchgeführt. Dafür wurden zunächst die Geometrien der Dosimeter, des Busses und seiner näheren Umgebung, soweit sie für die Rechnung relevant sind, in der Simulationssoftware erstellt.

6.5.1 Geometriemodell des Experiments

Die Umgebung des Feldexperiments wurde so detailgetreu wie möglich in die MCNP Simulation integriert. Der Erdbunker, die Container und der Erdboden wurden als einfache Geometriekörper dargestellt. Wie in Kapitel 6.2 vorgestellt, ist der Erdbunker aus aufgeschütteten Erdwällen aufgebaut. Der Querschnitt dreier Erdwälle kann als gleichschenkliges Trapez mit einer aufgeschütteten Höhe von mindestens 2,5 m und einer Grundseite von ca. 6 m beschrieben werden, jener des vierten Erdwalls als höherer und breiterer Wall mit einer Höhe von ca. 4 m und einer Grundseite von ca. 9 m (Lettner (2013), pers. Kommunikation). Die Materialzusammensetzung und Dichte von Erde wurden aus einer Veröffentlichung über Strahlentransportrechnungen von Umweltradioaktivität entnommen (Saito und Jacob (1995)).

Die Container, die zur Abschirmung der Strahlung auf der Hinterseite des Busses verwendet wurden, sind genormte Großraumbehälter aus Stahl. Die Dimensionen und Materialdicke wurden aus technischen Zeichnungen entnommen (Shipping Container Homes (2014)).

Das Experiment wurde mit einem INTEGRO Bus des Herstellers Mercedes Benz durchgeführt, Abmessungen und Dimensionen des Busaufbaus stammen aus einer technischen Zeichnung des Herstellers (EvoBus GmbH (2007)).

⁷Das Ergebnis der Widerstände wurde mit OSL-Messungen bestimmt, wobei das Messprotokoll in Kapitel 2.3 (Vorstellung der Dosimeter) erläutert ist. Die Daten wurden aus dem CATO Project Deliverable (2014) entnommen.

Aus zusätzlichen Messungen vor Ort wurden nicht bekannte Innendetails des Busses, wie beispielsweise Sitzplatzdimensionen und zugehörige Reihenabstände, ergänzt. Die Materialzusammensetzung und Materialdichte wurden aus einer Standardliteratur für Strahlentransportberechnungen entnommen (Williams et al. (2006)), da keine genauen Materialspezifikationen vorlagen.

Als Phantome wurden Wasserbehälter integriert, welche die Dimension der im Experiment benutzen Wasserkanister besaßen und an denselben Sitzplatzpositionen platziert wurden.

In Abbildung 6.5.1a und 6.5.1b ist die simulierte Geometrie mit dem 3D Geometrie Plotter Programm „visedX_24“ dargestellt.

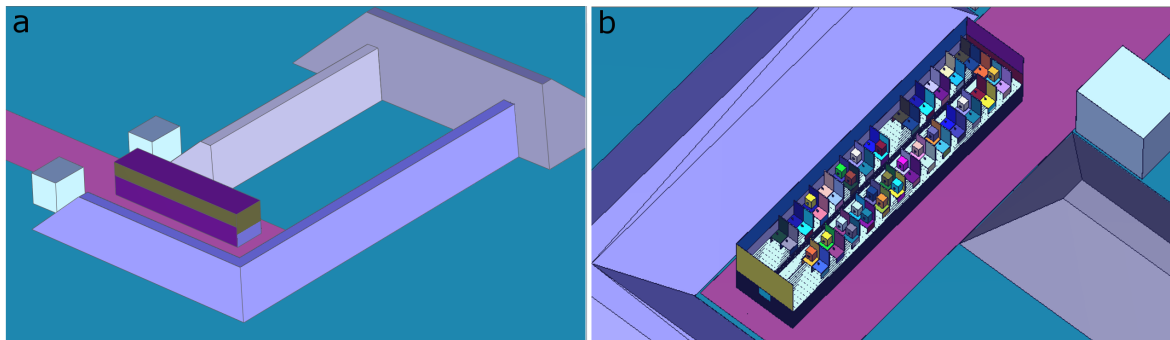


Abbildung 6.5.1: Geometrie des Feldexperiments integriert in der MCNP Simulation.

Die idealisierte Geometrieform des Erdbunkers und die Position der quaderförmigen Container sind erkennbar. In Abbildung 6.5.1b ist die Draufsicht auf den Bus gezeigt, um den Innenaufbau des Businterieurs und den Sitzplan im Detail zu zeigen. Ebenfalls sind die Wasserkanister an den ausgewählten Positionen dargestellt.

Die vollständig integrierte Umwelt in der MCNP Simulation besitzt die Abmessungen von $300 \times 300 \times 21 \text{ m}^3$, wobei sich der Ursprung auf die Mitte der Frontseite des Busses bezieht.

6.5.2 Simulationsdetektoren zur Dosisbestimmung

Zur Berechnung der absorbierten Dosis in Luft wurde an jedem Sitzplatz des Busses eine Luftzelle definiert. Diese befindet sich an der Position mittig vor dem Wasserphantom. Die Dimension der Luftzelle entspricht der Größe eines elektronischen Personendosimeters⁸ $8,6 \times 6,2 \times 1,85 \text{ cm}^3$.

Zur Simulation der absorbierten Dosis im Material des Notfalldosimeters wurde ein Mobiltelefon an der entsprechenden Sitzplatzposition integriert. Es handelt sich um das idealisierte Modell eines Nokia 5250 Mobiltelefons, das in Kapitel 5 ausführlich vorgestellt und untersucht wurde. Das Mobiltelefon wurde ebenfalls mittig vor dem Wasserphantom platziert und die absorbierte Dosis über das gesamte Glasmaterial des hinteren Displayglases bestimmt. Die Dimensionen der Glasplatte als Detektor betragen insgesamt $5,0 \times 6,4 \times 0,05 \text{ cm}^3$.

⁸Die Abmessungen sind aus dem technischen Datenblatt des elektronischen Personendosimeters EPD Mk2 der Firma Thermo Electron Corporation entnommen worden (Auswertestelle Helmholtz Zentrum München (2013)).

Die absorbierte Dosis im Material wurde mit dem F6 Tally (Energiedeposition in einer Zelle über den Weglängen Schätzer, engl. track length estimator) bestimmt und über die Gleichung 5.1.4 (siehe Kapitel 5.1.2) berechnet. Zur Berechnung der Anzahl N wurden die zerfallskorrigierte Aktivität A der Ir-192 Quelle, die Expositionsdauer t und die Gesamtzahl der Photonen aus der Emissionswahrscheinlichkeit pro Zerfall Y (engl. photon yield) hergenommen. Die Gleichung 5.1.4 kann umgeschrieben werden zu:

$$D = F6 \cdot N = F6 \cdot A \cdot t \cdot Y. \quad (6.5.1)$$

Bei der Abschätzung der Unsicherheit der simulierten Ergebnisse, basierend auf obiger Formel, ist die Hauptunsicherheit die Aktivität der Bestrahlungsquelle. Die Aktivität der Quelle wird nicht exakt bestimmt, sondern im definierten Abstand über die Dosisleistung gemessen. Dabei beträgt die Eichfehlergrenze der Dosisleistungsmessgeräte mindestens 20 % (Stettner (2014), pers. Kommunikation). Die Expositionszeit birgt eine weitere Fehlerquelle, die auf 1 % abgeschätzt wird⁹. Die statistische Unsicherheit aus der MCNP Simulation mit der Anzahl von $1 \cdot 10^8$ bis $8 \cdot 10^8$ Quellenteilchen (NPS, engl. number of particles) beträgt zwischen 1 und 5 % je nach Sitzplatzposition des Detektors und daraus resultierendem Abstand zur Quelle.

6.5.3 Beschreibung der Ir-192 Gammaquelle

Der Iridiumstrahler wurde als punktförmige, isotrope Quelle im Gepäckraum des Busses in die Simulation integriert. Die Quelle ist vereinfacht dargestellt, da die radioaktive Kapsel der Strahlenquelle einen Durchmesser von nur 2 mm besitzt und dadurch die ausgedehnte Quellendimension im Verhältnis zum simulierten Geometrieaufbau vernachlässigt werden kann. Das Photonen-Energiespektrum der Ir-192 Quelle wurde aus der tabellierten Gamma-Emission entnommen (siehe Anhang B, Tabelle B.1) und in die MCNP Simulation als Histogramm aus diskreten Energien und zugehörigen Wahrscheinlichkeiten integriert.

Die Position der Quelle im Gepäckraum wurde aus Abstandsmessungen vor Ort relativ zur äußeren Busabmessung bestimmt. Der Abstand zwischen dem Ursprung der Quelle und der vertikalen Ebene mittig zu den Luftzellen wird auf 80 cm berechnet. Die Abstandsberechnung ist jedoch mit einer Ungenauigkeit behaftet, da der Abstand zwischen Quellenposition und Strahlendetektor im Experiment nur indirekt bestimmt werden konnte. Zur Berechnung der akkumulierten Dosis wurde die Quellenaktivität der stärkeren Quelle ($A = 1,4$ TBq am Versuchstag) mit einer Expositionsdauer von $t = 8$ h herangezogen.

6.5.4 Ergebnisse der Simulation

Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 6.5.2a zusammen mit den Ergebnissen der Referenzdosimeter und Displayglas dargestellt. Die absorbierte Dosis im simulierten Mobiltelefon gibt den experimentell bestimmten Dosiswert an den meisten Sitzplatzpositionen wieder. An den Sitzplatzpositionen nahe der Quellenposition sind jedoch Unterschiede zwischen gemessener und simulierter absorbierter Dosis im Displayglas beobachtbar.

⁹In der Unsicherheit ist ebenfalls die Zeitdauer berücksichtigt, die zum Öffnen und Schließen der Ir-192 Quelle benötigt wird.

Eine Tendenz der Überbestimmung ist an Position P21 und P30 deutlich zu erkennen (bis zu einem Faktor 3,1). Diese Unterschiede können durch das sehr generalisierte Geometriemodell des Busses erklärt werden, da nur die Hauptelemente in der Simulation integriert worden sind. Vernachlässigte Elemente können zu einer stärkeren Abschwächung der Strahlung beitragen als es in der durchgeführten Simulation beobachtet wird. Zusätzlich können Positionierungsunterschiede der Dosimeter im Experiment und in der Simulation eine Rolle spielen. Dennoch ist die MCNP Simulation ein hilfreiches Instrument, um die zu erwartenden Dosen an unterschiedlichen Sitzplatzpositionen abzuschätzen.

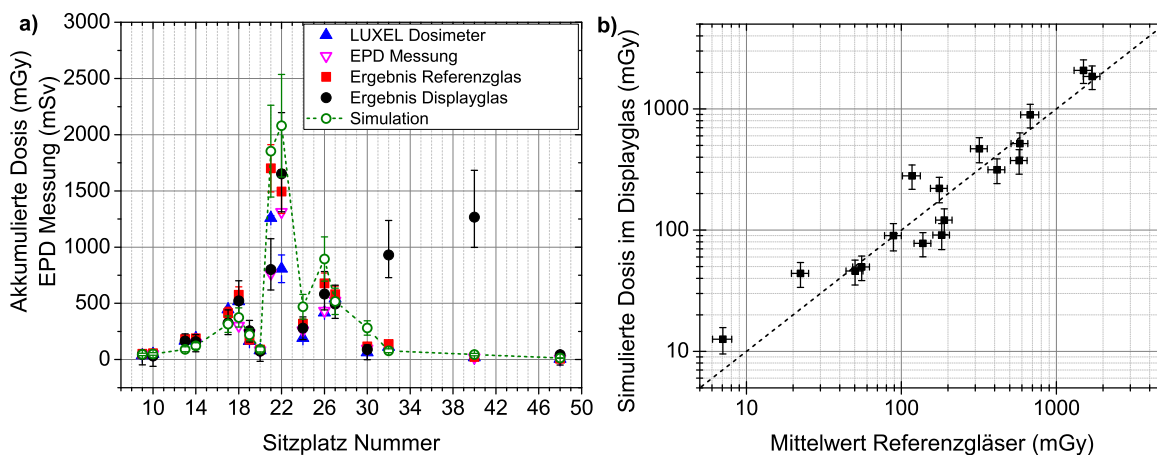


Abbildung 6.5.2: Vergleich der Simulation mit den experimentell gemessenen Ergebnissen von Referenzdosimeter, Referenzgläsern und Displayglas als Unfalldosimeter.

Der Vergleich der simulierten absorbierten Dosis im Displayglas mit den experimentellen Ergebnissen der Referenzgläser ist in Abbildung 6.5.2b gezeigt. Die Datenwerte orientieren sich an der ersten Winkelhalbierenden, die im Schaubild gestrichelt eingezeichnet ist.

In Abbildung 6.5.3 sind die Ergebnisse für die absorbierte Dosis in den Luftzellen vor dem Wasserphantom für zwei unterschiedliche Simulationssetups gezeigt. Im ersten Setup wurden die Wasserphantome analog zum Experiment auf den Sitzplätzen integriert. Im zweiten Setup hingegen wurden die Wasserphantome weggelassen, um Effekte wie Rückstreuung und Abschirmung zu untersuchen. Zusätzlich wurde die Dosis $D(r)$ in Abhängigkeit des Abstandes r mithilfe der Expositionszeit t und der Dosisrate $\dot{D}(r)$ aus dem Dosis-Abstandsquadratgesetz einer punktförmigen Strahlenquelle mit der Aktivität A über die Beziehung $D(r) = \dot{D}(r) \cdot t = \frac{A}{r^2} \Gamma \cdot t$ berechnet. Der Konversionskoeffizient $\Gamma = 1,230 \cdot 10^{-1} \frac{\text{mGy m}^2}{\text{h GBq}}$ für Ir-192 wurde aus Tschurlovits et al. (1992) entnommen.

Das Ergebnis der Simulation für das Setup ohne Wasserphantome stimmt gut mit den Werten überein, die über das Dosis-Abstandsquadratgesetz berechnet werden. Die Abweichungen für einen Abstand von $r > 300$ cm sind mit den Abschirmungseffekten von Luft und dem Aufbau des Busses zu erklären, die in der Berechnung des Dosis-Abstandsquadratgesetzes nicht berücksichtigt worden sind. In Abbildung 6.5.3 sind 10 Positionen markiert, an denen die Effekte für Rückstreuung und Abschirmung des Wasserphantoms im Detail untersucht wurden. Der Abschirmungseffekt der Wasserphantome ist für die Sitzreihen der Positionen P17+P18, P13+P14 und P09+P10 deutlich ausgeprägt. An diesen Positionen befindet sich

das Wasserphantom zwischen der Quellenposition und der Luftzelle als Detektor. Die Abschirmung lässt sich aus dem Unterschied der akkumulierten Dosis berechnen und beträgt an diesen Positionen zwischen 69 und 76 % im Vergleich zur Simulation ohne Wasserphantom. An diesen Sitzreihen wird die Luftzelle hauptsächlich indirekt bestrahlt.

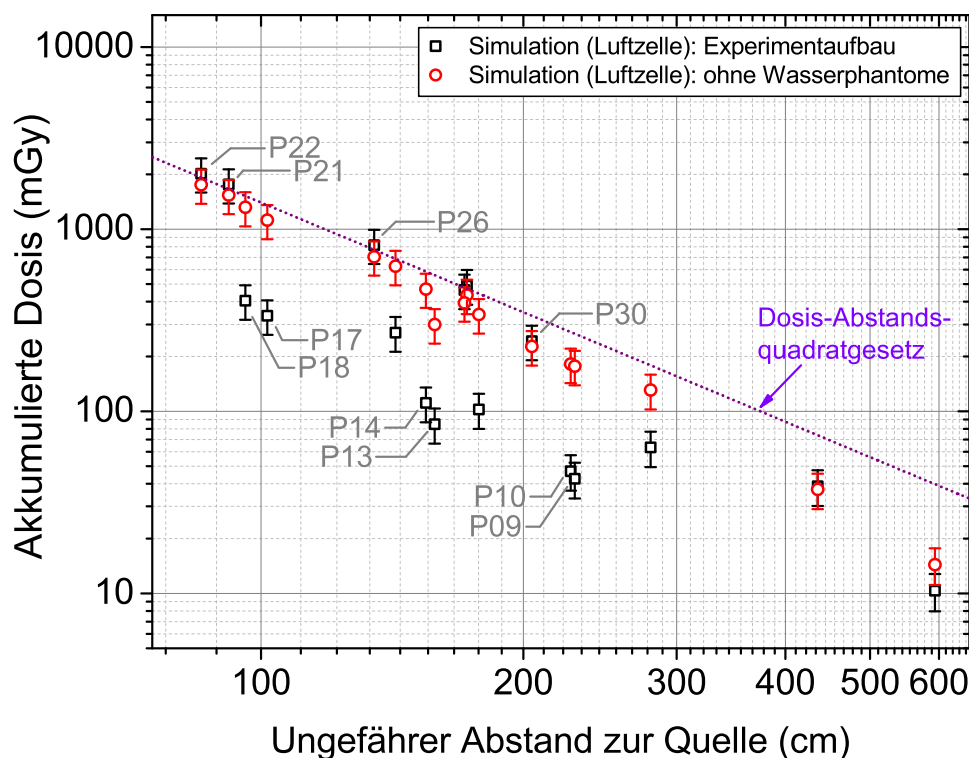


Abbildung 6.5.3: Simulationsvergleich: Wasserphantome, platziert wie im Experimentaufbau (schwarze Symbole) im Vergleich zur Simulation ohne Wasserphantome (rote Symbole).

Für die Sitzreihen der Positionen P21+P22, P26 und P30 ist die Rückstreuung des Wasserphantoms beobachtbar. An diesen Positionen befindet sich die Luftzelle als Detektor zwischen der Quellenposition und dem Wasserphantom. Die Rückstreuung bzw. die Dosisüberschätzung, die sich aus dem Unterschied der akkumulierten Dosis berechnet, beträgt zwischen 7 und 15 % im Vergleich zur Simulation ohne Wasserphantom. Zwar sind die Ergebnisse im Rahmen der angegebenen Unsicherheit in der Darstellung nicht signifikant unterschiedlich, da die Unsicherheiten hauptsächlich durch die Eichgenauigkeit der Quelle von 20 % verursacht werden (siehe Kapitel 6.5.2). Für den direkten Vergleich der Ergebnisse der Simulation sind jedoch nur die Unsicherheiten der Simulation relevant, die je nach Sitzplatzposition zwischen 0,5 und 2 % betragen.

Untersuchung der Energiedeposition in Abhängigkeit der Photonenenergie

Das Photonenpektrum an der Detektorposition wurde mit dem F6 Tally (Energiedeposition in einer Zelle über den Weglängen Schätzer) sowohl für die Glaszelle im Mobiltelefon, als auch für eine Luftzelle an derselben Position berechnet.

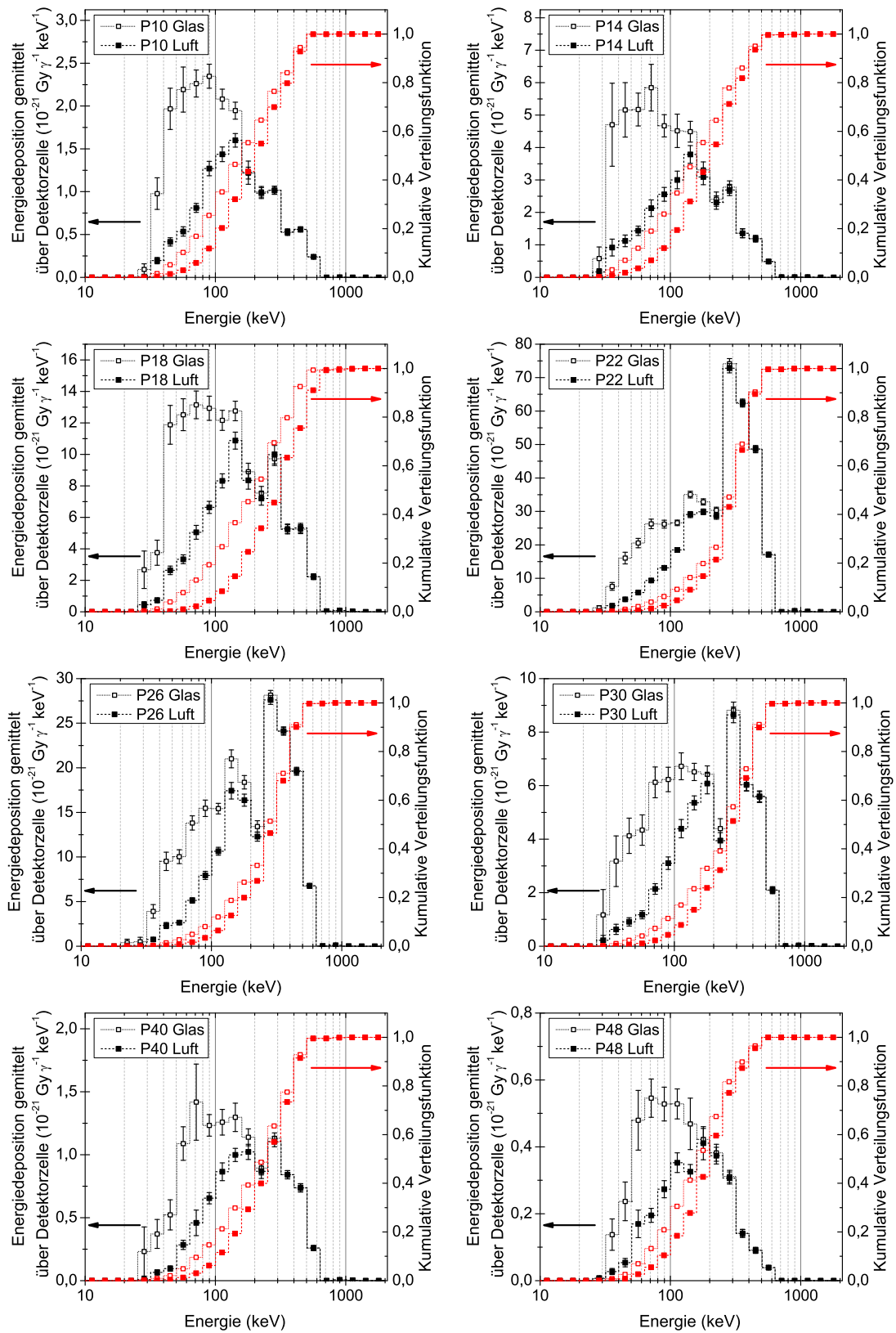


Abbildung 6.5.4: Untersuchung der Energiedeposition in der Detektorzelle für Glas (offene Symbole) und für Luft (ausgefüllte Symbole) als Detektormaterial abhängig vom Photonenspektrum an ausgewählten Sitzplatzpositionen und zugehöriger kumulativer Verteilungsfunktion (entsprechende rote Symbole).

Für die Berechnung wurden in logarithmischer Darstellung 30 gleich verteilte Energie-Bins zwischen 10 keV und 10 MeV gewählt. Die Energiedeposition als Eintrag eines Bins wird auf die jeweilige Binbreite normiert. Die kumulative Verteilungsfunktion wird auf die gesamte Energiedeposition berechnet, um den jeweiligen Beitrag der Gammaquanten eines Photonenenergiebereichs zur totalen Energiedeposition in der Zelle an ausgewählten Sitzplatzpositionen zu analysieren.

Abbildung 6.5.4 zeigt die Ergebnisse für Glas (offene Symbole) und für Luft (ausgefüllte Symbole) als Detektormaterial an unterschiedlichen Sitzplatzpositionen, die sich auf der Ursprungsachse zur Strahlenquelle befinden. Aus der Analyse der Energiedepositionsspektren kann der Beitrag der sekundär gestreuten Photonen mit dem Beitrag der ungestreuten Photonen aus der Strahlenquelle verglichen werden. Im Allgemeinen ist der Beitrag der niederenergetischen Photonen (< 200 keV) zur Gesamtenergiedeposition für das Displayglas größer als für Luft. Dies ist ebenfalls in jedem Energie-Bin in der kumulativen Verteilungsfunktion beobachtbar. An Sitzplatzpositionen P10, P14 und P18 wird der Detektor indirekt durch das Wasserphantom hindurch bestrahlt und niederenergetische Photonen werden durch Streueffekte wie beispielsweise die Comptonstreuung verursacht. An diesen Sitzplatzpositionen zeigen die Spektren der gemittelten Energiedeposition in Luft und in der Glaszelle einen nahezu ähnlichen Verlauf. Aus der kumulativen Verteilungsfunktion wird entnommen, dass Photonen bis zu einer Energie von 100 keV bis zu ca. 19-26 % der Energiedeposition im Glasmaterial bzw. 5-12 % der Energiedeposition in Luft bewirken.

Die Sitzplatzposition sehr nahe an der Strahlenquelle ist Position P22. Der Beitrag der niederenergetischen Photonen wird für diesen Platz bei ca. 6 % für Glas bzw. 3 % für Luft als am geringsten berechnet und der Hauptanteil der Energiedeposition wird durch den ungestreuten Anteil der Photonen zwischen 250 und 600 keV der Ir-192 Quelle verursacht. Für die Sitzplatzpositionen P26, P30, P40 und P48 nimmt mit zunehmendem Abstand zur Strahlenquelle der Anteil der ungestreuten Photonen der Ir-192 Quelle wiederum ab und damit nimmt der Anteil der sekundär gestreuten Photonen bis 100 keV zu. Dieser niederenergetische Beitrag hat einen Anteil von 8-21 % zur gesamten Energiedeposition im Glasmaterial bzw. 3-10 % der Energiedeposition in Luft.

Der direkte Vergleich des Verhältnisses der Energiedeposition von Displayglas zu Luft ist in Tabelle 6.2 berechnet.

Position	Absorbierte Dosis in Glas (10^{-19} Gy γ^{-1})	Absorbierte Dosis in Luft (10^{-19} Gy γ^{-1})	Verhältnis Glas zu Luft
P10	5,59±0,11	4,41±0,10	1,27±0,04
P14	13,60±0,39	10,50±0,29	1,29±0,05
P18	42,18±0,76	35,23±0,73	1,20±0,03
P22	234,08±2,20	218,48±2,05	1,07±0,01
P26	100,60±1,04	91,61±0,93	1,10±0,02
P30	31,60±0,56	27,87±0,48	1,13±0,03
P32	8,76±0,14	7,28±0,12	1,20±0,03
P40	4,94±0,11	4,20±0,08	1,18±0,03
P48	1,42±0,05	1,14±0,04	1,25±0,06

Tabelle 6.2: Verhältnis der Energiedeposition für Glas und für Luft als Detektormaterial.

Mit zunehmendem Abstand zur Strahlenquelle, die sich nahe der Sitzplatzposition P22 befindet, vergrößert sich das Verhältnis von absorbierter Dosis in Displayglas zu Luft bis zu einer Überschätzung um einen maximalen Faktor von $1,29 \pm 0,05$ an Sitzplatzposition P14. Diese Überschätzung wird im Folgenden mit der aus der gemessenen (siehe Kapitel 4.4.1) und der simulierten Energieabhängigkeit von Displayglas (siehe Kapitel 5.3.1) berechneten Überschätzung verglichen.

Mit dem Spektrum der Energiedeposition in der luftgefüllten Detektorzelle Ξ und der interpolierten Energieabhängigkeit von Displayglas R mit einer diskreten Energieaufteilung in 30 Energie-Bins kann die Überschätzung F auf folgende Weise berechnet werden:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{30} R(i)\Xi(i)}{\sum_{i=1}^{30} \Xi(i)}. \quad (6.5.2)$$

Daraus ergibt sich die berechnete Überschätzung aus der Energieabhängigkeit des Displayglases für die jeweilige Sitzplatzposition (siehe Tabelle 6.3).

Position	berechnete Überschätzung F
P10	$1,50 \pm 0,07$
P14	$1,52 \pm 0,08$
P18	$1,40 \pm 0,06$
P22	$1,18 \pm 0,06$
P26	$1,22 \pm 0,06$
P30	$1,26 \pm 0,06$
P32	$1,39 \pm 0,06$
P40	$1,32 \pm 0,06$
P48	$1,47 \pm 0,08$

Tabelle 6.3: Berechnete Überschätzung der absorbierten Dosis in Displayglas mithilfe der Energieabhängigkeit und dem Spektrum der Energiedeposition in der luftgefüllten Detektorzelle.

Die berechneten Werte der Überschätzung in Tabelle 6.3 sind tendenziell höher als das Verhältnis der Energiedeposition für Glas und Luft als Detektormaterial in Tabelle 6.2. Jedoch unterscheiden sich die berechneten Werte nicht signifikant (3σ). Die berechnete Überschätzung zeigt, dass diese in dem simulierten Busexperiment um einen Faktor von maximal 1,5 für die zur Strahlenquelle maximal-entfernten Sitzplatzpositionen (P10 bzw. P48) beschrieben wird. Obwohl Displaygläser bei niedrigen Photonenenergien ein starkes Detektoransprechverhalten aufweisen, zeigt dieses Experiment, dass in einem realistischen Unfallszenario mit wahrscheinlich auftretenden Gammastrahlern der Anteil an Streustrahlung gering ist. Selbst in ungünstigen Fällen fällt die Abweichung der gemessenen Dosis im Mobiltelefon von der Dosis in Luft moderat aus. Es ist zu erwarten, dass diese Abweichung bei Verwendung von Cs-137 oder Co-60 als radioaktive Quelle, mit Emissionen von höheren Photonenenergien beim radioaktiven Zerfall im Vergleich zu Ir-192, noch geringer ausfallen würde.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war die Weiterentwicklung und praktische Untersuchung der individuellen Notfalldosimetrie mit Displaygläsern aus Mobiltelefonen, die mit etablierten retrospektiven physikalischen und biologischen Dosisbestimmungsmethoden kombiniert werden kann.

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass durch die Optimierung der Probenaufbereitung, indem die Displayglasoberfläche chemisch geätzt wird, eine signifikante Reduzierung des intrinsischen Nullsignals erreicht werden kann, was in einer deutlichen Verbesserung der Nachweisgrenze resultiert. Dies wurde mit Bestrahlungsversuchen an extrahierten Glasproben verifiziert.

Durch die Messung der spektralen TL-Emission der unterschiedlichen Displayglaskategorien konnte erstmalig ein Detektionsfenster festgelegt werden, in dem die Signalsensitivität optimiert wird. Dabei wurden bestrahlte und unbestrahlte Glasproben, letztere zur Untersuchung des intrinsischen Nullsignals, aus unterschiedlichen Glaskategorien herangezogen. Die Ähnlichkeit der aufgezeichneten Peakwellenlängen für beide Glaskategorien im TL-Spektrum deutet an, dass dieselben Defekte im Rekombinationsprozess, jedoch mit einer deutlich unterschiedlichen relativen Intensität, involviert sind. Durch die Erkenntnisse aus der Spektralmessung konnte gezeigt werden, dass eine zuvor untersuchte Displayglasart (Borosilikatglas), die bisher als weniger geeignet klassifiziert wurde, in einem optimierten Detektionsfenster doch eine ausreichende Signalsensitivität aufzeigt. Somit konnten die dosimetrischen Eigenschaften dieser Glaskategorie neu bestimmt und Gläser dieser Kategorie mit einem geeigneten Messprotokoll und optimierter Filterkombination für die Notfalldosimetrie nutzbar gemacht werden.

Bisherige Untersuchungen von Displayglas fokussieren sich im Wesentlichen auf die Dosisbestimmung im Material des Notfalldosimeters. Die Dosis in Luft oder die Ganzkörperdosis eines Unfallopfers kann jedoch signifikant unterschiedlich sein. Dies war der Anlass zur Untersuchung der Richtungs- und Photonen-Energieabhängigkeit von Displayglas als Notfalldosimeter. Displayglas besitzt eine ausgeprägte Energieabhängigkeit mit einer Überschätzung um einen Faktor fünf für niedrige Photonenenergien (< 150 keV), was mit drei unterschiedlichen Mobiltelefonen (unterschiedliche Hersteller, Mobiltelefongenerationen und Displayglaskategorien) untersucht wurde. Die Richtungsabhängigkeit von Displayglas wurde für zwei unterschiedliche Expositionsgeometrien frei in Luft und mit einem ISO-Wasserphantom bestimmt und es zeigte sich ein unterschiedliches Verhalten. Dies ist durch die Überlagerung

unterschiedlicher Effekte erklärbar, wie Rückstreuung durch das Wasserphantom oder Abschirmung durch das Mobiltelefon. Unabhängig von der Expositionsgeometrie lässt sich festhalten, dass die Richtungsabhängigkeit für Displayglas bezogen auf Dosis in Luft innerhalb eines Einfallswinkels von $\pm 60^\circ$ hinreichend flach ist.

Im theoretischen Teil dieser Arbeit wurden Strahlentransportrechnungen zur Simulation der recht komplexen Bestrahlungs- und Abschirmungsgeometrie durchgeführt. Zunächst wurden einfache Versuchsdurchführungen von extrahierten Glasdetektoren und Bestrahlungen mit der Cs-137 Quelle des SSDLs nachgestellt. Dabei konnten die Dosis in Luft und die absorbierte Dosis im Glasdetektor in unterschiedlichen Abständen zwischen Quelle und Detektor (Dosis-Abstandsquadratgesetz) und mit unterschiedlichen Expositionsgeometrien (Bestrahlung frei in Luft oder mit einem ISO-Wasserphantom) verglichen werden. Mit einer generalisierten Geometrie eines Mobiltelefons konnten die durchgeführten Experimente bei der Bestimmung der Energie- und Richtungsabhängigkeit der Dosimeter-Response realitätsnah simuliert werden. Die simulierten Ergebnisse reproduzierten gut die experimentellen Messungen, wobei zusätzliche Effekte der Energieabhängigkeit in Abhängigkeit der Bestrahlungsbedingungen detaillierter untersucht wurden.

In einem Feldexperiment, das im Rahmen des europäischen Sicherheitsprojektes CATO durchgeführt wurde, konnten die Erkenntnisse aus Laborbestrahlungen realitätsnah validiert werden. Ebenfalls wurden die Verwendbarkeit und Zuverlässigkeit der individuellen Notfalldosimetrie unter realen Bedingungen getestet. Das durchgeführte Feldexperiment war angelehnt an den radiologischen Unfall 2002 in Cochabamba (Bolivien). Aufgrund eines Defekts und unsachgemäßer Handhabung einer industriell eingesetzten Radiographie-Gammaquelle, die als Fracht im Gepäckraum eines Linienfernbusse transportiert worden ist, wurden 55 Buspassagiere unbewusst ionisierender Strahlung ausgesetzt.

Mithilfe persönlicher, körpernah getragener Gegenstände als Notfalldosimeter wie das Mobiltelefon oder Chipkarten, konnte die absorbierte Dosis in diesem Falle eines radiologischen Unfalls rekonstruiert werden. Als individuelle Referenzdosiswerte wurden etablierte, sowie amtliche Personendosimeter in den Versuchsaufbau integriert. Die Ergebnisse für Displayglas stimmten in den meisten Fällen sehr gut mit den Referenzwerten überein. Es wurden jedoch vereinzelt Ausreißer ermittelt. Die genaue Untersuchung der TL-Messungen zeigte ein Vorhandensein eines sehr ausgeprägten Nulldosissignals im Hochtemperaturbereich der TL-Ausleuchtcurve, wodurch sich die Überschätzung der Dosis bei den Ausreißern erklären lässt. Das führte dann zu der Annahme, dass in der Voruntersuchung die Anzahl der untersuchten Proben nicht erschöpfend war und nicht der volle Umfang einer Verteilung der Hintergrunddosis erfasst worden ist. Deshalb wurde eine zusätzliche Methode zur Bestimmung der Dosis in der Auswertung der Messdaten entwickelt, um als Qualitätssicherung Ausreißer kennzeichnen bzw. herauszufiltern zu können.

Ebenfalls wurden die experimentellen Daten des Feldexperimentes mit Strahlentransportrechnungen verifiziert. Dafür wurden zunächst die Geometrien der Dosimeter, des Busses und seiner näheren Umgebung, soweit sie für die Rechnung relevant sind, in der Simulationssoftware detailgetreu erstellt. Die Ergebnisse der Simulation der absorbierten Dosis im simulierten Mobiltelefon gaben den experimentell bestimmten Dosiswert an den meisten Sitzplatzpositionen wieder. Jedoch waren Unterschiede zwischen den simulierten absorbierten Dosen im Displayglas und den experimentellen Werten speziell an den Sitzplatzpositionen nahe der Quellenposition beobachtbar. Erklärbar sind diese Unterschiede durch eine Kom-

bination aus der Generalisierung des Bus-Geometriemodells, wobei vernachlässigte Elemente zu einer stärkeren Abschwächung der Strahlung beitragen könnten, und zusätzlich aus den Positionierungsunterschieden der Dosimeter zwischen Experiment und Simulation. Dennoch ist die MCNP Simulation ein hilfreiches Instrument, um die zu erwartenden Dosen an unterschiedlichen Sitzplatzpositionen abzuschätzen.

Die MCNP Simulation wurde ebenfalls zur Berechnung der Photonenspektren der Energiedeposition herangezogen. Damit konnte die Überschätzung der absorbierten Dosis in Displayglas mithilfe der Energieabhängigkeit von Glas und dem Spektrum der Energiedeposition in der luftgefüllten Detektorzelle berechnet werden. Es zeigte sich, dass die Überschätzung in dem simulierten Busexperiment um einen Faktor von maximal 1,5 für die zur Strahlenquelle maximal-entfernten Sitzplatzpositionen beschrieben wurde.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die Dosisbestimmung mit persönlichen Gegenständen als Notfalldosimeter eine rasche und robuste Methode ist. Mit der Kombination unterschiedlicher Materialien und Messmethoden, wie TL-Messungen an Displayglas und OSL-Messungen an Widerständen, kann eine verlässliche physikalische Dosisbestimmung durchgeführt werden. Weiterführend wurde gezeigt, dass theoretische Simulationen für Referenzbestrahlungen (Bestrahlungsquelle, Energie und Strahlenfeld) durchgeführt werden können, um die absorbierte Dosis in einem Mobiltelefon in geeignete Dosisgrößen für den Strahlenschutz zu überführen.

Dies kann zukünftig in einer Simulation durchgeführt werden, in dem ein etabliertes Voxelpantom mit einem Mobiltelefon an Referenztragepositionen am Phantom kombiniert wird. Damit können Dosis-Konversionskoeffizienten berechnet werden, um aus der physikalischen Dosisbestimmung auf Organdosen und die Ganzkörperdosis schließen zu können, welche letztlich als medizinische Entscheidungshilfe für das medizinische Strahlenunfallmanagement relevant ist.

Literaturverzeichnis

- Ainsbury, E. A., Bakhanova, E., Barquinero, J. F., Brai, M., Chumak, V., Correcher, V., Darroudi, F., Fattibene, P., Gruel, G., Guclu, I., Horn, S., Jaworska, A., Kulka, U., Lindholm, C., Lloyd, D., Longo, A., Marrale, M., Monteiro Gil, O., Oestreicher, U., Pajic, J., Rakic, B., Romm, H., Trompier, F., Veronese, I., Voisin, P., Vral, A., Whitehouse, C. A., Wieser, A., Woda, C., Wojcik, A., und Rothkamm, K. Review of retrospective dosimetry techniques for external ionising radiation exposures. *Radiation Protection Dosimetry*, 147(4):573 – 592, 2011.
- Aitken, M. J. *An Introduction to Optical dating*. Oxford University Press, Oxford, 1998.
- Auswertestelle Helmholtz Zentrum München. Technisches Datenblatt für das elektronische Personendosimeter EDP Mk2, 2013. https://www.helmholtz-muenchen.de/fileadmin/AWST/PDF/LEISTUNGEN_PRODUKTE/EPD/F075KOM01A_-_Datenblatt_EPD-MK2.pdf; abgerufen am 12.11.2014.
- Bailiff, I. K., Correcher, V., Delgado, A., Göksu, Y., und Hübner, S. Luminescence Characteristics of Dental Ceramics for Retrospective Dosimetry: A Preliminary Study. *Radiation Protection Dosimetry*, 101(1-4):519 – 524, 2002.
- Bartolotta, A., Brai, M., Caputo, V., D Oca, M.C., Longo, A., und Marrale, M. Thermoluminescence response of sodalime glass irradiated with photon and electron beams in the 1-20 Gy range. *Radiation Measurements*, 46(9):975 – 977, 2011.
- BASF. Medizinische Leitlinien bei akuten Einwirkungen von chemischen Substanzen - Flusssäure (HF), 2012. http://www.basf.com/group/corporate/de_DE/function/conversions:/publish/content/sustainability/employees/occupational-medicine/responsible-care-files/BASF_medLeitlinien_D026_Flusssaure_A.pdf; abgerufen am 12.11.2014.
- Bassinet, C., Trompier, F., und Clairand, I. Radiation accident dosimetry on electronic components by OSL. *Health Physics*, 98(2):440–445, 2010a.
- Bassinet, C., Trompier, F., und Clairand, I. Radiation accident dosimetry on glass by TL and EPR spectrometry. *Health Physics*, 98(2):400 – 405, 2010b.
- Bassinet, C., Woda, C., Bortolin, E., Della Monaca, S., Fattibene, P., Quattrini, M.C., Bulanek, B., Ekendahl, D., Burbidge, C.I., Cauwels, V., Kouroukla, E., Geber-Bergstrand, T., Mrozik, A., Marczewska, B., Bilski, P., Sholom, S., McKeever, S.W.S., Smith, R.W.,

- Veronese, I., Galli, A., Panzeri, L., und Martini, M. Retrospective radiation dosimetry using OSL of electronic components: Results of an inter-laboratory comparison. *Radiation Measurements*, 71:475 – 479, 2014a.
- Bassinot, C., Pirault, N., Baumann, M., und Clairand, I. Radiation accident dosimetry: TL properties of mobile phone screen glass. *Radiation Measurements*, 71:461 – 465, 2014b.
- Beerten, K., Woda, C., und Vanhavere, F. Thermoluminescence dosimetry of electronic components from personal objects. *Radiation Measurements*, 44(5-6):620 – 625, 2009.
- Bernhardsson, C., Christiansson, M., Matsson, S., und Rääf, C. L. Household salt as a retrospective dosimeter using optically stimulated luminescence. *Radiation and Environmental Biophysics*, 48:21 – 28, 2009.
- Bortolin, E., Boniglia, C., Della Monaca, S., Gargiulo, R., Onori, S., und Fattibene, P. Is dust a suitable material for retrospective personal dosimetry? *Radiation Measurements*, 45:753 – 755, 2010.
- Bortolin, E., Boniglia, C., Della Monaca, S., Gargiulo, R., und Fattibene, P. Silicates collected from personal objects as a potential fortuitous dosimeter in radiological emergency. *Radiation Measurements*, 46:967 – 970, 2011.
- Bos, A. J. J. Theory of thermoluminescence. *Radiation Measurements*, 41:45–56, 2007.
- Bourns data sheet chip resistor CRT0402. Material declaration sheet, 2006. http://www.bourns.com/pdfs/crt0402_mds.pdf; abgerufen am 12.11.2013.
- Brandt, S. *Statistical and Computational Methods in Data Analysis*. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1970.
- Browne, E. NM - CEA/LNHB - Table de Radionucléides, Laboratoire National Henri Becquerel, 2003. http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Ir-192_tables.pdf; abgerufen am 12.11.2014.
- Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Folgen eines Strahlenunfalls, 2014a. <http://www.bfs.de/de/ion/wirkungen/unfallfolgen.html>; abgerufen am 12.11.2014.
- Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Individuelle Strahlenempfindlichkeit, 2014b. <http://www.bfs.de/de/ion/wirkungen/strahlenempfindlichkeit.html>; abgerufen am 12.11.2014.
- Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Realisierung des Europäischen Netzwerks in Biologischer Dosimetrie (RENEB), 2014c. http://www.bfs.de/de/bfs/forschung/dm_forschung/RENEB.html; abgerufen am 12.11.2014.
- Carraher, C.E. *Seymour/Carraher's Polymer Chemistry: Sixth Edition, revised and expanded*. Marcel Dekker, Inc., New York, 2003.

- CATO Project. About CATO - project approach, 2014. <http://www.cato-project.eu/page/about-cato/usage-cases-project-approach.php>; abgerufen am 12.11.2014.
- CATO Project Deliverable. D6.2.10 - Report on the dose assessment and dose reconstruction from the RED experiment, 2014.
- Cauwels, V., Beerten, K., Vanhavere, F., und Lievens, L. Accident dosimetry using chipcards. pages 253–264, 2010. Proceedings of the Third European IRPA Congress 2010 June 14-18, Helsinki, Finland.
- CeramTec data sheet for Al₂O₃ ceramics. Materials table: General characteristics ceramics (96.0 % Al₂O₃), o. D. http://www.ceramtec.de/files/ma_materials_data_de_en.pdf; abgerufen am 12.11.2013.
- Chen, R. und McKeever, S. W. S. *Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 1997.
- Christiansson, M., Matsson, S., Bernhardsson, C., und Rääf, C. L. Using an optimised OSL single-aliquot regenerative-dose protocol for low-dose retrospective dosimetry on household salt. *Radiation Protection Dosimetry*, 144:584 – 587, 2011.
- Currie, L. A. Detection and quantification limits: Origins and historical overview. *Analytica Chimica Acta*, 391(2):127 – 134, 1999.
- Del Rosario Perez, M., Carr, Z., Rojas-Palma, C., van der Meer, K., Smith, K., Rahola, T., Muikku, M., Liland, A., Jaworska, A., und Jerstad, A. A new handbook on triage, monitoring and treatment of people following malevolent use of radiation. *Health Physics*, 98(6):898 – 902, 2010.
- Della Monaca, S., Bortolin, E., und Fattibene, P. A thermoluminescence study of mineral silicates extracted from herbs in the dose range 0.5 - 5 Gy. *Radiation Measurements*, 53: 74 – 79, 2013.
- DGUV. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), GESTIS-Stoffdatenbank Fluorwasserstoffsäure, 2014. www.dguv.de/ifa/stoffdatenbank; Bearbeitungsstand: 17.10.2014, abgerufen am 12.11.2014.
- Discher, M. Thermolumineszenz-Untersuchungen an Glasdisplays von Mobiltelefonen hinsichtlich deren Eignung für die Notfalldosimetrie. *Technische Universität München, Diplomarbeit*, 2011.
- Discher, M. und Woda, C. Thermoluminescence of glass display from mobile phones for retrospective and accident dosimetry. *Radiation Measurements*, 53-54(0):12 – 21, 2013.
- Discher, M. und Woda, C. Thermoluminescence emission spectrometry of glass display in mobile phones and resulting evaluation of the dosimetric properties of a specific type of display glass. *Radiation Measurements*, 71:480 – 484, 2014. Proceedings of the 17th Solid State Dosimetry Conference (SSD17).

- Discher, M., Woda, C., und Fiedler, I. Improvement of dose determination using glass display of mobile phones for accident dosimetry. *Radiation Measurements*, 56(0):240 – 243, 2013. Proceedings of the 8th International Conference on Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation (LUMDETR 2012).
- Discher, M., Greiter, M., und Woda, C. Photon energy dependence and angular response of glass display used in mobile phones for accident dosimetry. *Radiation Measurements*, 71: 471 – 474, 2014a. Proceedings of the 17th Solid State Dosimetry Conference (SSD17).
- Discher, M., Hiller, M., und Woda, C. MCNP simulations of a glass display used in a mobile phone as an accident dosimeter. *Radiation Measurements*, in Revision, 2014b.
- Dörschel, B., Schuricht, V., und Steuer, J. *Praktische Strahlenschutzphysik*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, New York, 1992.
- Dunn, W.L. und Shultis, J.K. *Exploring Monte Carlo Methods*. Elsevier Science Academic Press, Amsterdam, 2012.
- Dürr, C. Charakterisierung der Photonenenergieabhängigkeit elektronischer Bauteile in Mobiltelefonen hinsichtlich deren Nutzung als Notfalldosimeter. *Hochschule München, Bachelorarbeit*, 2011.
- Eakins, J. On the effect of updated MCNP photon cross section data on the simulated response of the HPA TLD. *Radiation Protection Dosimetry*, 134:66 – 71, 2009.
- Eakins, J. S., Bartlett, D. T., Hager, L. G., Molinos-Solsona, C., und Tanner, R. J. The MCNP-4C2 design of a two element photon/electron dosimeter that uses magnesium/copper/phosphorus doped lithium fluoride. *Radiation Protection Dosimetry*, 128:21 – 35, 2008.
- Ekendahl, D. und Judas, L. NaCl as a retrospective and accident dosimeter. *Radiation Protection Dosimetry*, 145:36 – 44, 2011.
- Ekendahl, D. und Judas, L. Retrospective dosimetry with alumina substrate from electronic components. *Radiation Protection Dosimetry*, 150(2):134 – 141, 2012.
- Ekendahl, D., Judas, L., und Sukupova, L. OSL and TL retrospective dosimetry with a fluorapatite glass-ceramic used for dental restorations. *Radiation Measurements*, 58:138 – 144, 2013.
- ET Enterprises. Photomultiplier 9235B series data sheet, 2014. <http://my.et-enterprises.com/pdf/9235B.pdf>; abgerufen am 12.11.2014.
- EvoBus GmbH. Serienbeschreibung INTEGRO C 633.001-113, 2007. Änderungsstand: 01.10.2007, Mercedes Benz, DaimlerChrysler AG.
- Fattibene, P., Trompieri, F., Wieser, A., Brai, M., Ciesielski, B., De Angelis, C., Della Monaca, S., Garcia, T., Gustafsson, H., Olag Hole, E., Juniewicz, M., Krefft, K., Longo, A., Leveque, P., Lund, E., Marrale, M., Michalec, B., Mierzwinska, G., Rao, J. L., Romanyukha, A. A., und Tuner, H. EPR dosimetry intercomparison using smart phone touch screen glass. *Radiation and Environmental Biophysics*, 53(2):311 – 320, 2014.

- Fiedler, I. und Woda, C. Thermoluminescence of chip inductors from mobile phones for retrospective and accident dosimetry. *Radiation Measurements*, 46(12):1862 – 1865, 2011.
- Flemming, M., Ziegmann, G., und Roth, S. *Faserverbundbauweisen: Fasern und Matrices*. Springer Berlin Heidelberg, 1995.
- Freiberg Instruments GmbH. *Certificate of calibration and certificate for sealed radioactive sources*. 2012a.
- Freiberg Instruments GmbH. *Manual and documentation LEXSYG*. 2012b.
- Geber-Bergstrand, T., Bernhardsson, C., Christiansson, M., Mattsson, S., und Rääf, C. L. Desiccants for retrospective dosimetry using optically stimulated luminescence (OSL). *Radiation Measurements*, In Press, Corrected Proof, 2014. DOI: 10.1016/j.radmeas.2014.11.002.
- Göksu, H. Y. Telephone chip cards as individual dosimeters. *Radiation Measurements*, 37(6):617 – 620, 2003.
- Greiter, M. Unsicherheiten Buchlerbestrahlung, 2013. AMSD - Abteilung für Medizinische Strahlenphysik und Diagnostik, Helmholtz Zentrum München, persönliche Kommunikation: Email am 15.01.2013. Dokument einzusehen beim Verfasser dieser Arbeit.
- Greiter, M. Zwei Fragen über die Quellen am SSDL, 2014. AMSD - Abteilung für Medizinische Strahlenphysik und Diagnostik, Helmholtz Zentrum München, persönliche Kommunikation: Email am 30.01.2014. Dokument einzusehen beim Verfasser dieser Arbeit.
- Gross, R. und Marx, A. *Festkörperphysik - Vorlesungsskript zur Vorlesung im WS 2004/2005*. Walther-Meissner-Institute, Internet: <http://www.wmi.badw.de/teaching/LectureNotes/index.html>; Stand: 20.01.2011, 2004.
- Hamamatsu. Photon Counting Head H7421 Series, 2014. <http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/m-h7421e.pdf>; abgerufen am 12.11.2014.
- Hering, W. T. *Angewandte Kernphysik*. Teubner Studienbücher, Stuttgart, 1999.
- Hubbell, J.H. und Seltzer, S.M. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients (version 1.4). 2004. <http://physics.nist.gov/xaamdi>; abgerufen am 30.08.2013, National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD.
- Inrig, E.L., Godfrey-Smith, D.I., und Khanna, S. Optically stimulated luminescence of electronic components for forensic, retrospective, and accident dosimetry. *Radiation Measurements*, 43(2-6):726 – 730, 2008.
- Inrig, E.L., Godfrey-Smith, D.I., und Larsson, C.L. Fading corrections to electronic component substrates in retrospective accident dosimetry. *Radiation Measurements*, 45(3-6):608 – 610, 2010.
- International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). *Report 68: Retrospective assessment of exposures to ionising radiation*. ICRU report. Nuclear Technology Pub., 2002.

- International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Report 85: Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation, 5. Dosimetry. *Journal of the ICRU*, 11(1):23–28, 2011.
- International Commission on Radiological Protection (ICRP). Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. *ICRP Publication 116*, Ann. ICRP 40(2-5), 2010.
- Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO). Cytogenic analysis for radiation dose assessment. *IAEA Technical Report Series 405*, STI/DOC/010/405, 2001. Vienna.
- Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO). The Radiological Accident in Cochabamba. *STI/PUB/1199*, 2004. Vienna.
- Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO). Update of X ray and gamma ray decay data standards for detector calibration and other applications, Volume 1. *STI/PUB/1287*, 2007. Vienna.
- Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO). Lessons Learned from the Response to Radiation Emergencies (1945-2010). 2012. Vienna.
- Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO). Informationblatt IAEO Basiswissen: Den Beitrag nuklearer Technik zur Gesellschaft maximieren und ihre friedliche Verwendung verifizieren, 2014a. http://www.iaea.org/sites/default/files/iaea-primer_ger.pdf; abgerufen am 12.11.2014.
- Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO). Live Chart of Nuclides - nuclear structure and decay data, 2014b. <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>; abgerufen am 12.11.2014.
- ISO 4037-1. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 1: Radiation characteristics and production method. *International Organization for Standardization (ISO)*, 1996.
- ISO 4037-3. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence. *International Organization for Standardization (ISO)*, 1999.
- ISOLA data sheet IS410 laminate. Material safety data sheet: Composition/information on ingredients, 2010. <http://www.isola-group.com/wp-content/uploads/2011/08/IS410-Laminate-MSDS-2010.08.23.pdf>; abgerufen am 12.11.2013.
- ISOLA data sheet IS410 prepreg. Safety data sheet: Physical and chemical properties, 2004. <http://www.isola-group.com/wp-content/uploads/2011/08/IS420laminatesafetydatasheet.pdf>; abgerufen am 12.11.2013.

- Jaworska, A., Wojcik, A., Ainsbury, E. A., Fattibene, P., Lindholm, C., Oestreicher, U., Rothkamm, K., Romm, H., Thierens, H., Trompier, F., Voisin, P., Vral, A., und Woda, C. Guidance for using MULTIBIODOSE tools in Emergencies for Radiation Emergency Response Organisations in Europe, 2014. http://www.multibiodose.eu/News/MBD_Guidance_web.pdf; abgerufen am 12.11.2014.
- Jörß, W. und Handke, V. Unsicherheiten der PAREST-Referenz-Emissionsdatenbasis, 2014. http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/texte_45_2013_appelhans_e07_komplett_0.pdf; abgerufen am 12.11.2014.
- Landauer Inc. Luxel Dosimeter for X, Gamma, Beta, and Neutron Radiation, 2005. http://www.landauer.com/uploadedFiles/Healthcare_and_Education/Products/Dosimeters/LuxelSpecifications.en-US.pdf; abgerufen am 12.11.2014.
- Lettner, H. Fertiger Wall, 2013. Abteilung Physik und Biophysik, Universität Salzburg, Österreich, persönliche Kommunikation: Email am 28.05.2014. Dokument einzusehen beim Verfasser dieser Arbeit.
- Longo, A., Brai, M., Carlino, A., und Marrale, M. Discrimination of LINAC photon and sunlight contributions in watch glass analyzed by means of thermoluminescence. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 281(0):89 – 96, 2012.
- Marrale, M., Longo, A., Bartolotta, A., Basile, S., D Oca, M.C., Tomarchi, E., Cirrone, G.A.P., Rosa, F. Di, Romano, F., Cuttone, G., und Brai, M. Thermoluminescence response of sodalime glass irradiated with proton and neutron beams. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 292(0):55 – 58, 2012a.
- Marrale, M., Longo, A., Bartolotta, A., D Oca, M.C., und Brai, M. Preliminary application of thermoluminescence and single aliquot regeneration method for dose reconstruction in soda lime glass. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 297(0):58 – 63, 2012b.
- McKeever, S. W. S. *Thermoluminescence of solids*. Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- McKeever, S. W. S. und Moscovitch, M. On the advantages and disadvantages of optically stimulated luminescence dosimetry and thermoluminescence dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*, 104(3):263 – 270, 2003.
- McKinlay, A. F. *Thermoluminescence Dosimetry*. Adam Hilger Ltd, Bristol, 1981.
- Moffatt, J.E., Spooner, N.A., Creighton, D.F., und Smith, B.W. Luminescence properties of common glasses for application to retrospective dosimetry. *Radiation Measurements*, 47(9):851 – 856, 2012.
- Mrozik, A., Marczevska, B., Bilski, P., und Gieszczyk, W. Investigation of osl signal of resistors from mobile phones for accidental dosimetry. *Radiation Measurements*, 71:466 – 470, 2014a.

- Mrozik, A., Marczevska, B., Bilski, P., und Klosowski, M. Investigation of thermoluminescence properties of mobile phone screen displays as dosimeters for accidental dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry*, 104:88 – 92, 2014b. 1st International Conference on Dosimetry and its Applications.
- Müller, P. H. *Wahrscheinlichkeitsrechnung und Mathematische Statistik. Lexikon der Stochastik*. Akademie-Verlag, Berlin, 1991.
- Narayan, P., Senwar, K.R., Vaijapurkar, S.G., Kumar, D., und Bhatnagar, P.K. Application of commercial glasses for high dose measurement using the thermoluminescent technique. *Applied Radiation and Isotopes*, 66(1):86 – 89, 2008.
- ÖNORM S 5265-2. Zerstörungsfreie Prüfung - Teil 2: Strahlenschutzregeln für die technische Gammagraphie. *Österreichisches Normungsinstitut, Wien*, 2006.
- Park, S. K., Han, J.I., Kim, W.K., und Kwak, M.G. Deposition of indium-tin-oxide films on polymer substrates for application in plastic-based flat panel displays. *Thin Solid Films*, 397:49 – 55, 2001.
- Pascu, A., Vasiliniuc, S., Zeciu-Dolha, M., und Timar-Gabor, A. The potential of luminescence signals from electronic components for accident dosimetry. *Radiation Measurements*, 56:384 – 388, 2013.
- Poludniowski, G., Landry, G., DeBlois, F., Evans, P.M., und Verhaegen, F. SpekCalc: a program to calculate photon spectra from tungsten anode x-ray tubes. *Physics in Medicine and Biology*, 54:433 – 438, 2009.
- Pradhan, A.S., Lee, J.I., und Kim, J.L. Use of OSL and TL of electronic components of portable devices for retrospective accident dosimetry. *Defect and Diffusion Forum*, 347: 229 – 245, 2013.
- Randall, J. T. und Wilkins, M. H. F. Phosphorescence and Electron Traps. I. The Study of Trap Distributions. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 184(999):365–389, 1945.
- Research Unit Medical Radiation Physics and Diagnostics. IAEA-SSDL, 2014. <http://www.helmholtz-muenchen.de/amsd/service/scientific-services/iaea-ssdl/index.html>; abgerufen am 12.11.2014.
- Richter, A., Richter, D., und Dornich, K. A variety of optional luminescence stimulation sources for lexsyg devices, Poster LED Montreal. 2014. <http://www.lexsyg.com/publications.html>; abgerufen am 12.11.2014.
- Richter, D., Pintaske, R., Dornich, K., und Krbetscheck, M. A novel beta source design for uniform irradiation in dosimetric applications. *Ancient TL*, 30(2):57–64, 2012.
- Richter, D., Richter, A., und Dornich, K. Lexsyg - A new system for luminescence research. *Geochronometria*, 40(4):220–228, 2013.
- Riehl, N. *Einführung in die Thermolumineszenz*. Verlag Karl Thieme KG, München, 1971.

- Risø Danmarks Tekniske Universitet. *Guide to the Risø TL/OSL Reader*. Risø National Laboratory, Roskilde, 2008.
- Rojas Palma C. [edit.], et al. *TMT Handbook - Triage, Monitoring and Treatment of people exposed to ionising radiation following a malevolent act*. Osterås, Norway, NRPA, 2009.
- Saito, K. und Jacob, P. Gamma ray fields in the air due to sources in the ground. *Radiation Protection Dosimetry*, 58(1):29 – 45, 1995.
- Seelentag, W. W., Panzer, W., Drexler, G., Platz, L., und Santner, F. *A Catalogue of Spectra used for the Calibration of Dosemeters*. Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München, Institut für Strahlenschutz, GSF-Bericht S 560, 1979.
- Shipping Container Homes. Free shipping container technical drawing package, 2014. <http://containerhome.info/shipping-container-drawings.html>; abgerufen am 12.11.2014.
- Sholom, S. und McKeever, S.W.S. Emergency OSL dosimetry with commonplace materials. *Radiation Measurements*, 61(0):33 – 51, 2014.
- Shultis, J.K. und Faw, R.E. An MCNP Primer, 2011. <http://www.nucleonica.net/wiki/images/6/6b/MCNPprimer.pdf>; abgerufen am 12.11.2013.
- Stettner, C. Ir-192 Quelle, 2014. Seibersdorf Labor GmbH, Seibersdorf, Österreich, persönliche Kommunikation: Email am 25.10.2014. Dokument einzusehen beim Verfasser dieser Arbeit.
- Teixeira, M. I., DaCosta, Z. M., DaCosta, C. R., Pontuschka, W. M., und Caldas, L. V. E. Study of the gamma radiation response of watch glasses. *Radiation Measurements*, 43(2-6): 480 – 482, 2008. Proceedings of the 15th Solid State Dosimetry (SSD15).
- Trompier, F., Bassinet, C., Della Monaca, S., Romanyukha, A., Reyes, R., und Clairand, I. Overview of physical and biophysical techniques for accident dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*, 144(1-4):571–574, 2011.
- Tschurlovits, M., Leitner, A., und Daverda, G. Dose Rate Constants for New Dose Quantities. *Radiation Protection Dosimetry*, 42(2):77 – 82, 1992.
- Umicore data sheet indium tin oxide ITO. Indium tin oxide ITO for evaporation: Material properties (90/10 wt% In-Sn-oxide), 2011. http://www.thinfilmproducts.umicore.com/Products/TechnicalData/show_ito_evaporation.pdf; abgerufen am 12.11.2013.
- Umicore data sheet LiCoO₂. LiCoO₂ for thin film battery applications, 2012. http://www.thinfilmproducts.umicore.com/Products/TechnicalData/show_datenblatt_licoo2.pdf; abgerufen am 12.11.2013.
- Valleydesign data sheet 1737F. Thermal/mechanical properties of 1737F glass, 2013. <http://www.valleydesign.com/glass-properties.htm#1737f>; abgerufen am 12.11.2013.

- Veronese, I., Galli, A., Cantone, M. C., Martini, M., Vernizzi, F., und Guzzi, G. Study of TSL and OSL properties of dental ceramics for accidental dosimetry applications. *Radiation Measurements*, 45(1):35 – 41, 2010.
- Wiegand, R. Lumineszenzuntersuchungen an kontaktlosen Chipmodulen. *Technische Universität München, Diplomarbeit*, 2012.
- Wieser, A. persönliche Kommunikation, 2013. Institut für Strahlenschutz, Helmholtz Zentrum München.
- Williams, R.G, Gesh, C.J., und Pagh, R.T. Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling. *PNNL-15870*, 2006.
- Woda, C. persönliche Kommunikation, 2014. Institut für Strahlenschutz, Helmholtz Zentrum München.
- Woda, C. und Spöttl, T. On the use of osl of wire-bond chip card modules for retrospective and accident dosimetry. *Radiation Measurements*, 44(5-6):548 – 553, 2009. Proceedings of the 12th International Conference on Luminescence and Electron Spin Resonance Dating (LED 2008).
- Woda, C., Fiedler, I., und Spöttl, T. On the use of OSL of chip card modules with molding for retrospective and accident dosimetry. *Radiation Measurements*, 47(11-12):1068 – 1073, 2012.
- Wu, K., Sun, C. P., und Shi, Y. M. Dosimetric properties of watch glass: A potential practical esr dosemeter for nuclear accidents. *Radiation Protection Dosimetry*, 59(3):223 – 225, 1995.
- Wu, K., Guo, L., Cong, J.B., Sun, C.P., Hu, J.M., Zhou, Z.S., Wang, S., Zhang, Y., Zhang, X., und Shi, Y.M. Researches and applications of esr dosimetry for radiation accident dose assessment. *Radiation Protection Dosimetry*, 77(1-2):65 – 67, 1998.
- X-5 Monte Carlo Team. MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory. *Los Alamos National Laboratory report LA-UR-03-1987*, 2003a. letzte Überarbeitung 1. Feb. 2008.
- X-5 Monte Carlo Team. MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume II: User´s Guide. *Los Alamos National Laboratory report LA-CP-03-0245*, 2003b. letzte Überarbeitung 1. Feb. 2008.
- Yoshio, M., Brodd, R.J., und Kozawa, A. *Lithium-Ion Batteries: Science and Technologies*. Springer, New York, 2010.
- Yukihara, E. G. und McKeever, S. W. S. *Optically Stimulated Luminescence. Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2011.

Abbildungsverzeichnis

2.1.1 Energie-Bändermodell von Halbleiter, Isolator, Metall und Halbmetall mit eingezeichnetem Fermi-Niveau.	8
2.1.2 Gesamtprozess der Lumineszenz als einfaches Modell aufgeteilt in drei Stufen	9
2.2.1 Grafische Darstellung der Voraussetzungen für Notfalldosimeter	12
2.3.1 Vorstellung der wichtigsten Notfalldosimeter	14
2.3.2 Exemplarische Messung des Nulldosissignals im Vergleich mit dem dosisinduzierten TL-Signal und Histogramm der Hintergrunddosis	16
3.1.1 Schematischer Aufbau der Messkomponenten eines Risø TL/OSL-Messgeräts	20
3.1.2 Bestückter Proben-Drehteller	21
3.1.3 Die schematische Abbildung des thermischen und optischen Lumineszenz-Stimulationssystems der kombinierten TL/OSL-Einheit	24
3.2.1 Der schematische Aufbau des LEXSYG Messgeräts	25
3.3.1 Röntgenanlage und Buchleranlage OB 20 zur Bestrahlung eines Mobiltelefons	29
4.1.1 Vergrößertes Bild einer Glasprobe vor und nach dem Ätzen und Vergleich des Nulldosissignals mit Variation der Ätzdauer	32
4.1.2 Einfluss des Ätzens auf das TL-Signal: Ausleuchtcurve einer ungeätzten und geätzten Glasprobe, eine Stunde nach Bestrahlung gemessen.	33
4.1.3 Histogramme der Verteilung der berechneten Hintergrunddosis ungeätzter und geätzter Glasproben	34
4.1.4 Ergebnis der Bestrahlungsversuche an extrahierten Glasproben	36
4.2.1 TL-Spektrum bestrahlter Glasproben der Kategorie A und der Kategorie B .	38
4.2.2 Gebleichtes TL-Spektrum einer mit 1 kGy bestrahlten Glasprobe der Kategorie A und der Kategorie B	39
4.2.3 TL-Spektrum einer unexponierten Glasprobe	40
4.3.1 Untersuchungen der dosimetrischen Eigenschaften von Glas der Kategorie B .	41
4.3.2 Untersuchungen der intrinsischen Hintergrunddosis von Glasproben der Kategorie B	43
4.4.1 Relatives Detektoransprechverhalten mit unterschiedlichen Expositionsgeometrien	44

4.4.2 Relatives Detektoransprechverhalten für drei untersuchte Mobiltelefone	46
4.4.3 Richtungsabhängigkeit von Displayglas für ein Mobiltelefon bestrahlt frei der Luft und bestrahlt an einem ISO-Wasserphantom	47
4.5.1 Signalabnahme durch Fading bei unterschiedlicher Lagerungszeit	50
5.1.1 3D Gitternetzansicht, offene Seitenansicht und geschnittene Seitenansicht der simulierten Geometrie des Mobiltelefons	54
5.3.1 Vergleich zwischen einer simulierten und einer gemessenen Photonen-Energieabhängigkeit einer Displayglasprobe normiert auf Cs-137	56
5.3.2 Der Vergleich zwischen der simulierten und der gemessenen Winkelabhängigkeit einer Displayglasprobe mit drei Röntgenspektren der Strahlenqualität N-60, N-150 und N-300 und eine monoenergetische Cs-137 Gammaquelle	57
5.3.3 Photonen-Energieabhängigkeit für Bestrahlungen mit einem ISO-Wasserphantom oder frei in Luft	58
5.4.1 Variation des CaO-Gehalts des Glasdetektors und Auswirkung auf die Photonen-Energieabhängigkeit	60
6.2.1 Bus in Parkposition im Erdwallbunker	65
6.2.2 Innenansicht des Busses	66
6.2.3 Fixierung des Endschlauchs der Quelle im Gepäckraum des Busses und Behälter mit Kennzeichnung der eingesetzten Ir-192 Quelle	67
6.2.4 Busplan mit Positionen der Wasserkanister, anthropomorphen Phantome, Strahlenquellenposition und wichtigen Dimensionen des Busses	68
6.2.5 Notfalldosimeter und Referenzdosimeter fixiert an unterschiedlichen Positionen am Wasserkanister und am anthropomorphen Phantom	69
6.2.6 Mobiltelefone mit Referenzdosimetern	70
6.4.1 Ergebnis der Referenzdosimeter und Referenzgläser für den Versuchstag mit der stärkeren Quelle.	72
6.4.2 Ergebnisse der Referenzdosimeter, der Referenzgläser und der Displaygläser als Notfalldosimeter für den Versuchstag mit der stärkeren Quelle.	73
6.4.3 Vergleich der Ergebnisse der Referenzdosimeter, der Referenzgläser und der Displaygläser als Notfalldosimeter für den Versuchstag mit der stärkeren Quelle.	74
6.4.4 Vergleich der Ergebnisse der Referenzdosimeter, der Referenzgläser und der Displaygläser als Notfalldosimeter für den Versuchstag mit der schwächeren Quelle.	74
6.4.5 Vergleich der Dosisabschätzung mit zwei unterschiedlichen Komponenten eines gleichen Mobiltelefons (Displayglas und Widerstände) und zugehörige Referenzdosimeter (Referenzglas und LUXEL Dosimeter), für den Versuchstag mit der stärkeren und schwächeren Quelle	76
6.5.1 Geometrie des Feldexperiments integriert in der MCNP Simulation.	78

6.5.2 Vergleich der Simulation mit den experimentell gemessenen Ergebnissen von Referenzdosimeter, Referenzgläsern und Displayglas als Unfalldosimeter.	80
6.5.3 Simulationsvergleich: Wasserphantome, platziert wie im Experimentaufbau im Vergleich zur Simulation ohne Wasserphantome	81
6.5.4 Untersuchung der Energiedeposition in der Detektorzelle für Glas und für Luft als Detektormaterial abhängig vom Photonenspektrum an ausgewählten Sitzplatzpositionen und zugehöriger kumulative Verteilungsfunktion.	82
A.1.1 Berechnung der Grenzen v und w aus der logarithmischen Normalverteilung.	105
A.1.2 Berechnung Erkennungs- und Nachweisgrenze aus der logarithmischen Normalverteilung.	106

Tabellenverzeichnis

2.1	Unterschiedliche Anregungsarten der Lumineszenz.	5
2.2	Licht-induzierte Stimulationsverfahren für die Lumineszenz-Untersuchung. . .	7
4.1	Parameter der logarithmischen Normalverteilung der Hintergrunddosis, sowie berechnete Bestimmungs- und Nachweisgrenze von geätzten und ungeätzten Proben	35
5.1	Ergebnisse des Experiments und der Simulation.	55
5.2	Ergebnisse des Experiments mit dem ISO-Wasserphantom und der Simulation.	55
6.1	Ergebnisse der Ausreißerklassifizierung mit einer Schwelle der Hintergrunddosis.	76
6.2	Verhältnis der Energiedeposition für Glas und für Luft als Detektormaterial.	83
6.3	Berechnete Überschätzung der absorbierten Dosis in Displayglas mithilfe der Energieabhängigkeit und dem Spektrum der Energiedeposition in der luftgefüllten Detektorzelle.	84
B.1	Gammaemission von Ir-192	109
C.1	Materialbeschreibung, Materialdichte und die Referenzquelle der Materialien verwendet in der Simulation	111
C.2	Fortsetzung: Materialbeschreibung, Materialdichte und die Referenzquelle der Materialien verwendet in der Simulation.	112
C.3	Materialzusammensetzungen für die Simulation. Die Zusammensetzung der Materialien ist als Gewichtsanteil (< 1) oder Atomfraktion (≥ 1) angegeben .	112
C.4	Fortsetzung: Materialzusammensetzungen für die Simulation. Die Zusammensetzung der Materialien ist als Gewichtsanteil (< 1) oder Atomfraktion (≥ 1) angegeben.	113

Anhang A

Berechnungen

A.1 Berechnungen der Nachweisgrenze für Displayglas

Die Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze hängen hauptsächlich von der Variabilität des Nulldosissignals ab. Nach Discher und Woda (2013) und Discher et al. (2013) kann die Verteilung der Hintergrunddosis als logarithmische Normalverteilung mit den Parametern Erwartungswert μ (Mittelwert der ln Werten) und Breite σ (Standardabweichung der ln Werten) angenähert werden.

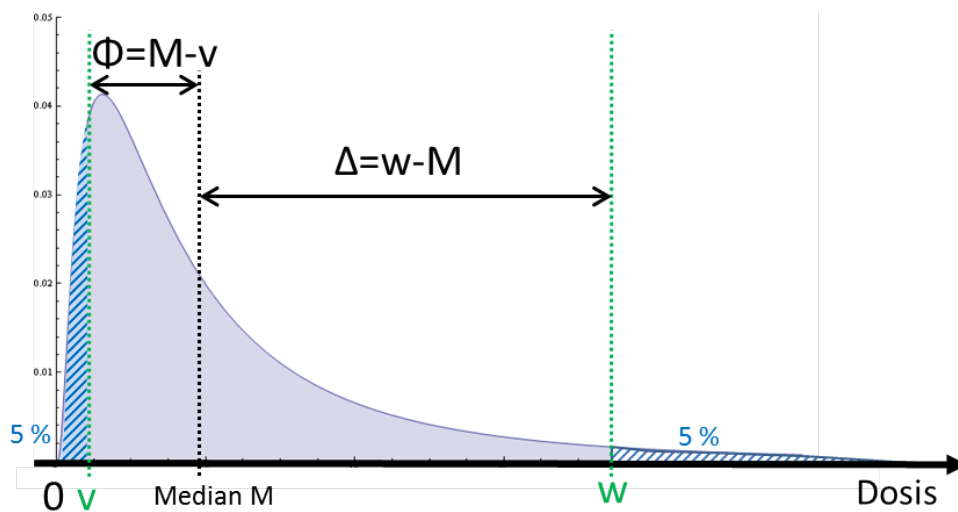


Abbildung A.1.1: Berechnung der Grenzen v und w aus der logarithmischen Normalverteilung.

In der schematischen Abbildung A.1.1 werden die Limits v und w für 5 % bzw. 95 % der Funktion der Wahrscheinlichkeitsdichte der logarithmischen Normalverteilung (PDF (x) = $\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp[-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}]$, für $x > 0$) basierend auf den Definitionen in Currie (1999) beschrieben.

Die Limits für 5 % bzw. 95 % werden über folgende Bedingungen berechnet:

$$\int_0^w \text{PDF}(x) dx = 0,95, \quad (\text{A.1.1})$$

$$\int_v^\infty \text{PDF}(x) dx = 0,95 \Leftrightarrow \int_0^v \text{PDF}(x) dx = 0,05. \quad (\text{A.1.2})$$

Die Nachweisgrenze L_C und Erkennungsgrenze L_D werden durch eine Transformation der PDF mit $\hat{x} = M - x$ berechnet, wobei M der Median der Verteilung ist.

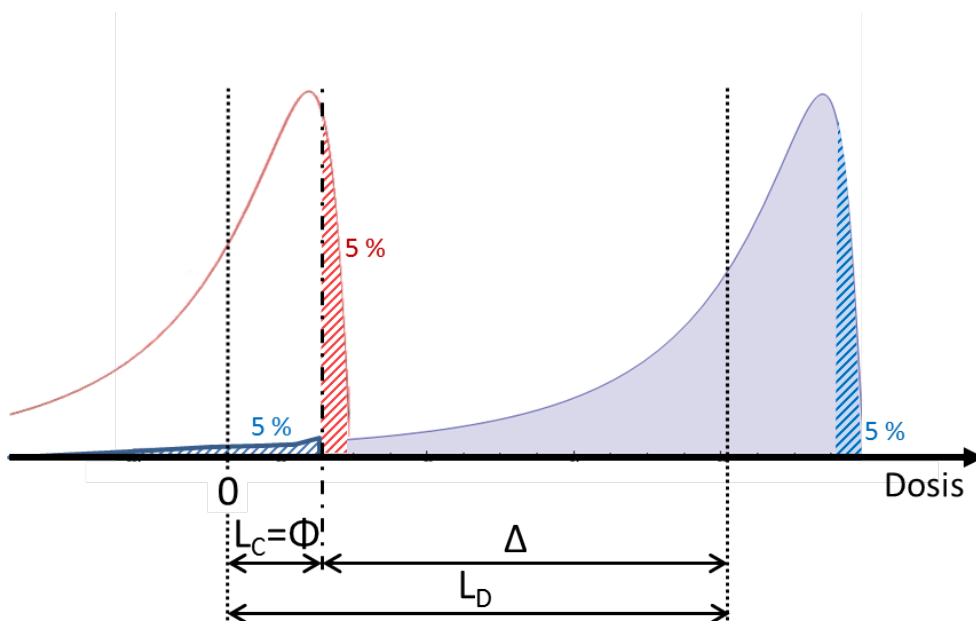


Abbildung A.1.2: Berechnung Erkennungs- und Nachweisgrenze aus der logarithmischen Normalverteilung.

Schließlich lassen sich L_C und L_D mit den bestimmten Limits v und w aus den Hilfsvariablen Φ und Δ wie folgt berechnen (siehe schematische Abbildung A.1.2):

$$L_C = \Phi = M - v,$$

$$L_D = L_C + \Delta = M - v + w - M = w - v.$$

A.2 Berechnungen des Massen-Energieabsorptionskoeffizient

Einschub: Energietransfer-Koeffizient μ_{tr}/ρ

Die dosimetrische Größe Kerma wird im ICRU Report 85 definiert (International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) (2011)). Kerma steht für die englische Abkürzung Kinetic energy relased per mass. Die Größe Kerma ist für ionisierende, ungeladene Teilchen wie Photonen als Quotient aus dE_{tr}/dm definiert, wobei dE_{tr} die mittlere Summe der kinetischen Ausgangsenergie aller geladenen Teilchen beschreibt, die im Massenelement eines Materials dm von dem ungeladenen Teilchen freigesetzt wird. Die SI Einheit lautet J kg^{-1} bzw. Gy (Gray).

Die Größe Kerma K ist definiert aus dem materialspezifischen Energietransfer-Koeffizienten μ_{tr}/ρ und der Photon Energiefluenz Ψ , welche wiederum aus Photonenfluenz Φ und Photonenenergie E bestimmt wird (International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) (2011)):

$$K = \Psi \cdot \mu_{tr}/\rho = \Phi \cdot E \cdot \mu_{tr}/\rho. \quad (\text{A.2.1})$$

Laut Hubbell und Seltzer (2004) sind im Energietransfer-Koeffizienten μ_{tr}/ρ alleinig entweichende sekundäre Photonen, die an der Wechselwirkungsstelle von Photon und Atom produziert werden (Photoeffekt), als auch die Quanten aus der Positronenvernichtung, die aus der initialen Wechselwirkung von Paar- und Tripletproduktion stammen, berücksichtigt.

Der Massen-Energieabsorptionskoeffizient μ_{en}/ρ beinhaltet weitere Emission von Strahlung, die von geladenen Teilchen durch den Transport durch das Medium erzeugt werden, und ist mit dem Energietransfer-Koeffizient μ_{tr}/ρ definiert als:

$$\mu_{en}/\rho = (1 - g) \cdot \mu_{tr}/\rho. \quad (\text{A.2.2})$$

Gemäß Hubbell und Seltzer (2004) repräsentiert der Faktor g den durchschnittlichen Bruchteil der kinetischen Energie der sekundären geladenen Teilchen (erzeugt in allen Arten von Wechselwirkungen), die anschließend in Energieverlustprozessen durch emittierte Photonenstrahlung verloren geht, bis das Teilchen im Medium abgebremst wird. Die Berechnung von g wird durch die Integration des Strahlungsprozess-Querschnitts über das Weglängendifferential Verteilung der Partikel im Verlauf der Abbremsung erhalten. Die Berechnungen werden in Hubbell und Seltzer (2004) vorgestellt und für die Werte für μ_{en}/ρ durchgeführt.

Laut International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) (2011) ist der Wert von g für Photonenenergien $E < 1$ MeV sehr klein und es gilt somit:

$$\mu_{en}/\rho \approx \mu_{tr}/\rho. \quad (\text{A.2.3})$$

Berechnungen des Massen-Energieabsorptionskoeffizienten für Displayglas

Mithilfe der chemischen Materialzusammensetzung und der Tabellenwerte aus der Literatur (Hubbell und Seltzer (2004)) wird der relative Massen-Energieabsorptionskoeffizient berechnet. Die Glaszusammensetzung wurde mit einer EDX Messung (energiedispersive Röntgenspektroskopie) bestimmt. Die bestimmte Zusammensetzung für eine Probe der Glaskategorie A in Gewichtsprozent beträgt: SiO₂ (58), Al₂O₃(30), CaO (10) MgO (1) und Na₂O (1).

Gemäß Hubbell und Seltzer (2004) wird für jedes Element in der Glaszusammensetzung aus Tabelle 1 das Verhältnis der Atom- zur Massenzahl Z/A und aus Tabelle 3 der Massen-Energieabsorptionskoeffizient μ_{en}/ρ entnommen. Das Verhältnis Z/A wird zur Berechnung des Gewichtsprozents je Element in einer chemischen Verbindung benötigt.

Mit folgender Formel wird der Massen-Energieabsorptionskoeffizient μ_{en}/ρ für homogene Mischungen und Verbindungen berechnet:

$$\mu_{en}/\rho = \sum_i w_i (\mu_{en}/\rho)_i. \quad (\text{A.2.4})$$

Der relative Massen-Energieabsorptionskoeffizient für Displayglas zu trockener Luft wird wie folgt berechnet:

$$R = \frac{(\mu_{en}/\rho)_{\text{Glas}}}{(\mu_{en}/\rho)_{\text{tr. Luft}}}. \quad (\text{A.2.5})$$

Anhang B

Gamma-Emission von Ir-192

Übergang	Energie (keV)	Photonen pro 100 Zerfälle
$\gamma_{4,3}(\text{Os})$	110,4 (3)	0,0122(11)
$\gamma_{4,3}(\text{Pt})$	136,3426 (3)	0,199 (25)
$\gamma_{6,5}(\text{Pt})$	176,98 (4)	0,0043 (12)
$\gamma_{4,2}(\text{Os})$	201,3112 (7)	0,473 (8)
$\gamma_{1,0}(\text{Os})$	205,79430 (9)	3,34 (4)
$\gamma_{5,4}(\text{Pt})$	280,27 (24)	0,009 (5)
$\gamma_{2,1}(\text{Os})$	283,2668 (8)	0,266 (3)
$\gamma_{2,1}(\text{Pt})$	295,95650 (15)	28,72 (14)
$\gamma_{4,2}(\text{Pt})$	308,45507 (17)	29,68 (15)
$\gamma_{1,0}(\text{Pt})$	316,50618 (17)	82,75 (21)
$\gamma_{5,3}(\text{Os})$	329,17 (15)	0,0174 (17)
$\gamma_{3,1}(\text{Os})$	374,4852 (8)	0,726 (6)
$\gamma_{5,3}(\text{Pt})$	416,4688 (7)	0,669 (21)
$\gamma_{5,2}(\text{Os})$	420,52 (6)	0,069 (7)
$\gamma_{3,1}(\text{Pt})$	468,0688 (3)	47,81 (24)
$\gamma_{4,1}(\text{Os})$	484,5751 (4)	3,189 (24)
$\gamma_{2,0}(\text{Os})$	489,06 (3)	0,438 (14)
$\gamma_{5,2}(\text{Pt})$	588,5810 (7)	4,517 (22)
$\gamma_{6,3}(\text{Pt})$	593,49 (13)	0,0421 (17)
$\gamma_{7,3}(\text{Pt})$	599,41 (15)	0,0039 (17)
$\gamma_{4,1}(\text{Pt})$	604,41105 (25)	8,20 (4)
$\gamma_{2,0}(\text{Pt})$	612,4621 (3)	5,34 (8)
$\gamma_{6,2}(\text{Pt})$	765,8 (3)	0,0013 (6)
$\gamma_{5,1}(\text{Pt})$	884,5365 (7)	0,291 (7)
$\gamma_{6,1}(\text{Pt})$	1061,48 (4)	0,053 (1)
$\gamma_{8,1}(\text{Pt})$	1089,9 (3)	0,0012 (2)
$\gamma_{6,0}(\text{Pt})$	1378,20 (15)	0,0012 (3)

Tabelle B.1: Gammaemission von Ir-192. Tabelle entnommen aus Browne (2003).

Anhang C

Materialspezifikationen verwendet in der MCNP Simulation

Material Nr.	Material	Dichte (g/cm ³)	Quelle(n)
1	Glasdetektor (Displayglas)	2,58	Discher et al. (2014a); Valleydesign data sheet 1737F (2013)
2	Luft (trocken, auf Meereshöhe)	0,001205	Hubbell und Seltzer (2004)
3	Polymethylmethacrylat (PMMA)	1,19	Hubbell und Seltzer (2004)
4	Wasser	1,00	Hubbell und Seltzer (2004)
5	Aluminiumabdeckung	2,699	Hubbell und Seltzer (2004)
6	Platine aus Glasfasermatte (45 %), Harzformstoff (45 %), Kupferfolie (10 %)	1,80	Carraher (2003), Seite 487; ISOLA data sheet IS410 laminate (2010); ISOLA data sheet IS410 prepreg (2004)
7	Keramik der elektronischen Bauteile auf der Platine bestehend aus: Al ₂ O ₃ (96 %), SiO ₂ (3 %), MgO (1 %)	3,75	Bourns data sheet chip resistor CRT0402 (2006); CeramTec data sheet for Al ₂ O ₃ ceramics (o. D.)
8	LiCoO ₂ (die Hauptkomponente der Akku-Batterie)	4,90	Yoshio et al. (2010), Seite 34; Umicore data sheet LiCoO ₂ (2012)
9	Abdeckung des Mobiltelefons aus Polyamid (PA 6)	1,13	Flemming et al. (1995), Seite 112 f.
10	ITO (Indium-Zinnoxid) Schicht auf dem Touchscreenglas (ITO: In ₂ O ₃ 90 w% + SnO ₂ 10 w%)	7,14	Park et al. (2001); Umicore data sheet indium tin oxide ITO (2011)

Tabelle C.1: Materialbeschreibung, Materialdichte und die Referenzquelle der Materialien verwendet in der Simulation (adaptiert aus Discher et al. (2014b)).

112 ANHANG C. Materialspezifikationen verwendet in der MCNP Simulation

Material Nr.	Material	Dichte (g/cm ³)	Quelle(n)
11	Erde	1,00	Saito und Jacob (1995)
12	Stahl bestehend aus Fe (99,5 w%) und C (0,5 w%)	7,82	Williams et al. (2006)
13	Holz	0,50	Williams et al. (2006)
14	Polyvinyl Chloride (PVC)	1,406	Williams et al. (2006)
15	Flachglas	2,40	Williams et al. (2006)

Tabelle C.2: Fortsetzung: Materialbeschreibung, Materialdichte und die Referenzquelle der Materialien verwendet in der Simulation.

Chemisches Symbol	Material Nummer									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H			0,0805	2		0,0647			11	
Li								1		
C		0,0001	0,5998			0,3853			6	
N		0,7553							1	
O	0,4852	0,2318	0,3196	1		0,2103	0,4719	2	1	0,1885
Na	0,0074					0,0434				
Mg	0,0060					0,0095	0,0060			
Al	0,1588				1	0,0048	0,5081			
Si	0,2711					0,1514	0,0140			
Cl										
Ar		0,0128								
Ca	0,0715					0,0306				
Fe										
Co								1		
Cu						0,1000				
Zn										0,0671
In										0,7444

Tabelle C.3: Materialzusammensetzungen für die Simulation. Die Zusammensetzung der Materialien ist als Gewichtsanteil (< 1) oder Atomfraktion (≥ 1) angegeben (adaptiert aus Discher et al. (2014b)).

Chemisches Symbol	Material Nummer				
	11	12	13	14	15
H	0,0223		0,0579	0,0484	
Li					
C		0,005	0,4827	0,3844	
N					
O	0,5752		0,4594		0,4598
Na					0,0964
Mg					
Al	0,0847				
Si	0,2618				0,3366
Cl				0,5673	
Ar					
Ca					0,1072
Fe	0,0560	0,995			
Co					
Cu					
Zn					
In					

Tabelle C.4: Fortsetzung: Materialzusammensetzungen für die Simulation. Die Zusammensetzung der Materialien ist als Gewichtsanteil (< 1) oder Atomfraktion (≥ 1) angegeben.

Liste eigener Publikationen und Vorträge auf wissenschaftlichen Konferenzen

Im Rahmen meiner Doktorarbeit konnte ich fünf Vorveröffentlichungen in international verbreiteten Zeitschriften (peer-reviewed) publizieren, die nachfolgend aufgelistet sind:

- Discher, M. und Woda, C. Thermoluminescence of glass display from mobile phones for retrospective and accident dosimetry. *Radiation Measurements* 53-54, 12-21, 2013.
- Discher, M., Woda, C. und Fiedler, I. Improvement of dose determination using glass display of mobile phones for accident dosimetry. *Radiation Measurements* 56, 240-243, 2013.
- Discher, M., Greiter, M. und Woda, C., Photon energy dependence and angular response of glass display used in mobile phones for accident dosimetry, *Radiation Measurements* 71, 471-474, 2014.
- Discher, M. und Woda, C., Thermoluminescence emission spectrometry of glass display in mobile phones and resulting evaluation of the dosimetric properties of a specific type of display glass, *Radiation Measurements* 71, 480-484, 2014.
- Discher, M., Hiller, M. und Woda, C., MCNP simulations of a glass display used in a mobile phone as an accident dosimeter, *Radiation Measurements* (in Revision) 2014.

Weiter konnte ich im Verlaufe meiner Zeit am Helmholtz Zentrum München Auszüge meiner Arbeit auf wissenschaftlichen Konferenzen vortragen und mich mit Wissenschaftlern austauschen, die im selben Forschungsfeld arbeiten:

- Jan. 2012 - Dez. 2014 EU Sicherheitsprojekt CATO Konsortium Besprechungen in Tel Aviv (Israel), Aix-en-Provence (Frankreich), Portsmouth (Großbritannien), Bonn, Berlin, Salzburg (Österreich), Wien (Österreich), Brüssel (Belgien)
- Aug. 2012 Posterpräsentation (2. Posterpreis) Wilhelm und Else Heraeus „Physikschule Schutz des Menschen und seiner Umwelt vor ionisierender Strahlung“, Bad Honnef
- Sept. 2012 Posterpräsentation „8th International Conference on Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation“ (LUMDETR), Halle
- Sept. 2013 Posterpräsentation „17th International Conference on Solid State Dosimetry“ (SSD17), Recife (Brasilien)
- Okt. 2013 Vortrag „German Luminescence and ESR Meeting“ (gLED), Freiberg
- Feb. 2014 „EURADOS Annual Meeting 2014“ (AM2014), Budapest (Ungarn)
- Feb. 2014 Posterpräsentation <interact2014>, München
- Jul. 2014 Posterpräsentation im Rahmen der Evaluierung von der „Helmholtz Graduate School Environmental Health“ (HELENA), Neuherberg
- Sept. 2014 Vortrag „41st Annual Meeting of the European Radiation Research Society“ (ERR2014), Rhodos (Griechenland)
- Sept. 2014 Laboraustausch mit Experimenten im Lumineszenz-Labor am „Istituto Superiore di Sanità“ (ISS) in Rom (Italien)
- Nov. 2014 Vortrag „German Luminescence and ESR Meeting“ (gLED), Gießen

Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben:

- Prof. Dr. Herwig G. Paretzke für die Überlassung des Themas und die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit,
- Dr. Clemens Woda für seine tatkräftige Unterstützung, hilfreichen Diskussionen, Hinweise und Anregungen bei allen aufgetretenen physikalischen Problemen im Laufe der Arbeit,
- der gesamten Arbeitsgruppe ISAR am Institut für Strahlenschutz (ISS) am Helmholtz Zentrum München für die Unterstützung und freundliche Aufnahme in der Arbeitsgruppe schon während meiner vorangegangenen Diplomarbeit,
- besonders meiner Büronachbarin Dr. Irene Fiedler für ihre tatkräftige Hilfe und Unterstützung im Labor, vor allem beim Ätzen der unzähligen Glasproben,
- Dr. Alexander Ulanovsky für sein offenes Ohr bei allen Fragen zu MCNP Simulationen,
- Dr. Matthias Greiter (AMSD) für die unzähligen Gespräche über das Bestrahlungslabor und für seine Flexibilität, wenn die Bestrahlungstermine am SSDL nicht pünktlich um 15 Uhr abgeschlossen waren,
- Dr. Kay Dornich und Andreas Richter von Freiberg Instruments für Versuchsmessungen an einem LEXSYG Lumineszenzmessgerät ausgestattet mit einem rotempfindlichen Photomultiplier,
- Mauritius Hiller für die hilfreichen Diskussionen über die MCNP Simulationen und das Aushelfen bei aufgetretenen Engpässen in der Rechenleistung bei langen Simulationen,
- dem CATO Feldexperiment-Team, das im Feldexperiment in Salzburg beteiligt war, besonders Dr. Carlos Rojas Palma (SCK-CEN), Prof. Dr. Friedrich Steinhäuser (PLUS), Rodolfo Cruz-Suárez (IAEO), Petr Kuča (SÚRO), Irena Češpírová (SÚRO), Jérémie Dabin (SCK-CEN), sowie Herbert Lettner (PLUS) und Christoph Stettner (Seibersdorf Laboratories) für die informativen Email-Korrespondenzen,
- der Graduiertenschule HELENA (Helmholtz Graduate School Environmental Health) für die finanzielle Unterstützung zur Teilnahme an der Konferenz „17th International Conference on Solid State Dosimetry“ (SSD17) in Recife und zum Austausch mit dem Lumineszenzlabor „Istituto Superiore di Sanità“ (ISS) in Rom,
- meinen Kommilitonen Christian Steyer für die EDX Messungen zur chemischen Bestimmung der Glaszusammensetzung, sowie auch Fabian Honecker und Ulrich Ackermann für unsere gemeinsame Physik-Studienzeit,
- meinen Eltern gilt der besondere Dank für ihre Hilfe und unbegrenzte Unterstützung während meines ganzen Studiums, das ohne sie nur schwer möglich gewesen wäre,
- meinen Geschwistern Andreas und Susanne, sowie meiner Freundin Carina für ihre Geduld und die vielen Aufmunterungen in den kritischen Phasen dieser Arbeit.

