

Ortsdosimetrie in gepulsten Strahlungsfeldern

Schriftenreihe, Heft 5/2015



Dosimetrie in hochenergetischen, gepulsten Strahlungsfeldern

Malte Gotz, Dr. Leonhard Karsch, Dr. Jörg Pawelke

1	Einleitung	6
2	Wissenschaftlicher Stand zu Projektbeginn und aktuelle Entwicklungen Dritter	7
3	Vorexperimente am klinischen Beschleuniger (Arbeitsschritt 1).....	9
3.1	Erstes Vorexperiment.....	9
3.2	Zweites Vorexperiment.....	10
3.3	Schlussfolgerungen aus den Vorexperimenten	11
4	Auswahl der zu untersuchenden Messgeräte (Arbeitsschritt 2)	11
5	Bewerten, Implementieren und Kalibrieren der Referenzdosimetrie (Arbeitsschritt 3)	14
5.1	Auswahl der Referenzdosimetrie.....	14
5.2	Heizkurve der Thermolumineszenzdosimeter	14
5.3	Kalibrierung der Thermolumineszenzdosimeter	16
5.4	TLD-Referenzmessungen	16
5.5	Homogenitätskontrolle mittels OSL	18
6	Experimentvorbereitung und erstes Experiment an ELBE (Arbeitsschritte 4, 5, 6)	19
6.1	Die Strahlenquelle ELBE	19
6.2	Experimenteller Aufbau und Durchführung.....	20
6.3	Ergebnisse	20
6.4	Diskussion und Schlussfolgerung.....	21
7	Zweites Experiment an ELBE (Arbeitsschritt 7)	22
7.1	Experimenteller Aufbau und Durchführung.....	22
7.2	Ergebnisse	23
7.3	Diskussion und Schlussfolgerungen.....	27
8	Drittes Experiment an ELBE (Arbeitsschritt 8)	27
8.1	Experimenteller Aufbau und Durchführung.....	27
8.2	Ergebnisse	28
8.3	Diskussion und Schlussfolgerung.....	34
9	Allgemeines Korrekionsverfahren (Arbeitsschritt 9)	34
10	Zusammenfassung.....	36
	Unterlagenverzeichnis	37

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Heiz- und Glühkurve eines TLD ohne Vorheizen	15
Abbildung 2:	Heiz- und Glühkurve eines TLD mit Vorheizen	15
Abbildung 3:	Kalibriermessung für einen TLD-Chip	16
Abbildung 4:	TLD-Messungen der ersten Strahlzeit mit Anpassungsgerade	17
Abbildung 5:	TLD-Messungen der zweiten Strahlzeit mit Anpassungsgerade	17
Abbildung 6:	Homogenität des Strahlungsfeldes: Strahlintensität über die gesamte Image-Plate als Falschfarbenbild (links). Profilschnitte (rechts) entlang der x-Achse (oben) und der y-Achse (unten)	18
Abbildung 7:	Dosisleistungsanzeige der AD-18-Sonde, aufgetragen über der Dosisleistung aus der Ionisationskammermessung	21
Abbildung 8:	Relation der Bremsstrahlungsdosisleistung am Ort des Ortsdosisleistungsmessgerätes zur Dosisleistung durch den primären Elektronenstrahl in der Ionisationskammer für das RamION.....	24
Abbildung 9:	Relation der Bremsstrahlungsdosisleistung am Ort des Ortsdosisleistungsmessgerätes zur Dosisleistung durch den primären Elektronenstrahl in der Ionisationskammer für das LB 123 D-H10.....	24
Abbildung 10:	Gemessene Dosisleistung des RamION bei konstanter mittlerer Dosisleistung, erreicht durch gleichzeitige Variation von Pulswiederholffrequenz und Pulsdosis	25
Abbildung 11:	Gemessene Dosisleistung des RamION in Abhängigkeit von der Pulsdosis, die aus dem Messwert der Ionisationskammer und der Relation nach Abbildung 8 berechnet wurde.....	25
Abbildung 12:	Gemessene Dosisleistung des LB 123 D-H10 bei konstanter mittlerer Dosisleistung, erreicht durch gleichzeitige Variation von Pulswiederholffrequenz und Pulsdosis	26
Abbildung 13:	Gemessene Dosisleistung des LB 123 D-H10 bei konstanter mittlerer Dosisleistung, Pulsdosis und Pulswiederholffrequenz, aber einer variablen Pulsdauer	26
Abbildung 14:	Messantwort des RamION bei Bestrahlung mit kurzen Pulsen variabler Dosis und 5 Hz Wiederholungsrate. Die Pulsdosis ist aus den Ionisationskammermessungen unter Verwendung der mittels TLD-Messungen bestimmten Kalibrierwerte abgeleitet. Der ideale Verlauf entspricht der korrekten Messung der Dosisleistung durch das RamION bei der jeweiligen Pulsdosis.....	29
Abbildung 15:	Messantwort des RamION bei Bestrahlung mit Pulsen variabler Länge und einer mittleren Dosisleistung von 17,3 μ Gy/h. Die Messantwort wurde für Abweichung in der Pulsdosis vom eingestellten Wert korrigiert.	29
Abbildung 16:	Quasi-kontinuierliche Bestrahlung des LB 123 D-H10 (Symbole) mit zugehöriger Regressionsgerade (grün)	31
Abbildung 17:	Messantwort des LB 123 D-H10 bei Bestrahlung mit kurzen Pulsen variabler Dosis und 25 Hz Wiederholungsrate. Die Pulsdosis ist aus den Ionisationskammermessungen unter Verwendung der mittels TLD-Messungen bestimmten Kalibrierwerte abgeleitet. Der eingezeichnete ideale Verlauf (korrekte Messung der applizierten Dosisleistung durch das Messgerät) berücksichtigt die erhöhte Empfindlichkeit des LB 123 D-H10.....	31
Abbildung 18:	Messantwort des LB 123 D-H10 bei Bestrahlung mit Pulsen variabler Länge und einer mittleren Dosisleistung von 16,5 mSv/h. Die Messantwort wurde für Abweichung in der Pulsdosis vom eingestellten Wert korrigiert. Die Steigung der Regressionsgerade erlaubt die Errechnung der maximalen Pulsdosisleistung.	32
Abbildung 19:	Messantwort der AD-b-Sonde bei Bestrahlung mit kurzen Pulsen variabler Pulsdosis und 5 Hz Wiederholungsrate. Die Pulsdosis ist aus den Ionisationskammermessungen unter Verwendung der mittels TLD-Messungen bestimmten Kalibrierwerte abgeleitet. Der ideale Verlauf wäre eine korrekte Messung der mittleren Dosisleistung.	33
Abbildung 20:	Messantwort der AD-b-Sonde bei Bestrahlung mit Pulsen variabler Länge und konstanter mittlerer Dosisleistung von 1,3 mSv/h. Die Messantwort wurde für Schwankungen der Pulsdosis korrigiert. Die Regressionsgerade für Pulsdauern < 40 μ s erlaubt die Berechnung der maximalen Pulsdosisleistung.	33

Abkürzungsverzeichnis

ELBE	Elektronen-Linearbeschleuniger hoher Brillanz und geringer Emittanz
HZDR	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
IK	Ionisationskammer
LiF	Lithiumfluorid
OSL	optische stimulierte Lumineszenz
PTB	Physikalische Technische Bundesanstalt
PTFE	Polytetrafluorethylen
TLD	Thermolumineszenz Dosimeter

Formelzeichen

\dot{H}_{Puls}	Pulsdosisleistung (Dosisleistung während eines Strahlungspulses)
$\dot{H}_{\text{Puls}}^{\text{max}}$	maximal messbare Pulsdosisleistung
τ	Totzeit
G	Zählkalibrierfaktor (definiert das Verhältnis von gezählten Impulsen zu angezeigter Dosis)
T	Zykluszeit eines Messgeräts
t_{Puls}	Pulsdauer
m	gemessene Zählrate
n	tatsächliche Zählrate

1 Einleitung

Gepulste Strahlungsfelder treten bei einer Vielzahl in Klinik, Forschung und Industrie genutzten Strahlungsquellen auf. Ähnlich vielfältig wie ihr Einsatz ist die Pulsstruktur der verwendeten Strahlungsquellen. Der Großteil moderner Teilchenbeschleuniger erzeugt eine hochfrequente primäre Mikropulsstruktur im MHz- (Zyklotrons und Synchrotrons) bis GHz-Bereich (Linearbeschleuniger) mit Pulsdauern im Bereich von Nano- bzw. Pikosekunden. Darüber hinaus ist z. B. bei vielen Elektronen-Linearbeschleunigern der Mikropulsstruktur noch eine Makropulsung von z. B. 75 Hz mit Mikrosekunden langer Pulsdauer überlagert. Im Falle von gepulsten C-Bögen und Angiografiegeräten werden Röntgenpulse mit Millisekunden Pulsdauern erzeugt und in der Entwicklung befindliche, laserbasierte Beschleuniger erzeugen bei Wiederholraten von wenigen Hertz Pikosekunden lange Pulse. Neben der Zeitstruktur variiert hierbei in Abhängigkeit von der Anwendung und der eingesetzten Strahlungsquelle auch die Pulsdosis in einem sehr großen Bereich. So liefert z. B. ein in der Strahlentherapie eingesetzter Elektronen-Linearbeschleuniger Photonenstrahlung mit einer Mikropulsdosis im Bereich von 100 nGy, wohingegen Dosen im Gray-Bereich mit einem Einzelpuls eines laserbasierten Beschleunigers appliziert werden können.

Alle diese Strahlungsfelder sollten im Sinne des Strahlenschutzes dosimetrisch erfassbar sein, um einen adäquaten Schutz der Menschen in ihrer Umgebung zu gewährleisten. Im Kontext der Dosimetrie sind sehr hochfrequente Felder mit geringen Pulsdosen vergleichsweise unproblematisch, weil sie für viele Messgeräte als quasi-kontinuierlich betrachtet werden können. Gepulste Strahlungsfelder geringer Pulswiederholfrequenz und insbesondere im Bereich hoher Pulsdosen können jedoch für viele Geräte problematisch sein. Daher war das Ziel dieses Forschungs- und Entwicklungsprojektes zur „Dosimetrie in hochenergetischen gepulsten Strahlungsfeldern“ die Untersuchung verschiedener, kommerziell erhältlicher Messgeräte in gepulsten Strahlungsfeldern (gemäß U 1, U 2). Auf der Grundlage von Messungen sollte eine Bewertung ihrer Eignung erfolgen und ein allgemeines Korrektionsverfahren für die Messungen in gepulsten Strahlungsfeldern entwickelt werden. Das Projekt wurde durchgeführt am Nationalen Zentrum für Strahlenforschung in der Onkologie (OncoRay), welches durch die Medizinische Fakultät und das Universitätsklinikum Carl Gustav Carus an der Technischen Universität Dresden und das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) getragen wird. Für die Experimente wurden die zur Verfügung stehenden Anlagen der Trägerinstitutionen, wie die Therapielinearbeschleuniger des Universitätsklinikums Carl Gustav Carus und der Forschungsbeschleuniger ELBE (Elektronen-Linearbeschleuniger hoher Brillanz und geringer Emittanz) des HZDR genutzt.

Das Projekt gliederte sich in folgende Arbeitsschritte (vgl. U 2):

1. Vorexperimente zur Festlegung geeigneter Aufstellorte für die zu bewertenden Messgeräte und die Referenzdosimeter an der Strahlungsquelle ELBE des HZDR und an den medizinischen Elektronen-Linearbeschleunigern des Universitätsklinikums
2. Spezifizieren der Messparameter und Erstellen eines Auswahlvorschlages für die im Rahmen dieses Vorhabens zu untersuchenden Geräte
3. Bewerten, Implementieren und Kalibrieren der Referenzdosimetrie (TLD oder OSL)
4. Experimentvorbereitung an der Strahlungsquelle ELBE und an den medizinischen Elektronen-Linearbeschleunigern
5. Implementieren der Datenerfassung- und -auswertungssoftware
6. Erstes Experiment, Auswertung sowie Festlegung der Zielstellung und Parameter des zweiten Experimentes

7. Zweites Experiment, Auswertung sowie Festlegung der Zielstellung und Parameter des dritten Experimentes
8. Drittes Experiment, Auswertung
9. Datenaufbereitung und Entwicklung eines allgemeinen Korrektionsverfahrens für die Dosimetrie in gepulsten Strahlungsfeldern

In diesem Abschlussbericht werden nach einer Darlegung des wissenschaftlichen Standes zum Beginn der Forschungsarbeit und dessen Entwicklung im Laufe der Projektbearbeitung die Ergebnisse der Arbeitsschritte 1 bis 8 dargelegt. Im Anschluss folgt mit der Diskussion der Ergebnisse die Darstellung des Arbeitsschrittes 9.

2 Wissenschaftlicher Stand zu Projektbeginn und aktuelle Entwicklungen Dritter

Die Problematik der Messung gepulster Strahlungsfelder wurde an verschiedenen Stellen thematisiert. Im Bereich des Strahlenschutzes wurde die Problematik in Bezug auf elektronisch zählende Dosimeter und dabei insbesondere für elektronische Personendosimeter herausgestellt (vgl. U 3, U 4). Aber auch Dosisleistungsmessgeräte wie die hier untersuchten wurden bereits untersucht (vgl. U 5). Diese Untersuchungen zeigten primär nur ein allgemeines Problem der dosimetrischen Erfassung gepulster Strahlungsfelder auf, lieferten jedoch keine konkreten Angaben wie Grenzen der Einsetzbarkeit einzelner Messinstrumente oder gar eine Möglichkeit der Korrektion der offensichtlich fehlerbehafteten Messungen in gepulsten Feldern.

In der medizinischen Dosimetrie wird die Problematik gepulster Strahlungsfelder und deren Messung mit Ionisationskammern bereits deutlich länger diskutiert. Weil es sich häufig um die Messung des Primärstrahls eines Beschleunigers handelt, sind deutlich intensivere Pulsdosen zu messen und die Zeitstruktur der Pulsung ist oft bekannt. Im Gegensatz zu Messungen im Bereich des Strahlenschutzes ist auch das Energiespektrum im Allgemeinen bekannt. Es existieren Korrekturen für idealisierte (sehr kurz) gepulste Felder (vgl. U 6) und auch erste Untersuchungen zum Verhalten von Ionisationskammern in gepulsten Feldern variabler Pulslänge (vgl. U 7, U 8) sind verfügbar.

Während der Projektlaufzeit fand das 274. Seminar der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) am 18. und 19.11.2013 in Braunschweig statt. Es war das erste Seminar dieser Art, das den neuesten Stand von Wissenschaft und Technik bezüglich der Messung gepulster Strahlung im Bereich des Strahlenschutzes sowie die Prüfkonzepte und normativen Anforderungen im Rahmen der kürzlich erschienenen DIN IEC/TS 62743 Vornorm behandelte (vgl. U 9, U 10).

Die DIN IEC/TS 62743 Vornorm, erschienen 2013 als Übersetzung der IEC/TS 62743 (vgl. U 11), definiert Anforderungen an elektronische Dosimeter bezüglich gepulster Photonen-Strahlung. Bis zu ihrem Erscheinen gab es keine normativen Richtlinien bezüglich der Eignung elektronischer Dosimeter in gepulsten Strahlungsfeldern. Zusammen mit dem Entwurf der ISO/NP TS 18090-1, die Referenzstrahlungsfelder für gepulste Photonenstrahlung definiert, stellt diese Vornorm die Grundvoraussetzung für ein Bauartzulassungsverfahren für Dosimeter in gepulsten Strahlungsfeldern bei der PTB und allgemein eine Grundlage für einheitliche Tests dar. Daher sollen die sich aus ihr ergebenden Anforderungen hier kurz zusammengefasst werden.

Als gepulste Strahlung werden in diesem Zusammenhang zunächst Pulse verstanden, die kürzer als 10 s sind. Ziel der Norm sind elektronisch zählende Dosimeter, z. B. Geiger-Müller Zählrohre, in denen ionisierende Strahlung eine Gasentladung erzeugt, die von einer nachgeschalteten Elektronik registriert wird. Die Registrierung solcher Ereignisse ist mit einer Totzeit verbunden, in der keine weiteren Ereignisse registriert werden können. Die Anzahl der Ereignisse ist proportional zur Dosis, so bestimmt das Dosimeter über einen Zählkalibrierfaktor aus der Anzahl bzw. der Rate der Ereignisse die Dosis bzw. Dosisleistung.

Das Dosimeter sollte laut Vornorm eine Totzeit $\tau < 10 \mu\text{s}$ haben, eine Zykluszeit $T < 30 \text{ s}$ und einen Zählkalibrierfaktor $G < 10 \text{ nSv}$. Die Totzeitanforderung hat zum Zweck, dass auch bei „kurzen“ Pulsen auswertbare Zählraten erreicht werden. Die Zykluszeitanforderung soll eine zu träge Reaktion des Dosimeters auf Veränderungen verhindern und der Zählkalibrierfaktor bestimmt die Dosisanzeige pro Zählereignis und sollte möglichst klein sein, um eine akzeptable Auflösung bei kleinen Dosen (wenigen Ereignissen) zu erreichen.

Die Norm geht im Weiteren von einem Strahlungsfeld aus, für das innerhalb der Pulsdauer t_{Puls} eine konstante Pulsdosisleistung \dot{H}_{Puls} vorliegt. Also werden idealerweise Rechteck-Strahlungspulse angenommen. Für das Dosimeter lässt sich dann eine maximal messbare Pulsdosisleistung $\dot{H}_{\text{Puls}}^{\text{max}}$ bestimmen, welche mindestens 1 Sv/h betragen sollte. Dabei darf die Anzeige bis $\dot{H}_{\text{Puls}}^{\text{max}}$ maximal 20% vom tatsächlichen Wert abweichen und bis zu einer 100-fachen Überlastung ($100 \cdot \dot{H}_{\text{Puls}}^{\text{max}}$) nicht zurückgehen, also keinen geringeren Messwert als bei $\dot{H}_{\text{Puls}}^{\text{max}}$ anzeigen.

Die von einem Gerät maximal messbare Pulsdosisleistung lässt sich aus der Totzeit τ des Dosimeters und seinem Zählkalibrierfaktor G abschätzen:

$$\dot{H}_{\text{Puls}}^{\text{max}} = \frac{0,25 G}{\tau}$$

Auch wenn ein Messgerät laut Norm für gepulste Strahlung geeignet ist, bleibt zu berücksichtigen, dass eine Pulsdosisleistung von 1 Sv/h sehr viel niedriger ist als die in vielen real auftretenden Strahlungsfeldern vorhandene Pulsdosisleistung. So treten z. B. an einem klinischen Linearbeschleuniger im Direktfeld Pulsdosisleistungen von bis zu ca. 10^6 Sv/h und im Streufeld immer noch Pulsdosisleistungen von ca. 10 Sv/h auf. Bei dem Einsatz eines Messgerätes bleibt also vor dem Einsatz zu prüfen, ob die zu erwartenden Pulsdosisleistungen in den Messgrenzen des Gerätes liegen.

Im 274. PTB-Seminar wurde außerdem das Berthold LB6419-Ortsdosismessgerät vorgestellt. Dieses wurde in Kooperation von der Firma Berthold und dem Forschungszentrum DESY in Hamburg speziell zur Messung intensiver, ultra-kurz gepulster Strahlung, wie sie am Freie-Elektronen-Laser FLASH des DESY entsteht, entwickelt. Es soll aufgrund seiner speziell auf den Nachweis gepulster Strahlungsfelder optimierten Funktionsweise und der für ein Online-Dosimeter einzigartigen Fähigkeit, die Dosis beliebig kurzer Pulse zu registrieren, kurz vorgestellt werden.

Die Dosis eines Pulses wird bestimmt, indem der Zerfall radioaktiver Zwischenprodukte registriert wird. Für den Nachweis gepulster Photonen wird z. B. Kohlenstoff in der Reaktion $^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$ aktiviert. Aus der Intensität der Bohr-12-Aktivität, gemessen mit einem Szintillator, kann die Intensität des ursprünglichen Gammapulses bestimmt werden. Gleichzeitig können mit dem Szintillator in konventioneller Detektionsweise kontinuierliche Strahlungsfelder aus γ -Strahlung oder geladenen Teilchen direkt gemessen werden. Analog dazu misst der Detektor auch kontinuierliche und gepulste Neutronenstrahlung. Schnelle Neutronen werden zunächst moderiert und die thermalisierten Neutronen in einem Helium-3-Proportionalzähler detektiert (kontinuierliche

Strahlung). Um gepulste Neutronen zu detektieren, wird der Zerfall der Produkte einer Aktivierung von Kohlenstoff-12 durch schnelle Neutronen gemessen.

Die weiteren, im Seminar präsentierten Ergebnisse z. B. zu der von den Autoren ebenfalls untersuchten Automess AD-18-Messsonde, stimmen sehr gut den Erkenntnissen der Autoren überein. Durch die DIN IEC/TS 62743 Vornorm und die ebenfalls im Seminar vorgestellte Referenzstrahlungsquelle für gepulste Strahlung an der PTB wird es in absehbarer Zukunft die Möglichkeit der Bauartzulassung von zählenden Dosimetern für gepulste Strahlung und damit eine verbesserte Sicherheit geben, ob und inwieweit ein Messgerät in gepulsten Strahlungsfeldern einsetzbar ist.

Aufgrund der Definition einer maximalen Pulsdosisleistung als Grenzwert für die Eignung in gepulsten Strahlungsfeldern ist allerdings zu erwarten, dass bei sehr kurzen Pulsen, d. h. bei Pulsen kürzer als oder in der gleichen Größenordnung wie die Totzeit (oder einer anderen kritischen Zeitkonstante), höchstwahrscheinlich kein Dosimeter die erforderlichen Einsatzkriterien erfüllt. Bei solch kurzen Pulsen kommt es zu extremen Pulsdosisleistungen (z. B. 10^6 mSv/h an einem Linearbeschleuniger), die kaum messbar sind, wenn gleichzeitig eine gute Empfindlichkeit für geringere, mittlere Dosisleistungen, wie im Strahlenschutz notwendig, gewahrt werden soll.

Für die korrekte Messbarkeit solch kurzer Pulse ist aber nicht die Pulsdosisleistung entscheidend, sondern (wie auch die Experimentergebnisse der Autoren zeigen) vielmehr die Pulsdosis unabhängig von der Dauer des Strahlpulses.

Die neuen normativen Regelungen sollten trotzdem immer dort helfen, wo gepulste Strahlung durch Streuung und Abschirmung hinreichend geschwächt und Pulse zeitlich verbreitert wurden, sodass die Pulsdauern deutlich länger als die Totzeiten der eingesetzten Messgeräte sind. Allerdings dort, wo kurz gepulste, intensive Strahlungsfelder (Direktfelder einer Strahlungsquelle) auftreten können, bleibt die Problematik bestehen, dass aus Bauartzulassungssicht wahrscheinlich kein Gerät geeignet sein wird.

3 Vorexperimente am klinischen Beschleuniger (Arbeitsschritt 1)

3.1 Erstes Vorexperiment

Methode

Die ersten Vorversuche wurden an einem klinischen Linearbeschleuniger durchgeführt. Als Primärstrahlung wurde Photonenstrahlung mit einer Energie von 15 MV eingesetzt. Diese Primärstrahlung mit einer Feldgröße von $10 \times 10 \text{ cm}^2$ wurde auf einen Aluminiumblock (Größe: $20 \times 20 \times 10 \text{ cm}^3$) gerichtet. Im Aluminiumblock wird der Strahl absorbiert und in (aufgestreute) Sekundärstrahlung umgewandelt. Für Untergrunduntersuchungen wurde der Aluminiumblock entfernt.

Mit einer Farmerkammer, angeschlossen an ein Unidos-Elektrometer (beides von PTW, Freiburg, Deutschland), wurde zunächst die mittlere Energiedosisleistung an verschiedenen Punkten im Bestrahlungsraum bestimmt. Zur Vereinfachung der Korrekturen wurde als Strahlqualität das Röntgenspektrum von ^{60}Co angenommen. Mit der weiteren Annahme, dass die Sekundärstrahlung die gleiche Zeitstruktur wie der Primärstrahl

hat, kann dann die Pulsdosis berechnet werden. Innerhalb der mit einer Dauer von 4 μs bei einer Repetitionsrate von 75 Hz erzeugten Makropulse kann die Strahlung auf Grund der hohen Mikropulsfrequenz von ca. 3 GHz als kontinuierlich betrachtet werden.

Ergebnisse

Im Bestrahlungsraum wurden Pulsdosen im Bereich von 0,1 μGy bis 0,08 mGy gemessen. Das entspricht einer mittleren Dosisleistung von 30 mGy/h bis 23 Gy/h.

Der Beschleuniger erzeugt auch Strahlung außerhalb des eingestellten Primärstrahlungsfeldes. Für diese Orte muss überprüft werden, ob die Annahme über die Pulsdauer wegen der Überlagerung von primärer Untergrundstrahlung des Beschleunigers und Sekundärstrahlung noch gültig ist.

Bei Messungen an Orten, die nicht in dem Feld des Primärstrahles liegen, könnte die Richtungsabhängigkeit der Detektoren die Messung verfälschen.

Für einen höheren Pulsdosisbereich könnte auf den Aluminiumabsorber verzichtet werden, weil die Photonenstrahlung ja bereits eine Sekundärstrahlung des Linearbeschleunigers ist. Dann beträgt die maximal erreichbare Pulsdosis 1,1 mGy. Das entspricht einer mittleren Dosisleistung von 300 Gy/h.

3.2 Zweites Vorexperiment

Methode

Drei Messgeräte wurden im Strahlungsfeld des klinischen Beschleunigers, wie im ersten Vorexperiment beschrieben, hinter einem 20 x 20 x 10 cm^3 Aluminiumblock positioniert. Untersucht wurden aufgrund der Verfügbarkeit und der unterschiedlichen Funktionsprinzipien (vgl. Kapitel 4 bzw. Arbeitsschritt 2) das LB 123 D-H10 mit LB 1236-H10 (Proportionalzählrohr), Inspector 1000 mit IPROS-2 (Szintillationszähler) und RamION (Ionisationskammer). Mit dem Ziel, eine möglichst geringe Dosisleistung zu erreichen, wurde der direkte Elektronenstrahl des Beschleunigers verwendet und auf den Aluminiumblock gelenkt. Die im Aluminiumblock entstandene Bremsstrahlung wurde dann für die Untersuchung der Messgeräte verwendet. Die verwendete Beschleunigungsspannung lag bei 6 MV. Die Dosisleistung des Bremsstrahlungsfeldes wurde über die Feldgröße des Elektronenstrahls (mit der Kollimatoreinstellung vorgegeben) variiert.

Von einer Positionierung der Messgeräte abseits der Strahlachse wurde abgesehen, weil kein geeignetes Verfahren zur Bestimmung der Zeitstruktur der dort herrschenden Strahlungsfelder vorliegt.

Ergebnisse

Die mit dem Aufbau erreichbare minimale Dosisleistung im Bremsstrahlungsfeld von ca. 30 mSv/h erwies sich als zu hoch für die angestrebten Messungen. Das Inspector 1000-Messgerät schaltet automatisch bei zu hoher Dosisleistung von der externen Szintillatorsonde IPROS-2 auf ein internes Zählrohr um. Der dafür verwendete Schwellwert liegt mit 37 $\mu\text{Sv/h}$ deutlich unter der niedrigsten erreichbaren Dosisleistung, daher kann der Szintillationszähler in diesem Aufbau nicht untersucht werden.

Das LB 1236-H10-Proportionalzählrohr ist ausgelegt für Messungen bis zu 10 mSv/h, also ebenfalls niedriger als die geringste erreichte Dosisleistung. Es ist zwar in der Lage, auch höhere Dosisleistungen zu messen und anzuzeigen, im durchgeführten Experiment zeigte es aber unabhängig von der eingestellten Dosisleistung im

Bremsstrahlungsfeld einen konstanten Wert von 93 $\mu\text{Sv/h}$ an. Dieser viel zu niedrige, invariante Wert ließ keine sinnvolle Messreihe zu.

Das RamION erlaubt prinzipiell Messungen bis zu einer Dosisleistung von 500 mSv/h und könnte in dem Aufbau untersucht werden. Allerdings ist die Feldgröße des Elektronenstrahls als Parameter für die Einstellung der Dosisleistung des Bremsstrahlungsfeldes ungünstig, weil der angezeigten Dosisleistung die Annahme zugrunde liegt, dass ein homogenes Strahlungsfeld den gesamten Detektor durchdringt. Mit zunehmender Verkleinerung der Feldgröße des Elektronenstrahls kommt es aber zu einer zunehmend inhomogenen Ausleuchtung der aktiven Fläche des untersuchten Messgerätes.

3.3 Schlussfolgerungen aus den Vorexperimenten

Für sinnvolle Experimente am klinischen Beschleuniger wäre eine geringere und besser kontrollierbare Dosisleistung anzustreben. Die dazu begonnene Untersuchung der Möglichkeit eines „Gatings“ des klinischen Beschleunigers wurde letztendlich als impraktikabel verworfen. Möglicherweise hätten durch ein Gating einzelne 4 μs -Pulse in zeitlich variablem Abstand appliziert werden können. Dadurch ließe sich zwar die mittlere Dosisleistung über die Periode der Pulse kontrollieren, allerdings bliebe die Pulsdauer unverändert und eine Variation der Pulsdosis wäre nur in einem höchst unbefriedigendem, geringem Maße steuerbar. Die Variation der Pulsdosis über die Größe des Primärstrahlungsfeldes hätte eine individuelle Verifikation der Homogenität des Strahls für jede Pulsdosis erfordert. Auch Messungen im Streustrahlungsfeld wurden verworfen, weil eine Verifikation der Zeitstruktur der Strahlung im Streustrahlungsfeld als nicht in diesem Projekt realisierbar eingestuft wurde.

Aufgrund der viel größeren Variabilität in den Strahlparametern (Pulsdosis, Pulsdauer, Wiederholfrequenz) bei konstanter räumlicher Abmessung des Strahls konzentrierten sich die weiteren Experimente auf den forschungsorientierten Elektronen-Linearbeschleuniger ELBE am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf. Obwohl die dort verfügbare Strahlzeit stark begrenzt ist, wurde der überlegene Parameterbereich als ausschlaggebendes Kriterium für die anzustrebenden Untersuchungen angesehen.

4 Auswahl der zu untersuchenden Messgeräte (Arbeitsschritt 2)

Zunächst wurden die am Universitätsklinikum Dresden und am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf verfügbaren Messgeräte erfasst und daraus Geräte ausgewählt, die für die Untersuchungen vorgeschlagen wurden. Die Auswahl wurde nach folgenden Kriterien erstellt:

- Beteiligung möglichst vieler Messprinzipien
- Beteiligung von Geräten mit möglichst verschiedenen Einsatzempfehlungen
- Begrenzung der Anzahl der Geräte auf ein dem Arbeitsumfang in der Leistungsbeschreibung entsprechendes Maß

Zur engeren Auswahl standen folgende Geräte:

- a) LB 123 D-H10 (Berthold, Bad Wildbad, Deutschland)
Dosisgröße: H*10
Dosisleistungsbereich: 50 nSv/h bis 10 mSv/h
Strahlenart (Energiebereich): Photonen 30 keV bis 1,3 MeV
Bauartzulassung: PTB
Prinzip: energiekompensiertes Proportionalzählrohr (0,214 μ Sv/h pro ips, LB 1236-H10)
- b) Inspector 1000 mit IPRON-1 (Canberra Industries, Meridan, USA)
Dosisgröße: -
Dosisleistungsbereich: 10 nSv/h bis 10 mSv/h
Strahlenart (Energiebereich): 50 keV bis 3 MeV
Bauartzulassung: nein (transportables Spektrometer)
Prinzip: NaI-Szintillator (6000 cps/mrem) und Multichannel-Analyzer
- c) Unidos mit Markuskammer (PTW, Freiburg, Deutschland)
Dosisgröße: Energiedosis (bei bekannter Strahlenart)
Dosisleistungsbereich: 40 mGy/h bis 4 MGy/h
Strahlenart (Energiebereich): Photonen (30 kV bis 50 MV) Elektronen (2 bis 45 MeV)
Bauartzulassung: nein (medizinische Dosimetrie)
Prinzip: (integrierende) Stromkammer
- d) EPD Mk2 (Thermo Scientific, Erlangen, Deutschland)
Dosisgröße: HP(10)
Dosisleistungsbereich: 50 nSv/h bis 1 Sv/h (für Streustrahlen)
Strahlenart (Energiebereich): Photonen (16 keV bis 7 MeV)
Bauartzulassung: PTB
Prinzip: Halbleiterdetektoren
- e) RamION (Rotem Industries, Rotem Industries Park, Israel)
Dosisgröße: Hx
Dosisleistungsbereich: 2 μ Sv/h bis 500 mSv/h
Strahlenart (Energiebereich): Photonen(7 keV bis 3 MeV)
Bauartzulassung: PTB
Prinzip: Geiger-Müller-Zählrohr

Mit diesen Geräten sind viele Bereiche der Umgebungsdosimetrie bereits durch typische Messgeräte abgedeckt. Geräte anderer Hersteller mit dem gleichen Ziel haben in der Regel nur geringe technische Abweichungen, sodass es weitestgehend genügt, die zuvor genannten Messgeräte einzusetzen. Es ist jedoch sinnvoll, zusätzlich noch ein Dosisleistungsmessgerät 6150AD (Automation und Messtechnik GmbH, Ladenburg, Deutschland) einzusetzen. Dieses Messgerät wird für Feuerwehren empfohlen, um im Brandfall ionisierende Strahlung zu erkennen.

- f) Dosisleistungsmessgerät 6150AD (Automess GmbH, Ladenburg, Deutschland)
Dosisgröße: H*(10)
Dosisleistungsbereich: 0,5 μ Sv/h bis 9,99 mSv/h
Strahlenart (Energiebereich): Photonen (65 keV bis 1,3 MeV)
Bauartzulassung: PTB
Prinzip: Szintillator (AD-b) oder Geiger-Müller-Zählrohr (AD-18)

Es verfügt über eine einmalige Kombination von Eigenschaften. Dazu gehört neben den bereits oben genannten Kriterien auch:

- ein 20 m langes Kabel, damit ist eine einfache Bedienung auch bei entfernter Sonde möglich
- optional eine Steuerung über einen PC
- kombinierbar mit verschiedenen Arten von Sonden (Szintillator und Geiger-Müller-Zählrohr)

Ein Messgerät 6150AD wurde für die Untersuchungen vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt.

Eine ausführliche Untersuchung aller aufgeführten Geräte überschreitet erheblich den der Leistungsbeschreibung zugrunde gelegten Arbeitsumfang ebenso wie die am Elektronen-Linearbeschleuniger ELBE nur begrenzt zur Verfügung stehende Strahlzeit. Jedoch nehmen einige Geräte eine Sonderstellung ein, was eine Reduzierung der Auswahl erlaubte.

Das EPD MK2 (d) ist das einzige Personendosimeter in dieser Auswahl. Über Personendosimeter in gepulsten Feldern im Allgemeinen und das EPD MK2 im Besonderen existieren bereits mehrere Untersuchungen (vgl. U 3, U 4, U 10), daher schien eine Konzentration auf die anderen Dosisleistungsmessgeräte sinnvoll und das EPD MK2 wurde letztendlich nicht untersucht.

Das Inspector 1000 mit IPRON-1 (b) stellte sich aufgrund der im Vorexperiment festgestellten (siehe Kapitel 3.2) automatischen Messsondenumschaltung als am Elektronen-Linearbeschleuniger ELBE schwer zu untersuchend heraus und wurde zugunsten der Szintillatorsonde des 6150AD (f) nicht weiter untersucht.

Von den beiden Sonden des 6150AD (f) wurde das Geiger-Müller-Zählrohr (AD-18) nur im ersten Experiment untersucht (Kapitel 6). Die Erwartung, dass aufgrund der dem Messprinzip inhärenten, langen Totzeit ein äußerst unzureichendes Ansprechvermögen in gepulsten Strahlungsfeldern vorliegt, wurde in diesem Experiment bestätigt. Daher konzentrierte sich die ausführliche Untersuchung auf das mit der Sonde AD-18 verwandte und ebenfalls als Zählrohr ausgelegte LB 1236-H10 Proportionalzählrohr des Messgerätes LB 123 D-H10 (a).

Ausführlich untersucht wurden somit die Dosisleistungsmessgeräte LB 123 D-H10 mit dem Proportionalzählrohr LB 1236-H10 (a), das RamION (e) und das 6150AD mit Szintillatorsonde AD-b (f).

Die Markuskammer mit Unidos-Elektrometer (c) diente in den Experimenten an ELBE als Strahlmonitor für den primären Elektronenstrahl, beschrieben in den Kapiteln 7 und 8. In dieser Rolle wurde ihr Ansprechverhalten im gepulsten Strahlenfeld bestimmt. Dies ist eine Ergänzung vorheriger experimenteller Untersuchungen (vgl. U 7, U 8) von für den Einsatz in der medizinischen Dosimetrie ausgelegten und mit der Applikation intensiver Pulsdosen verbundenen Ionisationskammern. Gegenstand der vorliegenden Forschungsarbeit ist aber der dosimetrische Einsatz im Sinne des Strahlenschutzes, weshalb auf eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse für die Markuskammer im Bericht verzichtet wird. Für das für Ionisationskammern abgeleitete Korrektungsverfahren für intensive Pulse beliebiger Dauer wird auf Kapitel 9 und die Veröffentlichung in der Zeitschrift für Medizinische Physik (vgl. U 12) verwiesen.

5 Bewerten, Implementieren und Kalibrieren der Referenzdosimetrie (Arbeitsschritt 3)

5.1 Auswahl der Referenzdosimetrie

Um die Messungen der Ortsdosisleistungsmessgeräte unabhängig zu überprüfen, wird eine Referenzdosimetrie benötigt. Diese sollte Messungen unabhängig von der Zeitstruktur der Strahlung erlauben. Die Autoren wählten dazu Thermolumineszenzdosimeter (TLD). Diese weisen eine hohe Empfindlichkeit auf, was im Gegensatz zu radiochromischen Filmen auch die erforderlichen Messungen geringer Dosen erlaubt. Außerdem müssen sie im Gegensatz zu Dosimetern basierend auf optisch stimulierter Lumineszenz (OSL) nicht vor Licht geschützt werden. TLD sind dotierte Kristalle, im Falle des hier verwendeten TLD-100h-Materials ist dies Lithium-Fluorid (LiF) dotiert mit Magnesium, Kupfer und Phosphor. Durch die Dotierung werden im Kristall Fehlstellen erzeugt, einige dieser Fehlstellen fangen die in Folge einer Bestrahlung freigesetzten Ladungen und können diese für eine längere Zeit speichern. Andere Fehlstellen dienen als Fluoreszenzzentren, in denen freigesetzte Ladungen unter Lichtemission rekombinieren. Durch Erwärmen des TLD wird die gefangene Ladung zurück in das Leitungsband gehoben, um dann an einem Fluoreszenzzentrum zu rekombinieren. Das hierbei erzeugte Licht kann gemessen werden und dient als Grundlage der Dosimetrie. LiF ist ein pulverförmiges Material, zum Zwecke der Dosimetrie wird es in PTFE (Polytetrafluoroethylen bzw. Teflon) eingebettet, sodass kleine Chips geformt werden können. Weil jeder Chip eine unterschiedliche Menge LiF enthalten kann, muss die Lichtausbeute-zu-Dosis-Relation für jeden Chip individuell bestimmt werden. Außerdem muss eine für das Material geeignete Heizkurve gewählt werden, um die TLD auszulesen.

5.2 Heizkurve der Thermolumineszenzdosimeter

Während des Auslesevorganges wird der TLD erwärmt und das emittierte Licht gemessen. Das zum Auslesen verwendete Temperatur-Zeit-Profil wird Heizkurve genannt, die dabei entstehende Relation aus Licht-zu-Zeit bzw. Licht-zu-Temperatur wird Glühkurve genannt. Die maximale Temperatur, auf die der TLD aufgeheizt werden sollte, liegt laut Herstellerangaben bei 240 °C. Diese Temperatur wird durch Aufheizen mit einer Temperaturrampe von 10 °C/s angefahren. Entscheidend ist darüber hinaus auch noch, ob vor dem eigentlichen Auslesen ein so genanntes Vorheizen stattfindet. Dazu wird der TLD zunächst für 10 s auf 135 °C erwärmt und anschließend durch weiteres Aufheizen bis 240 °C ausgelesen. In Abbildung 1 und Abbildung 2 sind zwei Glühkurven, einmal mit Vorheizen und einmal ohne, dargestellt. Durch das Vorheizen wird der erste, kleinere Peak (Niedrigtemperaturpeak) unterdrückt. Diese niederenergetischen Peaks sind besonders anfällig für Veränderungen wie z. B. ein langsames Verschwinden mit der Zeit zwischen Bestrahlung und Auslesen. Weil relativ wenig Energie benötigt wird, um Ladungen von den involvierten Fehlstellen in das Leitungsband zu heben, kann dies mit genügend Zeit auch schon bei Raumtemperatur geschehen. Bei Bestrahlungen am ELBE-Beschleuniger ist es jedoch nicht zu garantieren, dass immer die konstant gleiche Zeit zwischen Bestrahlung und Auslesen eingehalten werden kann. Daher wurde für die Auslese der TLD eine Heizkurve mit Vorheizen bei 135 °C für 10 s gewählt.

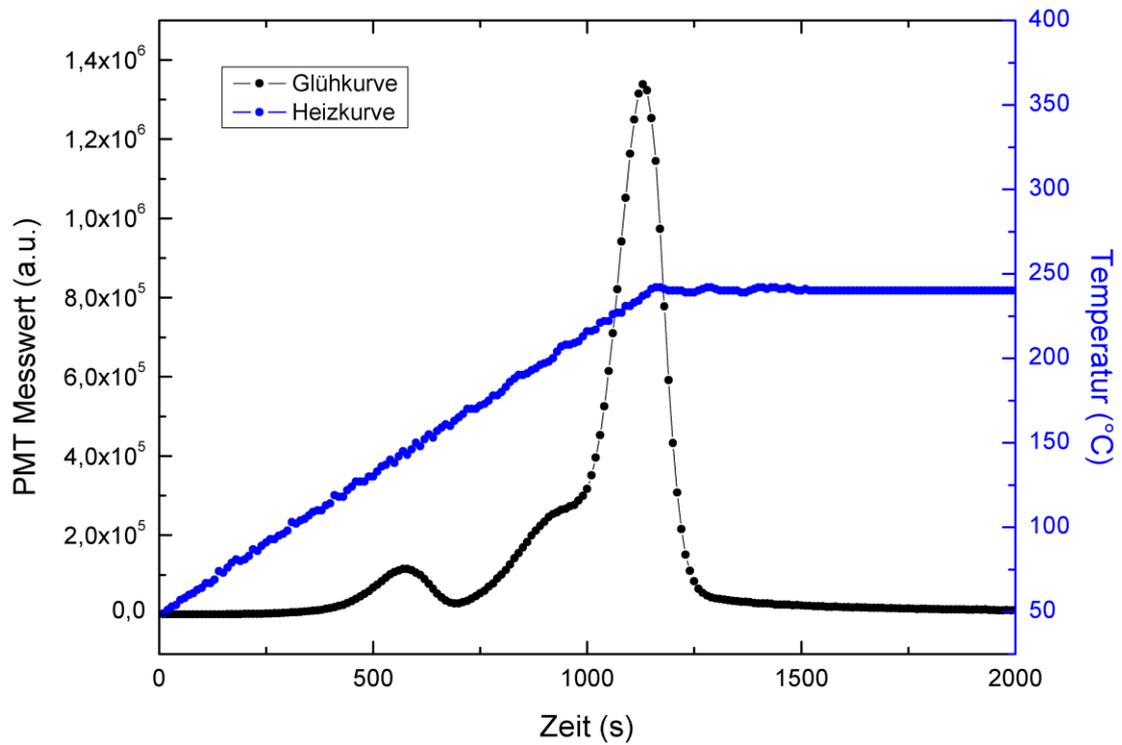


Abbildung 1: Heiz- und Glühkurve eines TLD ohne Vorheizen

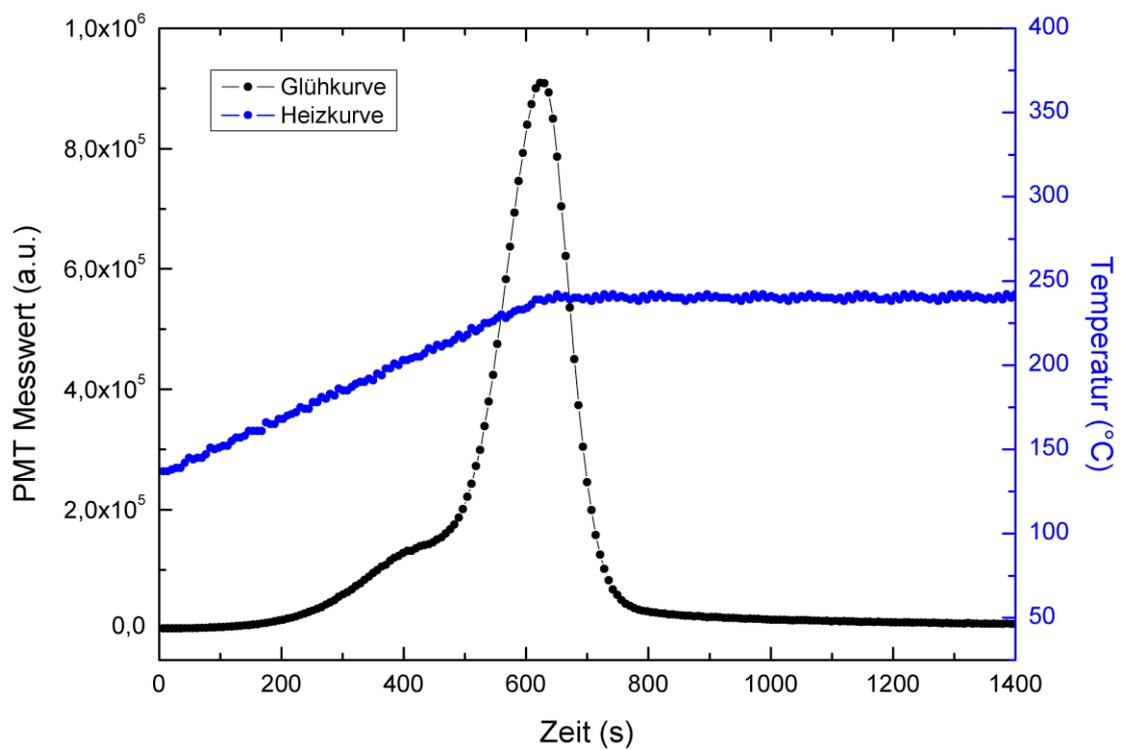


Abbildung 2: Heiz- und Glühkurve eines TLD mit Vorheizen

5.3 Kalibrierung der Thermolumineszenzdosimeter

Die Referenzbestrahlung der 30 zu verwendenden TLD-Chips wurde mit einer Röntgenröhre durchgeführt. Die TLD wurden 5-mal für je 1 Minute mit 200 kV Röntgenstrahlung bestrahlt und jeweils im Anschluss an die Bestrahlung ausgelesen und gelöscht. In den fünf Bestrahlungsdurchläufen wurde der Anodenstrom so eingestellt, dass sich Dosen von ca. 0,9 mGy, 3 mGy, 5 mGy, 50 mGy und 500 mGy ergaben. Die Dosis wurde vor jeder Bestrahlung genau mit einer Farmer-Ionisationskammer in je fünf Wiederholungsmessungen bestimmt. Die Unsicherheit der Referenzdosis wurde aus der Standardabweichung der Kammermessungen geschätzt. Um die Unsicherheit des Auslesens der TLD abzuschätzen, wurde die Schwankung der Referenzmessung des Photomultipliertubes betrachtet, welcher das vom TLD emittierte Licht misst. Die Standardabweichung dieser Messung wurde als relativer Fehler der verschiedenen Zeitkanäle der TLD-Messung zugrunde gelegt.

In Abbildung 3 ist beispielhaft die Kalibrierkurve für einen TLD-Chip gezeigt.

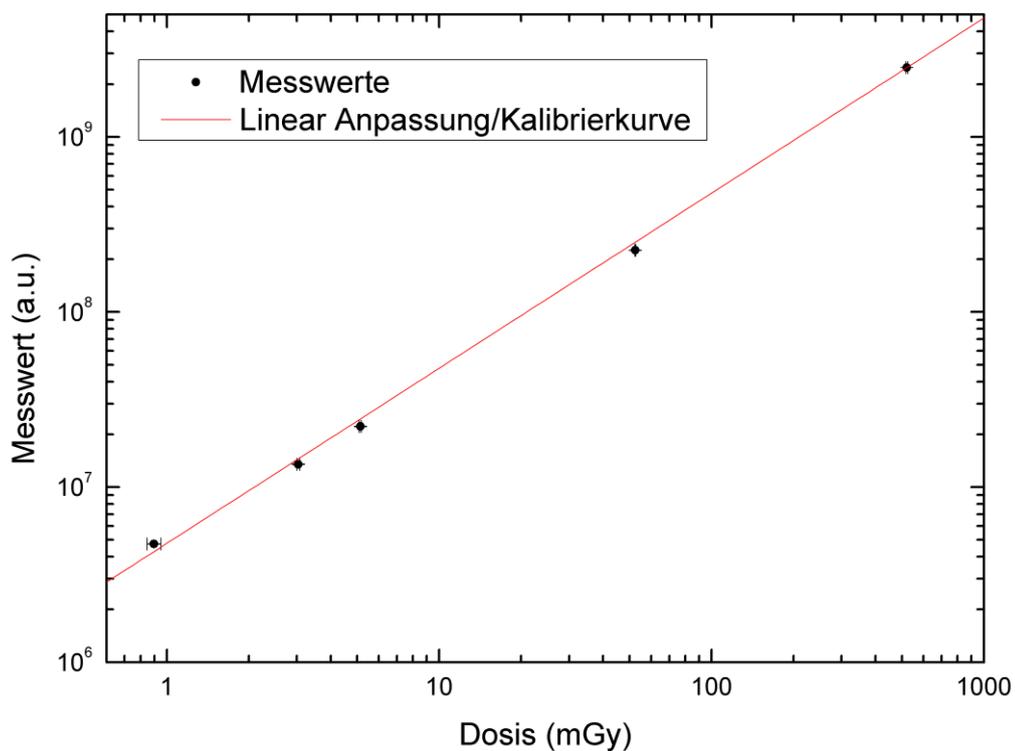


Abbildung 3: Kalibriermessung für einen TLD-Chip

5.4 TLD-Referenzmessungen

Im dritten Experiment an ELBE (Kapitel 8) wurden die kalibrierten TLD zur Bestimmung absoluter Dosen in den Messungen eingesetzt. Weil allerdings für jeden Messpunkt mindestens ein TLD-Chip bestrahlt und anschließend ausgelesen werden müsste, ist eine direkte Referenzdosimetrie mittels TLD-Chips für sämtliche Messreihen und für alle vorgesehenen Experimente aufgrund des sehr hohen Aufwandes und der immer nur retrospektiv vorliegenden Dosisinformation ungeeignet. Daher wurden die TLD-Chips genutzt, um eine Querkalibrierung einer Ionisationskammermessung zu errechnen. Im verwendeten Aufbau am Beschleuniger ELBE durchquert ein Elektronenstrahl eine Markus-Ionisationskammer, ehe er auf einen Faradaycup trifft, welcher als Bremsstrahlungsquelle dient. Die Ionisationskammermessung der Intensität des primären Elektronen-

strahls ist direkt proportional zur Intensität der erzeugten Bremsstrahlung und kann daher als Referenz dienen. Als weitere Referenz erfolgte die Messung der Intensität des primären Elektronenstrahles mit dem Faradaycup.

Das dritte Experiment (vgl. Kapitel 8 bzw. Arbeitsschritt 8) wurde aufgeteilt in zwei Strahlzeiten an ELBE durchgeführt. Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen die Kalibrierung der Ionisationskammernmessungen durch die TLD-Chips für beide Strahlzeiten. Es ergeben sich innerhalb der Fehlergrenzen übereinstimmende Umrechnungswerte von $(4,86 \pm 0,07) \cdot 10^{-3} \text{ mGy/nC}$ und $(4,78 \pm 0,17) \cdot 10^{-3} \text{ mGy/nC}$ respektive für die erste und zweite Strahlzeit. Diese Werte wurden genutzt, um die im Kapitel 8 für das dritte Experiment angegebenen Dosis- bzw. Dosisleistungswerte aus den jeweiligen Ionisationskammernmessungen zu errechnen.

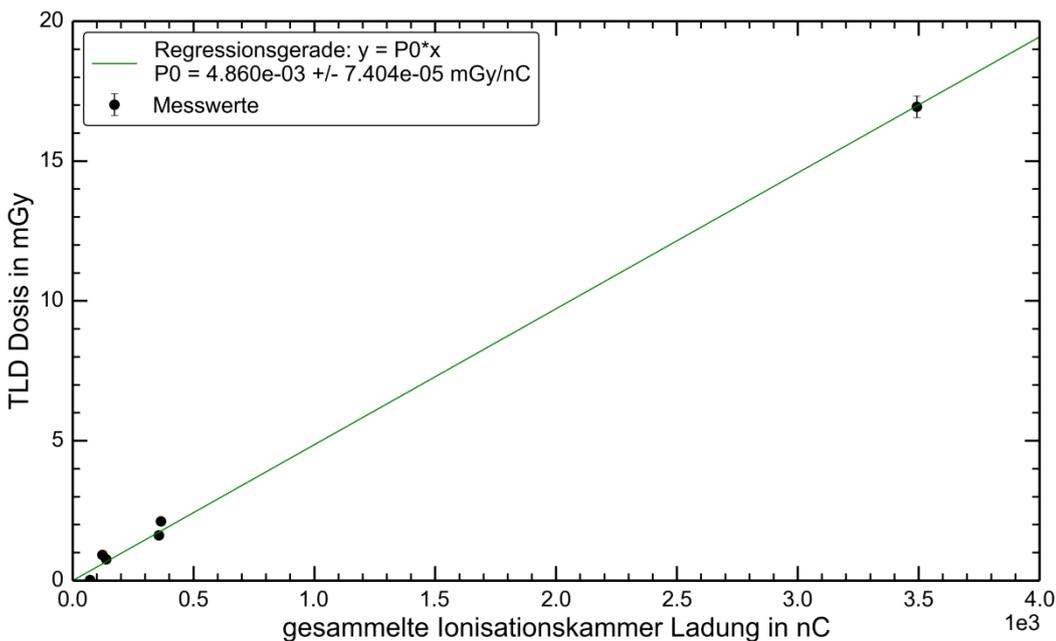


Abbildung 4: TLD-Messungen der ersten Strahlzeit mit Anpassungsgerade

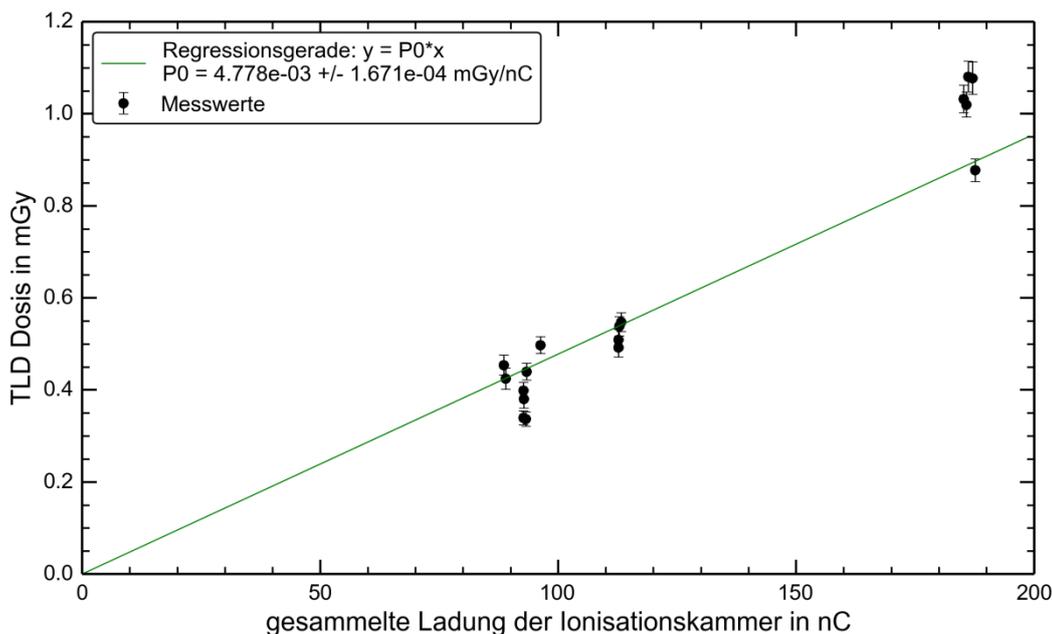


Abbildung 5: TLD-Messungen der zweiten Strahlzeit mit Anpassungsgerade

5.5 Homogenitätskontrolle mittels OSL

Im zweiten Experiment (Kapitel 7) hatte sich zusätzlich zur Referenzdosismessung die Frage ergeben, ob die zur Untersuchung der Messgeräte genutzte Bremsstrahlung ein ausreichend homogenes Feld am Bestrahlungsort erzeugt. Zur Überprüfung der Homogenität wurde ein Image-Plate-Detektor der Firma Fuji am Bestrahlungsort der Messgeräte in einem Aufbau wie im zweiten Experiment bestrahlt. Die Image-Plate ist ein auf optisch stimulierter Lumineszenz (OSL) basierender Detektor für ionisierende Strahlung, der positionsabhängig ausgelesen werden kann. Diese OSL-basierten Detektoren erlauben zwar positionsabhängige Rückschlüsse auf die Dosis, sind jedoch in ihrer Handhabung umständlich und aufgrund der starken Strahlenqualitätsabhängigkeit der Messantwort auch sehr aufwendig zu kalibrieren. Daher wurden die OSL nicht für die gesamte Referenzdosimetrie, sondern lediglich für eine einmalige Verifikation der Homogenität des Strahlungsfeldes verwendet.

Die Auswertung der Image-Plate, zu sehen in Abbildung 6, zeigt ein ausreichendes, weitgehend homogenes Strahlungsfeld über den gesamten erfassten Bereich. Die intensiven Randbereiche bei $x = 160$ mm bzw. $y = 40$ mm sind sehr wahrscheinlich bedingt durch die Haltungsverrichtung aus Aluminiumprofilen, die dort vor der Image-Plate liegen. Die Messantwort der Image-Plate ist stark von der einfallenden Quantenenergie abhängig und sehr empfindlich für niederenergetische Photonen und Elektronen. Im Aluminium wird ein Teil der einfallenden hochenergetischen Röntgenphotonen in niederenergetische Photonen und Elektronen umgewandelt und erzeugt so eine scheinbar höhere Strahlintensität.

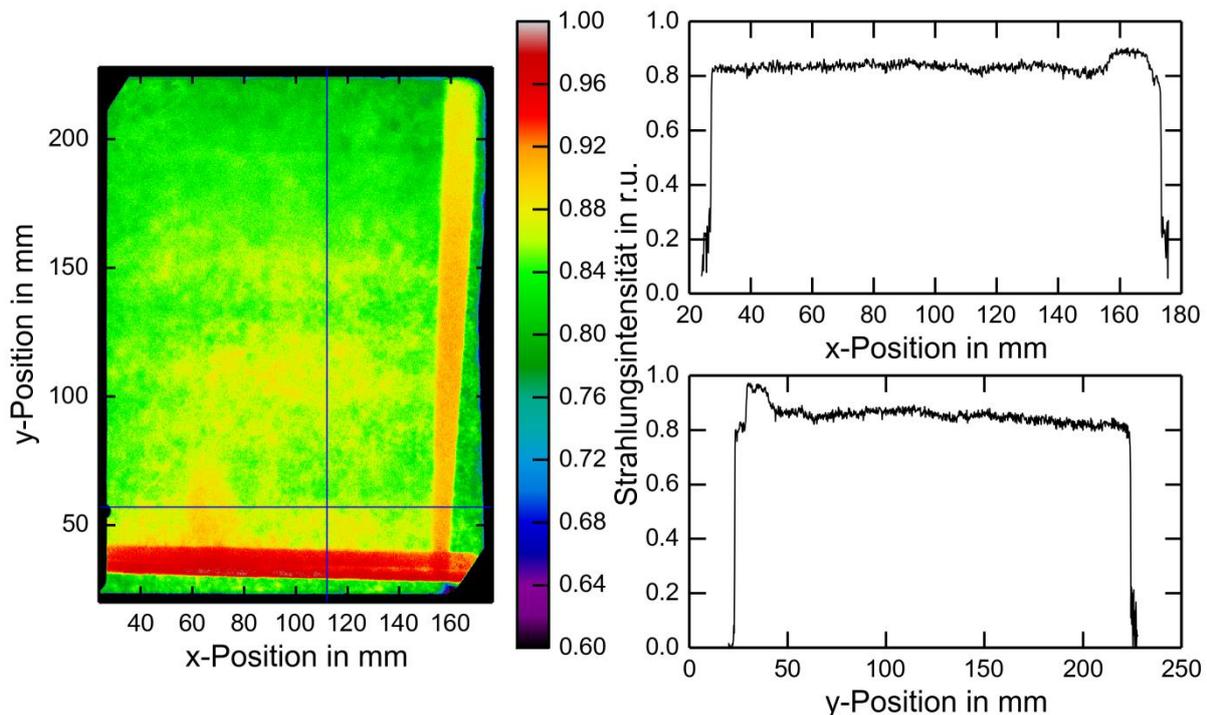


Abbildung 6: Homogenität des Strahlungsfeldes: Strahlintensität über die gesamte Image-Plate als Falschfarbenbild (links). Profilschnitte (rechts) entlang der x-Achse (oben) und der y-Achse (unten)

6 Experimentvorbereitung und erstes Experiment an ELBE (Arbeitsschritte 4, 5, 6)

Aufgrund der unbefriedigenden Ergebnisse der Vorexperimente am klinischen Beschleuniger (siehe Kapitel 3) konzentrierten sich die weiteren Versuche auf den Elektronen-Linearbeschleuniger ELBE am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf. Die Vorzüge dieses Beschleunigers sind im folgenden Abschnitt kurz erläutert.

6.1 Die Strahlenquelle ELBE

ELBE erzeugt einen gepulsten Elektronenstrahl mit einer Grundfrequenz von 13 MHz und einer Mikropulsdauer von ca. 5 ps. Die einzelnen Mikropulse können in ihrer Intensität bzw. Bunch-Ladung (Anzahl der Elektronen in einem Mikropuls) durch die Gate-Spannung an der Elektronenquelle variiert werden. Die Grundfrequenz von 13 MHz entspricht einem Pulsabstand von 77 ns. Aufgrund des kurzen Pulsabstandes kann dieser Strahl zunächst als quasi-kontinuierlich betrachtet werden.

Diese Zeitstruktur kann auf zwei Weisen variiert werden. Zum einen ist es möglich, die Grundfrequenz mit $2N$ ($N = 1-7$) zu untersetzen, das heißt Frequenzen von 13/2, 13/4, 13/8, 13/16, 13/32, 13/64 und 13/128 MHz zu erzeugen. Zum anderen kann der Strahl durch die Überlagerung mit einer weiteren Pulsung moduliert werden, wodurch längere Pulszüge bei sehr variabler Wiederholungsrate und Pulsdauer möglich sind.

Im ersten Experiment wurde lediglich die erste Möglichkeit der Untersetzung genutzt, wohingegen im zweiten und dritten Experiment die erweiterte Pulsung des Strahls genutzt wurde.

Durch die Modulation des Elektronenstrahls mit einer überlagerten Pulsung entstehen Makropulse, deren interne Mikropuls-Struktur aufgrund der dichten Mikropulsfolge für die Messgeräte nicht auflösbar ist. Der Makropuls kann annähernd als Rechteck-Strahlpuls mit einer konstanten Pulsdosisleistung angesehen werden. Zur Makropuls Erzeugung stehen an ELBE zwei unterschiedliche Pulser zur Verfügung. Der so genannte „Makro-Pulser“ lenkt den Strahl mittels eines elektrischen Feldes auf eine Blende, blockiert ihn so temporär und ermöglicht daher die Strahlpulsung. Aufgrund seines Einschwingverhaltens kann der „Makro-Pulser“ allerdings nur eine minimale Pulsdauer von 0,1 ms und minimale Pulsabstände von 40 ms erreichen. Darüber hinaus kann mit dem so genannten „Single-Pulser“ die Gate-Spannung der Elektronenquelle gepulst werden. Auch dieser Pulser erzeugt Makropulse, erlaubt allerdings die explizite Auswahl einer Anzahl an Mikropulsen im Makropuls und ist so in der Lage, die Makropulsdauer bis hin zur Dauer eines einzelnen Mikropulses zu reduzieren.

ELBE bietet somit vielfältige Möglichkeiten der kontrollierten Variation einzelner Strahlparameter und damit die Voraussetzungen für eine systematische Untersuchung der verschiedenen Dosimeter.

6.2 Experimenteller Aufbau und Durchführung

In diesem ersten Experiment wurde der Elektronenstrahl auf ein dünnes Bremsstrahlungstarget aus Niob gerichtet und die entstehende Röntgenstrahlung gelangte durch einen Bleikollimator in den Experimentierbunker. Direkt hinter dem Kollimator wurde eine den gesamten Strahl erfassende Ionisationskammer (PTW Bragg Peak Kammer, Typ: 34070) angebracht. Diese diente zur Überwachung der tatsächlich erbrachten Dosisleistung, weil die Ionisationskammer im hier untersuchten Dosisleistungsbereich keine Sättigung zeigt. Die Ionisationskammer wurde an ein Unidos Dosismessgerät (ebenfalls von PTW) angeschlossen, welches außerhalb des Bunkers aufgestellt war.

Untersucht wurde das Automess 6150AD Dosisleistungsmessgerät mit der AD-18 Sonde, einem externen Geiger-Müller-Zählrohr. Das Zählrohr wurde dazu gemäß den Herstellerangaben senkrecht zum und zentral im Strahl platziert und die Anzeige des 6150AD über eine Kamera ausgelesen.

Es wurden zwei Messreihen durchgeführt. In der ersten Messreihe wurde die Wiederholungsrate der Pulse verändert, indem die Frequenz im Bereich von 13/128 MHz bis 13 MHz in sieben Schritten jeweils verdoppelt wurde. Die Gate-Spannung war hierbei konstant bei 13 V. In der zweiten Messreihe wurde die Gate-Spannung bei einer konstanten Wiederholungsrate von 13 MHz im Bereich von 11 V bis 13 V in mehreren Schritten variiert.

6.3 Ergebnisse

In Abbildung 7 sind die Ergebnisse der beiden durchgeführten Messreihen zusammen dargestellt. Die Messung der Ionisationskammer (IK) dient als gemeinsame Abszisse, weil sie die tatsächliche Dosisleistung wiedergeben sollte (TLD-Referenzen waren zum Zeitpunkt des Experiments noch nicht kalibriert). Diese Kontrolle ist nötig, weil Gate-Spannung und Pulsdosis in einem nicht linearen Verhältnis zueinander stehen und auch die Änderung der Wiederholungsrate an ELBE eine Änderung der Pulsdosis zur Folge haben kann. Die an der oberen Abszisse aufgetragene Dosisleistung wurde aus den Strommesswerten der Ionisationskammer ermittelt, indem das Verhältnis von Dosisleistungsanzeige der AD-18 Messungen zu Ionisationskammermesswerten von niedrigen Dosisleistungen aus extrapoliert wurde.

Die in Abbildung 7 ebenfalls dargestellte Anpassungskurve stellt das zu erwartende Verhalten eines Detektors mit einer Totzeit bei einer hohen Zählrate dar. Wird der Detektor durch eine dichte Pulsfolge nicht gelähmt, so lässt sich unter Kenntnis der Totzeit τ aus der gemessenen Zählrate m die wahre Interaktionsrate n errechnen (vgl. U 13):

$$n = \frac{m}{1 - m\tau}.$$

Umgestellt nach der gemessenen Zählrate und unter der Annahme, dass die wahre Interaktionsrate proportional zur Messung der Ionisationskammer ist ($n = \alpha D_{IK}$), ergibt sich die Anpassungsfunktion

$$D_{AD-18} = \frac{A}{\tau + \frac{1}{\alpha D_{IK}}},$$

wobei A die Proportionalitätskonstante von gemessener Zählrate der AD-18-Sonde zu angezeigter Dosisleistung ist.

Aus dem linearen Verlauf im Beginn der Messreihe ist gut ersichtlich, dass im vom Hersteller angegebenen Messbereich (bis 2,8 $\mu\text{Sv/s}$) für die hier eingesetzte Kombination aus hoher Wiederholungsrate und geringer Pulsdosis kein Sättigungsverhalten zu beobachten ist. Erst bei höheren mittleren Dosisleistungen zeigt sich ein Sättigungsverhalten, jedoch nicht speziell in Abhängigkeit der Pulsung, sondern vor allem aufgrund der mittleren Dosisleistung.

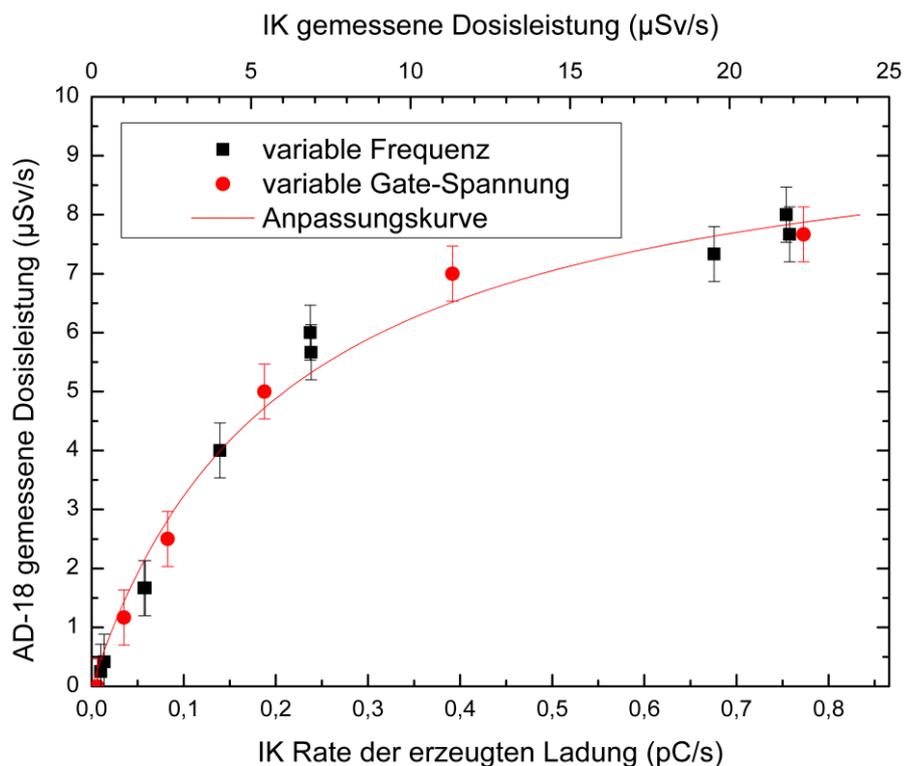


Abbildung 7: Dosisleistungsanzeige der AD-18-Sonde, aufgetragen über der Dosisleistung aus der Ionisationskammermessung

6.4 Diskussion und Schlussfolgerung

Zur Beobachtung eines speziellen Verhaltens aufgrund der Pulseigenschaften ist eine höhere Pulsdosis anzustreben. Die mittlere Dosisleistung des Strahls muss dabei allerdings in einem Bereich bleiben, in dem ein sinnvolles Messen mit dem jeweils untersuchten Gerät möglich ist.

Um höhere Pulsdosen zu erreichen, wurden die weiteren Experimente an ELBE am direkten Elektronenstrahl und hierzu in einem anderen Experimentierbunker durchgeführt. Durch Verwendung der Makropulsung soll gleichzeitig eine geringere Wiederholungsrate erreicht werden.

7 Zweites Experiment an ELBE (Arbeitsschritt 7)

7.1 Experimenteller Aufbau und Durchführung

In diesem zweiten Experiment wurde gegenüber dem ersten Experiment ein anderer Aufbau gewählt, um den für die Dosimeter nötigen Parameterbereich besser abzudecken. Insbesondere um auch bei geringer Dosisleistung, wo die geringe Empfindlichkeit der klinischen Ionisationskammer problematisch wird, eine Referenzmessung durch eine solche Ionisationskammer zu erlauben, wurde der Messaufbau und Messplatz gegenüber dem ersten Experiment verändert. Die Autoren wählten einen Experimentbunker, in dem an Stelle der im ersten Experiment genutzten, aus dem Elektronenstrahl außerhalb des Bestrahlungsraumes erzeugten Bremsstrahlung nun der Elektronenstrahl direkt genutzt werden kann. Der Elektronenstrahl wurde durch einen Bleikollimator auf eine vorgegebene Strahlfleckgröße begrenzt, auf eine Ionisationskammer gerichtet (Advanced Markusammer, Typ: 34045 von PTW) und anschließend in einem Faradaycup aufgefangen. Der Faradaycup erlaubt auch bei stark gepulster Strahlung eine sättigungsfreie, relative Messung der eingebrachten Dosis. Gleichzeitig diente der Faradaycup als Bremsstrahlungstarget. Die im Faradaycup erzeugte Bremsstrahlung wurde mit den zu untersuchenden Dosisleistungsmessgeräten gemessen. In diesem Aufbau sollte die Messung der Elektronendosis mit der Ionisationskammer vor dem Faradaycup als Referenz für die Dosisleistung der Bremsstrahlung nutzbar sein, weil bei ansonsten unveränderten Parametern die Intensität der erzeugten Bremsstrahlung direkt von der Intensität des einfallenden Elektronenstrahls abhängt. Die relativ geringe Effizienz des aus Aluminium bestehenden Faradaycups als Bremsstrahlungstarget sollte es darüber hinaus erlauben, den intensiveren Elektronenstrahl mit der weniger empfindlichen Ionisationskammer und gleichzeitig die Bremsstrahlung mit den Dosisleistungsmessgeräten in dem erforderlichen, deutlich niedrigeren Dosisleistungsbereich zu messen. Bei sehr stark gepulster Strahlung kann darüber hinaus auch der Faradaycup zur Bestimmung der Pulsdosis genutzt werden.

In diesem Experiment wurden so die Messgeräte RamION (Rotem Industries) und LB 123 D-H10 (Berthold) untersucht. Das RamION ist eine Ionisationskammer und die LB 1236-H10 Sonde des LB 123 D-H10 ist ein Proportionalzählrohr.

Der Einsatz des „Single-Pulsers“ war mit einigen nicht vorhersehbaren Problemen behaftet. So zeigte sich im Experiment, dass die Pulsung der Elektronenquelle durch den „Single-Pulser“ nicht ideal ist, was bedeutet, dass auch bei „Aus“ gepulstem Strahl ein kontinuierlicher Dunkelstrom durch den Beschleuniger bis zum Bestrahlungsplatz fließt. So misst beispielsweise das LB 123 D-H10 bei durch Single-Pulsung ausgeschaltetem Strahl bereits eine Dosisleistung von 5 mSv/h (obere Grenze des Dosisleistungsmessbereichs laut Hersteller: 10 mSv/h). Daher musste der „Single-Pulser“ immer mit dem „Makro-Pulser“ kombiniert werden, um den Untergrund in einem akzeptablen niedrigen Rahmen zu halten. Der „Makro-Pulser“ ist durch seine grundlegend andere Funktionsweise in der Lage, den Strahl annähernd komplett auszuschalten. In der Kombination der beiden „Pulser“ schaltet der „Makro-Pulser“ ein Fenster auf, indem dann ein Pulszug durch den „Single-Pulser“ appliziert wird. Allerdings werden die verfügbaren Zeitstrukturen durch diesen Zwang stark eingeschränkt auf einen minimalen Pulsabstand von 40 ms bzw. eine maximale Pulswiederholfrequenz von 25 Hz. Außerdem ergibt sich stets eine gewisse ungepulste Untergrunddosis, weil das Makropulsfenster immer länger als der applizierte Pulszug des Single-Pulser sein muss.

Daher wurde das RamION bei einer Makropulsdauer von 100 μs mit 500 Mikropulsen untersucht, was einem Pulszug mit einer Länge von 38,4 μs (499 x 77 ns) entspricht. In der ersten Messreihe wurde die Pulswiederholffrequenz variiert und gleichzeitig die Gate-Spannung so nachgeregelt, dass bei Erhöhung der Pulsfrequenz durch eine reduzierte Pulsdosis die mittlere Dosisleistung annähernd konstant blieb. In einer zweiten Messreihe wurde bei einer konstanten Pulswiederholffrequenz von 1 Hz die Gate-Spannung und somit die mittlere Dosisleistung variiert.

Das LB 123 D-H10 wurde aufgrund der den Autoren unbekanntem Totzeiteigenschaften mit etwas geänderter Strahleinstellung untersucht. Bei einer Makropulsdauer von 2,0 ms und einer konstanten Pulswiederholffrequenz von 1 Hz wurde die Anzahl der Mikropulse und damit die Länge des Pulszuges variiert, gleichzeitig wurde die Gate-Spannung so nachreguliert, dass die in einem Pulszug applizierte Dosis annähernd konstant blieb. Darüber hinaus wurde, wie in der ersten Messreihe mit dem RamION, eine Messung mit variabler Pulsfrequenz bei konstanter mittlerer Dosisleistung durchgeführt. Hierbei wurde auch eine Makropulsdauer von 2,0 ms eingestellt und eine Anzahl von 25.000 Mikropulsen im Pulszug verwendet.

Um eine Einschätzung der tatsächlichen Dosisleistung am Ort der Dosimeter zu erhalten und eine Relation zwischen der mit der Markus-Ionisationskammer gemessenen Elektronendosis und der Dosis der Bremsstrahlung herzustellen, wurde außerdem für beide Dosimeter (RamION und LB 123 D-H10) eine Messung bei quasi-kontinuierlicher Strahlung verschiedener Intensität durchgeführt.

7.2 Ergebnisse

In Abbildung 8 und Abbildung 9 sind die Relationen der Dosisleistung der Bremsstrahlung am Messort der Ortsdosisleistungsmessgeräte zur Elektronendosisleistung dargestellt. Letztere wurde mit der im Strahl befindlichen Markus-Ionisationskammer (IK) gemessenen. Aus den Anpassungskurven ergibt sich für eine Umrechnung gemäß *Bremsstrahlungsdosis* [Sv] = $a \cdot \text{Elektronendosis}$ [Gy] für das RamION ein Faktor $a = (1217 \pm 40) \text{ mSv/Gy}$ und für das LB 123 D-H10 ein Faktor $a = (2574 \pm 45) \text{ mSv/Gy}$. Zu bemerken ist hierbei, dass die vom LB 123 D-H10 gemessene Dosisleistung linear von der Pulsdauer abhängt und dies bis zur minimalen untersuchten Pulsdauer von 100 μs .

Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen die Messergebnisse für die Pulsdosis- und Pulswiederholffrequenzabhängigkeit des RamION. Dabei wird, wie in Abbildung 10 ersichtlich, statt der durch die mit steigender Pulswiederholffrequenz gleichzeitig fallende Pulsdosis eingestellten, konstanten mittleren Dosisleistung eine annähernd linear steigende mittlere Dosisleistung durch das RamION angezeigt. In Abbildung 11 zeigt sich, dass bei steigender Pulsdosisleistung eine klare Sättigung erfolgt. Trotz steigender Pulsdosis und somit auch steigender mittlerer Dosisleistung ist ab einer Pulsdosis von ca. 100 μSv kaum noch ein Anstieg der vom RamION gemessenen mittleren Dosisleistung zu verzeichnen.

Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen die Messergebnisse des LB 123 D-H10. In Abbildung 12 ist ein sehr ähnliches Verhalten wie beim RamION zu beobachten. Trotz gleichbleibender mittlerer Dosisleistung wird bei steigender Pulswiederholffrequenz eine ansteigende Dosisleistung gemessen. Die Dosisleistung am Ort des Dosimeters kann dabei unter Verwendung der in Abbildung 9 dargestellten Relation auf ca. 230 mSv/h geschätzt werden. Außerdem ist in Abbildung 13 zu erkennen, dass die gemessene Dosisleistung auch annähernd linear von der Pulsdauer abhängt, obwohl die eingebrachte Dosisleistung konstant bleibt.

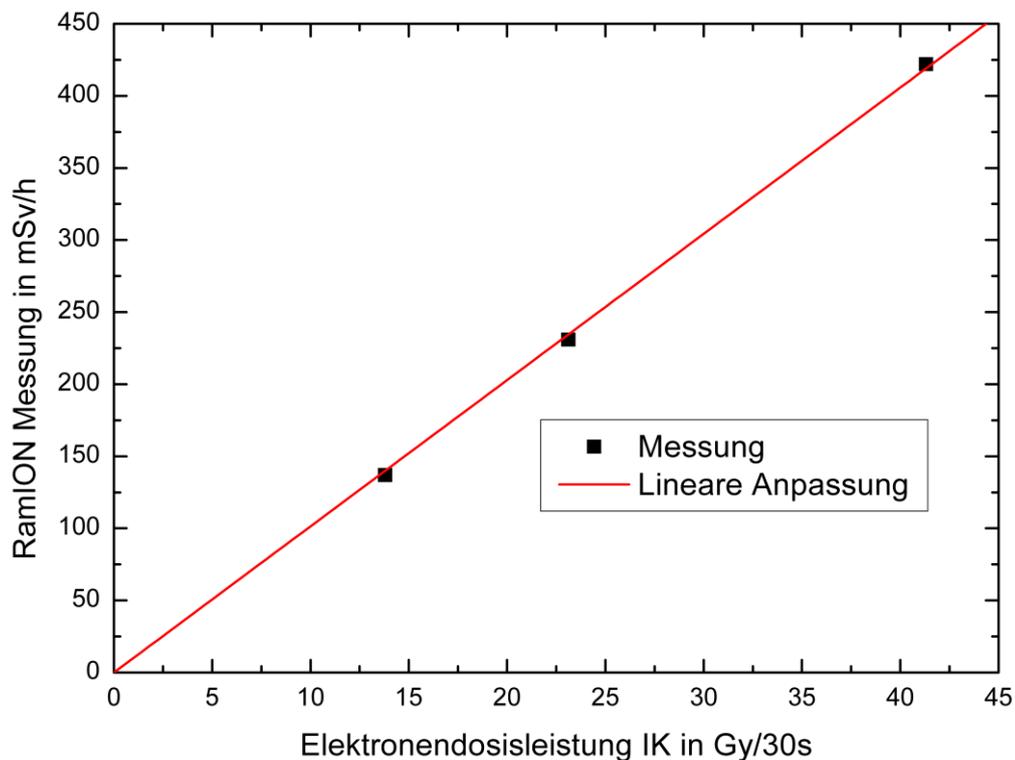


Abbildung 8: Relation der Bremsstrahlungsdosisleistung am Ort des Ortsdosisleistungsmessgerätes zur Dosisleistung durch den primären Elektronenstrahl in der Ionisationskammer für das RamION

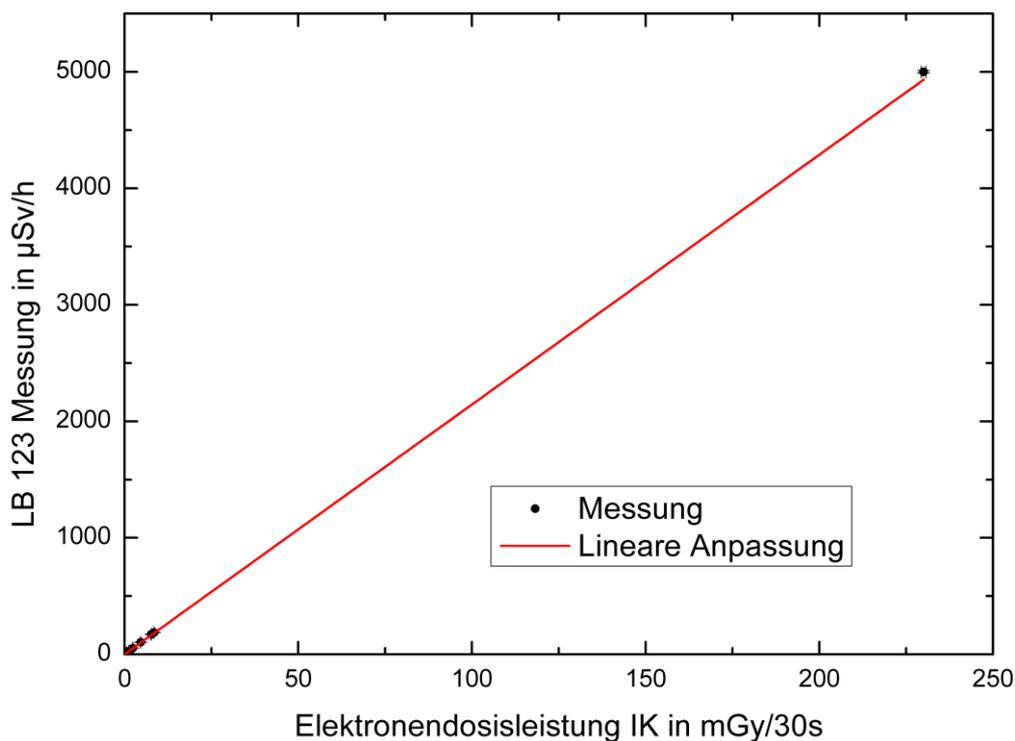


Abbildung 9: Relation der Bremsstrahlungsdosisleistung am Ort des Ortsdosisleistungsmessgerätes zur Dosisleistung durch den primären Elektronenstrahl in der Ionisationskammer für das LB 123 D-H10

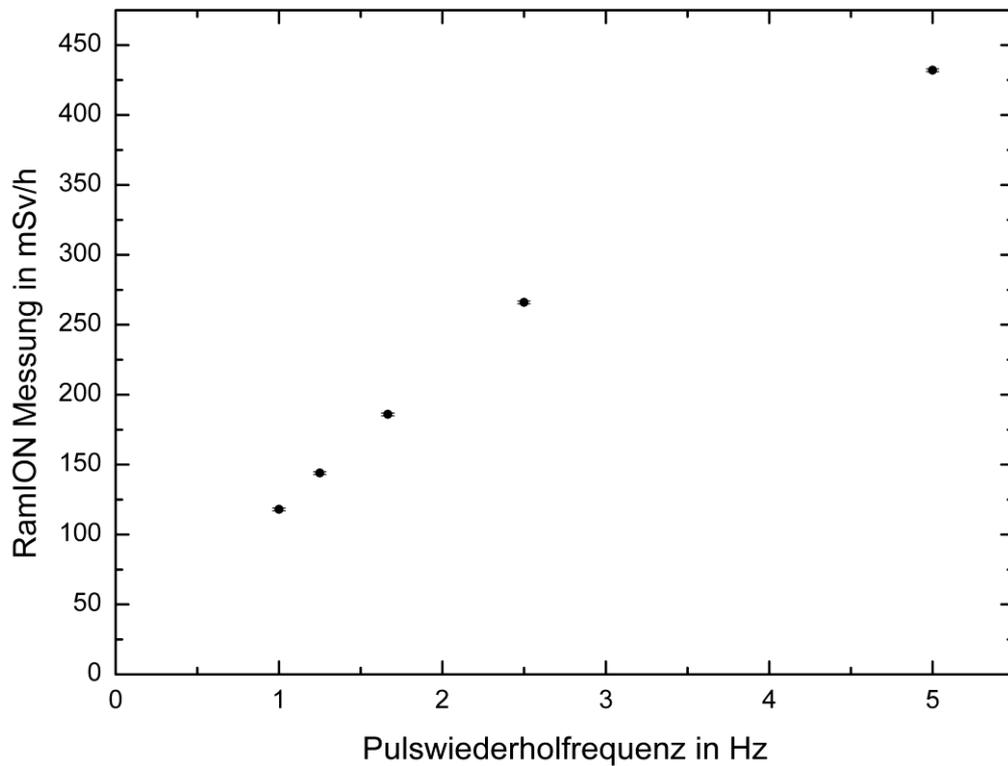


Abbildung 10: Gemessene Dosisleistung des RamION bei konstanter mittlerer Dosisleistung, erreicht durch gleichzeitige Variation von Pulswiederholffrequenz und Pulsdosis

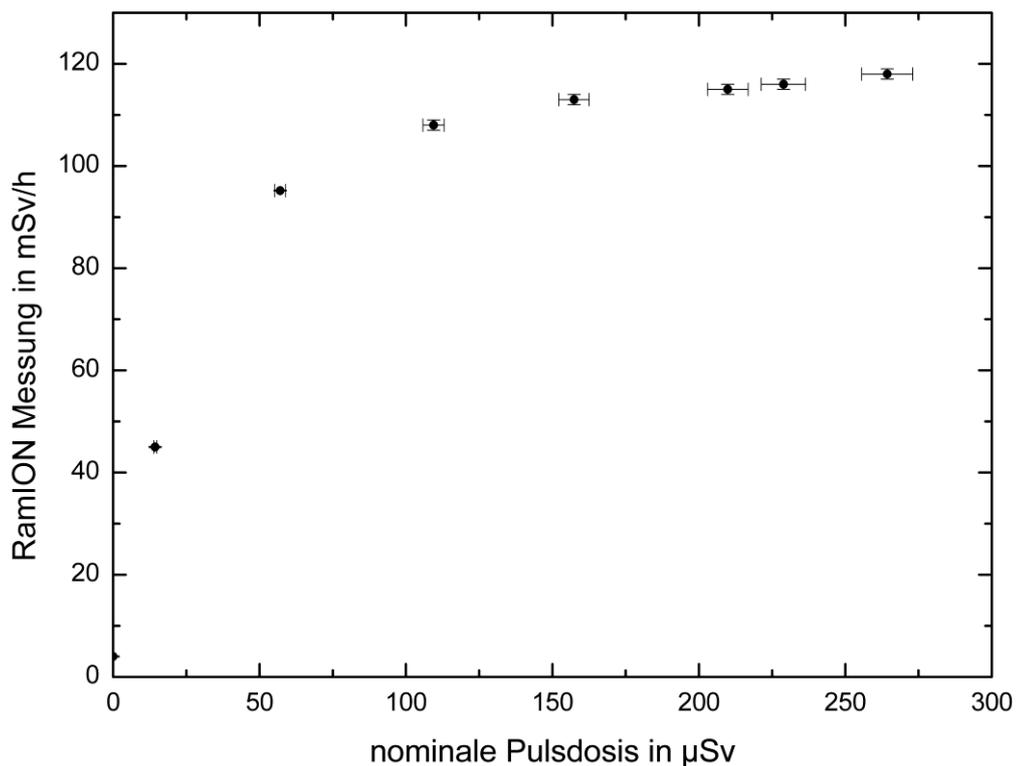


Abbildung 11: Gemessene Dosisleistung des RamION in Abhängigkeit von der Pulsdosis, die aus dem Messwert der Ionisationskammer und der Relation nach Abbildung 8 berechnet wurde

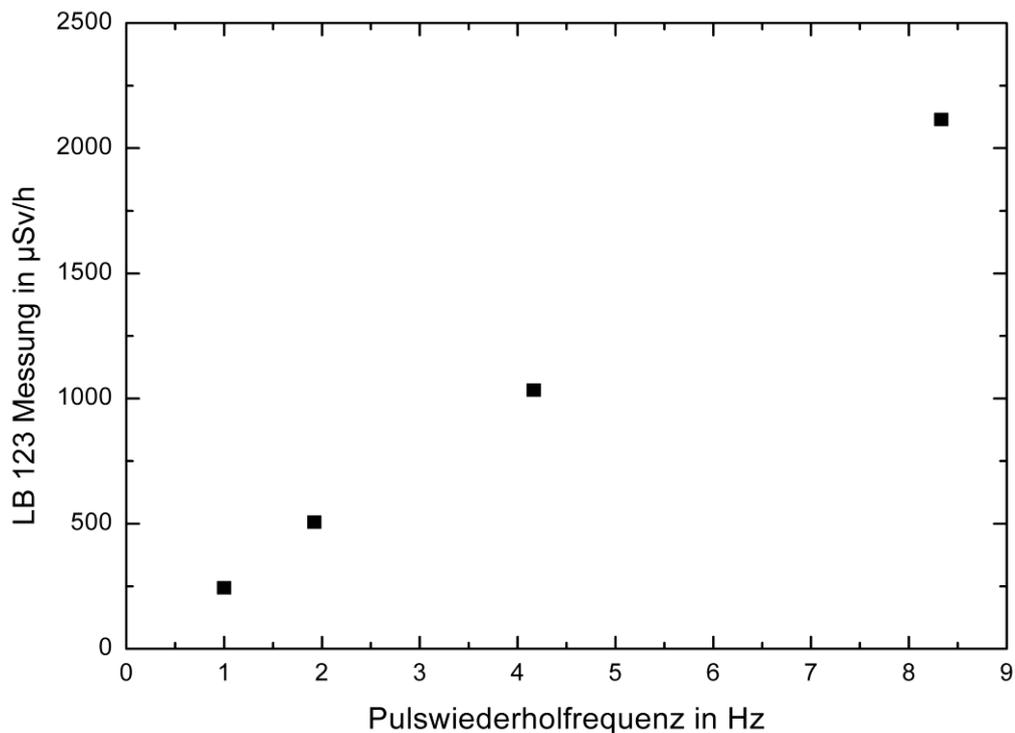


Abbildung 12: Gemessene Dosisleistung des LB 123 D-H10 bei konstanter mittlerer Dosisleistung, erreicht durch gleichzeitige Variation von Pulswiederholfrequenz und Pulsdosis

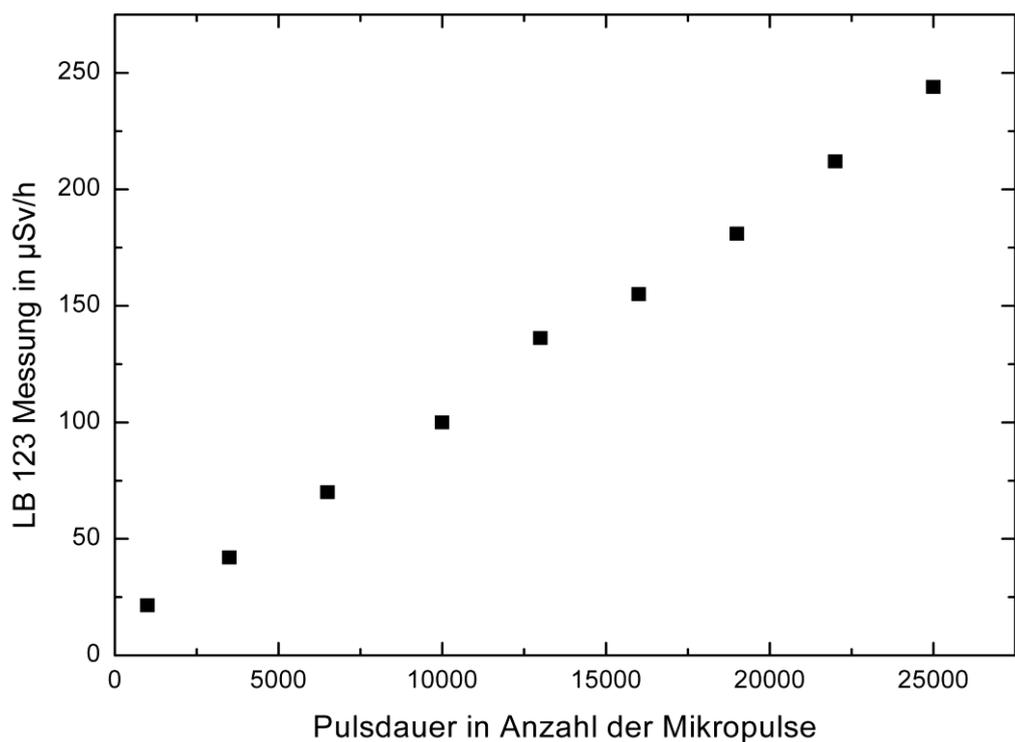


Abbildung 13: Gemessene Dosisleistung des LB 123 D-H10 bei konstanter mittlerer Dosisleistung, Pulsdosis und Pulswiederholfrequenz, aber einer variablen Pulsdauer

7.3 Diskussion und Schlussfolgerungen

Zunächst sind die unterschiedlichen Relationen von Elektronendosis zu Bremsstrahlungsdosis für das RamION und das LB 123 D-H10 zu bemerken. Die ursprüngliche Annahme, dass dies in der unterschiedlichen Ausdehnung der beiden Messgeräte und einem inhomogenen Strahlungsfeld begründet sei, konnte durch die zeitlich vor dem dritten Experiment durchgeführte Referenzmessung (siehe Kapitel 5.5) nicht bestätigt werden. Aufgrund einer hier fehlenden unabhängigen Referenz bleiben so große Unsicherheiten und eine quantitative Aussage über die Sättigung der untersuchten Geräte ist auf Basis dieser Messung nicht möglich.

Trotzdem lassen sich auf Basis der erfolgten Messungen bereits einige generelle Aussagen über die Eignung der beiden Ortsdosisleistungsmessgeräte in stark gepulsten Feldern treffen. Der jeweils lineare Zusammenhang zwischen Pulswiederholfrequenz und gemessener Dosisleistung (siehe Abbildung 10 und Abbildung 12) zeigt, dass die im Experiment applizierte Pulsdosis die Geräte annähernd vollständig sättigt. Unabhängig von der eingebrachten Pulsdosis hängt die angezeigte mittlere Dosisleistung nur von der Anzahl der einfallenden Pulse ab. Diese Sättigung ist auch in Abbildung 11 klar ersichtlich. Dort kann außerdem abgelesen werden, dass für das RamION dieses Verhalten insbesondere bei einer Pulsdosis von über 100 μSv dominant wird.

Für das LB 123 D-H10 ist darüber hinaus zu bemerken, dass die Pulsdauer einen ähnlichen Einfluss hat wie die Pulswiederholfrequenz. Daher scheint das Gerät bei den hier gewählten Pulsdauern nicht durch eine Totzeit limitiert zu sein, sondern die Pulsdosisleistung einen maximal messbaren Wert zu erreichen. Werden die Pulse länger, erhöht sich auch die gemessene Dosisleistung.

In nachfolgenden Messungen sollte der Pulsdosis- und Pulsdauerbereich, in dem diese Geräte sättigen, genauer eingegrenzt werden. Außerdem sollte durch geeignete Referenzmessungen die genaue Dosis bzw. Dosisleistung der Bremsstrahlung am Bestrahlungsort der Geräte bestimmt werden.

8 Drittes Experiment an ELBE (Arbeitsschritt 8)

8.1 Experimenteller Aufbau und Durchführung

Der Experimentaufbau entsprach dem Aufbau im vorherigen, zweiten Experiment (Kapitel 7). Der Elektronenstrahl des Beschleunigers wird durch einen Bleikollimator und eine Markus-Ionisationskammer auf einen Faradaycup geleitet. Die im Faradaycup erzeugte Bremsstrahlung wird zur Untersuchung der Messgeräte genutzt und ist proportional zur Intensität des primären Elektronenstrahls, gemessen mit der Markus-Ionisationskammer und zur Kontrolle mit dem Faradaycup.

In dieser dritten Experimentreihe, die auf zwei Strahlzeiten aufgeteilt war (vgl. Kapitel 5.4), wurden zum einen die Untersuchungen von RamION und LB 123 D-H10 erweitert, zum anderen wurde zusätzlich die Szintillationssonde AD-b am Automess 6150AD untersucht.

Die Geräte wurden hinsichtlich der Abhängigkeit ihrer Messwerte von den zwei Parametern Pulsdosis und Pulsdauer untersucht. Die Pulsdosis wurde variiert durch die Veränderung der Gate-Spannung des ELBE-Beschleunigers. Dabei wurde mit möglichst kurzen Pulsen bestrahlt, also Makropulsen aus lediglich einem

Mikropuls. Zur Untersuchung des RamION und der Szintillatorsonde wurden diese Pulse mit einer Wiederholfrequenz von 5 Hz appliziert. Das LB 123 D-H10 wurde mit einer Wiederholfrequenz von 25 Hz untersucht. Als Referenz für die Pulsdosis dienten die Messwerte der Ionisationskammer, aus denen Dosisleistungen, mit den im Kapitel 5.4 beschriebenen und aus TLD-Messungen ermittelten Kalibrierwerten, berechnet wurden. Diese Dosisleistung, geteilt durch die Pulsfrequenz, ergibt die Pulsdosis. Weil die Basis der Kalibrierung der Referenzdosen eine Energiedosis in Wasser ist und die untersuchten Dosisleistungsmessgeräte in Bezug auf Äquivalenzdosis kalibriert sind, wurden entsprechend unterschiedlichen Einheiten (Gray und Sievert) zur Darstellung gewählt. Im hier verwendeten hochenergetischen Photonenfeld sollten die beiden Dosisgrößen jedoch numerisch identisch sein, was einen einfachen Vergleich erlaubt.

Um die Pulsdauer bei einer konstanten Pulsdosis zu variieren, wurde zunächst ein Makropuls, bestehend aus einem Mikropuls, appliziert. Anschließend wurden sukzessive mehr Mikropulse pro Makropuls verwendet, während gleichzeitig die Gate-Spannung so reduziert wurde, dass die mit der Ionisationskammer gemessene mittlere Dosisleistung konstant blieb. So entstanden immer längere Makropulse mit konstanter Dosis pro Makropuls und daher abnehmender Makropulsleistung. Weil die Makropulse mit konstanter Frequenz von 5 Hz im Falle der RamION und AD-b Messung bzw. 25 Hz für die LB 123 D-H10 Messung appliziert wurden und ihre Dosis konstant gehalten wurde, blieb auch die zu messende mittlere Dosisleistung konstant. Die Referenzleistung wurde, wie bei der Messung mit variierender Pulsdosis, aus Ionisationskammermessung und TLD-Kalibrierwerten bestimmt. Die Pulsdauer ergibt sich jeweils aus der Anzahl der Mikropulse im Makropuls und dem Mikropulsabstand von 77 ns.

Aufgrund der verschiedenen technischen Möglichkeiten der Messgeräte wurden diese unterschiedlich ausgelesen. Am RamION wurde die Dosisleistungsanzeige über eine Kamera im Bestrahlungsraum abgelesen und in den Kontrollraum übertragen. Beim LB 123 D-H10 und dem AD-b mussten lediglich die Sonden im Bestrahlungsraum liegen, während die Anzeigegeräte in den Kontrollraum gelegt und dort direkt bedient und abgelesen werden konnten. Für die AD-b Sonde wurde dazu die mittlere Dosisleistung über einen Zeitraum von 1 min durch das Auslesegerät gemittelt. Am Auslesegerät des LB 123 D-H10 stand eine solche Mittelungsfunktion nicht zur Verfügung und es wurde die momentane Dosisleistung nach 60 s Bestrahlung abgelesen.

8.2 Ergebnisse

Das RamION Messgerät wurde in der ersten Strahlzeit untersucht und zunächst mit Makropulsen, bestehend aus einem Mikropuls, bei variabler Dosis bestrahlt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 14 dargestellt. Um noch höhere Pulsdosen als mit nur einem Mikropuls im Makropuls möglich zu erreichen, wurde das RamION zudem mit Makropulsen aus 10 und 50 Mikropulsen bei maximaler Pulsdosis bestrahlt. Die resultierenden Pulsdauern von 693 ns und 3,8 μ s sollten immer noch kurz sein im Vergleich zu den zu erwartenden relevanten Ladungstransport- bzw. Totzeiten des Messgerätes. Die Referenzmessung durch die Ionisationskammer muss bei solch hohen Pulsdosen für unvollständige Sättigung korrigiert werden und die Messpunkte sind dementsprechend farbig hervorgehoben. Als Unsicherheit der RamION-Messung wurde 20 % des Messwertes angenommen, was der maximalen Energieabhängigkeit der Anzeige laut Herstellerangabe und den Vorgaben der DIN IEC/TS 62743 Vornorm zur maximal zulässigen Abweichung in gepulsten Strahlungsfeldern entspricht. Selbst bei der maximal hier verwendeten Pulsdosis von 16,5 μ Gy misst das RamION innerhalb der Fehlergrenzen die korrekte Dosisleistung.

Außerdem wurde das RamION mit Pulsen variabler Länge, bei einer konstanten mittleren Dosisleistung von 17,3 mGy/h und einer konstanten Pulsfrequenz von 5 Hz, bestrahlt. Weil es bei dieser Untersuchung

zu leichten Variationen in der eingestellten Pulsdosis kommt, wurden die RamION-Messwerte auf die maximal aufgetretene Pulsdosis der Messreihe normiert. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Abbildung 15 dargestellt. Als Unsicherheit wurden auch hier 20 % des Messwerts angenommen. Die Pulslängenvariation im untersuchten Bereich zeigt keine signifikante Veränderung der Anzeige.

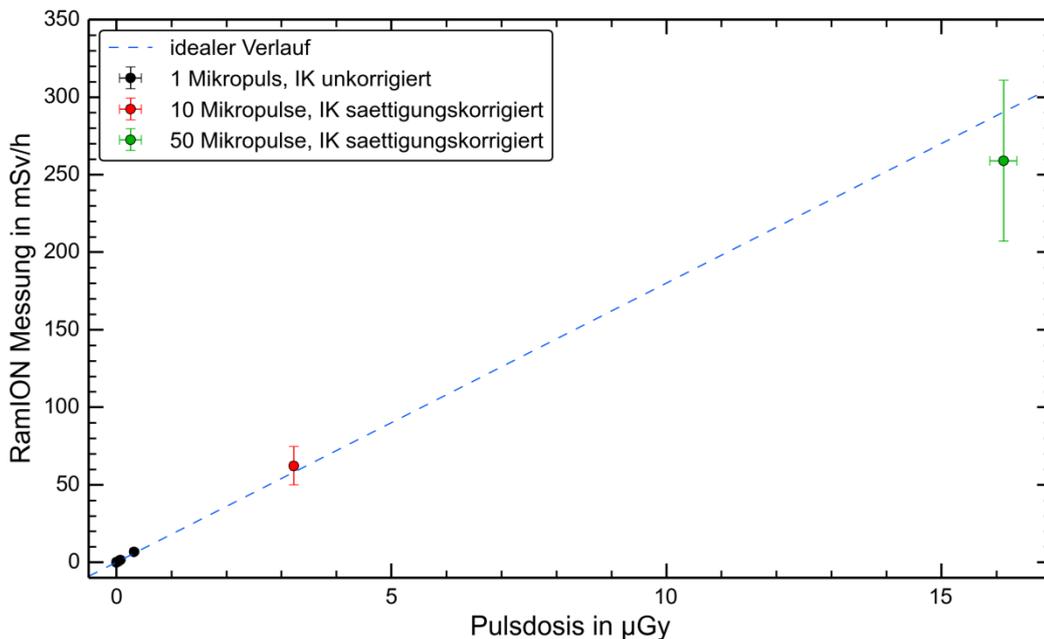


Abbildung 14: Messantwort des RamION bei Bestrahlung mit kurzen Pulsen variabler Dosis und 5 Hz Wiederholungsrate. Die Pulsdosis ist aus den Ionisationskammermessungen unter Verwendung der mittels TLD-Messungen bestimmten Kalibrierwerte abgeleitet. Der ideale Verlauf entspricht der korrekten Messung der Dosisleistung durch das RamION bei der jeweiligen Pulsdosis.

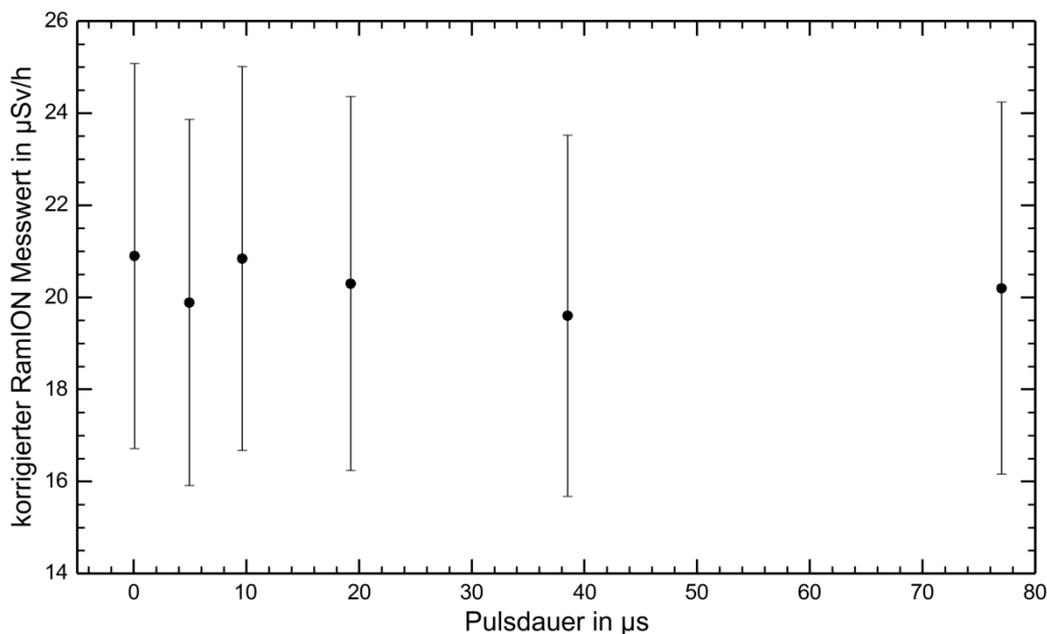


Abbildung 15: Messantwort des RamION bei Bestrahlung mit Pulsen variabler Länge und einer mittleren Dosisleistung von 17,3 $\mu\text{Gy/h}$. Die Messantwort wurde für Abweichung in der Pulsdosis vom eingestellten Wert korrigiert.

Das LB 123 D-H10 wurde in beiden Strahlzeiten untersucht. Während der ersten Strahlzeit wurde es mit einer Reihe quasi-kontinuierlicher Strahleinstellungen bestrahlt. Die Ergebnisse, dargestellt in Abbildung 16, zeigen eine deutlich stärkere Empfindlichkeit des LB 123 D-H10 im Vergleich zur Referenzmessung, wobei die unterschiedlichen Einheiten der Achsen aufgrund der unterschiedlichen Referenzen für die Kalibrierung gewählt wurden, aber numerisch identisch sein sollten. Damit zeigt das LB 123 D-H10 eine überhöhte Messantwort im Vergleich zu den TLD, die über die Querkalibrierung der Ionisationskammer die Referenz für Abbildung 16 sind, aber auch gegenüber dem RamION, welches sehr gut mit den TLD-Messungen übereinstimmt (siehe Abbildung 14). Weil die Strahlung kontinuierlich war, nehmen die Autoren an, dass die erhöhte Empfindlichkeit eine von der Pulsung unabhängige Charakteristik des LB 123 D-H10 ist. Aus der Regressionsgeraden an die Messwerte lässt sich die erhöhte Empfindlichkeit auf einen Faktor von $2,65 \pm 0,02$ Sv/Gy im Vergleich zur TLD-Messung quantifizieren.

Im Weiteren wurde das LB 123 D-H10 in der zweiten Strahlzeit mit einem Mikropuls variabler Pulsdosis bei einer Wiederholfrequenz von 25 Hz bestrahlt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 17 dargestellt, zusammen mit dem idealen Verlauf, der die bei quasi-kontinuierlicher Strahleinstellung gemessene erhöhte Empfindlichkeit des LB 123 D-H10 bereits berücksichtigt. Klar erkennbar ist die Sättigung des Gerätes, welche bei hohen Pulsdosen (und somit hoher mittlerer Dosisleistung) einen maximalen Anzeigewert von ungefähr $5,5 \mu\text{Sv/h}$ bedingt. Dies entspricht einer Zählrate von $25,7$ Impulsen/s, also genau einem Zählimpuls pro Strahlungspuls, der hier aus einem Mikropuls besteht und mit einer Frequenz von 25 Hz appliziert wurde. Diese Sättigung bedingt, dass ab einer Pulsdosis von über $1,48 \cdot 10^{-11}$ Gy nach TLD-Referenz (bzw. $3,36 \cdot 10^{-11}$ Sv, falls die erhöhte Empfindlichkeit des LB 123 D-H10 berücksichtigt wird) die Messantwort des LB 123 D-H10 mehr als 20 % unter den Referenzwerten liegt.

Als dritte Messreihe wurde das LB 123 D-H10 mit Pulsen variabler Länge bei einer mittleren Dosisleistung von $6,3$ mGy/h nach TLD-Referenz (bzw. $16,5$ mSv/h unter Berücksichtigung der erhöhten LB 123 D-H10 Empfindlichkeit) bestrahlt. Die entsprechend hohen Pulsdosen von $7,0 \cdot 10^{-8}$ Gy (bzw. $1,8 \cdot 10^{-7}$ Sv) wurden gewählt, um die Totzeiteffekte gut zu erkennen. Wie bereits für die Messung mit dem RamION beschrieben, wurden die LB 123 D-H10-Messwerte auf die in der Messreihe maximal gemessene Pulsdosis normiert. Die in Abbildung 18 dargestellten Ergebnisse lassen klar ein Totzeitverhalten im Bereich kurzer Pulsdauern erkennen, sichtbar an dem stufenweisen Anstieg der Messantwort bei kurzen Pulsdauern.

Der Übergang zwischen erster und zweiter Stufe findet zwischen einer Pulsdauer von $2,31 \mu\text{s}$ und $3,08 \mu\text{s}$ und der zwischen zweiter und dritter Stufe zwischen $3,85 \mu\text{s}$ und $4,62 \mu\text{s}$ statt. Dieses Stufenverhalten verwischt zunehmend mit steigender Pulsdauer, bedingt durch die stochastische Natur der Ionisationsereignisse. Aus dem Übergang zwischen erster und zweiter Stufe lässt sich auf eine Totzeit von ungefähr $2,4 \mu\text{s}$ schließen. Die Anpassungsgerade an den oberen, linearen Teil der Messreihe gibt durch ihre Steigung, geteilt durch die Pulsfrequenz, ein Maß für die maximal registrierbare Pulsdosisleistung ($\dot{H}_{\text{Puls}}^{\text{max}}$). Um im Sinne der DIN IEC/TS 62743 für die Messung gepulster Strahlung geeignet zu sein, müsste diese maximal messbare Pulsdosisleistung mindestens 1 Sv/h betragen. Sie beträgt jedoch nur (158 ± 2) mSv/h. Mit dem Kalibrierfaktor von $59,4$ pSv/count laut Datenblatt ergibt sich daraus eine maximal registrierbare Zählrate des LB 123 D-H10 von 738 kHz, diese invertiert ergibt eine Totzeitabschätzung von $1,4 \mu\text{s}$.

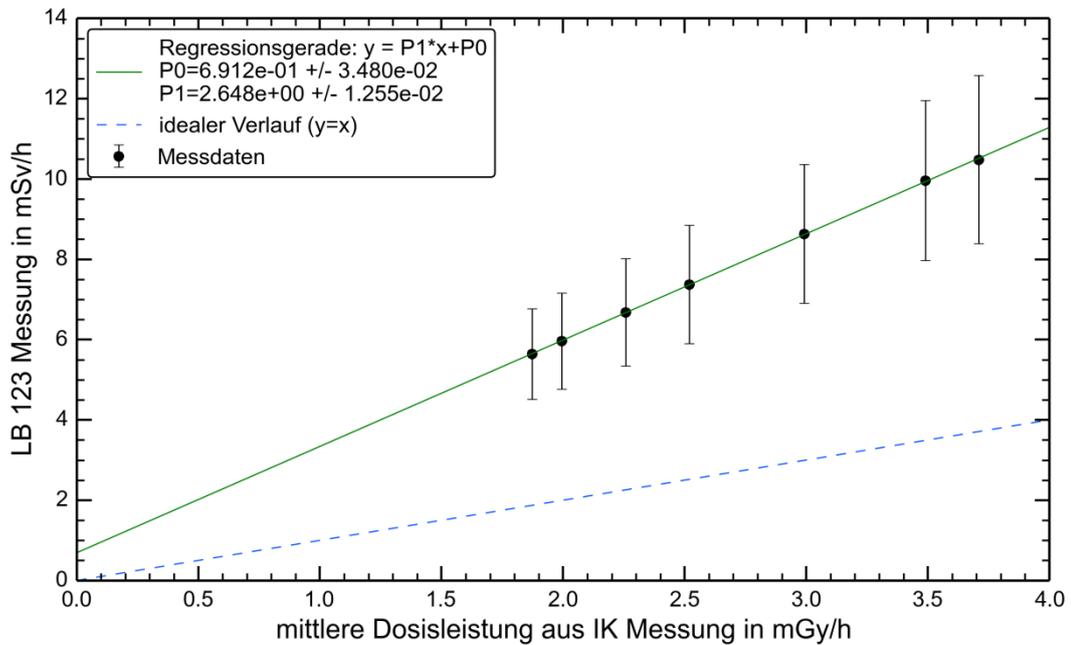


Abbildung 16: Quasi-kontinuierliche Bestrahlung des LB 123 D-H10 (Symbole) mit zugehöriger Regressionsgerade (grün)

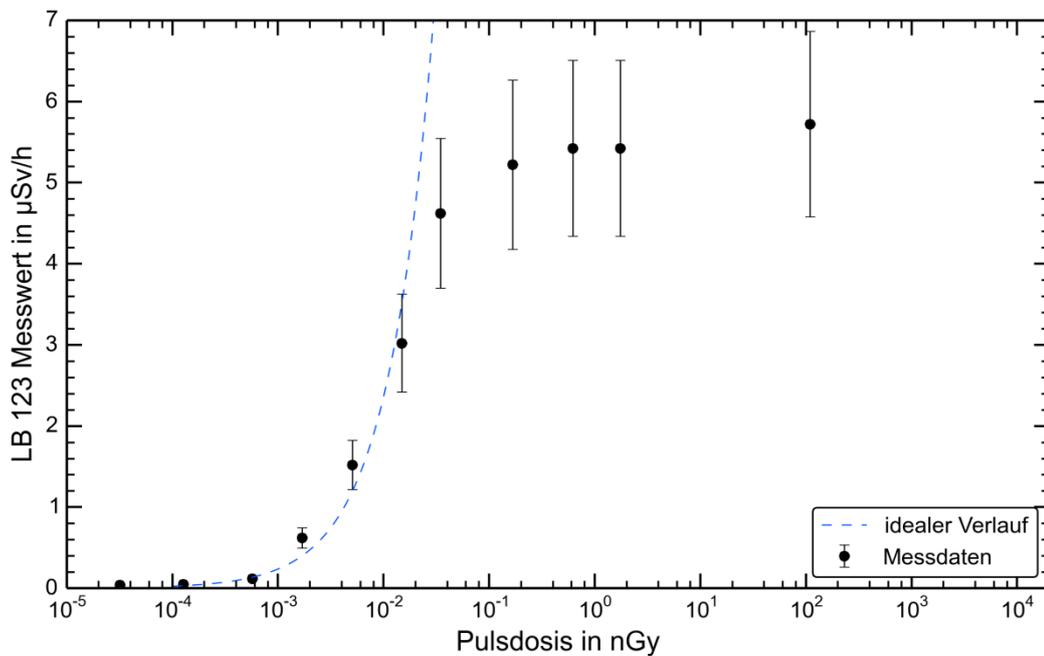


Abbildung 17: Messantwort des LB 123 D-H10 bei Bestrahlung mit kurzen Pulsen variabler Dosis und 25 Hz Wiederholungsrate. Die Pulsdosis ist aus den Ionisationskammermessungen unter Verwendung der mittels TLD-Messungen bestimmten Kalibrierwerte abgeleitet. Der eingezeichnete ideale Verlauf (korrekte Messung der applizierten Dosisleistung durch das Messgerät) berücksichtigt die erhöhte Empfindlichkeit des LB 123 D-H10.

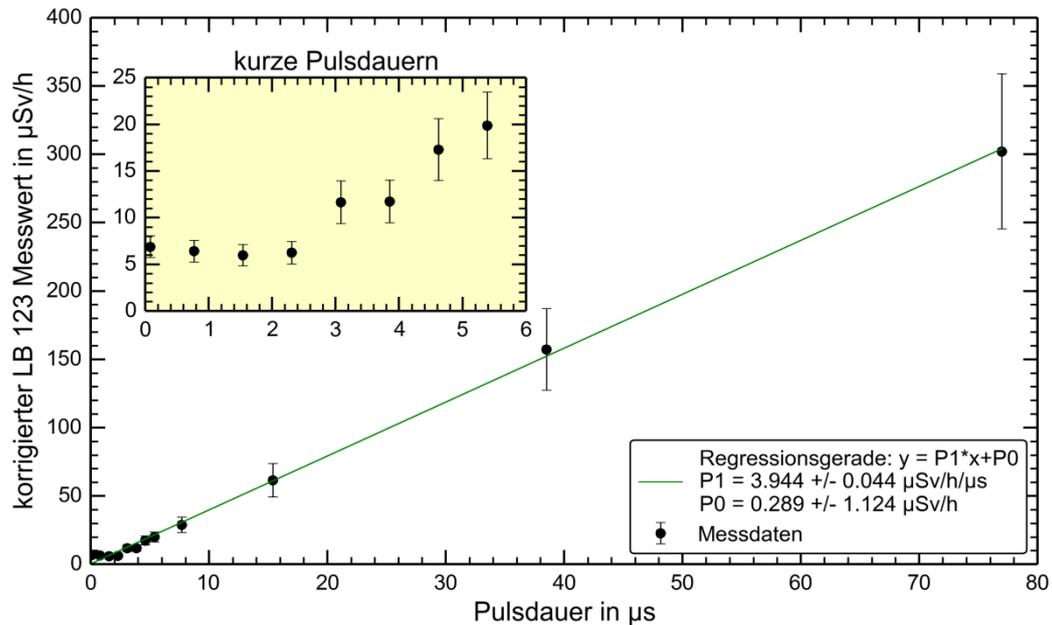


Abbildung 18: Messantwort des LB 123 D-H10 bei Bestrahlung mit Pulsen variabler Länge und einer mittleren Dosisleistung von 16,5 mSv/h. Die Messantwort wurde für Abweichung in der Pulsdosis vom eingestellten Wert korrigiert. Die Steigung der Regressionsgerade erlaubt die Errechnung der maximalen Pulsdosisleistung.

Das 6150AD mit AD-b-Szintillator-Sonde, untersucht in der zweiten Strahlzeit, wurde analog zu den bereits diskutierten Messgeräten RamION und LB 123 D-H10 zunächst mit einem Mikropuls variabler Pulsdosis, bei einer Wiederholungsrate von 5 Hz, bestrahlt. Das Ergebnis, zusammen mit dem idealen Verlauf einer korrekten Messantwort, ist in Abbildung 19 präsentiert. Auch hier zeigt sich ein klares Sättigungsverhalten. Bereits bei der kleinsten Pulsdosis von 39 pGy liegt die gemessene Dosis mehr als 20 % unter der Referenz. Allerdings erreicht die Messantwort bei wachsender Pulsdosis keine Obergrenze, wie dies beim LB 123 D-H10 der Fall ist.

Die Pulsdauerabhängigkeit der Messantwort der AD-b-Sonde wurde bei einer mittleren Dosisleistung von 1,3 mSv/h untersucht. Wiederum wurde die Antwort bezüglich der Variationen in der Pulsdosis korrigiert. Die in Abbildung 20 dargestellten Ergebnisse zeigen keine klar erkennbare Totzeit, allerdings wächst die Messantwort zunächst linear mit der Pulsdauer, ehe sie bei ungefähr 50 μs ein Maximum erreicht. Aus der linearen Steigung lässt sich wiederum die maximal registrierbare Pulsdosisleistung ablesen, die hier $640 \pm 3 \text{ mSv/h}$ beträgt.

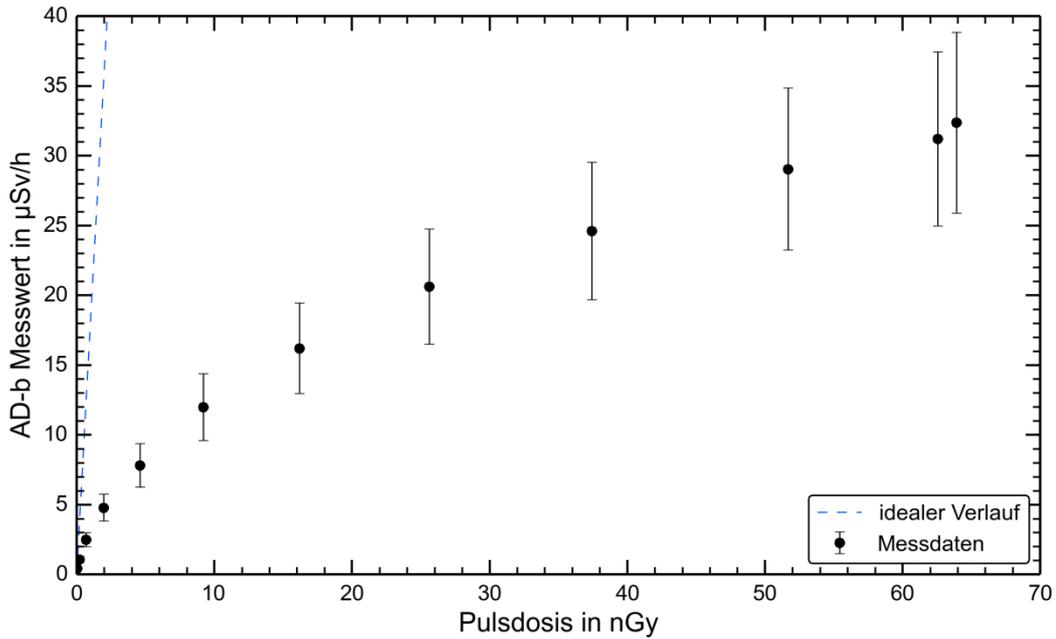


Abbildung 19: Messantwort der AD-b-Sonde bei Bestrahlung mit kurzen Pulsen variabler Pulsdosis und 5 Hz Wiederholungsrate. Die Pulsdosis ist aus den Ionisationskammermessungen unter Verwendung der mittels TLD-Messungen bestimmten Kalibrierwerte abgeleitet. Der ideale Verlauf wäre eine korrekte Messung der mittleren Dosisleistung.

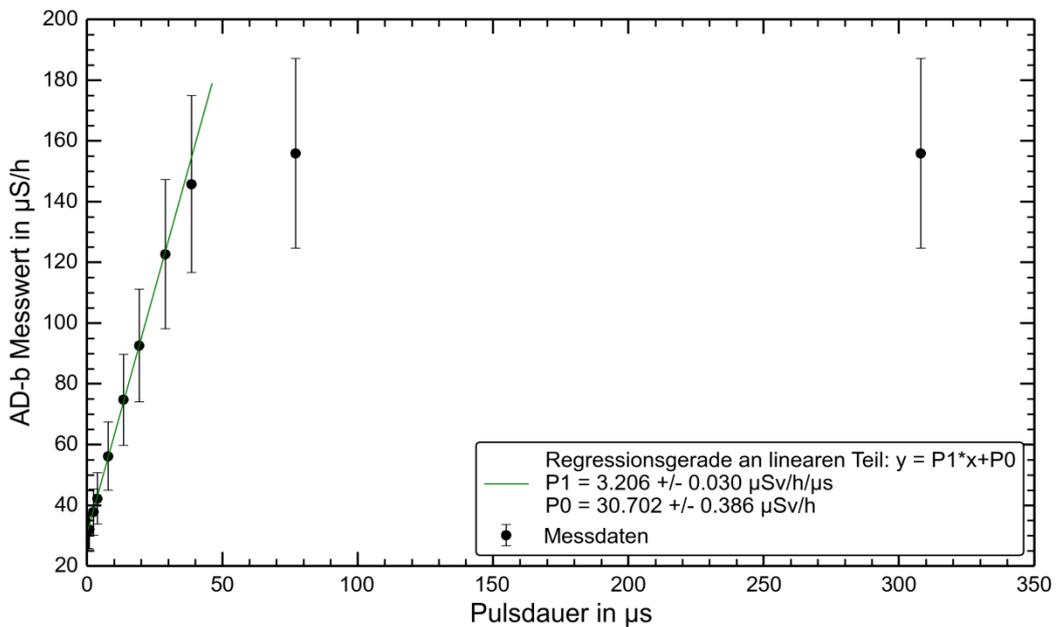


Abbildung 20: Messantwort der AD-b-Sonde bei Bestrahlung mit Pulsen variabler Länge und konstanter mittlerer Dosisleistung von 1,3 mSv/h. Die Messantwort wurde für Schwankungen der Pulsdosis korrigiert. Die Regressionsgerade für Pulsdauern < 40 μs erlaubt die Berechnung der maximalen Pulsdosisleistung.

8.3 Diskussion und Schlussfolgerung

Durch die unabhängige Referenzdosismessung mittels TLD-Chips und Image-Plate lassen sich nun sichere Aussagen über absolute Dosis- und Dosisleistungsgrenzen der untersuchten aktiven, elektronischen Dosimeter treffen. Als alleinige Unsicherheit bleibt eine in etwa 2,6-fach überhöhte Dosisleistungsanzeige des LB 123 D-H10, verglichen mit allen anderen Messmethoden. Wahrscheinlich liegt diese darin begründet, dass die Sonde des LB 123 D-H10 ein Metallgehäuse besitzt, während die anderen Messgeräte lediglich leichte Kunststoffumhüllungen haben. Ähnlich wie in der Image-Plate-Bestrahlung (vgl. Abbildung 6) führt diese Umhüllung möglicherweise zu einer Veränderung der gemessenen Strahlqualität und damit einer überhöhten Empfindlichkeit des LB 123 D-H10. Die gute Übereinstimmung der Kalibrierkurven (Ionisationskammeranzeige zu TLD-Dosismessung) in beiden Strahlzeiten, zwischen denen das Experiment komplett ab- und wieder aufgebaut wurde, sprechen für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Die quantitativen Messungen der Dosimeter sollten zwei Aussagen erlauben. Zum einen lassen sich aus den Ergebnissen der Messungen mit Pulsdosisvariation ablesen, bis zu welchen maximalen Pulsdosen beliebig kurze Pulse verlässlich gemessen werden können. Für das RamION ist dies für Pulse bis zu maximal 16,5 μGy möglich und für das LB 123 D-H10 für Pulse bis zu 14,8 pGy . Für die AD-b-Sonde des Automess 6150AD lässt sich aus dieser Messung lediglich die Aussage treffen, dass die Pulsdosis kleiner als 38 pGy sein muss.

Zum anderen erlauben die Messergebnisse der Variation der Pulsdauer eine Aussage über die maximal messbare Pulsdosisleistung und es lässt sich zumindest für das LB 123 D-H10 die Totzeit bestimmen. Die Totzeit ist relevant, weil nur bei Pulsen, die deutlich länger als die Totzeit sind, eine Angabe einer Pulsdosisleistung wirklich sinnvoll ist. Die AD-b-Sonde mit 640 mSv/h und das LB 123 D-H10 mit 158 mSv/h maximal messbarer Pulsdosisleistung wären nach DIN IEC/TS 62743 Vornorm für gepulste Strahlung ungeeignet, weil diese mindestens 1 Sv/h als messbare Pulsdosisleistung fordert. Für das RamION ließ sich kein vergleichbarer Wert ermitteln, weil es im untersuchten Bereich verlässlich gemessen hat und auch keinerlei totzeitbedingtes Verhalten gezeigt hat.

9 Allgemeines Korrektionsverfahren (Arbeitsschritt 9)

Die Schwierigkeit, ein allgemeines Korrektionsverfahren zu entwickeln, wird vor allem an den Ergebnissen des dritten Experiments an ELBE (siehe Kapitel 8) deutlich. Einerseits zeigen die dort untersuchten drei, auf verschiedenen Messverfahren beruhenden Messgeräte sehr unterschiedliche Verhaltensweisen. Das RamION misst im untersuchten Bereich (Pulse bis zu 16,5 μGy Pulsdosis, wiederholt mit 5 Hz) die korrekte Dosisleistung. Im Gegensatz dazu stehen der AD-b-Szintillator und das LB 1236-H10-Proportionalzählrohr. Insbesondere das LB 1236-H10 gibt ab einer Pulsdosis von größer etwa 0,5 nGy eine von der Pulsdosis und Dosisleistung unabhängige Messantwort. Ein Korrektionsverfahren wird durch ein solches Verhalten unmöglich. Wenn sich unterschiedliche Strahlungsfelder in der Messantwort nicht unterscheiden, kann auch keine Korrektur dies beheben.

Auch bei den Geräten, deren Verhalten eine Korrektur nicht grundsätzlich ausschließt, stellt sich die Frage, welche weiteren a priori-Informationen hierzu erforderlich sind. Dass ein Feld „gepulst“ ist, würde sicherlich

nicht reichen, wie an der Messantwort der AD-b-Sonde in Abbildung 20 zu sehen ist. Alle Messpunkte wurden bei gepulsten Feldern gleicher Dosisleistung, aber unterschiedlicher Pulsdauer gemessen und die Messantwort ist stark von der Pulsdauer abhängig. Eine gute Abschätzung für die Pulsdauer eines Strahlungsfeldes hinter einer Abschirmung ist bereits schwierig und für ein unbekanntes Strahlungsfeld ist diese gar unmöglich. Für den Strahlenschutz wären dies jedoch zwei sehr typische Fälle und die Messung des reinen (primären) Feldes eines Beschleunigers ist eher uninteressant. Für eine sinnvolle Korrektur wären somit in der Praxis kaum verfügbare Informationen nötig und es stellt auch die Notwendigkeit der Messung eines Strahlungsfeldes in Frage, wenn vor der Messung bereits viel über dieses Feld bekannt sein muss.

Zusammengefasst muss also festgestellt werden, dass ein allgemeines Korrektungsverfahren für gepulste Strahlung nicht möglich ist und in den möglichen Einzelfällen wenig sinnvoll erscheint.

Dies heißt jedoch nicht, dass auf eine Messbarkeit von gepulsten Strahlungsfeldern verzichtet werden muss. Wie in diesem Bericht dargelegt, gibt es durchaus Geräte, die in der Lage sind, gepulste Strahlungsfelder akkurat zu messen. Die Bewertung eines Messgerätes sollte sich hierbei an der DIN IEC/TS 62743 Vornorm orientieren. Mit dieser Norm und einer Referenzstrahlungsquelle für gepulste Strahlung bei der PTB Braunschweig sollten in absehbarer Zeit Bauartzulassungen für Dosisleistungsmessgeräte für gepulste Felder verfügbar sein und so können für eine jeweilige Anwendung geeignete Geräte ausgewählt werden. Es bleibt allerdings zu bedenken, dass die Kriterien der DIN IEC/TS 62743 Vornorm für sehr kurz gepulste Strahlungsfelder wahrscheinlich kein geeignetes Gerät zulassen, aufgrund der in Kapitel 2 dargelegten Beschränkungen bei einer Pulsdosisleistungsschwelle als entscheidendem Faktor. Bestrebungen zur Erweiterung der Norm, um auch eine Pulsdosisleistungsschwelle für extrem kurz gepulste Felder zu berücksichtigen, könnten daher sinnvoll sein.

Ergänzungen der Norm sind auch aus anderen Überlegungen heraus sinnvoll. Das hier untersuchte RamION basiert auf dem Prinzip einer Ionisationskammer, ist damit kein zählendes Dosimeter und fällt somit auch nicht unter die DIN IEC/TS 62743. Trotzdem zeigte sich hier, dass sich dieses Verfahren durchaus gut zur Messung gepulster Felder eignet. Üblicherweise werden Ionisationskammern vielfach in der klinischen Dosimetrie eingesetzt und ihr Verhalten in gepulsten Feldern ist daher auch recht gut untersucht. Dabei werden Ionisationskammern oft im Direktstrahl z. B. in der Strahlentherapie eingesetzt und so intensiven und gepulsten Strahlungsfeldern, allerdings mit einem wohldefinierten Parameterbereich, ausgesetzt. In diesem Projekt nutzten die Autoren eine Markusammer unter vergleichbaren Einsatzbedingungen als Strahlmonitor des primären Elektronenstrahls. Es existieren Korrektungsverfahren für Ionisationskammern für kontinuierliche Strahlungsfelder und sehr kurz gepulste Strahlung. Eine mögliche Erweiterung der vorhandenen Korrektungsverfahren für sehr kurze Pulse auf Pulse beliebiger Dauer wurde im Rahmen dieses Projektes entwickelt und in der Zeitschrift für Medizinische Physik veröffentlicht (vgl. U 12). Es sei allerdings angemerkt, dass auch in diesem erweiterten Korrektungsverfahren effektive Parameter für jedes Gerät und jede Pulsdauer bestimmt werden müssen, ein im allgemeinen Einsatz zur Umweltdosimetrie oft wenig praktikables Verfahren, insbesondere aufgrund der oben erläuterten Schwierigkeit der Bestimmung der Pulsdauer von sekundären (gestreuten bzw. abgeschirmten) Strahlungsfeldern.

10 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojektes zur „Dosimetrie in hochenergetischen, gepulsten Strahlungsfeldern“ wurden drei Ortsdosisleistungsmessgeräte als exemplarische Vertreter der wichtigsten Messprinzipien ausführlich hinsichtlich ihrer Eignung zur Messung gepulster Strahlungsfelder untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein ursprünglich gefordertes allgemeines Korrektionsverfahren für gepulste Strahlungsfelder nicht realisierbar ist. Stattdessen wird auf den Bemühungen von anderer Stelle aufbauend empfohlen, Dosisleistungsmessgeräte in gepulsten Strahlungsfeldern zu testen bzw. im Bauartzulassungsverfahren testen zu lassen und somit geeignete Geräte zu identifizieren, welche ohne Korrekturen gepulste Strahlungsfelder akkurat messen können. Die von den Autoren gewonnenen Erkenntnisse stimmen sehr gut mit aktuellen Erkenntnissen Dritter überein und lassen darauf schließen, dass zählende Messverfahren kaum für den Einsatz in gepulsten Strahlungsfeldern geeignet sind und dass Ionisationskammern, soweit einsetzbar, das beste untersuchte Messprinzip darstellen. Für Ionisationskammern existieren auch Korrektionsverfahren für kurz gepulste Strahlung, die hier auf beliebige Pulsdauern erweitert wurden.

Unterlagenverzeichnis

- U 1 Forschungs- und Entwicklungsvertrag „Dosimetrie in hochenergetischen gepulsten Strahlungsfeldern“. AZ.: 53(13)-4331/22512, Vergabe Nr. 209. Zwischen dem Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie und dem Nationalen Zentrum für Strahlenforschung in der Onkologie (OncoRay) an der TU-Dresden vom 18.08.2012/10.10.2012
- U 2 Leistungsbeschreibung zum Forschungs- und Entwicklungsvertrag „Dosimetrie in hochenergetischen gepulsten Strahlungsfeldern“. Vergabe Nr. B 209 vom 06.07.2012
- U 3 CLAIRAND, I., STRUELENS, L., BORDY, J.-M., DAURES, J., DEBROAS, J., DENOZIÈRES, M., DONADILLE, L., GOURIOU, J., ITIÉ, C., VAZ, P., D'ERRICO, F.: Intercomparison of active personal dosimeters in interventional radiology. *Radiation Protection Dosimetry* 129(2008), S. 340-345
- U 4 IAEA (International Atomic Energy Agency): Intercomparison of personal dose equivalent measurements by active personal dosimeters. Final Report of a joint IAEA-EURADOS Project. (2007) IAEA-TECDOC-1564
- U 5 ANKERHOLD, U., HUPE, O., AMBROSI, P.: Deficiencies of active electronic radiation protection dosimeters in pulsed fields. *Radiation Protection Dosimetry* 135(2009), S. 149-153
- U 6 BOAG, J.: Ionization measurements at very high intensities-Part 1: Pulsed radiation beams. *British Journal of Radiology* 23(1950), S. 601-611
- U 7 KARSCH, L., BEYREUTHER, E., BURRIS-MOG, T., KRAFT, S., RICHTER, C., ZEIL, K., PAWELKE, J.: Dose rate dependence for different dosimeters and detectors: TLD, OSL, EBT films, and diamond detectors. *Medical Physics* 39(2012), S. 2447-2455
- U 8 KARSCH, L., RICHTER, C., PAWELKE, J.: Experimentelle Untersuchung der Sättigungskorrektur einer PTW Roos-Ionisationskammer in gepulsten Strahlungsfeldern mit hoher Pulsdosis bei verschiedenen Pulsdauern. *Zeitschrift für Medizinische Physik* 21(2011), 1, S. 4-10
- U 9 DIN (Deutsches Institut für Normung): DIN IEC/TS 62743:2013-04; VDE V 0492-4-1:2013-04: Strahlenschutz-Messgeräte – Zählende elektronische Dosimeter für gepulste Felder ionisierender Strahlung (IEC/TS 62743:2012). (2013), S. 1-25
- U 10 ZUTZ, H., HUPE, O., AMBROSI, P., KLAMMER, J.: Determination of relevant parameters for the use of electronic dosimeters in pulsed fields of ionising radiation. *Radiation Protection Dosimetry* 151(2012), S. 403-410
- U 11 IEC (The International Electrotechnical Commission): IEC/TS 62743:2012: Radiation protection instrumentation - electronic counting dosimeters for pulsed fields of ionizing radiation. (2012), S. 1-25
- U 12 KARSCH, L., PAWELKE, J.: Theoretische Untersuchung der Sättigungskorrektur von Ionisationskammern in gepulsten Strahlungsfeldern bei beliebiger Pulsdauer. *Zeitschrift für Medizinische Physik* 24(2014), 3, S. 201-210
- U 13 KNOLL, G. F.: Radiation detection and measurement. (4th ed., 2010) Hoboken, N.J.: John Wiley.

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

Malte Gotz, Dr. Leonhard Karsch, Dr. Jörg Pawelke
OncoRay – Nationales Zentrum für Strahlenforschung in der Onkologie,
Medizinische Fakultät und Universitätsklinikum Carl Gustav Carus,
Technische Universität Dresden, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
Fetscherstr. 74, 01307 Dresden
Telefon: +49 351 458-7628
E-Mail: malte.gotz@oncoray.de

Redaktion:

Thomas Philipp
LfULG; Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen/Referat Strahlenschutz
Söbrigener Str. 3a (Haus 4), 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-5301
Telefax: +49 351 2612-5399
E-Mail: thomas.philipp@smul.sachsen.de

Foto:

André Wirsig, OncoRay

Redaktionsschluss:

26.01.2015

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.