

Bewertung und Kalibrierung des Plastikszintillationsdetektors BC400 für in der Brachytherapie eingesetzte ^{125}I -Quellen

Bachelorarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science
im Fachbereich Medizinphysik

vorgelegt von
Felix Bärenfänger
geboren in Hagen

Lehrstuhl für Experimentelle Physik V
Fakultät Physik
Technische Universität Dortmund
2014

Gutachter : Frau Dr. M. Eichmann

Herr Prof. Dr. B. Spaan

Datum des Einreichens der Arbeit: 26. Juli 2014

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Materialien	3
2.1 Relevante Grundlagen zu Strahlung und Dosimetrie	3
2.2 Geometrie des verwendeten Seeds	7
2.3 Verwendete Messgeräte und Messaufbauten	7
2.3.1 Schachtkammer	7
2.3.2 xyz-Messtisch und Plastiksintillationsdetektor	10
3 Dosimetrische Untersuchung	14
3.1 Berechnung der Dosisleistung nach TG-43	14
3.1.1 Experimentelle Bestimmung der Kenndosisleistung	16
3.1.2 Komponenten des TG-43 Formalismus	19
3.2 Vermessung eines I25.S16 Seeds mit dem Plastiksintillationsdetektor BC400	23
3.2.1 Messprozedur	23
3.2.2 Lagebestimmung des Mittelpunktes	23
3.3 Vergleich von berechneter Wasser-Energiedosisleistung und gemessenem Strom	24
3.3.1 Bestimmung der Kalibrierfaktoren	24
3.3.2 Unsicherheit der Kalibrierfaktoren	30
3.3.3 Diskussion systematischer Fehler	32
3.3.4 Verhältnis zwischen den Kalibrierfaktoren von ^{106}Ru und ^{125}I . .	35
4 Zusammenfassung und Ausblick	36
A Zertifikat für I25.S16 Seeds der Firma Eckert und Ziegler BEBIG	38
B Kalibrierschein der Schachtkammer	40
Abbildungsverzeichnis	42

INHALTSVERZEICHNIS

Tabellenverzeichnis	44
Literaturverzeichnis	46
Danksagungen	48

Kapitel 1

Einleitung

Krebserkrankungen sind mittlerweile allgegenwärtig in der Gesellschaft. Ähnlich zahlreich, wie die Krebsformen, sind die Behandlungsmöglichkeiten. Zu ihnen gehört unter anderem die Therapie mit ionisierender Strahlung, welche sich im Wesentlichen in zwei Arten unterscheiden lässt: Die Tele- und die Brachytherapie. Bei den meisten Krebsformen kommt die Teletherapie zum Einsatz. Hier wird der Patient kontrolliert von außen mithilfe einer Strahlenquelle bestrahlt. An gut zugänglichen Körperstellen bietet sich jedoch auch die Brachytherapie an. Bei dieser wird ein Radionuklid direkt auf oder in das kranke Gewebe gebracht und für bestimmte Zeit dort belassen.

Zwei Krebsformen, welche brachytherapeutisch behandelt werden, sind das Retinoblastom und das wesentlich häufigere Aderhautmelanom, die beide das Auge betreffen. In Deutschland werden zur Bestrahlung dieser beiden Krankheitserscheinungen die Radionuklide Ruthenium-106 (^{106}Ru) und Jod-125 (^{125}I) eingesetzt. Es steht außer Frage, dass gerade bei den empfindlichen Strukturen des Auges eine möglichst genaue Dosimetrie der Strahlenquellen unerlässlich ist. Voraussetzung einer genauen Dosimetrie ist die Eignung des verwendeten Phantommaterials und der Detektoren. Als Phantommaterial hat sich Wasser bewährt, da dessen Energieabsorption sich nur um wenige Prozent von der des menschlichen Gewebes unterscheidet. Ziel einer Detektorkalibrierung ist es also, einen Faktor anzugeben, der den Messwert mit der Wasser-Energiedosisleistung am effektiven Messort verknüpft. Dazu ist es nötig, dass das Energieabsorptionsverhalten des Detektormaterials im betrachteten Energiebereich proportional zu dem des Wassers ist. Im Energiebereich der von ^{106}Ru emittierten Strahlung ist die Energieabsorption eines Plastiksintillationsdetektors des Typs BC400 in guter Näherung wasseräquivalent und somit gut geeignet für Messungen von ^{106}Ru . Bei Photonenenergien kleiner als 200 keV wurde aber in einer Reihe von Untersuchungen eine Energieabhängigkeit des Absorptionsvermögens eines Plastiksintillators diesen Typs im Vergleich zu dem von Wasser nachgewiesen. In diesen Energiebereich fällt auch die von ^{125}I emittierte Strahlung, sodass die Beurteilung des Szintillators als Detektor für ^{125}I erschwert wird. 2004 veröffentlichte die Arbeitsgruppe von Herrn Dr. Dirk Flühs ein Verhältnis von $3,26 \pm 0,47$ zwischen den Kalibrierfaktoren von ^{106}Ru und ^{125}I für einen Szintillationsde-

tektor [FAW⁺04]. Wenn davon ausgegangen wird, dass sich der Detektor zur Messung von ^{125}I eignet, ist es mit diesem Verhältnis möglich, den Kalibrierfaktor für ^{125}I aus dem von ^{106}Ru zu bestimmen, der es schließlich ermöglicht, die Wasser-Energiedosisleistung von ^{125}I am Messpunkt zu bestimmen.

Ziel dieser Arbeit ist die experimentelle Prüfung, in wie weit sich ein Plastiksintillationsdetektor des Typs BC400 zur Vermessung von ^{125}I -Quellen eignet, welche zur Therapie von Augenkarzinomen verwendet werden, sowie die Verifikation des in [FAW⁺04] angegebenen Verhältnisses zwischen den Kalibrierfaktoren von ^{106}Ru und ^{125}I .

Zu diesem Zweck werden zunächst die Wasser-Energiedosisleistungswerte einer ^{125}I -Quelle für mehrere Raumpunkte mithilfe des Formalismus der TG-43 berechnet. Bei der TG-43 handelt es sich um eine Arbeitsgruppe, die Mitte der 90er Jahre von der American Association of Physicists in Medicine (AAPM) ins Leben gerufen wurde. Aufgabe dieser Arbeitsgruppe war die Standardisierung der Dosimetrie von niederenergetischen Brachytherapiequellen. Nötig war dies, da bis dato aufgrund von widersprüchlichen Literaturwerten uneinheitliche Dosimetrie in den Krankenhäusern betrieben wurde. Aus diesem Grund leitete die TG-43 aus mehreren vorhandenen Datensätzen einen Formalismus ab, welcher die Bestimmung der Dosisleistung an beliebigen Raumpunkten für einige ausgewählte niederenergetische Brachytherapiequellen ermöglicht.

Nach Berechnung der Dosisleistung an den Raumpunkten wird die Quelle mithilfe des Plastiksintillationsdetektors an den selbigen in Wasser vermessen. Durch Bestimmung von Kalibrierfaktoren zwischen berechneten Dosisleistungen und Messwerten für jeden der Raumpunkte kann anhand ihrer Verteilung entschieden werden, ob sich der Szintillator als Detektor eignet. Zudem wird ein mittlerer Kalibrierfaktor ermittelt, mit dessen Hilfe das in [FAW⁺04] angegebene Verhältnis überprüft wird.

In **Kapitel 2** werden zunächst die für die Arbeit notwendigen Grundlagen aus dem Bereich der Strahlungsphysik erläutert. Es werden grundlegende Begriffe geklärt und auf das Verhalten von Strahlung in Materie eingegangen. Anschließend wird geschildert, welche Art von Quelle vermessen wird. Außerdem wird auf die verwendeten Messgeräte eingegangen und die Messaufbauten werden erläutert.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Prüfung des Szintillationsdetektors. Zunächst wird der Formalismus der TG-43 vorgestellt und die eingehenden Größen erläutert sowie gegebenenfalls bestimmt. Anschließend wird die durchgeführte Messung geschildert. Dem folgt die Bestimmung der Kalibrierfaktoren zwischen berechneten und gemessenen Werten und die Analyse ihrer Verteilung. Letztlich wird das Verhältnis der Kalibrierfaktoren von ^{106}Ru und ^{125}I bestimmt und mit dem in [FAW⁺04] angegebenen verglichen.

In **Kapitel 4** werden letztlich die Ergebnisse zusammengefasst und beurteilt, in wie weit das Ziel der Arbeit erreicht wurde. Zudem wird ein Ausblick auf noch folgende Untersuchungen gegeben.

Kapitel 2

Grundlagen und Materialien

In diesem Kapitel werden zunächst einige Begriffe und Definitionen aus der Strahlungsphysik erläutert, die für das Verständnis der Arbeit essentiell sind. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um die Strahlungseigenschaften von ^{125}I , Wechselwirkung von Photonen mit Materie und einige dosimetrische Begriffe. In Abschnitt 2.2 wird der Aufbau und die Beschaffenheit der verwendeten Quelle beschrieben. Anschließend wird kurz auf die in Kapitel 3 verwendeten Messapparaturen und Messsysteme eingegangen sowie die Messaufbauten werden erläutert.

2.1 Relevante Grundlagen zu Strahlung und Dosimetrie

Wenn nicht anders ausgezeichnet, stammen die Informationen für diesen Abschnitt aus dem Vorlesungsskriptum “Medizinphysik 2“ von Herrn Prof. Dr. Suter [Sut].

Aktivität eines Radionuklids

Die Aktivität einer Quelle ist ein Maß für die auftretenden Zerfallsereignisse pro Zeit und ist somit, zusammen mit dem Energiespektrum der Quelle, auch ein Maß für die emittierte Leistung. Sie hängt vom in der Quelle vorhandenen Radionuklid und vom Zeitpunkt ab. Die **Aktivität A** zum Zeitpunkt t und der Kernanzahl N wird durch Gleichung 2.1 beschrieben.

$$A(t) = -\frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 \cdot e^{-\lambda t} = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.1)$$

N_0 und A_0 stehen für die Kernanzahl bzw. für die Aktivität zum Zeitpunkt $t=0$. Für die Zerfallsrate gilt $\lambda = \ln 2/T_{1/2}$. Die Zeit $T_{1/2}$, nach der die Aktivität auf die Hälfte des Anfangswertes gesunken ist, wird als Halbwertszeit bezeichnet. Die Einheit der Aktivität ist $1/s$ und wird als Becquerel (Bq) bezeichnet.

Strahlungseigenschaften von ^{125}I

Alle spezifischen Angaben zu ^{125}I wurden [Iod] entnommen. Die in dieser Arbeit vermessene Quelle enthält das Radionuklid ^{125}I . Dabei handelt es sich um einen reinen,

niederenergetischen γ -Strahler, der durch K-Einfang in das stabile ^{125}Te (Tellur) zerfällt (Gleichung 2.2).



Beim **K-Einfang** wird ein Proton des Kerns unter Emission eines Elektronenneutrinos ν_e in ein Neutron umgewandelt, indem ein Elektron der inneren Schalen in den Kern fällt. Typischerweise bezieht der Kern das Elektron aus der K-Schale. Der freiwerdende Platz in der K-Schale wird durch ein Elektron einer äußeren Schale aufgefüllt. Die Energiedifferenz der beiden Niveaus wird durch Emission eines γ -Teilchens (Photon) freigesetzt. Das beim K-Einfang emittierte Photon besitzt eine Energie von 35,49 keV. Diese Photonen verlassen aber nur in 6,68 % der Zerfälle das Atom. Bei den restlichen Fällen wird die Energie durch innere Konversion an die Atomhülle abgegeben. Bei der **inneren Konversion** gibt das Photon seine Energie an eines der Hüllenelektronen ab, wodurch dies die Bindungsenergie aufbringen kann und das Atom ionisiert wird. Die Reichweite der ausgelösten Elektronen beträgt nur wenige μm , sodass diese die im Folgenden verwendete Quelle nicht verlassen. Der freigewordene Platz auf einer der Schalen wird durch ein Elektron eines höheren Niveaus aufgefüllt. Bei diesem Übergang wird ein Photon mit der Energie, die der Differenz der beiden Niveaus entspricht, emittiert. Dies führt zu einem diskreten, für Jod charakteristischen Spektrum, das sich von 3,34 bis 35,49 keV erstreckt. Die Halbwertszeit von ^{125}I beträgt $T_{1/2} = 59,4 \text{ d}$.

Wechselwirkungen von Photonen mit Materie

Die Abnahme der Intensität I eines monoenergetischen, schmalen Photonenstrahls in Materie wird durch das **exponentielle Schwächungsgesetz** beschrieben:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (2.3)$$

I_0 ist die Anfangsintensität und x der im Absorber zurückgelegte Weg. Bei μ handelt es sich um den linearen Gesamtschwächungskoeffizienten, welcher die Wechselwirkungseigenschaften des durchstrahlten Materials mit dem Photonenstrahl beschreibt. Er setzt sich aus den Schwächungskoeffizienten der beteiligten Wechselwirkungsarten zusammen. Die möglichen Wechselwirkungen von Photonen mit Materie sind Comptonstreuung, Photoeffekt, Rayleighstreuung (kohärente Streuung) und Paarerzeugung. Das verwendete Phantommaterial in dieser Arbeit, mit dem die Photonen wechselwirken, ist Wasser. Aus diesem Grund sind in Abbildung 2.1 die Beiträge der einzelnen Schwächungskoeffizienten in Wasser in Abhängigkeit der Photonenenergie dargestellt. Hier ist zu sehen, dass im betreffenden Energiebereich von 3,34 bis 35,49 keV lediglich Comptonstreuung, Photoeffekt und Rayleighstreuung auftreten und unterhalb von 30 keV der Gesamtschwächungskoeffizient primär durch den Beitrag des Photoeffekts charakterisiert wird.

Beim **Photoeffekt** übertragen die Photonen ihre gesamte Energie auf eines der Hüllenelektronen im Absorber. Dieses kann dadurch die Bindungsenergie aufbringen, sodass das Atom ionisiert wird. Die Energie des ausgelösten Elektrons entspricht der des Photons abzüglich der Bindungsenergie.

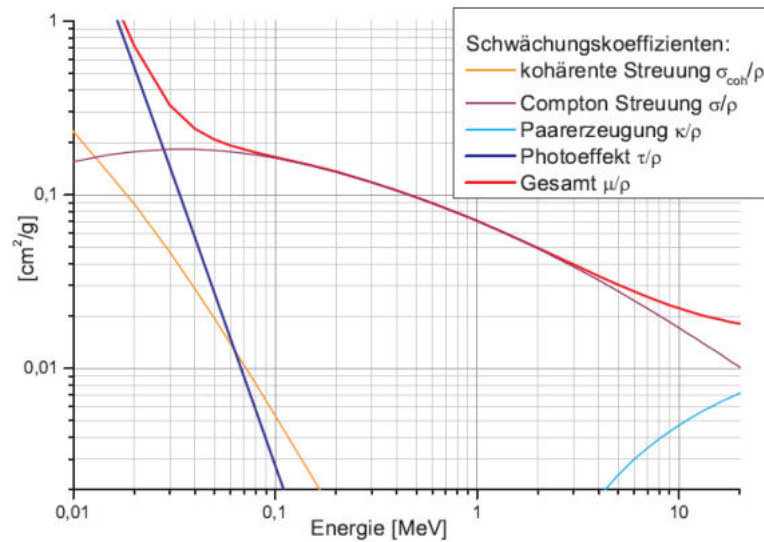


Abbildung 2.1: Energieabhängigkeit der Beiträge der einzelnen Wechselwirkungsarten von Photonen in Wasser zum Gesamtschwächungskoeffizienten [Eic09].

Bei der **Comptonstreuung** werden die Photonen durch elastische Stöße an quasi-freien Teilchen gestreut. Dabei geben die Photonen immer nur einen Teil ihrer Energie an das freie Teilchen ab. Bei einem Stoßwinkel von 180° ist der Energieübertrag maximal.

Die **Rayleighstreuung** bezeichnet die kohärente Streuung von Photonen an Elektronen. Das Photon ändert bei diesem Vorgang seine Bewegungsrichtung, gibt aber keine Energie an das Elektron ab.

In der Realität entspricht die Abschwächung eines gerichteten Strahlenbündels jedoch nicht der kinetischen Energie der Sekundärteilchen. Dies liegt zum einen an der Bindungsenergie der ausgelösten Sekundärteilchen und zum anderen an Streuprozessen, die die Photonen aus der Strahlrichtung lenken. Aus diesem Grund wird der **Energieumwandlungskoeffizient** μ_{tr} mit dem mittleren Energieübertrag E_{tr} und der Photonenenergie E_γ eingeführt:

$$\mu_{\text{tr}} = \frac{E_{\text{tr}}}{E_\gamma} \cdot \mu \quad (2.4)$$

Unter Berücksichtigung des Anteils der von den Sekundärteilchen abgestrahlten Bremsstrahlung G , erhält man letztendlich den **Energieabsorptionskoeffizienten** μ_{en} [Eic09]:

$$\mu_{\text{en}} = \mu_{\text{tr}}(1 - G) \quad (2.5)$$

Dosimetrische Größen

Dosisangaben sind ein Maß für die Aufnahme von ionisierender Strahlung in Materie. Entscheidend für die Wirkung von Strahlung ist die geleistete Arbeit in dem betreffenden Objekt. Im Folgenden werden die für das Verständnis der nächsten Kapitel

notwendigen Dosisgrößen erläutert. Wenn nicht anders angegeben, stammen die Definitionsgleichungen aus dem Buch “Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes“ [Kri12a].

Die **Energiedosis** D ist die am häufigsten verwendete Größe. Sie ist definiert als die von ionisierender Strahlung deponierte Energie dE pro bestrahlter Masse dm . Die Einheit der Energiedosis ist das Gray (Gy), welches J/kg entspricht. Außerdem ist D , wie Gleichung 2.6 zeigt, materialspezifisch.

$$D = \frac{dE}{dm} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dV} \quad (2.6)$$

Die zeitliche Ableitung der Energiedosis ist die **Energiedosisleistung** \dot{D} . Sie stellt ein Maß für die deponierte Energie pro Masse in einem bestimmten Zeitintervall dar und ist die in dieser Arbeit verwendete Größe. Ihre Einheit ist J/(kg·s). Aufgrund der Materialabhängigkeit der Energiedosis und Energiedosisleistung ist es wichtig immer das Absorbermaterial anzugeben, auf das sich die Dosis bezieht. In dieser Arbeit handelt es sich bei dem Absorbermaterial immer um Wasser. Ist von der Dosisleistung die Rede, ist also immer die Wasser-Energiedosisleistung \dot{D}_W gemeint.

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (2.7)$$

Eine weitere wichtige Dosisgröße ist die **Kerma** (kinetic energy released per unit mass) K . Die Kerma besitzt als Einheit ebenfalls das Gray und ist definiert als die auf geladene Sekundärteilchen erster Generation übertragene Bewegungsenergie pro Masseneinheit. Sie wird nur bei indirekt ionisierender Strahlung gemessen. Bei Photonenstrahlung treten ausschließlich Elektronen und Positronen als Sekundärteilchen auf. Wie auch die Energiedosis, hängt die Kerma stark vom bestrahlten Material ab, da die Bindungsenergien der Elektronen und somit auch die gesamte freigesetzte Bewegungsenergie bei verschiedenen Materialien unterschiedlich groß ist.

$$K = \frac{dE_{\text{kin}}}{dm} = \frac{dE_{\text{kin}}}{\rho \cdot dV} \quad (2.8)$$

Die **Kermaleistung** \dot{K} ist wiederum die zeitliche Ableitung der Kerma:

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt} \quad (2.9)$$

Die **Kenndosisleistung** (engl. air kerma Strength) S_k ist die Kermaleistung in Luft bei einem Abstand von einem Meter zur Quelle [OzR]. Sie wird als Maß für die Stärke von Brachytherapie-Quellen verwendet. S_k wird in Kapitel 3.1 ermittelt und zur Berechnung der Dosisleistung verwendet.

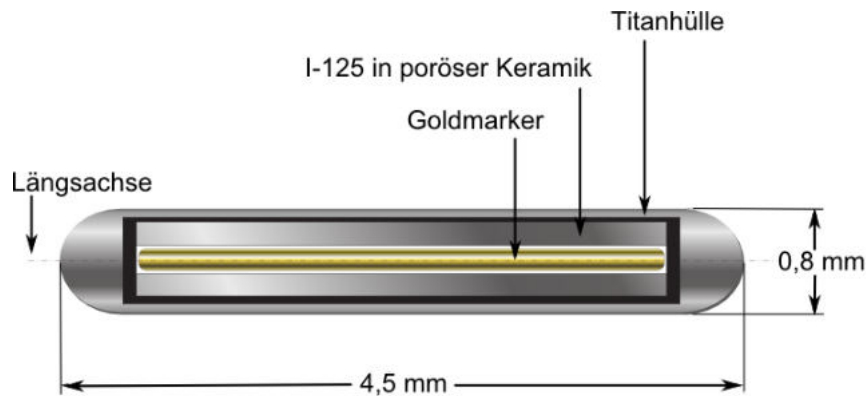


Abbildung 2.2: Geometrie des verwendeten ^{125}I -Seeds der Firma Eckert und Ziegler BEBIG (verändert nach [BEB]).

2.2 Geometrie des verwendeten Seeds

Bei der in dieser Arbeit verwendeten Strahlenquelle handelt es sich um einen IsoSeed, genauer um das Model I25.S16 der Firma Eckert und Ziegler BEBIG. IsoSeeds sind zylindrisch umschlossene Strahlenquellen, siehe Abbildung 2.2. Dieser besitzt eine Länge von 4,5 mm und einen Durchmesser von 0,8 mm. Im Innern befindet sich ein zylindrischer Träger, bestehend aus einer Al_2O_3 -Keramik, auf dem sich das Radionuklid ^{125}I befindet. Die Länge des Trägers entspricht der aktiven Länge L und beträgt 3,5 mm. Den Kern der Keramik bildet ein Goldstift, welcher zur Lagebestimmung im Gewebe dienen soll. Umschlossen wird die Strahlenquelle von einem Titanrohr mit einer Wandstärke von 0,05 mm. An den Enden ist das Titanrohr laserverschweißt. Dies führt zu einem konkaven Abschluss und somit zu einer erhöhten Wandstärke an den Enden des Seeds von ca. 0,44 mm.

Der verwendete Seed wurde am 14.04.2014 mit sieben weiteren der gleichen Bauart geliefert. Für die Luftkermaleistung S_k gibt der Hersteller (Eckert und Ziegler BEBIG) einen Wert von $S_k = 25,197 \pm 7\% (\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2)/\text{h}$ an (siehe Zertifikat im Anhang A). Dabei handelt es sich um den Mittelwert über alle acht gelieferten Seeds zum Referenzdatum 24.04.2014. Die Herstellerangabe für S_k wird in Kapitel 3.1 überprüft.

2.3 Verwendete Messgeräte und Messaufbauten

In diesem Abschnitt sollen kurz die in Kapitel 3 verwendeten Messgeräte sowie Messaufbauten erläutert werden.

2.3.1 Schachtkammer

Als Informationsquelle dient das Buch “Strahlungsmessung und Dosimetrie“ [Kri12b]. Werden Gase ionisierender Strahlung ausgesetzt, entstehen negative und positive Ladungen. Messgeräte, bei denen diese Ladungen durch ein elektrisches Feld voneinander

getrennt werden, bezeichnet man als **Ionisationskammern**.

Durch die Trennung der Ladungen entsteht ein messbarer elektrischer Strom, der Ionisationsstrom. Befindet sich die angelegte Spannung im Arbeitsbereich der Ionisationskammer, so ist der gemessene Ionisationsstrom proportional zur Quellstärke. Die Empfindlichkeit solcher Kammern hängt stark von ihrer Geometrie, der Art und dem Druck des Füllgases, der angelegten Spannung und der Temperatur ab. Somit lassen sich Ionisationskammern sehr gut an verschiedene Anforderungen anpassen. Da ^{125}I zu den γ -Strahlern zählt, ist es sinnvoll eine möglichst voluminöse Ionisationskammer zu verwenden, um die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit zu erhöhen. Eine solche Ionisationskammer ist die **Schachtkammer**.

Bei der Schachtkammer handelt es sich also um eine besondere Bauform von Ionisationskammern. Sie dient zur Messung der Aktivität und der Kenn dosisleistung S_k . Der Strahler wird hier in einem Schacht positioniert, in dem er von dem Messvolumen zylindrisch umgeben ist. Einige Schachtkammern besitzen sogar unterhalb des Strahlers ein zusätzliches Messvolumen. Somit besteht nahezu eine 4π -Geometrie des Messvolumens um die Probe, sodass die Nachweiswahrscheinlichkeit maximiert wird. Daher kann diese Art der Ionisationskammer dazu verwendet werden besonders niederenergetische Quellen, wie ^{125}I , zu vermessen.

In dieser Arbeit wird eine Schacht-Ionisationskammer vom Typ 33005 der Firma PTW verwendet. Das Messvolumen beträgt 116 cm^3 und umgibt die Probe lediglich zylindrisch. Die Kammer ist luftoffen, sodass Luft als Füllgas dient. Das prinzipielle Innenleben ist in Abbildung 2.3 vereinfacht dargestellt. Eine Besonderheit der hier verwen-

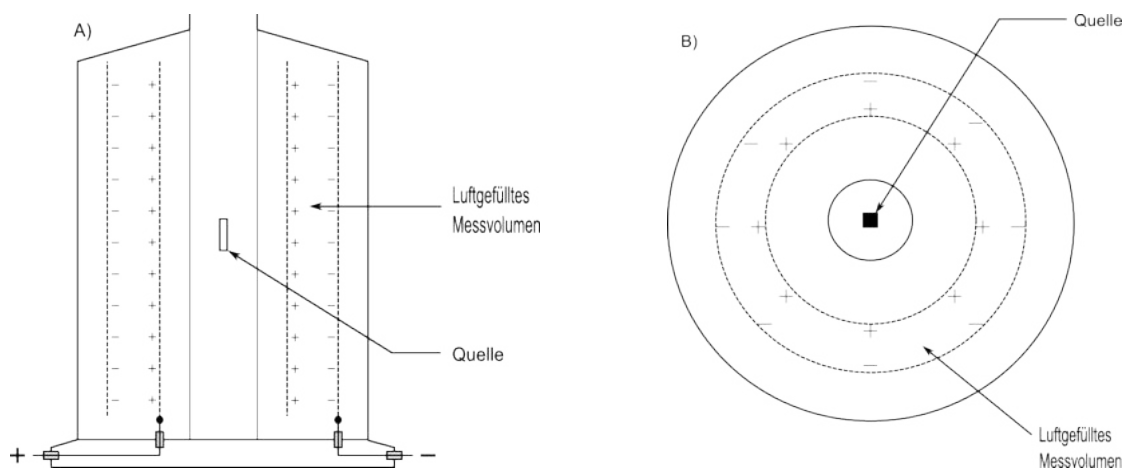


Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau der verwendeten Schachtkammer: A) Längsschnitt; B) Querschnitt.

deten Schachtkammer ist die Ausstattung mit einem "Guard-Ring". Dieser verhindert Verfälschungen des gemessenen Kammerstroms durch eventuelle Leckströme.

Weitere technische Details können in dem Handbuch der Schachtkammer [PTW14] nachgelesen werden.

Messaufbau für die Kenndosisleistungsmessung

In Kapitel 3.1 wird mithilfe der Schachtkammer die Kenndosisleistung für acht Seeds des in Kapitel 2.2 vorgestellten Typs gemessen. Für den dafür nötigen Messaufbau wird die Schachtkammer mit einem Generator und einem Elektrometer (PTW UNIDOS E) in Reihe geschaltet. Anschließend wird der zu vermessene Seed mithilfe einer trichterförmigen Halterung in der Mitte der Schachtkammer platziert.

2.3.2 xyz-Messtisch und Plastiksintillationsdetektor

Zur Vermessung der räumlichen Dosisverteilung des Jod-Seeds wird die Messapparatur in Abbildung 2.4 (A) verwendet. Diese besteht im Wesentlichen aus einer Plexiglaswanne, einer Quellenhalterung und einer Positionierungseinheit, an der sich das Messsystem befindet. Die Positionierungseinheit besteht aus drei Motoren mit Piezoträgheitsantrieb, die auf allen drei Raumachsen jeweils eine Strecke von $30000\ \mu\text{m}$ abfahren können. Die Schrittweite beträgt $0,45\ \mu\text{m}$ und die Positionierungsungenauigkeit $0,5\ \mu\text{m}$ [Kra11]. An den Motor kann ein geeignetes Messsystem gekoppelt werden. Die verwendete Quellenhalterung ist in Abbildung 2.4 (B) dargestellt und besteht aus einer RE1-Scheibe. Dabei handelt es sich um ein für niederenergetische γ -Strahlung wasseräquivalentes Plastik. Speziell für Seeds besitzt die Scheibe eine Nut, welche eine reproduzierbare Positionierung des Seeds erleichtert. Weitergehende Informationen zur

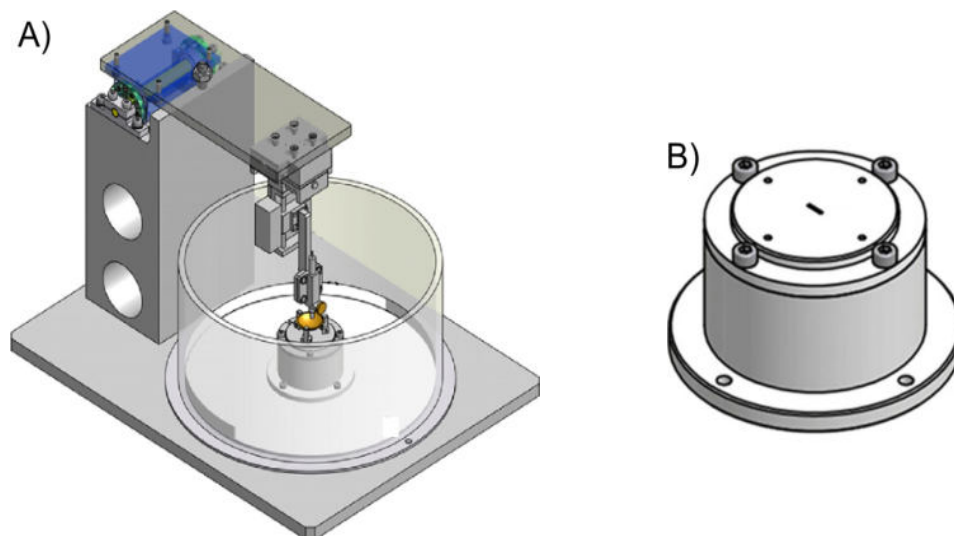


Abbildung 2.4: Messtisch für die Szintillatormessungen: A) Darstellung der Messapparatur; B) Quellenhalterung für Seeds [Kra11].

Funktionweise der Motoren und den Bestandteilen des Messtisches können in der Diplomarbeit von Herrn T. Krause [Kra11] nachgelesen werden.

Der Plastiksintillationsdetektor BC400

Als Quellen für den Inhalt dieses Abschnitts dienen die Publikationen [Eic09], [Bam96] und [FHIW96]. Für die dosimetrische Vermessung der ^{125}I -Seeds in Kapitel 3.2 wird ein Plastiksintillationsdetektor mit Fasern vom Typ BC400 der Firma Bicron verwendet. Ziel dieser Arbeit ist die Beurteilung und Kalibrierung dieses Plastiksintillationsdetektors bezüglich der Wasser-Energiedosisleistung von ^{125}I -Seeds.

Bei den Fasern des Szintillators handelt es sich um organische Fasern mit einem Durchmesser von 1 mm und einer Höhe von 0,47 mm. Organische Fasern bestehen in der Regel aus drei Komponenten: Einem Trägermaterial, einem Fluoreszenzstoff und einem Wellenlängenschieber. In Tabelle 2.1 sind die Materialien, aus denen sich die Fasern zusammensetzen, samt Funktion und Anteil am Gesamtvolumen aufgelistet. Die Dichte des Materials beträgt $1,032\text{ g/cm}^3$. Dies entspricht in etwa der Dichte von Wasser. Das p-Terphenyl wird von der einfallenden Strahlung angeregt und emittiert durch die

Material	Funktion	Anteil [%]
Polyvinyltoluol	Trägermaterial	98
p-Terphenyl	Fluoreszenzstoff	2
POPOP	Wellenlängenschieber	0,1

Tabelle 2.1: Zusammensetzung der BC400 Szintillationsfasern und Funktion der einzelnen Bestandteile [Bic].

daraus resultierenden Übergänge in die Grundzustände elektromagnetische Strahlung der Wellenlänge 340 nm. Diese wird durch den Wellenlängenschieber (hier POPOP) zu einer Wellenlänge von 423 nm verschoben. Dies ist nötig, um die emittierte Strahlung auf die Empfindlichkeit der folgenden Komponenten abzustimmen.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass der Szintillator eine Lichtmenge emittiert, welche proportional zur im gesamten Szintillatorvolumen deponierten Energie ist. Entscheidend für den Messwert ist also das Ansprechvermögen des Szintillatormaterials für die zu vermessene Strahlung. Dosimetrische Vermessungen in medizinischen Bereichen werden in der Regel in Wasser durchgeführt, da es sich bezüglich ionisierender Strahlung in guter Näherung wie menschliches Gewebe verhält. Folglich ist die in der Strahlungsmedizin verwendete Messgröße die Wasser-Energiedosisleistung \dot{D}_W . Interessant ist also lediglich die Energie, welche in einem Wasservolumen der Größe des Szintillators pro Zeit am Messort deponiert würde. Für eine eindeutige Kalibrierung des Detektors in Wasser ist es deshalb nötig, dass das Ansprechvermögen, für welches der Massen-Energieabsorptionskoeffizient μ_{en}/ρ ein gutes Maß darstellt, des Detektors proportional zu dem von Wasser ist. Ist dies der Fall, so existiert ein Proportionalitätsfaktor zwischen \dot{D}_W und Messwert. In Abbildung 2.5 ist das Verhältnis der Massen-Energieabsorptionskoeffizienten von Wasser $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{wasser}}$ und des Szintillatormaterials $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{szint.}}$ in Abhängigkeit der Energie der einfallenden γ -Strahlung aufgetragen. Es ist deutlich zu sehen, dass für Photonenenergien größer 200 keV nahezu konstant $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{wasser}} \approx (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{szint.}}$ gilt, sodass sich der Szintillator in diesem Bereich gut als Detektor in Wasser verwenden lässt. Für Photonenenergien kleiner 200 keV ist ei-

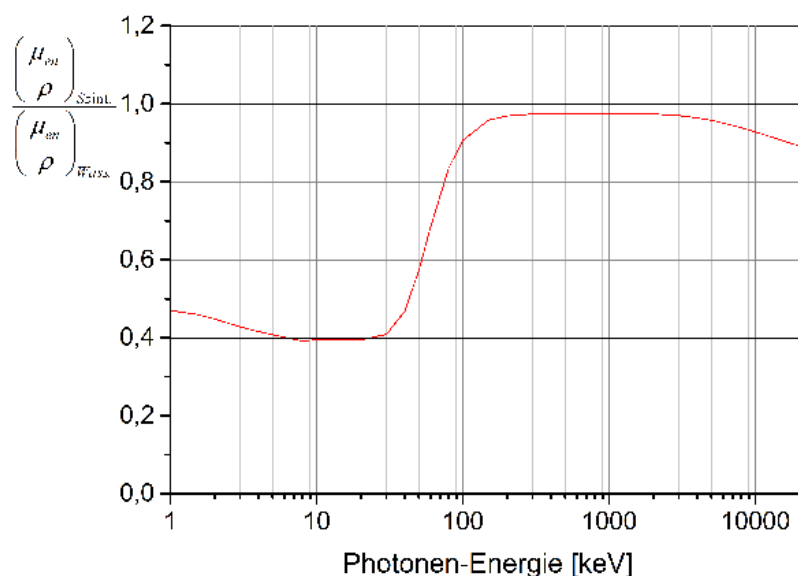


Abbildung 2.5: Verhältnis der Massen-Energieabsorptionskoeffizienten von Szintillatormaterial und Wasser in Abhängigkeit der Photonenergie [Eic09].

ne deutliche Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens des Szintillators im Vergleich zu dem von Wasser zu erkennen. In diesem Bereich wäre eine eindeutige Kalibrierung nicht möglich. Im Energiebereich von ^{125}I (3,34 bis 35,49 keV) scheint das Verhältnis zwischen $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{wasser}}$ und $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{szint.}}$ jedoch konstant bei 0,4 zu liegen. Das bedeutet, dass das Ansprechvermögen des Szintillators in diesem Bereich wieder näherungsweise proportional zu dem von Wasser ist und eine eindeutige Kalibrierung somit möglich wäre. Dies wird in Kapitel 3 überprüft.

Bei dem verwendeten Messsystem handelt es sich um ein Zweikanal-Plastikszintillationsdetektorsystem. Dieses besteht aus einem Szintillations- und einem Cerenkovkanal. Der Szintillationskanal ist in Abbildung 2.6 dargestellt. An der Spitze des Kanals befindet

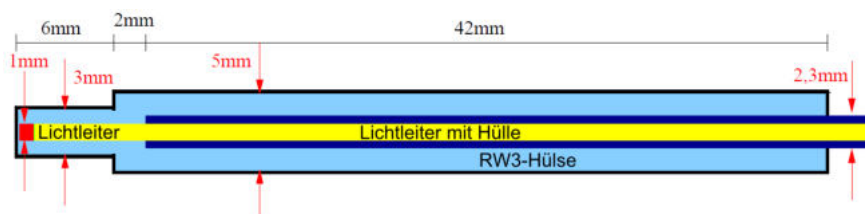


Abbildung 2.6: Schematischer Aufbau des Szintillationskanals [Eic09].

sich der eben beschriebene Plastikszintillator. Die von diesem emittierte elektromagnetische Strahlung wird durch einen Lichtleiter, welcher aus Polymethylmethacrylat (PMMA) besteht, in einen angekoppelten **Photomultiplier** weitergeleitet. Hier wird das Licht in ein Stromsignal umgewandelt und verstärkt. Die Funktionsweise des Pho-

tomultipliers beruht auf den Prinzipien des Photoeffekts. Der so entstandene Strom wird mithilfe eines **Picoamperemeters** des Typs 486 der Firma Keithley gemessen und ist proportional zu der im Szintillatorvolumen deponierten Dosisleistung. Der Cerenkovkanal dient lediglich der Bestimmung des auftretenden Cerenkovlichts im Lichtleiter, um es vom eigentlichen Signal zu subtrahieren. Da in PMMA jedoch erst ab Energien von ca. 178 keV Cerenkovlicht auftritt, kann dies im Falle von ^{125}I vernachlässigt werden. Weiterführende Informationen zum hier verwendeten Plastikszintillationsdetektorsystem sind der Dissertation von Frau Dr. M. Eichmann [Eic09] zu entnehmen.

Messaufbau der Szintillatormessungen

Für die Vermessung des ^{125}I -Seeds mithilfe des Plastikszintillationsdetektors BC400 wird dieser in Verbindung mit dem xyz-Messtisch verwendet. Der Seed wird mithilfe von medizinischem Silikon auf der dafür vorgesehenen Quellenhalterung (Abbildung 2.4 B) fixiert, sodass dieser nicht verrutschen kann. Gelagert wird der Seed nach Abschluss einer Messung auf der Halterung, sodass er bei folgenden Messungen möglichst reproduzierbar remontiert werden kann. Als Phantommaterial wird, wie schon erwähnt, Wasser verwendet, welches in die Plexiglaswanne gefüllt wird.

Der Plastikszintillationsdetektor wird, wie beschrieben, mit einem Photomultiplier und einem Picoamperemeter in Reihe geschaltet. Die Motoransteuerung und Aufnahme der Messwerte geschieht über einen Computer mithilfe der Software LabVIEW.

Kapitel 3

Dosimetrische Untersuchung

Zur Bewertung und Kalibrierung des Plastiksintillationsdetektors BC400 bezüglich der Wasser-Energiedosisleistung von ^{125}I werden die mithilfe des Szintillators gemessenen Ströme mit theoretisch berechneten Dosisleistungen verglichen, indem für jeden Messpunkt ein Kalibrierfaktor zwischen Strom und Dosisleistung berechnet wird. Anhand der räumlichen Verteilung der Kalibrierfaktoren wird beurteilt, in wie weit der Szintillator geeignet ist. Eignet sich der Szintillator, dann ist der gemessene Strom an allen Messpunkten gleichermaßen proportional zur berechneten Dosisleistung, sodass die Kalibrierfaktoren nur stochastischen Schwankungen unterliegen dürften.

Im Folgenden wird zunächst der Formalismus vorgestellt, mit dem die Wasser-Energiedosisleistung \dot{D}_W berechnet wird. Anschließend wird in Kapitel 3.2 die Vorgehensweise der Szintillatormessungen erläutert, bevor in 3.3 die Messergebnisse mit den berechneten Werten verglichen und bewertet werden. Bei der Bewertung werden mögliche systematische Fehler diskutiert. Letztlich wird in Kapitel 3.3.4 das Verhältnis der Kalibrierfaktoren von ^{106}Ru und ^{125}I bestimmt und mit dem in [FAW⁺04] angegebenen verglichen.

3.1 Berechnung der Dosisleistung nach TG-43

Die folgenden Berechnungen der Wasser-Energiedosisleistung \dot{D}_W beruhen auf einem Formalismus des American Association of Physicists in Medicine (AAPM) Task Group No. 43 Reports [TG404]. Dieser gilt für niederenergetische γ -Quellen, die in der Brachytherapie Anwendung finden, wie beispielsweise ^{125}I -Seeds. Aufgestellt wurde der Formalismus durch die Parametrisierung mehrerer Datensätze, welche zum Teil experimenteller Natur sind und zum Teil aus Simulationen gewonnen und schließlich gemittelt wurden. Der große Vorteil dieses Formalismus ist die Berücksichtigung von Quellenform und -beschaffenheit sowie die Lieferung von eindeutigen Ergebnissen für \dot{D}_W . Der TG-43 Formalismus wird durch Gleichung 3.1 beschrieben.

$$\dot{D}_W(r, \Theta) = S_k \cdot \Lambda \cdot \frac{G_L(r, \Theta)}{G_L(r_0, \Theta_0)} \cdot g_L(r) \cdot F(r, \Theta) \quad (3.1)$$

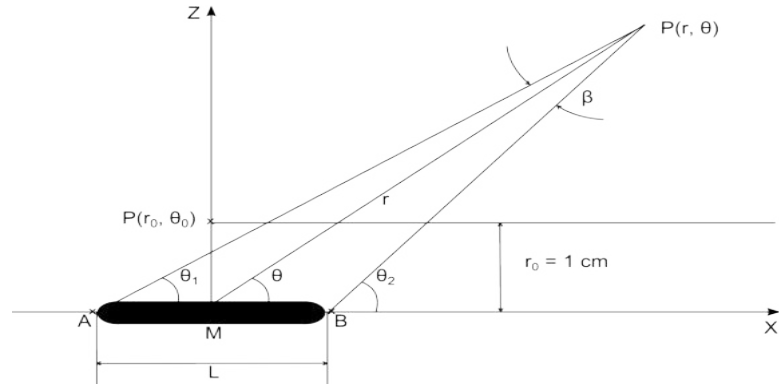


Abbildung 3.1: Darstellung der für die Berechnung der Wasser-Energiedosisleistung \dot{D}_W nach TG-43 relevanten Größen (Verändert nach [TG404]).

In Abbildung 3.1 wird das, sofern nicht anders angegeben, für die folgenden Berechnungen und Messungen verwendete Koordinatensystem definiert. Die Längsachse des Seeds definiert die x-Achse und der Mittelpunkt liegt bei $M = (0|0|0)$. Zudem sind die in Gleichung 3.1 auftretenden Parameter dargestellt, welche im Folgenden kurz erläutert und die zugehörigen Berechnungsvorschriften angegeben werden.

Abstand r

r bezeichnet den Abstand des Punktes $P = (x|y|z)$, an dem die Dosisleistung bestimmt werden soll, zum Mittelpunkt $M = (m_1|m_2|m_3)$ der Quelle und wird mit Gleichung 3.2 bestimmt. r_0 ist der Referenzabstand, welcher 1 cm beträgt.

$$r = \|\overrightarrow{MP}\| = \sqrt{(x - m_1)^2 + (y - m_2)^2 + (z - m_3)^2} \quad (3.2)$$

Winkel Θ

Bei Θ handelt es sich um einen Polarwinkel. Das ist der Winkel zwischen einer Flächennormalen (hier die Seed-Längsachse) und einem Vektor, der die Fläche durchstößt (hier der Vektor \overrightarrow{MP}). Der Winkel Θ_0 beträgt 90° und definiert die yz-Ebene. Diese ist senkrecht zur Längsachse des Seeds und schneidet diesen im Mittelpunkt. Da beim Formalismus der TG-43 davon ausgegangen wird, dass es sich um einen idealen Seed handelt, dessen Dosisverteilung zylindersymmetrisch ist, stellt diese yz-Ebene die Symmetrieebene der Dosisverteilung dar. Alle an dieser Ebene gespiegelten Punkte haben denselben Dosiswert und somit auch den selben Wert für Θ . Folglich ist die Funktion $F(r, \Theta)$, welche in 3.1.2 vorgestellt wird, nur für $\Theta \leq \Theta_0$ tabelliert. Bei der durch Gleichung 3.3 gegebenen Berechnungsvorschrift für Θ kommt es auch zu Werten $\Theta \geq \Theta_0$. In diesen Fällen wird der Supplementwinkel $\Theta' = 180^\circ - \Theta$ verwendet.

$$\Theta = \arccos \left(\frac{\overrightarrow{MP} \cdot \overrightarrow{MB}}{\|\overrightarrow{MP}\| \cdot \|\overrightarrow{MB}\|} \right) \quad (3.3)$$

Winkel β

β ist der Winkel zwischen \vec{PA} und \vec{PB} , definiert also die Lage der Endpunkte A und B der aktiven Länge L relativ zum Punkt P , und kann mit Gleichung 3.4 bestimmt werden. Bei einer aktiven Länge von $L = 3,5$ mm, wie sie der hier betrachtete Seed besitzt, beträgt der Winkel am Referenzpunkt $P(r_0, \Theta_0)$ $\beta_0 = 120,51^\circ$.

$$\beta = \arccos \left(\frac{\vec{PB} \cdot \vec{PA}}{\|\vec{PB}\| \cdot \|\vec{PA}\|} \right) \quad (3.4)$$

Im folgenden Kapitel wird S_k bestimmt. Anschließend werden die übrigen Komponenten von Gleichung 3.1 erläutert.

3.1.1 Experimentelle Bestimmung der Kenndosisleistung

Die Bedeutung von S_k wurde in Kapitel 2.1 beschrieben. Nun wird S_k experimentell mithilfe einer Schachtkammer ermittelt und mit den Herstellerangaben (siehe Zertifikat im Anhang A) verglichen. Untersucht werden acht Isoseeds des in Kapitel 2.2 beschriebenen Typs. Die Seeds wurden am 14.04.2014 geliefert und vermessen.

Messprozedur

Zur Bestimmung der Kenndosisleistung wurde der in Kapitel 2.3.1 beschriebene Aufbau verwendet. Mithilfe des Elektrometers wurden die in der Zeit t durch Ionisationsprozesse freigesetzten Ladungen gemessen. Der mittlere Ionisationsstrom ergibt sich durch Division des Messwertes durch die Messzeit. Als Messintervall wurde $t = 60$ s gewählt, da nach dieser Zeit keine signifikanten Änderungen des mittleren Ionisationsstroms auftraten. Die Betriebsspannung betrug während allen Messungen 400 V. Vor jeder Messung wurde die Temperatur im Messvolumen mithilfe eines digitalen Thermometers (Modell GMH 2000 von Greisinger electronic) und der Luftdruck mit einem Barometer (Modell GMH 3160 von Greisinger electronic) gemessen. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Schachtkammernmessungen wurde die Messung für jeden Seed 10 mal wiederholt. Für zwei der Seeds wurden zur Untersuchung von Positionierungseffekten weitere 10 Messungen durchgeführt. Dabei wurde der Seed nach jeder Messung neu positioniert.

Berechnung von S_k

Zur Bestimmung von S_k aus dem gemessenen Ionisationsstrom wird im Handbuch der Schachtkammer [PTW14] Gleichung 3.5 angegeben.

$$S_k = M \cdot N_{S_k} \cdot P_{\text{ion}} \cdot k_{TP} \quad (3.5)$$

S_k ist somit das Produkt aus dem Messwert M in Ampere, dem Kammerkalibrierfaktor N_{S_k} , dem Sättigungskehrwert P_{ion} und der Luftdichtekorrektur k_{TP} . Der Kammerkalibrierungsfaktor wird im Kalibrierschein der PTW (siehe Anhang B) angegeben und beträgt:

$$N_{S_k} = 5,302 \cdot 10^5 \frac{\text{Gy m}^2}{\text{h A}} \pm 2,5 \%$$

Der Kehrwert der Sättigung P_{ion} ist einheitenlos und kann für Kammeranspannungen $> 300 \text{ V}$ als 1 angenommen werden.

Die Luftdichtekorrektur ist nötig, da die Kammer luftdicht ist und die Messwerte somit wetterabhängig sind. Sie wird durch Gleichung 3.6 bestimmt.

$$k_{TP} = k_1 \cdot \left(\frac{(T + 273,2) \cdot P_0}{(T_0 + 273,2) \cdot P} \right)^{k_2} \quad (3.6)$$

k_1 und k_2 sind einheitenlose Konstanten, die in [PTW14] mit $k_1=0,998$ und $k_2=0,534$ angegeben werden. Die Kalibriertemperatur T_0 betrug 20°C und der Kalibrierluftdruck P_0 $1013,25 \text{ hPa}$. T ist die Temperatur im Messvolumen in $^\circ\text{C}$ und P der Luftdruck am Messort in hPa .

Zwischen k_{TP} und T besteht ein linearer Zusammenhang. Folglich nimmt der Wert der Luftdichtekorrektur bei steigender Temperatur zu. Da es sich bei der Kennndosisleistung aber um einen von Temperatur und Dichte unabhängigen Wert handelt, muss der Messwert bei höheren Temperaturen geringer ausfallen. Ein Grund für einen niedrigeren Messwert bei höheren Temperaturen ist die erhöhte Reaktivität der Luftmoleküle. Diese begünstigt Rekombinationseffekte, welche den gemessenen Ionisationsstrom verringern.

Der Zusammenhang zwischen Luftdichtekorrektur und Luftdruck ist exponentiell fallend. Der stärkste Abfall ist zwischen 0 und 1000 hPa , also Umgebungsdruck, zu verzeichnen. Danach nähert sich die Luftdichtekorrektur nur langsam dem Wert Null. Die Abnahme der Luftdichtekorrektur bei steigendem Druck rührt daher, dass der gemessene Ionisationsstrom bei höherem Druck größer ist. Dies liegt an der dichteren Verteilung der Luftmoleküle im Raum, aus der eine höhere Wechselwirkungswahrscheinlichkeit für die eintreffenden Photonen resultiert.

Die Messungen wurden bei einem Luftdruck von 1003 hPa durchgeführt. Durch den Anstieg der Temperatur von $21,4^\circ\text{C}$ auf $22,5^\circ\text{C}$ während der Messungen stieg der Wert der Luftdichtekorrektur k_{TP} von $1,006$ auf $1,008$ an. Dies bestätigt die zuvor beschriebene Temperaturabhängigkeit. Die Messwerte befinden sich alle in einem Bereich von $51,7 \text{ pA}$ bis $52,4 \text{ pA}$. Während der Vermessung eines Seeds blieben Temperatur und Luftdruck nahezu konstant, sodass auch k_{TP} für die einzelnen Seeds konstant blieb. Somit ergibt sich der Wert von $S_{k,\text{exp}}$ für jeden Seed durch Mittelung der Messwerte und Einsetzen der zugehörigen Werte in Gleichung 3.5. Um die Messungen mit dem im Zertifikat von BEBIG (siehe Anhang A) angegebenen Klassenmittelwert $\bar{S}_{k,\text{BEB}}$ vergleichen zu können, wurde der Mittelwert $\bar{S}_{k,\text{exp}}$ über alle acht vermessenen Seeds bestimmt. Da die Messungen am 14.04.2014 durchgeführt wurden, der Hersteller aber die Kennndosisleistung zum 21.04.2014 angibt, muss zudem noch der Zerfall berücksichtigt werden, um die Werte vergleichen zu können. Der zeitliche Verlauf der Kennndosisleistung verhält sich wie der der Aktivität, sodass der Wert für $\bar{S}_{k,\text{exp}}$ mithilfe von Gleichung 2.1 auf den 21.04.2014 umgerechnet werden kann, indem $t = 604800 \text{ s}$ gewählt und für $T_{1/2}$ die Halbwertszeit für ^{125}I eingesetzt wird. Die Werte für $\bar{S}_{k,\text{exp}}$ und $\bar{S}_{k,\text{BEB}}$ samt ihrer relativen Unsicherheiten befinden sich in Tabelle 3.1.

Ein Vergleich des experimentell ermittelten $\bar{S}_{k,\text{exp}}$ mit der Herstellerangabe $\bar{S}_{k,\text{BEB}}$ zeigt

	$\bar{S}_{k,\text{exp}} [\mu\text{Gy m}^2/\text{h}]$	$\bar{S}_{k,\text{BEB}} [\mu\text{Gy m}^2/\text{h}]$
Mittelwert	25,63	25,197
abs. Fehler	0,657	1,764
rel. Fehler	2,57 %	7 %

Tabelle 3.1: Vergleich des Klassenmittelwertes $\bar{S}_{k,\text{exp}}$ der gemessenen Kennndosisleistung mit dem vom Hersteller angegebenen Mittelwert $\bar{S}_{k,\text{BEB}}$.

eine relative Abweichung von 1,7 %. Somit liegen beide Werte in den Fehlergrenzen des jeweils anderen. Der experimentell bestimmte Klassenmittelwert $\bar{S}_{k,\text{exp}}$ besitzt jedoch einen sehr viel geringeren Fehler und ist somit als genauer einzuschätzen.

Der relative Fehler σ_{S_k} der einzelnen $S_{k,\text{exp}}$ wird für jeden Seed mithilfe von Gleichung 3.7 berechnet. Diese ergibt sich mithilfe Gauß'scher Fehlerfortpflanzung aus Gleichung 3.5.

$$\sigma_{S_k} = \sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_N^2 + \sigma_{k_{TP}}^2} \quad (3.7)$$

$\sigma_{k_{TP}}$ ist der relative Fehler der Luftdichtekorrektur. Wendet man die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung auf Gleichung 3.6 an, so ergibt sich für den absoluten Fehler Δk_{TP} der Luftdichtekorrektur:

$$\Delta k_{TP} = k_1 k_2 \left(\frac{(T + 273,2)P_0}{(T_0 + 273,2)P} \right)^{k_2 - 1} \sqrt{\left(\frac{P_0}{(T_0 + 273,2)P} \right)^2 \Delta T^2 + \left(\frac{(T + 273,2)P_0}{(T_0 + 273,2)P^2} \right)^2 \Delta P^2} \quad (3.8)$$

Mithilfe von Gleichung 3.9 ergibt sich daraus der relative Fehler $\sigma_{k_{TP}}$.

$$\sigma_{k_{TP}} = \frac{\Delta k_{TP}}{k_{TP}} \quad (3.9)$$

σ_N ist der im Kalibrierschein (Anhang B) angegebene Fehler des Kammerkalibrierungsfaktors N_{S_k} . σ_T und σ_P sind die vom Hersteller angegebenen relativen Unsicherheiten für das Thermo- und das Barometer. Für den relativen Fehler der Messwerte σ_M wird ausschließlich der des Elektrometers berücksichtigt, da die Standardabweichung der Messwerte weniger als 0,1 % beträgt und somit nicht zu einer signifikanten Erhöhung des Gesamtfehlers führt. Sämtliche relativen Fehler sind in Tabelle 3.2 aufgelistet. Die Variationen von $\sigma_{k_{TP}}$ unter den einzelnen Seeds sind geringer als 0,001 %, sodass die Angabe eines Wertes für alle Seeds an dieser Stelle genügt. Der relative Fehler σ_{S_k} setzt

$\sigma_{k_{TP}}$ [%]	σ_M [%] [Ele]	σ_N [%] (Anhang B)	σ_T [%] [The]	σ_P [%] [Bar]
0,22	0,50	2,50	0,03	0,40

Tabelle 3.2: Auflistung der relativen Fehlerbeiträge für den Fehler von $\bar{S}_{k,\text{exp}}$.

sich somit für jeden Seed aus den selben Einzelfehlern zusammen, sodass dieser für alle acht Seeds $\sigma_{S_k} = 2,56 \%$ beträgt.

Der relative Fehler $\sigma_{\bar{S}_k}$ des Klassenmittelwertes ergibt sich aus der relativen Standardabweichung $\sigma_{\text{sta.}}$ des Mittelwerts der acht bestimmten Kennndosisleistungen und dem

relativen Fehler σ_{S_k} :

$$\sigma_{\bar{S}_k} = \sqrt{\sigma_{\text{sta.}}^2 + \sigma_{S_k}^2} \quad (3.10)$$

σ_{S_k} pflanzt sich durch die Mittelwertbildung nicht fort, da dieser ausschließlich aus systematischen Fehlern, wie der Ungenauigkeit des Kammerkalibrierungsfaktors, besteht, welche im gleichen Maße für den Klassenmittelwert gelten.

Bei den folgenden Berechnungen und Messungen wurde nur einer der acht Seeds verwendet. Die Kenndosisleistung für diesen Seed wurde zu

$$S_k = 25,61 \frac{\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2}{\text{h}} \pm 2,56 \%$$

bestimmt. Dieser Wert gilt für alle folgenden Berechnungen.

Reproduzierbarkeit der Schachtkammermesswerte

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Schachtkammer wurde bei zwei der acht Seeds der Einfluss von Orientierungsänderungen in der Schachtkammer untersucht. Dazu wurden bei beiden Seeds 10 weitere Messungen durchgeführt. Nach jeder Messung wurde der jeweilige Seed entweder 90° um die Längsachse oder 180° um die Querachse gedreht.

Trotz der Neupositionierungen betrug die maximale Schwankung zwischen zwei Messwerten lediglich $0,33 \%$, sodass keine direkte Abhängigkeit des Messwertes von der Orientierung des Seeds in der Halterung festgestellt werden konnte, da diese geringen Schwankungen sowohl vom Elektrometer ($0,5 \%$ Fehler) als auch vom Temperaturanstieg während der Messungen stammen können.

Somit lässt sich festhalten, dass die Schachtkammer unabhängig von der Orientierung des zu vermessenen Seeds bei einer Messzeit von $t = 60 \text{ s}$ absolut reproduzierbare Ergebnisse liefert.

3.1.2 Komponenten des TG-43 Formalismus

In diesem Abschnitt werden nach und nach die restlichen in Gleichung 3.1 auftretenden Größen erläutert. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Funktionen, welche die Geometrie der Strahlungsquelle berücksichtigen und die Dosisverteilung dementsprechend anpassen. Um die Einflüsse dieser Funktionen zu visualisieren, ist jede im jeweiligen Abschnitt graphisch dargestellt. Dabei wurde für $F(r, \Theta)$ und $G_L(r, \Theta)$ die xz-Ebene (siehe Abbildung 3.1) als Darstellungsebene gewählt, da hier sowohl der Verlauf der Tiefendosis, als auch der Verlauf in Längsrichtung nachvollzogen werden kann. Der auftauchende Index bei den Funktionen charakterisiert den Quellentyp. Der Index L steht für Linienquelle. Dabei handelt es sich um eine dosimetrische Näherung, bei der angenommen wird, dass das Radionuklid entlang eines eindimensionalen Segments mit der Länge L homogen verteilt ist. Die Länge L wird so gewählt, dass sie der aktiven Länge des Seeds entspricht. Die wesentlichen Unterschiede zu einem Seed sind die fehlende Abschirmung, welche nicht an allen Stellen gleich stark ist, und die fehlende zylindrische Ausdehnung des aktiven Segments.

Dosisleistungs-Konstante Λ

Λ ist die Dosisleistungs-Konstante. Sie ist definiert als das Verhältnis von Dosisleistung am Referenzpunkt $P(r_0, \Theta_0)$ und der Kenndosisleistung S_k und hat die Einheit $1/\text{cm}^2$:

$$\Lambda = \frac{\dot{D}(r_0, \Theta_0)}{S_k} \quad (3.11)$$

Der Wert von Λ hängt vom Radionuklid, der Quellenform und dem Absorbermaterial ab. Für das hier verwendete Seedmodell (I25.S16) und Wasser als Absorber wird von der AAPM folgender Wert empfohlen:

$$\Lambda = 1,012 \frac{1}{\text{cm}^2} \pm 4,8\% \quad (3.12)$$

Geometriefunktion $G_L(r, \Theta)$

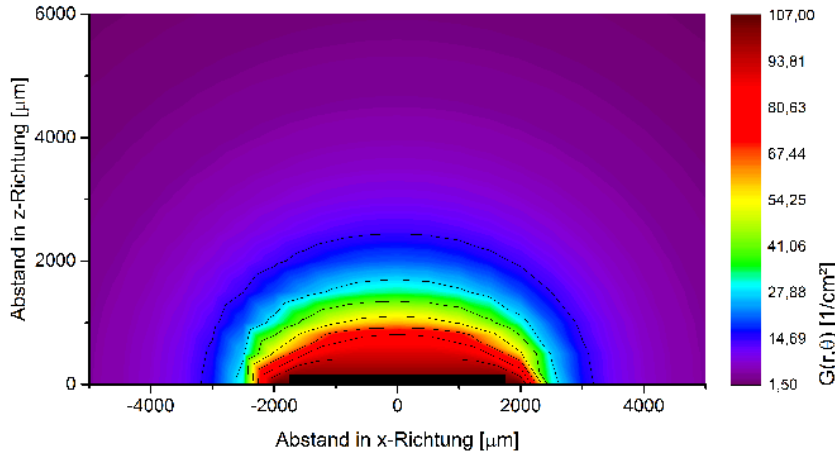


Abbildung 3.2: Darstellung von $G_L(r, \Theta)$ für die xz -Ebene bei einer Linienquelle der Länge $L = 3,5$ mm.

Die Geometriefunktion $G_L(r, \Theta)$ beschreibt die Verteilung einer Linienquelle. Sie gibt eine erste Näherung für die endgültige Verteilung an, wesentliche Effekte, wie Streuung und Absorption, bleiben aber noch unberücksichtigt. Die Werte für die Geometriefunktion werden mithilfe von Gleichung 3.13 bestimmt.

$$G_L(r, \Theta) = \begin{cases} \frac{\beta}{L \cdot r \cdot \sin \Theta}, & \Theta \neq 0^\circ \\ (r^2 - L^2/4)^{-1}, & \Theta = 0^\circ \end{cases} \quad (3.13)$$

In Gleichung 3.1 wird das Verhältnis zwischen $G_L(r, \Theta)$ und $G_L(r_0, \Theta_0)$ gebildet. Bei letzterem handelt es sich um den Wert der Geometriefunktion am Referenzpunkt $P(r_0, \Theta_0)$.

In Abbildung 3.2 ist $G_L(r, \Theta)$ für die xz -Ebene exemplarisch dargestellt. Schwarz eingezeichnet ist die Lage und Länge L der Linienquelle.

Radiale Dosisfunktion $g_L(r)$

Die radiale Dosisfunktion $g_L(r)$ beschreibt die relative Abweichung der Verteilung ei-

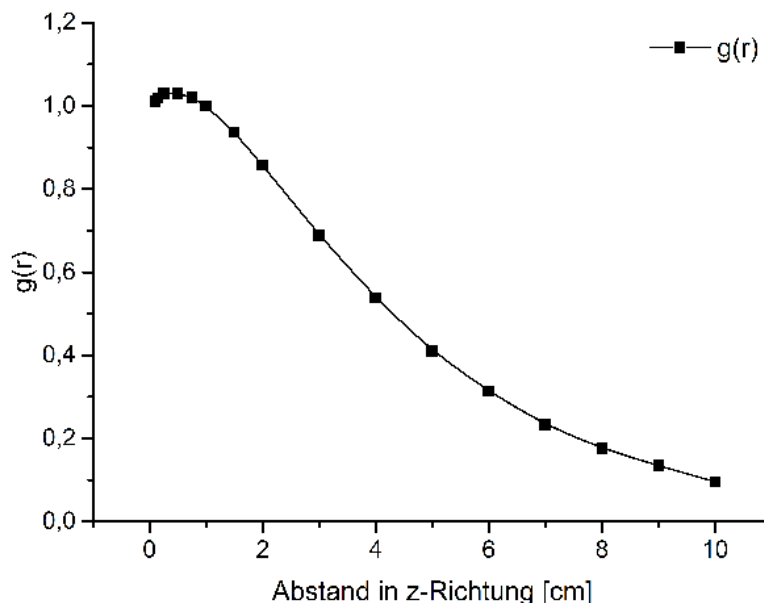


Abbildung 3.3: Darstellung des Verlaufs von $g_L(r)$. Eingezeichnet sind die 16 durch die AAPM angegebenen Werte für das Seedmodell I25.S16. Zwischen den Werten wurde linear interpoliert.

nes Seeds von der Dosisverteilung einer Linienquelle entlang der yz -Ebene durch den Mittelpunkt des Seeds, welche durch Θ_0 definiert wird, indem das Verhältnis zwischen der Dosisleistung im Abstand r zu der im Abstand r_0 , auf die sie folglich normiert ist, bestimmt wird. $g_L(r)$ ist einheitenlos und durch folgende Gleichung definiert:

$$g_L(r) = \frac{\dot{D}(r, \Theta_0)}{\dot{D}(r_0, \Theta_0)} \frac{G_L(r_0, \Theta_0)}{G_L(r, \Theta_0)} \quad (3.14)$$

Die AAPM gibt im TG-43 Report für verschiedene Quellentypen jeweils 16 Werte für $g_L(r)$ an. Durch lineare Interpolation können Werte für beliebige Radien zwischen den angegebenen bestimmt werden. Die für den hier verwendeten Quellentyp angegebenen Werte sind in Abbildung 3.3 dargestellt und durch lineare Interpolation miteinander verbunden.

Anisotropiefunktion $F(r, \Theta)$

$F(r, \Theta)$ beschreibt das Dosisverhalten relativ zur yz -Ebene und berücksichtigt so die

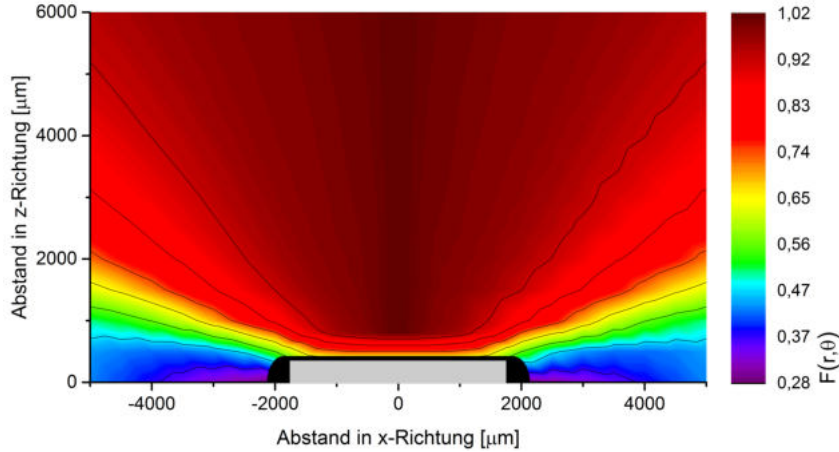


Abbildung 3.4: Darstellung von $F(r, \Theta)$ für die xz -Ebene bei einem Seed mit einer aktiven Länge von $L = 3,5$ mm. Grau eingezeichnet die aktive Länge und schwarz das abschirmende Material.

Abweichungen der Dosisverteilung eines Seeds von der einer Linienquelle abseits der yz -Ebene. Die Funktion ist also auf diese Ebene normiert und übersteigt in der Regel nicht den Wert 1. Lediglich bei Winkeln, für die $|\Theta - 90^\circ| > \arcsin(L/2r)$ gilt, übersteigt $F(r, \Theta)$ den Wert 1. Definiert wird $F(r, \Theta)$ durch Gleichung 3.15.

$$F(r, \Theta) = \frac{\dot{D}(r, \Theta)}{\dot{D}(r, \Theta_0)} \frac{G_L(r, \Theta_0)}{G_L(r, \Theta)} \quad (3.15)$$

Auch für diese Funktion werden von der AAPM im TG-43 Report für mehrere Quellentypen diskrete Werte angegeben. Für Punkte, die nicht angegeben sind, muss $F(r, \Theta)$ aus den gegebenen Werten interpoliert werden. Dafür wird in dieser Arbeit ein lineares Interpolationsverfahren namens "Triangulation" von Originlab 9.1 verwendet. Die genaue Vorgehensweise bei dieser Interpolationsmethode kann in [Ori] nachgelesen werden. Die AAPM bezeichnet alle Interpolationsverfahren als geeignet, welche eine Abweichung von $\leq 2\%$ von den tabellierten Werten liefern. Das ist bei der hier verwendeten Methode der Fall.

In Abbildung 3.4 ist der Verlauf von $F(r, \Theta)$ in der xz -Ebene dargestellt. Zur Orientierung ist der in dieser Arbeit verwendete Seed eingezeichnet. Grau dargestellt ist das aktive Element mit der Länge L und schwarz die Titanhülle. Gut zu erkennen ist hier, dass das Maximum von $F(r, \Theta)$ wie zu erwarten bei $x = 0$ liegt, da die Funktion auf die yz -Ebene durch den Mittelpunkt normiert ist und abgesehen von wenigen Ausnahmen den Wert 1 nicht übersteigt. Mit sinkendem Θ nimmt der Wert der Funktion sukzessive ab, da an den Enden des Seeds die Einkapselungsdicke steigt.

3.2 Vermessung eines I25.S16 Seeds mit dem Plastiksintillationsdetektor BC400

Zur Beurteilung des Plastiksintillationsdetektors BC400 aus Kapitel 2.3.2 zur Vermessung von ^{125}I in Wasser wurde ein I25.S16 IsoSeed der Firma Eckert und Ziegler BEBIG (Kapitel 2.2) vermessen. Die Messungen wurden über einen Zeitraum von 15 Tagen durchgeführt. Da ^{125}I eine Halbwertszeit von lediglich 59,4 Tagen besitzt, muss der Zerfall berücksichtigt werden, um die Messungen miteinander vergleichen zu können. Aus diesem Grund wurde jedem Messwert ein Zeitpunkt t relativ zur ersten Messung zugeordnet und mithilfe von Gleichung 2.1 angepasst. Im Folgenden wird der Messablauf erläutert und die Messergebnisse werden dargestellt.

3.2.1 Messprozedur

Der ^{125}I -Seed wurde in mehreren Ebenen vermessen. Vor Messbeginn wurden die Messpunkte in kartesischen Koordinaten (Einheit μm) mit LabVIEW eingelesen. Der Detektor fuhr diese Punkte dann relativ zu einem vorher definierten Referenzpunkt an. Dafür wurde hier der Seedmittelpunkt gewählt. Gemessen wurde an jedem Punkt so lange, bis der statistische Messfehler $\leq 2\%$ betrug, maximal aber 60 s. Zur Vermeidung von Verfälschungen durch äußere Lichtquellen wurde das Labor nach Messstart verdunkelt.

Vermessen wurden mehrere Ebenen parallel und senkrecht zum Seed mit in der Regel äquidistanten Abständen von 1 mm zwischen den einzelnen Messpunkten. Der kleinstmögliche effektive Abstand zwischen Seedmittelpunkt und Detektor betrug 0,759 mm. Dieser setzte sich aus dem Seedradius von 0,4 mm, einer Kleberschicht am Detektor von 0,124 mm und der halben Detektorhöhe von 0,235 mm zusammen. Um mögliche Berührungen zwischen Seed und Detektor durch unvorhergesehene Hochlagerung des Seeds auszuschließen, betrug der minimale Abstand zum Mittelpunkt bei allen Messungen 1,5 mm. Damit die Messpunkte relativ zum Mittelpunkt angeben werden können, muss dieser vorher bestimmt werden. Die dafür verwendete Methode wird nun im Folgenden erläutert.

3.2.2 Lagebestimmung des Mittelpunktes

Um die Lage der Messkoordinaten relativ zum Seed bestimmen zu können, wird ein bekannter Referenzpunkt benötigt. Dazu wurde bei den Messungen der Seedmittelpunkt gewählt. Zur Bestimmung der Lage des Mittelpunkts wurde diese zunächst abgeschätzt. Anschließend wurde eine Ebene in 1,5 mm Abstand parallel zur xy-Ebene des Seeds vermessen. Die Ebene wurde als Konturdiagramm (Abbildung 3.5) dargestellt und die Isodosenlinien durch Rechtecke genähert. Der Schnittpunkt der Diagonalen befindet sich im Mittelpunkt des Rechtecks, welcher als Mittelpunkt der einzelnen Isodosenlinien angenommen wurde. Der Mittelwert mehrerer Isodosenmittelpunkte wurde als Seedmittelpunkt angenommen. Aufgrund von Schwankungen im Ergebnis bei mehrmaligem Durchführen dieser Methode an der selben Isodosenlinie wurde eine Ablesegenauigkeit

von $\pm 0,15$ mm in x- und y-Richtung festgelegt. Der Nullpunkt in z-Richtung wurde bestimmt, indem bis auf Kontakt an den Seed herangefahren wurde. Dies entspricht einem effektiven Messabstand von 0,759 mm (Siehe 3.2.1). Da es aufgrund des Silikonmaterials, mit dem der Seed befestigt wurde, zu einer Anhebung des Selbigen kommen kann, wurde die Genauigkeit in z-Richtung auf $\pm 0,1$ mm festgelegt.

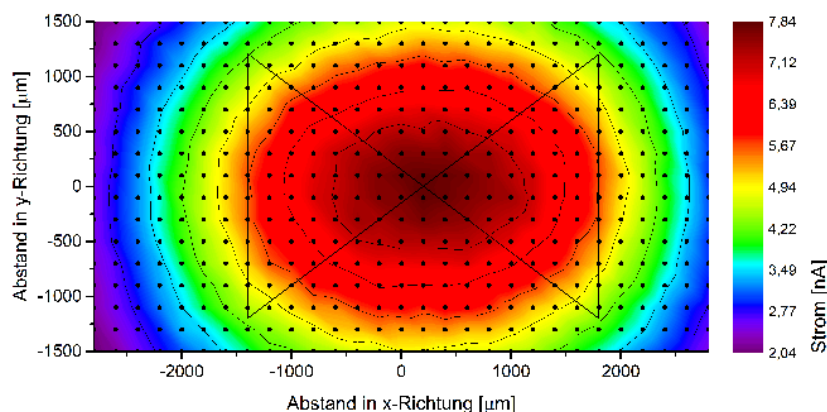


Abbildung 3.5: Verfahren zur Lagebestimmung des Seedmittelpunkts mithilfe einer Ebene in 1,5 mm Abstand parallel zur xy-Ebene des Seeds.

3.3 Vergleich von berechneter Wasser-Energiedosisleistung und gemessenem Strom

Zur Beurteilung des Plastiksintillationsdetektors BC400 als Messsystem für ^{125}I -Quellen wird im Folgenden für jeden Messpunkt ein Kalibrierfaktor zwischen gemessenem Strom und berechneter Wasser-Energiedosisleistung bestimmt und die räumliche Verteilung dieser Faktoren dargestellt. In Kapitel 3.3.2 wird anschließend erläutert, wie sich die in Kapitel 3.3.1 angegebenen Fehler zusammensetzen. In 3.3.3 werden schließlich systematische Fehlerquellen diskutiert und die Verteilungen der Kalibrierfaktoren bewertet.

3.3.1 Bestimmung der Kalibrierfaktoren

Eignet sich der verwendete Plastiksintillator zur Vermessung eines ^{125}I -Seeds, dann ist der gemessene Strom M an jedem Messpunkt gleichermaßen proportional zur berechneten Wasser-Energiedosisleistung \dot{D}_W . Folglich sollte sich der Strom mithilfe eines Kalibrierfaktors K in die Dosisleistung umrechnen lassen. Der Wert des Kalibrierfaktors K_i am i -ten Messpunkt wird mithilfe von Gleichung 3.16 bestimmt.

$$K_i = \frac{\dot{D}_{W_i}}{M_i \cdot k_{\text{rel}}} \quad (3.16)$$

Die Einheit von K ist $\text{Gy}/(\text{h}\cdot\text{nA})$.

k_{rel} ist der relative Kalibrierfaktor, der durch die Tagesankopplung zustande kommt,

3.3. Vergleich von berechneter Wasser-Energiedosisleistung und gemessenem Strom

welche täglich durchgeführt wurde. Diese ist nötig, um eine möglichst hohe Genauigkeit der Messungen zu gewährleisten, da es zu Schwankungen des Ansprechvermögens der Messgeräte kommen kann. Für die Tagesankopplung wurde ein Sekundärstandard verwendet. Dabei handelt es sich um eine $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ Flächenquelle mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 28,8\text{ a}$ für ^{90}Sr und $T_{1/2} = 64,1\text{ h}$ für ^{90}Y . Nähere Informationen zum Sekundärstandard und zur Tagesankopplung können [Eic09] entnommen werden. k_{rel} setzt sich aus den Strommesswerten I_0 am Bezugstag und I_m am Messtag für den Sekundärstandard zusammen und wird mithilfe von Gleichung 3.17 bestimmt.

$$k_{\text{rel}} = \frac{I_m}{I_0} \quad (3.17)$$

In dem Messzeitraum für diese Arbeit betragen die Schwankungen von k_{rel} weniger als 1%. Da der Fehler der Tagesankopplung aber bereits 1,5% beträgt, wurde k_{rel} als 1 angenommen [Mel14] und nur der Fehler berücksichtigt.

Im Folgenden werden verschiedene vermessene Ebenen vorgestellt und die Kalibrierfaktoren für diese ermittelt. Auftretende Erscheinungen, die womöglich systematischer Natur sind, werden anschließend in Kapitel 3.3.3 diskutiert. Der Mittelwert \bar{K}_i wird immer für einzelne Ebenen berechnet, indem das gewichtete Mittel (Gleichung 3.18) der K_i gebildet wird.

$$\bar{K}_i = \frac{\sum_i \frac{1}{(\Delta K_i)^2} \cdot K_i}{\sum_i \frac{1}{(\Delta K_i)^2}} \quad (3.18)$$

Bei den Gewichten handelt es sich um die reziproken Varianzen $1/(\Delta K_i)^2$ der Kalibrierfaktoren, sodass Werte mit großen Unsicherheiten nicht so stark ins Gewicht fallen. Die ΔK_i werden aus den relativen Fehlern σ_{K_i} der Kalibrierfaktoren bestimmt, welche, wie auch die Fehler der Mittelwerte $\sigma_{\bar{K}_i}$, in Kapitel 3.3.2 bestimmt werden.

Die Abbildungen 3.6-3.8 zeigen die Konturdiagramme für drei der vermessenen Ebenen. Bei A) handelt es sich immer um den mithilfe des Plastiksintillators vermessenen Strom, B) ist die mit Gleichung 3.1 berechnete Wasser-Energiedosisleistung und C) die sich aus A) und B) ergebene Verteilung der mit Gleichung 3.16 berechneten Kalibrierfaktoren in der Ebene. Bei den Darstellungen des Stroms und der Kalibrierfaktoren sind zusätzlich die Messpunkte eingezeichnet. Diese besitzen in der Regel äquidistante Abstände von 1 mm (weit vom Seed entfernt) bzw. 0,5 mm (nahe am Seed) zueinander. In allen Darstellungen ist die Position des Seeds eingezeichnet. Die aktive Länge L ist grau eingezeichnet und die Titanhülle schwarz. Der Mittelpunkt des Seeds befindet sich überall bei $M = (0|0|0)$.

In Abbildung 3.6 sind die Ergebnisse für die yz-Ebene durch den Seedmittelpunkt dargestellt. Abgesehen von einem Bereich von -2 mm bis 2 mm entlang der Querachse des Seeds und ca. 3 mm in die Höhe sind die Kalibrierfaktoren hier weitestgehend stochastisch verteilt. In dem angesprochenen Bereich sind die Kalibrierfaktoren deutlich höher. Dies deutet auf einen zu kleinen Strom hin. Ein möglicher Grund dafür ist die Mittelung des Szintillators über das Messvolumen, welche bei stark exponentiell abfallenden Kurven zu Verfälschungen führen kann. Außerdem wirken sich Positionierungsfehler bei

kleineren Entfernungen stärker aus als bei größeren. Der gewichtete Mittelwert \bar{K}_L für diese Ebene beträgt:

$$\bar{K}_L = 1,04 \frac{\text{Gy}}{\text{h} \cdot \text{nA}} \pm 7,95 \% \quad (3.19)$$

Abbildung 3.7 zeigt die Konturdiagramme für die xz-Ebene durch den Seedmittelpunkt.

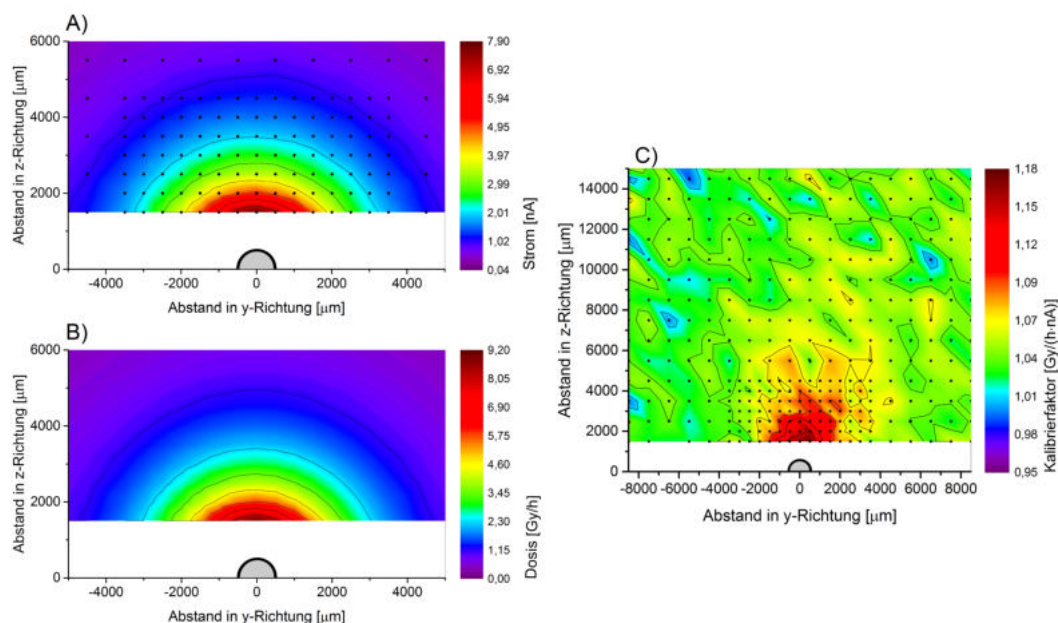


Abbildung 3.6: Konturdiagramme für die yz-Ebene durch den Mittelpunkt des Seeds. Grau eingezeichnet das strahlende Material, schwarz die Titanhülle: A) Darstellung des gemessenen Stroms mit den zugehörigen Messpunkten; B) Darstellung der mit Gleichung 3.1 berechneten Dosisleistung; C) Darstellung der Kalibrierfaktorverteilung.

Der bei Abbildung 3.6 angesprochene Bereich bestätigt sich hier noch einmal. Auch hier sind die Kalibrierfaktoren in der Nähe des Seeds bis zu einem Abstand von ca 3 mm verhältnismäßig hoch und der Strom somit niedrig. Zudem sind in einem Bereich rechts vom Seed die Kalibrierfaktoren erhöht und links vom Seed erniedrigt. Dies spricht für eine Verschiebung des Seeds. Erscheinungen solcher Art werden in Kapitel 3.3.3 näher untersucht. Für Entfernungen ab ca. 3 mm scheinen die Kalibrierfaktoren auch hier stochastisch verteilt.

Der Mittelwert \bar{K}_Q dieser Ebene beträgt:

$$\bar{K}_Q = 1,01 \frac{\text{Gy}}{\text{h} \cdot \text{nA}} \pm 8,12 \% \quad (3.20)$$

In Abbildung 3.8 sind die Konturdiagramme für eine Ebene parallel zur xy-Ebene des Seeds dargestellt. Die Ebene befindet sich in einem Abstand von 1,5 mm zum Seed und somit in dem auffälligen Bereich der anderen beiden Ebenen. Durch den, im Vergleich zu den anderen beiden, hohen Mittelwert \bar{K}_P (Gleichung 3.21) wird die Annahme des

3.3. Vergleich von berechneter Wasser-Energiedosisleistung und gemessenem Strom

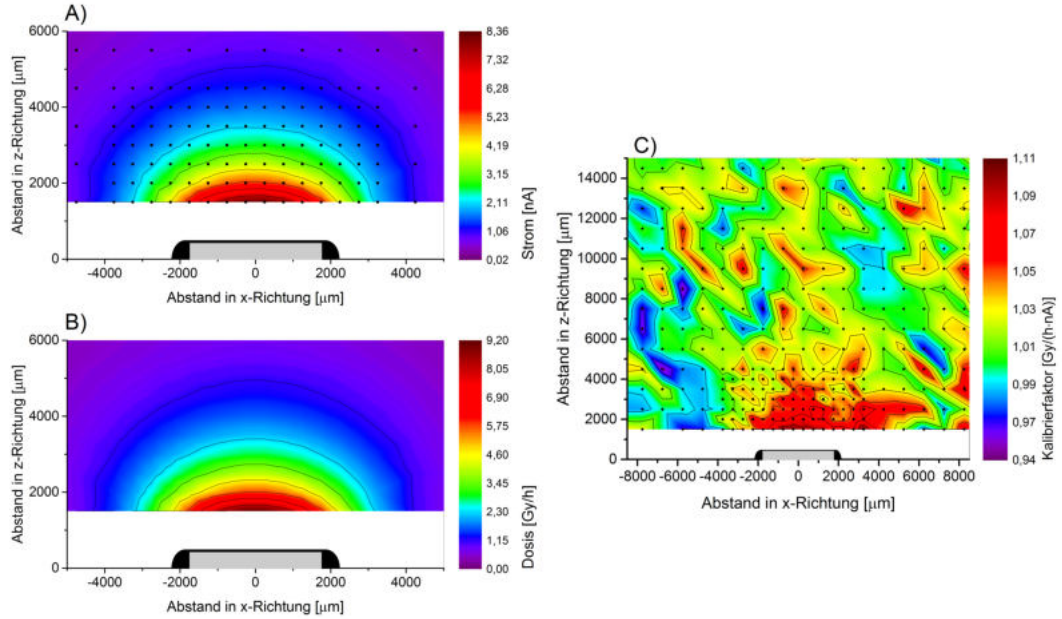


Abbildung 3.7: Konturdiagramme für die xz-Ebene durch den Mittelpunkt des Seeds. Grau eingezeichnet das strahlende Material, schwarz die Titanhülle: A) Darstellung des gemessenen Stroms mit den zugehörigen Messpunkten; B) Darstellung der mit Gleichung 3.1 berechneten Dosisleistung; C) Darstellung der Kalibrierfaktorverteilung.

verhältnismäßig hohen Kalibrierfaktoren in nächster Nähe zum Seed durch eine dritte unabhängige Messung bestätigt. Zudem weist die räumliche Verteilung der Kalibrierfaktoren hier viele Strukturen auf, welche eine gewisse Systematik besitzen. Zum einen scheinen die Kalibrierfaktoren in den Ecken des Diagramms höher zu sein als in den übrigen Punkten. Zum anderen sind die Kalibrierfaktoren linksseitig des Seeds verhältnismäßig niedrig, ohne dass sie simultan rechtsseitig erhöht sind. Somit kann diese Erscheinung nicht alleine durch eine Verschiebung in x-Richtung zustande kommen, sondern ist möglicherweise Folge einer Kippung bzw. einer einseitigen Anhebung des Seeds. Da die Positionierungsungenauigkeiten hier aufgrund des kleinen Abstands zum Seed stärker ins Gewicht fallen, ist auch der Fehler für \overline{K}_P größer als bei den anderen beiden Ebenen.

$$\overline{K}_P = 1,15 \frac{\text{Gy}}{\text{h} \cdot \text{nA}} \pm 10,96 \% \quad (3.21)$$

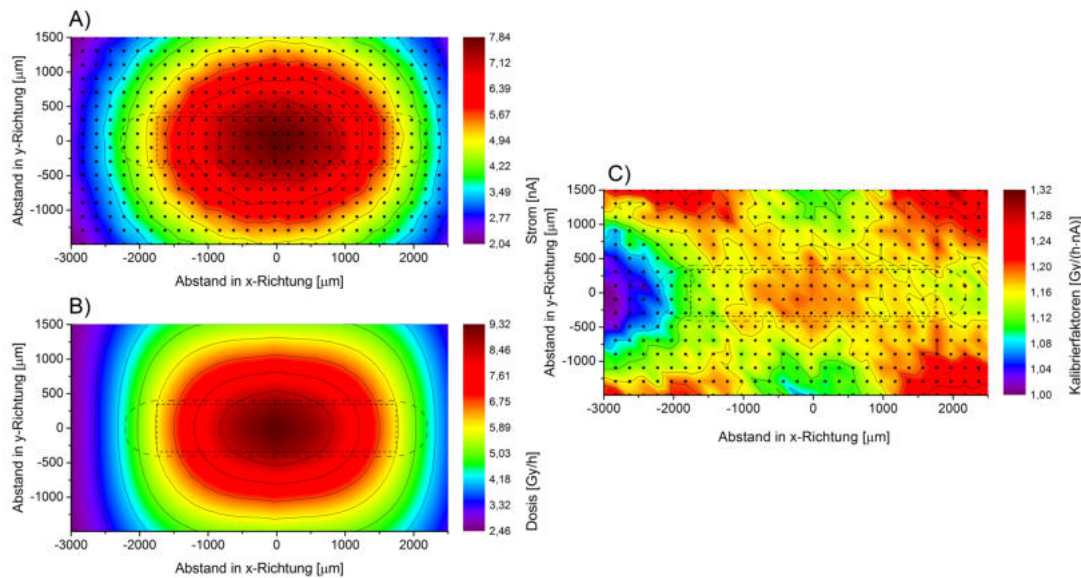


Abbildung 3.8: Konturdiagramme für eine Ebene parallel zur xy-Ebene des Seeds in 1,5 mm Abstand. Gestrichelt eingezeichnet die Position des Seeds und des strahlenden Materials: A) Darstellung des gemessenen Stroms mit den zugehörigen Messpunkten; B) Darstellung der mit Gleichung 3.1 berechneten Dosisleistung; C) Darstellung der Kalibrierfaktorverteilung.

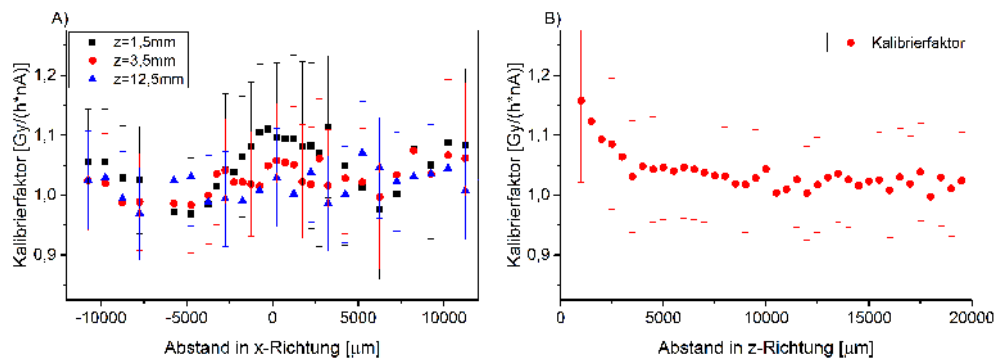


Abbildung 3.9: Darstellung der Quer- und Tiefenverteilung der Kalibrierfaktoren: A) Querverteilungen bei $y=0$; B) Tiefenverteilung.

In Abbildung 3.9 sind die Kalibrierfaktoren mit ihren Fehlern für eine Tiefendosisleistungskurve (Abbildung B) und für drei Querverteilungen entlang der Seedlängsachse (Abbildung A) mit $y=0$ dargestellt. Auch in diesen beiden Abbildungen deutet sich an, dass die Kalibrierfaktoren in unmittelbarer Nähe zum Seed systematisch erhöht sind, sich dieser Effekt aber bei einem Abstand von ca. 3 mm verliert. Der größte Teil der Fehler stammt aus der Berechnung der Wasser-Energiedosisleistung nach TG-43 und wirkt sich auf alle Messpunkte ungefähr gleich aus, wie in 3.3.2 gezeigt wird. Deshalb eignen sich die

3.3. Vergleich von berechneter Wasser-Energiedosisleistung und gemessenem Strom

Darstellungen in Abbildung 3.9 nicht, um zu kontrollieren, ob die Messunsicherheiten richtig abgeschätzt wurden.

Wenn der Plastiksziintillator ein geeignetes Messsystem darstellt, sollten die K_i lediglich stochastischen Schwankungen unterliegen. In Abbildung 3.10 sind die Verteilungen der Kalibrierfaktoren dargestellt. A) ist die Verteilung für die xz-Ebene durch den Mittelpunkt, B) die Verteilung für die Parallelebene in 1,5 mm Abstand und C) die Verteilung für die yz-Ebene durch den Mittelpunkt. An alle drei Verteilungskurven ist eine Gaußfunktion angepasst. In D) sind alle drei Ebenen in einem Histogramm zusammengefasst. Hier ist deutlich die Abweichung der Parallelebene von den anderen beiden zu erkennen.

Unterliegen die K_i ausschließlich stochastischen Schwankungen, dann stammen die

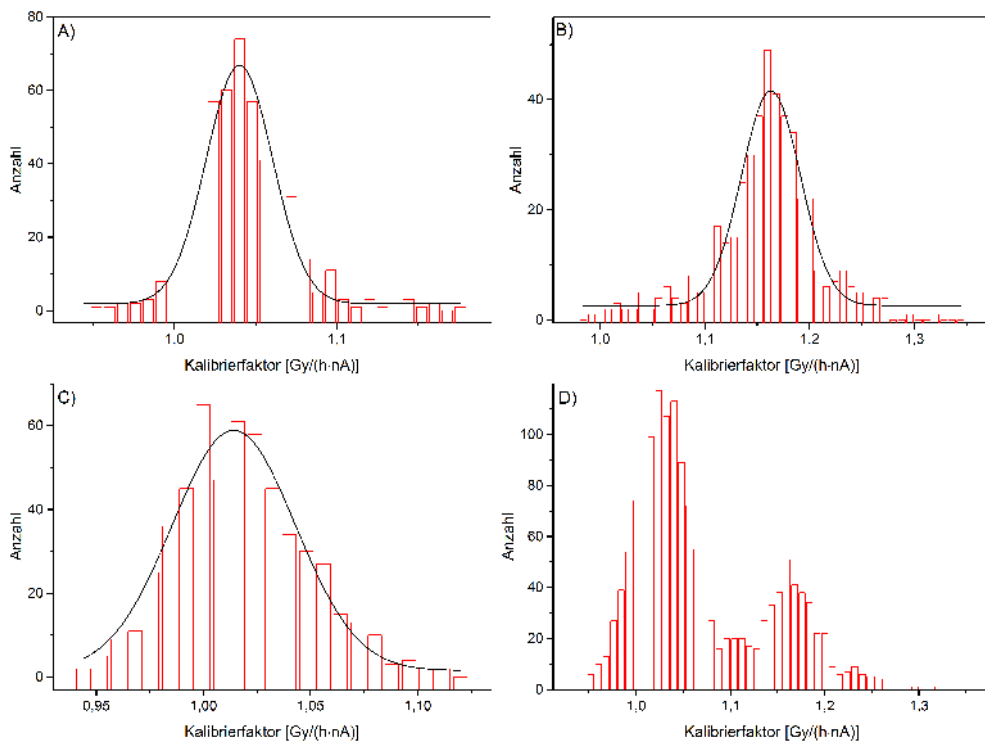


Abbildung 3.10: Darstellung der Verteilungen der Kalibrierfaktoren in Histogrammen mit angepassten Gaußfunktionen: A) xz-Ebene durch den Mittelpunkt; B) Parallelebene zur xy-Ebene des Seeds in 1,5 mm Abstand; C) yz-Ebene durch den Mittelpunkt; D) Alle Ebenen zusammengefasst.

Verteilungen aus einer normalverteilten Grundgesamtheit. Dies wurde mithilfe des Chi-Quadrat-Anpassungstests [Bos12] bei einem Signifikanzniveau von 5 % für jede Ebene überprüft. Für den p-Wert ergab sich bei allen Ebenen $p \ll 5\%$. Resultierend kann ausgeschlossen werden, dass es sich bei einer der Ebenen um eine Stichprobe aus einer normalverteilten Grundgesamtheit handelt.

Dies bestätigt die zuvor formulierten Vermutungen, dass es bei den Messungen zu

systematischen Ungenauigkeiten kam. Diese Ungenauigkeiten werden in Kapitel 3.3.3 diskutiert.

3.3.2 Unsicherheit der Kalibrierfaktoren

In diesem Abschnitt wird erläutert, wie sich die Fehler σ_{K_i} der einzelnen Kalibrierfaktoren und die in Kapitel 3.3.1 angegebenen Fehler $\sigma_{\bar{K}_i}$ der Mittelwerte zusammensetzen. Der Fehler der Kalibrierfaktoren setzt sich aus der statistischen Unsicherheit der gemessenen Ströme und dem Fehler der berechneten Dosisleistung zusammen. Im Folgenden soll nun zunächst bestimmt werden, aus welchen Beiträgen sich der Fehler der berechneten Dosisleistung zusammensetzt. Anschließend wird der Fehler der gemessenen Ströme bestimmt und letztlich der des Kalibrierfaktors.

Unsicherheit der berechneten Wasser-Energiedosisleistung nach TG-43

Für den relativen Fehler $\sigma_{\dot{D}_W}$ der Dosisleistung \dot{D}_W nach TG-43 ergibt sich mithilfe Gauß'scher Fehlerfortpflanzung Gleichung 3.22.

$$\sigma_{\dot{D}_W} = \sqrt{\sigma_{S_k}^2 + \sigma_{\Lambda}^2 + \sigma_P^2 + \sigma_{g_L}^2 + \sigma_F^2} \quad (3.22)$$

Der relative Fehler σ_{S_k} der Kenndosisleistung wurde in Kapitel 3.1.1 bestimmt und beträgt 2,56 %.

Für den relativen Fehler σ_{Λ} der Dosisleistungskonstanten empfiehlt die AAPM einen Wert von 4,8 %.

Bei dem relativen Fehler σ_P wird die in 3.2.3 angenommene Positionierungsunsicherheit des Seeds berücksichtigt. Obwohl dies eigentlich ein Fehler des Strommesswertes ist, wird dieser in der Berechnung der Wasser-Energiedosisleistung berücksichtigt, da es aufgrund der Art der Fortpflanzung für den Gesamtfehler nicht relevant ist, in welchem Term der Fehler berücksichtigt wird, und die Abschätzung der Auswirkung der Positionierungsungenauigkeit in diesem Fall leichter fällt. Zudem wird durch σ_P auch der Fehler der Geometriefunktion $G_L(r, \Theta)$ berücksichtigt, da diese nur von den Ortskoordinaten abhängt. Zur Bestimmung der Auswirkung der Positionierungsungenauigkeit wurde überprüft, wie stark sich diese auf die Wasser-Energiedosisleistung nach TG-43 auswirkt. So wurde für jeden Messpunkt eine maximale prozentuale Abweichung nach oben (obere Schranke α) und nach unten (untere Schranke β) der Wasser-Energiedosisleistung bestimmt. Daraus wurde der Fehler σ_P mithilfe der in [DIN95] empfohlenen Methode (Gleichung 3.23) ermittelt. Die resultierenden Fehler nehmen von ca. 10 % bei einem Abstand von $r = 1,5 \text{ mm}$ auf ca. 1 % bei $r = 12 \text{ mm}$ ab.

$$\sigma_P = \frac{\alpha + \beta}{\sqrt{12}} \quad (3.23)$$

Der Fehler σ_{g_L} der Radialfunktion wird von der AAPM angegeben. Bei einem Abstand von $0,1 \text{ cm} \leq r \leq 1 \text{ cm}$ sinkt der Fehler von 3,5 % auf 0 % linear ab. Bei einem Abstand von $1 \text{ cm} \leq r \leq 5 \text{ cm}$ steigt σ_{g_L} von 0 % auf 4,6 % linear an. Bei $r = 1 \text{ cm}$ gilt $\sigma_{g_L} = 0 \%$. Auch der relative Fehler σ_F der Anisotropiefunktion wird von der AAPM angegeben.

3.3. Vergleich von berechneter Wasser-Energiedosisleistung und gemessenem Strom

Für Winkel $\Theta > 30^\circ$ beträgt gilt $\sigma_F \leq 5\%$ und für Winkel $\Theta \leq 30^\circ$ ungefähr $\sigma_F = 10\%$. Alle Fehlerbeiträge der Wasser-Energiedosisleistung sind in Tabelle 3.3 aufgelistet.

σ_{S_k} [%]	σ_Λ [%] [TG404]	σ_P [%]	σ_{g_L} [%] [TG404]	σ_F [%] [TG404]
2,56	4,8	1-10	0-4,6	5-10

Tabelle 3.3: Fehlerbeiträge der Wasser-Energiedosisleistung nach TG-43.

Unsicherheit der Strommesswerte

Der Fehler σ_{M_i} der Strommesswerte setzt sich aus den statistischen Fehlern $\sigma_{\text{sta.}i}$ der Messwerte, den Schwankungen σ_V der Versorgungsspannung des Photomultipliers und dem Fehler $\sigma_{\text{ank.}}$ der Tagesankopplung zusammen und wird mithilfe von Gleichung 3.24 bestimmt.

$$\sigma_{M_i} = \sqrt{\sigma_{\text{sta.}i}^2 + \sigma_V^2 + \sigma_{\text{ank.}}^2} \quad (3.24)$$

Die Fehlerbeiträge der Unsicherheit der Strommesswerte sind in Tabelle 3.4 aufgelistet.

$\sigma_{\text{sta.}i}$ [%]	σ_V [%] [Mel14]	$\sigma_{\text{ank.}}$ [%] [Mel14]
1-3	0,8	1,5

Tabelle 3.4: Fehlerbeiträge des Strommesswertes.

Unsicherheit der einzelnen Kalibrierfaktoren

Der Fehler σ_{K_i} der Kalibrierfaktoren am i -ten Messpunkt wird mit Gleichung 3.25 bestimmt. Er setzt sich aus den Fehlern σ_{M_i} der Strommesswerte und den Fehlern $\sigma_{\dot{D}_{W_i}}$ der Wasser-Energiedosisleistungen zusammen.

$$\sigma_{K_i} = \sqrt{\sigma_{\dot{D}_{W_i}}^2 + \sigma_{M_i}^2} \quad (3.25)$$

Unsicherheit der Kalibrierfaktor-Mittelwerte

Die σ_{K_i} sind an verschiedenen Messpunkten unterschiedlich groß, da sich die Positionierungsunsicherheit bei verschiedenen Abständen unterschiedlich stark auswirkt. Aus diesem Grund wird bei der Mittelwertsbestimmungen der Kalibrierfaktoren das gewichtete Mittel \bar{K} gebildet (Gleichung 3.18). Der relative Fehler $\sigma_{\bar{K}}$ des Mittelwerts setzt sich aus dem Mittelwert $\bar{\sigma}_{\dot{D}_W}$ der einzelnen Wasser-Energiedosisleistungsfehlern und dem mit Gleichung 3.26 fortgepflanzten Fehler σ_M der Strommesswerte M_i zusammen. Die $\sigma_{\dot{D}_{W_i}}$ werden gemittelt und nicht über Gleichung 3.26 fortgepflanzt, da sie sich aus systematischen Fehlern zusammensetzen, die gleichermaßen für den Mittelwert gelten und deshalb durch eine Fortpflanzung nicht kleiner werden dürfen. $\sigma_{\bar{K}}$ ergibt sich letztlich aus Gleichung 3.27.

$$\sigma_M = \frac{1}{\sqrt{\sum_i \frac{1}{\sigma_{M_i}^2}}} \quad (3.26)$$

$$\sigma_{\bar{K}} = \sqrt{\sigma_M^2 + \bar{\sigma}_{D_w}^2} \quad (3.27)$$

3.3.3 Diskussion systematischer Fehler

Bei den Berechnungen der Wasser-Energiedosisleistungen mithilfe von Gleichung 3.1 wurde immer davon ausgegangen, dass sich der Mittelpunkt des Seeds bei $M = (0|0|0)$ befindet. Wie schon in Kapitel 3.2.2 erläutert, ist es jedoch nicht möglich die Lage des Seeds in der Messapparatur mit letzter Genauigkeit zu bestimmen. Somit kann es aufgrund von Positionierungsfehlern zu systematischen Ungenauigkeiten kommen. Zur Überprüfung eben dieser wird versucht, die in Kapitel 3.3.1 bereits angesprochenen Erscheinungen in den Konturdiagrammen der Kalibrierfaktoren (Abbildungen 3.6-3.8) mithilfe von zwei mit Gleichung 3.1 berechneten Ebenen zu reproduzieren, indem bei einer der beiden Ebenen die Lage des Seeds verändert wird.

Die Erscheinungen rechts und links des Seeds in Abbildung 3.7 sprechen für eine Ver-

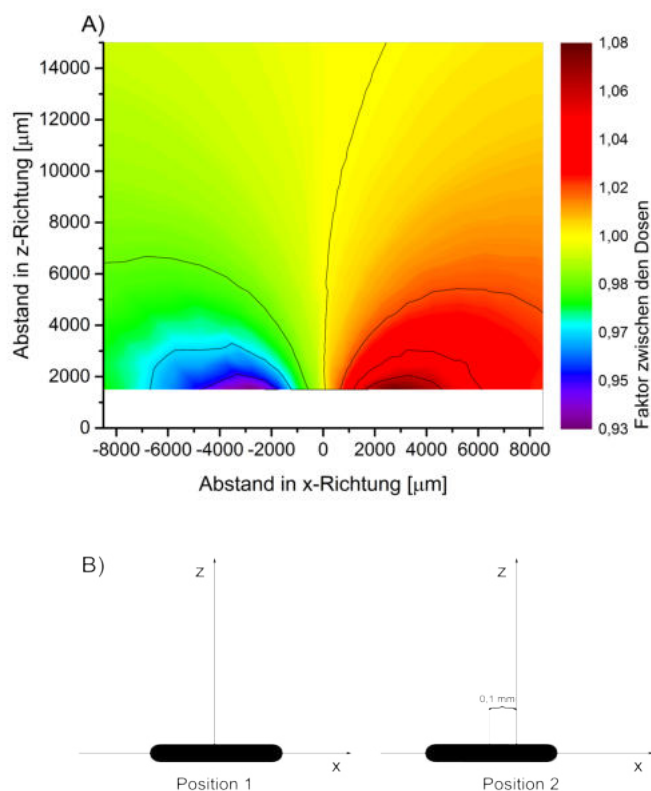


Abbildung 3.11: Reproduktion der Positionierungsfehler durch Verschiebung: A) Das entstehende Konturdiagramm des Faktors zwischen den beiden Dosisleistungen; B) Die beiden Seedpositionen.

3.3. Vergleich von berechneter Wasser-Energiedosisleistung und gemessenem Strom

schiebung nach links entlang der Längsachse relativ zum Mittelpunkt, da die Messwerte linksseitig zu hoch (niedriger Kalibrierfaktor) und rechtsseitig zu niedrig (hoher Kalibrierfaktor) sind. Zur Überprüfung dieser Annahme wurde die Dosisleistung einmal wie in Abbildung 3.7 bestimmt und einmal unter der Annahme, dass sich der Mittelpunkt bei $M = (-100|0|0)$ befindet (Abbildung 3.11 B). Die entstehenden Ebenen wurden nach Gleichung 3.16 durcheinander dividiert, sodass das Konturdiagramm in Abbildung 3.11 (A) entsteht. Hier sind deutlich die zuvor angesprochenen Strukturen (niedriger Faktor linksseitig, hoher Faktor rechtsseitig) zu erkennen. Es ist somit davon auszugehen, dass der Mittelpunkt des Seeds bei den Messungen in negativer x-Richtung verschoben war.

In dem Konturdiagramm der Kalibrierfaktoren in Abbildung 3.8 sind im Gegensatz

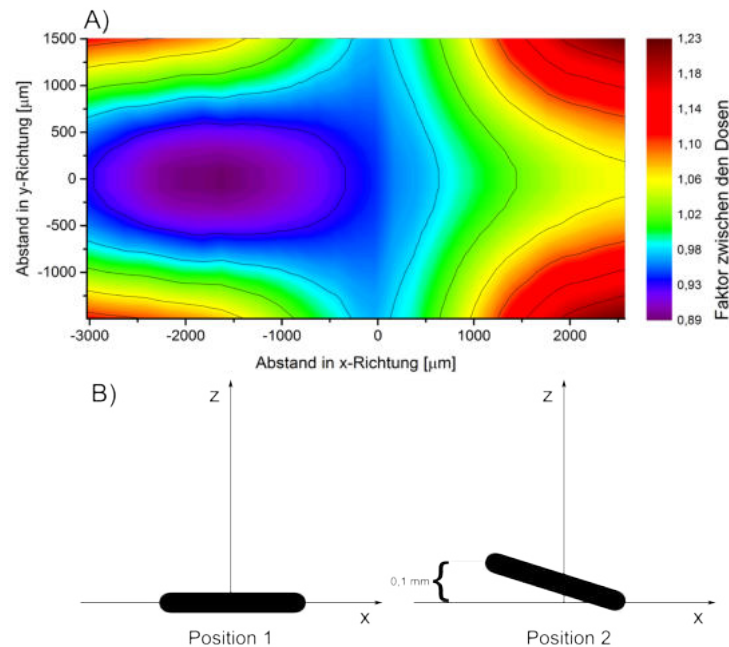


Abbildung 3.12: Reproduktion der Positionierungsfehler durch einseitige Anhebung: A) Das entstehende Konturdiagramm; B) Die beiden Seedpositionen.

zu dem in Abbildung 3.7 die Messwerte nur einseitig erhöht (niedriger Kalibrierfaktor) ohne eine Erniedrigung auf der anderen Seite. Dies spricht dafür, dass der Seed einseitig angehoben war. Dies kann passieren, wenn etwas Silikonmaterial, mit dem der Seed befestigt wird, unter den Seed gelangt. Zur Überprüfung der These wurden wiederum zwei Dosisleistungsverteilungen für diese Ebene mithilfe von Gleichung 3.1 bestimmt. Einmal wie zuvor unter der Annahme, dass sich der Mittelpunkt bei $M = (0|0|0)$ befindet, und ein weiteres Mal unter der Annahme, dass der Seed linksseitig um 0,1 mm angehoben ist (siehe Abbildung 3.12 B). Anschließend wurde daraus das in Abbildung 3.12 A zu sehende Konturdiagramm bestimmt. Hier ist deutlich die einseitige Erhöhung des “Messwertes“ (hier simuliert durch die zweite berechnete Ebene) zu erkennen. Zudem tauchen auch die verhältnismäßig hohen Faktoren in den Ecken des Diagramms

auf, wie in Abbildung 3.8. Somit lässt sich mit großer Sicherheit sagen, dass der Seed während der Messungen in negativer x-Richtung einseitig angehoben war.

Die bisher angesprochenen systematischen Unsicherheiten betrafen die Positionierung und werden in dem Ausmaße, wie sie hier scheinbar auftraten, durch σ_P in der Fehlerangabe des Kalibrierfaktors (Kapitel 3.3.2) bereits berücksichtigt.

Die Erhöhung der Kalibrierfaktoren in unmittelbarer Nähe des Seeds, welche durch alle drei Ebenen verifiziert wurde, kann hingegen nicht allein durch Positionierungsungenauigkeiten erklärt werden. Wie in Kapitel 2.3.2 erläutert mittelt der Szintillator über ein zylindrisches Messvolumen mit dem Radius von 1 mm und der Höhe von 0,47 mm. Dies entspricht einer Faltung der Messwerte durch eine Rechteckfunktion mit den Ausmaßen des Messvolumens. Diese Mittelung ist für stark exponentiell abfallende Prozesse jedoch nicht korrekt, sodass in Bereichen in denen dieser Abfall besonders stark ist, also nahe des Seeds, der Messwert niedriger ausfällt als es für die Dosis in der Mitte des Messvolumens erforderlich wäre. Zu überprüfen wäre, ob sich dieser Effekt mit einer Entfaltung der Messwerte eliminieren ließe. Da diese für jeden Messpunkt in alle drei Raumrichtungen durchgeführt werden müsste, war dies im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr möglich.

In Abbildung 3.13 sind die Kalibrierfaktoren der drei Ebenen unter Ausschluss aller Kalibrierfaktoren für Punkte mit einem Abstand < 3 mm noch einmal in einem Histogramm mit einer angepassten Gaußkurve dargestellt. Mithilfe des Chi-Quadrat-Anpassungstests ergibt sich für diese Verteilung ein p-Wert von $p = 19\%$. Bei dem gewählten Signifikanzniveau von 5% kann für diese Verteilung nicht ausgeschlossen werden, dass es sich um eine Stichprobe aus einer normalverteilten Grundgesamtheit handelt. Die Standardabweichung der Gaußfunktion beträgt $\sigma = 0,029 \text{ Gy}/(\text{h nA})$. Die relative Abweichung vom Mittelwert (Gleichung 3.28) beträgt $2,82\%$. Dies entspricht in etwa den statistischen Fehlern des Strommesswertes (vgl. Tabelle 3.4).

Folglich bleibt die Hypothese bestehen, dass die Streuung der Kalibrierfaktoren bei Abständen ≥ 3 mm primär stochastischer Natur sind und sich der Plastiksintillationsdetektor BC400 aus Kapitel 2.3.2 hier für die Messung der Wasser-Energiedosisleistung von ^{125}I eignet. Der Mittelwert $\overline{K}_{125\text{I}}$ des Kalibrierfaktors für diese Ebene beträgt:

$$\overline{K}_{125\text{I}} = 1,03 \frac{\text{Gy}}{\text{h} \cdot \text{nA}} \pm 7,91\% \quad (3.28)$$

Für die Abstände < 3 mm kann eine Eignung des Szintillationsdetektorsystems weder verifiziert, noch ausgeschlossen werden. Es spricht jedoch einiges dafür, dass die auftretenden Effekte durch eine Entfaltung eliminiert werden könnten.

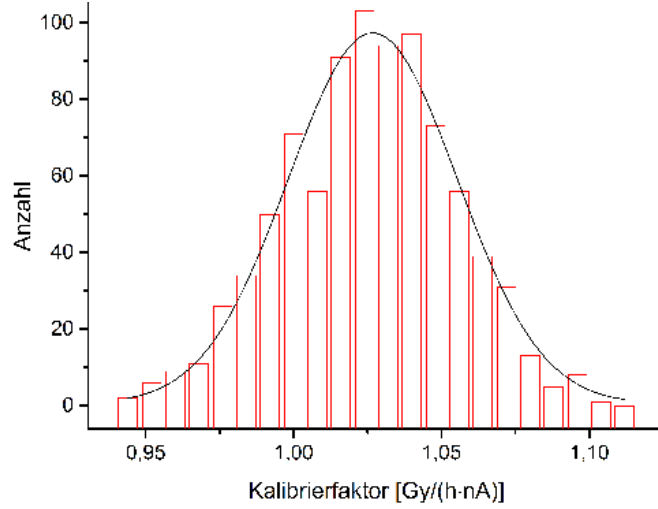


Abbildung 3.13: Verteilung aller Kalibrierfaktoren unter Ausschluss der Werte für Punkte mit einem Abstand < 3 mm zum Seed. Anzahl der verwendeten Messwerte: 876.

3.3.4 Verhältnis zwischen den Kalibrierfaktoren von ^{106}Ru und ^{125}I

Um die in der Einleitung erwähnten Ergebnisse in [FAW⁺04] mit den hier ermittelten vergleichen zu können, muss das Verhältnis K_{rel} zwischen den Kalibrierfaktoren $K_{^{106}\text{Ru}}$ von ^{106}Ru und $\overline{K}_{^{125}\text{I}}$ von ^{125}I gebildet werden (Gleichung 3.29).

$$K_{\text{rel}} = \frac{\overline{K}_{^{125}\text{I}}}{K_{^{106}\text{Ru}}} \quad (3.29)$$

Für das hier verwendete Messsystem wurde $K_{^{106}\text{Ru}}$ von Frau Dr. M. Eichmann zu

$$K_{^{106}\text{Ru}} = 0,32 \frac{\text{Gy}}{\text{h} \cdot \text{nA}} \pm 4,6\% \quad (3.30)$$

bestimmt [Mel14]. Für das Verhältnis K_{rel} der beiden Kalibrierfaktoren $K_{^{106}\text{Ru}}$ und $\overline{K}_{^{125}\text{I}}$ ergibt sich somit:

$$K_{\text{rel}} = 3,22 \pm 9,15\% \quad (3.31)$$

Der in [FAW⁺04] angegebene Wert beträgt $K_{\text{rel,Flueh.}} = 3,26 \pm 14,42\%$. Die beiden Verhältnisse liegen innerhalb der Fehlergrenzen des jeweils anderen und sind somit gut miteinander vereinbar.

Kapitel 4

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die Klärung der Frage, ob sich der Plastiksintillationsdetektor BC400 zur Messung der Wasser-Energiedosisleistung von ^{125}I -Quellen, welche in der Brachytherapie eingesetzt werden, eignet, obwohl das Szintillatormaterial für γ -Strahlung eine Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens im Vergleich zu dem von Wasser besitzt.

Um die Frage beantworten zu können wurde zunächst die Wasser-Energiedosisleistung eines I25.S16 Seeds an mehreren Raumpunkten mithilfe des durch die TG-43 aufgestellten Formalismus berechnet.

Die für die Berechnung notwendige Kenndosisleistung S_k wurde mithilfe einer Schachtkammer gemessen. Zur Überprüfung der Messgenauigkeit der Schachtkammer wurde diese Messung mit acht verschiedenen ^{125}I -Quellen des Typs I25.S16 der Firma Eckert und Ziegler BEBIG durchgeführt. Aus den acht Einzelwerten wurde der Klassenmittelwert $\bar{S}_{k,\text{exp}}$ bestimmt und dieser mit der Herstellerangabe verglichen. Mithilfe der Schachtkammer konnte $\bar{S}_{k,\text{exp}}$ zu $25,63 (\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2)/\text{h} \pm 2,57\%$ bestimmt werden. Dies entspricht der Angabe des Herstellers BEBIG (siehe Zertifikat im Anhang A). Zudem lieferte die Schachtkammer auch nach Neupositionierungen der Quellen eine hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Anschließend wurde ein I25.S16 Seed mithilfe des Plastiksintillationsdetektors BC400 vermessen. Um die Messwerte mit den nach TG-43 berechneten Werten vergleichen zu können, ist es erforderlich, die Position des Mittelpunkts der Quelle relativ zum Messpunkt zu bestimmen. Dies war jedoch lediglich mit einer Genauigkeit von $\pm 0,15$ mm entlang der Längs- und Querachse und $\pm 0,1$ mm entlang der Vertikalachse der Quelle möglich. Dies führte bei kleinen Abständen zur Quelle (etwa 1,5 mm) zu Fehlern der Dosisleistung von bis zu 9%, während es bei großen Abständen (ab 1 cm) mit Fehlern von $< 1\%$ kaum noch ins Gewicht fiel.

Zur Beurteilung der Szintillatormessungen wurden Kalibrierfaktoren für die Messpunkte zwischen Messwert und berechneter Wasser-Energiedosisleistung bestimmt und die räumliche Verteilung analysiert. Fast alle systematisch auftretenden Erscheinungen konnten auf die Ungenauigkeit der Quellenpositionierung zurückgeführt werden. Le-

diglich der Bereich für Abstände < 3 mm zur Quelle lieferte bei allen Messungen einen verhältnismäßig großen Kalibrierfaktor und somit einen vergleichsweise zu niedrigen Messwert. Dies ist womöglich auf die Mittelung des Szintillators über ein zylindrisches Messvolumen mit einem Radius von 1 mm und einer Höhe von 0,47 mm zurückzuführen. Diese Mittelung ist bei stark exponentiell abfallenden Prozessen nicht korrekt, da sie einen geringeren Wert als den in der Mitte des Volumens liefert. Werden die Werte der Kalibrierfaktoren für Abstände < 3 mm unberücksichtigt gelassen, konnte mithilfe des Chi-Quadrat-Anpassungstests nicht ausgeschlossen werden, dass es sich um eine Stichprobe aus einer normalverteilten Grundgesamtheit handelt. Der p-Wert beträgt $p = 19\%$ bei einer Signifikanzschwelle von 5% . Außerdem beträgt die Standardabweichung σ der Gaußkurve für die Verteilung dieser Werte $\sigma = 2,82\%$. Dies liegt in der Größenordnung der statistischen Messfehler der Szintillatormessungen. Somit kann angenommen werden, dass die Streuungen der Kalibrierfaktoren für Abstände ≥ 3 mm rein stochastischer Natur sind. Folglich eignet sich der Plastiksintillationsdetektor BC400 für die Messung der Wasser-Energiedosisleistung einer ^{125}I -Brachytherapiequelle bei Abständen ≥ 3 mm zur Quelle. Der Mittelwert $\bar{K}_{125\text{I}}$ der Kalibrierfaktoren für diese Abstände beträgt $\bar{K}_{125\text{I}} = 1,03 \text{ Gy}/(\text{h} \cdot \text{nA}) \pm 7,91\%$. Für das Verhältnis zwischen den Kalibrierfaktoren von ^{106}Ru und ^{125}I ergibt sich $K_{\text{rel}} = 3,22 \pm 9,15\%$. Dies ist mit dem in [FAW⁺04] angegebenen Wert von $K_{\text{rel,Flueh.}} = 3,26 \pm 14,42\%$ sehr gut vereinbar. Auch der Fehler des Kalibrierfaktors von $7,91\%$ ist in der medizinischen Anwendung als klein genug zu bewerten, da die Fehlerquellen des Operateurs vergleichsweise groß sind.

Da die verwendeten Applikatoren bei Augentumoren jedoch lediglich 1,5 mm dick sind und das zu bestrahlende Volumen unmittelbar dahinter beginnt, ist auch der Bereich $1,5 < 3$ mm bei brachytherapeutischen Anwendungen von Bedeutung. Für diesen Bereich konnte die Eignung des Szintillationsdetektors BC400 in dieser Arbeit weder verifiziert noch ausgeschlossen werden. Es deutet jedoch einiges darauf hin, dass der Szintillator aufgrund der Mittelung über das Messvolumen hier zu geringe Messwerte liefert.

Es wäre nun zu überprüfen, ob sich dieser Effekt durch eine Entfaltung mithilfe einer Funktion mit den Ausmaßen des Messvolumens eliminieren ließe. Da dies für jeden Messpunkt in allen drei Raumrichtungen durchgeführt werden muss, war dies im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr möglich.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Energieabhängigkeit der Wechselwirkungsarten von Photonen in Wasser	5
2.2	Geometrie des verwendeten IsoSeeds	7
2.3	Innenleben der verwendeten Schachtkammer	8
2.4	Messtisch für die Szintillatormessungen	10
2.5	Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens des Szintillatormaterials im Verhältnis zu dem von Wasser	12
2.6	Schematischer Aufbau des Szintillationskanals	12
3.1	Darstellung der für den Formalismus der TG-43 relevanten Größen	15
3.2	Darstellung der Geometriefunktion	20
3.3	Darstellung des Verlaufs der radialen Dosisfunktion	21
3.4	Darstellung der Anisotropiefunktion	22
3.5	Verfahren zur Lagebestimmung des Seedmittelpunkts	24
3.6	Konturdiagramme für die yz-Ebene durch den Mittelpunkt des Seeds	26
3.7	Konturdiagramme für die xz-Ebene durch den Mittelpunkt des Seeds	27
3.8	Konturdiagramme für eine Ebene parallel zur xy-Ebene des Seeds in 1,5 mm Abstand	28
3.9	Darstellung der Quer- und Tiefenverteilung der Kalibrierfaktoren	28
3.10	Darstellung der Verteilungen der Kalibrierfaktoren in Histogrammen mit angepasster Gaußfunktion	29
3.11	Reproduktion der Positionierungsfehler durch Verschiebung	32
3.12	Reproduktion der Positionierungsfehler durch einseitige Anhebung	33
3.13	Verteilung aller Kalibrierfaktoren unter Ausschluss der Werte für Punkte mit einem Abstand < 3 mm zum Seed. Anzahl der verwendeten Messwerte: 876.	35
A.1	Zertifikat für I25.S16 Seeds der Firma Eckert und Ziegler BEBIG Seite 1	38
A.2	Zertifikat für I25.S16 Seeds der Firma Eckert und Ziegler BEBIG Seite 2	39
B.1	Kalibrierschein der Schachtkammer der Firma PTW Seite 1	40
B.2	Kalibrierschein der Schachtkammer der Firma PTW Seite 2	41

Tabellenverzeichnis

2.1	Zusammensetzung der BC400 Szintillationsfasern und Funktion der einzelnen Bestandteile [Bic].	11
3.1	Vergleich des Klassenmittelwertes $\bar{S}_{k,\text{exp}}$ der gemessenen Kenndosisleistung mit dem vom Hersteller angegebenen Mittelwert $\bar{S}_{k,\text{BEB}}$	18
3.2	Fehlerbeiträge der Kenndosisleistung	18
3.3	Fehlerbeiträge der Wasser-Energiedosisleistung nach TG-43.	31
3.4	Fehlerbeiträge des Strommesswertes.	31

Literaturverzeichnis

- [Bam96] BAMBYNEK, M.: *Entwicklung eines Mehrkanal-3D-Dosimetriesystems basierend auf Plastikszintillatoren und Simulationsrechnungen zur Optimierung der Dosisverteilung für Augentumorthherapie mit ^{125}I* , TU Dortmund, Diplomarbeit, 1996
- [Bar] *Technische Daten des verwendeten Barometers GMH 3160 von Greisinger electronic.* <http://greisinger.de/files/upload/de/produkte/kat/23.pdf>, [Stand: 10.07.2014],
- [BEB] *Internetseite des Quellenherstellers Firma Eckert und Ziegler Bebig.* <http://www.bebig.eu/products/ophthalmic.html>, [Stand: 10.07.2014],
- [Bic] *Internetseite des Herstellers des Szintillators, Saint-Gobain.* <http://www.detectors.saint-gobain.com>,
- [Bos12] BOSCH, K.: *Statistik für Nichtstatistiker-Zufall und Wahrscheinlichkeit*. Oldenbourg Verlag, 2012 (6. Auflage)
- [DIN95] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMIERUNG E.V. (Hrsg.): *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*. DIN Deutsches Institut für Normierung e.V., 1995
- [Eic09] EICHMANN, Marion: *Entwicklung eines hochpräzisen Dosimetriesystems zur Messung der Oberflächendosisverteilung von Augenapplikatoren*, TU Dortmund, Dissertation, 2009
- [Ele] *Technische Daten des verwendeten Elektrometers PTW UNIDOS E bei den Schachtkammernmessungen.* <http://www.pi-medical.eu/download/Unidos%20E.pdf>, [Stand: 10.07.2014],
- [FAW+04] FLÜHS, Dirk ; ANASTASSIOU, Gerasimos ; WENIG, Jan ; SAUERWEIN, Wolfgang ; BORNFELD, Norbert: The design and the dosimetry of bi-nuclide radioactive ophthalmic applicators. In: *Medical Physics* 6. (2004)
- [FHIW96] FLÜHS, D. ; HEINTZ, M. ; INDENKÄMPEN, F. ; WIECZOREK, C.: Direct reading measurement of absorbed dose with plastic scintillators-The general concept and applications to ophthalmic plaque dosimetry. In: *Medical Physics* 23. (1996)

- [Iod] *Internetseite LBNL Nuclear Data Search.* <http://www.nuclear.lu.se/nucleardata/toi>, [Stand: 10.07.2014],
- [Kra11] KRAUSE, Thorsten: *Entwicklung eines Messverfahrens zur Dosimetrie von Brachytherapiequellen unter spezieller Berücksichtigung der Rückstreuung von ^{125}I -Seeds*, TU Dortmund, Diplom, 2011
- [Kri12a] KRIEGER, H.: *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes*. Springer Verlag, 2012 (4. Auflage)
- [Kri12b] KRIEGER, H.: *Strahlungsmessung und Dosimetrie*. Springer Verlag, 2012 (2. Auflage)
- [Mel14] *M. Ebenau, mündliche Mitteilung.* Juni 2014
- [Ori] *Interpolationsmethode 'Triangulation' bei Konturdiagrammen.* http://www.originlab.de/www/helponline/Origin/de/UserGuide/Contour_Graphs.html, [Stand: 10.07.2014],
- [OzR] *Definitionen von Dosisbegriffen.* <http://ozradonc.wikidot.com/radioactivity-definitions>, [Stand: 10.07.2014],
- [PTW14] PTW (Hrsg.): *Benutzerhandbuch der verwendeten Schachtkammer Typ 33005*. PTW, 2014
- [Sut] *Vorlesungsskriptum der Medizinphysik 2 von Herrn Prof. D.Suter an der TU-Dortmund.* <http://e3.physik.uni-dortmund.de/suter/Vorlesung/MedizinphysikII13/MedizinphysikII13.html>,
- [TG404] Update of AAPM Task Group No. 43 Report: A revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations. (2004)
- [The] *Technische Daten des verwendeten Thermometers GMH 2000 von Greisinger electronic.* http://greisinger.de/files/upload/de/produkte/bda/old/GMH2000_d.pdf, [Stand: 10.07.2014],