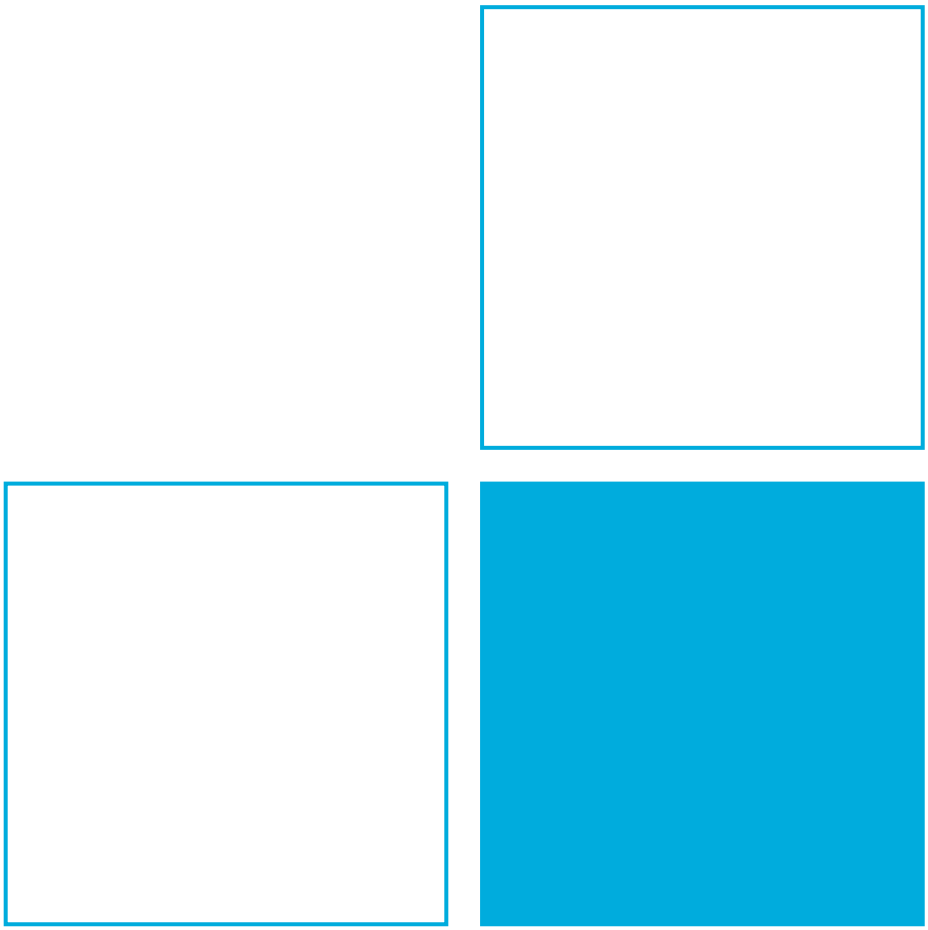
PTB bericht Dos-61
Mai 2020

Friederike Grote

Metrologie für die Brachytherapie: Neuer Kalibriermessplatz für Sekundärnormale



ISSN 0172-7095
ISBN 978-3-95606-523-1

Die Serien der PTB-Berichte:

Dosimetrie	PTB-Dos
Elektrizität	PTB-E
Elektronische Entwicklung	PTB-EW
Fertigungsmesstechnik	PTB-F
Informationstechnik	PTB-IT
Mechanik und Akustik	PTB-MA
Medizinische Messtechnik	PTB-MM
Neutronenphysik	PTB-N
Optik	PTB-Opt
Physikalische Grundlagen	PTB-PG
Radioaktivität	PTB-Ra
Thermodynamik	PTB-Th
Explosionsschutz	PTB-Ex
Chemische Physik	PTB-CP

Eingestellte Serien:

Akustik	(bis 1985)	PTB-Ak
Forschungs- und Meßreaktor Braunschweig	(bis 1988)	PTB-FMRB
Institut Berlin	(bis 1985)	PTB-IB
Mechanik	(bis 1985)	PTB-Me
Neutronendosimetrie	(bis 1988)	PTB-ND
Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle	(bis 1989)	PTB-SE
Wärme	(bis 3/97)	PTB-W
Literaturzusammenstellungen und Veröffentlichungshinweise	(bis 2001)	PTB-L
Akkreditierung, Qualitätsmanagement, Zertifizierung	(bis 2003)	PTB-AQZ
Atomphysik	(bis 2003)	PTB-APh
Internationale Organisation für Gesetzliches Messwesen	(bis 2003)	PTB-OIML
Thermodynamik und Explosionsschutz	(bis 2003)	PTB-ThEx
Technisch-Wissenschaftliche Dienste	(bis 2003)	PTB-TWD

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Dosimetrie
PTB-Dos-61
Braunschweig, Mai 2020

Friederike Grote

Metrologie für die Brachytherapie: Neuer Kalibriermessplatz für Sekundärnormale

ISSN 0172-7095
ISBN 978-3-95606-523-1

Herausgeber:
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21
Telefax: (05 31) 592-92 92
www.ptb.de

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis **III**

1 Einleitung **1**

2 Grundlagen **3**
2.1 Strahlentherapie . . . 3
2.2 Brachytherapie . . . 4
2.3 Dosimetrie . . . 7
2.4 Kalibrierungen . . . 10
2.4.1 Quellkalibrierung . . . 11
2.4.2 Schachtionisationskammerkalibrierung . . . 15
2.5 Robotik . . . 22
2.5.1 Mechanischer Aufbau . . . 22
2.5.2 Programmierung . . . 25

3 Hardware **27**
3.1 Gesamtaufbau des Messplatzes . . . 27
3.2 Kawasaki-Roboter . . . 30
3.3 Afterloading-Gerät . . . 33
3.4 Messelektronik . . . 35

4 Software **39**
4.1 Entwicklungsumgebung und Bibliothek . . . 39
4.2 Allgemeiner Aufbau der Software . . . 40
4.3 Hardware . . . 46
4.3.1 Roboter . . . 47
4.3.2 Afterloading-Gerät . . . 50
4.4 Datenstruktur . . . 54
4.5 Teilprogramm für den Messablauf . . . 57
4.6 Teilprogramm für die Datenauswertung . . . 61

5 Validierung **68**
5.1 Messung der Roboterposition . . . 68
5.2 Messung der Quellposition . . . 69
5.3 Leckstrommessung . . . 70
5.4 Elektrometermessungen . . . 71
5.5 Testprotokoll . . . 72
5.5.1 Kalibrierung von HDR-Quellen . . . 72
5.5.2 Kalibrierung von Schachtkammern . . . 76

5.6 Ermittlung der Messunsicherheit 79

6 Zusammenfassung **80**

Literaturverzeichnis **83**

Abbildungsverzeichnis **87**

Tabellenverzeichnis **89**

A Anhang **90**
A.1 Kalibrierschein für Brachytherapie-HDR-Quellen 91
A.2 Kalibrierschein für Schachtionisationskammern 95
A.3 Afterloaderbefehle 100
A.4 Messfenster 102
A.5 Datenstrukturen 103
A.6 Testprotokoll 111
A.7 Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) 114
A.7.1 Messunsicherheit der Kalibrierung einer Iridium-192 (^{192}Ir)-Quelle . . 114
A.7.2 Messunsicherheit der Kalibrierung einer Schachtionisationskammer mit einer ^{192}Ir-Quelle 115

Danksagung **116**

Abkürzungsverzeichnis

Bq Becquerel . . . 6

CMC calibration and measurement capabilities . . . 11

^{60}Co Cobalt-60 . . . 1

DNA Desoxyribonukleinsäure . . . 3

DPP dose per puls . . . 20

GUM Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement . . . II

HDR High Dose Rate . . . 1

^{125}I Jod-125 . . . 1

^{192}Ir Iridium-192 . . . II

Kerma kinetic energy released per unit mass . . . 3

LDR Low Dose Rate . . . 1

MDR Medium Dose Rate . . . 5

PDR Pulsed Dose Rate . . . 6

PTB Physikalisch Technische Bundesanstalt . . . 1

RAKR Reference Air Kerma Rate . . . 6

TCP Tool Center Point . . . 23

1 Einleitung

Die Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) ist das nationale Metrologieinstitut der Bundesrepublik Deutschland und somit die oberste Instanz im Bereich Messwesen [1]. Sie gliedert sich in neun Abteilungen. Die Abteilung sechs befasst sich mit dem Bereich „Ionisierende Strahlung“. Diese Arbeit wird in der Arbeitsgruppe 6.34 „Dosimetrie für Brachytherapie und Betrastrahlenschutz“ gefertigt. Sie befasst sich mit dem Aufbau eines neuen Messstands für die High Dose Rate (HDR)-Brachytherapie.
Diese Arbeit wird in Zusammenarbeit der PTB mit der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig erarbeitet.
Für die Metrologie im Bereich Brachytherapie kalibriert die PTB Brachytherapiequellen und Schachtionisationskammer, welche als Transfernormale genutzt werden. Brachytherapiequellen werden in Low Dose Rate (LDR) und High Dose Rate (HDR) unterschieden. LDR-Quellen, sogenannte Seeds, sind kleine Metallkapseln mit Jod-125 (^{125}I) im Inneren. HDR-Quellen sind kleine Metallkapseln mit Cobalt-60 (^{60}Co) oder ^{192}Ir im Inneren, welche an der Spitze eines Metalldrahtes angebracht sind. Mithilfe des Drahtes ist eine automatisierte Positionierung der stark radioaktiven Quellen möglich. Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Messstand neu entwickelt werden, der für die Kalibrierung von HDR-Quellen und Schachtionisationskammern genutzt werden kann. Dabei sollen die Messabläufe, die Messgenauigkeit und der Automatisierungsgrad des aktuellen Messstands verbessert werden.
Die Instandhaltung des aktuellen Messplatzes führte gehäuft zu Ausfallzeiten des Messbetriebes. Einzelne Module konnten nach Ausfall zunehmend nicht mit gleichen Modulen ersetzt werden. Die Kompatibilität mit neueren Modulen muss über umfangreiche Qualitätssicherungsprozesse sichergestellt werden. Somit ist die Neuentwicklung auf dem Stand der Technik und mit höherem Automatisierungsgrad wirtschaftlicher. Zudem können Messungen mit dem aktuellen Messstand nur während der Anwesenheit der Operateure durchgeführt werden, da die Quelle nach den Messungen nicht automatisch in den Quelltresor zurück gezogen wird. Die Strahlenbelastung außerhalb des Messraumes muss unterhalb der Grenzwerte für das Einrichten eines Überwachungsbereiches liegen. Daher darf sich die Quelle nur während der Messungen freistrahlend im Raum befinden. Daher muss nach einer Messung die Quelle unverzüglich vom Bediener über die Afterloading-Steuerung in den Tresor transportiert werden. Der Messstand muss den Strahlenschutz des Personals gewährleisten. Zusätzlich ist sicherzu-

stellen, dass die Messunsicherheit mindestens den Anforderungen des aktuellen Messstands entspricht. Die Automatisierung des Messablauf hat zusätzlich zur Messunsicherheit eine hohe Priorität. Für die Wartung des Messstandes ist ein modularer Aufbau der Hard- und Software zu bevorzugen. Diese Module sollten zusätzlich kompatibel zu den weiteren Anlagen des Fachbereichs 6.3 sein. Für den modularen Aufbau der Software ist das, im Fachbereich bereits genutzte, Quad-Core Modell zu nutzen.
Die für die Kalibrierung benötigten Messabläufe sind zunächst zu analysieren und zu optimieren. Die Hardwarekomponenten für den Messstand sind zusammenzustellen und per Software anzusteuern. Anschließend ist die Messsoftware zu implementieren und zu validieren. Dabei muss die Messunsicherheit bestimmt werden.
In Kapitel zwei werden die Grundlagen der Strahlentherapie und der Messungen erläutert. Darauf folgt die Darstellung der wesentlichen Hardwarekomponenten, wie dem Afterloading-Gerät und dem Roboter, in Kapitel drei. Für die Softwarebeschreibung wird zunächst die Entwicklungsumgebung und der allgemeine Aufbau der Software dargestellt. Zudem werden die einzelnen Komponenten der Software, wie die Hardwareansteuerung, der Messablauf und die Auswertung dokumentiert (Kapitel 4). Abschließend wird der neue Messstand anhand verschiedener Testszenarien validiert und der Einsatz für den Routine-Kalibrierbetrieb überprüft (Kapitel 5). Zum Abschluss werden die Erkenntnisse der Masterarbeit zusammengefasst.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für die Programmierung des Messstandes notwendigen Grundlagen erörtert. Zunächst wird auf die Strahlentherapie und auf die Brachytherapie-Grundlagen eingegangen. Anschließend werden die einzelnen Messverfahren zum Qualitätsmanagement in der Brachytherapie und die elementaren Grundlagen der Robotik beschrieben.

2.1 Strahlentherapie

Die Strahlentherapie ist in der Tumortherapie eine der drei wesentlichen Behandlungsmethoden. Sie wird sowohl eigenständig als auch in Kombination mit Chemotherapie und chirurgischen Eingriffen eingesetzt [2]. Dieser Einsatz in der Therapie ist nur durch die Mechanismen der Strahlenwirkung auf Zellen möglich. Der therapeutische Effekt beruht dabei auf der höheren Strahlungsempfindlichkeit von Tumorzellen, aufgrund der höheren Teilungsrate. Zusätzlich wird versucht das Tumorgewebe stärker zu bestrahlen. Die Energieübertragung teilt sich in vier Phasen (physikalische, physikalisch-chemische, biochemische und biologische Phase). Zunächst geschieht der physikalische Prozess der Absorption, dieser führt zu Wärme, Anregung oder Ionisation in einer Zelle. In der anschließenden physikalisch-chemischen Phase kann es zu direkten oder indirekten Schäden durch freie Radikale an der Zelle kommen. Die chemischen und biochemischen Prozesse der Hydroxylierung, Oxidation und Reduktion laufen in der biochemischen Phase ab. Dabei entstehen Veränderungen an organischen Molekülen wie unter anderem an der Desoxyribonukleinsäure (DNA). Die abschließende biologische Phase umfasst die biologischen Auswirkungen der physikalischen und chemischen Abläufe. Dabei kann es zu Mutation oder Tod der Zelle kommen [3].
Um die physikalische Einwirkung der Strahlung zu quantifizieren, werden Dosisgrößen definiert. Die Dosisleistung beschreibt dabei die Dosis pro Zeiteinheit. Es wird zwischen „kinetic energy released per unit mass (Kerma)“ und Energiedosis unterschieden. In Abbildung 2.1 ist der Unterschied zwischen Kerma und Energiedosis dargestellt. Die Energiedosis ist der Differentialquotient der mittleren Energie, die durch ionisierende Strahlung auf das Material in einem Volumenelement übertragen wird und der Masse des Volumens. Kerma ist der Differentialquotient aus der Summe der Anfangswerte der kinetischen Energie aller geladenen

Teilchen, die in einem Volumenelement erzeugt werden und der Masse des Volumens [4].

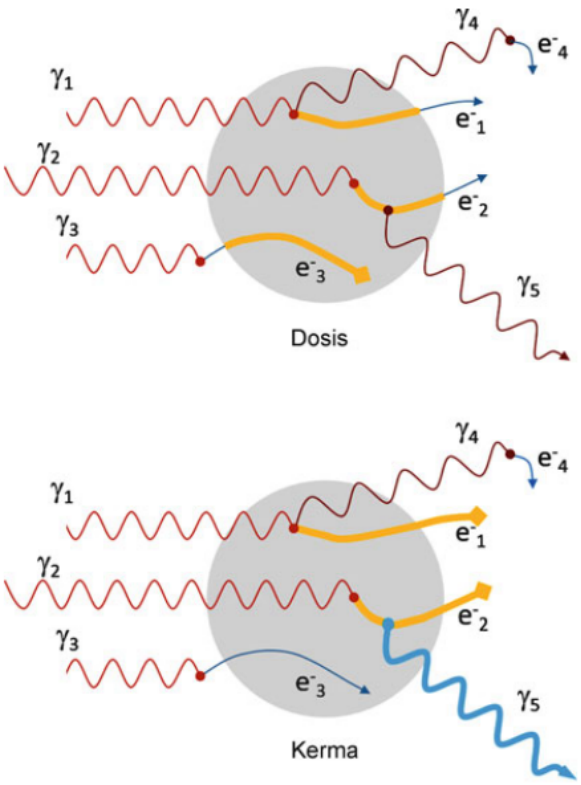


Abbildung 2.1: Darstellung der Definition von Energiedosis und Kerma nach [2]

In Abbildung 2.1 ist das betrachtete Volumen in grau dargestellt. In gelb sind die Beiträge der Energie dargestellt, welche für die jeweilige Dosisgröße betrachtet werden. Für die Energiedosis wird die gesamte kinetische Energie, welche von den Photoelektronen im Volumen deponiert wird betrachtet, unabhängig davon wo diese Elektronen erzeugt werden. Für Kerma wird die kinetische Energie aller Elektronen betrachtet, die im betrachteten Volumen durch den ersten Wechselwirkungsprozess freigesetzt werden. Bei der Angabe der Dosisgrößen ist es notwendig, das Bezugsmaterial, beispielsweise Luft oder Wasser, anzugeben. Die Messgrößen in der Brachytherapie sind für Messungen im Wasser oder in wasseräquivalent Phantomen die Wasser-Energiedosis, für Messungen in Luft wird die Luftkerma gemessen. Die Einheit für die beiden Messgrößen ist das Gray (Gy), d.h. Joule pro Kilogramm [5].

2.2 Brachytherapie

Bei der Brachytherapie werden eine oder mehrere verkapselte Strahlungsquellen direkt in oder nahe an das Tumorgewebe gebracht, um den starken Dosisabfall im Nahbereich einer radioaktiven Quelle zu nutzen. Die Bezeichnung wird von dem altgriechischen Begriff „bra-

chys“, was „kurz“ bedeutet, abgeleitet [2]. Der Abstand zwischen Quelle und zu bestrahlendem Gewebe beträgt dabei weniger als zehn Zentimeter [4]. Wesentlicher Vorteil gegenüber der Bestrahlung von außerhalb des Körpers ist, dass gesundes Gewebe, welches in der Nähe des Tumors liegt, besser geschont werden kann. Dies ist insbesondere wichtig, wenn es sich dabei um besonders strahlenempfindliche Körperteile handelt wie z.B. den Sehnerv.
Die Anwendungstechniken mit Radium wurden im frühen 20. Jahrhundert entwickelt. Die Entwicklungen von künstlich erzeugten Radionukliden im Jahr 1934 und von Afterloading-Geräten Mitte des 20. Jahrhunderts ermöglichten höhere Flexibilität und den notwendigen Strahlenschutz für das medizinische Personal [6]. Afterloading-Geräte werden in Abschnitt 3.3 beschrieben. Die Brachytherapie wird hauptsächlich für Tumore des Gebärmutterhalses, der Prostata, der Brust, der Haut und im Auge eingesetzt [7].
Durch die steilen Dosisgradienten ist die korrekte Positionierung der Quelle von entscheidender Bedeutung. Liegt der Tumor nicht an der Oberfläche, werden entweder mehrere, relativ schwache, gekapselte Quellen, sogenannte Seeds, in das Tumorgewebe implantiert oder Quellen über Röhren, sogenannte Applikatoren, in Körperöffnungen nahe an das Tumorgewebe gebracht. Diese Quelle wird über das Afterloading-Gerät gesteuert, um die Bestrahlung des medizinischen Personals zu minimieren [7]. In Abbildung 2.2 ist ein Beispiel für eine HDR-Brachytherapie-Drahtquelle neben einer Cent-Münze dargestellt. Die Quelle befindet sich in der Metallkapsel am Ende des Drahtes.

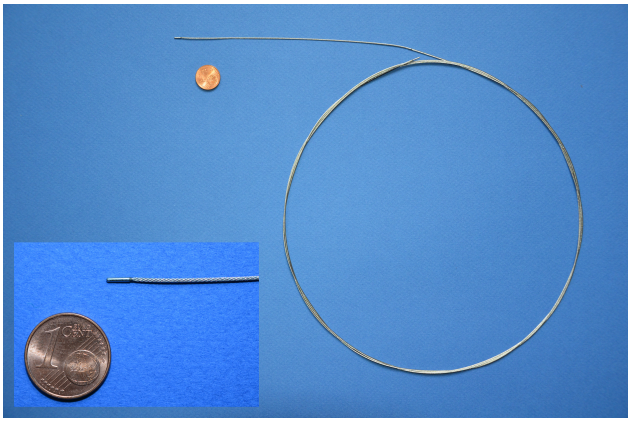


Abbildung 2.2: Beispiel einer Brachytherapie-Drahtquelle

Die Brachytherapie unterscheidet zwischen drei Referenzdosisleistungsbereichen, wobei die Referenzdosisleistung der Differentialquotient der Wasserenergiedosis nach der Zeit ist. HDR-Bestrahlungen liefern am Referenz-Dosispunkt P_D eine Dosisleistung $\dot{D}_{\mathrm{P_D}} > 12\,\mathrm{Gy/h}$, während LDR-Bestrahlungen eine Dosisleistung von $\dot{D}_{\mathrm{P_D}} < 2\,\mathrm{Gy/h}$ liefern. Dazwischen liegt der Bereich der mittleren Dosisleistung (Medium Dose Rate (MDR)) [4].

Häufig in der Brachytherapie verwendete Radionuklide sind in Tabelle 2.1 aufgeführt. Für die HDR-Brachytherapie werden hauptsächlich ^{192}Ir-Quellen mit einer Anfangsaktivität von bis zu 500 Giga Becquerel (Bq), eingesetzt. Diese können etwa zwei Halbwertszeiten, also knapp 150 Tage, eingesetzt werden. Seit einigen Jahren werden vermehrt ^{60}Co-Quellen angewendet. Aufgrund der längeren Halbwertszeit von ca. 5 Jahren müssen diese seltener ausgetauscht werden. Für die sogenannte Pulsed Dose Rate (PDR)-Bestrahlung werden ebenfalls ^{192}Ir- und ^{60}Co-Quellen verwendet. Im Fall von ^{192}Ir-Quellen werden dabei Aktivitäten von 20-80 GBq verwendet. Für die LDR-Brachytherapie werden hauptsächlich ^{125}I-Seeds verwendet [8].

Radionuklid	$T_{1/2}$ **in Tagen**	E_{avg} **in keV**	**Dose-rate**
Cäsium-137	10976 ± 29	614	LDR
Cobalt-60	1925,23 ± 0,29	1253	LDR, HDR, PDR
Iridium-192	73,827 ± 0,013	371	LDR, HDR, PDR
Jod-125	59,388 ± 0,028	28	LDR

Tabelle 2.1: Eigenschaften verwendeter Nuklide in der Brachytherapie nach [9] und [8]

Die Messgrößen für die Brachytherapie sind die Wasserenergiedosis und die Luftkerma. Die Wasserenergiedosisleistung in 1 cm Abstand von der Quelle ist die für die medizinische Anwendung wesentliche Messgröße, da der menschliche Körper zu großen Teilen aus Wasser besteht und da die Strahlungsquellen in die Nähe des Tumors gebracht werden. Für die Kenndosisleistung einer Brachytherapie-Quelle wird die Luftkermaleistung frei in Luft in 100 cm Abstand zum Schwerpunkt der Aktivitätsverteilung der Quelle angegeben. In dieser Messgröße werden die Quellen kalibriert, da in dieser Messgröße und in diesem Abstand Messungen wesentlich einfacher durchgeführt werden können als in 1 cm Abstand. Die Einflüsse des Quellaufbaus und des verwendeten Applikators werden dabei durch den Wert der Kenndosisleistung (Reference Air Kerma Rate (RAKR)) beschrieben [5].
In der Brachytherapie werden ausschließlich umschlossene Strahler verwendet. Diese sind von einer biologisch verträglichen Metallhülse umschlossen, die jedoch die Strahlungseigenschaften verändert. In Abbildung 2.3 sind zwei Strahlertypen dargestellt, die aufgrund ihres technischen Aufbaus unterschiedliche Abstrahlcharakteristiken aufweisen. Dargestellt ist die Dosisverteilung in der Ebene der Längsachse, die Anisotropie der Strahler [2].

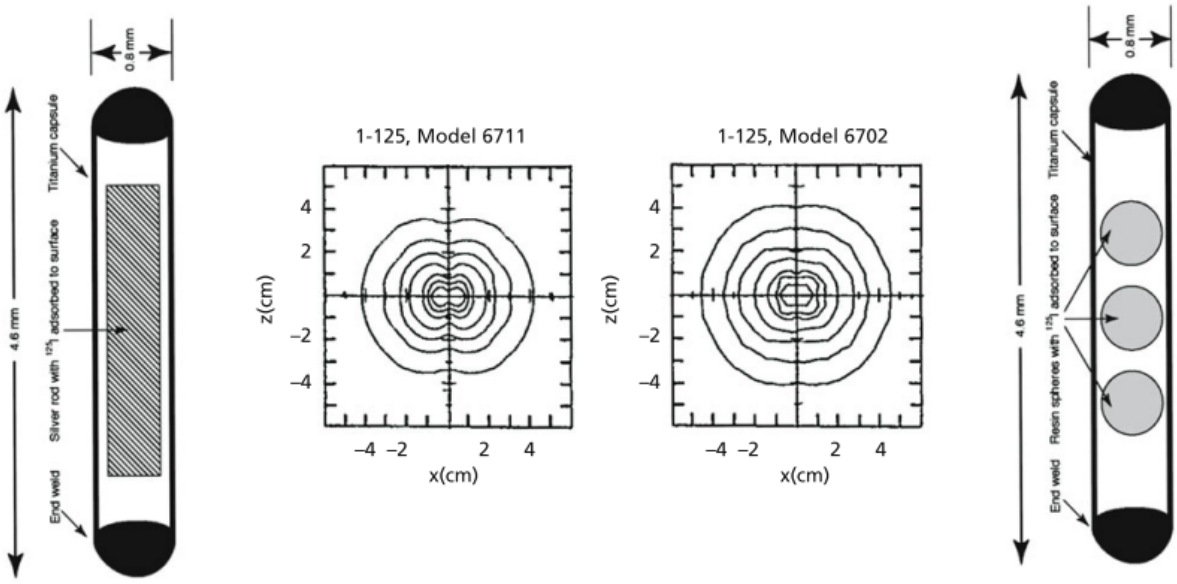


Abbildung 2.3: Konstruktion von verschiedenen ^{125}I-Strahlern (Typ Amersham 6711 und 6702) mit zugehöriger Dosisverteilung [2]

Für die Bestrahlungsplanung sind die wesentlichen Parameter die Anisotropie, die Kenn-Luftkermaleistung, engl. RAKR, der Quelle und die Dosisleistungskonstante Λ, welcher für die Umrechnung von Kenn-Luftkermaleistung multipliziert mit $(100)^2$ in Wasserenergiedosisleistung in Wasser in 1 cm Abstand von der Quelle genutzt wird [10].

2.3 Dosimetrie

Die Dosimetrie beschreibt die Messung der erzeugten Strahlenmenge, Dosis, eines Strahlungsfeldes. Zwei wesentliche Strahlungseffekte sind die Ionisation in Gasen und die Szintillation in Festkörpern. Diese werden in Ionisationskammern und dem Szintillator genutzt [9].
Das Messprinzip von Ionisationskammern ist in Abbildung 2.4 dargestellt. An den Elektroden der Kammer wird eine Hochspannung angelegt. Die ionisierende Strahlung erzeugt im Kammervolumen Elektronen-Loch-Paare und diese werden durch das elektrische Feld zu den Elektroden gezogen. Die entstandenen Ladungsträger erzeugen einen Strom, welcher durch ein Ladungs- oder Strommessgerät quantifiziert werden kann. Die gemessene Ladung ist abhängig von der Strahlungsart, der Strahlungsintensität, dem Füllgas, dem Gasdruck und der angelegten Spannung. Die letzten drei Parameter sind vor allem für die Rekombinationsverluste von hoher Bedeutung. Ursache und Wirkung von Rekombination wird in Abschnitt 2.4.2.2 genauer erläutert. Die genannten Parameter müssen daher bei der Kalibrierung einer Kammer beachtet werden. [11]

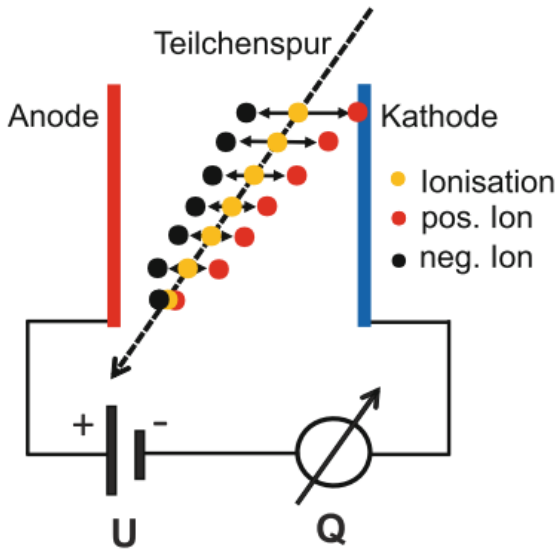


Abbildung 2.4: Messprinzip von Ionisationskammern [2]

Ionisationskammern werden in vielen verschiedenen Bauformen betrieben, einige sind in Abbildung 2.5 dargestellt. Für die Wahl der Bauform sind das Messvolumen und die Richtungsabhängigkeit der Dosimeteranzeige zu beachten. In der PTB sind im Bereich Brachytherapie Kugelkammern und Schachtionisationskammern im Einsatz. Kugelkammern haben eine sehr geringe Richtungsabhängigkeit und im Inneren ein nahezu kugelsymmetrisches, radiales elektrisches Feld. Sie werden mit unterschiedlichen Messvolumina zur Vermessung von HDR-Brachytherapiequellen eingesetzt. Schachtionisationskammern werden in der Brachytherapie zum Vermessen der Quellen verwendet. Die Brachytherapie-Quellen werden zur Vermessung innerhalb des Schachts im Inneren der Kammer platziert und sind nahezu vollständig vom Messvolumen umgeben.

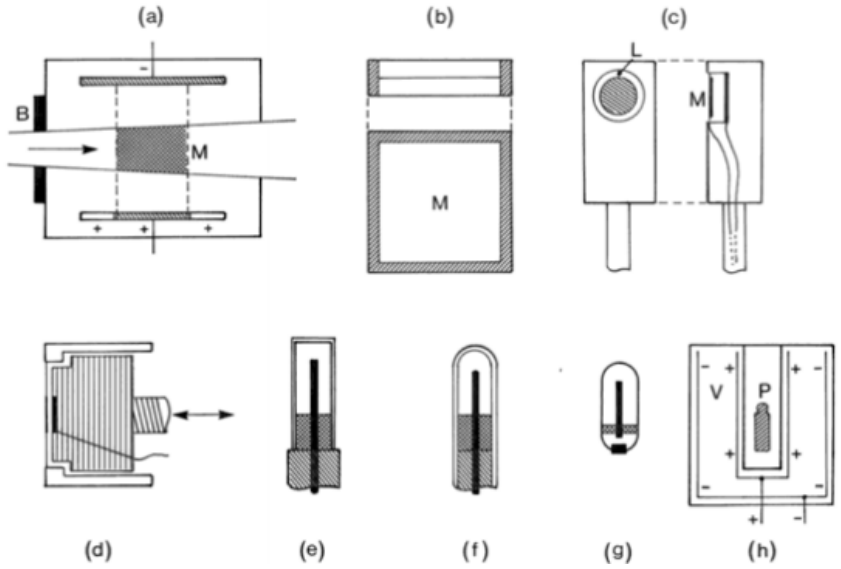


Abbildung 2.5: Bauformen von Ionisationskammern [11]
a) Parallelplattenkammer
b) Durchstrahlkammer
c) Flachkammer
d) Extrapolationskammer (Kammervolumen ist veränderlich)
e) Zylinderkammer
f) Fingerhutkammer
g) Kondensatorkammer
h) Schachtionisationskammer mit 4π-Geometrie

Ein Szintillator ist ein Festkörperdetektor, auf dem auftreffende, ionisierende Teilchen Lichtblitze im sichtbaren Bereich erzeugen. Diese Lichtblitze können mithilfe von Photomultipliern in Stromimpulse umgewandelt werden. Zusammen werden Szintillator und Photomultiplier als Szintillationszähler bezeichnet [9]. Je nach Anwendungsgebiet werden verschiedene Szintillatormaterialien verwenden, wie beispielsweise NaI(Tl) oder ZnS(Ag) [11]. Der Szintillationszähler hat aufgrund der hohen Dichte des Materials, insbesondere im Vergleich zu Gasen, eine sehr hohe Nachweisempfindlichkeit [2]
In Abbildung 2.6 ist der grundsätzliche Aufbau eines Szintillationszähler schematisch dargestellt. Die einfallende Strahlung erzeugt durch Ionisation im lichtdicht gekapselten Szintillatormaterial Lichtblitze. Diese gelangen durch ein Glasfenster in den Photomultiplier. Die von den Photonen in der Photokathode erzeugten Elektronen vervielfachen sich exponentiell in den Dynoden und werden an der Anode als Spannungsimpuls nachgewiesen. Die Elektronen werden dabei von Dynode zu Dynode mit einer Spannung von etwa 100 V beschleunigt. [11].

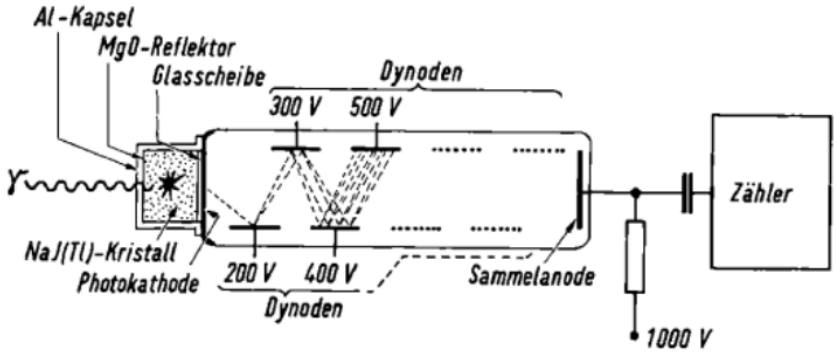


Abbildung 2.6: Grundsätzlicher, schematischer Aufbau eines Szintillationszählers [12]

In der PTB werden im Bereich Brachytherapie Szintillatoren für verschiedene Aufgaben eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Szintillator zur Vermessung der Anisotropien von LDR-Quellen verwendet.

2.4 Kalibrierungen

Unter dem Begriff der Kalibrierung eines Messgerätes versteht man den Vergleich des Anzeigewertes des Gerätes mit dem als richtig geltenden Wert. Um den Messwert auf den konventionell richtigen Wert zu korrigieren, wird der Kalibrierfaktor ermittelt [9]. Durch die Kalibrierung wird das Messgerät in einer oder mehreren Stufen auf ein nationales Normal rückgeführt. Diese Normale sind hierarchisch gegliedert. Diese Hierarchie ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Die oberste Ebene der Hierarchie bilden die nationalen Normale, üblicherweise Primärnormale [13]. Ein Primärnormal ist nach [10] Abschnitt 3.4.22 ein „Messnormal höchster metrologischer Qualität, das die Einheit einer Messgröße ohne Bezug auf ein Messnormal definiert, physikalisch repräsentiert, erhält und reproduziert, um sie auf andere Instrumente zu übertragen“. Primärnormale werden von Nationalen Metrologie Instituten (NMIs) (beispielsweise der PTB) betrieben und durch Vergleiche mit den Normalen anderer Institute überprüft. Werden Normale mit hoher metrologischer Qualität gegen ein Primärnormal geprüft, so werden diese als Sekundärnormal bezeichnet. Sie bilden die zweite Ebene der Hierarchie und werden zur Kalibrierung von Arbeits- bzw. Referenznormalen eingesetzt. Transfernormale sind nach [10] Messnormale, welche zum Vergleich von Messnormalen unter vorgegebenen Kalibrierbedingungen genutzt werden. Falls die Transfernormale den qualitativen Ansprüchen genügen, können sie auch als Sekundärnormale eingesetzt werden.

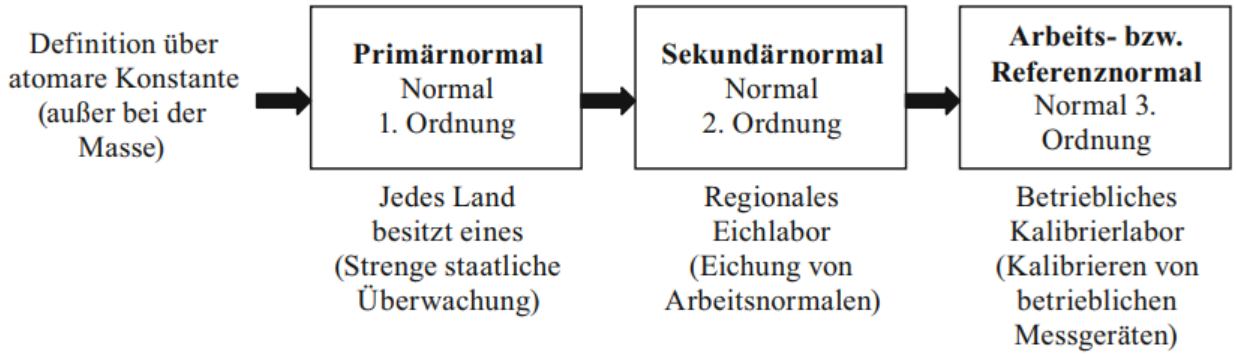


Abbildung 2.7: Hierarchie der Normale [13]

Im Bereich der Brachytherapie mit Photonenstrahlern sind Quellen und Schachtkammern, welche rückführbar kalibriert werden, die typischen Transfernormale. Dabei ist die Kalibrierung nur für einen bestimmten Strahlertyp und ein vollständiges Dosimetriesystem, d.h. inklusive Strahlerhalter, Detektorhalter und Detektor, gültig. Bei Veränderungen am Dosimetriesystem ist eine vollständige Neukalibrierung notwendig [10].
Die PTB kalibriert im Bereich Brachytherapie sowohl ^{125}I-LDR-, ^{192}Ir-HDR- und ^{60}Co-HDR-Quellen als auch Schachtkammern für diese Quelltypen [14]. In den folgenden Abschnitten werden die Kalibrierung von Brachytherapiequellen und Schachtkammern kurz erläutert.

2.4.1 Quellkalibrierung

Die Kalibrierung von Quellen unterteilt sich in drei Messungen. Für die Quellen wird die Kenndosisleistung, die polare und radiale Anisotropie und, bei LDR-Quellen, das Spektrum bestimmt. Der Messstand, der in dieser Arbeit entwickelt wird, ermöglicht die Messung der Kenndosisleistung von HDR-Afterloading-Quellen und der polaren und radialen Anisotropie von HDR- und LDR-Quellen. Im Anhang unter Punkt A.1 ist ein Beispiel für einen Kalibrierschein einer Brachytherapiequelle dargestellt. Das erste Blatt fast dabei die wesentlichen Kalibrierdaten zusammen. Auf Blatt zwei werden die Kalibrierbedingungen und das Ergebnis des RAKR-Messung dargestellt. Auf Blatt drei sind die Diagramme der Anisotropie-Messungen dargestellt und die Messunsicherheit angegeben. Auf Blatt vier befindet sich der calibration and measurement capabilities (CMC)-Verweise. Jedes Blatt wird mit dem Datum und dem Kalibrierzeichen des Kalibrierscheins gekennzeichnet, um eine eindeutige Zuweisung zu ermöglichen.

2.4.1.1 Reference Air Kerma Rate (RAKR)

Die RAKR bei Gammastrahlern für die Brachytherapie gibt die Luftkermaleistung frei in Luft in 100 cm Abstand vom Schwerpunkt der Aktivitätsverteilung an. Dabei wird die RAKR inklusive der Einflüsse des Quellaufbaus ermittelt [5]. Die Messung der RAKR erfolgt mithilfe einer Ionisationskammer mit einem Volumen von 1000 cm^3 [15]. Dieses Sekundärnormal wird in den Referenzfeldern der PTB kalibriert und das Ansprechvermögen als Funktion der Energie ermittelt. Der Kalibrierfaktor für ^{192}Ir-Quellen ergibt sich als gewichteter Mittelwert über das Emissionsspektrum der Quelle [16].
Um aus dem Messwert der Ionisationskammer, d.h. des Sekundärnormals, die Kenndosisleistung zu berechnen, wird Gleichung 2.1 verwendet. Der Messwert wird mit dem Kalibrierfaktor der Kammer und weiteren Korrektionsfaktoren multipliziert und von der gemessenen Entfernung r_M auf den Bezugsabstand r_O korrigiert.

$$\dot{K}_{a,100} = M \cdot N_K \cdot k \cdot k_V \cdot k_{as,a} (\frac{r_M}{r_O})^2 \tag{2.1}$$

mit

M = Messwert
N_k = Kalibrierfaktor des Sekundärnormals
k = Korrektur für Abweichungen zu den Bezugsbedingungen
k_V = Korrektion der Ausdehnung der Kammer
$k_{as,a}$ = Schwächung und Streuung im Umgebungsmaterial
r_M = Messabstand
r_O = Bezugsabstand

Die Abweichungen der Messbedingungen zu den Bezugsbedingungen werden über den Faktor k berücksichtigt. Die Korrektion für die Luftdichte k_Q ist gegeben durch die Gleichung 2.2 [5].

$$k_Q = \frac{p_0}{p} \cdot \frac{T}{T_0} \tag{2.2}$$

mit

$$p_0 = 1013 \text{ hPa}$$
$$T_0 = 293,2 \text{ K}$$

Der Korrektionsfaktor $k_{as,a}$ dient zur Einberechnung der Streuung und Schwächung der Strahlung im Umgebungsmaterial, um die Luftkermaleistung wie im Vakuum zu bestimmen [5].
Für die Kalibrierung wird in der PTB die Strahlungsquelle in einer Bleiburg platziert und das Strahlungsfeld mithilfe einer DensiMed® Blende, mit 5,5 cm oder 11 cm Durchmesser, kollimiert [15]. Der Abstand der Ionisationskammer zur Quelle wird mittels eines Industrieroboters auf der zentralen Achse des kollimierten Strahls variiert.



Abbildung 2.8: Aufbau einer RAKR-Messung

In Abbildung 2.8 ist der Aufbau einer RAKR-Messung dargestellt. Links im Bild ist das Afterloading-Gerät des PTB-Fachbereichs 6.3 abgebildet, rechts der Industrieroboter. Zentral in Abbildung 2.8 ist die Bleiburg und die davor platzierte Ionisationskammer zu erkennen. Für die reproduzierbare Positionierung der Kammer sind oberhalb und links von der Blende Linienlaser angebracht. Die Quelle wird mithilfe des Afterloading-Systems oberhalb der offenen Spitze einer Katheternadel in der Mitte der Bleiburg platziert. [17]

2.4.1.2 Anisotropie

Brachytherapiequellen können aufgrund ihrer räumlichen Ausdehnung und des mechanischen Aufbaus nicht als isotrope Punktquellen angenommen werden [8]. Bei der klinischen Anwendung der Quelle liegen keine Informationen über die radiale Orientierung vor, daher muss bei der Bestrahlungsplanung die Anisotropie der Quelle beachtet werden. Deswegen wird sowohl die radiale als auch die polare Anisotropie zusätzlich zum Dosisleistungswert im Kalibrierzertifikat angegeben. Für die Bestimmung wird eine relative Messung der Dosisverteilung mit einer Ionisationskammer des Typs Exradin A4 in konstantem Abstand vermessen [18]. In Abbildung 2.9 ist der Aufbau der radialen Anisotropiemessung rechts und der polaren Anisotropiemessung links dargestellt [18].

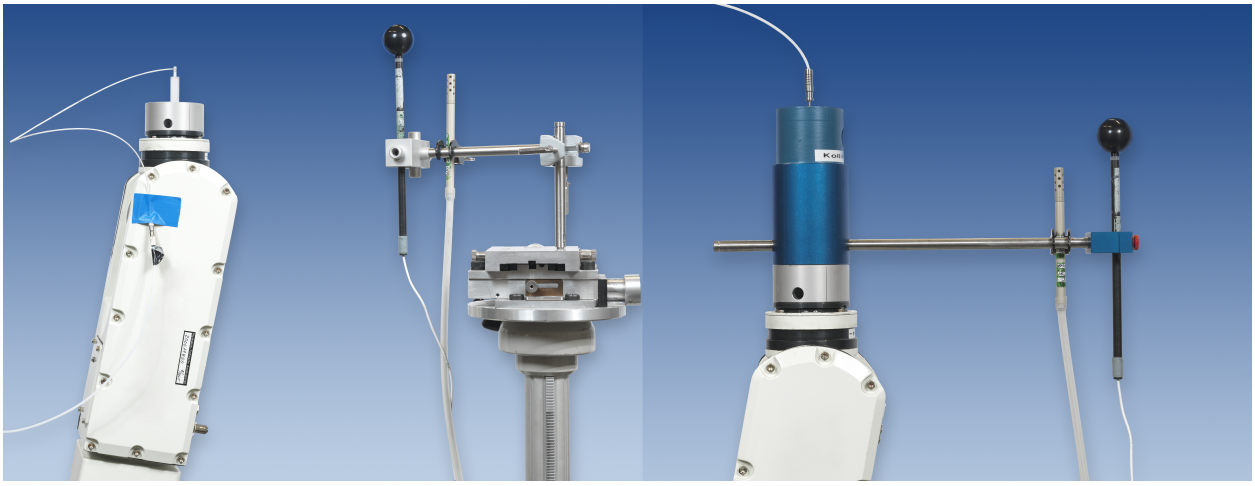


Abbildung 2.9: Aufbau der radialen Anisotropiemessung rechts und der polaren Anisotropiemessung links

Für die radiale Anisotropie wird ein Bleizylinder auf dem Industrieroboter befestigt. Dieser kollimiert das Strahlungsfeld. Die Ionisationskammer wird im Strahlenbündel fest mit dem Bleizylinder verbunden. Der Roboter dreht den Bleizylinder und die Ionisationskammer, während die Quelle, mit dem Afterloading-Gerät verbunden, in ihrer Orientierung konstant bleibt. Für die polare Anisotropie wird die Quelle über dem Roboter befestigt und gedreht. Die Ionisationskammer wird in festem Abstand zum Roboter positioniert. In Abbildung 2.10 sind links die polare und rechts die radiale Anisotropie einer MicroSelectron V2 ^{192}Ir-Quelle von Nucletron dargestellt.

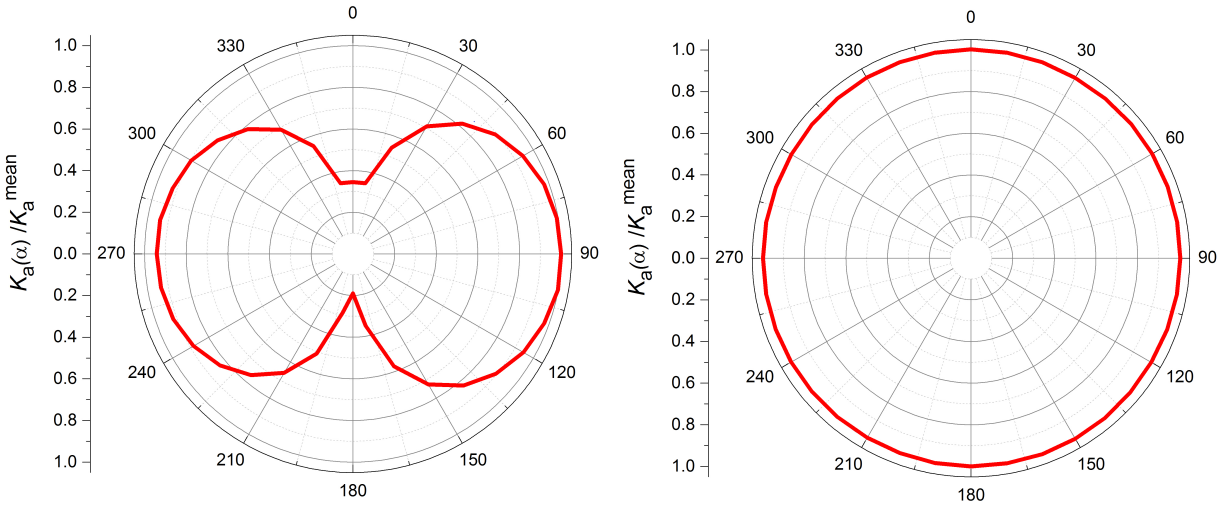


Abbildung 2.10: polare und radiale Anisotropie einer ^{192}Ir-Quelle

2.4.2 Schachtionisationskammerkalibrierung

Schachtionisationskammern sind in der Photonen-Brachytherapie ein häufig verwendetes Transfernormal. Die Kammern müssen vor der Nutzung für das Nuklid, den Strahlertyp und den verwendeten Applikator kalibriert werden. Die Kalibrierung wird mithilfe einer kalibrierten Quelle durchgeführt [10].
Der Kalibrierfaktor einer Kammer hängt entscheidend von der Position der Quelle entlang der Kammerachse ab. Ist die Position der Quelle innerhalb der Kammer flexibel, so wird während der Kalibrierung der Punkt des maximalen Messstromes bestimmt. Für diesen wird der Kalibrierfaktor ermittelt und weitergegeben. [19]
Die Kalibrierung der Schachtionisationskammer erfordert die Messung der Lage-Empfindlichkeitskurve, des Untergrundstroms und des Sättigungseffektes bei der genutzten Quellstärke. Im Anhang unter Punkt A.2 ist ein Beispiel für einen Kalibrierschein für eine Schachtionisationskammer dargestellt. Dabei sind das erste und letzte Blatt analog zu dem Kalibrierschein für Quellen. Auf dem zweiten Blatt werden der Messaufbau und die wesentlich Kalibrierdetails dargestellt. Auf Blatt drei ist die Berechnung des Druckkorrektionsfaktors und der Kalibrierfaktor dargestellt und auf Blatt vier die Lage-Empfindlichkeitskurve der Schachtionisationkammer und die Messunsicherheit.

2.4.2.1 Messung der Lage-Empfindlichkeitskurve und des Kalibrierfaktors

Für die Kalibrierung der Schachtionisationskammer wird eine kalibrierte Brachytherapiequelle genutzt. Die PTB kalibriert Schachtionisationskammern mit ^{60}Co- und/oder ^{192}Ir-HDR-Quellen und/oder ^{125}I-LDR-Quellen. Die LDR-Seeds werden in der Schachtionisationskam-

mer durch Applikatoren fest und reproduzierbar positioniert. Beispielhaft sind in Abbildung 2.11 zwei Applikatoren dargestellt. Dabei werden die LDR-Quellen manuell positioniert.



Abbildung 2.11: Applikatoren für die Schachtionisationskammerkalibrierung mit ^{125}I

In Abbildung 2.12 sind beispielhaft drei verschiedene Applikatoren für die Vermessung von HDR-Quellen dargestellt. Diese Applikatoren geben keine feste Position der Quelle vor. Nach DIN6803 Punkt 3.4.25 [10] wird der Kalibrierfaktor für den Punkt der maximalen Kammerantwort angegeben. Um diesen zu ermitteln, wird die Lage-Empfindlichkeitskurve gemessen und der Messwert am Maximum M_{max} ausgewertet. Um die Kurve zu ermitteln, wird die Kammermessung mit verschiedenen Quellpositionen entlang der Kammerachse durchgeführt.



Abbildung 2.12: Applikatoren für die Schachtionisationskammerkalibrierung mit ^{192}Ir und ^{60}Co

Aus dem maximalen Messwert der Schachtionisationskammer kann durch Gleichung 2.3 nach [19] der Kalibrierfaktor ermittelt werden.

$$N_{K_a} = \frac{\dot{K}_{\mathrm{a},100}}{M_{\mathrm{max}} \cdot k_{\mathrm{Q}} \cdot k_{\mathrm{recom}} \cdot N_{\mathrm{elec}}} \tag{2.3}$$

mit

$\dot{K}_{\mathrm{a},100}$ = RAKR der Quelle
M_{max} = maximaler Messwert
k_{Q} = Korrektur für die Abweichungen zu den Bezugsbedingungen
k_{recom} = Rekombinationskorrektur
N_{elec} = Kalibrierfaktor des Elektrometers

Schachtionisationskammern für die Brachytherapie sind gegenüber der Atmosphäre offene Systeme. Daher muss der Messwert gegenüber Druck und Temperatur auf die Referenzbedingungen korrigiert werden [20]. Die Korrektur für die Abweichungen zu den Bezugsbedingungen k_{Q} berechnet sich nach Gleichung 2.2.
Zusätzlich müssen bei der Berechnung des Kalibrierfaktors der Kalibrierfaktor des Elektro-

meters N_{elec} und die Rekombinationsverluste durch unvollständige Sättigung k_{recom} berücksichtigt werden. Die Rekombinationsverluste sind abhängig von der Schachtionisationskammer, der Quellstärke und der Kammerspannung. Der Korrektionsfaktor wird durch eine Sättigungsmessung ermittelt. In Abbildung 2.13 ist der Aufbau einer Schachtionisationskammer zu sehen. Dabei wird die Kammer auf dem Roboter mittig im Raum positioniert.

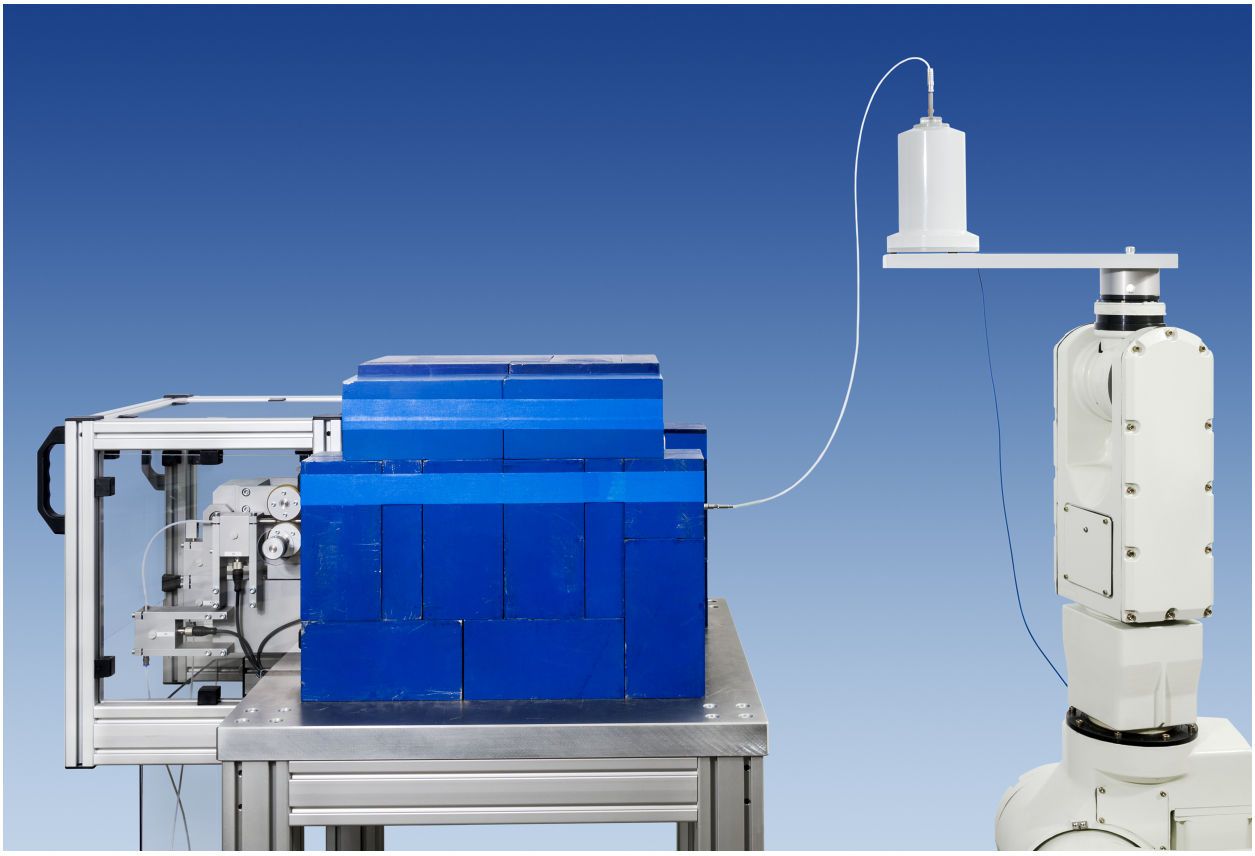


Abbildung 2.13: Aufbau einer Schachtionisationskammerkalibrierung

Für die Position der Schachtionisationskammer ist zu beachten, dass die Abstände von großen Streukörpern, wie Wänden und Bleiabschirmung, möglichst groß (mindestens 30 cm [11]) gewählt wird [10]. Die Schachtionisationskammer wird daher auf dem Industrieroboter mittig im Raum, oberhalb der Abschirmung des Afterloading-Gerätes positioniert. Dadurch ist der Abstand zu den Wänden möglichst groß. Der Abstand zu Roboter und Afterloading-Gerät ist so groß wie der Aufbau es ermöglicht. Aufgrund der polaren Anisotropie der Brachytherapiequelle strahlt diese in Richtung Kammerboden weniger als in der horizontalen Ebene. Rückstreuobjekte, die für die Kalibrierung nahe der Kammer benötigt werden, sind daher bevorzugt unterhalb der Kammer zu positionieren.

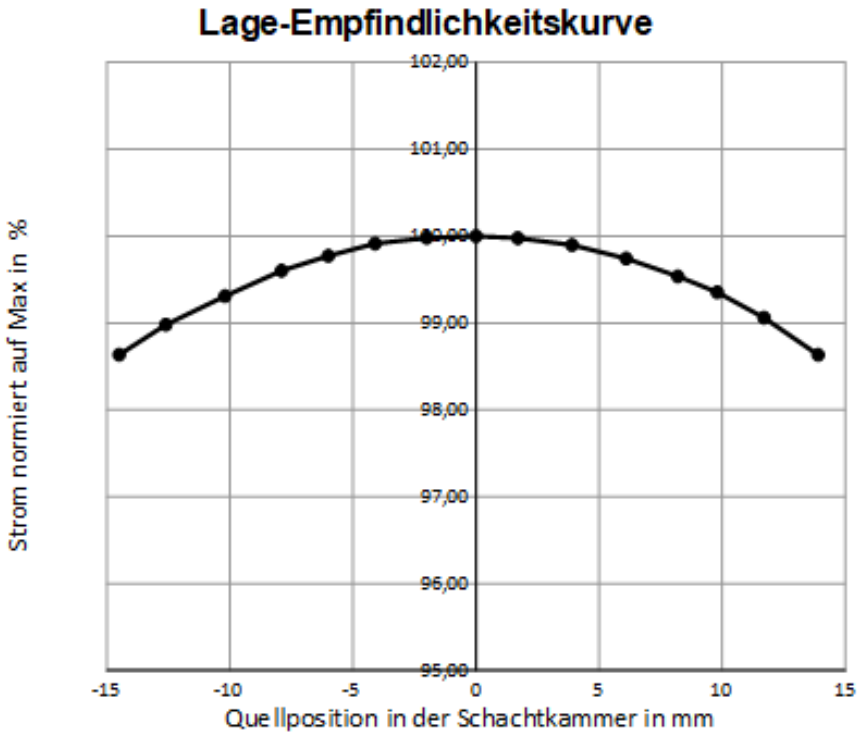


Abbildung 2.14: Lage-Empfindlichkeitskurve für eine Quelle innerhalb einer Schachtkammer nach Messungen in der PTB

In Abbildung 2.14 ist die Empfindlichkeitskurve einer HDR1000Plus Schachtkammer dargestellt. Diese wurde mit einer Microselectron V2 ^{192}Ir-Quelle mit dem aktuellen Messstand der PTB vermessen. Der Strom wird normiert auf das Maximum über der relativen Position innerhalb der Kammer dargestellt. Eine Verschiebung der Quelle innerhalb der Kammer um etwa 10 mm verändert dabei das Messsignal bereits um 1 %. Die Positionierung der Quelle innerhalb der Schachtionisationskammer ist abhängig vom Afterloading-System und von der Position der Kammer gegenüber des Systems. Daher wird im Kalibrierschein nicht die Quellposition in Bezug auf das untere Ende der Schachtionisationskammer angegeben, sondern in Bezug auf das Maximum. Dieses muss somit bei jeder Messung erneut ermittelt werden.

2.4.2.2 Sättigungsmessung

In Abbildung 2.15 ist die Abhängigkeit des Messstroms von der Kammerspannung bei konstanter Bestrahlung dargestellt. Diese Abhängigkeit entsteht durch Rekombinationsverluste innerhalb des elektrischen Feldes.

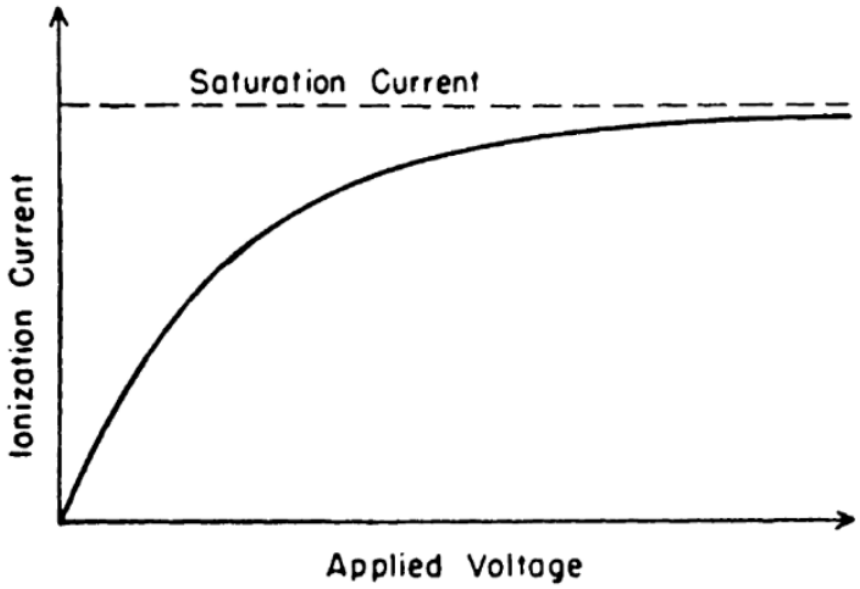


Abbildung 2.15: Abhängigkeit des Messstroms von der Kammerspannung [21]

In Ionisationskammern kommt es aufgrund von Anfangsrekombination, Volumenrekombination und Rekombination durch Diffusion zu Signalverlusten. Dabei rekombinieren entweder Ionenpaare aus der Spur von einem ionisierenden Teilchen, Ionenpaare aus verschiedenen Spuren oder geladene Teilchen gelangen durch Diffusion zur Elektrode mit gleicher Polarität. Die Anfangsrekombination ist unabhängig von der Dosisleistung. Sie hängt nur von der Ionendichte entlang einer Spur ab. Ist die Anfangsrekombination der vorherrschende Effekt, so ist nahe der Sättigung ein linearer Zusammenhang zwischen dem Kehrwert des Messstroms und dem Kehrwert der elektrischen Feldstärke zu ermitteln. Die Volumenrekombination entsteht durch Diffusion und elektrostatische Anziehung im Ionisationsvolumen. Ist dies der vorherrschende Effekt, so ist der Kehrwert des Messstroms proportional zu dem Quadrat des Kehrwerts der elektrischen Feldstärke. Die Rekombination durch Diffusion hängt ausschließlich von der Kammerspannung ab (nach [22], [21] und [9]).
Für die Bestimmung der Sättigung können drei Verfahren angewendet werden. Die Zwei-Spannungsmethode, das dose per puls (DPP)-Verfahren und Jaffé-Diagramme. Das DPP-Verfahren ist für gepulste Strahlung das nach DIN 6800-2 vorgeschlagene Verfahren [11]. Ist das Kammerverhalten bekannt, kann der Sättigungseffekt über die Zwei-Spannungsmethode ermittelt werden. Dabei sind nur zwei Messwerte, einer für die Arbeitsspannung und für eine weitere Spannung, zu ermitteln. Sind die Messbedingungen nicht bekannt, wird die Sättigungskorrektur über Jaffé-Diagramme bestimmt. Um den vorherrschenden Rekombinationseffekt zu ermitteln und die anzuwendende Korrektur zu berechnen, wird der reziproke Mittelwert über dem Kehrwert der Kammerspannung und der quadratischen Kammerspannung dargestellt und linear approximiert [11].

Der Schnittpunkt der approximierten Geraden mit der $1/I$-Achse ergibt den Messwert für unendlich hohe Spannungen und somit den auf Sättigungsverluste korrigierten Wert.
In Abbildung 2.16 ist der Aufbau einer Sättigungsmessung dargestellt. Dabei wird die Schachtionisationskammer innerhalb einer kleinen Bleiburg platziert. Diese Bleiburg erhöht den Anteil der Streustrahlung. Dadurch wird der Messstrom erhöht und der Sättigungseffekt verstärkt.

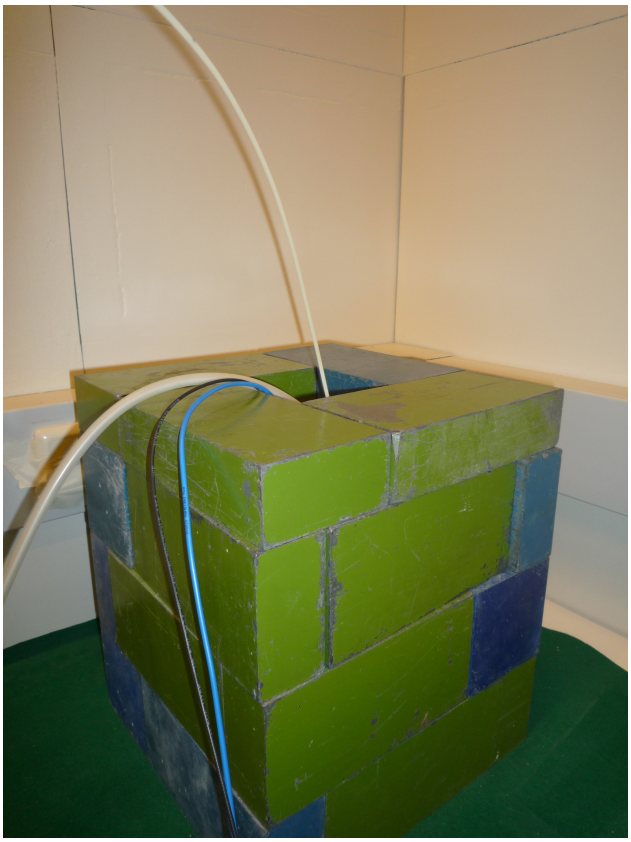


Abbildung 2.16: Aufbau einer Sättigungsmessung

In Abbildung 2.17 sind die Messergebnisse einer Sättigungsmessung dargestellt. Für die Auswertung wird der reziproke Strom über dem Kehrwert der quadratischen Spannung und über dem Kehrwert der Spannung aufgetragen und die lineare Regression über die kleinsten Fehlerquadrate ermittelt. Die Regressionsgeradengleichungen sind in Abbildung 2.17 ebenfalls dargestellt. In diesem Beispiel ist das Bestimmtheitsmaß für die Regression von $1/I$ auf $1/U^2$ größer. Daher wird aus dieser Gleichung der Sättigungskorrektionsfaktor bestimmt.

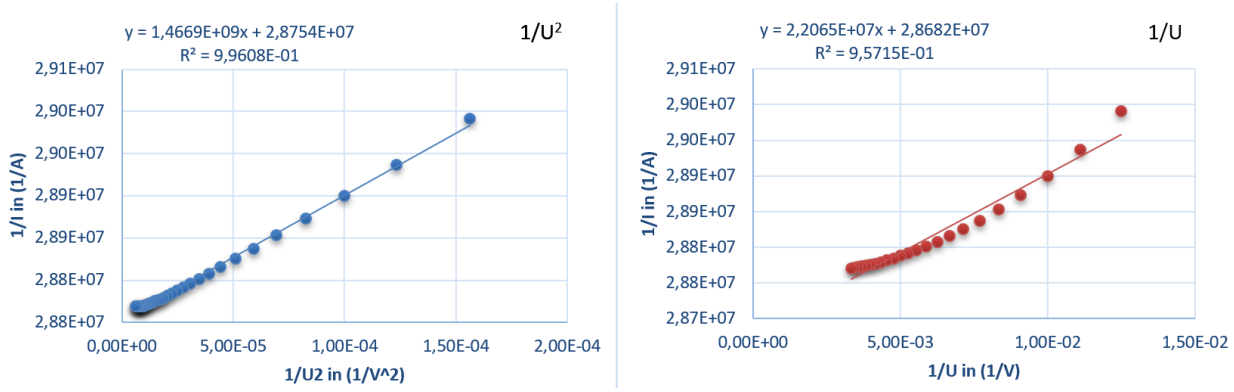


Abbildung 2.17: Messergebnisse einer Sättigungsmessung

2.5 Robotik

Der Ausdruck „Roboter“ kommt aus dem tschechischen von „robota “, welches „arbeiten“ bedeutet. Er wurde zuerst in dem Bühnenstück „Rossom’s Universal Robot“ von Karel Capeks im Jahr 1922 eingesetzt [23]. Roboter können in unterschiedliche Arten eingruppiert werden. Eine mögliche Klassifizierung unterscheidet zwischen Industrierobotern, Servicerobotern, mobilen Robotern, Mikro- und Nanorobotern und Humanoiden Robotern [24]. Im folgenden werden nur die Industrieroboter detaillierter betrachtet.
Industrieroboter sind nach VDI [25] wie folgt definiert:
„Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d.h, ohne mechanischen Eingriff) programmierbar und ggf. sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen.“ [25]
Der Einsatz von Robotern kann aus technischen, wirtschaftlichen und humanisierenden Gründen erfolgen. Dabei sind technische Gründe wie z.B. die Flexibilität, die Qualität und die Prozessbeherrschung mitentscheidend. Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten werden Roboter genutzt, um die Produktivität zu erhöhen und Personal einsparen zu können. Die Übernahme von schweren, gefährlichen oder monotonen Arbeiten sind humanisierende Gründe für die Nutzung von Robotern. Meist werden Industrieroboter für das Bestücken, Schweißen, Entgraten und die Montage eingesetzt.

2.5.1 Mechanischer Aufbau

Der mechanische Aufbau eines Industrieroboters beschreibt die Anordnung, Art und das Zusammenspiel seiner mechanischen Komponenten. Dieser Aufbau wird als Roboterkinematik

bezeichnet. Durch die Kinematik werden die Freiheitsgrade, der Arbeitsraum und weitere wichtige mechanische Eigenschaften bereits festgelegt [24].
Die Freiheitsgrade eines Roboters geben an, wie viele voneinander unabhängige Bewegungen ein Effektor gegenüber einem festen Koordinatensystem ausführen kann [26]. Der Effektor ist dabei ein am Ende des Roboterarmes, dem Flansch, angebrachtes Werkzeug oder Werkstück [24]. Der zu programmierende Wirkpunkt des Effektors wird Tool Center Point (TCP) genannt [27]. In Abbildung 2.18 sind Arbeitsräume verschiedener Roboterkinematiken dargestellt. Der Arbeitsraum beschreibt die Koordinaten, welche mit dem TCP angefahren werden können. Dabei bezieht der Arbeitsraum sich nicht nur auf die Position sondern ebenso auf die Orientierung. Gemeinsam werden diese als Pose bezeichnet.

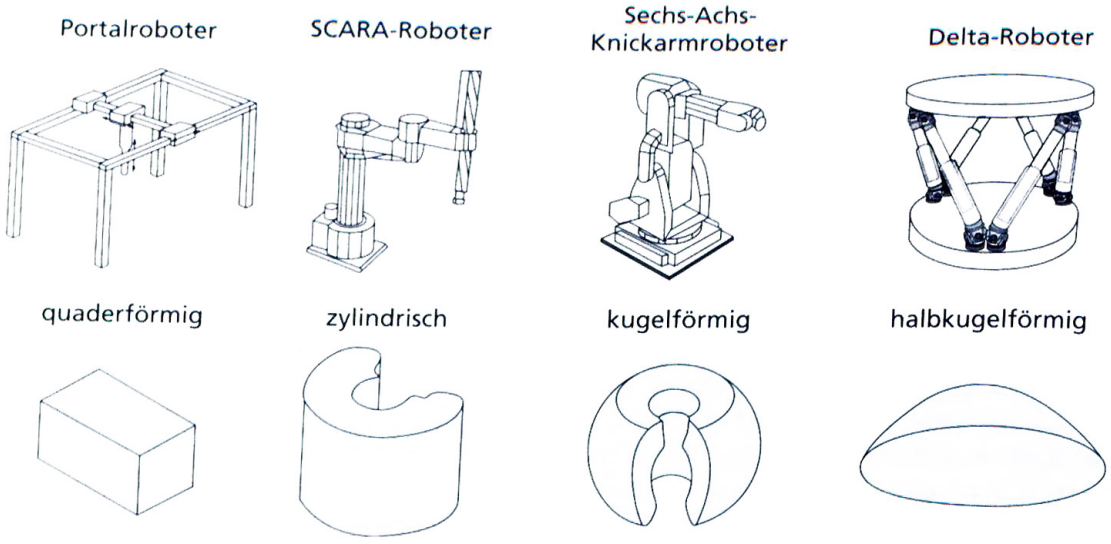


Abbildung 2.18: Roboterkinematiken (oben) und ihre Arbeitsräume (unten) [28]

Die Roboterkinematiken werden in serielle Kinematik und parallele Kinematik eingeteilt. Parallele Kinematiken verbinden die Roboterbasis über mehrere parallele Ketten mit dem Effektor. Sie können das Roboterwerkzeug sehr schnell und präzise positionieren, allerdings ist der Arbeitsraum begrenzt.
Serielle Kinematiken bestehen aus einer offenen kinematischen Kette, das bedeutet aus einer Hintereinanderschaltung von Gliedern und Gelenken. Der häufig verwendete Knickarmroboter besitzt eine serielle Kinematik [23].
Wichtige Kenngrößen von Robotern sind neben dem Arbeitsraum auch Nutzlast, Geschwindigkeit und Genauigkeit. Die Stabilität eines Prozesses wird maßgeblich durch die Überschwingweite, Ausschwingzeit und Genauigkeit beeinflusst. In Abbildung 2.19 ist der Weg,

bzw. der Winkel eines Verfahrvorganges über der Zeit dargestellt.

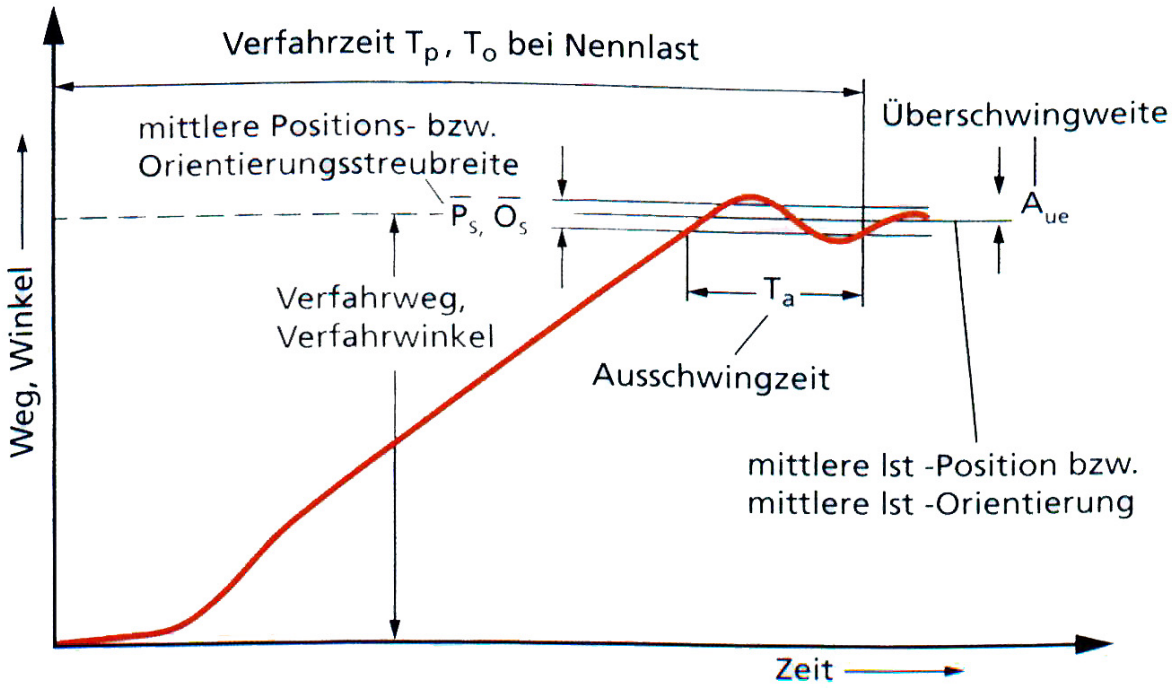


Abbildung 2.19: kinematische Kennwerte [26]

Beim Anfahren einer neuen Pose des TCP ändert sich der Winkel nach einer kurzen Anlaufphase linear, bis die Sollpose erreicht wird. Anschließend schwingt sich die Position während der Ausschwingzeit ein. Diese Zeit muss für eine stabile Position des TCP abgewartet werden. Die Positioniergenauigkeit eines Roboters wird durch zwei Größen angegeben, die Posegenauigkeit und die Wiederholgenauigkeit. In 2.20 sind die Abweichungen, welche sich durch die Genauigkeiten ergeben, dargestellt.

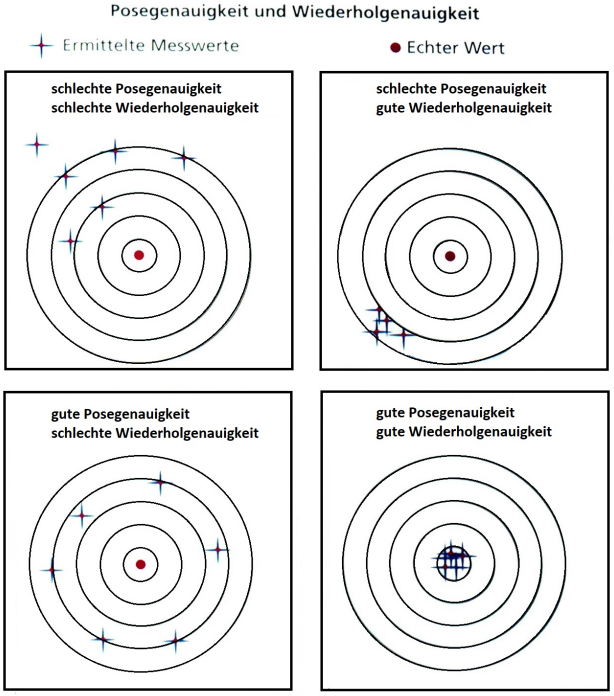


Abbildung 2.20: Positioniergenauigkeit eines Roboters [26]; Details finden sich im Text

Der „Echte Wert“ ist dabei die vorgegebene Sollpose des TCP. Die Abweichung des Mittelwertes der Istposen, nach n-Wiederholungen, von der Sollpose, wird als Posegenauigkeit bezeichnet. Die maximale Abweichung der einzelnen Istposen von diesem Mittelwert wird durch die Wiederholgenauigkeit beschrieben [29].

2.5.2 Programmierung

Für die Automatisierung eines Prozesses mithilfe eines Roboters muss dieser programmiert werden. Dabei wird zwischen „online“ - und „offline“ -Programmierung unterschieden. Die „online“ -Programmierung erfolgt durch Verfahren des Roboters. Dabei wird durch den Bediener der Roboter auf die gewünschten Pose gefahren und diese oder der Verfahrweg gespeichert. Für die „offline“ -Programmierung wird keine Einbindung des Roboters benötigt. Das Programm wird textuell oder simulationsgestützt erstellt. Die textuelle Programmierung lässt sich leicht ändern, dokumentieren und nutzt dabei nicht die Produktionskapazität des Roboters [26]. Für die textuelle Programmierung nutzt nahezu jeder Hersteller eine eigene Programmiersprache, sodass das Potential der Anlage vom Robotersystem abhängt.
Für die Beschreibung einer Pose im Arbeitsraum sind die Koordinaten und Orientierung jedoch nicht ausreichend. Zusätzlich wird das Bezugskoordinatensystem dieser Koordinaten benötigt. Für Roboter können mehrere Bezugskoordinatensysteme festgelegt werden.

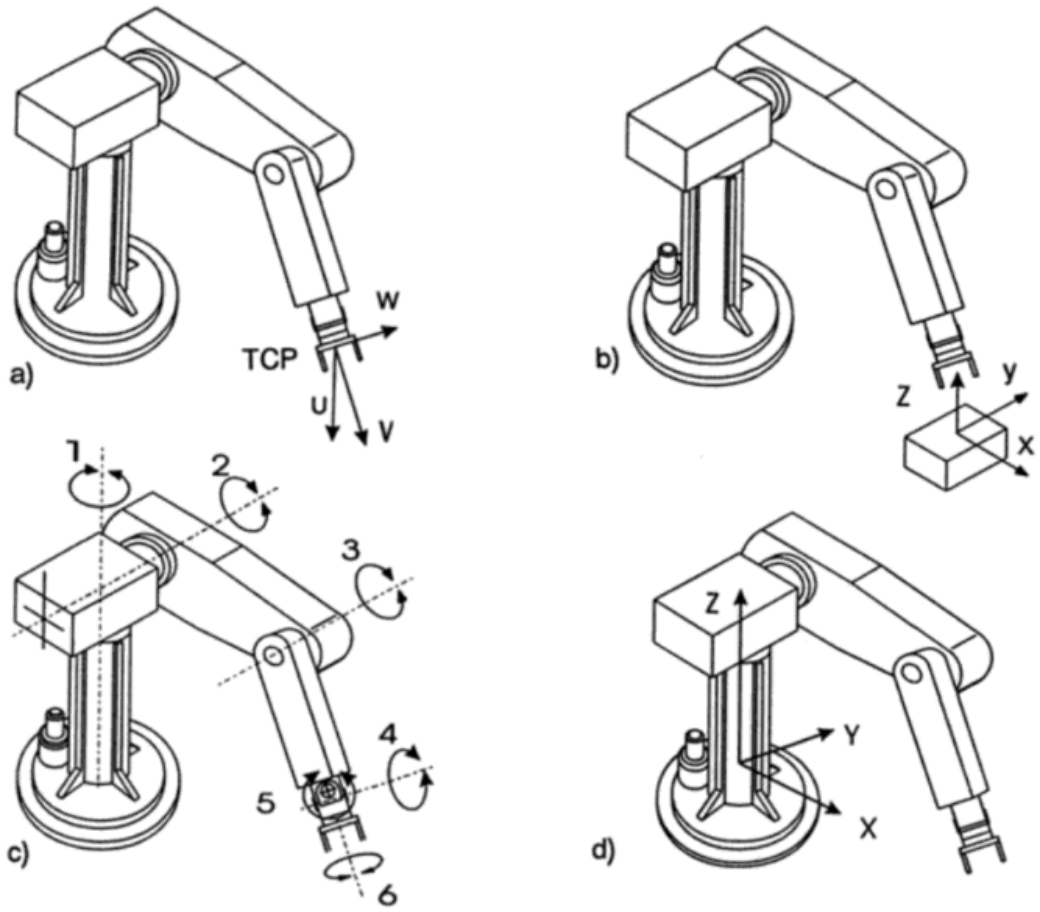


Abbildung 2.21: Koordinatensystemtypen eines Roboters nach [30]

In Abbildung 2.21 sind die Koordinatensystemtypen dargestellt. Die Bezugskoordinatensysteme eines Roboter sind das Welt- oder Basiskoordinatensystem [d], das Werkzeugkoordinatensystem [a] und Benutzerkoordinatensysteme[b]. Das Weltkoordinatensystem ist unabhängig von den Bewegungen des Roboters und wird für die örtliche Synchronisierung von mehreren Robotern eingesetzt. Der Ursprung des Werkzeugkoordinatensystems liegt im TCP des Roboters und ist somit von der Stellung des Roboters abhängig. Benutzerkoordinatensysteme werden vom Benutzer definiert und können beispielsweise auf die Arbeitsebene des Roboters oder auf ein Werkstück gelegt werden. Zusätzlich kann ein Punkt im Raum auch über die Stellung der Robotergelenke angegeben werden, dies wird als Achskoordinatensystem [c] bezeichnet [26].

3 Hardware

In diesem Kapitel wird die Hardware des Messplatzes beschrieben. Dabei wird zunächst der allgemeine Aufbau des Messplatzes dargestellt. Anschließend wird der Aufbau des Roboters und des Afterloading-Gerätes erläutert. Zum Abschluss des Kapitels werden die elektronischen Komponenten vorgestellt.

3.1 Gesamtaufbau des Messplatzes

Der Messplatz ist, aufgrund der starken radioaktiven Strahlung während der Messung, in zwei Räume aufgeteilt. Die Elektronik des Messplatzes befindet sich im Bedienraum und wird im Rahmen dieser Arbeit erneuert und in Abschnitt 3.4 vorgestellt. Die Komponenten werden vollständig ausgetauscht und der neue Messstand so konzipiert, dass er bis auf das Afterloading-Gerät, den Roboter und die Detektoren, keine Komponenten des alten Messstandes nutzt. Dies ermöglicht teilweise eine Entwicklung des Messstandes parallel zum Messbetrieb. Dafür werden neue Leitungen, neue Messgeräte und ein neuer Messrechner installiert.
Für die Konsistenz der Kalibrierergebnisse ist ein Vergleich der beiden Messplätze notwendig. Durch den parallelen Betrieb ist eine Validierung des neuen Messstandes durch Vergleich mit dem Bestehenden möglich. Sind Kalibrierfaktoren, die mit dem vorherigen Messstand ermittelt werden, durch den neuen Messstand reproduzierbar, so kann der neue Messstand für Kalibrierungen eingesetzt werden.
Im Messraum werden die radioaktiven Quellen und die Schachtkammern für die Kalibrierung aufgebaut. Dort befinden sich für die Messungen eine Kollimator-Bleiburg, ein Kawasaki-Roboter, ein Afterloading-Gerät und eine kleine Bleiburg für Sättigungsmessungen. Innerhalb der Kollimator-Bleiburg wird die HDR-Quelle für RAKR-Messungen mithilfe eines Röhrchens platziert. In Abbildung 3.1 links ist das Innere der Bleiburg dargestellt. Die HDR-Brachytherapie-Quellen werden über einen Katheter mit der Bleiburg verbunden und oberhalb des schmales Metallröhrchens vor der Blende platziert. Innerhalb der Bleiburg befindet sich zur Kontrolle der Quellposition eine Kamera, die an den Rechner angeschlossen wird. Innerhalb des Kollimators ist auf Pergamentpapier ein Fadenkreuz eingezeichnet. Kamera,

Fadenkreuz und Ionisationskammer werden mithilfe von Lasern auf eine Linie gebracht, so dass sich die Ionisationskammer mittig und vollständig innerhalb des kollimierten Strahls befindet. Für die Positionierung der Quelle wird die Kamera innerhalb der Bleiburg verwendet. Das Fadenkreuz ist durch die Raumbeleuchtung als Schatten innerhalb des beleuchteten Kollimators zu erkennen. Der Schatten der Quelle wird direkt vor diesem Kreuz positioniert. In Abbildung 3.1 rechts ist der Schattenwurf des Fadenkreuzes und der Quelle dargestellt.

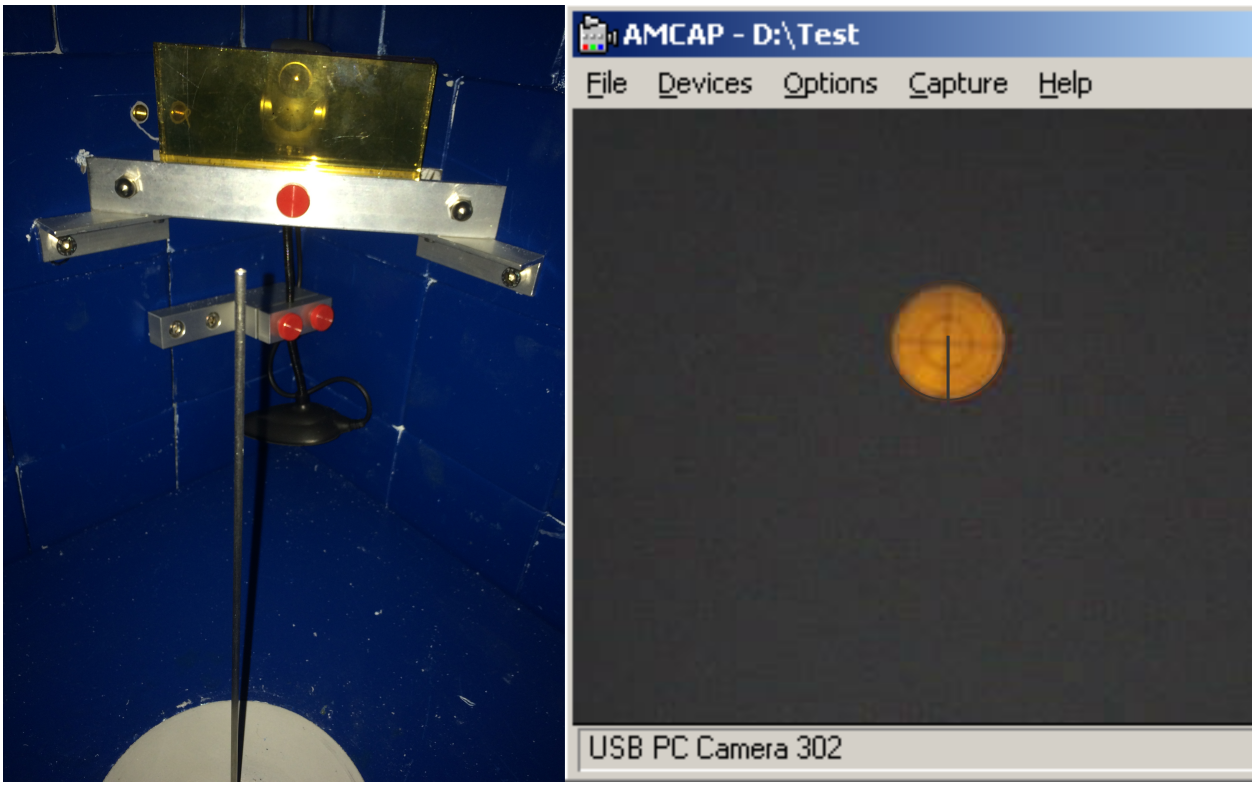


Abbildung 3.1: links: Innenaufbau des Bleiburg-Kollimators; rechts: Aufnahme mit der Webcam in dem Bleiburg-Kollimator aus der Bleiburg heraus

Der Kollimator mit den neu ausgerichteten Laserlinien ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Die drei Linienlaser sind oberhalb des Kollimators und an der Wand neben der Bleiburg befestigt. Der Schnittpunkt der drei Linien befindet sich in einem Meter Abstand mittig im kollimierten Strahlungskegel. Mithilfe dieses Laserkreuzes kann die Kugelionisationskammer reproduzierbar positioniert werden.

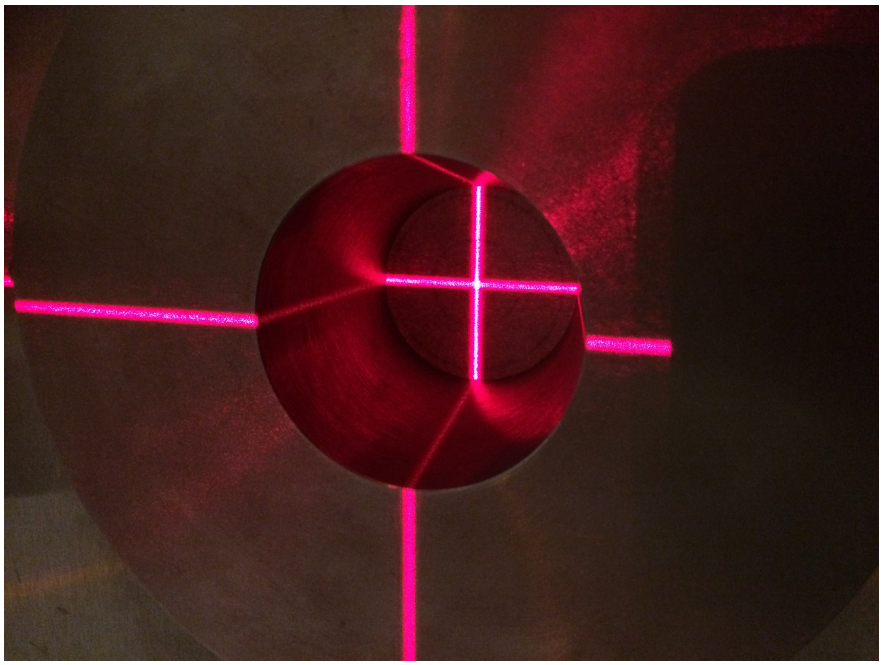


Abbildung 3.2: Kollimator mit Fadenkreuz und zwei Laserlinien

Um die Position der Laser im Rahmen des Qualitätsmanagements überprüfen zu können, wird ein Kreuz-Linien-Laser von Geo-Fennel mit Nivellier-Funktion und eine Plexiglasplatte mit eingeritztem Fadenkreuz genutzt. Der Aufbau ist in Abbildung 3.3 links dargestellt. Das Gerät erzeugt eine horizontale Linie und vier vertikale Linien, die im rechten Winkel aufeinander stehen. Der Schnittpunkt der Laser ist unterhalb des Gerätes mit einem Punkt markiert. Dieser Punkt und die vertikalen Linien werden mit dem Fadenkreuz auf der Plexiglasplatte und mit dem Fadenkreuz innerhalb des Kollimators ausgerichtet. Der Abstand dieses Schnittpunktes zum Quellhalter wird mithilfe eines Laser-Entfernungsmessers mit einer Genauigkeit von etwa 1,5 mm ermittelt und auf einen Abstand von einem Meter eingestellt. Dieser Aufbau ist in Abbildung 3.3 rechts dargestellt. Die an den Wänden befestigten Laser werden so eingestellt, dass sie mit den Laserlinien des Nivellierlasers übereinander liegen. Die eingestellte Roboterposition wird eingespeichert und kann so jederzeit wieder angefahren werden. Somit ist eine Überprüfung der angebauten Laser mithilfe der Plexglasplatte und des Nivellierlasers möglich. Diese Überprüfung sollte zur Qualitätssicherung etwa einmal im Jahr oder nach Umbaumaßnahmen durchgeführt werden.

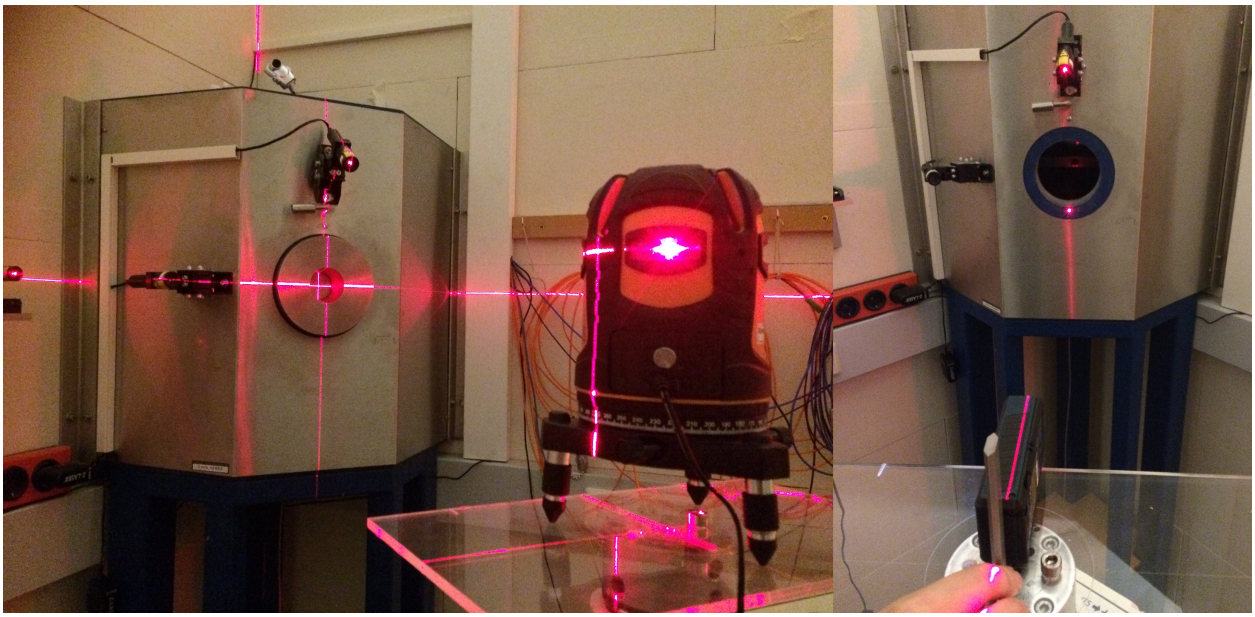


Abbildung 3.3: Nivellierlaser zur Ausrichtung des Lasersystems

3.2 Kawasaki-Roboter

Für die Positionierung der radioaktiven HDR-Quellen wird in der PTB ein Kawasaki Roboter genutzt. Mit diesem 6-Achs-Knickarmroboter (Kawasaki Typ FS20N) wird die Position der Quelle relativ zur Ionisationskammer variiert. Dabei kann entweder die Quell- oder die Ionisationskammerposition mit dem Roboter verändert werden. Der Roboter wird für die Messung der RAKR und der Anisotropien der Quellen genutzt. Für die Schachtkammerkalibrierung dient er als Halterung für die Kammer. Die Kammer soll dabei möglichst mittig im Raum und oberhalb des Afterloading-Gerätes, siehe Abbildung 2.13, positioniert werden, um Streueffekte zu minimieren.
Der Roboter wird über ein Steuergerät mit Programmierhandgerät gesteuert. Die Steuerung ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Diese übernimmt die Bahnsteuerung, Programmausführung und Ansteuerung der Achsmotoren. Für die Kommunikation werden verschiedene Bussysteme zur Verfügung gestellt.
Die Steuereinheit wird über eine serielle RS232-Schnittstelle mit dem Computer verbunden. Über diese oder über das Handbediengerät können Programmabläufe implementiert werden. Für die Steuerung des Roboters über den Computer wird die Software KCwin32 genutzt. Mit dieser können die aktuell auf dem Roboter vorhandenen Programme ausgelesen und neue geschrieben und geladen werden. Zusätzlich ist auch eine direkte Steuerung über die serielle Schnittstelle möglich.



Abbildung 3.4: Steuerung des Kawasaki-Roboters

Die Bewegung des Roboters kann im Glenk-, Welt- oder Werkzeugkoordinatenmodus erfolgen. Im Gelenkkoordinatenmodus werden die sechs Gelenke einzeln angesteuert. In Welt- oder Werkzeugkoordinatenmodus wird die Pose entlang einer Koordinatenachse, durch simultane Veränderung mehrerer Gelenke variiert.
Die Definition eines Punktes im Raum kann ebenfalls in Gelenkkoordinaten oder Weltkoordinaten erfolgen. Die Gelenkkoordinaten geben die Stellung der sechs Gelenkachsen in Grad an. Die Weltkoordinaten geben die drei Translationsangaben für die Position in Millimetern und die drei Rotationsangaben für die Orientierung des TCP in Grad an.
In Abbildung 3.5 sind die eingestellten Koordinatensysteme des Roboters eingezeichnet. Der Roboter steht links im Bild in Gelenkkoordinaten auf seiner Null-Position. Diese Position kann zur Überprüfung der Gelenkkoordinaten genutzt werden. Am Roboter sind für diese Stellung auf beiden Seiten des Gelenkes Markierungen angebracht, welche in Null-Position exakt aufeinander treffen müssen.
Der Ursprung des Weltkoordinatensystems liegt in der Basis des Roboters, wobei die Z-Achse (blau) senkrecht auf den Boden steht und die X-Achse (grün) der Strahlachse des kollimierten Strahls entspricht. Der kollimierte Strahl ist auf der Abbildung in hellgelb dargestellt. Auf dem Endeffektor des Roboters befindet sich das Werkzeugkoordinatensystem. X-, Y- und Z-Achse sind in den gleichen Farben wie das Weltkoordinatensystem gehalten. Dieses System ist mit dem Endeffektor verbunden und bewegt sich mit diesem im Raum. Das Weltkoordinatensystem ist fest im Raum.

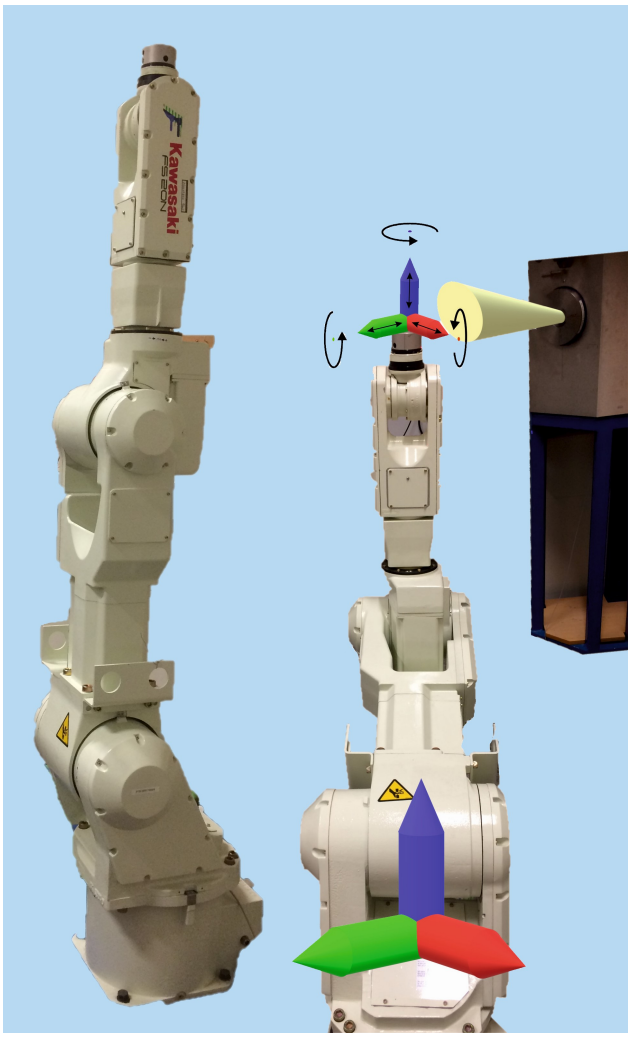


Abbildung 3.5: Messraum mit eingezeichneten Roboterkoordinatensystemen

Der Roboter hat laut Datenblatt [31] eine Wiederholgenauigkeit von 0,1 mm. Für die RAKR-Messung werden fünf Positionen eingespeichert. Diese dienen zur Positionierung der Kugel-Ionisationskammer innerhalb des kollimierten Strahls in verschiedenen Abständen. Weitere Roboterpositionen werden für die Schachtkammerkalibrierung, die verschiedenen Anisotropiemessungen und das Qualitätsmanagement programmiert.
Für die Schachtkammerkalibrierung wird der Endeffektor mittig im Raum oberhalb des Afterloading-Gerätes parallel zum Boden ausgerichtet. Für die Anisotropiemessungen wird der Roboter so positioniert, dass sich die Quelle auf der Achse des Lasers befindet. Somit können die Quelle und der Detektor auf einer Achse ausgerichtet werden.

3.3 Afterloading-Gerät

Für die Kalibrierung in der Brachytherapie ist es notwendig, hochradioaktive, sogenannte HDR-, Strahlungsquellen reproduzierbar und präzise zu positionieren. Dabei ist der Strahlenschutz, zusätzlich zur Messgenauigkeit, von höchster Bedeutung. Um die Positionierung der Quelle ohne Strahlenexposition zu ermöglichen, ist sie an einem Führungsdraht befestigt. Mittels dieses Drahtes wird die Quelle innerhalb von Führungskathetern durch sogenannte Afterloading-Geräte bewegt.
Ein Bewegen der Quelle darf nur ermöglicht werden, wenn sich keine Personen im Raum aufhält. Um dies zu gewährleisten, wird ein Sicherheitskreis installiert. Die Steuerung des Sicherheitskreises ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Die Steuerung ist mit einem Türkontakt, mehreren Notausschaltern im Messraum und dem Schlüsselschalter an der Steuerung verbunden. Nur wenn die Tür geschlossen ist und kein Notausschalter aktiv ist, kann der Sicherheitskreis mit dem Schlüsselschalter geschlossen werden. Wird ein Notausschalter gedrückt oder die Tür geöffnet, öffnet sich der Sicherheitskreis und die Afterloading-Steuerung zieht die Quelle mit maximaler Geschwindigkeit in den Quelltresor.

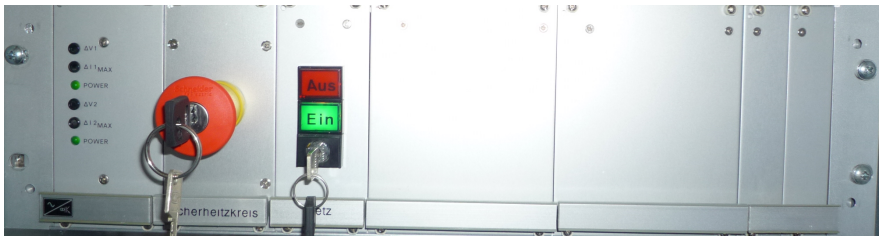


Abbildung 3.6: Steuerung des Sicherheitskreises

Abbildung 3.7 zeigt das unverkleidete Afterloading-Gerät der PTB. Dies ist eine Sonderanfertigung, die es ermöglicht, Quellen von verschiedenen Herstellern handhaben zu können. Der Führungsdraht der Quellen wird durch die Walzen des Afterloading-Gerätes bewegt. Dadurch kann die Quelle vollautomatisch in den Quelltresor hinein und hinaus bewegt werden.

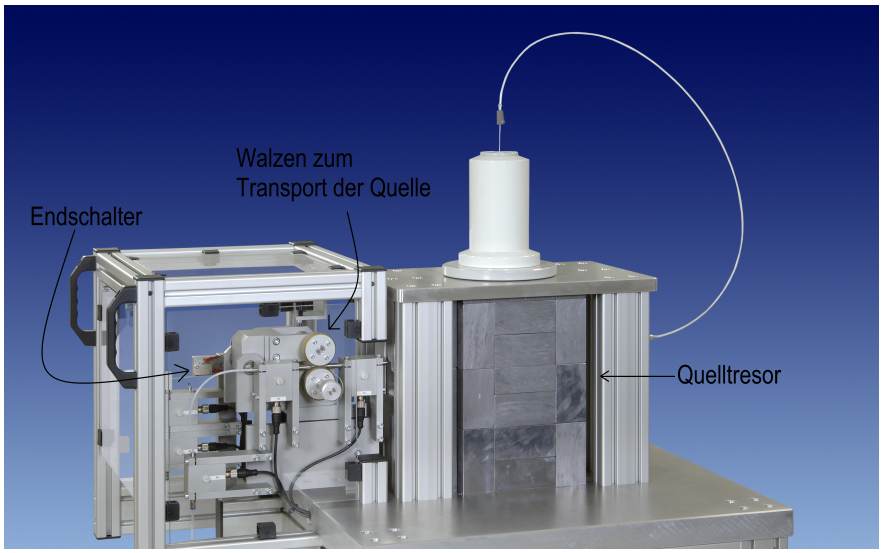


Abbildung 3.7: Afterloading-Gerät der PTB

Der Tresor des Afterloading-Gerätes wird mit einer zusätzlichen Schicht Bleiziegel verkleidet, um die Strahlenexposition bei Tätigkeiten in der Nähe des Gerätes möglichst gering zu halten. Dies ist vor allem bei hochenergetischen Strahlungsquellen, wie ^{60}Co, notwendig. Trotz dieser Abschirmung ist auch außerhalb des Tresors mit erhöhter Strahlenbelastung zu rechnen. Daher ist der Laborraum nur mit amtlicher Strahlenschutzüberwachung zu betreten und die Aufenthaltsdauer zu minimieren. Die Nutzung des Afterloading-Gerätes darf nur zu zweit und durch autorisierte und befähigte Personen durchgeführt werden.
Die Ansteuerung des Afterloading-Gerätes erfolgt über eine Simatic-S7 SPS. Abbildung 3.8 zeigt das Bedienfeld des 19„-Einschubs. Über das Touchpanel ist eine direkte Steuerung des Gerätes möglich. Für eine automatisierte Messung ist es allerdings erforderlich, die Ansteuerung durch einen Computer vorzunehmen. Dafür ist eine serielle RS232-Schnittstelle vorgesehen. Über die Schnittstelle können Befehle an die Steuerung und der aktuelle Status des Afterloading-Gerätes an den PC übertragen werden. Der Befehlssatz und die Zusammensetzung des zurück gesendeten Status ist im Anhang unter Abschnitt A.3 nachzulesen.

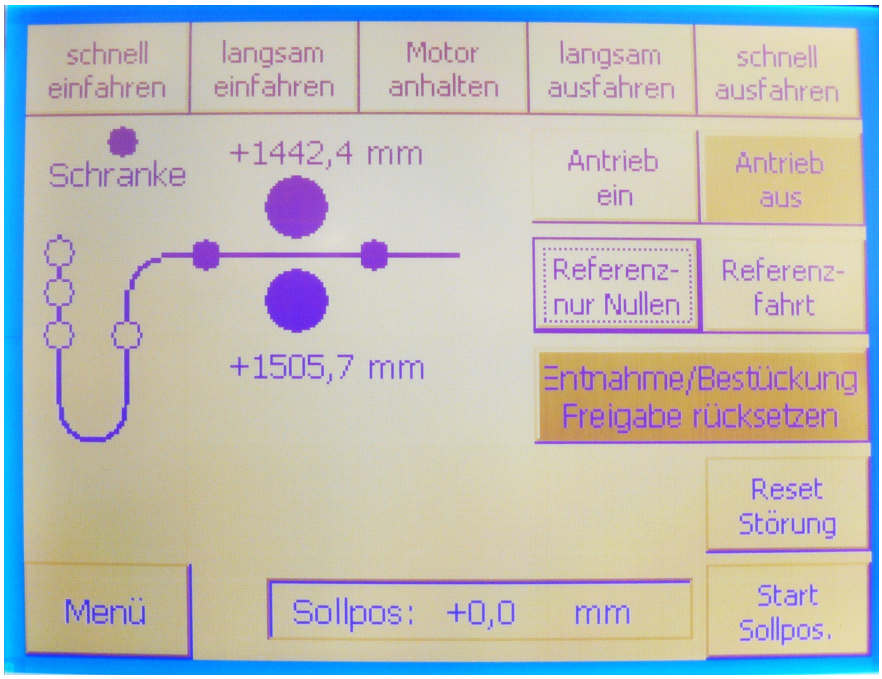


Abbildung 3.8: Steuerung des Afterloading-Gerätes

Für die Kalibrierungen ist es notwendig, mittels des Afterloading-Gerätes die Quelle reproduzierbar an vorgegebene Sollpositionen zu transportieren. Für die Kalibrierung von Schachtkammern muss zusätzlich die Quellposition innerhalb der Kammer ermittelt werden.

3.4 Messelektronik

Die Messelektronik im Bedienraum dient zur Aufnahme der Messsignale und der Versorgung der Detektoren. Die gesamte neue Messelektronik wird über Ethernet-Schnittstellen mit dem Messrechner verbunden. Für das Aufnehmen der Umgebungsparameter Luftdruck und Temperatur werden der Luftdrucksensor Setra270 und ein PT100-Sensor mit einem Keysight 34972A Datenlogger über einen 16-Kanal Multiplexer verbunden.
Die Ionisationskammern werden mit Hochspannung von ± 100 V bis ± 800 V versorgt. Dafür wird ein in der PTB entwickeltes Hochspannungsmodul eingesetzt [32].
In den Ionisationskammern wird durch ionisierende Strahlung Ladung freigesetzt und durch das elektrische Feld zu den Elektroden transportiert. Um diese Ladungen zu messen, wird ein in der PTB entwickelter Ladungsmesser eingesetzt. Die entstehenden Ladungsträger laden dabei einen Kondensator auf und aus der darüber gemessenen Spannung und der Integrationszeit wird der Strom bestimmt [33]. Zum Elektrometer gehört ein Integrator, eine Taktkarte und eine Interfaceplatine für die Ansteuerung über eine Ethernet-Schnittstelle. Zusätzlich wird zur Auslesung der Spannung ein Voltmeter benötigt. Es wird ein Keysight

34461A verwendet.
In Abbildung 3.9 ist die neue Messelektronik dargestellt. Oberhalb des Messrack sind der Datenlogger und das Voltmeter plaziert. Im Messrack sind von oben nach unten die Afterloader-Steuerung, der Sicherheitskreis und der 19„-Rahmen platziert. In diesem Rahmen befindet sich das in der PTB entwickelte Hochspannungsmodul, der Integrator, die Taktkarte und die Ethernet-Schnittstellen-Karte. Unterhalb des Messracks befindet sich der Messrechner. Die Sensoren für Druck und Temperatur werden für den Kalibrierbetrieb im Messraum aufgestellt.



Abbildung 3.9: Der neue Messstand für die HDR-Kalibrierung der Brachytherapie

Die Ionisationskammer im Messraum und die Messelektronik im Bedienraum werden über

zwei ca. 15 m lange Leitungen verbunden. Dabei werden Hochspannung und Messsignal über zwei einzelne Leitungen verbunden, um eine Störung des Messsignals durch die Hochspannung zu verhindern. Für den Anschluss der Ionisationskammern müssen diese beiden Leitungen zusammen geführt und an verschiedene Steckertypen angeschlossen werden. Für die Kalibrierung mit verschiedenen Ionisationskammern werden daher Adapterleitungen benötigt. In Abbildung 3.10 ist ein Adapter dargestellt. Die Adapter dienen für die Zusammenführung von Hochspannung und Messsignal auf die kammerspezifischen Stecker. Bisher erfolgte die Auswahl des korrekten Kammeranschlusses über einen Auswahlschalter, an welchem die verschiedenen Stecker dauerhaft angeschlossen sind. Die Schalterstellung ist jedoch schwer überprüfbar und kann daher in der Bedienung zu Fehlern, d.h. nicht nutzbaren zusätzlichen Messungen, führen.

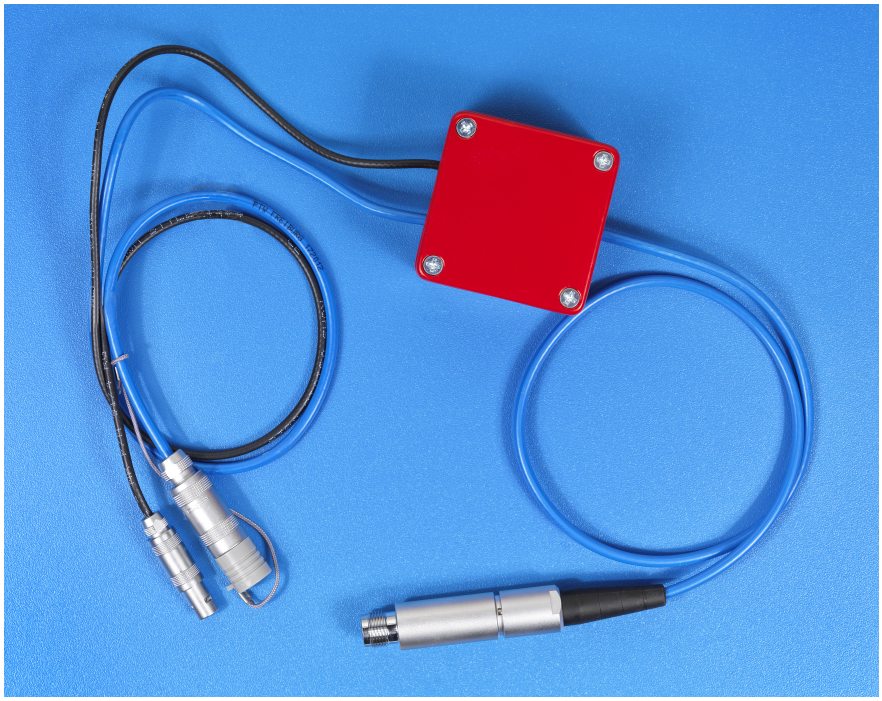


Abbildung 3.10: Adapterstück für die Verbindung von Hochspannung und Messsignal

Die Unsicherheit der Kalibrierfaktoren wird unter anderem durch die Unsicherheit der Ladungsmessung und durch die Stabilität der Hochspannung beeinflusst. Der Wert der Hochspannung ist, solange die Sättigungsspannung erreicht wird, vernachlässigbar. Allerdings wird der Eingangsstrom durch die Stabilität der Hochspannung beeinflusst. Der Eingangsstrom ergibt sich aus Gleichung 3.1. Die eingesetzte Spannungsquelle hat eine Spannungsänderung von weniger als 80 µV in 10000 s. Dies entspricht bei einer Kammerkapazität von 20 pF einem Strom von etwa 0,16 aA [32] und ist somit vernachlässigbar, da die kleinsten Messströme in

der Größenordnung von 1 fA liegen.

$$I_U = \frac{C_K \cdot \Delta U_K}{\Delta t} \tag{3.1}$$

mit

$$\begin{aligned} I_U &= \text{Erzeugter Strom} \\ C_K &= \text{Kammerkapazität} \\ \Delta U_K &= \text{Änderung der Hochspannung} \\ \Delta t &= \text{Messzeit} \end{aligned}$$

Die Unsicherheit des Elektrometers wird maßgeblich durch den Eingangsruhestrom bestimmt. Dieser Strom erzeugt am Elektrometer eine Ladung ohne angelegtes Messsignal und wird auch als Leckstrom bezeichnet. Der Leckstrom von erhältlichen Elektrometern liegt im Bereich von einigen Femtoampere. Da das Messsignal nur wenige Größenordnungen größer ist muss der Eingangsruhestrom korrigiert werden. Um diese Korrektur zu ermöglichen, muss die Stabilität des Leckstroms gewährleistet sein. Die Standardabweichung des in der PTB entwickelten Elektrometers ist nach [32] etwa 0,3 fA. Dieser stabile Wert ergibt sich etwa 10 Minuten nach dem Einschalten des Elektrometers.

4 Software

In diesem Kapitel wird das entwickelte Messprogramm genauer erläutert. Dabei wird zunächst auf die Grundlagen der Entwicklungsumgebung und die zur Verfügung stehende Messplatzbibliothek des PTB-Fachbereichs 6.3 beschrieben. Anschließend wird auf die Softwarekomponenten für den Roboter, das Afterloading-Gerät, die Datenstruktur, die Mess- und die Auswertesoftware eingegangen.

4.1 Entwicklungsumgebung und Bibliothek

Die Software des Messstands wird in der Entwicklungsumgebung „Lazarus“ in der Programmiersprache Object Pascal entwickelt. Für diese Entwicklungsumgebung steht im Fachbereich 6.3 eine umfangreiche Bibliothek zur Programmierung von Messplätzen zur Verfügung. In der Messplatzbibliothek ist bereits ein Projekt zur Strommessung mit Elektrometern verfügbar. Dies wird für den Messplatz der HDR-Brachytherapie genutzt und erweitert. Das Projekt implementiert das Quad-Core Modell des Fachbereichs. Dies ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

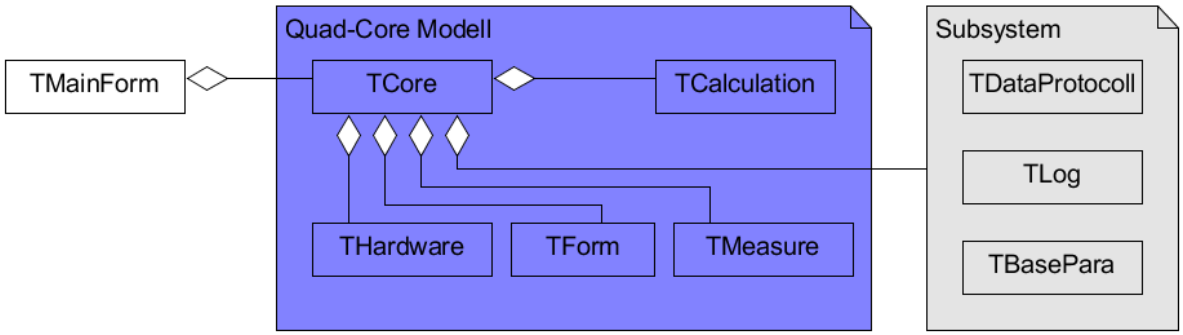


Abbildung 4.1: Quad-Core Modell des Fachbereichs 6.3

Das Projekt erzeugt zunächst das Hauptfenster, welches den Kern erstellt. Der Kern wiederum generiert die vier wesentlichen Softwarebestandteile jeder Messung: die Auswertung, die Messung, die Oberflächen und die Hardware. Zusätzlich werden dort weitere Subsysteme,

wie der Log-File, die Datenobjekte und der Berichtsmanager erstellt. Die Grundkomponenten für dieses Modell sind bereits vorhanden. Die davon abgeleiteten Klassen müssen für die HDR-Brachytherapie erweitert werden.

4.2 Allgemeiner Aufbau der Software

In Abbildung 4.2 ist das Hauptfenster der Messsoftware dargestellt. Dieses Fenster erzeugt den Kern und die weiteren Objekte. Durch die Knöpfe werden zwei verschiedene Messfenster geöffnet.



Abbildung 4.2: Hauptfenster der Messsoftware

Für die Entwicklung und den Test der Messhardware wurde das Experten-Fenster entwickelt. Dies ist im Anhang unter Punkt A.1 dargestellt. Es ist möglich über diese Oberfläche jede Hardwarekomponente einzeln anzusprechen und eine einfache Elektrometermessung zu starten. Mithilfe dieser Oberfläche können die einzelnen Hardwarkomponenten und ihre Ansteuerung getestet werden. Die Elektrometermessung dient zur Überprüfung der Linearität und der Kalibrierung des Elektrometers. Das Starten der Messung öffnet ein weiteres Fenster zur Darstellung der Messergebnisse. In Abbildung 4.3 ist eine Elektrometermessung mit einer angeschlossenen Präzisionsstromquelle und einem eingespeisten Strom von 190 fA dargestellt.

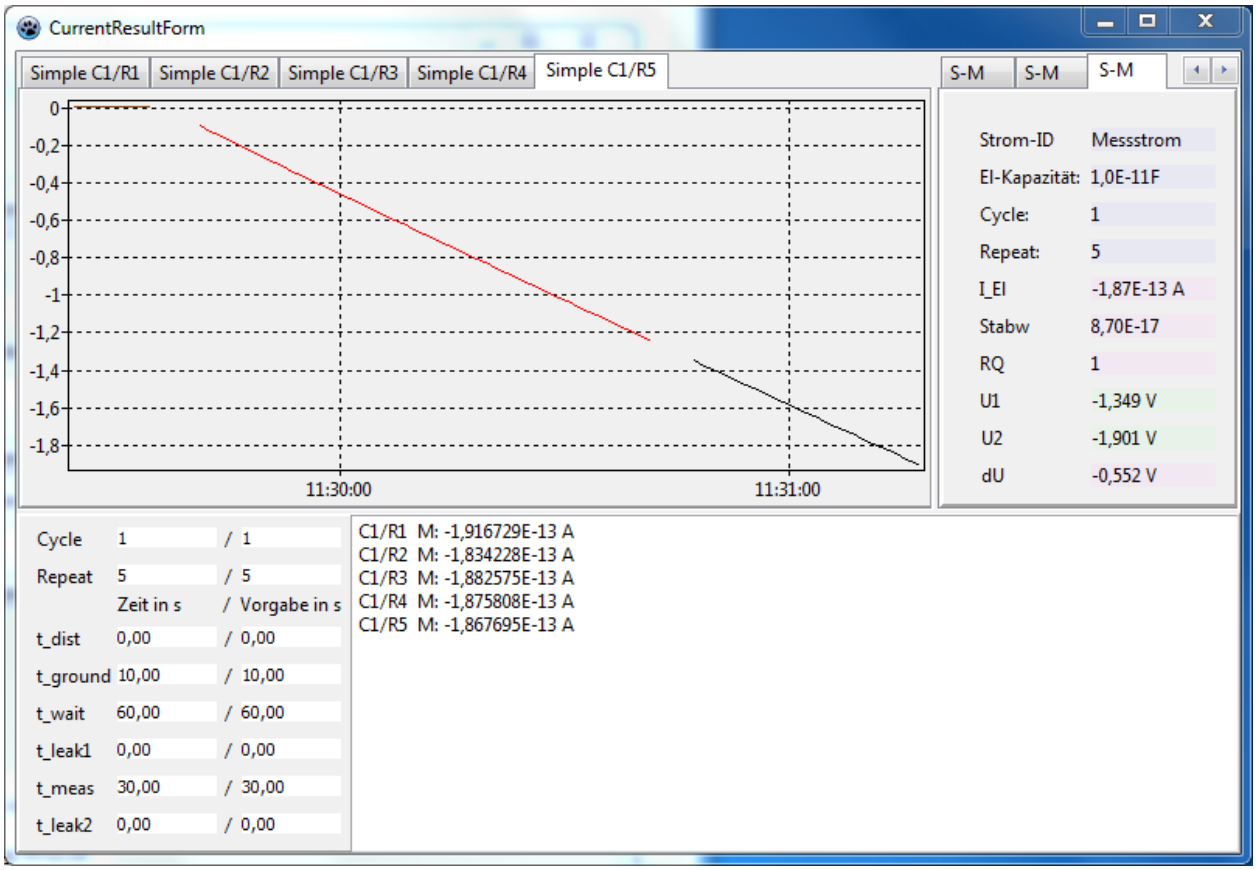


Abbildung 4.3: Ergebnis einer Elektrometermessung

In der „CurrentResultForm“ (Abbildung 4.3) ist die über der Elektrometerkapazität gemessene Spannung über der Zeit dargestellt. Dabei wird zunächst das Elektrometer geerdet (in braun), anschließend wird eine Wartezeit (in rot), die abhängig von der gewählten Kapazität ist, abgewartet. Innerhalb dieser Zeit kann es zu Nichtlinearitäten kommen. Daher werden die Spannungswerte erst nach dieser Wartezeit für die Stromberechnung genutzt und das Messsignal (in schwarz) aufgenommen. Aus der Steigung der Spannungswerte wird der Eingangsstrom ermittelt. Da die Strahlungsquelle nicht abgeschaltet werden kann, muss der Spannungshub welcher während der Wartezeit integriert wird in die Wahl des Messbereichs mit eingerechnet werden.
Für die Kalibrierung wird der Messablauf aus einzelnen Messungen zusammengestellt. In Abbildung 4.4 ist das Fenster für die Zusammenstellung und das Starten der Kalibriermessungen dargestellt. Der obere Bereich ist in verschiedene Panel unterteilt. Das grün umrandete Panel stellt die Umgebungsbedingungen, das Datum, die Weltzeit (UTC) und den aktuellen Messaufbau dar. Im dunkelrot umrandeten Panel werden die Quelldaten eingetragen. Die aktuelle RAKR und das Referenzdatum werden bei bekannten Quellen aus der Initialisierungsdatei eingelesen. Im blau umrandeten Panel werden die Kammerdaten ein-

getragen. Der Kalibrierfaktor wird bei bekannten Kammern ebenfalls eingelesen. Bei der Einstellung des Katheters wird überprüft, ob dieser zum eingestellten Applikator passt. Aus der Wahl des Applikators und des Katheters ergibt sich für die Messung die voraussichtliche Endposition der Quelle. Im braun umrandeten Panel werden die Auftragsdaten, sowie der Speicherpfad, eingetragen. Im lila umrandeten Panel kann ohne eine vollständige Messung die Hochspannung eingeschaltet werden und über die Funktion „ZeroCheck“ die Spannung über dem Elektrometer angezeigt werden. Zusätzlich kann in diesem Panel eingestellt werden, ob die Hochspannung nach der Messung ausgeschaltet werden soll. Falls weitere Messungen mit der gleichen Kammer folgen sollen kann eine weitere Messung ohne erneute Warmlaufzeit gestartet werden. Über den Menüreiter „Hardware“ können für den Roboter und das Afterloading-Gerät Dummys eingesetzt werden. Über diesen Reiter wird die Hardware verbunden und es können die Roboter- und die Afterloading-Steuerung geöffnet werden.

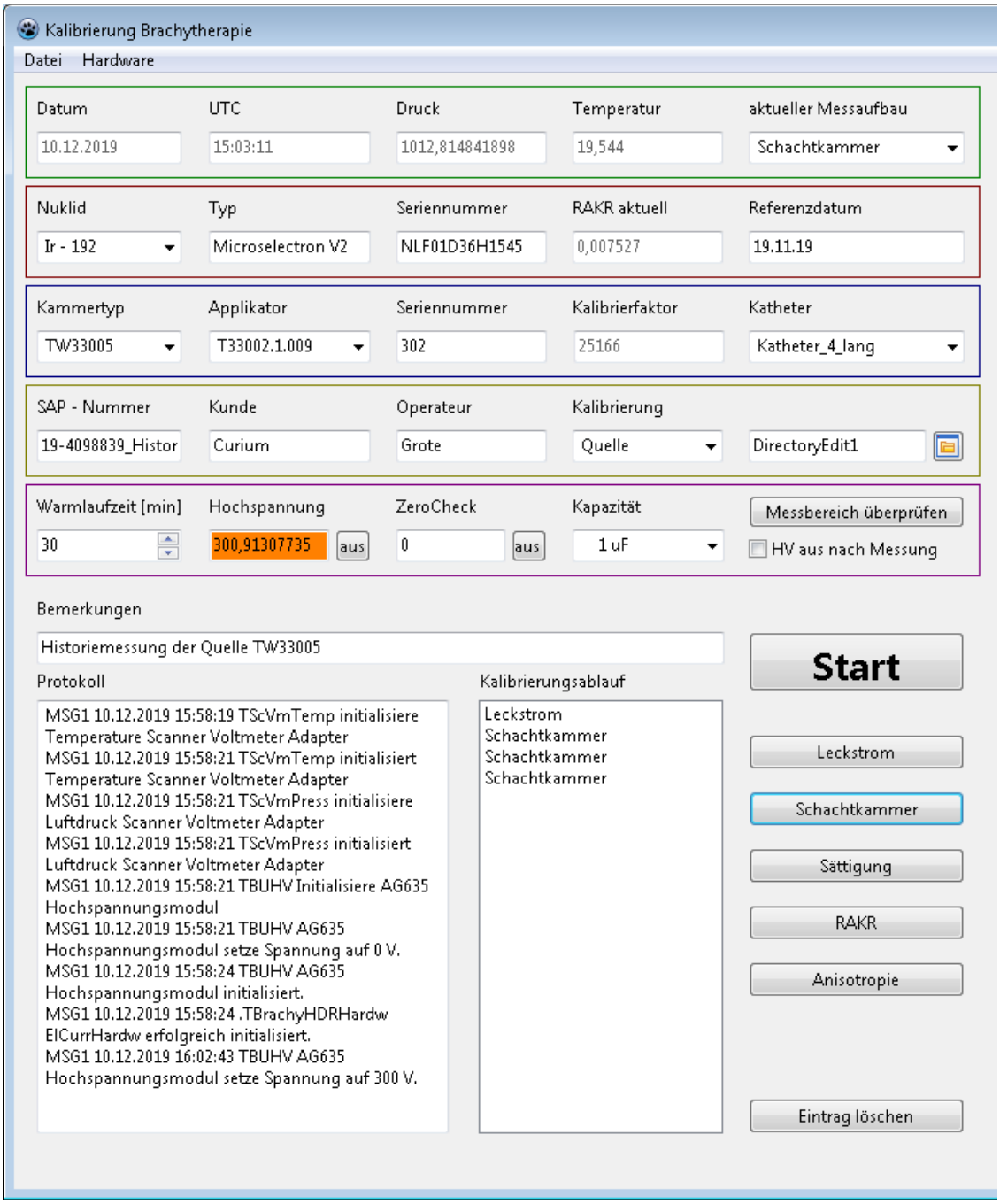


Abbildung 4.4: Kalibrier-Fenster der Messsoftware

Im unteren Bereich kann der Kalibrierablauf zusammengestellt werden. Dabei wird über die Knöpfe an der Seite die jeweilige Messung zum Messablauf hinzugefügt. Die Knöpfe öffnen Fenster zum Einstellen der Messparameter. Zwei Beispiele solcher Fenster sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Durch die Schaltfläche „Eintrag löschen“ kann ein erstellter Eintrag wieder entfernt werden. Mit der Schaltfläche „Start“ wird die zusammengestellte Messung gestartet. Im Fenster „Protokoll“ werden sämtliche Nachrichten der Software, wie beispielsweise die an

die Hardware übergebenen Parameter, dargestellt.
Das Fenster zum Einstellen der Messparameter ist abhängig von der gewählten Messung. Dabei wird die Messzeit, die Anzahl der Wiederholungen (Repeats) und die Kapazität eingestellt. Zusätzlich können je nach gewählter Messung Minima und Maxima der Quellposition, der Quellwinkel und der Spannung sowie ihre Variationsschritte eingegeben werden. Über einen Haken kann eine kurze Leckstrommessung (3 x 60 s) vor der Messung hinzugefügt werden.



Abbildung 4.5: Fenster zur Einstellung der Messparameter für die Kammer-, die Sättigungs- und die Anisotropiemessung

Nach dem Starten der Messung wird das Fenster nach rechts erweitert und dort ein Diagramm mit den Messwerten, sowie dem Status dargestellt. In Abbildung 4.6 ist die Erweiterung des Messfensters dargestellt. Dort werden die Messergebnisse grafisch aufgetragen und der Messstatus angezeigt. Über das Diagramm ist schon während der Messung erkennbar, ob die Messwerte plausibel sind. Für eine Schachtkammermessung ergeben die Messwerte durch die Empfindlichkeit der Kammer eine Parabel. Für die RAKR-Messungen wird der Kehrwert von der Wurzel des Stromes über dem Abstand aufgetragen. Aufgrund des Abstandsquadratgesetzes ergibt sich dabei eine Gerade. Für die Sättigungsmessung wird sowohl der Kehrwert der Spannung als auch der quadrierten Spannung aufgetragen. Nach Abschnitt 2.4.2.2 ergibt sich für eine Funktion eine Gerade. Die Anisotropiemessungen ergeben etwa einen Kreis.

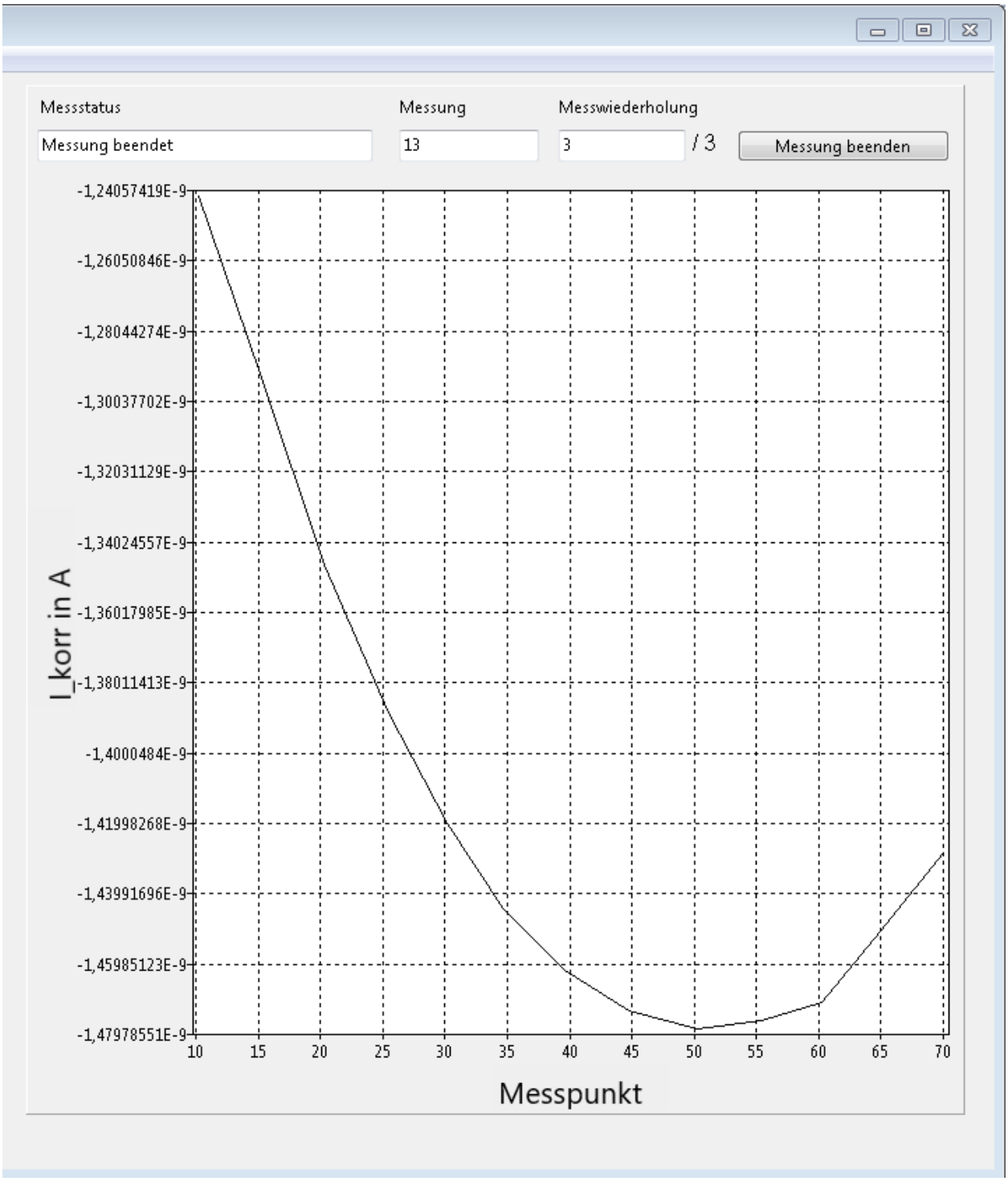


Abbildung 4.6: Erweiterung des Messfensters während der Messung zur Darstellung der Messergebnisse

4.3 Hardware

Die Hardware-Klasse des Projektes erzeugt alle notwendige Hardware-Objekte für die Kalibrierung. Über diese Klasse können die einzelnen Komponenten angesprochen werden. In Abbildung 4.7 ist die Objektstruktur der Hardwareklasse dargestellt. Die bereits vorhandenen Komponenten sind in schwarz dargestellt. Die neu im Rahmen dieser Arbeit erstellten Komponenten sind grün unterlegt. Die Klasse TIonDetector stellt alle Hardwarekomponenten zur Verfügung, die für eine Kammermessung notwendig sind. Die detaillierte Ansicht des Klassendiagramms befindet sich im Anhang unter Punkt A.2. In der detaillierten Ansicht sind zusätzlich zu den Variablen und Properties der Klassen auch die nutzbaren Funktionen dargestellt.

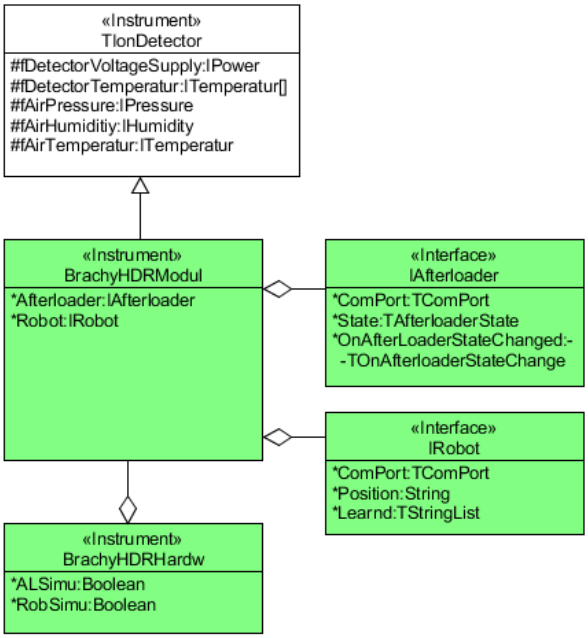


Abbildung 4.7: vereinfachtes Klassendiagramm der Hardwareklassen, detaillierte Ansicht im Anhang unter Punkt A.2

Die Hardwareklasse enthält alle Einzelkomponenten und stellt die Funktionen zum Erzeugen und Verbinden zur Verfügung. In der Hardware kann zusätzlich eingestellt werden, ob ein realer Roboter und ein reales Afterloading-Gerät angeschlossen sind oder ob eine Simulation genutzt werden soll. Dies ist zum Testen der Software parallel zum Messbetrieb notwendig. Zusätzlich können die Hardwareparameter, wie Schnittstellen und IP-Adressen, aus einer Initialisierungsdatei eingelesen werden.
Das TBrachyHDRModul fasst die Hardwareklassen zusammen und enthält Interfaces vom Afterloading-Gerät, dem Roboter und dem Ionendetektor. Der Ionendetektor wird bereits an mehreren Messplätzen verwendet und fasst die Hardwarekomponenten für die Messung

einer Ionisationskammer zusammen. Dazu gehören die Hochspannungsquelle (IPower), Sensoren für Detektortemperatur, sowie Raumtemperatur(ITemperatur), Druck (IPressure) und Luftfeuchtigkeit (IHumidity). Die Klassen für das Auslesen des Elektrometers sind ebenfalls in der Klasse TIonDetector enthalten.
Die Hardwareproperties innerhalb der Klassen TBrachyHDRModul und TIonDetector sind als Interfaces deklariert. Dadurch sind diese Komponenten variabel an die Hardware anpassbar. Einige Hardwarekomponenten sind bereits im Fachbereich im Einsatz und die Softwareklassen können übernommen werden. Die Softwareklassen des Voltmeters und Scanner-Voltmeters müssen aufgrund der neuen Ethernet-Schnittstelle hinsichtlich Timing und Kommunikation angepasst werden. Auf die Software der Komponenten Roboter und Afterloading-Gerät wird in den folgenden Abschnitten genauer eingegangen.

4.3.1 Roboter

Für die Hardwarekomponente Roboter wird ein Interface, eine Oberfläche, eine Hardwareklasse und eine Dummy-Klasse programmiert. Die Klassen implementieren das Interface. In Abbildung 4.8 sind die zum Roboter zugehörigen Klassen dargestellt. Im Interface werden die Records TPointWorld und TPointAxes zum strukturierten Abspeichern der Roboterpose definiert. Zusätzlich wird die Enumeration TRobPosType für die Kalibierpositionen des Roboters festgelegt.
Das Interface deklariert alle für die Oberfläche und den Messablauf benötigten Funktionen. Die Klassen TDummyRobot und TKawasaki implementieren diese Funktionen. Die Klasse TDummyRobot dient dabei als Simulation für den realen Roboter. TKawasaki steuert über eine serielle RS232-Schnittstelle den Roboter an.

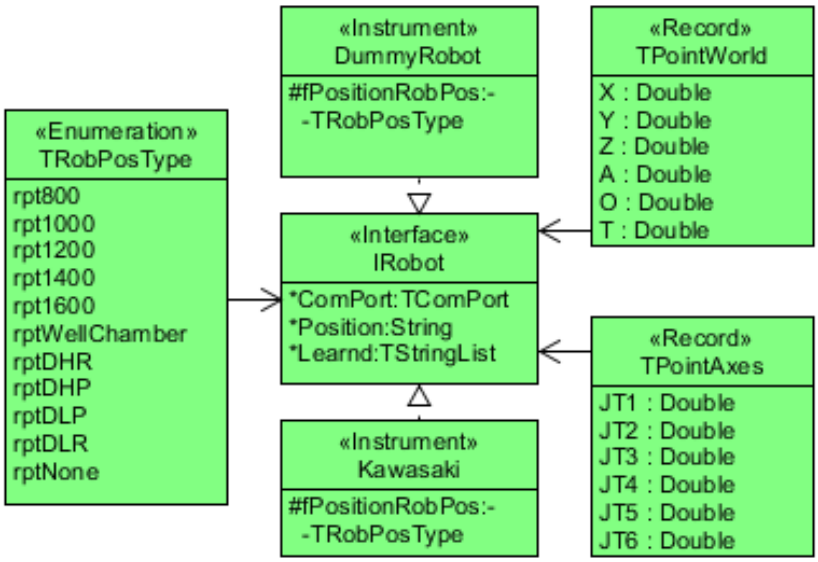


Abbildung 4.8: vereinfachtes Klassendiagramm der Roboterklasse, detaillierte Ansicht im Anhang unter A.3

Zu den Hardwareklassen des Roboters wird eine Oberfläche programmiert. Diese wird in die Messung integriert und ist zusätzlich als Stand-Alone-Programm nutzbar. Die Oberfläche ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Diese Oberfläche hat eine Property vom Typ IRobot. Diese kann nach dem Erzeugen der Oberfläche übergeben oder über das Menü der Oberfläche gesetzt werden. Dabei kann sowohl ein Objekt vom Typ TKawasaki oder vom Typ TDummyRobot übergeben bzw. erzeugt werden. Sobald der Roboter verbunden wurde, sind die unkritischen Funktionen der Oberfläche nutzbar.

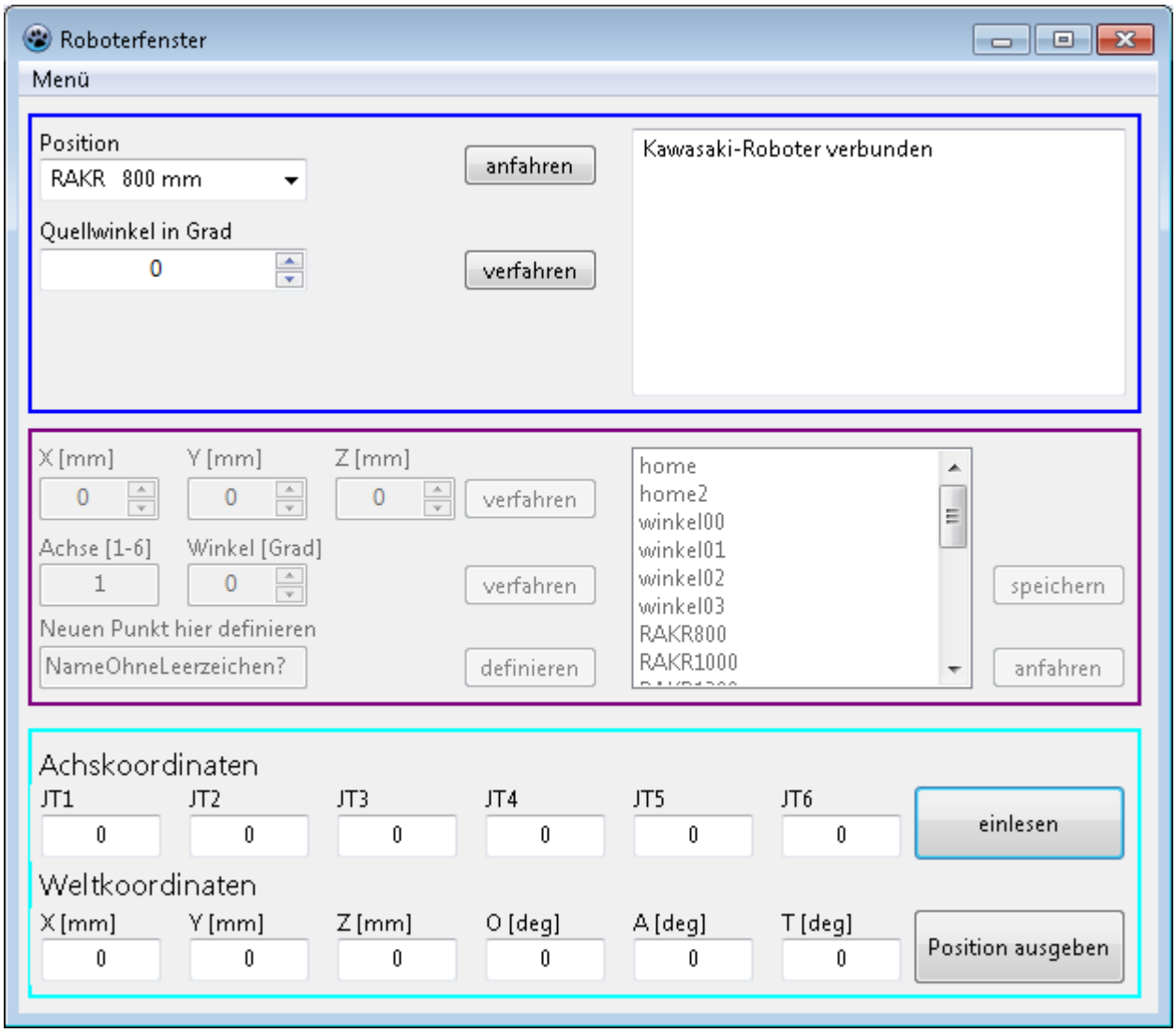


Abbildung 4.9: Oberfläche der Robotersteuerung

Die Oberfläche ist in drei Bereiche aufgeteilt. Der blau umrahmte Bereich ganz oben im Fenster umfasst alle für den Kalibrierbetrieb benötigten Funktionen, wie das Anfahren der einprogrammierten Kalibrierpositionen und das Einstellen verschiedener Winkel im letzten Gelenk. Dieses dient zum Einstellen des Quellwinkels für die Anisotropiemessungen. Zusätzlich wird über das Textfenster der Status des Roboters ausgegeben. Nach einer Bewegung kann über diese Fenster ausgelesen werden, ob die Bewegung erfolgreich war, oder ein Fehler aufgetreten ist. Der mittlere Bereich ist nur nach Anmeldung als Administrator über das Menü freigegeben. Dieser Bereich ermöglicht das Verfahren des Roboters in Weltkoordinaten und in Achskoordinaten. Zusätzlich können neue Punkte, beispielsweise zu Test- oder Qualitätssicherungszwecken definiert werden. Neu definierte Punkte werden in die Initialisierungsdatei des Roboters und in die Liste rechts in diesem Bereich eingetragen. Über die

Liste können diese Punkte nach der Definition erneut angefahren oder überschrieben werden. Somit können die für den Kalibrierbetrieb verwendeten Punkte ebenfalls in diesem Bereich überschrieben werden. Dies darf nur nach ausreichender Prüfung von autorisiertem Personal erfolgen.
Im dritten, türkis eingerahmten, Bereich können die aktuellen Achskoordinaten eingelesen und die Position ausgegeben werden.
Der blaue und der türkise Bereich ist nach dem Verbinden mit einem Roboter freigeschaltet. Der lila umrahmte Bereich ist sicherheitskritisch. Um eine unsachgemäße Bedienung, wie bereits erwähnt, zu vermeiden, muss für diese Funktionen das Administrator-Passwort eingegeben werden.
Die Monitorbefehle, die über die RS232-Schnittstelle übertragen werden, sind dem Handbuch des Roboters zu entnehmen [34]. In Abbildung 4.10 ist die Rückgabe des Roboters auf den Monitorbefehl „where“ dargestellt. Der Roboter gibt die aktuelle Position in vier Zeilen zurück. Dabei werden zunächst die Achskoordinaten und anschließend die Weltkoordinaten zurück gegeben. Die angezeigten Koordinaten entsprechen der Roboterstellung zur Kalibrierung von Schachtkammern. Für das Beispiel wurde die Verbindung zum Roboter über die Software „Putty“ hergestellt.

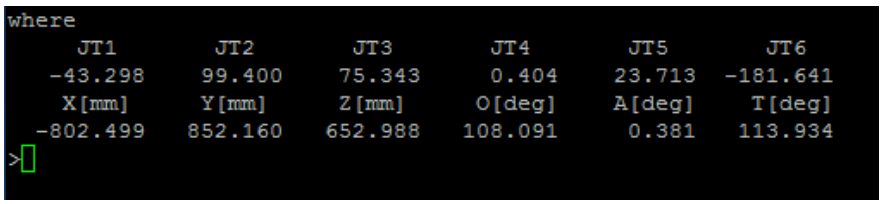


Abbildung 4.10: Zurückgesendeter Status des Roboters

4.3.2 Afterloading-Gerät

Für die Hardwarekomponente Afterloading-Gerät wird ein Interface, eine Oberfläche, eine Hardwareklasse und eine Dummy-Klasse programmiert. In Abbildung 4.11 ist das Klassendiagramm der zugehörigen Klassen dargestellt. Die Klassen implementieren das Interface. Über die grafische Oberfläche sollen sämtliche Funktionen der Touchpanel-Oberfläche und zusätzliche Funktionen für die Kalibrierung bedient werden können. Diese müssen durch das Interface bereitgestellt werden. Zusätzlich soll zur Laufzeit der Status des Afterloading-Gerätes und des angeschlossenen Sicherheitskreises dargestellt werden. Das Interface definiert für den Status des Afterloading-Gerätes das Record „TAfterloaderState“. Der Thread „TStateThread“ wird nach dem Verbinden des Gerätes gestartet und schickt im Hintergrund alle 200 ms eine Statusanfragen an das Gerät und schreibt die Antwort in eine Variable vom Typ „TAfterloaderState“. Falls sich diese lokale Variable von der Property der Klasse „State“

unterscheidet wird die Prozedur des Objektes „TAfterloaderStateChange“ aufgerufen und die Property der Klasse aktualisiert.

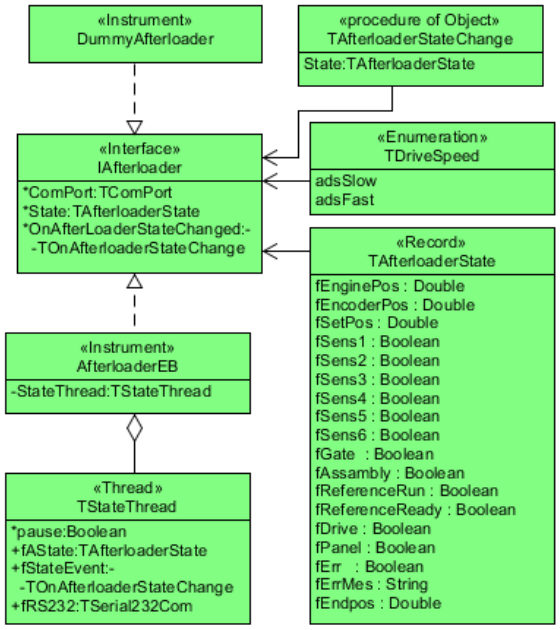


Abbildung 4.11: Vereinfachtes Klassendiagramm der Afterloadingklasse, detaillierte Ansicht im Anhang unter A.4

Zur Hardwareklasse des Afterloading-Gerätes wird eine Oberfläche programmiert. Diese wird in die Messung integriert und ist als Stand-Alone-Programm nutzbar. Die Stand-Alone-Funktion des Programms ermöglicht ein separates Testen der Klasse und die vollständige Steuerung des Afterloading-Gerätes vom Computer. Die Oberfläche hat eine Property vom Typ IAfterloader. Diese kann nach dem Erzeugen der Oberfläche übergeben oder über das Menü der Oberfläche gesetzt werden. Dabei kann sowohl ein Objekt vom Typ TAfterloaderEb oder vom Typ TDummyAfterloader übergeben bzw. erzeugt werden. Die Oberfläche ist in Abbildung 4.12 dargestellt.

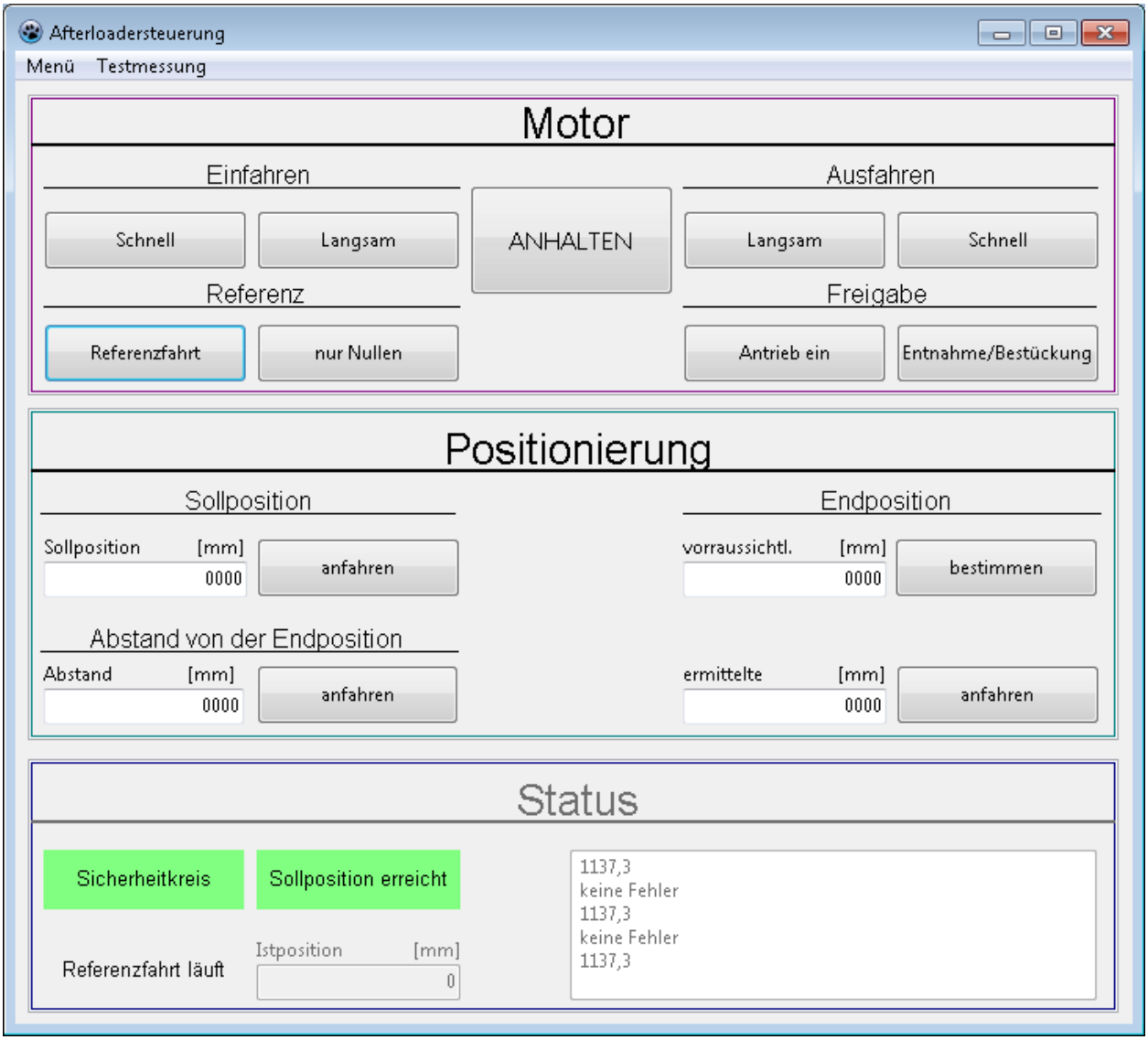


Abbildung 4.12: Oberfläche der Afterloading-Steuerung

Die Oberfläche ist in drei Panels unterteilt. Diese dienen zur Steuerung des Motors, zur exakten Positionierung der Quelle und zum Darstellen des Status. Erst nach dem Verbinden werden die Funktionen der anderen Schaltflächen freigeschaltet. Zusätzlich können über das Menü das Touchpanel der Simatic-Steuerung freigeschaltet oder gesperrt und Fehlermeldungen zurückgesetzt werden.

Das Panel „Motor“ dient zur Ansteuerung des Verfahrmotors. Vor jeder Bewegung der Quelle wird zunächst der Sicherheitskreis überprüft. Ist dieser geöffnet wird eine Warnung ausgegeben und die Quelle erst nach dem Schließen des Sicherheitskreises und bestätigen bewegt. Zusätzlich zur Steuerung der Quellbewegung kann die Quelle über diesen Bereich referenziert werden. Bei einer Referenzfahrt wird das Ende des Quelldrahtes mehrfach gegen einen Endschalter gefahren, um die Position der Quelle genau zu ermitteln. Anschließend wird die

Position auf Null gesetzt. Zusätzlich werden bei einer Referenzfahrt die Verfahrwalzen kontrolliert, ob sich auf diesen Rillen gebildet haben. Wird „nur Nullen“ gedrückt, entfällt diese Kontrolle und die Referenzierung benötigt weniger Zeit. Für das Be- und Entladen einer Quelle wird unter „Freigabe“, „Entnahme/Bestückung“ aktiviert. Dies ermöglicht das Öffnen des Sicherheitskreises, ohne dass das Afterloading-Gerät die Quelle wieder in den Tresor zurückzieht. Somit kann die Quelle in einen Transportbehälter gefahren und befestigt werden. Das Be- und Entladen darf nur von unterwiesenem Personal durchgeführt werden. Da die Funktion jedoch an der Afterloading-Steuerung frei verfügbar ist, wurde auf die zwingende Eingabe eines Passworts verzichtet.
Das Panel „Positionierung“ enthält die wesentlichen Funktionen für die Kalibrierungen. Für die Quellkalibrierung muss die Quelle wiederholt an eine bestimmte Sollposition gefahren werden, diese wird über die Kamera in der Kollimator-Bleiburg kontrolliert. Für die Schachtkammerkalibrierung muss zunächst die Endposition der Kammer ermittelt werden. Die Position innerhalb der Kammer wird anschließend als Abstand von dieser Endposition angegeben. Für die Bestimmung der Endposition ist zunächst die erwartete Endposition einzugeben. Bis 20 mm vor dieser Position wird die Quelle schnell aus dem Afterloading-Gerät herausgefahren, anschließend wird die Geschwindigkeit verringert. Bewegt sich die Quelle nicht mehr, so wurde die Endposition erreicht. Durch eine Blockierung des Katheters ist allerdings eine falsche Messung möglich. Die Software vergleicht daher, den eingegebenen Erwartungswert mit dem gemessenen Wert und gibt bei Abweichungen von mehr als 20 mm eine Warnung aus.
Der Befehlssatz des Afterloading-Gerätes umfasst 17 Befehle, die sich aus einem „B“ und einer laufenden Nummer zusammensetzen, beispielsweise „B01“. Zusätzlich kann die Sollposition im Format „S xxxx,x“ in Millimetern übermittelt werden. Der Befehlssatz ist im Anhang unter Punkt A.3 nachzulesen. Der Befehl „B14“ fordert das Steuergerät zur Übersendung des aktuellen Status auf. Dieser wird im folgenden Format zurückgesendet:
M-1234,5 DG-1234,5 SP-1234,5 S10101010 Z10101010 F1010101010100000 „CR“.
Der zurückgegebene Status ist ebenfalls im Anhang unter Punkt A.3 dargestellt und die Bedeutung der einzelnen Positionen erläutert. Die Position der Quelle wird im Afterloading-Gerät über zwei Sensoren erfasst. Der erste Sensor erfasst die Bewegung der vom Motor angetriebenen Walze und detektiert, wie weit die Quelle heraus geschoben werden sollte. Der zweite Sensor ist an der gegenüberliegenden Walze angebracht. Diese wird durch die Bewegung des Drahtes angetrieben. Somit erfasst dieser Drehgeber die tatsächliche Bewegung der Quelle. Über den Status wird zuerst die Position des Motorsensors in Millimetern übergeben und anschließend die Position des Drehgebers und die eingestellte Sollposition. Der Unterschied zwischen Motorposition und Drehgeberposition wird für die Ermittlung der Endposition genutzt. Durch das Anfahren der Sollposition wird die Motorposition auf

diese Position eingestellt. Durch die Verzögerung der Quellbewegung wird die Quelle allerdings nicht so weit heraus gefahren, wie vorgegeben. Dadurch muss beim Anfahren einer gewünschten Sollposition diese variiert werden, bis die Drehgeberposition mit der gewünschten Position übereinstimmt.
Im Status wird nach den Positionen der Zustand der Schalter gesendet. Dieser wird mit „S“ eingeleitet. Die Zahlen stellen dabei digitale Schalterzustände dar. Die Eins entspricht „Schalter geschlossen“ und die Null entspricht „Schalter geöffnet“. Die ersten sechs Ziffern geben die Schalterzustände der Sensoren für die Quellpostion wieder, anschließend folgt der Zustand des Sicherheitskreises und die letzte Ziffer dient als Reserve. Nach dem Buchstaben „Z“ folgt der Zustand des Systems und nach dem „F“ werden Fehlermeldungen ausgegeben. Dieser Status wird zur Laufzeit von dem StateThread umgewandelt und dieser speichert den aktuellen Status in die Property der Klasse „Status“. Das Statusevent der Oberfläche aktualisiert zusätzlich die Statusanzeige.
Die Klasse TAfterloader implementiert alle Funktionen, die für die Oberfläche und für die Kalibrierung benötigt werden. Diese können über die Oberfläche angesprochen werden. Die Funktionen lesen die notwendigen Parameter von der Oberfläche, verarbeiten diese und den aktuellen Status und senden Befehle an das Afterloading-Gerät. Das Panel „Status“ zeigt den aktuellen Status an. Der Sicherheitskreis leuchtet rot, wenn dieser geöffnet ist und wird beim Schließen grün. Die Panel „Referenzfahrt läuft“ und „Sollposition erreicht“ werden grün, wenn die Aussage zutrifft. Im Textfeld werden Fehlermeldungen angezeigt.

4.4 Datenstruktur

Für die Messung und Auswertung der Kalibrierungen müssen Messeinstellungen, Messparameter, Messergebnisse und die Ergebnisse der Auswertung gespeichert werden. In Abbildung 4.13 ist die Hierarchie einer Messung dargestellt. Die einfache Messung mit einer Messkonfiguration wird als Messwiederholung bezeichnet. Das Wiederholen dieser wird als Zyklus zusammen gefasst. Eine vollständige Messung besteht aus verschiedenen Messkonfigurationen und somit aus mehreren Zyklen. Die Software fasst zusätzlich mehrere Messungen zu einer Messreihe zusammen. Dabei bekommt jede Messung eine Messnummer. Für die Messreihe wird keine zusätzliche Hierarchieebene der Objekte erstellt.

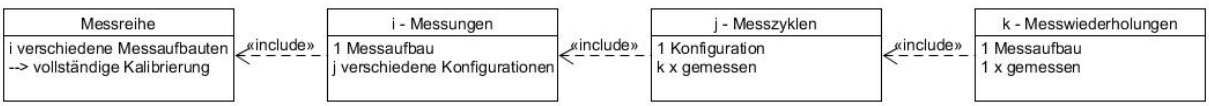


Abbildung 4.13: Hierarchische Gliederung einer Messung

Die Datenobjekte, die für die Messkonfiguration angelegt werden, sind in Abbildung 4.14 dargestellt. Die Einstellungen der Messkonfiguration eines Zyklus werden in einem HdrMeasPropData-Objekt gespeichert. Zu den wesentlichen Konfigurationen, die zwischen den Zyklen verändert werden, gehören die Quellposition, die Roboterposition und die Kammerspannung. Die Objekte werden über die Oberfläche der Messung, mittels der Messeigenschaftsfenster in Abbildung 4.5 erstellt. Eigenschaften, die für die vollständige Messung gelten werden im HdrUserData-Objekt gespeichert, welches ebenso die Liste der Messkonfigurationen enthält. Die Daten der genutzten Quelle werden innerhalb des UserData-Objekts in einem SourceData-Objekt gespeichert und für die PTB-Quelle aus einer Initialisierungsdatei ausgelesen. Für Schachtkammerkalibrierungen mit Kundenquellen sollten diese Daten in die Initialisierungsdatei eingepflegt werden.

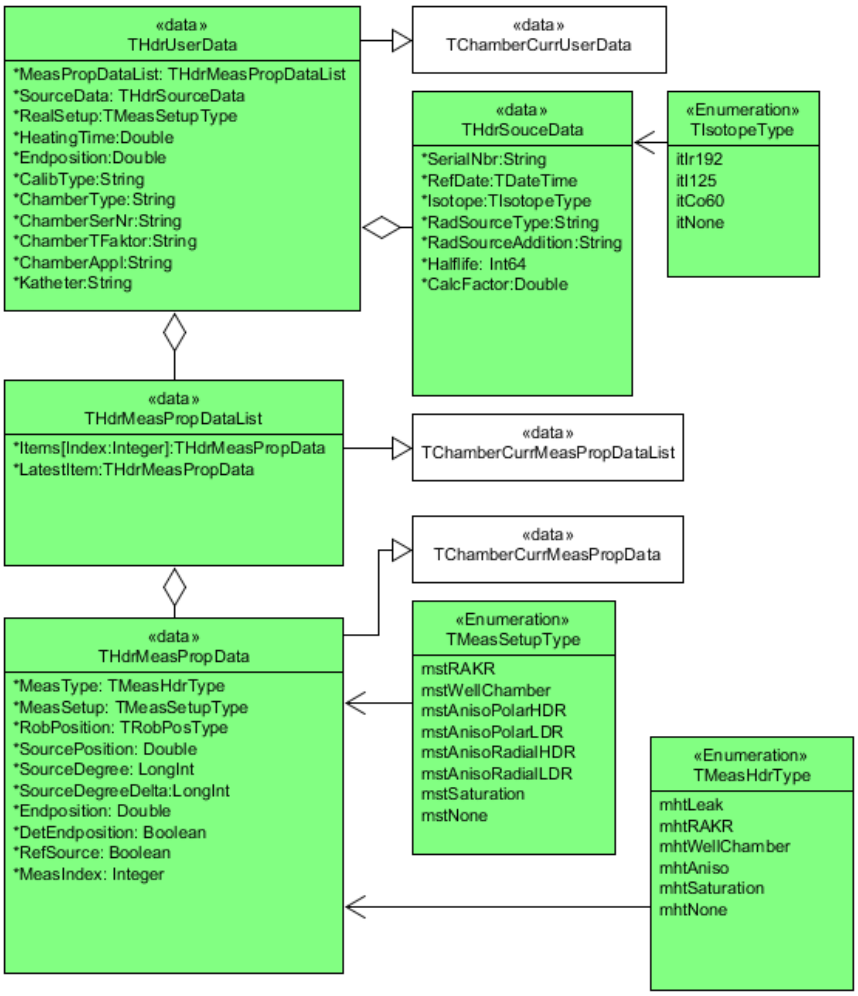


Abbildung 4.14: vereinfachtes Klassendiagramm für die Messkonfigurationsdatenobjekte, detaillierte Ansicht im Anhang unter A.5

In Abbildung 4.15 sind die Datenobjekte der Messung dargestellt. Diese sind in der gleichen

Hierarchie gegliedert wie die Messung. Für jede Hierarchieebene wird ein Messdatenobjekt angelegt. Die Messobjekte der oberen Ebene enthalten die Messobjekte der unteren Ebenen. Über das Messdatenobjekt der Messung kann zusätzlich zu den gemessenen Daten auf die Einstellungen der letzten Messung zugegriffen werden.

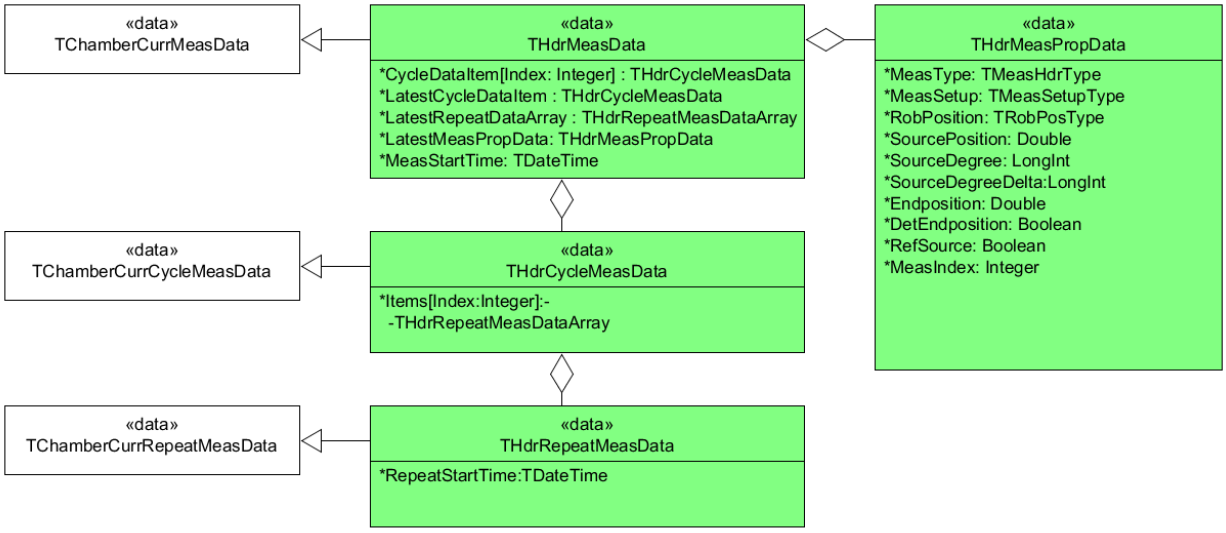


Abbildung 4.15: vereinfachtes Klassendiagramm für die Messdatenobjekte, detaillierte Ansicht im Anhang unter A.6

In Abbildung 4.16 sind die Objekte der Auswertung dargestellt. Zusätzlich zu den Objekten der drei Hierarchieebenen wird ein Datenobjekt für die Kalibrierdaten angelegt. Die CycleCalcData-Objekte werden nach jedem Zyklus dem CalcData-Objekt hinzugefügt. Dabei werden sie in eine Liste aus CycleCalcDataArrays hinzugefügt. Zusätzlich werden die Daten in das CalibRawDataArray hinzugefügt. Dies ist ein Array aus „THDRCycleCalcDataArrays“. Dies CycleCalcData-Objekte werden nach den Messungen sortiert. Diese nach Messnummer sortierten CycleCalcData-Arrays werden für die Auswertung der einzelnen Messungen verwendet. Die Datenobjekte der verschiedenen Messtypen enthalten die berechneten Ergebnisse der Messungen. Im CalibData-Objekt werden die berechneten Ergebnisse der Kalibrierung zusammengefasst.



Abbildung 4.16: vereinfachtes Klassendiagramm für die Auswertungsdatenobjekte, detaillierte Ansicht im Anhang unter A.7

4.5 Teilprogramm für den Messablauf

Wird über die Messoberfläche eine Messreihe mit verschiedenen Messungen und Parametern zusammen gestellt, kann diese über den Startbutton begonnen werden. Der Messablauf ist in Abbildung 4.17 dargestellt. Dabei wird zunächst das UserData-Objekt mit den Daten aus der Oberfläche gefüllt und das Messdatendiagramm vorbereitet. Anschließend wird der Oberflächentimer zum Einlesen der Temperatur, des Drucks und zur Aktualisierung der Zeit gestoppt, damit dieser die Messung nicht stören kann. Anschließend wird die Messung vorbereitet, durchgeführt und nachbereitet.

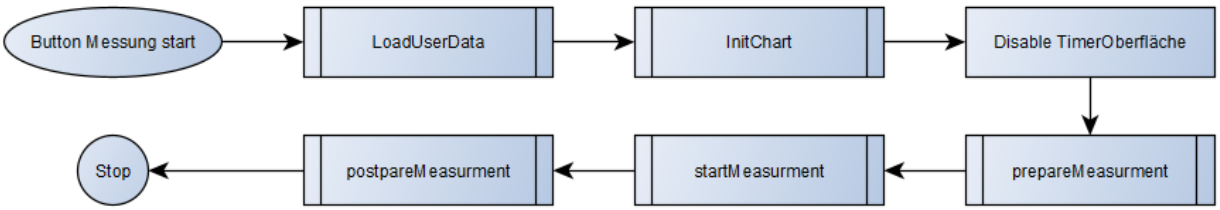


Abbildung 4.17: Ablauf einer Messung

In PrepareMeasurement können Messeinstellungen vorgenommen werden, dies ist für diesen Messstand nicht notwendig. In postpareMeasurement wird das Elektrometer geerdet, die Hochspannung ausgeschaltet, die Quelle referenziert und die Berechnung der Kalibrierfaktoren gestartet. Zusätzlich wird ein Event „MeasurementFinished“ ausgelöst. Dies führt auf der Oberfläche zum erneuten Starten des Oberflächentimers. Diese beiden Funktionen sind in Abbildung 4.18 dargestellt.

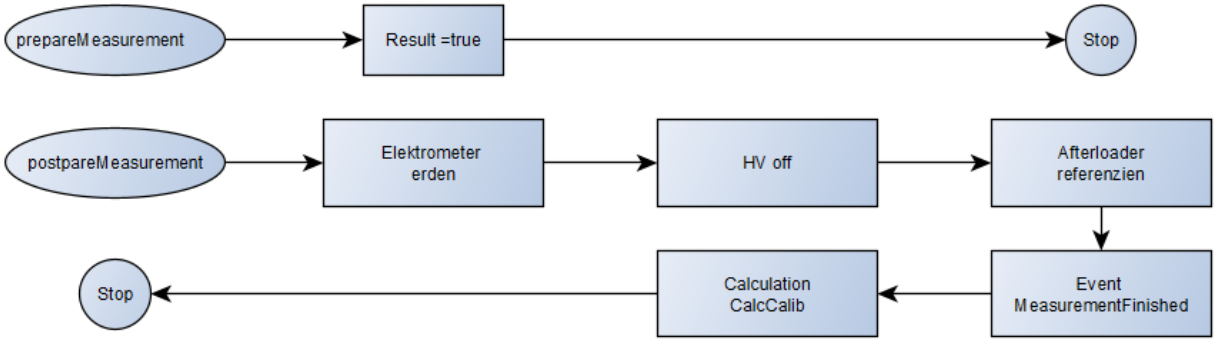


Abbildung 4.18: Vor- und Nachbereitung einer Messung

In Abbildung 4.19 ist der Ablauf der Funktion startMeasurement dargestellt. Dabei wird zunächst überprüft, ob Messeinstellungsdaten vorliegen und die Messdaten vorbereitet. In einer Schleife über die Zyklen werden die Messeinstellungen für den aktuellen Zyklus eingestellt und der Statusthread des Afterloading-Gerätes gestoppt, da dieser die Messung zu stark verlangsamt. Anschließend wird ein Messzyklus durchgeführt und der Thread wieder gestartet. In dem Unterprogramm PrepareCycle werden sämtliche Einstellungen für die Messung vorgenommen.

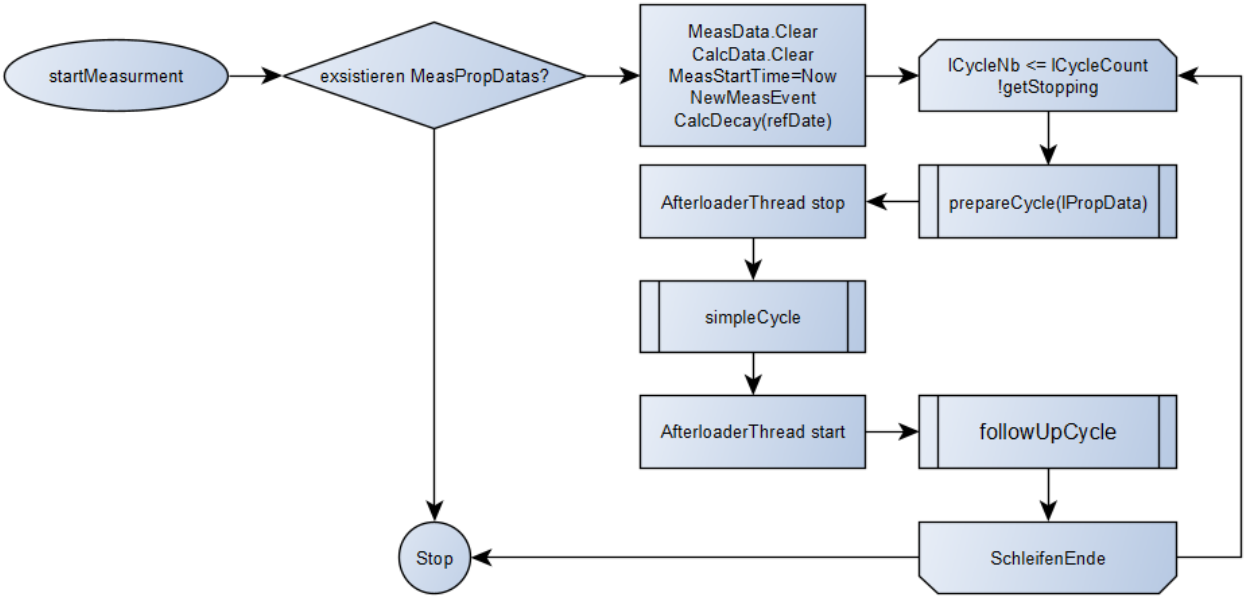


Abbildung 4.19: Flussdiagramm der Funktion StartMeasure

In Abbildung 4.20 ist der abstrahierte Ablauf des Unterprogramms PrepareCycle dargestellt. Der detaillierte Ablaufplan ist im Anhang unter Punkt A.8 zu finden. In diesem Unterprogramm werden zunächst die lokalen Variablen initialisiert. Anschließend wird überprüft, ob vor der Messung die Warmlaufzeit abzuwarten ist. Dies ist notwendig, wenn die Kammerspannung beispielsweise angeschaltet oder umgepolt wird. Anschließend wird der Messaufbau überprüft. Da der Messstand automatisch verschiedene Messungen abarbeitet, kann ein manueller Umbau zwischen Messungen notwendig sein. Falls ein manueller Umbau erforderlich ist, erscheint das Fenster in Abbildung 4.21 und zeigt den erforderlichen Messaufbau an. Ist kein manueller Umbau notwendig wird die Position des Roboters überprüft und falls erforderlich angepasst. Ist eine Messung mit HDR-Quellen eingestellt, wird falls erforderlich die Endposition bestimmt, die Quellposition bezogen auf die Endposition in die absolute Position umgerechnet und die Quelle verfahren. Wird eine Schachtkammer mit ^{125}I vermessen, so ist vor einer Messung der Seed manuell neu zu positionieren. Anschließend wird die Hochspannung gesetzt und die Messgeräte konfiguriert. Zuletzt wird falls notwendig die Warmlaufzeit abgewartet.

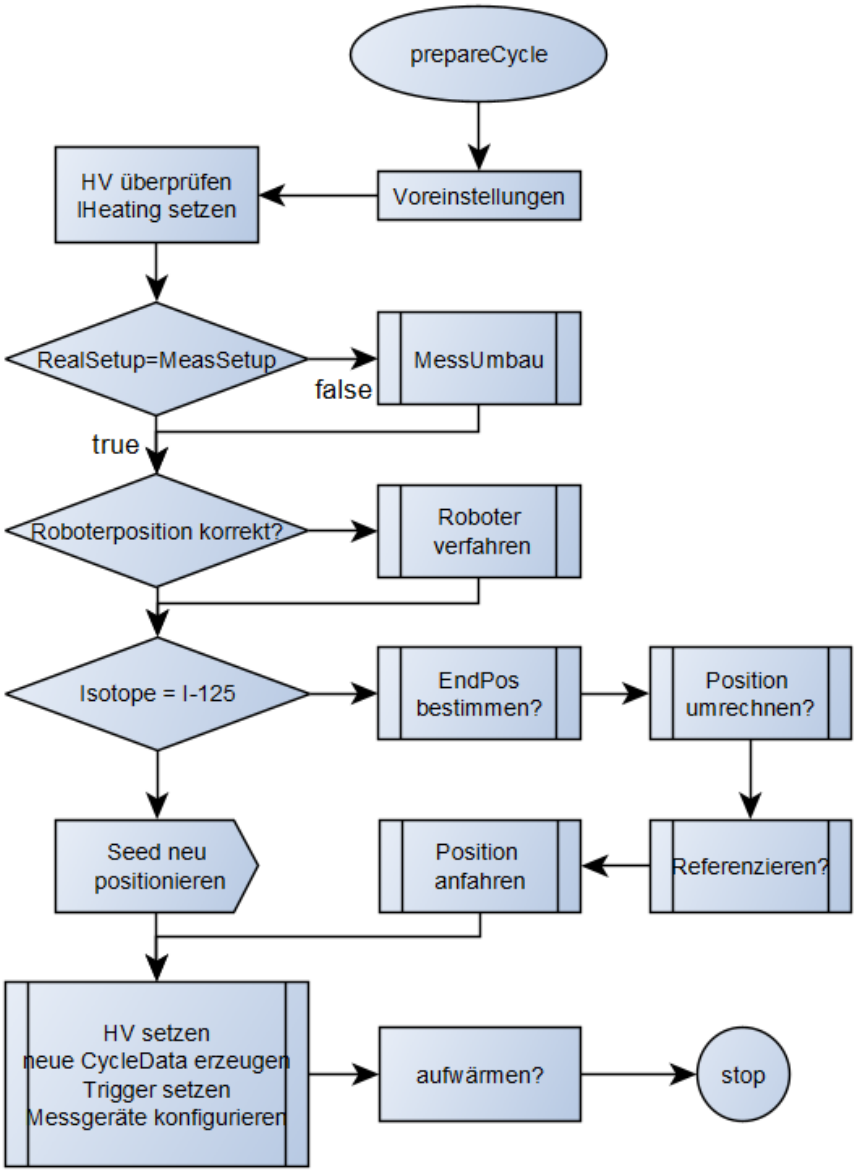


Abbildung 4.20: vereinfachtes Flussdiagramm für die Vorbereitung eines Messzyklus, detaillierter Ablauf im Anhang unter A.8

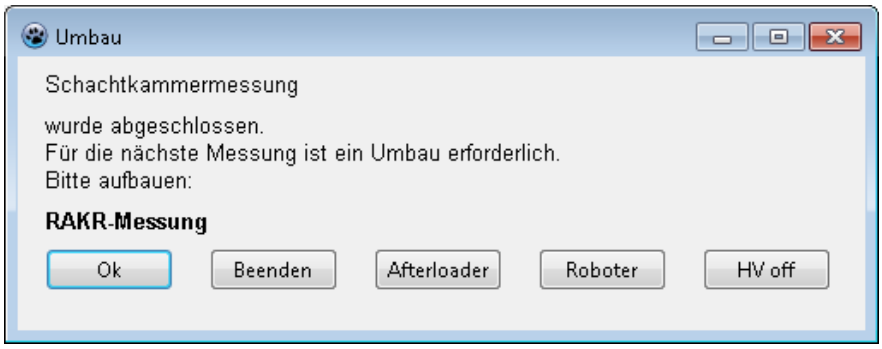


Abbildung 4.21: Fenster für den Messumbau

4.6 Teilprogramm für die Datenauswertung

Die Auswertung der Messung findet parallel zur Messung statt. Zu Beginn der Messung wird mittels der Funktion „CalcDecay“ der Zerfallskorrektionsfaktor auf das Referenzdatum der Quelle berechnet. Diese Funktion wird ebenfalls zu Beginn jedes Repeats für die Korrektur des Zerfalls auf den Messbegin genutzt. Der Ablauf der Funktion ist in Abbildung 4.22 dargestellt. Die Funktion bekommt dabei zwei Daten und die Halbwertszeit übergeben. Zusätzlich wird mittels einer Boolean-Varibale übergeben, ob die Berechnung während eines Repeats oder zu Beginn der Messung stattfinden. Über diese Variable wird Speicherort für das Ergebnis ausgewählt. Die Zerfallskorrektur wird nach Gleichung 4.1 berechnet [9].

$$k_{Decay} = e^{\frac{ln(2)\Delta t}{\lambda}} \tag{4.1}$$

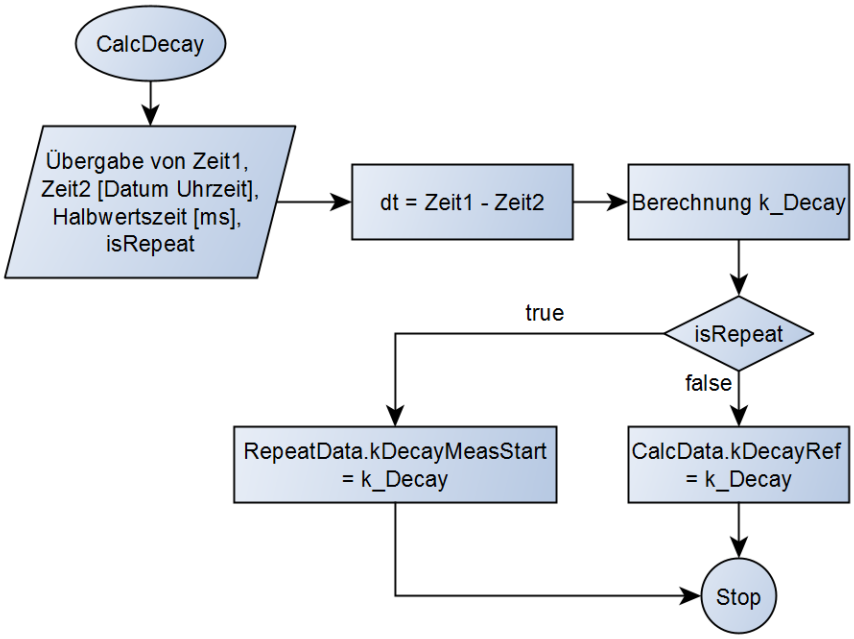


Abbildung 4.22: Flussdiagramm für die Funktion CalcDecay

Die Messung nimmt nach Einstellen aller Parameter eine Ut-Datenliste auf. Nach jedem aufgenommenen Spannungswert wird aus den aufgenommenen Ut-Daten der Messstrom und die Korrektionsfaktoren für die Luftdichte nach Gleichung 2.2 ermittelt. Zur Berechnung des Messstroms wird eine lineare Regression auf die gemessenen Ut-Wertpaare angewendet. Die verwendete Methode zur linearen Regression ist die Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Diese Funktionen waren bereits im Fachbereich im Einsatz und mussten im Rahmen dieser Arbeit nicht angepasst werden.
Nach jedem Messzyklus wird der mittlere Messstrom berechnet. Die Funktion CalcMean-

MeasCurrent wird nach dem Messzyklus in followUpCycle aufgerufen. In Abbildung 4.23 ist der Ablauf der Funktion dargestellt. Die Funktion bekommt die Einstellungen und Messwerte der aktuellen Messung übergeben. Daraus wird der arithmetische Mittelwert des Messstrom, sowie der Luftdichte- und Zerfallskorrektur berechnet. Falls es sich bei der Messung um eine Leckstrommessung handelt wird das Ergebnis in das CalcData-Objekt geschrieben. Falls es sich um einen anderen Messtyp handelt wird der zuletzt gemessene Leckstrom abgezogen. Anschließend wird der Strom um den Zerfalls seit Messbeginn korrigiert. Die für die Auswertung wesentlichen Messeinstellungen werden aus dem PropData-Objekt in das CycleCalcData-Objekt kopiert. Für die Auswertung der Kalibriermessungen werden diese CycleCalcData-Objekte in die CalibRawDataList sortiert. Die Liste enthält für jede Messung aus der Messreihe ein Array von CycleCalcData-Objekten. Über die Messnummern können die zur Messungen zugehörigen Objekte aus der Liste extrahiert und der Auswertung übergeben werden. Abschließend werden in dieser Unterfunktion bereits die Kalibrierfaktoren für die Auswertung aus der Initialisierungsdatei ausgelesen.

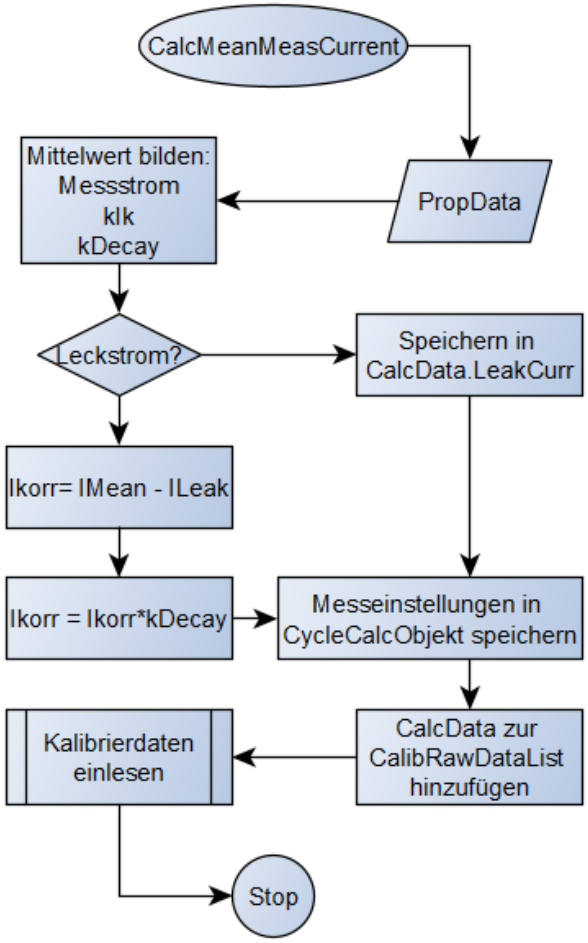


Abbildung 4.23: Flussdiagramm für die Funktion CalcMeanMeasCurrent

Nach dem Beenden der Messung wird die Berechnung der Kalibrierfaktoren gestartet. Die Messung ruft dafür die Funktion CalcCalib auf. Der Ablauf dieser Funktion ist in Abbildung 4.24 dargestellt. Dabei läuft eine Schleife über die CalibRawDataListe, überprüft den Messtyp und übergibt das CycleDataArray an die zugehörige Auswertung. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden in messtypspezifische Objekte geschrieben.

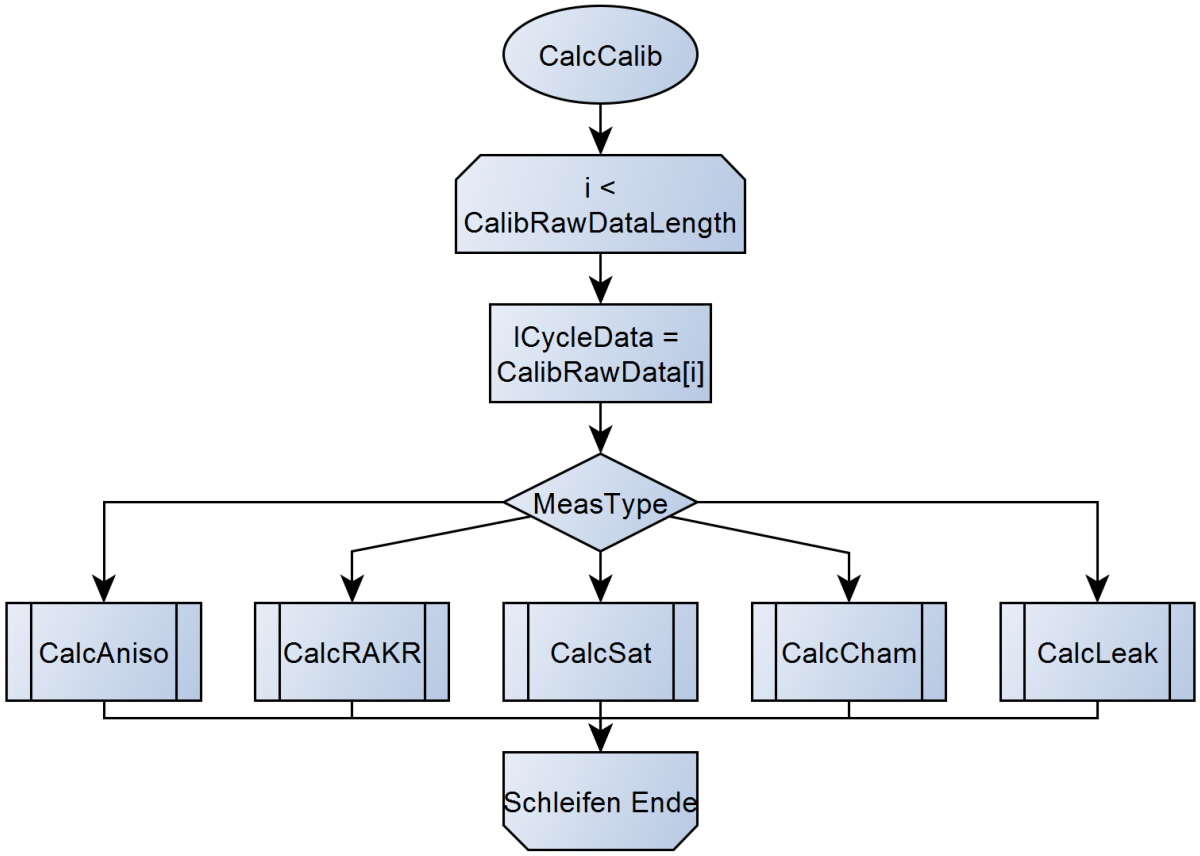


Abbildung 4.24: Flussdiagramm für die Funktion CalcCalib

Die Ergebnisse der Auswertung werden in das CalibData-Objekt gespeichert. In Abbildung 4.16 ist dieses Objekt dargestellt. Die Auswertung der Leckstrommessungen überprüft, ob der Leckstrom kleiner als 1 nA ist. Üblicherweise liegen diese Ströme im Bereich von 10 fA. Bei zu großen Leckströmen muss die gesamte Messung verworfen und der Messaufbau kontrolliert werden. Nach dieser Kontrolle wird der Strom im CalibData-Objekt gespeichert.
Der Ablauf der Funktionen CalcAniso und CalcRAKR ist in Abbildung 4.25 dargestellt. Für die Auswertung der Anisotropiemessungen wird zunächst eine lineare Korrektur durchgeführt. Die Detektoren für die Anisotropiemessungen besitzen einen linearen Drift in ihrem Ansprechvermögen. Der letzte Messwert wird in der gleichen Position wie der erste Messwert aufgenommen. Die Differenz zwischen den korrigierten Messwerten entspricht daher

dem Drift des Detektors. Nach dieser Korrektur wird der mittlere Messstrom bestimmt und die Messwerte auf diesen Wert normiert. Diese normierten Werte werden im Kalibrierschein angegeben. Zusätzlich wird das Maximum und das Minimum bestimmt um die Spannbreite der Messung zu ermitteln. Für die radiale Anisotropie ist diese Spannbreite üblicherweise unterhalb von 1 % für die polare Anisotropie bei über 50 % .
Für die Auswertung der RAKR einer Quelle werden abhängig vom Isotop die Abstandfaktoren berechnet. Diese Faktoren sind abhängig vom Isotop und dem Abstand zwischen Kammer und Quelle. Sie werden nach Gleichung 4.2 ermittelt. Wobei MCC1 und MCC2 durch Monte-Carlo Simulationen ermittelte Korrekturfaktoren sind und d der Abstand zwischen Quelle und Detektor in Millimetern ist. Der Referenzabstand d_{ref} entspricht 1 m bzw. 1000 mm.

$$k_{Abstand} = MCC1 \cdot \frac{d}{d_{ref}} + MCC2 \tag{4.2}$$

Nach der Zerfallskorrektur auf das Referenzdatum wird der Offset nach dem quadratischen Abstandsgesetz ermittelt. Der Offset wird aus einer linearen Regression berechnet, wobei die Wurzel des korrigierten Messstromes der Einflussgröße und der Abstand in Millimetern der Zielgröße entspricht. Die RAKR berechnet sich anschließend nach Gleichung 4.3. Dabei ist I_{korr} der um Zerfall, Leckstrom und Luftdichte korrigierte Strom. N_{Kammer} entspricht dem Kalibrierfaktor der Kammer. Die RAKR entspricht der Kerma in Gy/h in 1 m Abstand. Um die Einheiten in Gleichung 4.3 anzupassen, wird der feste Faktor von 0,0036 benötigt.

$$RAKR = I_{korr} \cdot N_{Kammer} \cdot (Abstand - Offset)^2 \cdot \frac{3600}{1000000} \tag{4.3}$$

Der Strom im Abstand von 800 mm wird aus der ersten und der letzten Messung gemittelt. Für jeden Abstand wird die RAKR bestimmt. Der Mittelwert und die Standardabweichung werden als Messergebnisse gespeichert.

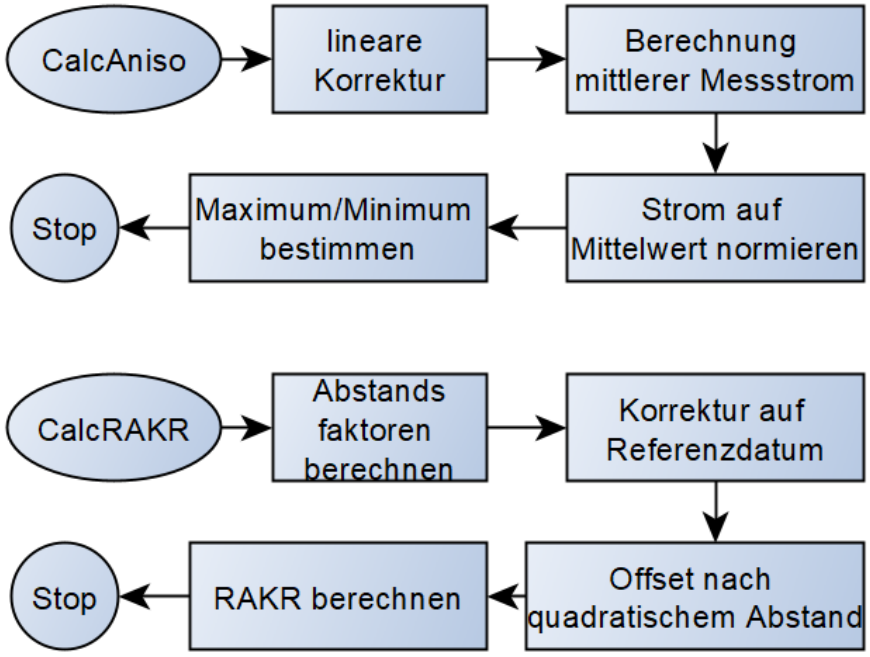


Abbildung 4.25: Flussdiagramm für die Funktionen CalcAniso und CalcRAKR

Die Auswertung der Sättigungsmessung ist in Abbildung 4.26 dargestellt. Für die Sättigung wird zunächst der Kehrwert der Spannung, des Spannungsquadrats und des Stromes berechnet. Anschließend wird über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate die lineare Regression mit der Einflussgröße $1/U$ bzw. $1/U^2$ und der Zielgröße $1/I$. Das Bestimmtheitsmaß der Regression R^2 entspricht der Güte einer Regression. Für die beiden erfolgten Regressionen wird das Bestimmtheitsmaß verglichen und die Regression mit dem R^2 näher an Eins für die Bestimmung des Sättigungskorrektionsfaktors genutzt. Dabei ergibt der Schnittpunkt mit der $1/I$-Achse den Kehrwert des Sättigungsstromes. Der Sättigungskorrektionsfaktor wird über Gleichung 4.4 bestimmt. Für die Berechnung des Faktors wird die Regressionsgeradengleichung $y = mx + b$ in diese Gleichung eingesetzt und umgestellt. Daraus ergibt sich je nach genutzter Regression Gleichung 4.5 oder Gleichung 4.6 . Dabei beschreibt b den $1/I$-Achsenabschnitt und m die Steigung der Regressionsgeraden. Als U_{max} wird die in der Messung maximal verwendete Spannung eingesetzt. Diese sollte der Betriebsspannung der Kammer entsprechen.

$$I_{korr} = k_{Sat} \cdot I_{U_{max}} \tag{4.4}$$

$$k_{Sat} = \frac{b + m/U_{max}}{b} \tag{4.5}$$

$$k_{Sat} = \frac{b + m/{U_{max}}^2}{b} \tag{4.6}$$

Die Auswertung einer Schachtkammermessung ist ebenfalls in Abbildung 4.26 dargestellt. Dabei wird zunächst das Maximum der Messwerte und die dazugehörige Position der Quelle ermittelt. Für die Bestimmung des Kalibrierfaktors der Kammer wird anschließend die RAKR der Quelle vom Bezugs auf das Messdatum umgerechnet. Mithilfe dieser Werte wird der Kalibrierfaktor nach Gleichung 4.7 bestimmt.

$$N_{K_a} = \frac{\dot{K}_{a,100}}{I_{max,korr}} \tag{4.7}$$

Für den Kalibrierschein werden anschließend die Quellpositionen noch auf die Position des maximalen Messstroms normiert und mit dem zugehörigen Messstrom abgespeichert.

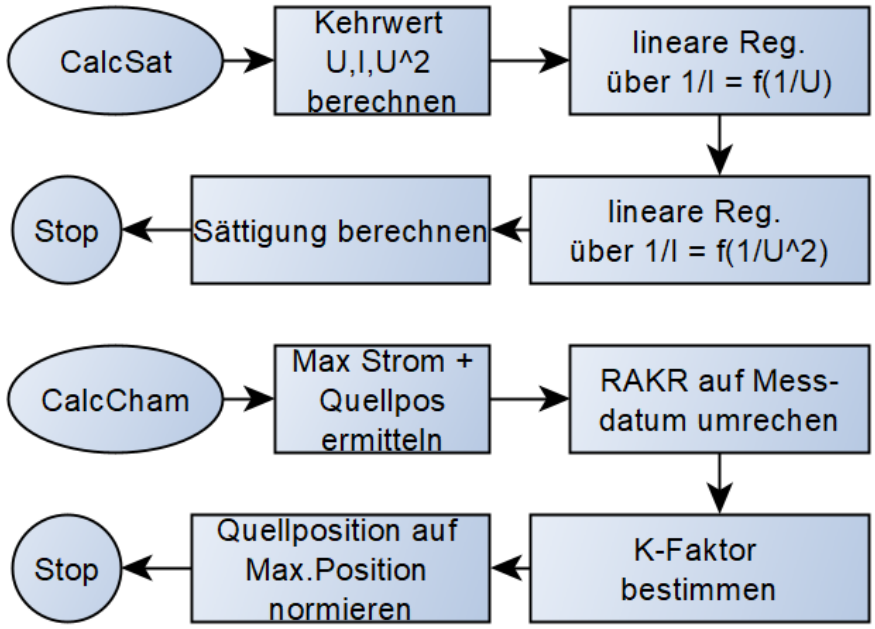


Abbildung 4.26: Flussdiagramm für die Funktionen CalcSat und CalcChamber

Die Ergebnisse der einzelnen Berechnungen werden im CalibData-Objekt gespeichert und durch den Reportmanager nach Abschluss der Berechnungen in Text-Dateien ausgegeben. Dieser legt während der Messung vier Ordner an. Im Ordner „MeasData“ wird für jede Messwiederholung eine Text-Datei mit den Ut-Daten und dem zur Messung gehörigen Header erstellt. Der Header enthält Geschäftszeichen, Umgebungsbedingungen, Kammerspannung, Elektrometerkapazität und Quellposition.
Nach jeder Wiederholung werden die Ergebnisse in eine Text-Datei im Ordner „Currents“

geschrieben. Dabei werden alle relevanten Parameter zu jeder Wiederholung abgespeichert. Nach jedem Zyklus wird der mittlere Strom im Ordner „Result“ in eine Text-Datei gespeichert. Dabei werden die Parameter Quellposition, Quellwinkel, Roboterposition und Kammerspannung, sowie die Korrekturfaktoren für Luftdichte und Zerfall angegeben.
Abschließend werden nach der Messung die Ergebnisse der Berechnungen in den Ordner „Calib“ gespeichert. Aus den Ergebnissen in dieser Datei kann durch Mittelwertbildung und Anwendung der Sättigungskorrektur direkt der Kalibrierfaktor für eine Kammer oder eine Quelle entnommen werden. Zusätzlich können durch die normierten Werte direkt die Diagramme für die Kalibrierscheine erzeugt werden.

5 Validierung

Bevor der entwickelte Messstand im Bereich der Kalibrierung eingesetzt werden kann, muss die Software und die Hardware überprüft werden. Dabei müssen Fehlerfälle möglichst verhindert bzw. per aussagekräftiger Meldung an den Nutzer gemeldet werden und die Korrektheit der Messergebnisse validiert werden. Für diese Überprüfung wird zunächst die Genauigkeit der Hardwarekomponenten betrachtet. Anschließend wird ein Softwaretestprotokoll durchgeführt und damit verschiedene Testszenarien überprüft. Zunächst wird die Genauigkeit des Anfahrens der Roboter- und der Quellpositionen überprüft. Die abschließende Kontrolle besteht aus einer vollständigen Quellkalibrierung einer ^{192}Ir-Quelle inklusive der Historiemessungen mit vier Schachtkammern. Diese wird zur Validierung zuvor mit dem gültigen Messstand kalibriert.

5.1 Messung der Roboterposition

Die Genauigkeitsanforderungen der Roboterpositionen für die Schachtkammerkalibrierung und die Anisotropiemessungen sind sehr gering. Dabei ist eine reproduzierbare Positionierung im Bereich von einigen Millimetern ausreichend. Für die RAKR-Messung ist die Präzision der Positionierung von höherer Bedeutung. Dabei müssen vor allem die Differenzen der Abstände sehr genau bekannt sein. Die absolute Position der Kammer relativ zur Quelle wird in der Auswertung über das Abstandsquadratgesetz korrigiert. Der Abstand von der Quelle wird von 800 bis 1600 mm in 200 mm Schritten variiert. Die Positionen des Roboters werden mithilfe der angebrachten Laser und eines Lasertrackers AT403 von Leica mit einer Messunsicherheit von Δ 8 µm bestimmt und im Roboter gespeichert. Durch mehrfaches Anfahren der Positionen und Abstandsermittlung wird die Unsicherheit der Positionierung ermittelt. Entscheidend für die Unsicherheit der Messergebnisse ist der relative Abstand zwischen den Positionen. Die Messergebnisse der Lasertrackermessung sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Vorgabe	**800 mm**	**1000 mm**	**1200 mm**	**1400 mm**	**1600 mm**
Differenz zu 1000 mm	-200,11 mm	0 mm	200,09 mm	399,83 mm	599,99 mm
Spannweite	0,123 mm	0,207 mm	0,207 mm	0,178 mm	0,253 mm

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Vermessung der Position des Roboters

Jede Position wurde 7-mal angefahren und der Abstand relativ zum Referenzpunkt mit einem Abstand von 1 m zur Quellposition ermittelt. Die Spannweite der Abweichungen der Messergebnisse ist zwischen 0,12 und 0,26 mm und somit deutlich höher als die angegebene Wiederholgenauigkeit des Roboters. Dies führt zu einer Unsicherheit der RAKR-Messung von etwa 0,065 % und sollte im Anschluss an diese Masterarbeit genauer untersucht und verbessert werden.

5.2 Messung der Quellposition

Die Positionierung der Quelle wird durch das Afterloading-Gerät variiert. Der Einfluss der Positionierung der Quelle auf die Unsicherheit der Kalibrierung sehr gering. Daher ist die Präzision des Afterloading-Gerätes von geringer Bedeutung. Um die Funktion des Afterloading-Gerätes und der Software zu überprüfen wurde der ausgefahrene Quelldraht mithilfe einer Dummyquelle vermessen. Dabei wurde ein Linearmaßstab mit 2000 mm Länge verwendet. Dies ermöglicht eine Vermessung der ausgefahrenen Quelle mit einer Messunsicherheit von etwa 1 mm. Die Quelle ist in ihrer Referenzposition etwa mittig im Quelltresor platziert. Von der Ausfahrlänge befinden sich daher noch etwa 270 mm innerhalb des Gerätes und können nicht vermessen werden. Für die Messung wurde die Quelle zwischen 500 und 1200 mm ausgefahren und die Länge vom Ausgang des Afterloading-Gerätes bis zur Quellspitze vermessen. Die Messergebnisse befinden sich in Tabelle 5.2.

Vorgabe	**500 mm**	**800 mm**	**1000 mm**	**1200 mm**
mittlerer Messwert	500,8 mm	800,7 mm	1000,6 mm	1200,7 mm
Spannweite	1,5 mm	1,5 mm	1,5 mm	2 mm

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Vermessung der Positionierung des Afterloading-Gerätes

Die Variation der Quellposition ist etwa rechteckverteilt und kann mit einer Halbbreite der Grenzen von 1 mm angenommen werden. Diese Genauigkeit ist für die Messungen in der Brachytherapie ausreichend.

5.3 Leckstrommessung

Der Eingangsruhestrom des Elektrometers wird von vielen Faktoren beeinflusst. Wichtige Faktoren sind die Elektrometerkapazität und die Leckströme der Leitungen und Stecker. Daher wurde der Leckstrom mit jedem Adapterstecker und verschiedenen Messbereichen ermittelt. In Abbildung 5.1 ist der Leckstrom über der Elektrometerkapazität aufgetragen.

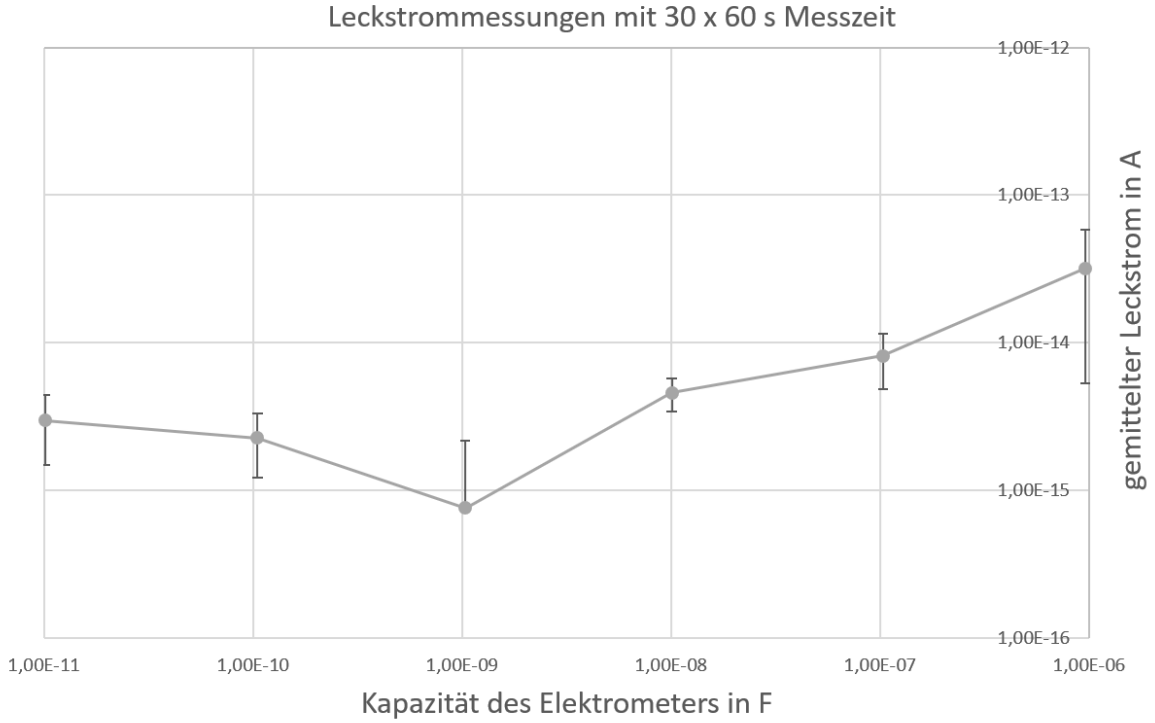


Abbildung 5.1: Diagramm des Leckstroms und der Standardabweichung über der Elektrometerkapazität

Für die Messung wurde eine HDR1000Plus Schachtkammer von Standard Imaging an den Messstand angeschlossen und ohne Quelle vermessen. Dabei wurde in jedem Messbereich 10 mal 60 s gemessen und der Mittelwert der gemessenen Ströme aufgetragen. Für die Messbereiche 10 pF bis 10 nF ist der Leckstrom etwa konstant. Für größere Kapazitäten steigt der Leckstrom leicht an. Für die Messung eines Stromes sollte daher immer die kleinstmögliche Kapazität verwendet werden, um das optimale Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu erzielen. Zur Überprüfung der neu hergestellten Adapterstücke wurden die Leckströme mit angeschlossenen Adapterstücken vermessen. Das Innere der Stecker muss für geringe Leckströme fettfrei sein. Daher müssen die Stecker vor dem Zusammenbau mit Alkohol im Ultraschallbad gereinigt und beim Zusammenbau mit größter Vorsicht behandelt werden. Um die Funktion der Adapterstücke zu prüfen, wird eine Leckstrommessung mit jedem Adapterstück durchge-

führt. Der Leckstrom wird mit der kleinsten Kapazität gemessen und sollte kleiner als 10 fA sein. In Tabelle 5.3 sind die Ergebnisse dieser Messungen dargestellt.

Adapter	**BNC**	**TNC**	**Wellhöfer**	**Pychlau**
Leckstrom in fA	-3,36	-2,89	-2,73	-2,72

Tabelle 5.3: Ergebnisse der Vermessung der Leckströme verschiedener Adapter

Die Leckströme der Adapter sind unterhalb von 10 fA. Der Messstrom liegt zwischen 10 pA und 10 nA. Daher ist der Leckstrom mindestens drei Größenordnungen kleiner als der Messstrom.

5.4 Elektrometermessungen

Das Elektrometer wurde mithilfe der im Fachbereich vorhandenen Software mit der Spannungssprung-Methode kalibriert. Um die Kalibrierung und die Messsoftware zu überprüfen, wurde das Elektrometer mit einer Präzisionsstromquelle verbunden und der eingespeiste Strom mit der Software bestimmt. Die Programm-Oberfläche der Elektrometermessung ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Der Kondensator des Elektrometers wird zunächst geerdet, danach eine Wartezeit abgewartet und anschließend der Messstrom bestimmt. In Abbildung 5.2 sind die Ergebnisse dieser Messung dargestellt. Dabei sind die gemessenen Ströme auf die eingespeisten Ströme normiert. Dargestellt sind die normierten Werte in Prozent über dem eingespeisten Strom. Für die Messungen wurden sämtliche Messbereiche genutzt und mit mindestens drei verschiedenen Strömen getestet. Die Abweichung des Messwertes vom Referenzwert beträgt maximal 0,2 %.

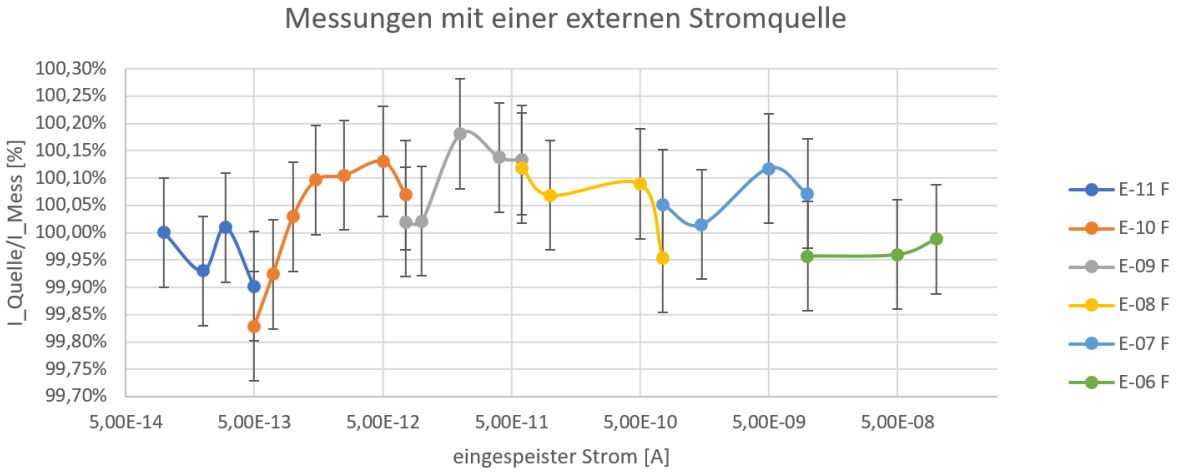


Abbildung 5.2: Messergebnisse mit eingetragener Standardabweichung mit einer Präzisionsstromquelle

5.5 Testprotokoll

Zur Überprüfung der Software wird ein Testprotokoll für den Abnahmetest durchgeführt. Dabei werden sowohl subjektive Aspekte, wie die Übersichtlichkeit der Oberflächen, als auch objektive Aspekte wie die Vermessung einer bekannten Kammer getestet. Das durchgeführte Testprotokoll befindet sich im Anhang unter Punkt A.6. Der Test wird vom technischen Personal der Arbeitsgruppe durchgeführt, um einen unvoreingenommenen Eindruck der Anwendung und Übersichtlichkeit zu erhalten. Im Protokoll werden bei objektiven Tests die Ergebnisse eingetragen. In subjektiven Testfällen werden Kommentare abgeben. Dabei wird zunächst die Übersichtlichkeit der Oberflächen überprüft. Anschließend werden verschiedene fehlerhafte Eingaben getestet. Diese dürfen nicht zu Programmabbruch oder zu einem Deadlock führen. Danach werden die Steuerungen der Hardwarekomponenten Roboter und Afterloading-Gerät überprüft. Abschließend werden die Messabläufe und Auswertungen überprüft. Der Status gibt an, ob der Test bestanden wurde. Als Kommentar können Verbesserungsvorschläge hinterlegt oder Programmreaktionen dokumentiert werden.

5.5.1 Kalibrierung von HDR-Quellen

Im Rahmen des Testprotokolls wird die vollständige Kalibrierung von zwei bekannten Quellen durchgeführt. Dabei wird zunächst eine ^{60}Co-Quelle und anschließend eine ^{192}Ir-Quelle kalibriert. Da die Auswertung unterschiedliche Korrekturfaktoren benötigt, ist es notwendig die Messung und Auswertung für die beiden unterschiedlichen Nuklide zu testen. Für den

aktuellen Messstand wird die Auswertung mit einer Excelvorlage durchgeführt. Der neue Messstand gibt direkt die Kalibrierfaktoren aus. Daher ist dabei keine weitere Rechnung notwendig. Die Ausgaben des neuen Programms werden den Auswertungen der Messungen mit dem aktuellen Messstand gegenübergestellt. In Tabelle 5.4 sind die bestimmten Werte vom aktuellen Messstand und dem neu entwickelten Messstand gegenübergestellt. Für die Ermittlung der RAKR der Quelle wird die Messung vier mal mit dem aktuellen und dem neuen Messstand durchgeführt. Zwischen den Messungen wird die Quelle neu positioniert, um die Unsicherheit der Messung durch die Anisotropie zu verringern. Anschließend wird der Mittelwert berechnet und in Tabelle 5.4 dargestellt. Der Messaufbau wird zwischen den Messungen nicht verändert. Die RAKR-Bestimmung des aktuellen Messstandes wird als korrekter Wert angenommen und der Wert des neuen Messstandes darauf bezogen, um die Abweichung zu bestimmen. In Abbildung 5.3 ist der Kehrwert des quadrierten Stroms über dem Abstand dargestellt. Nach dem quadratischen Abstandsgesetz muss sich dabei eine Gerade ergeben. Die lineare Regression dieser Funktion wird zur Berechnung des Offsets der Quellposition verwendet. Zusätzlich ist der Regessionskoeffizient ein Indiz für die Korrektheit der Messergebnisse. Dieser wird daher auch beim neuen Messstand mit ausgegeben, siehe Tabelle 5.4.

Messstand	**RAKR**	**StdAbw**	R^2	$RAKR_{aktuel}/RAKR_{Mess}$	**Leckstrom**
aktuell	$1,069 \cdot 10^{-2}$ Gy/h	0,032%	1,000	1	$7,68 \cdot 10^{-16}$ A
neu	$1,072 \cdot 10^{-2}$ Gy/h	0,020 %	1,000	0,997	$7,05 \cdot 10^{-16}$ A

Tabelle 5.4: Ergebnis einer ^{60}Co-Quellkalibrierung mit aktuellem und neuem Messstand

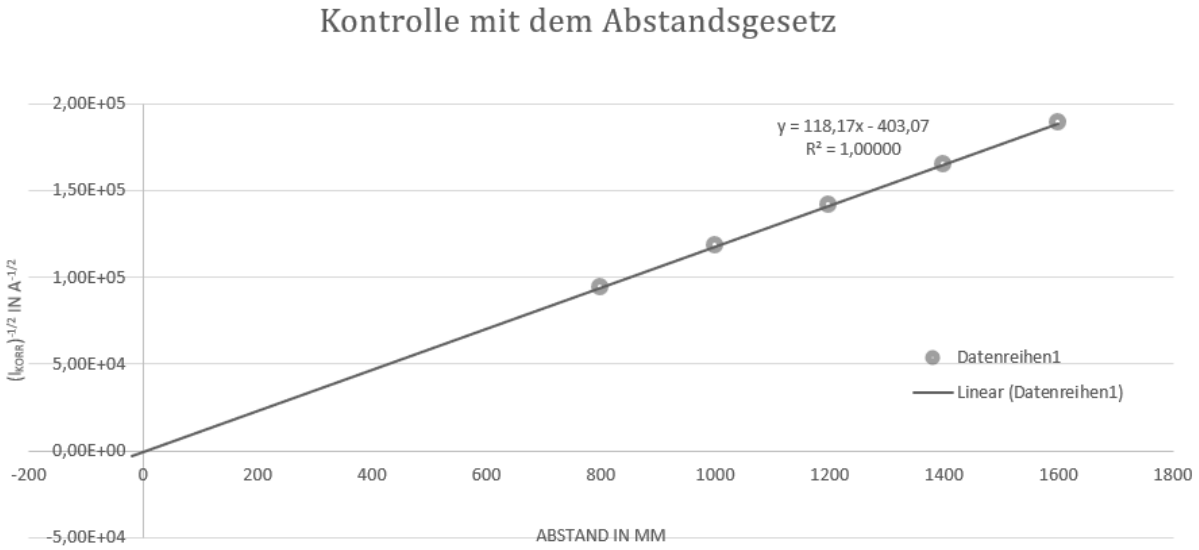


Abbildung 5.3: Kontrolle der Messergebnisse über das quadratische Abstandsgesetz

Die RAKR der Quelle konnte mit einer Abweichung von 0,3 % reproduziert werden. In Abbildung 5.4 ist die polare Anisotropie der Quelle dargestellt. Dabei ist die Messung mit dem aktuellen Messstand in rot und die Messung mit dem neuen Messstand in grün dargestellt. Die Werte sind auf den Mittelwert der Messungen normiert. Bei einem Winkel von etwa 160° findet sich der Quelldraht auf der Seite des Detektors. Daher ist dort eine deutliche Reduktion des Signals von etwa 25 % zu erkennen. Auf der Abbildung sind leichte Abweichungen direkt neben diesem Minimum zur erkennen. Dabei liegen die Abweichungen zwischen den beiden Messungen zwischen 0,2 % bis 5 %. Die Bestimmung der polaren Anisotropie ist allerdings nur im Bereich von etwa $90° \pm 30°$ zur Strahlerachse von Bedeutung. Daher sind die Abweichungen im Bereich des Minimums zu vernachlässigen.

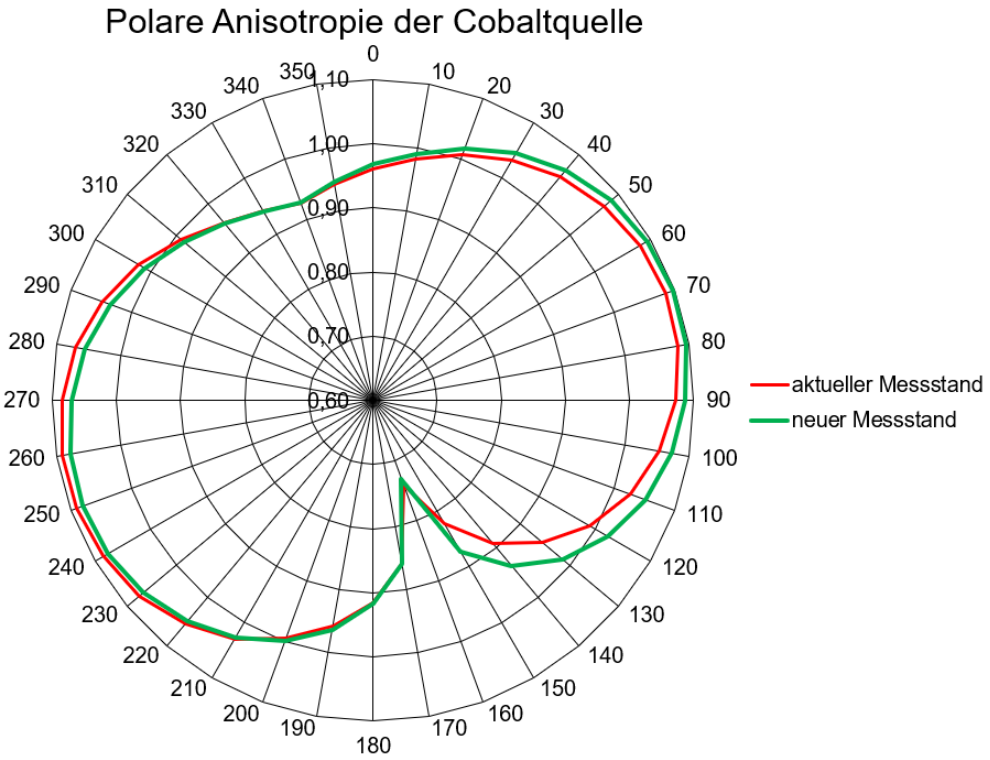


Abbildung 5.4: Polare Anisotropiemessung einer ^{60}Co-Quelle mit aktuellem und neuem Messstand

In Abbildung 5.5 ist die radiale Anisotropiemessung der ^{60}Co-Quelle mit beiden Messständen dargestellt. Die Abweichungen zwischen den Messwerten des aktuellen und des neuen Messstands betragen maximal 0,2 %. Mithilfe des Messstandes sind somit die RAKR, sowie die radiale und polare Anisotropie der ^{60}Co-Quelle reproduzierbar. Anschließend an diese Untersuchung wurde eine ^{192}Ir-Quelle vermessen. Dabei wurden die Kalibrierwerte ebenfalls mit dem aktuellen und dem neuen Messstand ermittelt.

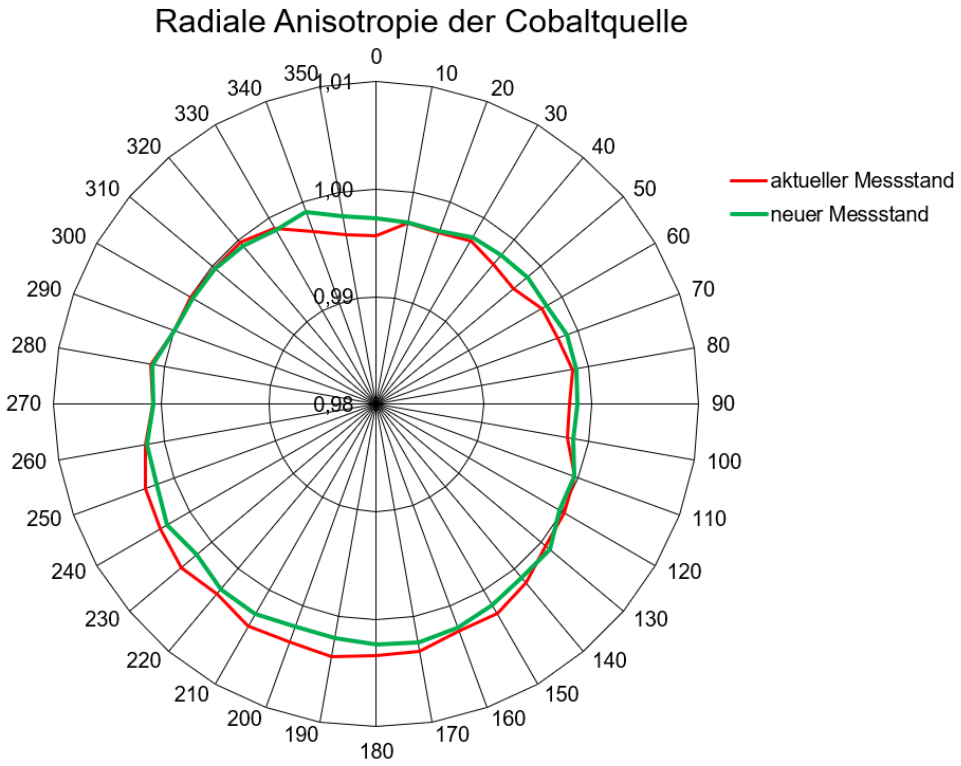


Abbildung 5.5: Radiale Anisotropiemessung einer ^{60}Co-Quelle mit aktuellem und neuem Messstand

Die Ergebnisse einer RAKR-Messung des aktuellen und des neuen Messstand mit einer ^{192}Ir-Quelle mit einer Aktivität von etwa 60 GBq sind in Tabelle 5.5 dargestellt. Die Auswertung erfolgt parallel zur Auswertung der ^{60}Co-Quelle. Dabei sind die Abstandskorrekturfaktoren und der Kammerkalibrierfaktor spezifisch für das Nuklid. Die RAKR der ^{192}Ir-Quelle kann mit dem neuen Messstand mit einer Abweichung von 0,2 % reproduziert werden. Die radiale und polare Anisotropie der ^{192}Ir-Quelle werden mit beiden Messständen ermittelt und sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Die Abweichungen für die polare Anisotropie liegen bei teilweise mehr als 10 %. Für die radiale Anisotropie liegen die Abweichungen maximal bei 0,25 %.
Die Energie der ausgesandten Photonen ist bei ^{192}Ir-Quellen sind geringer. Daher hat die Drahtführung der Quelle, durch Absorption, einen größeren Effekt auf die Anisotropie. Die Abweichung der Ergebnisse des neuen Messstandes vom aktuellen Messstand sind kleiner als 1 % und liegen somit deutlich unter der Unsicherheit der Messung. Somit ist die Kalibrierung einer Quelle mit dem neuen Messstand möglich. Für eine Kalibrierung einer Quelle mit dem aktuellen Messstand werden etwa 14 Tage Messzeit benötigt. Die Messungen können nur während der Anwesenheit der Operateure durchgeführt werden, da die Quelle nach den Messungen nicht automatisch in das Afterloading-Gerät zurück gezogen wird. Zudem muss die Quelle zwischen den Messwiederholungen per Handsteuerung referenziert und neu posi-

tioniert werden. Die Auswertung erfolgt durch Excelvorlagen und muss kontrolliert werden. Diese Auswertungen übernimmt nun das neue Programm. Durch die Erhöhung des Automatisierunggrades konnte die Dauer einer Kalibrierung auf zwei Tage reduziert werden. Die Messungen laufen vollständig automatisch ab. Lediglich die Umbauten müssen weiterhin manuell erfolgen.

Messstand	**RAKR**	**StdAbw**	R^2	$RAKR\frac{aktuell}{mess}$	**Leckstrom**
aktueller Messstand	7,543 mGy/h	0,041%	1,00	1	2,66 fA
neuer Messstand	7,527 mGy/h	0,066 %	1,00	1,002	9,63 fA

Tabelle 5.5: Ergebnis einer ^{192}Ir-Quellkalibrierung mit aktuellem und neuem Messstand

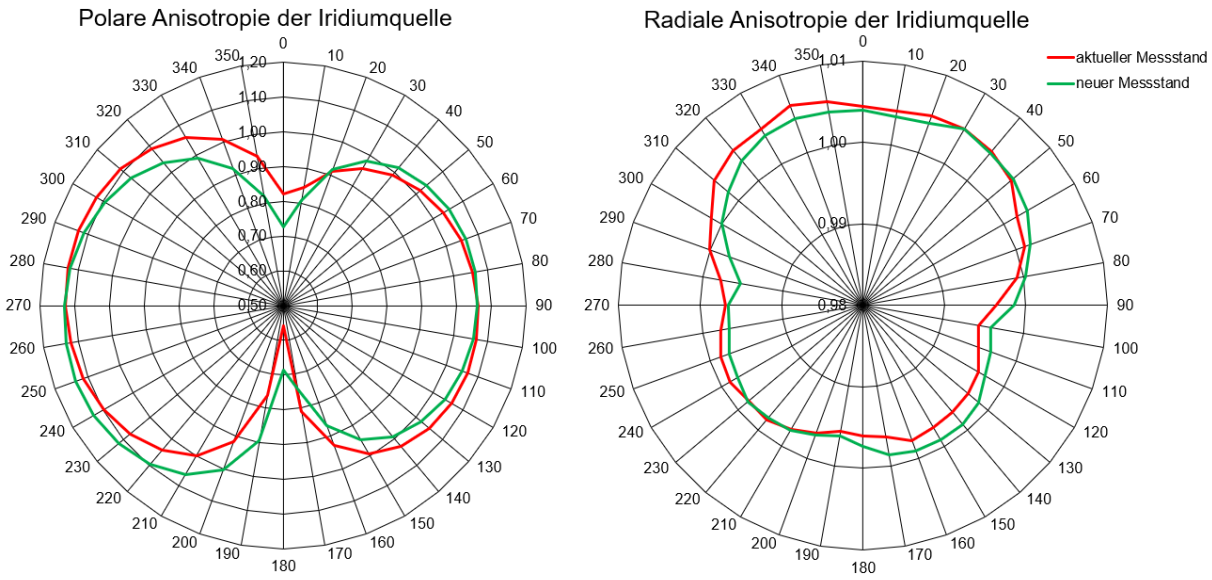


Abbildung 5.6: links polare Anisotropie, rechts radiale Anisotropie einer ^{192}Ir-Quelle die mit dem aktuellem und dem neuem Messstand vermessen wurden

5.5.2 Kalibrierung von Schachtkammern

Zusätzlich zu der Quellkalibrierung wird jede Kundenquelle mit den Schachtkammern der Arbeitsgruppe vermessen und die daraus bestimmten Kalibrierfaktoren der Kammern historisch verglichen. Somit kann die Quellkalibrierung überprüft und zudem die Stabilität der Kammern dokumentiert werden. Diese Historiemessungen werden mit der ^{192}Ir-Quelle mit dem neuen Messstand durchgeführt und mit den früheren Werten verglichen, um die Schachtkammerkalibrierung des neuen Messstandes zu validieren. In Tabelle 5.6 sind die Kalibrierfaktoren der vier Schachtkammern und die Abweichung des Mittelwertes der Historie dargestellt. Dabei werden zwei Schachtkammern von PTW vom Typ TM33004 und vom

Typ TW33005, sowie zwei Schachtkammern von Standard Imaging vom Typ HDR1000Plus (Seriennummern A011491 und A080863) genutzt. Alle Schachtkammern werden mit der gleichen Quelle kalibriert. Es wird eine Leckstrommessung, eine Sättigungsmessung und eine Schachtkammermessung durchgeführt.

Wert	**TM33004**	**TW33005**	**HDR A011491**	**HDR A080863**
N_K in $\mathrm{Gy(Ah)}^{-1}$	9,32E5	9,14E5	4,66E5	4,67E5
Abweichung in %	-0,12	-0,16	-0,2	0,00
Mittelwert $\mathrm{Gy(Ah)}^{-1}$	9,33E5	9,15E5	4,66E5	4,67E5
Sättigung	1,000	1,000	1,000	1,000
Leckstrom in A	$-2,55 \cdot 10^{-13}$	$-3,10 \cdot 10^{-13}$	$-3,76 \cdot 10^{-13}$	$-1,54 \cdot 10^{-13}$

Tabelle 5.6: Historiemessung einer ^{192}Ir-Quelle mit dem neuen Messstand, die Abweichungen beziehen sich auf den Mittelwert der bisherigen Messungen mit dem alten Messstand

Die Historiemessungen ergeben Abweichungen von maximal 0,2 % vom Mittelwert der bisherigen Kammerkalibrierfaktoren. Die Unsicherheit einer Schachtkammerkalibrierung liegt bei 1,2 % (k = 1). Die dabei verwendete Quelle wurde ebenfalls mit dem Messstand kalibriert. In Abbildung 5.7 ist der Kammerkalibrierfaktor über die Zeit dargestellt. Dabei ist der aktuellste Wert mit dem neuen Messstand aufgenommen und mit einem roten Dreieck dargestellt. Dieser Wert liegt innerhalb der normalen Schwankungen der Messung und kann als korrekt angenommen werden.

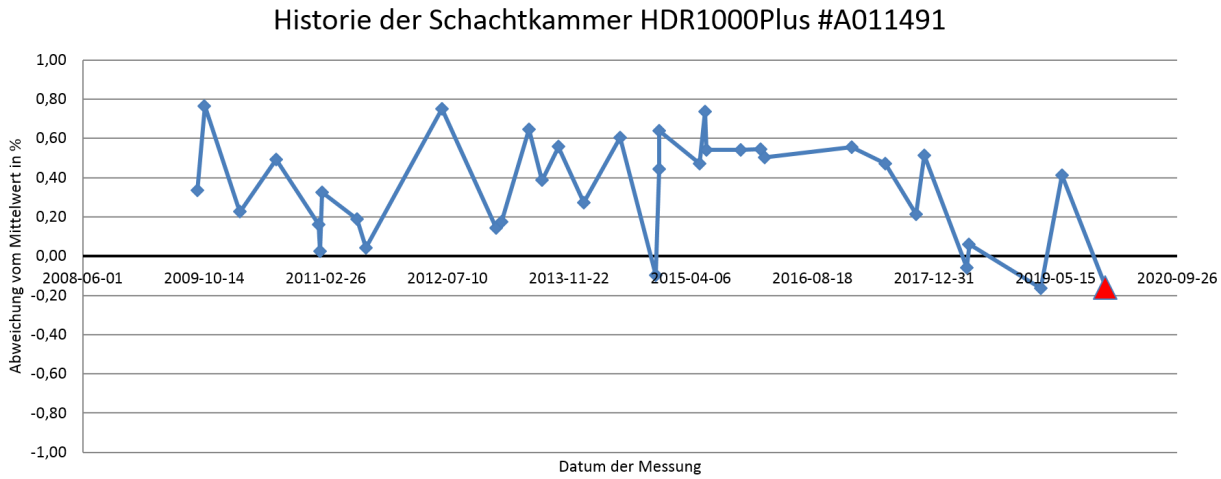


Abbildung 5.7: Historie des Kammerkalibrierfaktor der Schachtkammer HDR1000+ Nr. A011491

Zusätzlich zu dem Kalibrierfaktor wird die Lage-Empfindlichkeitskurve der Schachtkammer

ermittelt und normiert ausgegeben. Diese Werte werden während der Messung im Diagramm angezeigt und können als Indiz für einen korrekten Messablauf genutzt werden. In Abbildung 5.8 ist die Lage-Empfindlichkeitskurve der TM33004 Schachtkammer dargestellt. Diese wurde zunächst mit dem aktuellen Messstand ermittelt. Anschließend wurde die Messung mit dem neuen Messstand wiederholt. Die beiden Kurven in Abbildung 5.8 sind leicht versetzt. Dies liegt an der Positionierungenauigkeit der Quelle und der eingestellten Schrittweite der Quellposition. Dieser Versatz ist sowohl bei dem Vergleich der beiden Messplätze, als auch bei dem Vergleich von zwei Messungen am selben Messplatz erkennbar.

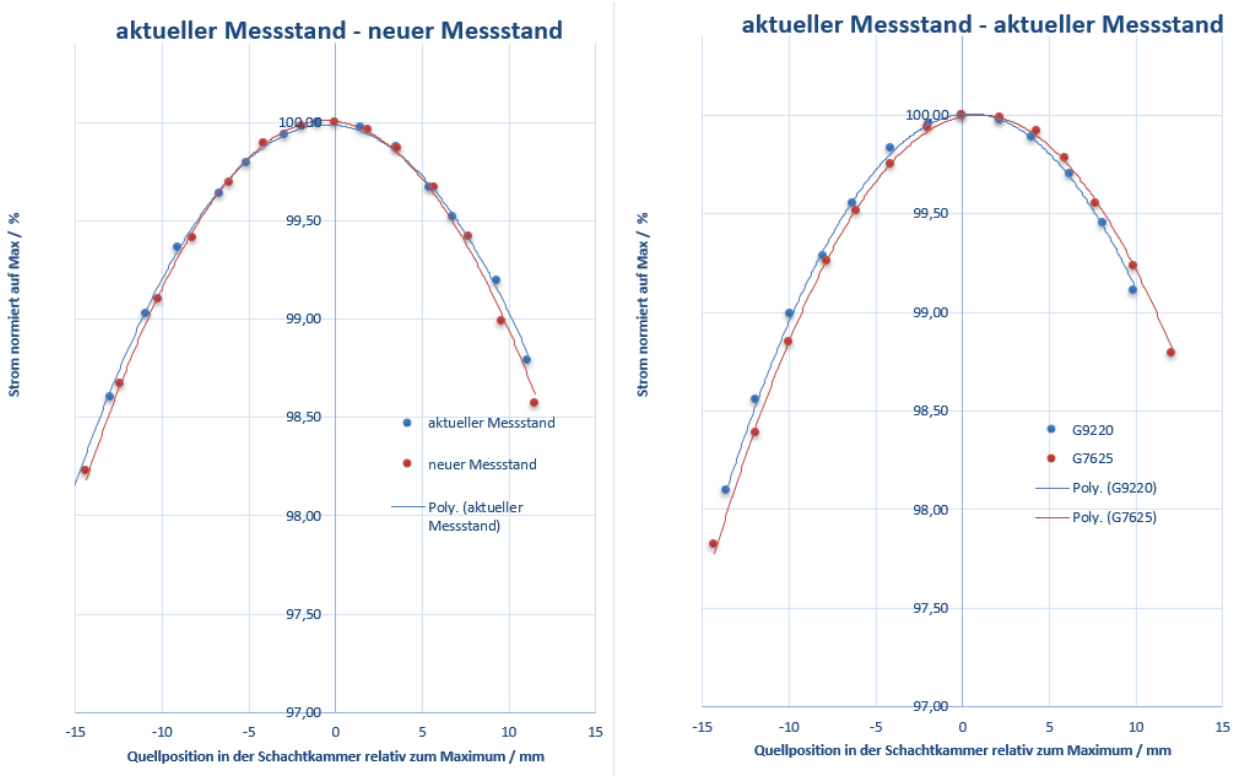


Abbildung 5.8: Lage-Empfindlichkeitskurven der TM33004 links mit dem neuen und dem aktuellen Messstand gemessen, rechts zwei Wiederholungen mit dem aktuellen Messstand

Die Kalibrierung einer Schachtkammer dauert mit dem aktuellen Messstand etwa eine Woche Messzeit und eine weitere Woche für die Auswertung und Kontrolle. Mithilfe des neuen Messstandes kann die Messzeit auf einen Tag begrenzt werden. Die Zeit für die Auswertung und Kontrolle reduziert sich ebenfalls. Somit ist eine vollständige Kalibrierung einer Schachtkammer innerhalb von zwei bis drei Tagen möglich.

5.6 Ermittlung der Messunsicherheit

Die Messunsicherheit des neuen Messstands wurde mithilfe der kommerziellen Software „GUM Workbench“ermittelt. Das ausführliche Unsicherheitsbudget für die Quellkalibrierung befindet sich im Anhang unter Punkt A.7.1. Für die Schachtkammerkalibrierung befindet es sich im Anhang unter Punkt A.7.2. Die wesentlichen Unsicherheitsbeiträge für die Quellkalibrierung werden durch die Unsicherheit der Ionisationskammerkalibrierung des genutzten Sekundärnormals und die Anisotropie der Quelle geliefert. Den wesentlichen Unsicherheitsbeitrag für die Kalibrierung von Schachtkammern liefert die Unsicherheit der Quellkalibrierung. Kleinere Beiträge kommen durch die Anisotropie der Quelle und durch die Korrektur der Luftdichte hinzu. Diese Faktoren können durch den neuen Messstand nicht verbessert werden. Daher besitzt die Quellkalibrierung mit dem aktuellen Messstand die gleiche Unsicherheit wie die Kalibrierung mit dem neuen Messstand. Die Unsicherhtei der Schachtkammerkalibrierung konnte um 0,2 % (k=2) verbessert werden.

6 Zusammenfassung

Innerhalb der Masterarbeit wurde ein neuer Messstand für die Kalibrierung von HDR-Brachytherapiequellen und Schachtionisationskammern entwickelt. Dieser Messstand ermöglicht die Kalibrierung von HDR-Brachytherapiequellen und Schachtionisationskammern. Dabei wurde die Hardware, bis auf Afterloading-Gerät und Roboter, und die Software vollständig ausgetauscht. Die Hardware wurde an vorhandene Hardwarekomponenten des Fachbereichs angepasst und modular aufgebaut. Dies gewährleistet die Austauschbarkeit und Kompatibilität der einzelnen Komponenten zwischen den Messplätzen. Die Software wurde mittels des Quad-Core Modells des Fachbereichs entwickelt. Dabei wurden vorhandene Grundkomponenten als Basisklassen genutzt und in abgeleiteten Klassen spezialisiert. Für die Hardwarekomponenten Afterloading-Gerät und Roboter wurden neue Grundkomponenten erstellt. Zusätzlich wurden neue Oberflächen für die Steuerung des Roboters und des Afterloading-Gerätes implementiert. Die Steuerung der Hardwarekomponenten wurde anhand der vorgegebenen Prüfkriterien von verschiedenen Anwendern getestet. Zum einzelnen Ansprechen der Hardwarekomponenten wurde ein Expertenfenster entwickelt. Über die Messoberfläche können diverse Messabläufe zusammengestellt werden. Die im Rahmen dieser Arbeit erstellte Software steuert die Hardwarekomponenten während der Messung an. Die aufgenommenen Messwerte werden abgespeichert und ausgewertet.
Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Messstand führt die eingegebenen Messungen, bis auf das Umbauen der Messaufbauten, automatisch durch und wertet diese abschließend vollständig aus. Der neue Messstand ermöglicht somit die Durchführung verschiedener Messungen ohne Anwesenheit von Personal. Die Dauer einer vollständigen Kalibrierung kann durch den neuen Messstand von ca. drei bis vier Wochen auf ca. eine Woche reduziert werden. Dabei kann die reine Messzeit auf etwa zwei Arbeitstage reduziert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Durchführung und Auswertung der Quellkalibrierung anhand von zwei Quellen (^{192}Ir und ^{60}Co) überprüft. Die Kammerkalibrierung wurde anhand von vier Schachtkammern mit einer ^{192}Ir-Quelle überprüft. Die Abweichungen der Kalibrierfaktoren des neu implementierten Messstandes betragen weniger als 0,2 % vom Kalibrierfaktor der mit dem aktuellen Messstand ermittelt wurde.
Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass der Messstand sich für die Kalibrierung von ^{60}Co- und ^{192}Ir-Quellen eignet. Zusätzlich konnte die Kalibrierung von Schachtionisati-

onskammern mit ^{192}Ir-Quellen verifiziert werden. Um den Messstand im Standardbetrieb für Kalibrierungen von Quellen und Schachtionisationskammern zu nutzen sind weitere Tests erforderlich. Dabei sollte die Langzeitstabilität des Messstandes überprüft werden. Zusätzlich sollte die Schachtkammermessung mit ^{125}I- und ^{60}Co-Quellen überprüft werden. Für ^{125}I-Quellen sollte die Anisotropiemessung ebenfalls in späteren Untersuchungen verifiziert werden.
Im Hinblick auf die bisher geringe Stichprobengröße der Kalibrierungen kann es sinnvoll sein, beide Messstände für eine Übergangszeit parallel für weitere Kalibrierungen zu nutzen. Bleiben die Differenzen der Ergebnisse beider Messstände konstant unterhalb von 0,5 % so kann der neue Messstand in den Routinebetrieb übernommen werden.
Ziel dieser Masterarbeit war es, mithilfe eines neuen Messstandes den Automatisierungsgrad der Kalibrierungen in der HDR-Brachytherapie zu erhöhen und falls möglich die Messunsicherheit zu verringern. Durch die Erhöhung des Automatisierungsgrades konnte eine Reduzierung der Kalibrierdauer um ca. 70 % erreicht werden. Die Messunsicherheit der Schachtionisationskammerkalibrierung konnte um 0,1 % (k=2) reduziert werden. Die Messunsicherheit der Quellkalibrierung setzt sich hauptsächlich aus der Unsicherheit der Sekundärnormalkalibrierung und der Anisotropie der Quelle zusammen und konnte daher nicht verbessert werden.

Literaturverzeichnis

[1] Physikalisch-Technische Bundesanstalt. *Fakten zur PTB.* www.ptb.de, December 2019. [13.12.2019].

[2] W. Schlegel, C.P. Karger, and O. Jaekel. *Medizinische Physik. Grundlagen-Bildgebung-Therapie-Technik*, chapter Brachytherapie, pages 579–622. Springer Verlag GmbH, Berlin, 2018.

[3] E. Richter and T. Feyerabend. *Grundlagen der Strahlentherapie.* Springer Verlage GmbH, Lübeck, 1996.

[4] DIN 6814-3:2016-08, *Begriffe in der radiologischen Technik - Teil 3: Dosimetrie.*

[5] DIN 6809-2:1993-11, *Klinische Dosimetrie - Teil 2: Brachytherapie mit umschlossenen gammastrahlenden radioaktiven Stoffen.*

[6] J. Venselaar, A. S. Meigooni, D. Baltas, and P. J. Hoskin. *Comprehensive Brachytherapy. Physical and Clinical Aspects.* CRC Press, Boca Raton, 2013.

[7] Jürgen Kiefer. *Strahlen und Gesundheit.* Wiley-vch Verlage GmbH&Co.KGaA, Weinheim, 2012.

[8] A. Almén, A. Kaul, J.H. Bernhardt, B.M. Moores, D. Noßke, J. Valentin, S. Vatnitsky, L. Johansson, H.M. Kramer, K.U. Kasch, et al. *Medical Radiological Physics I.* Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology - New Series. Springer Berlin Heidelberg, 2012.

[9] H. Reich, editor. *Dosimetrie ionisierender Strahlung.* B. G. Teubner, Stuttgart, 1990.

[10] DIN 6803-1:2019-05, *Dosimetrie für die Photonen-Brachytherapie - Teil1: Begriffe.*

[11] Dr. rer. nat. H. Krieger. *Strahlungsmessung und Dosimetrie.* Vieweg+Teubner Verlag, 2011.

[12] H. Oeser, W. Schumacher, H. Ernst, and D. Frost. *Atlas der Szintigraphie: Einführung, Technik und Praxis.* Walter de Gruyter Verlag, 2012.

[13] R. Parthier. *Messtechnik: Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 8. edition, 2016.

[14] R. Behrens. *Kalibrierungen im Bereich Brachytherapie*. https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt6/fb-63/detailierte-informationen/kalibrierungen-im-bereich-brachytherapie.html. [12.07.2019].

[15] H.-J. Selbach. *Neue Kalibrieranlage für ^{192}Ir- und ^{60}Co-Brachytherapie-Strahlungsquellen*. In *Medizinische Physik 2006-Tagungsband der 37. Jahrestagung der DGMP (Deutsche Gesellschaft für Medizinische Physik)*, page 244, 2006.

[16] H.-J. Selbach and L. Büermann. *Vergleich zweier Verfahren zur Darstellung der Einheit der Kenndosisleistung für ^{192}Ir-HDR-Brachytherapiequellen*. In *Medizinische Physik 2004-Tagungsband der 35. Jahrestagung der DGMP (Deutsche Gesellschaft für Medizinische Physik, Leipzig, 2004)*, page 82. DGMP, 2004.

[17] A. Schüller, M. Meier, H.-J. Selbach, and A. Ankerhold. A radiation quality correction factor k_Q for well-type ionization chambers for the measurement of the reference air kerma rate of ^{60}Co HDR brachytherapy sources. *Medical Physics*, 42(7):4285–4294, July 2015.

[18] U. Ankerhold. *Bestimmung der radialen Anisotropie des Strahlungsfeldes von Ir-192- und Co-60-Brachytherapiequellen*. https://www.ptb.de/cms/de/service-seiten/news/newsdetails.html?tx_news_pi1%5Bnews%5D=4500&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=7ee23f5f507539e3d678d5fac5334e63, September 2008. [27.07.2019].

[19] IAEA. Calibration of photon and beta ray sources used in brachytherapy. In *Guidelines on standardized procedures at Secondary Standards Dosimetry Laboratories (SSDLs) and hospitals*. IAEA (international atomic energy agency), Wien, 2002.

[20] H. Krieger and D. Baltas. Praktische Dosimetrie in der HDR-Brachytherapie. In *DGMP-Bericht*, 2006.

[21] K.R. Kase, B.E. Bjärngard, and F.H Attix. *The Dosimetry of Ionizing Radiation*. Elsevier Science, 2015.

[22] F. H. Attix, W. C. Roesch, , and E. Tochilin. *Radiation Dosimetry: Instrumentation*. Academic Press, 1966.

[23] W. Weber. *Industrieroboter. Methoden der Steuerung und Regelung*. Carl Hanser Verlag GmbH&Co. KG, München, 3. edition, 2017.

[24] G. Stark. *Robotik mit MATLAB*. Carl Hanser Verlag GmbH&Co. KG, Leipzig, 2009.

[25] VDI-Gesellschaft Produktionstechnik, editor. *VDI-Richtlinie 2860. Montage- und Handhabungstechnik*. Beuth-Verlag, 1990.

[26] A. Magaña Flores, G. Reinhart, and C. Zwicker. *Industrieroboter. Planung-Integration-Trends*. Vogel Communicatins Group GmbH & Co. KG, Würzburg, 2018.

[27] S. Hesse & M. Viktorio. *Taschenbuch Robotik. Montage - Handhabung*. Carl Hanser Verlag GmbH&Co. KG, München, 2016.

[28] M. Haun. *Handbuch Robotik. Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter*. Springer Verlag GmbH, Altrip, 2. edition, 2013.

[29] E. J. Kreuzer, J.-B. Lugtenburg, H.-G. Meißner, and A. Truckenbrodt. *Industrieroboter*. Springer-Verlag, Berlin, 1994.

[30] S. Hesse and G. Seitz. *Robotik: Grundwissen für die berufliche Bildung*. Springer-Verlag, 2013.

[31] Kawasaki Heavy Industries LTD. *Spezification of robot. FS020NFD40*, 3 edition, March 2007.

[32] G. Buchholz and W. Scheller. PTB-EW-13: Bipolare programmierbare Hochspannungsquelle für Ionisationskammermessungen. Technical report, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2006.

[33] G. Buchholz. PTB-EW-12: Ladungsmesser. Technical report, Physikalische-Technische Bundesanstalt, 2004.

[34] Kawasaki Heavy Industries, LTD. *Kawasaki Robot Controller Serie E: Referenzhandbuch für AS-Sprache*, 2 edition, June 2015.

Abbildungsverzeichnis

2.1 Darstellung der Definition von Energiedosis und Kerma nach [2] 4
2.2 Beispiel einer Brachytherapie-Drahtquelle 5
2.3 Konstruktion von verschiedenen ^{125}I-Strahlern [2] 7
2.4 Messprinzip von Ionisationskammern [2] 8
2.5 Bauformen von Ionisationskammern [11] 9
2.6 Grundsätzlicher, schematischer Aufbau eines Szintillationszählers [12] 10
2.7 Hierarchie der Normale [13] 11
2.8 Aufbau einer RAKR-Messung 13
2.9 Aufbau Anisotropiemessungen 14
2.10 polare und radiale Anisotropie einer ^{192}Ir-Quelle 15
2.11 Applikatoren für die Schachtionisationskammerkalibrierung mit ^{125}I 16
2.12 Applikatoren für die Schachtionisationskammerkalibrierung mit HDR-Quellen 17
2.13 Aufbau einer Schachtionisationskammerkalibrierung 18
2.14 Lage-Empfindlichkeitskurve für eine Quelle innerhalb einer Schachtkammer . 19
2.15 Abhängigkeit des Messstroms von der Kammerspannung [21] 20
2.16 Aufbau einer Sättigungsmessung 21
2.17 Messergebnisse einer Sättigungsmessung 22
2.18 Roboterkinematiken (oben) und ihre Arbeitsräume (unten) [28] 23
2.19 kinematische Kennwerte [26] 24
2.20 Positioniergenauigkeit eines Roboters [26]; Details finden sich im Text 25
2.21 Koordinatensystemtypen eines Roboters nach [30] 26

3.1 Inneres der Bleiburg 28
3.2 Kollimator mit Fadenkreuz und zwei Laserlinien 29
3.3 Nivellierlaser zur Ausrichtung des Lasersystems 30
3.4 Steuerung des Kawasaki-Roboters 31
3.5 Messraum mit eingezeichneten Roboterkoordinatensystemen 32
3.6 Steuerung des Sicherheitskreises 33
3.7 Afterloading-Gerät der PTB 34
3.8 Steuerung des Afterloading-Gerätes 35
3.9 Der neue Messstand für die HDR-Kalibrierung der Brachytherapie 36
3.10 Adapterstück für die Verbindung von Hochspannung und Messsignal 37

4.1 Quad-Core Modell des Fachbereichs 6.3 39
4.2 Hauptfenster der Messsoftware 40
4.3 Ergebnis einer Elektrometermessung 41
4.4 Kalibrier-Fenster der Messsoftware 43
4.5 Fenster zur Einstellung der Messparameter 44
4.6 Erweiterung des Messfensters zur Darstellung der Messergebnisse 45

4.7 Klassendiagramm der Hardwareklassen 46
4.8 Klassendiagramm der Roboterklasse 48
4.9 Oberfläche der Robotersteuerung 49
4.10 Zurückgesendeter Status des Roboters 50
4.11 Klassendiagramm der Afterloadingklasse 51
4.12 Oberfläche der Afterloading-Steuerung 52
4.13 Hierarchische Gliederung einer Messung 54
4.14 Klassendiagramm für die Messkonfigurationsdatenobjekte 55
4.15 Klassendiagramm für die Messdatenobjekte 56
4.16 Klassendiagramm für die Auswertungsdatenobjekte 57
4.17 Ablauf einer Messung 58
4.18 Vor- und Nachbereitung einer Messung 58
4.19 Flussdiagramm der Funktion StartMeasure 59
4.20 Flussdiagramm für die Vorbereitung eines Messzyklus 60
4.21 Fenster für den Messumbau 60
4.22 Flussdiagramm für die Funktion CalcDecay 61
4.23 Flussdiagramm für die Funktion CalcMeanMeasCurrent 62
4.24 Flussdiagramm für die Funktion CalcCalib 63
4.25 Flussdiagramm für die Funktionen CalcAniso und CalcRAKR 65
4.26 Flussdiagramm für die Funktionen CalcSat und CalcChamber 66

5.1 Diagramm des Leckstroms und der Standardabweichung über der Elektrometerkapazität 70
5.2 Messergebnisse mit eingetragener Standardabweichung mit einer Präzisionsstromquelle 72
5.3 Kontrolle der Messergebnisse über das quadratische Abstandsgesetz 73
5.4 Polare Anisotropiemessung einer ^{60}Co-Quelle 74
5.5 Radiale Anisotropiemessung einer ^{60}Co-Quelle 75
5.6 Anisotropien einer ^{192}Ir-Quelle mit aktuellem und neuem Messstand 76
5.7 Historie des Kammerkalibrierfaktor der Schachtkammer HDR1000+ Nr. A011491 77
5.8 Lage-Empfindlichkeitskurve der TM33004 78

A.1 Experten-Fenster der Messung 102
A.2 Detailliertes Klassendiagramm der Hardwareklassen 103
A.3 Detailliertes Klassendiagramm der Roboterklasse 104
A.4 Detailliertes Klassendiagramm der Afterloadingklasse 105
A.5 Detailliertes Klassendiagramm für die Messkonfigurationsobjekte 106
A.6 Detailliertes Klassendiagramm für die Messdatenobjekte 107
A.7 Detailliertes Klassendiagramm für die Auswertungsdatenobjekte 108
A.8 Detailliertes Flussdiagramm für die Vorbereitung eines Messzyklus 109

Tabellenverzeichnis

2.1 Eigenschaften verwendeter Nuklide in der Brachytherapie nach [9] und [8] . . 6

5.1 Ergebnisse der Vermessung der Position des Roboters 69
5.2 Ergebnisse der Vermessung der Positionierung des Afterloading-Gerätes . . . 69
5.3 Ergebnisse der Vermessung der Leckströme verschiedener Adapter 71
5.4 Ergebnis einer ^{60}Co-Quellkalibrierung mit aktuellem und neuem Messstand . 73
5.5 Ergebnis einer ^{192}Ir-Quellkalibrierung mit aktuellem und neuem Messstand . 76
5.6 Historiemessungen einer ^{192}Ir-Quelle mit dem neuen Messstand 77

A.1 Testprotokoll Teil 1 111
A.2 Testprotokoll Teil 2 112
A.3 Messunsicherheit der Kalibrierung einer ^{192}Ir-Quelle 114
A.4 Messunsicherheit einer Kammerkalibrierung mit einer ^{192}Ir-Quelle 115

A Anhang

A.1 Kalibrierschein für Brachytherapie-HDR-Quellen





Kalibrierschein
Calibration Certificate

Gegenstand: *Object:*	Umschlossene radioaktive Strahlungsquelle Iridium-192 metal source in a high grade steel housing
Hersteller: *Manufacturer:*	Hersteller
Typ: *Type:*	Quelltyp
Kennnummer: *Serial No.:*	012345
Auftraggeber: *Applicant:*	Adresse des Auftraggebers
Anzahl der Seiten: *Number of pages:*	4
Geschäftszeichen: *Reference No.:*	PTB-6.3-XXXXXXX
Kalibrierzeichen: *Calibration mark:*	XXXXX PTB JJ
Datum der Kalibrierung: *Date of calibration:*	Messdatum
Im Auftrag *On behalf of PTB*	Braunschweig, 2019-12-31 Siegel *Seal*
Name Prüfer 1	

Im Auftrag *On behalf of PTB*	
Name Prüfer 2	

Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Siegel haben keine Gültigkeit. Dieser Kalibrierschein darf nur unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge bedürfen der Genehmigung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt.
Calibration Certificates without signature and seal are not valid. This Calibration Certificate may not be reproduced other than in full. Extracts may be taken only with the permission of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

Kalibrierschein einer Quelle Seite 1

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Nationales Metrologieinstitut

1 General information

1.1 Test scope

Calibration of an ^{192}Ir brachytherapy source in terms of the quantity 'reference air kerma rate'.

1.2 Quantity reference air kerma rate

The reference air kerma rate is the air kerma rate at 1 m distance from a brachytherapy radiation source perpendicular to the axis of the source without the fraction of stray radiation and without attenuation in air. The unit of reference air kerma rate is Gy/h.

1.2.1 Calibration details

The air kerma rate of the ^{192}Ir metal source with a diameter of 0.6 mm and a length of 3.5 mm of the active material in a high-grade steel housing with a diameter of 0.9 mm and a length of 4.57 mm was determined by means of an ionization chamber of the type LS01 No. 302 at 1 m distance perpendicular to the source axis. The response of the ionization chamber to the radiation of ^{192}Ir was determined by calculation from the energy dependence of the response of the ionization chamber and from the energies and emission probabilities of the individual ^{192}Ir emission lines.
The calibration was performed in collimated beam geometry in order to reduce scatter radiation. The remaining stray radiation produced in the air and in the walls of the measuring room was determined experimentally by means of the "shadow shield method" and by Monte Carlo simulations and subtracted from the measured total air kerma rate. The attenuation in air (1.2 %) was determined by calculation and considered in the air kerma rate value stated below.
The representation of the reference air kerma rate is based on the new data available in ICRU 90: International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU 90 Key Data for Ionizing-Radiation Dosimetry: Measurement Standards and Applications. Journal of the ICRU Volume 14, No1 (2014).

2 Test results

2.1 Reference air kerma rate

Referred to the reference date **2016-01-26, 12:00 UTC** (13:00 GZ) for the source

Quelltyp
012345

the following reference air kerma rate at **1.00 m** distance perpendicular to the central axis of the source was determined:

$$\dot{K}_a = 51.55\ \mathrm{mGy/h}$$

Kalibrierschein einer Quelle Seite 2

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Nationales Metrologieinstitut

Seite 3 zum Kalibrierschein vom 2019-12-31, Kalibrierzeichen: XXXXX PTB JJ
Page 3 of the Calibration Certificate dated 2019-12-31, calibration mark: XXXXX PTB JJ

2.2 Radioactive decay

For the correction of the radioactive decay, the coefficient $\lambda = (\ln 2)/T_{1/2} = 9.3888 \cdot 10^{-3}\ d^{-1}$ was used.

2.3 Radial Anisotropy

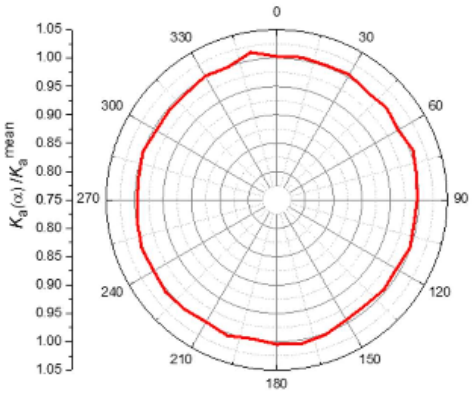


Fig. 2.1 Radial distribution of the air kerma rate, normalized to the mean air kerma rate

2.4 Polar Anisotropy

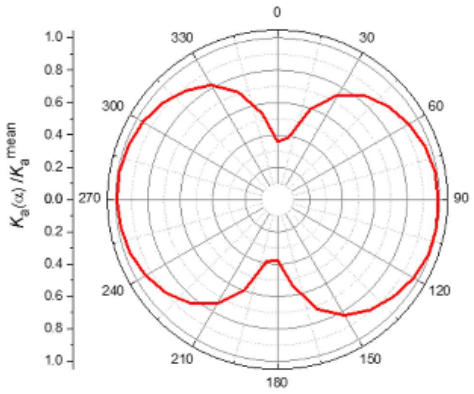


Fig. 2.2 Polar distribution of the air kerma rate, normalized to the mean air kerma rate

2.5 Uncertainty

The relative expanded uncertainty is 2.5 % (k = 2).
The uncertainty stated is the expanded measurement uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor k = 2. It has been determined in accordance with the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (GUM)". The value of the measurands then normally lies, with a probability of approximately 95 %, within the attributed coverage interval.

Kalibrierschein einer Quelle Seite 3

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Nationales Metrologieinstitut

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig und Berlin ist das nationale Metrologieinstitut und die technische Oberbehörde der Bundesrepublik Deutschland für das Messwesen. Die PTB gehört zum Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Sie erfüllt die Anforderungen an Kalibrier- und Prüflaboratorien auf der Grundlage der DIN EN ISO/IEC 17025.

Zentrale Aufgabe der PTB ist es, die gesetzlichen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) darzustellen, zu bewahren und weiterzugeben. Die PTB steht damit an oberster Stelle der metrologischen Hierarchie in Deutschland. Die Kalibrierscheine der PTB dokumentieren eine auf nationale Normale rückgeführte Kalibrierung.

Dieser Ergebnisbericht ist in Übereinstimmung mit den Kalibrier- und Messmöglichkeiten (CMCs), wie sie im Anhang C des gegenseitigen Abkommens (MRA) des Internationalen Komitees für Maße und Gewichte enthalten sind. Im Rahmen des MRA wird die Gültigkeit der Ergebnisberichte von allen teilnehmenden Instituten für die im Anhang C spezifizierten Messgrößen, Messbereiche und Messunsicherheiten gegenseitig anerkannt (nähere Informationen unter http://www.bipm.org).

CIPM MRA

The Physikalisch-Technische Bundesanstalt *(PTB) in Braunschweig and Berlin is the National Metrology Institute and the supreme technical authority of the Federal Republic of Germany for metrology. The PTB comes under the auspices of the Federal Ministry of Economics and Energy. It meets the requirements for calibration and testing laboratories as defined in DIN EN ISO/IEC 17025.*

The central task of PTB is to realize, to maintain and to disseminate the legal units in compliance with the International System of Units (SI). PTB thus is at the top of the metrological hierarchy in Germany. The calibration certificates issued by PTB document a calibration traceable to national measurement standards.

This certificate is consistent with the Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) that are included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details, see http://www.bipm.org).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100
38116 Braunschweig
DEUTSCHLAND

Abbestraße 2-12
10587 Berlin
DEUTSCHLAND

Kalibrierschein einer Quelle Seite 4

A.2 Kalibrierschein für Schachtionisationskammern





Kalibrierschein
Calibration Certificate

Gegenstand: *Object:*	Schachtionisationkammer ionization chamber
Hersteller: *Manufacturer:*	Hersteller
Typ: *Type:*	Schachtkammertyp
Kennnummer: *Serial No.:*	012345
Auftraggeber: *Applicant:*	Adresse des Auftraggebers
Anzahl der Seiten: *Number of pages:*	5
Geschäftszeichen: *Reference No.:*	PTB-6.3-XXXXXXX
Kalibrierzeichen: *Calibration mark:*	XXXXX PTB JJ
Datum der Kalibrierung: *Date of calibration:*	Messdatum
Im Auftrag *On behalf of PTB*	Braunschweig, 2019-12-31 Siegel *Seal*
Name Prüfer 1	

Im Auftrag
On behalf of PTB

Name Prüfer 2

Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Siegel haben keine Gültigkeit. Dieser Kalibrierschein darf nur unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge bedürfen der Genehmigung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt.
Calibration Certificates without signature and seal are not valid. This Calibration Certificate may not be reproduced other than in full. Extracts may be taken only with the permission of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

Kalibrierschein einer Schachtkammer Seite 1

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Nationales Metrologieinstitut

1 General information

1.1 Test scope

Calibration of a well-type ionization chamber in connection with an electrometer/a well-type ionization chamber in terms of the quantity reference air kerma rate per ionization current.

1.2 Quantity reference air kerma rate

The reference air kerma rate is the air kerma rate at 1 m distance from a brachytherapy radiation source perpendicular to the axis of the source without the fraction of stray radiation and without attenuation in air. The unit of reference air kerma rate is Gy/h.

1.2.1 Calibration details

The well-type ionization chamber was calibrated in terms of reference air kerma rate per ionization current by means of an afterloading source calibrated traceably to the PTB primary standards for air kerma. The representation of the reference air kerma rate is based on the new data available in ICRU90: International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU 90 Key Data for Ionizing-Radiation Dosimetry: Measurement Standards and Applications. Journal of the ICRU Volume 14, No 1 (2014).

1.2.2 Radiation source

^{192}Ir-HDR Afterloading source (Microselectron V2 *#Serial Number*) with a diameter of 0.60 mm and a length of 3.50 mm of the active material in a high-grade steel housing with a diameter of 0.90 mm and a length of 4.50 mm.

1.2.3 Applicators, Adapters

The calibration was carried out using the *typ of applicator* applicator with a plastic catheter.

1.2.4 High voltage

The well type ionization chamber was operated at a high voltage of *+300 V*. The polarity of the high voltage is defined by the potential of the chamber wall with respect to the central electrode (collector). The central electrode was connected to the input of the electrometer.

1.2.5 Polarity effect

A change of the polarity of the chamber voltage leads to a change of the ionisation current of approximately 0.x % and is, therefore, negligible.

1.2.6 Climatic conditions during calibration

Temperature:	from *293.75 K to 295.95 K*
Air pressure:	from *1009 hPa to 1013 hPa*
Rel. humidity:	approx. *50 %*

1.2.7 Correction for recombination loss

The charge collection loss due to ion recombination reaches a value of 0.07 % only for ^{192}Ir-sources with activities of about 412 GBq and may be neglected in most cases. For the present calibration with a source of *17* GBq the correction factor *1.0000* was used.

1.2.8 Leakage current

The leakage current of the well-type ionization chamber was negligible for the ionization currents obtained during the calibration.

Kalibrierschein einer Schachtkammer Seite 2

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Nationales Metrologieinstitut

2 Test result

2.1 Use of the calibration factor

The calibration factor N is the ratio of the value of the measurand and the indication M of the instrument under test under reference conditions. As a result, the reference air kerma rate $\dot{K}_{\mathrm{Ir}}$ is obtained from the indication of the instrument for a ^{192}Ir radiation source according to:

$$\dot{K}_{\mathrm{Ir}} = N_{K_{\mathrm{Ir}}} \cdot M \cdot k_\rho$$

$$k_\rho = \frac{p_0}{p} \cdot \frac{T}{T_0}$$

$N_{K_{\mathrm{Ir}}}$ calibration factor for the reference air kerma rate for ^{192}Ir-radiation

M indication of the well-type ionization chamber connected to the electrometer in ampere (A)

k_ρ correction factor for the air density, reference condition:
T_0 = 293.15 K, p_0 = 1013.25 hPa

2.2 Calibration factor $N_{K_{\mathrm{Ir}}}$

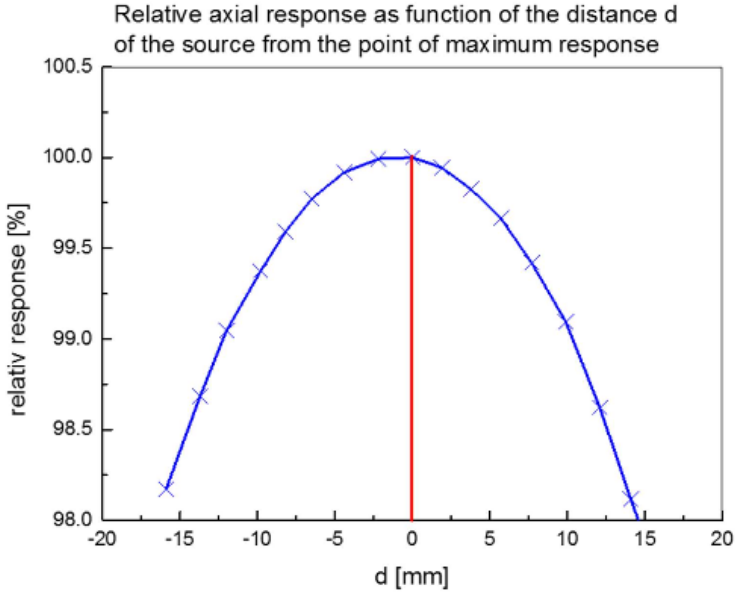
The calibration factor for ^{192}Ir radiation using the radiation source in the adapter was determined to be:

$$N_{K_{\mathrm{Ir}}} = 4.651 \cdot 10^5 \, \frac{\mathrm{Gy}}{\mathrm{A} \cdot \mathrm{h}}$$

Kalibrierschein einer Schachtkammer Seite 3

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Nationales Metrologieinstitut

2.3 Axial response of the well-type ionization chamber



2.4 Uncertainties

The relative expanded uncertainty is 2.6 % (k = 2).
The uncertainty stated is the expanded measurement uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor k = 2. It has been determined in accordance with the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (GUM)". The value of the measurands then normally lies, with a probability of approximately 95 %, within the attributed coverage interval.

Kalibrierschein einer Schachtkammer Seite 4

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Nationales Metrologieinstitut

Seite 5 zum Kalibrierschein vom 2019-12-31, Kalibrierzeichen: XXXXX PTB JJ
Page 5 of the Calibration Certificate dated 2019-12-31, calibration mark: XXXXX PTB JJ

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig und Berlin ist das nationale Metrologieinstitut und die technische Oberbehörde der Bundesrepublik Deutschland für das Messwesen. Die PTB gehört zum Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Sie erfüllt die Anforderungen an Kalibrier- und Prüflaboratorien auf der Grundlage der DIN EN ISO/IEC 17025.

Zentrale Aufgabe der PTB ist es, die gesetzlichen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) darzustellen, zu bewahren und weiterzugeben. Die PTB steht damit an oberster Stelle der metrologischen Hierarchie in Deutschland. Die Kalibrierscheine der PTB dokumentieren eine auf nationale Normale rückgeführte Kalibrierung.

Dieser Ergebnisbericht ist in Übereinstimmung mit den Kalibrier- und Messmöglichkeiten (CMCs), wie sie im Anhang C des gegenseitigen Abkommens (MRA) des Internationalen Komitees für Maße und Gewichte enthalten sind. Im Rahmen des MRA wird die Gültigkeit der Ergebnisberichte von allen teilnehmenden Instituten für die im Anhang C spezifizierten Messgrößen, Messbereiche und Messunsicherheiten gegenseitig anerkannt (nähere Informationen unter http://www.bipm.org).

CIPM MRA

The Physikalisch-Technische Bundesanstalt *(PTB) in Braunschweig and Berlin is the National Metrology Institute and the supreme technical authority of the Federal Republic of Germany for metrology. The PTB comes under the auspices of the Federal Ministry of Economics and Energy. It meets the requirements for calibration and testing laboratories as defined in DIN EN ISO/IEC 17025.*

The central task of PTB is to realize, to maintain and to disseminate the legal units in compliance with the International System of Units (SI). PTB thus is at the top of the metrological hierarchy in Germany. The calibration certificates issued by PTB document a calibration traceable to national measurement standards.

This certificate is consistent with the Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) that are included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details, see http://www.bipm.org).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100
38116 Braunschweig
DEUTSCHLAND

Abbestraße 2-12
10587 Berlin
DEUTSCHLAND

Kalibrierschein einer Schachtkammer Seite 5

A.3 Afterloaderbefehle

„B01“: schnell einfahren
„B02“: langsam einfahren
„B03“: Motor anhalten
„B04“: langsam ausfahren
„B05“: schnell ausfahren
„B06“: Antrieb einschalten
„B07“: Antrieb ausschalten
„B08“: Referenzfahrt „nur Nullen“ (ohne Walzenkontrolle)
„B09“: „normale“ Referenzfahrt einfahren (mit Walzenkontrolle)
„B10“: Entnahme \Bestückung freigeben
„B11“: Reset Hupe
„B12“: Reset Störung
„B13“: Anfahren Sollposition
„B14“: Anfrage Status
„B15“: Entnahme \Bestückung zurücksetzen
„B16“: Touchpanelbedienung sperren
„B17“: Touchpanelbedienung freigeben
„Sxxxx,x“: Sollposition in Millimeter senden Bsp. „S 1234,0“, „S-0002,7“

Zurückgesendeter Status:
„Mxxxxx,x DGxxxxx,x SPxxxxx,x S10101010 Z10101010 F1010101010100000 CR“
Position 1-8: Motorposition in Millimetern
Position 11-19: Drehgeberposition in Millimetern
Position 22-30: Sollposition in Millimetern
Position 34-39: Sensoren 1-6
Position 40: Eingang Sicherheitskreis
Position 44: Einleitung Signalzustände
Position 45: Entnahme freigegeben
Position 46: Referenzfahrt läuft
Position 47: Referenzfahrt ist fertig
Position 48: Antrieb ist eingeschaltet
Position 49: Touchpanelbedienung ist freigegeben
Position 55: Einleitung der Fehlerzustände
Position 56: Schranke geöffnet bei ausgefahrenem Draht
Position 57: Draht zu weit eingefahren

Position 58: Draht zu weit ausgefahren
Position 59: ein Sensor schaltet nicht
Position 60: Zeitüberschreitung im SPS-Programm
Position 61: Fehler: serielle Schnittstelle-Motor
Position 62: Fehler: serielle Schnittstelle-PC
Position 63: Redundanzmotor läuft nicht
Position 64: Sammelstörung
Position 65: Positioniermotor fährt nicht
Position 66: Antriebwalze hat Rillen

A.4 Messfenster

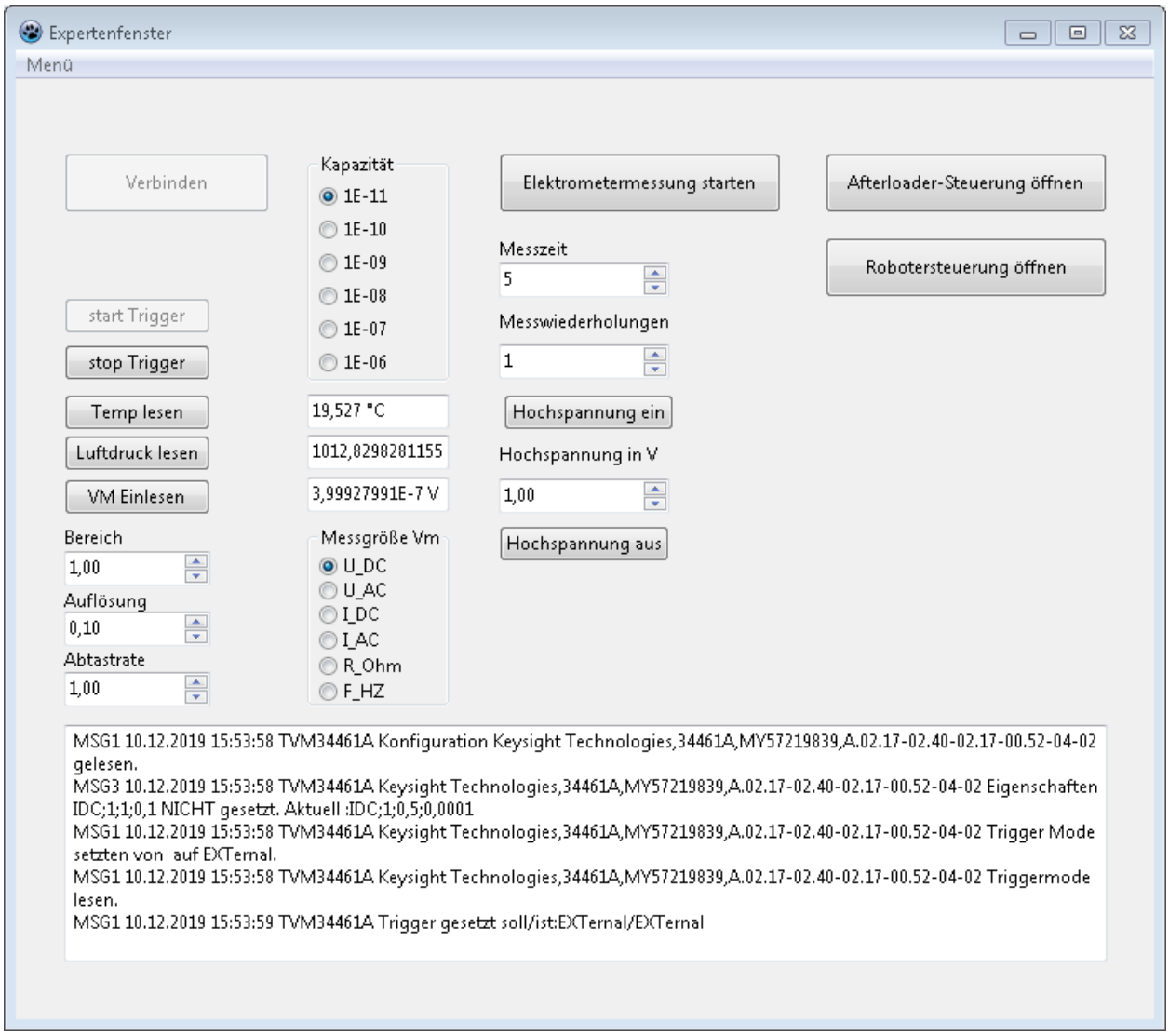


Abbildung A.1: Experten-Fenster der Messung

A.5 Datenstrukturen

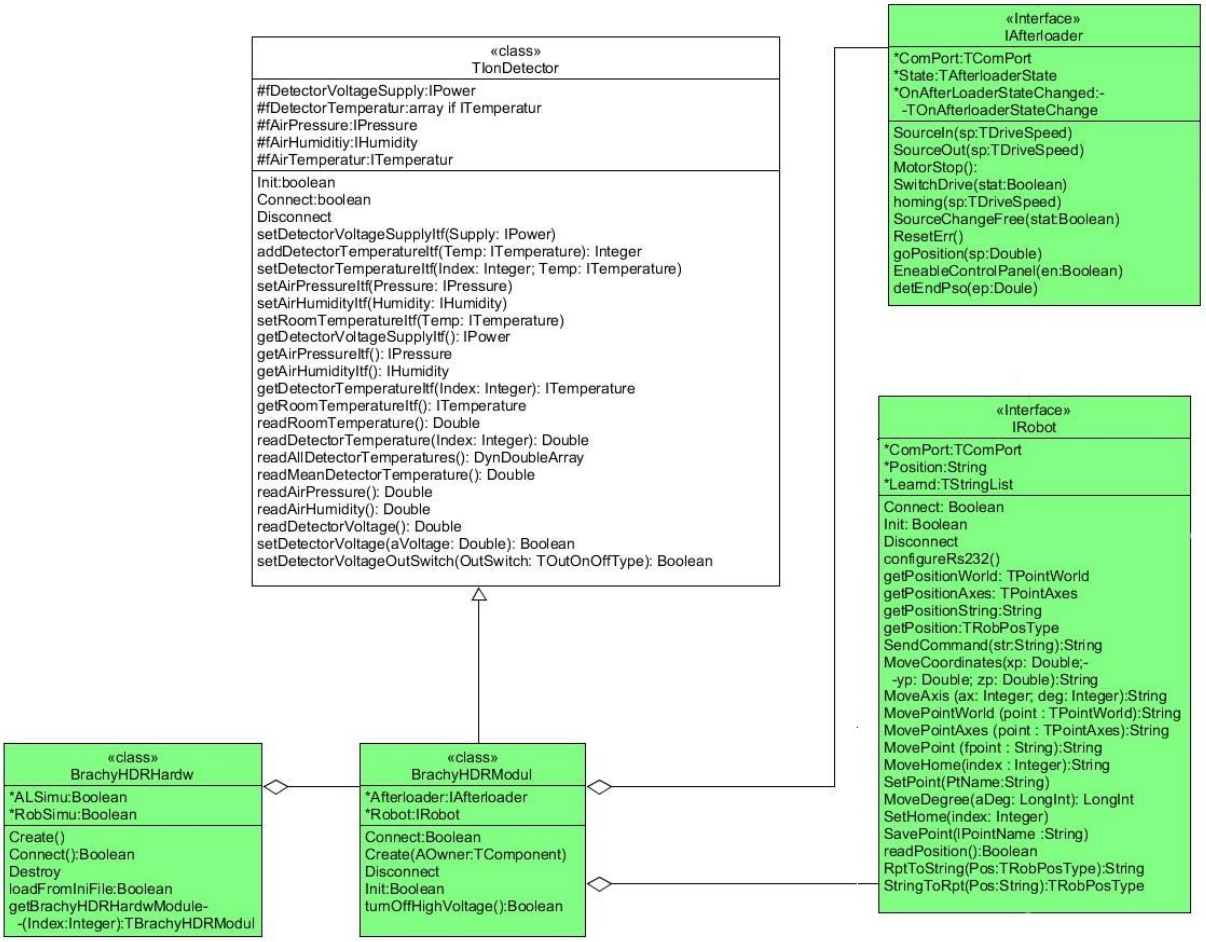


Abbildung A.2: Detailliertes Klassendiagramm der Hardwareklassen

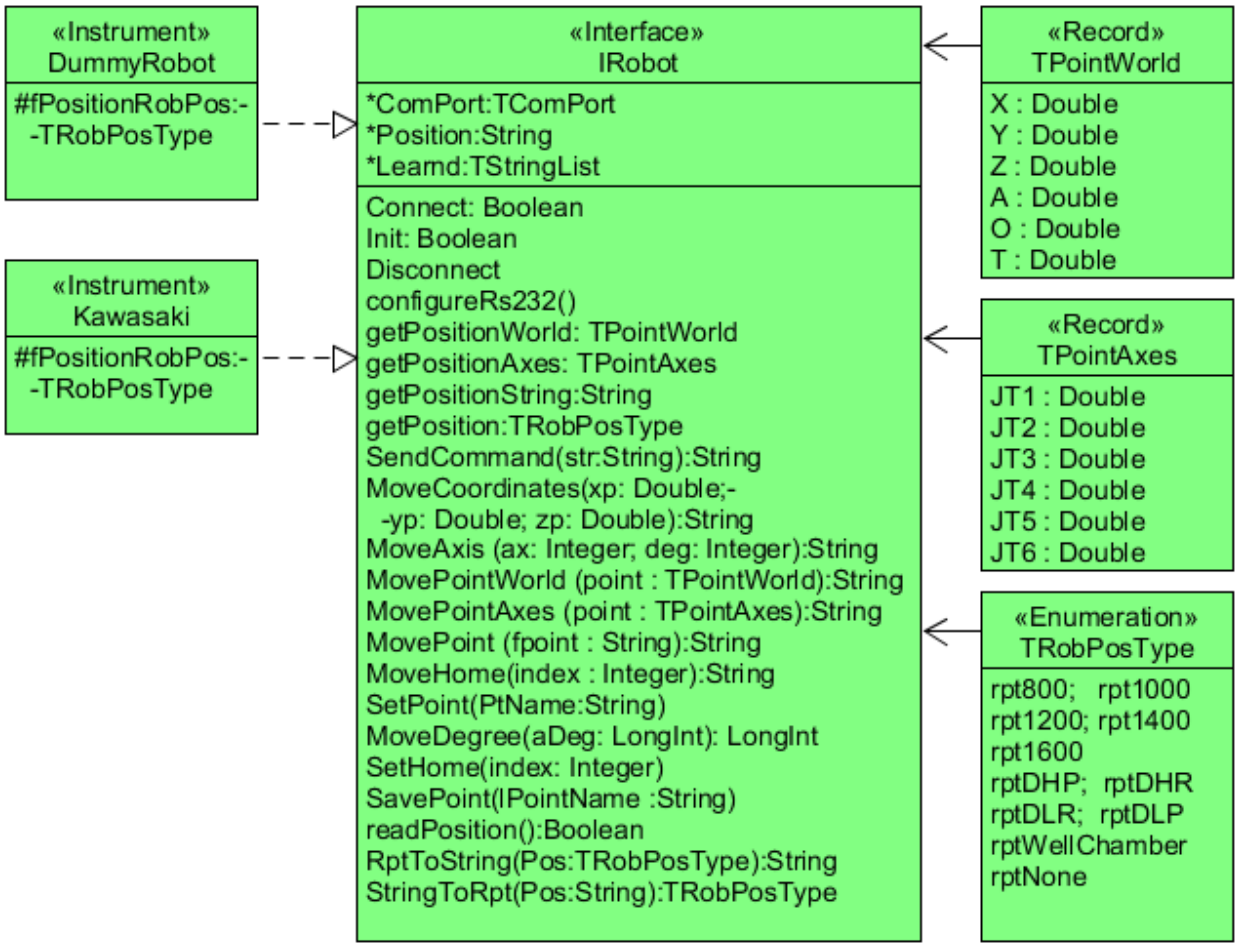


Abbildung A.3: Detailliertes Klassendiagramm der Roboterklasse

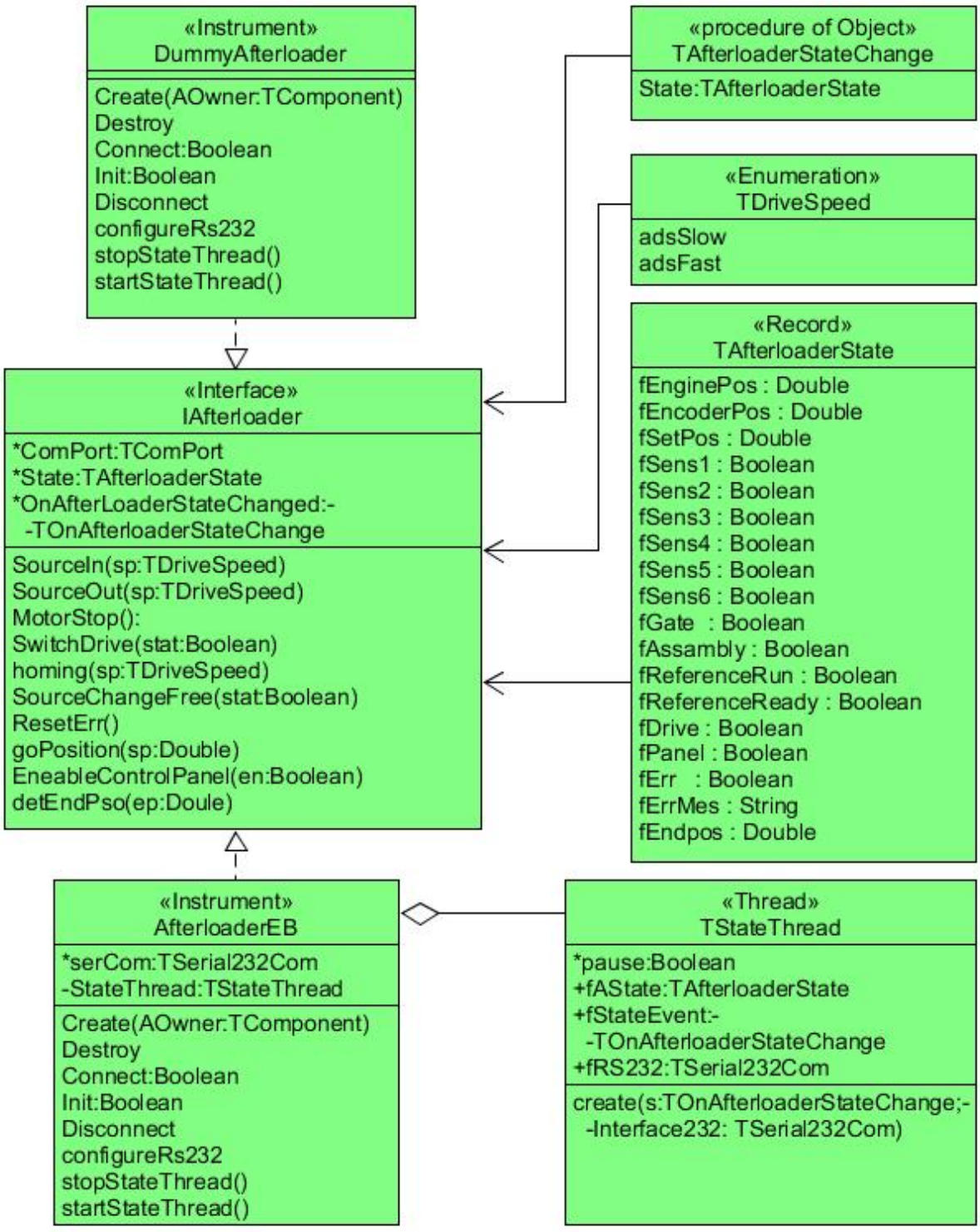


Abbildung A.4: Detailliertes Klassendiagramm der Afterloadingklasse

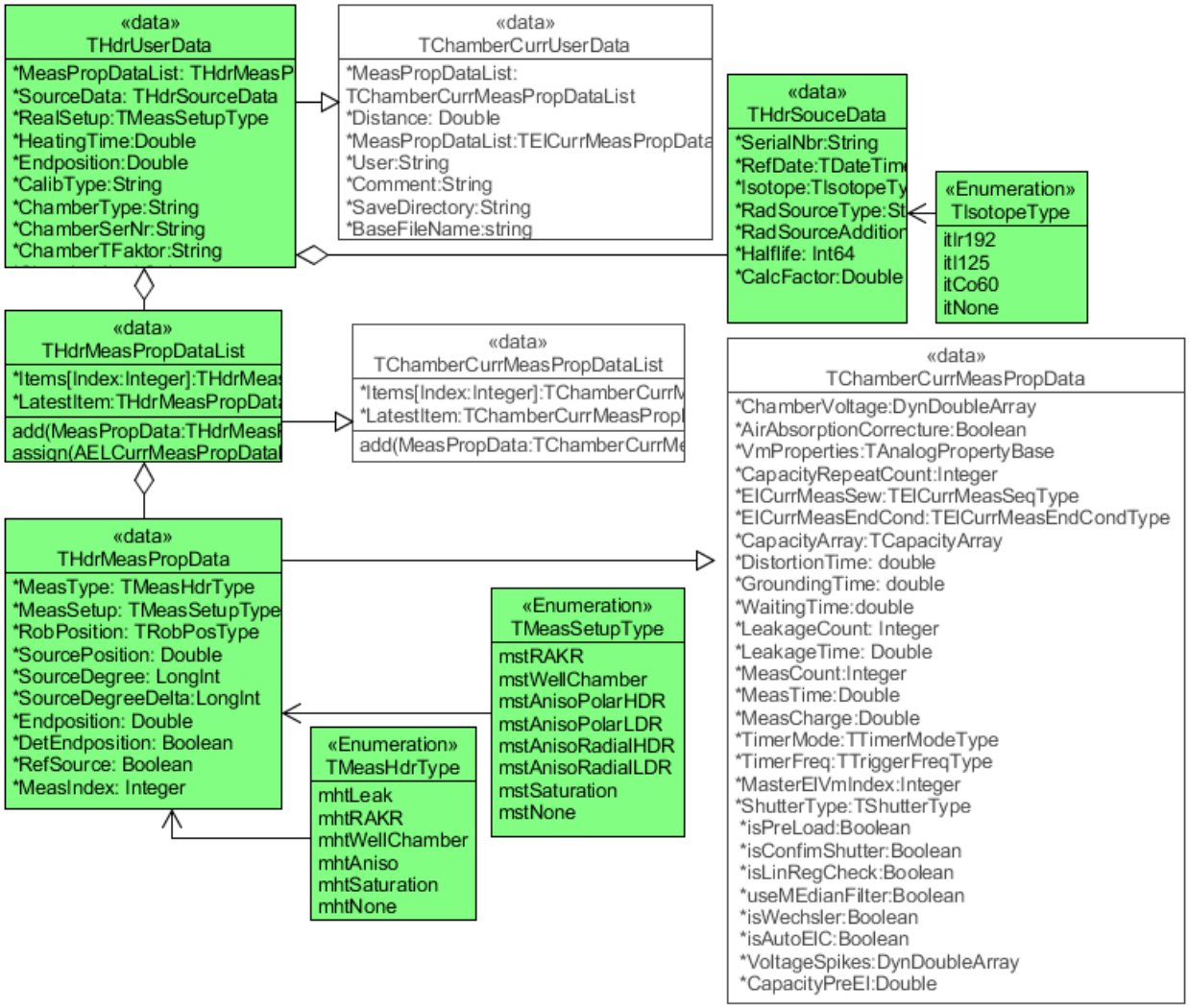


Abbildung A.5: Detailliertes Klassendiagramm für die Messkonfigurationsobjekte

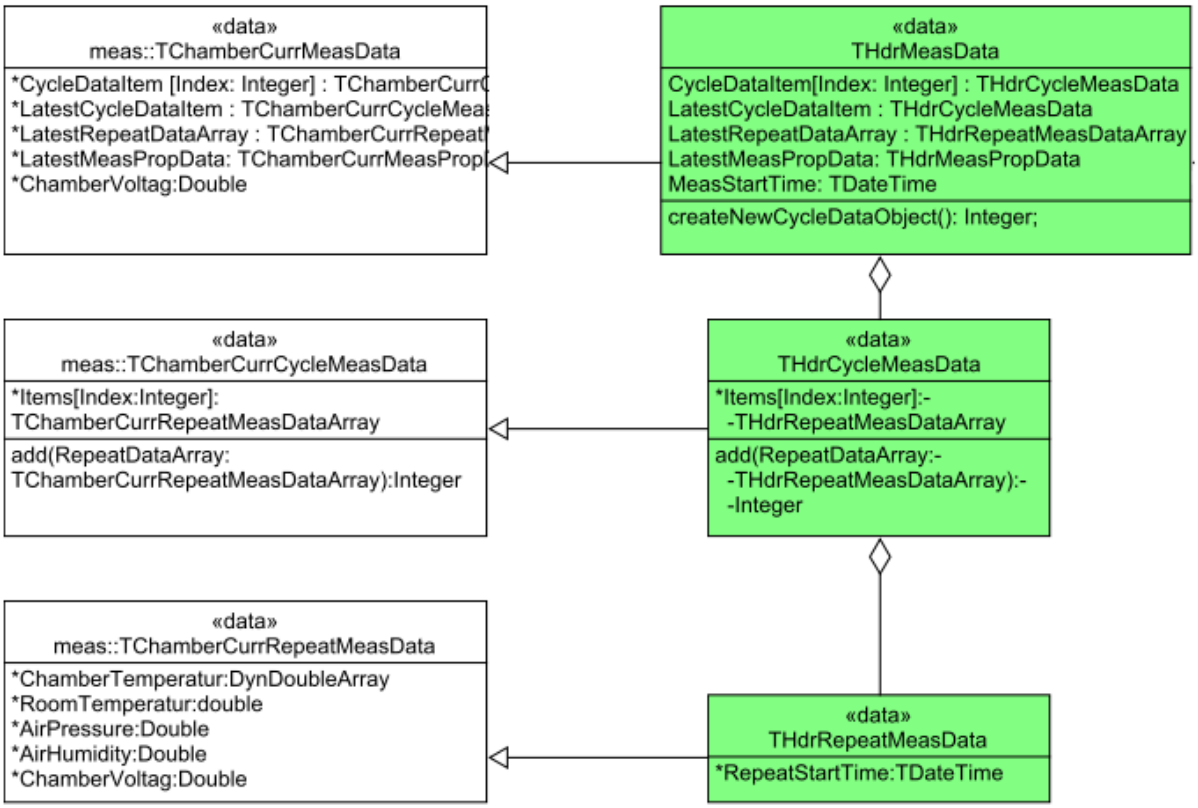


Abbildung A.6: Detailliertes Klassendiagramm für die Messdatenobjekte

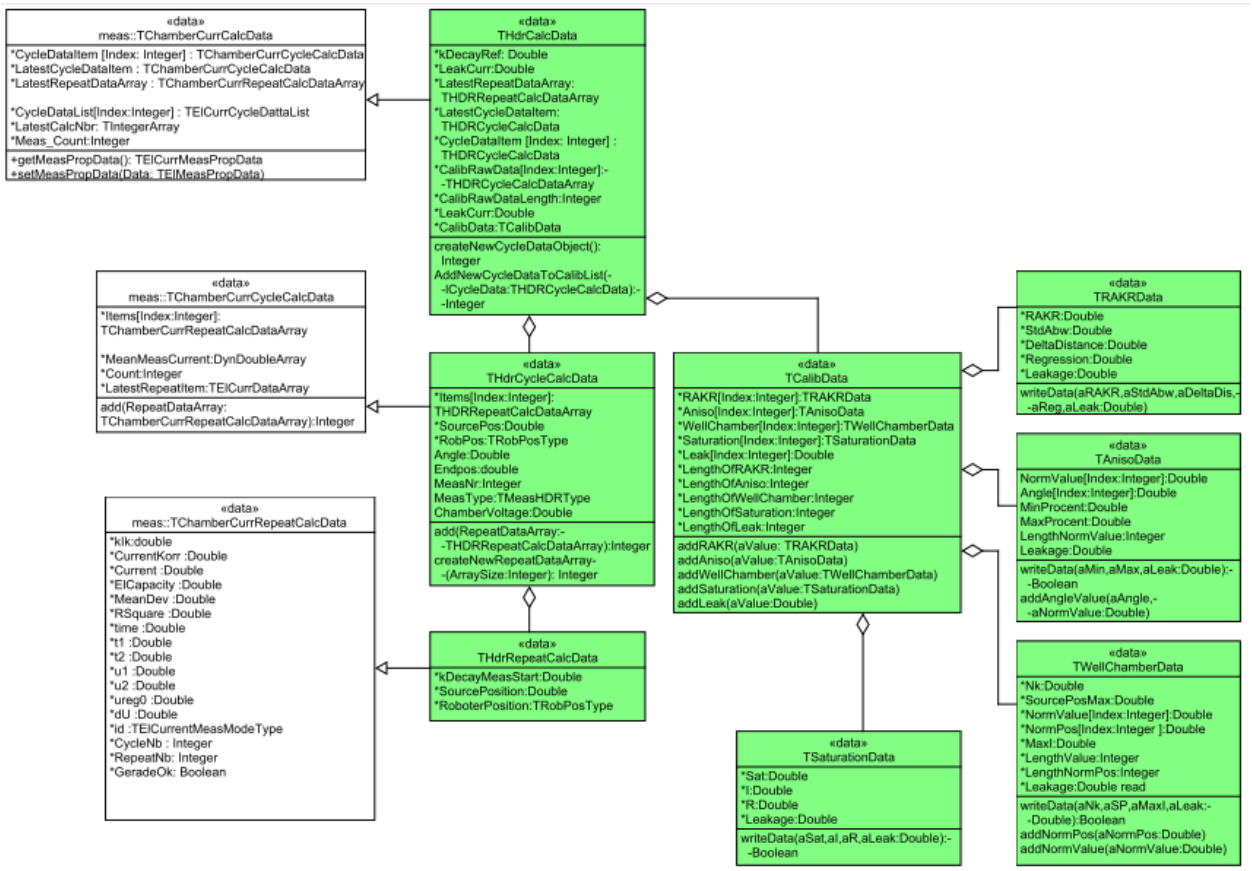


Abbildung A.7: Detailliertes Klassendiagramm für die Auswertungsdatenobjekte

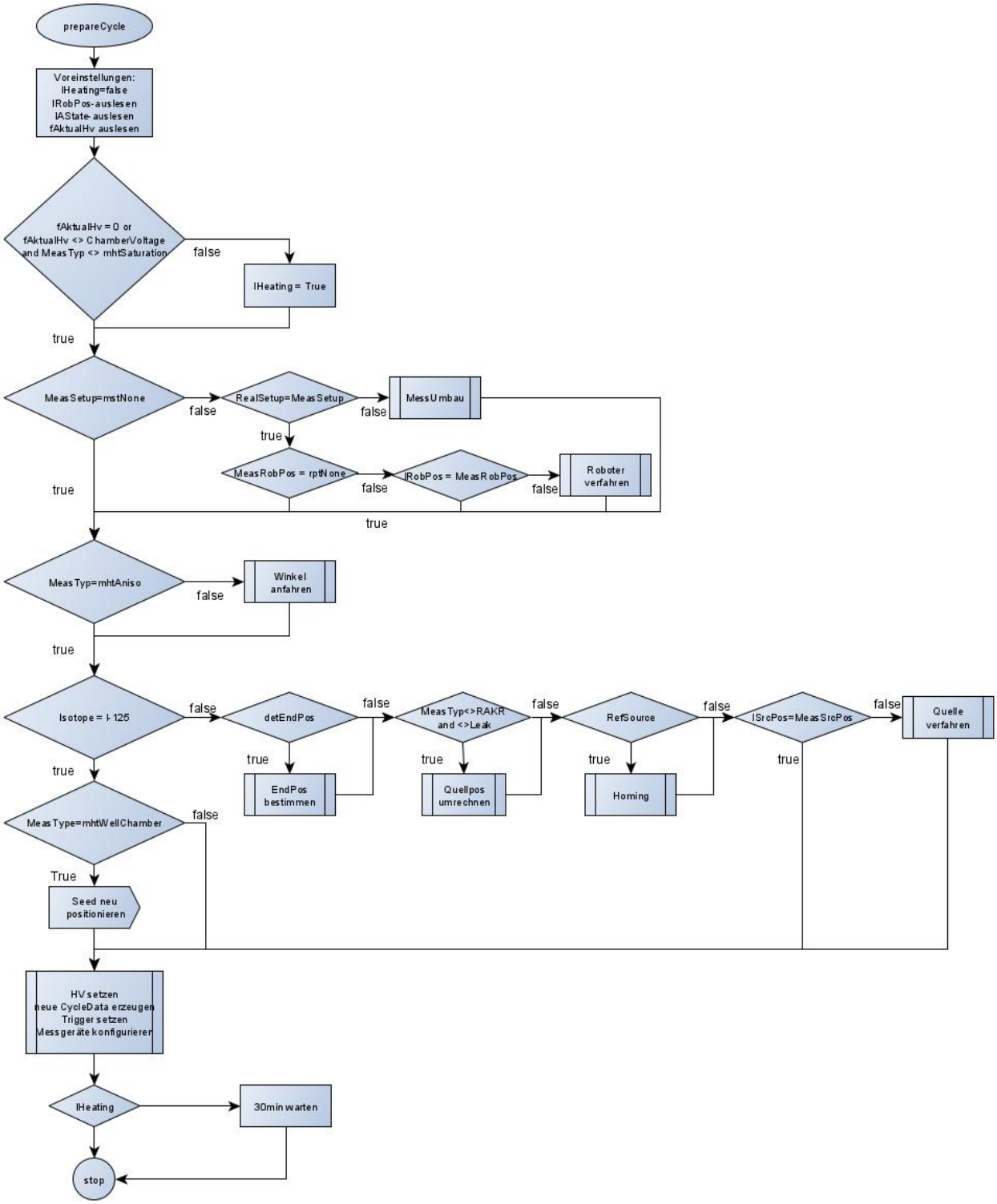


Abbildung A.8: Detailliertes Flussdiagramm für die Vorbereitung eines Messzyklus

A.6 Testprotokoll

Nr.	Beschreibung	Status	Kommentar
1	Allgemeine Übersichtlichkeit der Fenster	ok	
1.1	Messfenster	ok	weniger Nachkommastellen reichen
1.2	Einstellung Parameter	ok	Infofenster sind hilfreich
1.3	Messumbau	ok	
1.4	Expertenfenster	ok	alle wesentlichen Funktionen erkennbar
1.5	Afterloaderfenster	ok	Sicherheitskreis sollte an Standard 6.3 angepasst werden
1.6	Roboterfenster	ok	eventuell Achsen genauer beschriften
2	Parametereingabe	ok	
2.1	Text statt Zahlen	ok	Text wird durch minimale Zahl ersetzt
2.2	sehr große Zahlen	ok	angegebenes Maximum wird eingesetzt
2.3	leere Fenster	ok	Hinweise für falsche Eingabe wäre hilfreich
2.4	Start ohne Messparameter	ok	Messung wird sofort wieder beendet
3.	Ändern der Fenstergröße	ok	Fenster verzieht sich nicht
4.	Robotersteuerung	ok	
4.1	Alle Kalibrierpunkte anfahrbar ohne Kollisionen	ok	
4.2	Abstand zwischen RAKR Punkten korrekt je 200 mm	ok	Genauigkeit könnte verbessert werden
4.3	Connect ohne angeschlossenen Roboter gibt Fehler aus	ok	Meldung könnte genauer die Fehlerursache beschreiben
5.	Afterloadersteuerung	ok	
5.1	Status wird korrekt angezeigt	ok	Farbgebung Sicherheitskreis anpassen (gelb geschlossen, rot Quelle ausgefahren)
5.2	Quelle wird bei geöffnetem Sicherheitskreis nicht ausgefahren	ok	Aufforderung den Sicherheitskreis zu schließen erscheint
5.3	Fehler im Afterloader führt nicht zum Absturz des Programms	ok	Hupe wird direkt zurück gesetzt, Fehler nach Bestätigung
5.4	Connect ohne Afterloader funktioniert nicht	ok	Meldung könnte genauer die Fehlerursache beschreiben
5.5	nicht erreichbare Sollposition anfahren	ok	Ausgabe das Position nicht angefahren wurde vorhanden

Tabelle A.1: Testprotokoll Teil 1

Nr.	Beschreibung	Status	Kommentar
6.	Messablauf	ok	
6.1	Leckstrommessung wird mit eingegebenen Parametern durchgeführt	ok	
6.2	Leckstrommessung stellt die Messdaten im Diagramm dar	ok	
6.3	Schachtkammermessung wird mit eingegebenen Parametern durchgeführt	ok	
6.4	Schachtkammermessung stellt Plot korrekt dar	ok	Achsbeschriftung anpassen
6.5	Sättigungsmessung wird mit eingegebenen Parametern durchgeführt	ok	
6.6	Sättigungsmessung stellt Plot korrekt dar	ok	Achsbeschriftung anpassen
6.7	RAKR-Messung wird mit eingegebenen Parametern durchgeführt	ok	
6.8	RAKR-Messung stellt Plot korrekt dar	ok	Achsbeschriftung anpassen
6.9	Anisotropiemessung wird mit eingegebenen Parametern durchgeführt	ok	
6.10	Anisotropiemessung stellt Plot korrekt dar	ok	Kreisdiagramm ist erst nach vielen Messwerten erkennbar
6.11	Messung bricht mit Messung stoppen ab	ok	
6.12	Messumbau kann abgebrochen werden, ohne Bewegung Quelle und Roboter	ok	
6.13	Messstatus ist korrekt und hilfreich um die Restdauer einzuschätzen	ok	Messzeit des Messpunktes könnte hilfreich sein
7.	Auswertung	ok	
7.1	vollständige Kalibrierung einer bekannten ^{192}Ir-Quelle führt zu korrektem Wert	ok	Abweichung RAKR max. 0,2 %, radiale Anisotropie 0,2 %
7.2	vollständige Kalibrierung einer bekannten ^{60}Co-Quelle ergibt den korrektem Wert	ok	Abweichung RAKR max. 0,2 %, radiale Anisotropie 0,2 %
7.3	vollständige Kalibrierung einer bekannten Schachtkammer ergibt den korrekten Kalibrierfaktor	ok	Abweichung max. 0,2 %

Tabelle A.2: Testprotokoll Teil 2

A.7 Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)

A.7.1 Messunsicherheit der Kalibrierung einer ^{192}Ir-Quelle

Größe	Wert	Standmess-unsicherheit	c_i	Unsicherheits-beitrag	Index
k_{aniso}	1,00	0,29 %	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$22 \cdot 10^{-6}$ Gy/h	5,7 %
$RAKR_{800}$	$7,512 \cdot 10^{-3}$ Gy/h	1,3 %			
$RAKR_{1000}$	$7,506 \cdot 10^{-3}$ Gy/h	1,3 %			
$RAKR_{1200}$	$7,510 \cdot 10^{-3}$ Gy/h	1,3 %			
$RAKR_{1400}$	$7,510 \cdot 10^{-3}$ Gy/h	1,3 %			
$RAKR_{1600}$	$7,510 \cdot 10^{-3}$ Gy/h	1,3 %			
I_{800}	$0,1143 \cdot 10^{-9}$ A	$1,6 \cdot 10^{-6}$ %	$13 \cdot 10^{6}$	$24 \cdot 10^{-12}$ Gy/h	0,0 %
I_{off}	$0,96 \cdot 10^{-15}$ A	100 %	$-0,16 \cdot 10^{9}$	$0,16 \cdot 10^{-6}$ Gy/h	0,0 %
$k_{abst800}$	1,0086	0,7 %	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$11 \cdot 10^{-6}$	1,3 %
$k_{\rho 800}$	1	0,2 %	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-6}$	0,1 %
N	$25,166 \cdot 10^{3}$	1,1 %	$0,3 \cdot 10^{-6}$	$84 \cdot 10^{-6}$ Gy/h	86,0 %
d_{800}	800 mm	$25 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$0,75 \cdot 10^{-6}$	0,0 %
d_{off}	3,294 mm	12 %	$-13 \cdot 10^{-6}$	$-5,3 \cdot 10^{-6}$ Gy/h	0,3 %
$k_{Zerfall}$	1,133	$2,9 \cdot 10^{-3}$ %			
k_{sat}	1	0,1 %	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$ Gy/h	0,7 %
I_{1000}	$72,83 \cdot 10^{-12}$ A	$2,5 \cdot 10^{-6}$ %	$21 \cdot 10^{6}$	$38 \cdot 10^{-12}$ Gy/h	0,0 %
$k_{abst1000}$	1,01004	0,7 %	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$11 \cdot 10^{-6}$ Gy/h	1,3%
$k_{\rho 1000}$	1	0,2 %	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-6}$	0,1 %
d_{1000}	1000 mm	$20 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$0,6 \cdot 10^{-6}$	0,0 %
I_{1200}	$50,46 \cdot 10^{-12}$ A	$3,7 \cdot 10^{-6}$ %	$30 \cdot 10^{6}$	$55 \cdot 10^{-12}$ Gy/h	0,0 %
$k_{abst1200}$	1,01220	0,7 %	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$11 \cdot 10^{-6}$ Gy/h	1,3%
$k_{\rho 1200}$	1	0,2 %	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-6}$	0,1 %
d_{1200}	1200 mm	$17 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	0,0 %
I_{1400}	$36,98 \cdot 10^{-12}$ A	$5,0 \cdot 10^{-6}$ %	$41 \cdot 10^{6}$	$75 \cdot 10^{-12}$ Gy/h	0,0 %
$k_{abst1400}$	1,01400	0,7 %	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$11 \cdot 10^{-6}$ Gy/h	1,3%
$k_{\rho 1400}$	1	0,2 %	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-6}$	0,1 %
d_{1400}	1400 mm	$14 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$0,43 \cdot 10^{-6}$	0,0 %
I_{1600}	$28,24 \cdot 10^{-12}$ A	$6,5 \cdot 10^{-6}$ %	$53 \cdot 10^{6}$	$98 \cdot 10^{-12}$ Gy/h	0,0 %
$k_{abst1600}$	1,01580	0,7 %	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$11 \cdot 10^{-6}$ Gy/h	1,3%
$k_{\rho 1600}$	1	0,2 %	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-6}$	0,1 %
d_{1600}	1600 mm	$12 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$0,38 \cdot 10^{-6}$	0,0 %
t	13,322 d	$15 \cdot 10^{-3}$ %	$71 \cdot 10^{-6}$	$0,14 \cdot 10^{-6}$ Gy/h	0,0 %
T_{HWZ}	73,8270 d	$18 \cdot 10^{-3}$	$-13 \cdot 10^{-6}$	$-0,17 \cdot 10^{-6}$ Gy/h	0,0 %
$RAKR$	$7,5096 \cdot 10^{-3}$ Gy/h			$90,7 \cdot 10^{-6}$ Gy/h	(1,2 %)

Tabelle A.3: Messunsicherheit der Kalibrierung einer ^{192}Ir-Quelle

A.7.2 Messunsicherheit der Kalibrierung einer Schachtionisationskammer mit einer ^{192}Ir-Quelle

Größe	Wert	Standmess-unsicherheit	c_i	Unsicherheits-beitrag	Index
$RAKR_{Ir}$	$6,34 \cdot 10^{-3}$ Gy/h	1,2 %			
$RAKR_{Ir0}$	$7,51 \cdot 10^{-3}$ Gy/h	1,2 %	$62 \cdot 10^{6}$	$5,6 \cdot 10^{3}$ Gy/(Ah)	91,8 %
t_{Ir}	18 d	$11 \cdot 10^{-3}$ %	$-4,4 \cdot 10^{3}$	-8,8 Gy/(Ah)	0,0 %
T_{IrHWZ}	73,827 d	$18 \cdot 10^{-3}$ %	$1,1 \cdot 10^{3}$	14 Gy/(Ah)	0,0 %
I_{Ir}	$13,598 \cdot 10^{-9}$ A	$58 \cdot 10^{-3}$ %	$-34 \cdot 10^{12}$	-270 Gy/(Ah)	0,2 %
I_{IrLS}	0,0 A	$5,8 \cdot 10^{-15}$ A	$34 \cdot 10^{12}$	0,20 Gy/(Ah)	0,0 %
$k_{IrSätt}$	1	$58 \cdot 10^{-3}$ %	$-0,47 \cdot 10^{6}$	-270 Gy/(Ah)	0,2 %
$k_{\rho Ir}$	1	0,20 %	$-0,47 \cdot 10^{6}$	-930 Gy/(Ah)	2,5 %
k_{aniso}	1	0,29 %	$0,47 \cdot 10^{6}$	$1,3 \cdot 10^{3}$ Gy/(Ah)	5,2 %
N_{Ir}	$0,46639 \cdot 10^{6}$ Gy/(Ah)		$5,88 \cdot 10^{3}$ Gy/(Ah)		(1,3 %)

Tabelle A.4: Messunsicherheit einer Kammerkalibrierung mit einer ^{192}Ir-Quelle

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei der Erarbeitung meiner Masterarbeit unterstützt haben. Zuerst möchte ich mich bei Prof. Dr. rer nat. Schilling und bei apl. Prof. Dr. rer. nat Ludwig von der Technischen Universität Braunschweig für die Betreuung und Beurteilung meiner Masterarbeit bedanken.
Ich danke dem Fachbereich 6.3 der PTB für die Unterstützung meiner Arbeit. Ich bedanke mich für das Korrekturlesen meiner Arbeit und die konstruktive Kritik. Im speziellen möchte ich mich bei meinen Kollegen Björn Reinelt und Felix Lehner für die vielen gemeinsamen Stunden vor dem Rechner bei der Fehlersuche bedanken. Angelika Kasper und Phil Brüggemann möchte ich für die vielen Testmessungen mit dem Messstand danken. Zusätzlich möchte ich Angelika, Phil, meiner Familie und meinem Freund für den emotionalen Beistand und Rückhalt während der stressigen Phasen und meinem gesamten Studium danken. Alle Worte des Dankes reichen nicht aus, um zu beschreiben, wie viel Unterstützung ich während meines Studiums erfahren durfte. Danke!



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Nationales Metrologieinstitut

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Telefon: (0531) 592-93 21
Fax: (0531) 592-30 08
E-Mail: presse@ptb.de
www.ptb.de

Vertrieb:
Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH

Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen

Telefon: (04 21) 369 03-0
Fax: (04 21) 369 03-63
www.schuenemann-verlag.de