



Bundesamt
für Strahlenschutz

Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz

Aufbau und Charakterisierung eines Referenzfeldes zur
Sicherstellung des Strahlenschutzes an Beschleunigeranlagen
in Medizin und Forschung und zur Prüfung und Kalibrierung
entsprechender Messgeräte

Vorhaben 3619S22364

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

H. Zutz
J. Busse
O. Hupe

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz,
nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) und im Auftrag des Bundesamtes
für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMUV (Ressortforschungsplan) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

Impressum

Bundesamt für Strahlenschutz
Postfach 10 01 49
38201 Salzgitter

Tel.: +49 30 18333-0

Fax: +49 30 18333-1885

E-Mail: ePost@bfs.de

De-Mail: epost@bfs.de-mail.de

www.bfs.de

BfS-RESFOR-220/24

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:

urn:nbn:de:0221-2024040842847

Salzgitter, April 2024

Aufbau und Charakterisierung eines Referenzfeldes zur Sicherstellung des Strahlenschutzes an Beschleunigeranlagen in Medizin und Forschung und zur Prüfung und Kalibrierung entsprechender Messgeräte

H. Zutz, J. Busse, O. Hupe

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung der Auftraggeberin übereinstimmen.

1. Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projekts 3619S22364 sollte an der PTB in Braunschweig ein Referenzfeld zur Sicherstellung des Strahlenschutzes an Beschleunigeranlagen in Medizin und Forschung und zur Prüfung und Kalibrierung entsprechender Messgeräte aufgebaut werden.

Dem Umweltministerium obliegt die Bundesaufsicht nach Art. 85 GG über den Vollzug des Strahlenschutzrechts durch die Länder. In diesem Rahmen ergibt sich die Notwendigkeit, für moderne Beschleunigeranlagen und deren zunehmenden Einsatz in Wissenschaft, Technik und Medizin einen adäquaten Strahlenschutz zu gewährleisten, der den normativen Anforderungen der Personendosimetrie in Deutschland entspricht. Dosimetrische Messungen an diesen Anlagen erfolgen momentan mit Ortsdosimetern, deren Eignung für diese hochenergetischen und gepulsten Strahlungsfelder nicht adäquat und standardisiert geprüft werden kann. Hintergrund ist das bisherige Fehlen von geeigneten Referenzfeldern für die Prüfung von Ortsdosimetern für die beschriebenen Anwendungsfälle. Daher ist der Aufbau von Referenzstrahlungsfeldern notwendig, welche reproduzierbare und rückführbare Messungen sowie Tests für die Entwicklung und Überprüfung von dosimetrischen Systemen erlauben.

Ziel des Vorhabens ist es, mit einer kosteneffektiven Methode ein validiertes, rückgeführtes, beschleunigerbasiertes, hochenergetisches, gepulstes Referenzstrahlungsfeld zu entwickeln.

Das Nutzstrahlungsfeld einer medizinischen Linearbeschleunigeranlage ist in der Regel durch sehr hohe mittlere Dosisleistungen ausgezeichnet. Für die Sicherstellung des Strahlenschutzes an diesen Anlagen sind allerdings abgeschirmte Felder mit signifikant reduzierteren Dosisleistungen messtechnisch zu charakterisieren und auf ihre Grenzwerteinhaltung hin zu überprüfen. Dementsprechend muss die Dosisleistung der Beschleuniger durch geeignete Abschirmungen auf ein Niveau reduziert werden, welches hinter (schwachen) Abschirmungen zu erwarten ist. Für die Art der Abschirmung sollen verschiedene Varianten untersucht werden.

Für die kosteneffektive Realisierung soll das Referenzfeld an einer der vorhandenen Beschleuniger-Anlagen der PTB aufgebaut werden. Da diese Anlagen auch für weitere metrologische Aufgaben und Dienstleistungen verwendet werden, ist eine wesentliche Vorgabe, dass diese Modifikation sehr flexibel und schnell auf- und abbaubar sein muss. Idealerweise wird auf vorhandene Abschirmungen zurückgegriffen.

Zur Auswahl geeigneter Abschirmungen sollen vereinfachte Geometrien per Monte-Carlo Simulation simuliert und mögliche Aufbauorte messtechnisch untersucht werden. Für die finale Realisierung sollen die Komponenten des Strahlungsfeldes (Photonen, Elektronen und Neutronen) hinsichtlich ihres Spektrums mittels Simulationen und Messungen charakterisiert werden.

Die Dosimetrie im neuen Referenzstrahlungsfeld soll rückführbar auf die nationalen Primärnormale der PTB sein und eine validierte Charakterisierung von Prüflingen erlauben.

2. Voraussetzungen, unter denen das FE-Vorhaben durchgeführt wurde

Der Aufbau des Referenzstrahlungsfeldes basiert auf Vorarbeiten zum Streustrahlungsfeld an den medizinischen Beschleunigeranlagen der PTB [1] sowie Erkenntnissen aus Empfehlung der Strahlenschutzkommission zur Strahlenschutzdosimetrie in hochenergetischen Photonenfeldern [2].

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde in 4 Arbeitspakete (AP) aufgeteilt: In AP1 wird der relevante Stand von Wissenschaft und Technik zusammengetragen und als interner Zwischenbericht zusammengefasst, da kein relevanter Stand der Technik identifiziert werden konnte, wurde auf eine Veröffentlichung zu Gunsten einer Fachveröffentlichung verzichtet. Im weiteren Verlauf des Projekts werden dann die erzielten Ergebnisse ergänzt und veröffentlicht.

In AP2 erfolgt ausgehend von vereinfachten (Abschirmungs-) Geometrien die Simulation von Photonen-, Elektronen- und evtl. Neutronenspektren für verschiedene Realisierungsmöglichkeiten des Referenzfeldes. Basierend auf diesen Ergebnissen werden Anforderungen an die finale Geometrie entwickelt, welche in AP3 realisiert werden soll. Erkenntnisse aus der Realisierung fließen wiederum in die detaillierte Simulationsgeometrie in AP2 ein. Das Referenzfeld wird dann in AP4 durch Messungen und Vergleich mit den Simulationsergebnissen der detaillierten Geometrie validiert und die entsprechenden Konversionskoeffizienten bestimmt.

4. wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die PTB verfügt über umfangreiche Erfahrungen mit dem Aufbau von Referenzstrahlungsfeldern. Unter anderem wurde ein Referenzfeld für gepulste Photonenstrahlung mit Photonenenergien im Bereich der medizinischen Diagnostik realisiert [3].

International werden die Anforderungen an Referenzstrahlungsfelder für Photonenstrahlung in ISO-Normen festgeschrieben [4, 5, 6, 7]. Die PTB hat an der jüngsten Überarbeitung der Normenreihe maßgeblich mitgewirkt und auch die Projektleitung innegehabt. Die zusätzlichen Anforderungen an gepulste Strahlungsfelder [8] wurden ebenfalls von der PTB federführend entwickelt.

Die internationalen Anforderungen an Dosimeter zur Messung in gepulsten Feldern ionisierender Strahlung werden in IEC Normen festgelegt und wurden ebenfalls unter Projektleitung der PTB entwickelt [9, 10].

Aus vorangegangenen Arbeiten zum Strahlenschutz an Beschleunigern im Rahmen einer SSK-Arbeitsgruppe lagen Einschätzungen zu typischen Dosisleistungen hinter schwachen Abschirmungen an medizinischen Beschleunigeranlagen vor [2].

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

Die Arbeiten in diesem Projekt fanden im Wesentlichen in der Abteilung 6 der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig statt.

6. Erzielte Ergebnisse

Auswahl der Realisierungsoptionen

Beschleuniger im Glocker-Bau der PTB

Im Glocker-Bau der PTB sind drei Linearbeschleuniger untergebracht, welche als Quelle für das Referenzfeld dienen könnten. Zum Zeitpunkt der Projektdurchführung waren dies zwei ELEKTA Precise Treatment System (6 MV, 10 MV und 15 MV sowie 4 MV, 8 MV und 25 MV, Puls wiederholte Frequenz bis 400 Hz, Pulsdauer etwa 3 μ s) und ein ACCEL Forschungsbeschleuniger (bis 50 MV). In Abbildung 1 ist ein Schema des Glocker-Baus dargestellt.

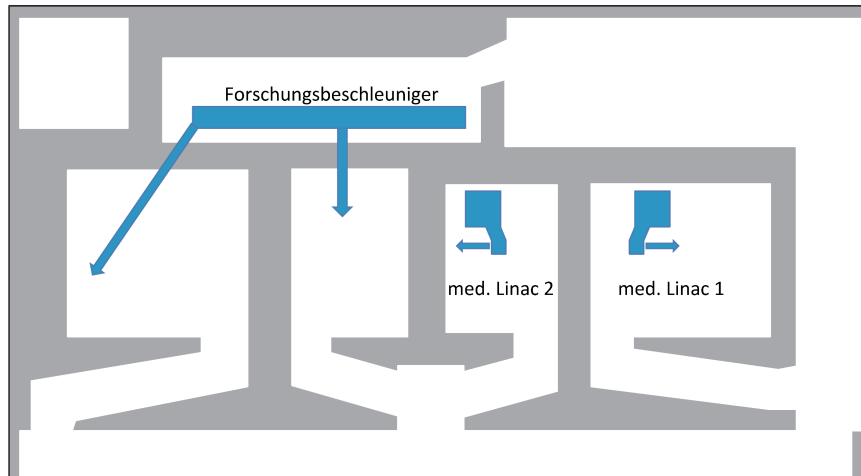


Abbildung 1 Schematischer Grundriss des Glocker-Baus mit drei Beschleunigern. Im Raum ganz rechts steht der erste medizinische Linearbeschleuniger, im Raum links daneben der zweite. Der Elektronenbeschleuniger steht im Raum am oberen Bildrand und verfügt über Strahlrohre in die beiden linken Bestrahlungsräume.

Es gilt Orte im Gebäude zu identifizieren, an denen dann das Referenzfeld aufgebaut werden könnte. Für das Feld ist es notwendig die Dosisleistung des Primärstrahls so abzuschwächen, dass Dosisleistungen erreicht werden, wie sie für schwache Abschirmungen gemessen wurden [2]. Diese Reduzierung der Dosisleistung kann durch vorhandene, schwache, Abschirmungen oder neue, zusätzliche, Abschirmungen im Beschleunigerraum realisiert werden. Alternativ kann die Dosisleistung des Beschleunigers direkt reduziert werden – dies ist nur eine Option für den Forschungsbeschleuniger.

Im Rahmen des Projektes wurden mehrere Orte im Glocker-Bau auf ihre Eignung geprüft. Die Erhebungsmessungen erfolgten mit NDT-Filmen der Firma DÜRR welche in der Regel in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung (non-destructive testing) zur Bildgebung eingesetzt werden.

Die Wände in Strahlrichtung des ersten medizinischen Linearbeschleunigers (med. Linac) sind in Strahlrichtung mit Barytbeton verstärkt. Durch die signifikant höhere Dichte wird eine sehr gute Abschirmung des Beschleunigerraumes zu den Seiten erreicht. Somit fallen diese Orte als Messort aus.

Über den Beschleunigern

Die Decken der Bestrahlungsräume sind weniger massiv ausgeführt, so dass oberhalb der Beschleuniger potenziell gemessen werden könnte. Die Ergebnisse der orientierenden Messungen oberhalb des med. Linac 1 sind in Abbildung 2 dargestellt. Das Feld ist oberhalb der Decke des Raumes auf den NDT-Filmen erkennbar. Allerdings liegt der Feldaustritt im Bereich der Lüftungsanlage des Gebäudes. Im Beschleunigerraum befinden sich im Strahlbereich ebenfalls Lüftungskanäle, welche für eine unbestimmte und inhomogene Abschirmung des Strahlungsfeldes sorgen.

Die Messungen auf der Decke sind logistisch schwierig, da der zusammenhängende Dachbereich vor jeder erneuten Inbetriebnahme einer der drei Beschleuniger aus Strahlenschutzgründen abgesucht werden muss. Dieser Vorgang muss durch Drücken mehrerer Absuchtaster in der richtigen Reihenfolge bestätigt werden. Ein Betreten des Dachraumes während des Betriebs von auch nur einem der drei Beschleuniger ist nicht gestattet. Diese Messplätze sind somit für ein Referenzfeld ungeeignet.

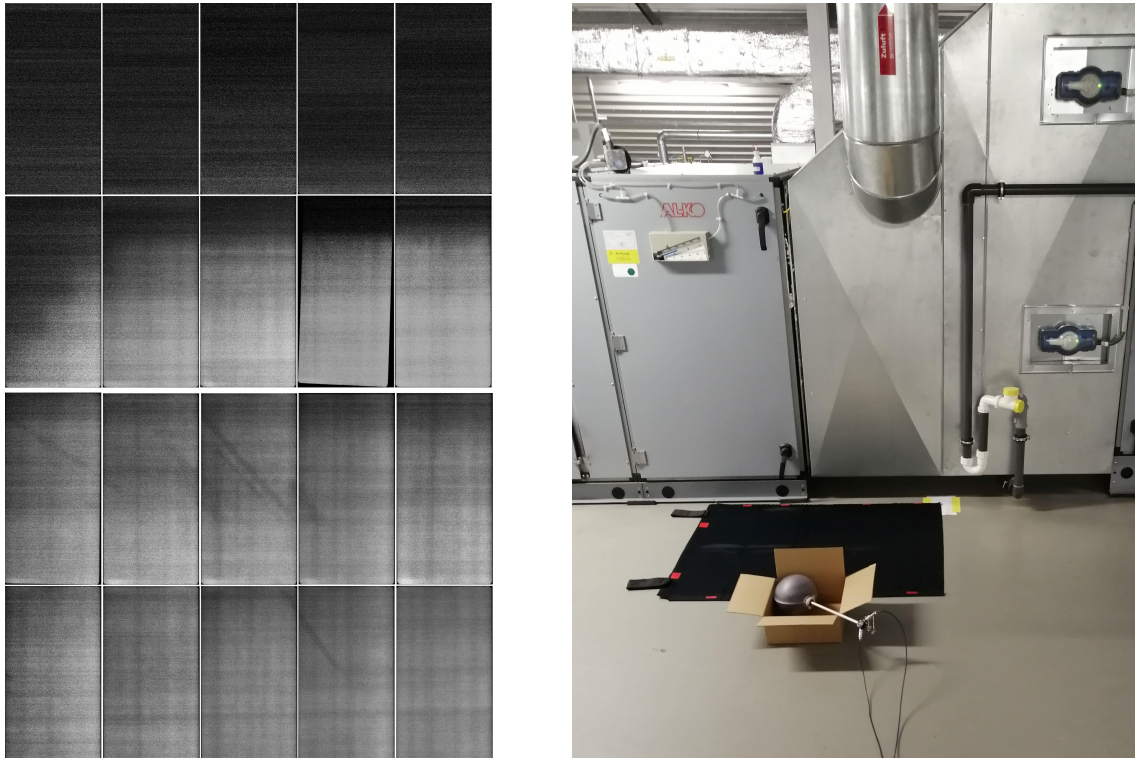


Abbildung 2 Links: Aus zwei Aufnahmen mit je zehn NDT-Filmen zusammengefügte Übersicht des Strahlungsfeldes oberhalb des med. Linac 1 (15 MV-Einstellung, Feldgröße 40 cm x 20 cm im Isozentrum, Strahlrichtung an die Decke). Die Kontur des Strahlungsfeldes ist als hellere Fläche erkennbar. Rechts: Foto des Aufbaus auf der Decke: NDT-Filme in schwarzer Tasche und HS01-H*(10)-Ionisationskammer im Vordergrund. Im Hintergrund Teile der Lüftungsanlage.

Der Forschungsbeschleuniger

Als zweite Realisierungsoption wurde die direkte Reduzierung der Dosisleistung am Forschungsbeschleuniger (Beschleunigungsspannung bis 50 MV) evaluiert. Dabei wird der primäre Elektronenstrahl auf ein Bremsstrahlungstarget gelenkt und erzeugt dort Röntgenstrahlung. Die Intensität des Elektronenstrahls lässt sich durch Blendensysteme und gezielte Defokussierung vor Ablenkung in den Bestrahlraum (linker Raum in Abbildung 1) so weit reduzieren, dass Dosisleistungen im gewünschten Bereich erzeugt werden. Trotzdem ist für eine realistische Darstellung der Strahlungsfelder welche Sachverständige beim Vor-Ort-Einsatz vorfinden, eine zusätzliche Betonabschirmung zur Filterung und Abschwächung der Strahlungsfelder notwendig. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse (siehe Abbildung 3) wäre eine Realisierung nur mit einer Modifikation am Strahlrohr möglich. Diese Modifikationen gefährden die weiteren metrologischen Experimente am Forschungsbeschleuniger. Somit wurde auch dieser Ansatz während der Projektlaufzeit nicht weiterverfolgt.

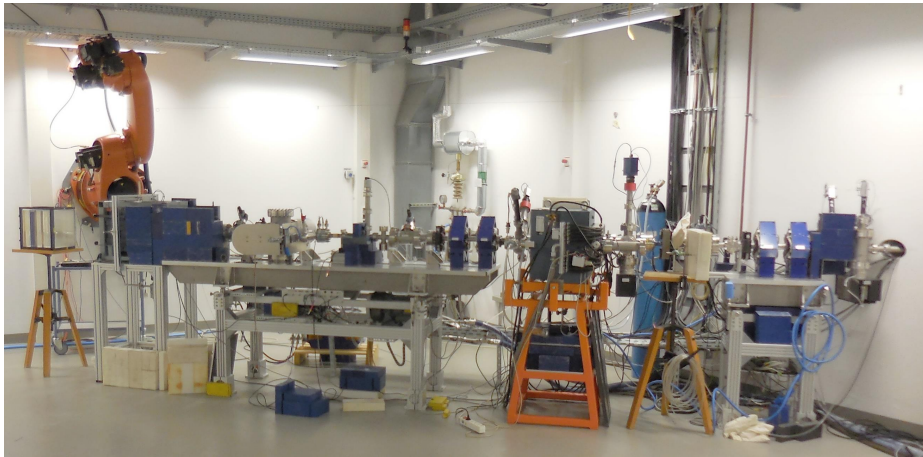


Abbildung 3 Das Hochenergiestrahlrohr des Forschungsbeschleunigers tritt rechts in den Bestrahlraum ein und endet in der linken Bildhälfte in einem Kollimator. Davor steht ein Phantom auf einem Dreibein.

Der benachbarte Bestrahlraum

Die dritte untersuchte Realisierungsoption war ein Messort im Bestrahlraum des niederenergie-Strahlrohres des Forschungsbeschleunigers. Dieser Raum ist durch eine 2 m dicke Wand aus Normalbeton vom Bestrahlraum des med. Linac 2 getrennt. Diese 2 m Wand stellt eine hinreichend schwache Strahlenschutzwand dar, wenn der med. Linac 2 auf diese Wand gerichtet wird (Abbildung 4). Die Wand dient im Normalbetrieb nur zur Abschirmung der Streustrahlung, während der Primärstrahl in die entgegengesetzte Richtung orientiert ist und dort entsprechende Experimente aufgebaut sind. In Primärstrahlrichtung befindet sich eine entsprechende Barytbetonwand.

Auch an diesem Messort wurden erste Erhebungsmessungen mit einer $H^*(10)$ -Ionisationskammer und NDT-Filmen durchgeführt (Abbildung 5). Die Ergebnisse der NDT-Filmaufnahmen sind in Abbildung 6 dargestellt. Es stellte sich heraus, dass die Feldmitte nahe an einem Kabelkanal liegt. Dieser Kanal wurde versetzt und eine weitere NDT-Filmaufnahme angefertigt (Abbildung 6 rechts).

Die Größe des Strahlungsfeldes entspricht dabei jeweils den Erwartungen nach Strahlensatz. Für den Beschleuniger werden die Feldgrößen immer im sogenannten Isozentrum definiert. Das Isozentrum ist der Drehpunkt des Beschleunigerkopfes und gleichzeitig Bezugspunkt für die Feldgrößen und Dosisangaben des Beschleunigers. Es hat bei den verwendeten Beschleunigern einen Abstand von 1 m vom Ursprung des Strahlungsfeldes (Bremsstrahlungstarget im Beschleunigerkopf). Ein Feld von 1 cm x 1 cm im Isozentrum des Beschleunigers ergibt somit ein Feld von 5 cm x 5 cm an der Rückseite der Wand: 1 m Abstand Fokus zum Isozentrum + 2 m Abstand Isozentrum zur Wand + 2 m Dicke der Wand ergibt einen Gesamtabstand von 5 m.

Die NDT-Filmaufnahmen lassen erkennen, dass das Strahlungsfeld auch nach Durchgang durch die 2 m Wand hinreichend homogen und gut begrenzt ist. Die Streuung in der Wand führt nicht zu einer signifikanten Verbreiterung des Strahlungsfeldes.

Bei den Messungen mit den NDT-Filmen wurde beobachtet, dass die Abbildung auf den Filmen deutlich schwächer wird, wenn die Filme frei in Luft bestrahlt werden, also zum Beispiel etwas Abstand zur Wand haben. Dies ist vermutlich dadurch zu erklären, dass die Filme insbesondere auf niederenergetische Photonen und Elektronen ansprechen. Diese Anteile nehmen aufgrund der Absorption durch die Luft mit zunehmendem Abstand schnell ab. Mittels einer entsprechenden Aufbauplatte aus zum Beispiel 25 mm PMMA können auch Aufnahmen in einem größeren Abstand angefertigt werden. Dies wurde ausgenutzt, um die exakte Lage des Strahlungsfeldes im Raum zu bestimmen und an den Wänden zur späteren Referenzierung zu kennzeichnen.

Aufgrund der guten Zugänglichkeit und der erreichten mittleren Dosisleistungen im Bereich bis etwa 200 $\mu\text{Sv/h}$ wurde diese Realisierungsmöglichkeit weiterverfolgt und der Messort ausführlich qualifiziert.

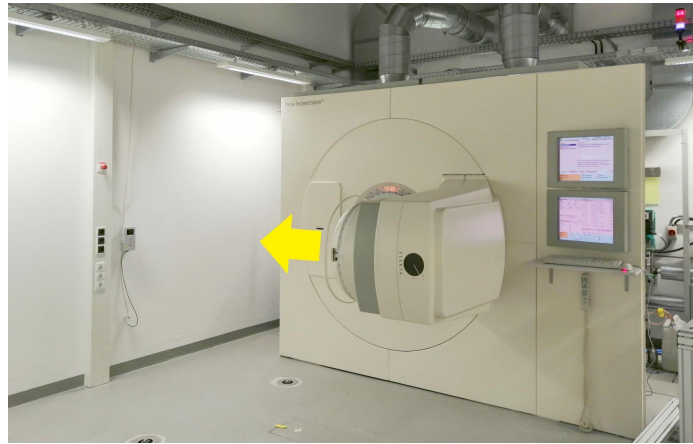


Abbildung 4 Medizinischer Linearbeschleuniger im Glocker-Bau (ELEKTA Precise) mit Strahlrichtung (gelber Pfeil) nach links.

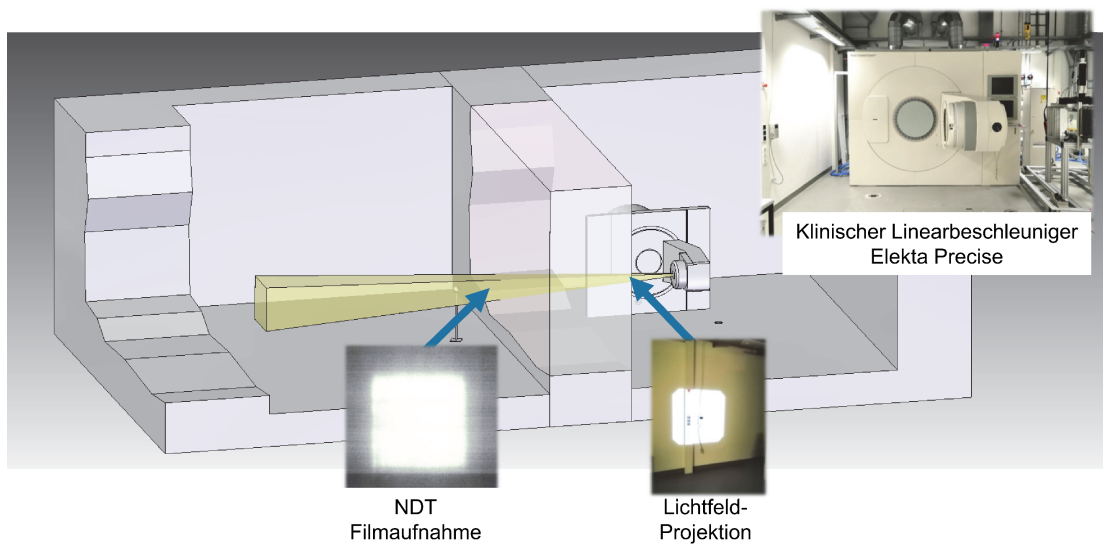


Abbildung 5 Schematische Darstellung der Positionen bei den NDT-Filmaufnahmen. Der Beschleuniger rechts strahlt auf die Wand. Das Strahlungsfeld ist als Lichtfeldprojektion sichtbar gemacht. Auf der Rückseite der Wand visualisiert die NDT-Filmaufnahme das Strahlungsfeld.

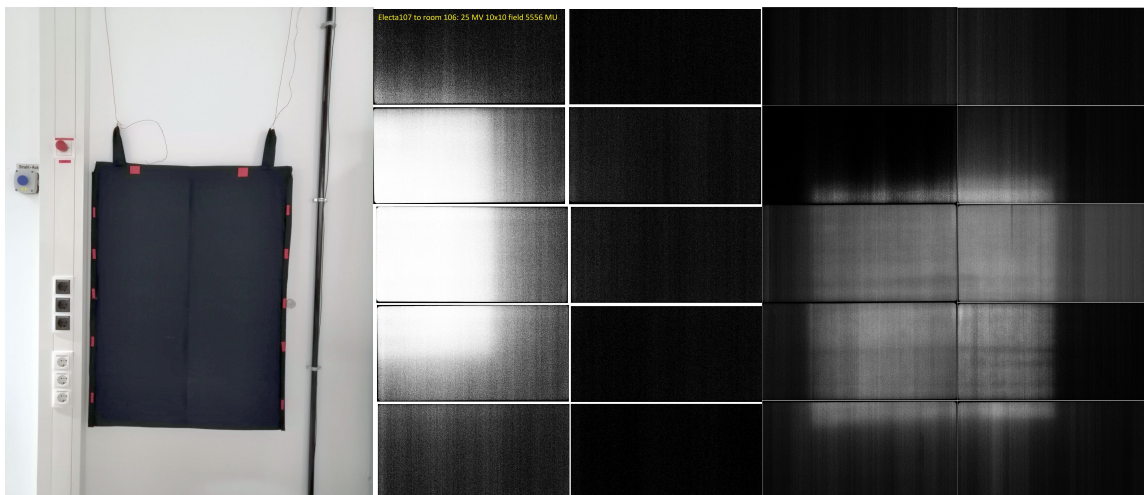


Abbildung 6 Links: NDT-Filme an der Rückseite der Wand auf welche der Beschleuniger in Abbildung 4 gerichtet ist. Mitte: Ergebnisse der NDT-Filme: Es ist das Strahlungsfeld erkennbar (25 MV-Einstellung, Feldgröße 10 cm x 10 cm im Isozentrum). Die Größe entspricht den Erwartungen nach Strahlensatz. Rechts: Ergebnisse der NDT-Filme nach Versetzen des Kabelkanals und optimierter Positionierung.

Messplatz für höhere Dosisleistungen

Höhere mittlere Dosisleistungen können nur mit einer Abschirmung erreicht werden, welche dünner als die vorhandene 2 m Betonwand ist. Eine Modifikation dieser Wand ist aus Strahlenschutzgründen nicht zulässig, weshalb weitere Möglichkeiten untersucht wurden. Die notwendigen Abschirmdicken wurden experimentell untersucht in dem der Nutzstrahl durch eine variable Anzahl von Betonsteinen (50 cm x 40 cm x 25 cm, vermutlich Barytbeton) abgeschwächt wurde. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 7 dargestellt und wurde an beiden med. Linacs verwendet.

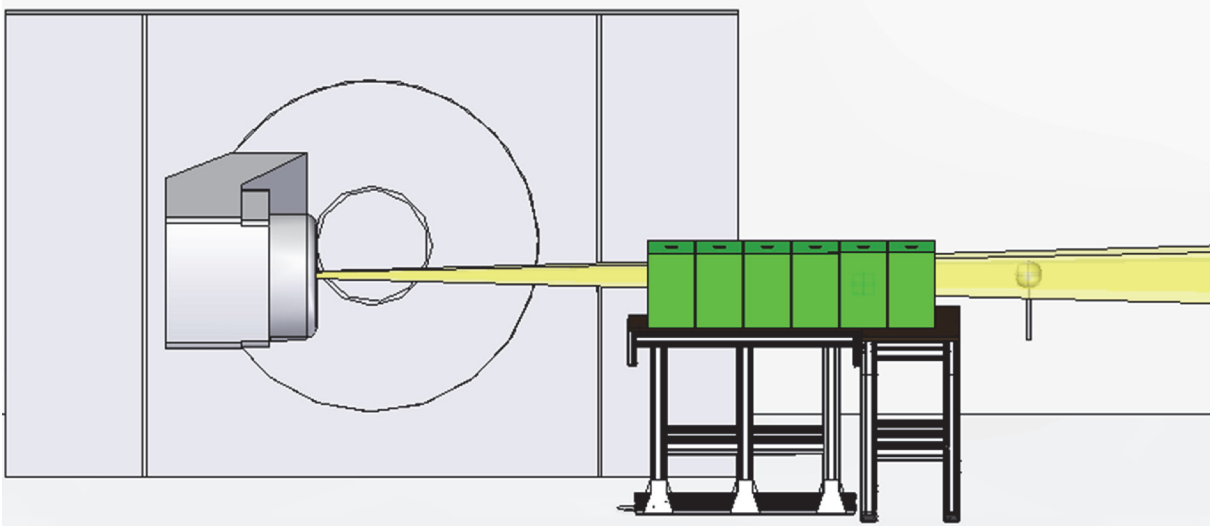


Abbildung 7 Schematische Darstellung des Aufbaus für eine variable Abschirmung von Betonsteinen.

Die Bestimmung der Dosisleistung erfolgte mit einer 1 Liter- $H^*(10)$ -Ionisationskammer sowie einer kleinen Farmerkammer (Luftkerma). Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit und zum Ausgleich von Schwankungen der Beschleunigerleistung wurden die Daten auf eine Beschleunigerdosisabgabe von 500 MonitorUnits (MU) pro Minute normiert. Es ist erkennbar, dass die Dosisleistung erstmal wie erwartet mit der Anzahl der Betonsteine abnimmt. Ab etwa 5 Betonsteinen stellt sich ein sättigungsartiger Effekt ein. Dieser Effekt wird durch die zusätzliche Streustrahlung erklärbar, welche in den Betonsteinen erzeugt wird und ebenfalls die Messkammern erreicht. Ab einer gewissen Dicke der primären Abschirmung dominiert der Streustrahlungsanteil das Messsignal. Dies wird auch auf NDT-Film Aufnahmen sichtbar, welche zwischen den Betonsteinen bestrahlt wurden (Abbildung 9).

Für den Einsatz als Referenzfeld ist dieser Ansatz nur geeignet, wenn die Streustrahlung entsprechend abgeschirmt werden kann. Dazu wurde eine entsprechende Geometrie (Abbildung 10) entworfen und mittels Monte-Carlo Simulationen (siehe Abschnitt Simulation mit GEANT4) rechnerisch auf ihre Eignung geprüft.

Die Ergebnisse der Monte-Carlo Simulationen für verschiedene Seitenwanddicken und Hohlraumgrößen (Abbildung 11) zeigen, dass eine seitliche Abschirmung den Anteil der Streustrahlung signifikant reduziert. Dies erkennt man gut durch den Vergleich der Datenpunkte für eine Vorbaudicke von 2000 mm Beton: Schon bei einer Dicke der Seitenwand von 100 mm ist der Anteil der Dosis vernachlässigbar. Bei geringeren Vorbaudicken steigt der Anteil der Streustrahlung an der Photonendosis im Inneren, da der Ort der Erzeugung näher am Messort liegt. Kleinere Hohlraumgrößen haben an höheren Anteil an Streustrahlung.

Dosisleistungsmessung hinter variablen Abschirmungen

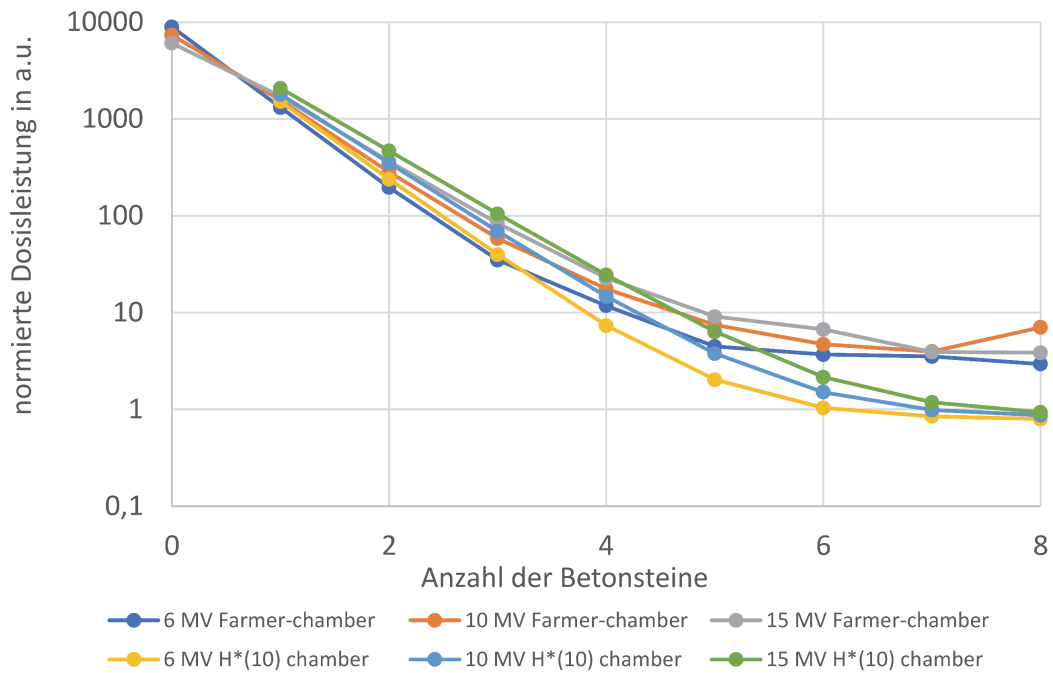


Abbildung 8 Ergebnisse der Messungen bei verschiedenen Beschleunigerenergien mit $H^*(10)$ -Kammer und Farmerkammer für eine variable Anzahl an Betonsteinen vor den Kammern. Die Dosisleistung ist auf eine Beschleunigerleistung von 500 MonitorUnits (MU) pro Minute normiert. Die Dosisleistung nimmt mit Anzahl der Betonsteine ab. Ab 5 Betonsteinen ist keine Abnahme mehr messbar, es kommt zu einem sättigungsartigen Verlauf.

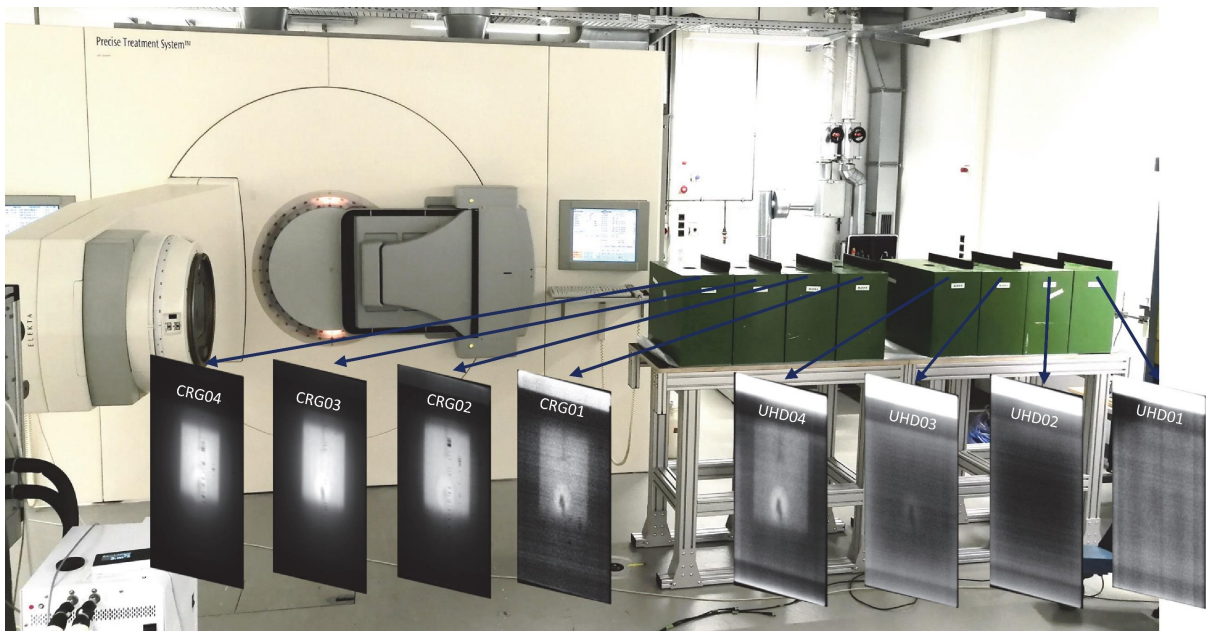


Abbildung 9 Montage der NDT-Filmaufnahmen zwischen den Betonsteinen in ein Foto des Aufbaus. Auf den Filmen nahe des Beschleunigerkopfes (links) ist das Strahlungsfeld klar erkennbar. Das Abbild des Primärstrahls wird dann unschärfer bis auf dem letzten Film scheinbar am Rand mehr Dosis gemessen wurde als im Zentrum.

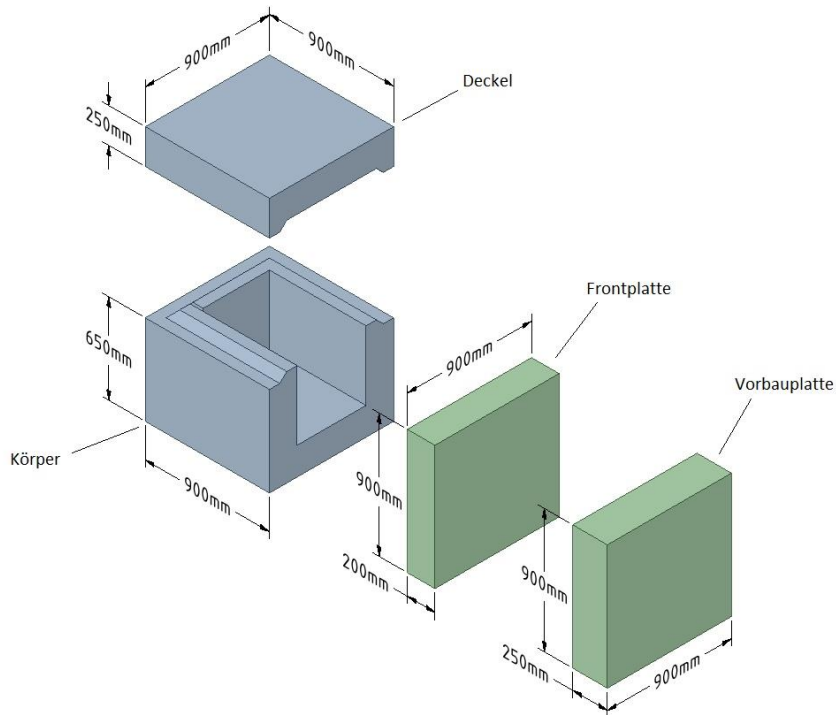


Abbildung 10 Entwurf einer Abschirmbox mit variabler Abschirmung des Nutzstrahls. Die Anzahl der Vorbauplatten kann variiert werden und somit die mittlere Dosisleistung im inneren gezielt reduziert werden.

Relative Photonendosis für verschiedene Hohlräume ohne Primärstrahldosis

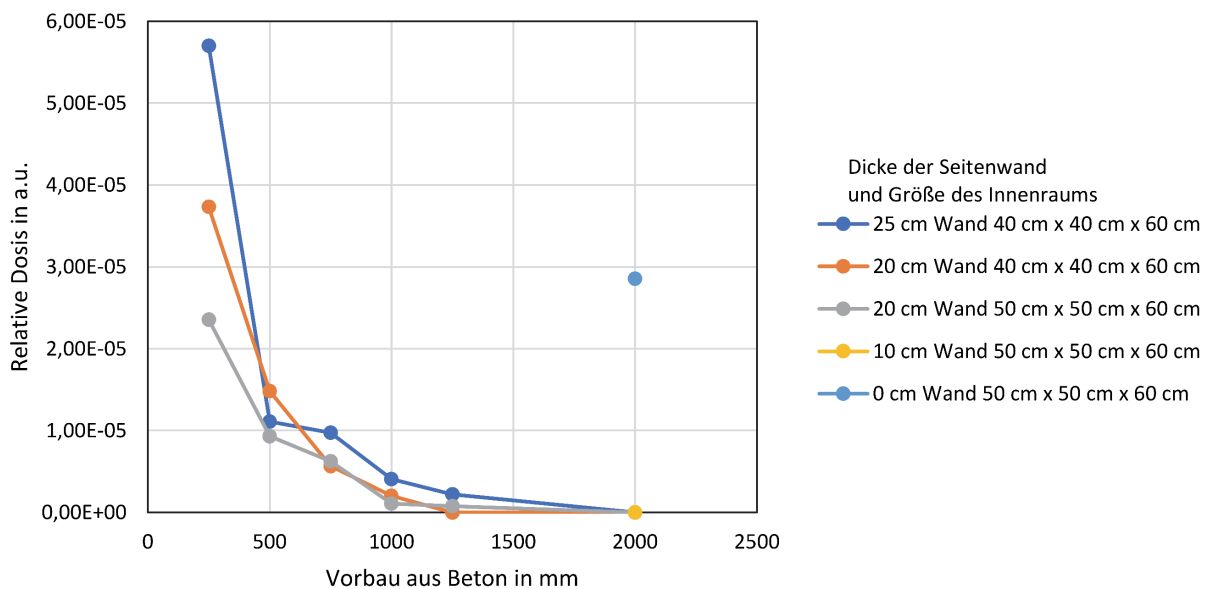


Abbildung 11 Ergebnisse der Monte-Carlo Simulation der Abschirmbox. Simuliert wurde der Strahlungstransport vom Beschleunigerkopf in die Abschirmbox. Für die Dosisbestimmung wurden nur Anteile berücksichtigt, welche nicht durch den Primärstrahl aus der Frontplatte kamen. Die Rechnungen wurden für verschiedene Seitenwanddicken und Hohlraumvolumina durchgeführt.

Prinzipiell ist dieser Aufbau realisierbar, allerdings hat die Abschirmbox, da sie aus Barytbeton gefertigt werden müsste, ein hohes Gewicht (je nach Anzahl der Vorbauschichten von mehr als 2 t). Das schränkt die Möglichkeiten des schnellen Auf- und Abbaus sowie der Lagerung stark ein. Zusätzlich ist eine sichere Abstützung im Betrieb notwendig, welche – aufgrund des Gewichts und der auftretenden Kräfte – nicht einfach konstruiert werden kann. Aufgrund der Einschränkungen durch die Corona-Pandemie konnte diese Variante nicht mehr im Rahmen des Projekts realisiert werden. Stattdessen wurde der Fokus auf die Charakterisierung des Messplatzes hinter der existierenden 2 m Betonwand gelegt.

Charakterisierung des Messplatzes

Referenzinstrumente

Für die Messung der zeitlich gemittelten Ortsdosisleistung wurden Sekundärstandard-Ionisationskammern benutzt, welche rückführbar auf die Primärnormale der PTB kalibriert wurden. Die Ionisationskammern wurden mit der bewährten mobilen Messtechnik verbunden und die Ionisationsströme entsprechend rückführbar gemessen und protokolliert (Abbildung 12). Die Auswertung erfolgte mit eigens erstellten Programmen, welche den verwendeten Messablauf berücksichtigen.

Hauptsächlich wurde die $H^*(10)$ -Sekundärstandardkammer HS01 von Seibersdorf mit 1 Liter Volumen genutzt. Diese Kammer wurde in der PTB ausführlich charakterisiert und optimiert [11]. Die relative Energieabhängigkeit ist gering und über einen weiten Energiebereich wesentlich kleiner als 10 % (siehe Abbildung 13).

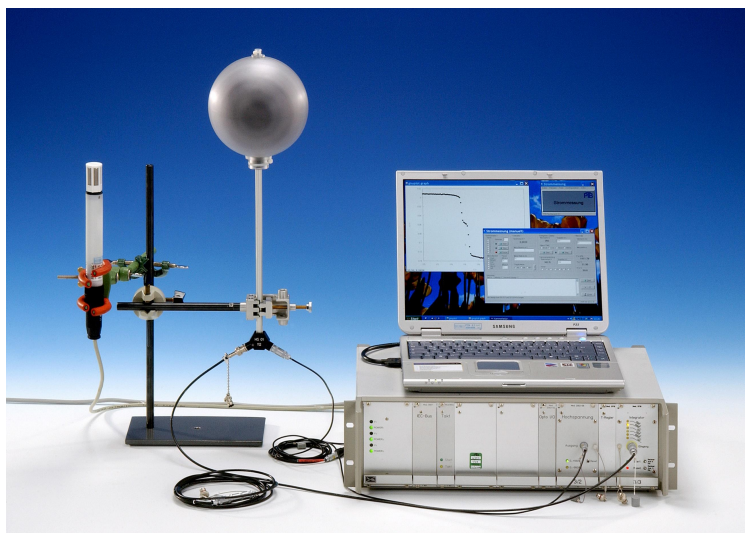


Abbildung 12 Mobiler Messstand mit HS01-Sekundärstandardkammer und externem Temperatur- und Luftfeuchtefühler zur Luftdichtekorrektur.

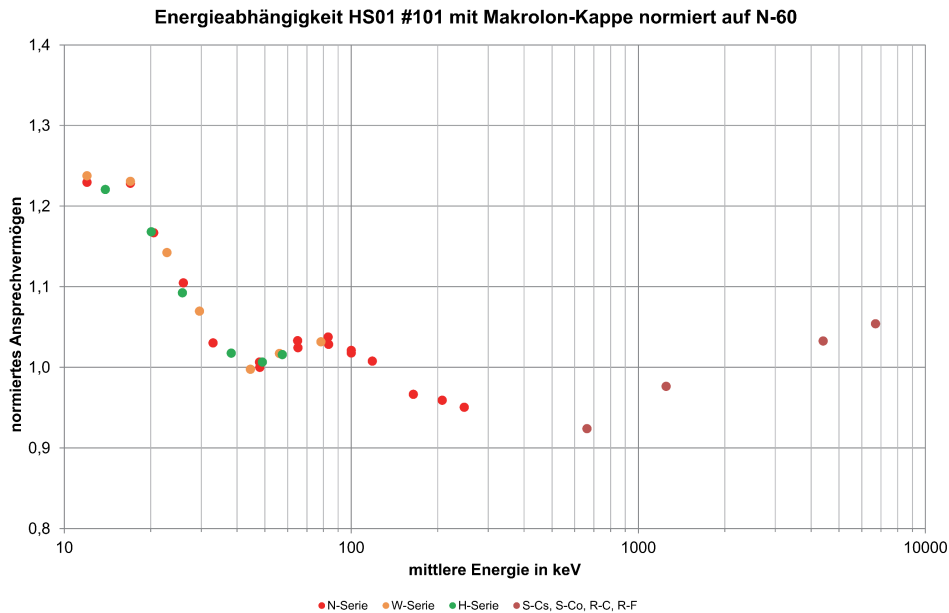


Abbildung 13 Normiertes Ansprechvermögen der $H^*(10)$ -Sekundärstandardionisationskammer HS01 #101 für die Bestrahlungsqualitäten nach ISO 4037 bis 7 MeV.

Monitorsystem

Die von den med. Linacs abgegebene Strahlung zeigt signifikante Schwankungen in der Dosisleistung. Dies wird von der Steuersoftware des Beschleunigers erfasst und bei der Bestrahlungssteuerung berücksichtigt. In der Regel ist die Steuerung der Bestrahlung auf eine möglichst genau zu applizierende Zieldosis ausgerichtet. Diese Dosis wird in MU (Monitorunits) dem Beschleuniger vorgegeben und vom Programm bestmöglich eingehalten. Die Bestrahlzeiten variieren dementsprechend von Bestrahlung zu Bestrahlung leicht. Insbesondere kann es im Laufe eines Messtages größere Schwankungen der Dosisleistung geben.

Für eine reine Dosisbestrahlung sind diese Schwankungen nicht relevant. Für die hier vorgesehene Prüfung von Ortsdosisleistungsmessgeräten ist hingegen ein möglichst konstantes Strahlungsfeld wünschenswert. Da die Beschleunigerleistung nur in groben Stufen verändert werden kann, ist es notwendig die Änderungen in der momentanen Dosisleistung bei jeder Bestrahlung zu erfassen und die errechnete Solldosisleistung im Referenzfeld entsprechend zu korrigieren.

Für diese Korrektur wurden mehrere Optionen messtechnisch geprüft wobei die Nutzung der internen und externen Monitorkammer des Beschleunigers die besten Ergebnisse bringt.

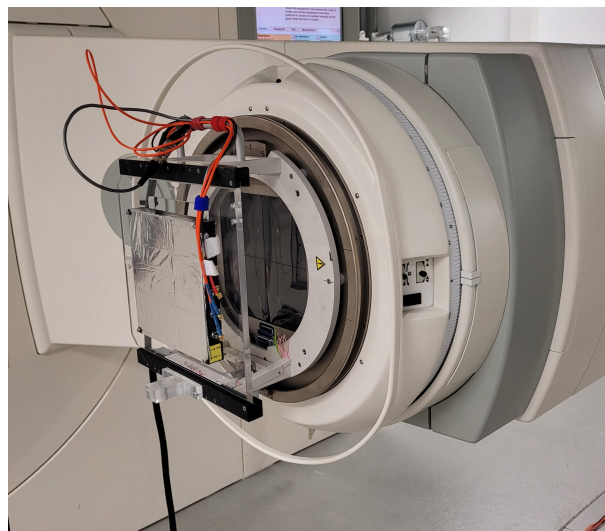


Abbildung 14 Strahlerkopf des med. Linac mit montierter externer Monitorkammer (links).

Die Nutzung der internen Monitorkammer kann hingegen gut für eine Korrektur der berechneten Dosisleistung am Messort genutzt werden. Zusätzlich bietet die externe Monitorkammer (Abbildung 14) eine weitere Möglichkeit der Überwachung. Die Daten der drei Kammern werden über eine Software im 2-Sekundentakt protokolliert und können somit per Software ausgewertet werden. Dazu wurde ein Programm entwickelt, welches die entstehenden großen Dateien in kleine, zu den einzelnen Bestrahlungen gehörige, Abschnitte aufteilt. Diese können dann einfach den Bestrahlungen zugeordnet und halb-automatisch ausgewertet werden. In Abbildung 15 ist das Ergebnis dieser Korrektur dargestellt. Für die Referenzmessungen bei einem Abstand von 0,5 m zur Wand ergibt sich ein Ionisationsstrom von 1,2 pA. Die Schwankung des Stromes ist im unskalierten Strom deutlich erkennbar, es ergibt sich eine relative Standardabweichung von 2 %, durch die Normierung auf die Ausgabewerte der internen Monitorkammer kann diese auf 0,4 % reduziert werden. Die interne Monitorkammer des Beschleunigers ist also für die fortlaufende Überwachung des Referenzstrahlungsfeldes gut geeignet.

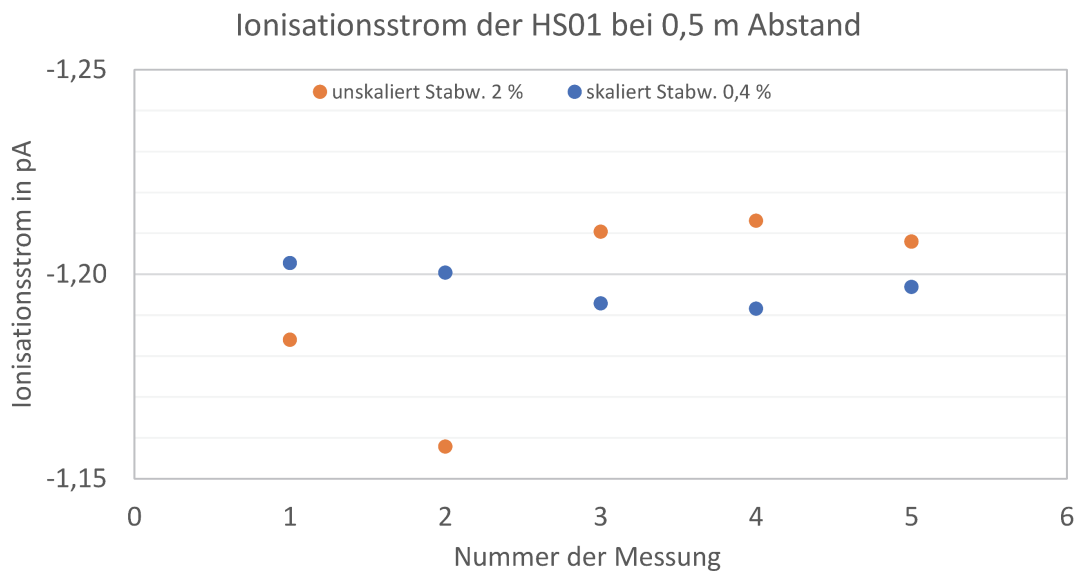


Abbildung 15 Unskalierter und skaliertes Ionisationsstrom der HS01 für eine Beschleunigerspannung von 25 MV und einen Abstand von 0,5 m von der Wand. Unskaliert ergibt sich eine relative Standardabweichung von 2 %, welche sich durch die Korrektur (Skalierung) auf die interne Monitorkammer auf 0,4 % reduziert.

Qualitätssicherung

Zur Validierung und Qualitätssicherung des Feldes wird ein passives OSL-Dosimetriesystem mit $H^*(10)$ und $H_p(10)$ Dosimetersonden von Dosimetrics eingesetzt. Durch eine zeitnahe Auslesung der Dosimetersonden können Einflüsse durch Nulleffekt und natürliche Umgebungsstrahlung minimiert werden. Die Dosimetersonden sollen vor Beginn der Prüflingsmessungen eingesetzt werden, um mit einem zweiten System die ordnungsgemäße Funktion des Referenzstrahlungsfeldes zu dokumentieren. Dabei wird der gemessene Dosiswert mit vorherigen Ergebnissen verglichen und bei hinreichender Übereinstimmung das Feld freigegeben.

Der geplante Messablauf für zukünftigen Messkampagnen besteht aus:

1. Der Kalibrierung des Feldes, also der Bestimmung der aktuellen Dosisleistung mit einer Sekundärstandardionisationskammer relativ zu den Daten der internen Monitorkammer
2. Eine Qualitätssicherungsmessung mit den passiven Dosimetersonden
3. Der Prüflingsbestrahlung

Aufbau des Messplatzes

Um Prüflinge reproduzierbar im Feld positionieren zu können, wurde ein Verfahrtisch konstruiert (Abbildung 16). Mithilfe von NDT-Filmaufnahmen in verschiedenen Abständen wurde die Lage des Strahlungsfeldes exakt vermessen und mit zwei Linienlasern markiert. Die Laser erzeugen zwei Linien, welche sich in der Feldmitte kreuzen. Zur Absicherung der Ausrichtung der Linienlaser wurde der Feldmittelpunkt an der Wand und der Kreuzungspunkt an der gegenüberliegenden Wand dauerhaft markiert.

Aufgrund kleiner Unsicherheiten bei der räumlichen Orientierung des Strahlerkopfes bei Drehung ergeben sich Abweichungen bei einem Abstand von 2 m von der Wand für die Höhe des Strahls im Bereich weniger cm. Der Strahl ist somit nicht immer parallel zum Fußboden im Messraum ausgerichtet. Es ergibt sich somit eine Abweichung der Strahlachse zur Achse der Verfahrbahn welche Konstruktionsbedingt parallel zum Fußboden ausgerichtet ist. Der Effekt der Höhenverschiebung von wenigen cm auf die Dosisleistung wurde mit Hilfe zweier Messungen am Ende der Bahn bestimmt: Es ergibt sich einen Unterschied von etwa 1 % welcher in der Messunsicherheit berücksichtigt wird und vor jeder Messkampagne überprüft werden kann.

Für eine stabile und reproduzierbare Ausrichtung der Verfahrbahn wurden zwei Befestigungsbolzen in die Wand eingelassen. Eine Kontrolle der Position der Verfahrbahn kann mit Hilfe des Systems aus den beiden Linienlasern erfolgen und gegebenenfalls auf wenige Millimeter korrigiert werden.

Die Ausrichtung der Referenzkammer oder der Prüflinge erfolgt dann mit dem Laserkreuz so, dass der Bezugspunkt in der Feldmitte liegt. Der Abstand wird mit einem kalibrierten Laserentfernungssystem gemessen und mit dem Verfahrtisch mit einer Genauigkeit von etwa 1 mm eingestellt.

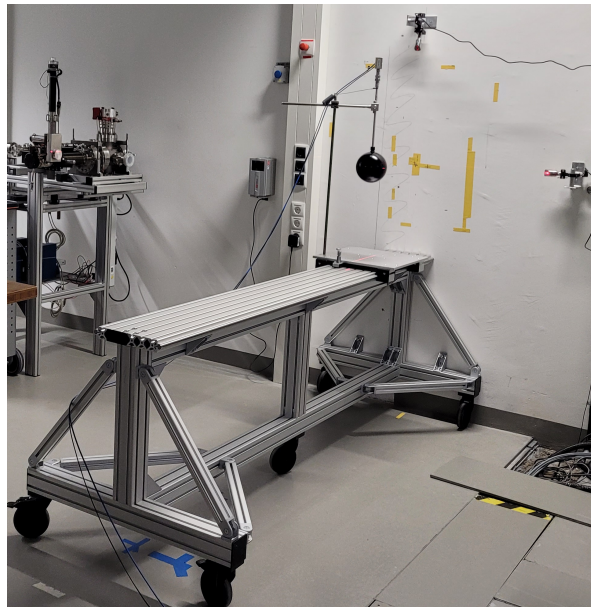


Abbildung 16 Verfahrbahn mit Referenzlasersystem (oberer und rechter Bildrand) und Ionisationskammer.

Variation der Dosisleistung

Es gibt zwei Möglichkeiten der Variation der zeitlich gemittelten Dosisleistung: Erstens Variation der Pulswiederholfrequenz – dies ist in diskreten Schritten möglich, reduziert allerdings nicht die Dosisleistung im Strahlungspuls. Zweitens durch Ausnutzung der Dosisleistungsabhängigkeit vom Abstand von der Strahlenquelle. Aufgrund der Geometrie gilt das bekannte „ $1/r^2$ -Gesetz“ nicht, da die Wand als Quelle zusätzlicher Streustrahlung wirkt. Trotzdem ergibt sich eine eindeutig bestimmte Abhängigkeit der Dosisleistung vom Abstand.

Diese Abhängigkeit wurde mit der Sekundärstandardionisationskammer HS01 vermessen (Abbildung 17).

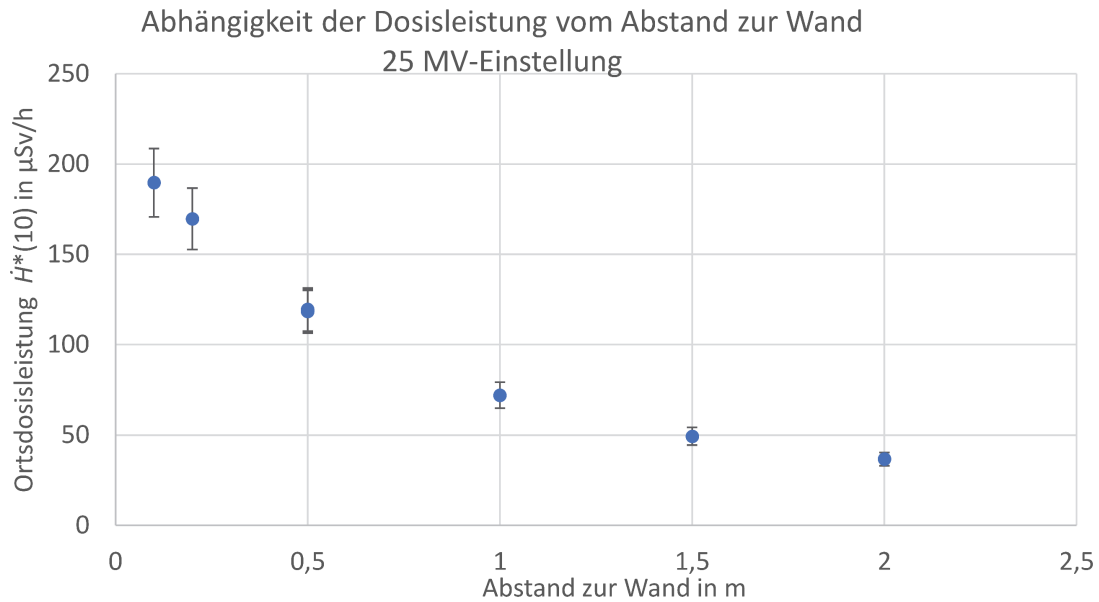


Abbildung 17 Dosisleistungsabhängigkeit vom Abstand von der Wand für eine Beschleunigereinstellung von 25 MV bei einer Leistung von etwa 280 MU/min gemessen mit der Sekundärstandardionisationskammer HS01.

Homogenität des Strahlungsfeldes

Die räumliche Homogenität des Strahlungsfeldes wurde, neben den NDT-Filmaufnahmen (Abbildung 6), durch zahlreiche Messungen mit einem 2D-Messplatz untersucht, welcher die reproduzierbare Positionierung einer Ionisationskammer in einer Ebene ermöglicht. Ein Ergebnis für die Einstellung 25 MV, 10 cm x 10 cm Feld im Isozentrum, ist für einen Abstand von 50 cm von der Wand in Abbildung 18 dargestellt. Der 2D-Plot zeigt, die Feldverteilung in der Ebene. Damit der Feldrand sicher im erreichbaren Geometriebereich des 2D-Messstandes lag, war der Messtand bei dieser Messung etwas versetzt zur Feldmitte positioniert. Im nicht vermessenen Feldteil ist nach den NDT-Filmaufnahmen kein grundsätzlich anderer Verlauf zu erwarten.

Die Abmessungen des Feldes entsprechen den Ergebnissen der NDT-Filmaufnahmen. Die Dosis bzw. Dosisleistungsverteilung nimmt zu den Rändern messbar ab. Dies ist bei der Positionierung der Prüflinge entsprechend zu berücksichtigen. Messungen mit einer $H^*(10)$ -Ionisationskammer im Abstand von 50 cm zur Wand und einem Abstand von 20 cm (links oder rechts) von der Feldmitte zeigen einen Unterschied von 12 % zum Messwert im Zentrum.

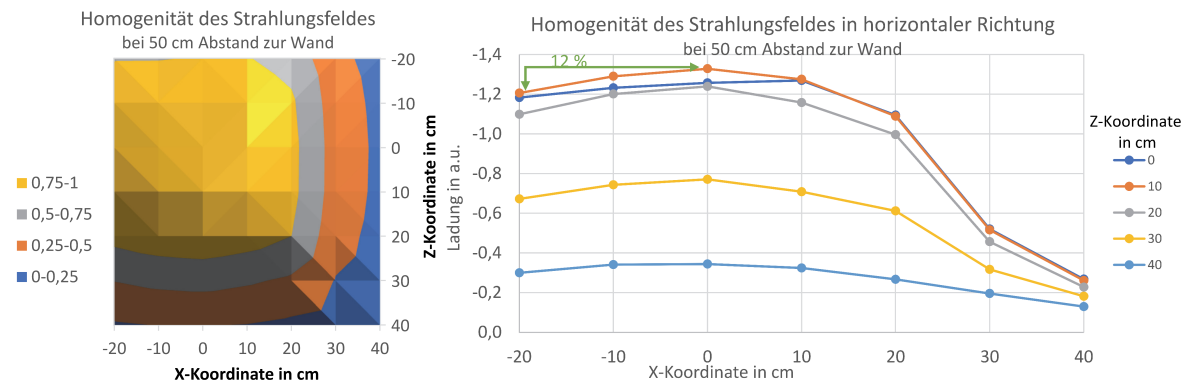


Abbildung 18 Links: 2D-Plot der relativen Dosisverteilung für einen Abstand von 50 cm von der Wand. Rechts: Gemessene Ladung über horizontaler Koordinate für verschiedene Höhen (Z-Koordinate).

Spektrometrie mit dem Wenigkanal-Spektrometer

Für die Bestimmung der spektralen Photonenvverteilung wurden Messungen mit einem passiven Wenigkanal-Spektrometer durchgeführt [12, 13]. Das Wenigkanal-Spektrometer basiert auf Thermolumineszenzdetektoren (TLD) in welche in mehreren Schichten, getrennt durch Abschirmmaterial, angeordnet sind. Die Messungen wurden in einen Abstand von 50 cm von der Wand für zwei verschiedene Feldgrößeneinstellungen (10 cm x 10 cm und 40 cm x 40 cm) bei einer Beschleunigereinstellung von 25 MV durchgeführt [14].

Nach der Bestrahlung mit einer hinreichenden Dosis werden die TLD-Detektoren des Wenigkanal-Spektrometers ausgewertet. Aus den Dosiswerten und Annahmen über die Form des Spektrums lässt sich ein Spektrum rekonstruieren.

Das Spektrum für die Feldgröße 10 cm x 10 cm ist in Abbildung 19 im Vergleich zum Primärspektrum dargestellt. Das Primärspektrum, ebenfalls mit dem Wenigkanal-Spektrometer gemessen, ist in der Graphik um den Faktor 10^{-6} skaliert. Dies entspricht etwa der Schwächung durch den größeren Abstand und der, aus den energieabhängigen Schwächungskoeffizienten abgeschätzten, mittleren Abschirmwirkung durch 2 m Normalbeton. Es ergibt sich ein Spektrum, das gegenüber dem Ursprungsspektrum hinsichtlich der mittleren Energie zu höheren Energien verschoben ist (Aufhärtung). Die aus den Daten berechnete mittlere Energie (bezogen auf die Fluenz) steigt von 5,5 MeV auf 6 MeV. Dieser Effekt ist aufgrund der energieabhängigen Filterwirkung der Wand zu erwarten. Die Form des Spektrums verändert sich nicht grundlegend und nach Durchgang durch die Wand sind sowohl niedrige als auch hohe Energien noch im Spektrum enthalten und nicht durch die Wand gefiltert. Zusätzlich ist erkennbar, dass das Spektrum nicht signifikant über 20 MeV hinausreicht.

Eine detaillierte Auswertung der Ergebnisse inklusive der Berechnung der Konversionskoeffizienten von Luftkerma zu den operationellen Messgrößen findet sich in [14].

Für eine Feldgröße von 40 cm x 40 cm ergibt sich ein vergleichbares Bild. Die gemessene Dosis ist in Verhältnis zum 10 cm x 10 cm höher. Dies ist vermutlich durch einen höheren Anteil von gestreuten Photonen zu erklären, da eine größere Fläche der Wand als Quelle wirken kann.

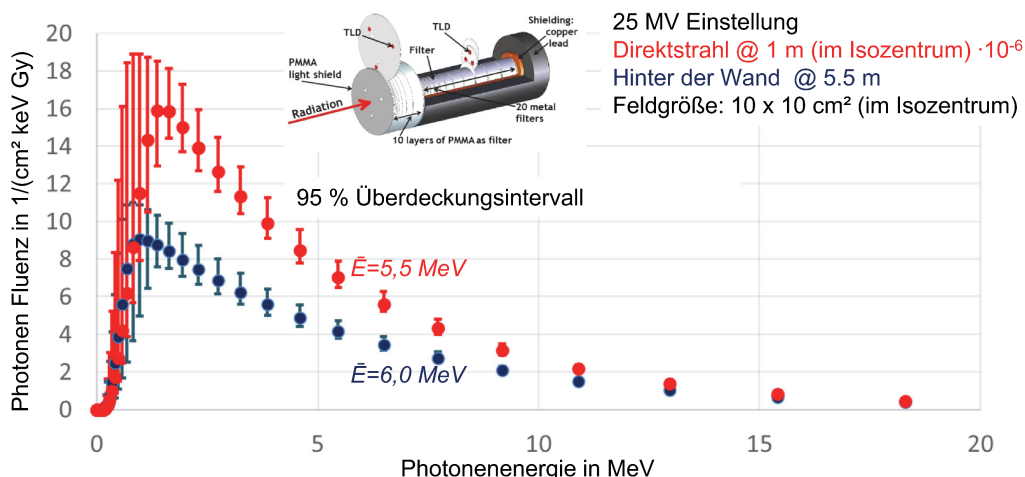


Abbildung 19 Ergebnis der Spektrometrie mit dem passiven Wenigkanal-Spektrometer für eine Feldgröße von 10 cm x 10 cm im Isozentrum. Im Einschub oben rechts ist der Aufbau des Spektrometers schematisch dargestellt. In rot ist das Primärspektrum im Isozentrum dargestellt, skaliert um den Faktor 10^{-6} entsprechend der mittleren Abschwächung durch Abstand und 2 m Beton. In Blau ist das Spektrum dargestellt, nach dem Durchgang durch die 2 m Betonwand.

Zur exakteren Bestimmung der maximalen Photonenenergie des Strahlungsfeldes wurden noch Spektren mit einem Germanium-Spektrometer gemessen. Diese Messungen bestätigen die vorigen Ergebnisse, dass die Maximalenergie bei etwa 20 MeV für die 25 MV-Einstellung liegt. Aufgrund der hohen Energie der Photonenstrahlung konnte mit diesem Spektrometer allerdings nur die Maximalenergie, nicht aber das Spektrum bestimmt werden.

Simulation mit GEANT4

Für zur Berechnung von Spektren sowie eine Überprüfung der gewählten Ansätze für einen Messplatz mit höherer Ortsdosisleistung wurden die Strahlungsfelder simuliert.

Die Simulationen für die Geometrien wurden dabei mit dem GEANT4 Toolkit durchgeführt [15, 16, 17]. Als Eingangsdaten wurden dabei bereits vorliegende Phasenraumdateien des Beschleunigers benutzt, welche im Wesentlichen das ursprüngliche Spektrum am Ausgang der Beschleunigerkopfes beschreiben. Diese Phasenraumdateien wurden mit einem detaillierten Geometriemodell des Beschleunigerkopfes und durch Messungen validiert.

Die Geometriedaten basieren auf den Zeichnungen des Gebäudes und eigenen Messungen. Schwierig war die Recherche für die richtige Materialzusammensetzung der Abschirmwand. Hier wurde auf vorhandene Bauunterlagen und Messprotokolle zurückgegriffen.

Um die Berechnungen zu validieren, wurde ein Vergleich der mit der Ionisationskammer gemessenen und der für die vereinfachte Geometrie berechneten Abstandsabhängigkeit durchgeführt. Nachdem hier eine hinreichende Übereinstimmung erzielt werden konnte, wurden in einer komplexeren Geometrie für verschiedene Mittelungsvolumina die Photonen- und Elektronenspektren sowie Dosisbeiträge beim Messplatz für höhere Dosisleistungen (Abbildung 11) berechnet.

Simulation mit MCNP

Für die Berechnung des Neutronenanteils im Strahlungsfeld wurde die dafür besser geeignete Strahlungstransport-Software MCNP 6.2 benutzt [18]. Die Berechnungen basieren im Wesentlichen auf denselben Eingangsparametern für Geometrie und Materialzusammensetzung. Zusätzlich wurden in dieser Simulation Details des Beschleunigerkopfes mit in die Simulation einbezogen und nicht von einer fertigen Phasenraumdatei ausgegangen. Die Simulation startet also beim Elektronenstrahl welcher die Photonenstrahlung als Bremsstrahlung erzeugt. Dies ist notwendig, da ein wesentlicher Teil der Neutronenproduktion im Strahlerkopf stattfindet.

Die Ergebnisse für Photonen sind in Abbildung 20 dargestellt. Durch die leicht unterschiedliche Basis, insbesondere in der Detailtiefe der Geometrie des Beschleunigerkopfes, ergeben sich leicht andere Ergebnisse im Vergleich zur Berechnung mit GEANT4.

Das Ergebnis der Simulation der Elektronenkomponente ist in Abbildung 21 dargestellt.

Der Anteil an Neutronen im Strahlungsfeld hinter der 2 m Betonwand ist nach der Simulation gering. Er kann, insbesondere im Vergleich zum natürlichen Hintergrund, vernachlässigt werden.

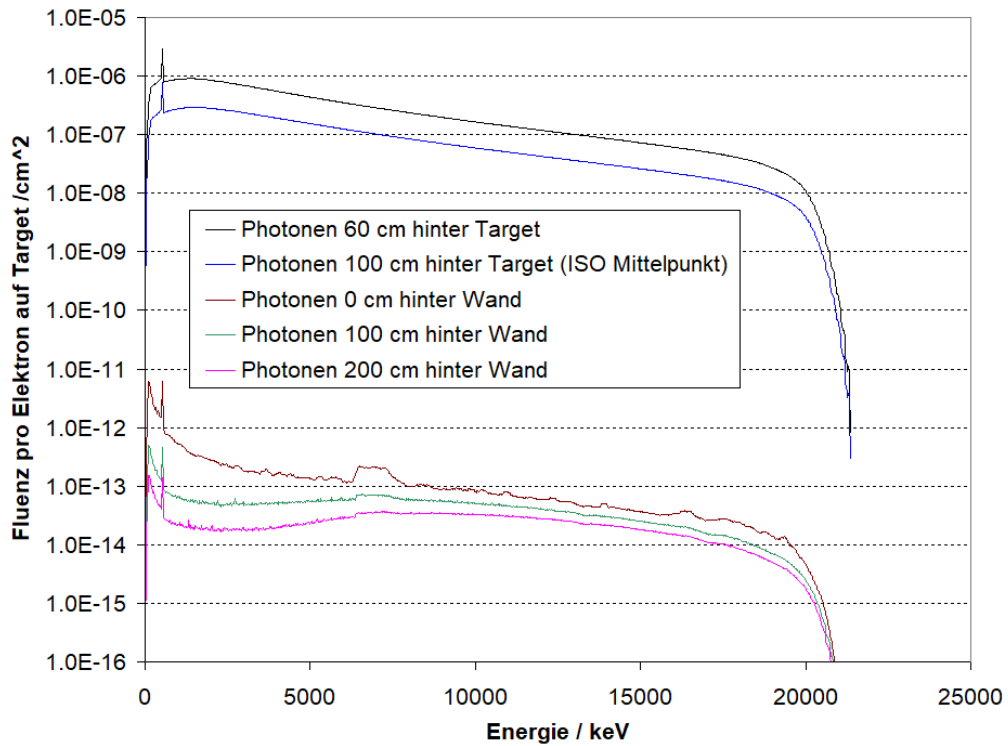


Abbildung 20 Mit MCNP berechnete Photonenspektren für verschiedene Positionen im Raum. Die beiden oberen Datenreihen sind im Beschleunigerraum berechnet. Die drei unteren Datenreihen sind nach Durchgang durch die 2 m Betonwand für drei Abstände berechnet.

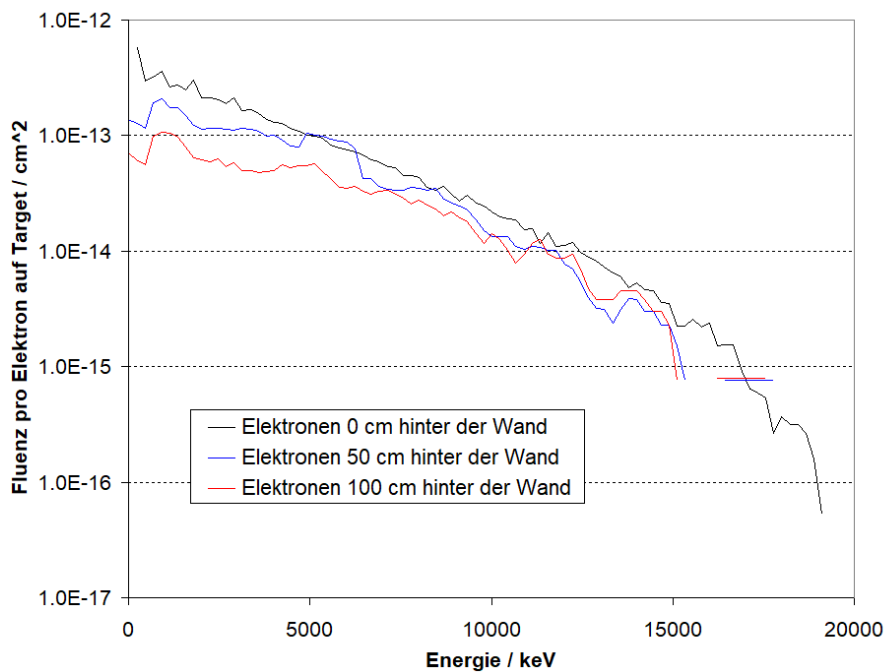


Abbildung 21 Mit MCNP berechnete Elektronenspektren für verschiedene Abstände von der Wand nach Durchgang durch die 2 m Betonwand.

Messung des Neutronenanteils

Die Bestimmung des Neutronenanteils im Strahlungsfeld erfolgte, neben den oben genannten Simulationen, auch mittels Messungen mit dem NEMUS-Spektrometer der PTB [19]. Ein beispielhafter Aufbau für zwei Kugeln ist in Abbildung 22 gezeigt. Die damit ermittelten Anteile an Neutronen waren, wie auch die Simulationsdaten zeigten, nicht dosisrelevant und können somit für die Dosimetrie in diesem Feld vernachlässigt werden.

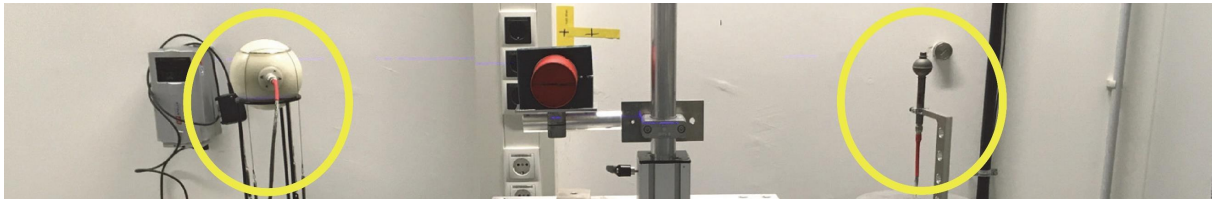


Abbildung 22 Neutronen-Spektrometrie: Zwei Detektoren des PTB-NEMUS-Spektrometers vor der Wand des Referenzfeldes. In der Mitte ist in rot das passive Wenigkanal-Spektrometer zu erkennen.

Erreichte Messunsicherheit

Im Rahmen des Aufbaus konnte eine gute Reproduzierbarkeit des Feldes bei Verwendung der internen Monitorkammer des Beschleunigers erreicht werden. Das Strahlungsfeld hat eine mittlere Energie, welche im charakterisierten Bereich der verwendeten Sekundärstandardionisationskammer liegt. Somit kann eine Messunsicherheit erreicht werden, welche für die Untersuchung von Prüflingen ausreichend ist.

Finaler Aufbau und Ergebnisse realer Dosimeter

Eine Impression vom finalen Aufbau ist in Abbildung 23 dargestellt.

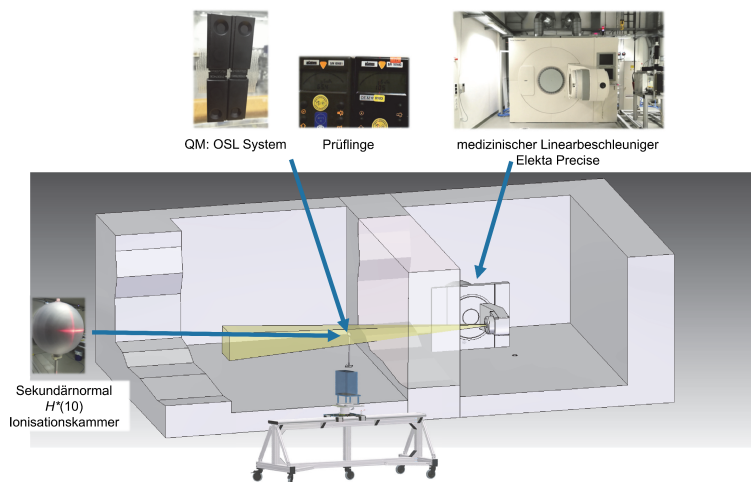


Abbildung 23 Übersicht über das Referenzfeld: Im rechten Raum der medizinische Linearbeschleuniger als Strahlungsquelle und im linken Raum der Aufbau: entweder das Sekundärnormal zur Feldcharakterisierung, OSL-Dosimeter auf einem ISO-Quader-Wasserphantom zur Qualitätssicherung oder Prüflinge.

Mit diesem Aufbau wurden verschiedene kommerzielle Ortsdosimeter auf ihr Verhalten in diesem gepulsten, hochenergetischen Strahlenfeld untersucht.

Für zwei verschiedene Typen von Ortsdosimetern wurde das Ansprechvermögen untersucht. Es ergibt sich für die 25 MV-Einstellung des Beschleunigers folgendes Bild für die Abstände zur Wand von 10 cm bis 200 cm. Die Dosisleistungsanzeige wurde jeweils auf den mit der $H^*(10)$ -Sekundärstandardionisationskammer bestimmten Referenzwert bezogen.

Tabelle 1 Gemessene mittlere Dosisleistung mit der $H^*(10)$ Ionisationskammer und Ansprechvermögen für zwei verschiedene kommerzielle Ortsdosimeter im Referenzfeld bestimmt für verschiedene Abstände von der Wand.

	Abstand 200 cm	Abstand 50 cm	Abstand 20 cm	Abstand 10 cm
Mittlere Dosisleistung	37 $\mu\text{Sv/h}$	119 $\mu\text{Sv/h}$	170 $\mu\text{Sv/h}$	190 $\mu\text{Sv/h}$
Dosisleistung im Puls	61 mSv/h	198 mSv/h	283 mSv/h	316 mSv/h
Dosis pro Puls	0,05 nSv	0,17 nSv	0,24 nSv	0,26 nSv
Dosimetertyp				
a	2,2	1,0	0,7	0,6
b	1,2	0,8	0,6	Überlast

Für das Dosimeter Typ a ergibt sich bei einem Abstand von 2 m ein starkes Überansprechen, wie es für die hohen Photonenenergien zu erwarten war. Bei einem Abstand von 50 cm entspricht die Anzeige im Mittel der korrekten Dosisleistung und bei kleineren Abständen zeigt das Gerät, vermutlich bedingt durch die hohen Pulsdosisleistungen und den damit einhergehenden Totzeitverlusten, ein starkes Unteransprechen.

Das Dosimeter Typ b zeigt kein extremes Überansprechen, allerdings bei höheren mittleren Dosisleistungen ein starkes Unteransprechen. Der Überlastalarm funktioniert, bezogen auf die angezeigte Dosisleistung weiterhin.

7. Nutzen und Verwertbarkeit

Das Referenzfeld steht nach Abschluss des Projekts, ergänzend zu den bestehenden Referenzfeldern an der PTB, für die Charakterisierung von Ortsdosimetern zur Verfügung. Die nutzbaren Dosisleistungsbereiche sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2 Erreichbare Dosisleistungsbereiche im Referenzfeld

Beschleunigereinstellung	8 MV	25 MV
Maximale mittlere Dosisleistung	20 $\mu\text{Sv/h}$	190 $\mu\text{Sv/h}$
Maximale Pulsdosisleistung	17 mSv/h	316 mSv/h

8. Bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Das Projekt hat für den Bereich Strahlenschutz den Status eines Pilot-Referenzfeldes. Es sind keine Arbeiten Dritter auf diesem Gebiet bekannt geworden.

9. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Aus dem Projekt ist zum Zeitpunkt dieses Berichtes eine Veröffentlichung erschienen: [14]. Eine weitere Veröffentlichung der Ergebnisse in einem Fachjournal ist geplant.

Das Projekt wurde auf folgenden Konferenzen präsentiert:

SMSI 2021 - Measurement Science, Mai 2021

Flash Radiotherapy and Particle Therapy Conference, Dezember 2021

International Conference on Individual Monitoring of Ionising Radiation (IM2022); Neutron and Ion Dosimetry Symposium (NEUDOS-14), Krakow, April 2022

8th NCS Lustrum, Utrecht, November 2022

25. Fortbildungsseminar der Arbeitsgemeinschaft Physik und Technik, Braunschweig, Juni 2022

International Conference on Occupational Radiation Protection: Strengthening Radiation Protection of Workers - Twenty Years of Progress and the Way Forward, Geneva, September 2022

Kolloquium des Bundesamts für Strahlenschutz, November 2022

4th International Conference on Dosimetry and its Applications, Valencia, Oktober 2023

Literaturverzeichnis

- [1] H. Zutz and O. Hupe, "Ambient dose and dose rate measurements in the vicinity of Elekta precise accelerators for radiation therapy," *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 162, no. 4, pp. 431 - 437, 2014.
- [2] Strahlenschutzkommission, „Strahlenschutzdosimetrie in hochenergetischen Photonenfeldern,“ Geschäftsstelle der Strahlenschutzkommission, Bonn, 2022.
- [3] J. Klammer, J. Roth und O. Hupe, „Novel reference radiation fields for pulsed photon radiation installed at PTB,“ *Radiation Protection Dosimetry*, Bd. 151, pp. 478-482, 2012.
- [4] ISO, „Radiological protection — X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 1: Radiation characteristics and production methods,“ International Organization for Standardization, 2019.
- [5] ISO, *Radiological protection — X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges from 8 keV to 1,1*, International Organization for Standardization, 2019.
- [6] ISO, *Radiological protection — X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their r* , International Organization for Standardization.
- [7] ISO, *Radiological protection — X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 4: Calibration of area and personal dosimeters in low energy X reference radii*, International Organization for Standardization, 2019.
- [8] ISO, *Radiological Protection: Characteristics of reference pulsed radiation – Part 1: Photon radiation. ISO/TS 18090-1*, International Organization for Standardization, 2015.
- [9] IEC, *Radiation protection instrumentation - Electronic counting dosimeters for pulsed fields of ionizing radiation*, International Electrotechnical Commission, 2012.
- [10] IEC, *Radiation protection instrumentation - Dosimeters for pulsed fields of ionizing radiation*, International Electrotechnical Commission, 2019.

- [11] U. Ankerhold, „Optimisation of a secondary standard chamber for the measurement of the ambient dose equivalent, $H^*(10)$, for low photon energies,“ *Radiation Protection Dosimetry*, Bd. 118, pp. 16-21, 2006.
- [12] R. Behrens und P. Ambrosi, „A TLD-based Few-channel Spectrometer for Mixed Photon, Electron, and Ion Fields with High Fluence Rates,“ *Radiation Protection Dosimetry*, Bd. 101, pp. 73-76, August 2002.
- [13] R. Behrens, „A spectrometer for pulsed and continuous photon radiation,“ *Journal of Instrumentation*, Bd. 4, p. P03027, 2009.
- [14] R. Behrens, H. Zutz und J. Busse, „Spectrometry of pulsed photon radiation,“ *Journal of Radiological Protection*, Bd. 42, p. 011507, January 2022.
- [15] S. Agostinelli, et al., „Geant4—a simulation toolkit,“ *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Bd. 506, pp. 250-303, 2003.
- [16] J. Allison, et al., „Geant4 developments and applications,“ *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Bd. 53, pp. 270-278, 2006.
- [17] J. Allison, et al., „Recent developments in Geant4,“ *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Bd. 835, pp. 186-225, 2016.
- [18] C. J. Werner, et al., „MCNP6.2 Release Notes,“ *report LA-UR-18-20808*, 2018.
- [19] B. Wiegel und A. V. Alevra, „NEMUS—the PTB Neutron Multisphere Spectrometer: Bonner spheres and more,“ *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Bd. 476, pp. 36-41, 2002.
- [20] ISO, *Reference radiation fields for radiation protection — Definitions and fundamental concepts. ISO 29661-1:2012*, International Organization for Standardization, 2012.