Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

http://www.ssk.de

Strahlenschutzdosimetrie in hochenergetischen Photonenfeldern

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 321. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 22. September 2022

Vorwort

Die Nutzung von hochenergetischen und zudem gepulsten Strahlungsfeldern, wie sie in Beschleunigeranlagen erzeugt werden, nimmt in Medizin, Industrie und Forschung zu.

Da derzeit keine konformitätsbewerteten Messgeräte für Strahlenschutzmessungen bei Photonenenergien von mehr als 7 MeV und für gepulste Strahlungsfelder erhältlich sind, hat das Bundesumweltministerium die SSK am 19. Mai 2014 um Erarbeitung einer Empfehlung zum Gebrauch von Orts- und Personendosimetern zu Strahlenschutzmessungen bei hohen Energien gebeten.

Unter dem Ausschuss „Strahlenschutztechnik“ der SSK wurde daraufhin eine Arbeitsgruppe eingesetzt. Der Arbeitsgruppe haben unter anderem PD Dr. Jürgen Henniger (TU Dresden), Dr. Oliver Hupe (PTB Braunschweig) und Dr. Ingo Lehmann (Sachverständigenbüro für Strahlenschutz) angehört. Mit der Unterstützung der Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), dem VKTA – Strahlenschutz, Analytik & Entsorgung Rossendorf e.V., der TU Dresden/Strahlenschutz-Akademie Dresden (SAD) und dem TÜV-Nord/Sachverständigenbüro Dr. Ingo Lehmann wurden in insgesamt drei Messaktionen mit verschiedenen Dosimetern und einem Referenzinstrument umfangreiche Messungen in hochenergetischen gepulsten Strahlungsfeldern im Umfeld medizinischer Beschleunigeranlagen durchgeführt, um eine Datenbasis für die vorliegende Empfehlung zu generieren.

Dr. Anette Röttger

Vorsitzende des Ausschusses „Strahlenschutztechnik“

Prof. Dr. Werner Rühm

Vorsitzender der Strahlenschutzkommission

INHALT

1 Einleitung 4

2 Beratungsauftrag 5

3 Empfehlung 5

4 Wissenschaftliche Begründung 8

4.1. Funktionsprinzipien und Verhalten von Messgeräten bei hochenergetischer und gepulster Strahlung 9

4.2. Prüfung von Messgeräten in gepulsten Strahlungsfeldern 10

5 Literatur 12

Anhang 16

A1 Gesetzliches Messwesen 16

A2 Orientierende Messungen mit Ortsdosisleistungsmessgeräten im Umfeld von Beschleunigeranlagen 17

1 Einleitung

Die Nutzung von Strahlungsfeldern, die in Beschleunigeranlagen erzeugt werden, nimmt in Medizin, Industrie und Forschung zu. So werden z. B. im Bereich der Medizin in der perkutanen Strahlentherapie fast ausschließlich Elektronen-Linearbeschleuniger genutzt; auch im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung und bei der Wahrnehmung von Sicherungsaufgaben (z. B. bei der Frachtdurchleuchtung) kommen derartige Beschleunigeranlagen zum Einsatz[1]. Charakteristisch für die in solchen Anlagen erzeugten Strahlungsfelder ist, dass die Strahlung hochenergetisch und zudem gepulst ist.

Bei derartigen Beschleunigeranlagen ist die zuverlässige Durchführung von dosimetrischen Messungen – sowohl im Bereich der Personendosimetrie als auch im Bereich der Ortsdosimetrie – zur Gewährleistung des Strahlenschutzes von grundlegender Bedeutung. Die maximale Energie der Photonen ist bei solchen Beschleunigeranlagen deutlich höher als die Photonenenergien, die im Bereich der Kerntechnik vorkommen. Die heute im Einsatz befindlichen Orts- und Personendosimeter – dazu gehören passive Dosimeter wie OSL-, TL-, Film- oder Glasdosimeter und aktive Geräte, die auf gasgefüllten Zählrohren, integrierend messenden Ionisationskammern, Szintillations- oder Halbleiterdetektoren beruhen, – sind aber hauptsächlich für den Einsatz in der Kerntechnik entwickelt worden. In diesem Einsatzgebiet treten weit überwiegend geringere Strahlungsenergien auf, zudem ist die Strahlung nicht gepulst. Aus den Messanforderungen der Kerntechnik folgend, liegt bei vielen aktiven Ortsdosimetern die untere Grenze der korrekt messbaren Photonen bei Energien im Bereich von 40 keV bis 60 keV; die obere Grenze des Messbereichs wird je nach verwendetem Detektortyp bei Energien von 1,3 MeV bis 7 MeV erreicht. Die passiven Dosimeter und einige aktive Personendosimeter decken zusätzlich den in der Medizin vorhandenen Anwendungsbereich der nichtgepulsten Strahlungsfelder mit niedrigeren Energien ab und haben dafür die notwendige untere Grenze des Nenngebrauchsbereichs der mittleren Photonenenergie von 12 keV bis 20 keV.

Die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) richtete 1976 zusammen mit der Weltgesundheitsorganisation (WHO) ein Netz von Sekundärstandard-Dosimetrie-Laboratorien (SSDL) für die Qualitätssicherung ein, das als IAEO/WHO SSDL-Netz bekannt ist. Dieses Netzwerk hat die Genauigkeit der Dosimetrie im Strahlenschutz systematisch verbessert und bietet einen Weg zur metrologischen Rückführung[2] der nationalen Messtechnik zum Internationalen Einheitensystem an: Die Rückführung erfolgt bzgl. Photonenfeldern mit den Nukliden ^{60}Co, ^{137}Cs und Röntgen-Strahlungsqualitäten nach ISO 4037-1. Diese Referenzfelder sind allerdings weder hochenergetisch (maximale Photonenenergie von 1,3 MeV für ^{60}Co) noch gepulst.

In Deutschland wurden die Orts- und Personendosimeter für Photonen in das gesetzliche Messwesen[3] integriert. Der Energiebereich ist durch § 1 Satz 1 Nummer 13 der Mess- und Eichverordnung auf eine maximale Photonenenergie von 7 MeV begrenzt, für höhere Energien erfolgt keine Prüfung und Zertifizierung beim Eignungstest (Baumusterprüfung) des Konformitätsbewertungsverfahrens. Konformitätsbewertungsverfahren für Orts- und Personendosimeter werden von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) durchgeführt. Diese bietet Prüfungen im Energiebereich medizinischer Röntgenanlagen an und kann dabei auch das Ansprechvermögen gegenüber gepulster Strahlung im Pulsdauerbereich von 0,2 ms bis 10 s mit

[1] Laut (BMU 2020, Tabelle T V.20) lagen am 31. Dezember 2019 für den Anlagenbetrieb nach § 12 Abs. 1 Nr. 1 StrlSchG (Betrieb von Anlagen zur Erzeugung von ionisierender Strahlung) 948 gültige Genehmigungen und 65 Errichtungsgenehmigungen nach § 10 StrlSchG vor.

[2] Metrologische Rückführungskette: Folge von Normalen und Kalibrierungen, die verwendet wird, um ein Messergebnis auf eine Referenz zu beziehen (Brinkmann 2012)

[3] Ein Überblick über das gesetzlich geregelte Messwesen findet sich in Anhang 1.

Einzelpulsen oder Pulswiederholfrequenz bis 100 Hz und bei Röntgenblitzgeräten mit Pulsdauern von ca. 100 ns ermitteln. Bei der Prüfung wird der Einfluss der Pulsung des Strahlungsfeldes (Strahlungspulsdauer, Spitzen-Pulsdosisleistung) unabhängig von den weiteren Parametern des Strahlungsfeldes (Energie und Einfallswinkel) geprüft. Es gibt aktuell nur einige wenige Personendosimeter, die für gepulste Strahlung geprüft sind. Bei diesen ist der Parameterbereich klar spezifiziert[4].

Die bei Beschleunigeranlagen entstehende hochenergetische gepulste Strahlung weist Pulsdauern im Bereich weniger Mikrosekunden und Pulswiederholfrequenz bis über 200 Hz auf. Dieser Parameterbereich ist nicht Bestandteil der Baumusterprüfung. Daher gibt es in Deutschland keine baumustergeprüften aktiven Personendosimeter für gepulste Strahlung im µs-Pulsdauerbereich, folglich auch keine geeichten Geräte für diesen Messzweck – unabhängig vom Energiebereich. Außerdem gibt es auch keine Ortsdosimeter, die für gepulste Strahlung konformitätsbewertet sind.

Diese Empfehlung beschäftigt sich ausschließlich mit der Messung der Dosis bzw. der Dosisleistung durch Photonenstrahlung in den Bereichen, in denen sich während des Betriebes Personen aufhalten können und die daher gegenüber dem erzeugten Strahlungsfeld entsprechend abgeschirmt sind. Die Messung der Dosis oder Dosisleistung im Nutzstrahlungsfeld sowie die Betrachtung der u. U. entstehende Neutronenkomponente ist nicht Teil des vorliegenden Dokuments.

2 Beratungsauftrag

Da derzeit keine konformitätsbewerteten Messmittel für Strahlenschutzmessungen bei Photonenenergien von mehr als 7 MeV und für gepulste Strahlungsfelder, wie sie für Beschleunigeranlagen typisch sind, existieren, hat das Bundesumweltministerium die SSK am 19. Mai 2014 um Erarbeitung einer Empfehlung zum Gebrauch von Orts- und Personendosimetern zu Strahlenschutzmessungen bei hohen Energien gebeten. Dabei sollen insbesondere folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Gerätetypen bzw. Messprinzipien sind grundsätzlich für den Einsatz in hochenergetischen Strahlungsfeldern geeignet?
- Woran kann ein Nutzer eines Messgeräts die Brauchbarkeit für eine konkrete Messaufgabe erkennen?
- Welche (zusätzlichen) Unsicherheiten sind mit der Messung in hochenergetischen Feldern verbunden?

Die Empfehlung soll die in der Praxis relevanten Fälle betrachten, das heißt Strahlungsfelder, die bei einer relevanten Anzahl von Anlagen (z. B. medizinisch genutzten Elektronen-Linearbeschleunigern) auftreten. Dabei sind insbesondere Strahlungsfelder an Orten, an denen sich Personen aufhalten können, zu betrachten.

3 Empfehlung

Unter Berücksichtigung des Standes von Wissenschaft und Technik sowie auf Basis von orientierenden Messungen, die im Rahmen der Erarbeitung dieser Empfehlung durchgeführt wurden, kommt die SSK zu folgendem Ergebnis:

---

[4] Ersichtlich in der Liste der Baumusterprüfungen von Personendosimetern für $H_p(0{,}07)$, $H_p(3)$ bzw. $H_p(10)$ gemäß PTB-A 23.2 durch den ergänzenden Vermerk Strahlungspulsdauer, Spitzen-Pulsdosisleistung und Bezugsenergie.

- Hochenergetische, nicht gepulste Strahlungsfelder können grundsätzlich mit allen bekannten Messprinzipien erfasst werden, sofern die Konstruktion des Messgerätes für den Messzweck entsprechend ausgelegt ist. Für Messgeräte mit einer Baumusterprüfung ist dabei von einer Brauchbarkeit auszugehen, wenn die Parameter des zu messenden Strahlungsfeldes insbesondere hinsichtlich Energie und Dosisleistung im Messbereich des jeweiligen Gerätes liegen. Die Anwendung des Mess- und Eichgesetzes ist nach dem § 1 Satz 1 Nummer 13 der Mess- und Eichverordnung derzeit auf eine maximale Photonenenergie von 7 MeV beschränkt, daher sind darüber hinaus keine Baumusterprüfungen möglich.

  Die SSK empfiehlt daher zu prüfen, ob nicht-gepulste Strahlungsfelder mit Photonenenergien über 7 MeV in der Praxis auftreten und ob die Notwendigkeit besteht, die gesetzliche Grundlage (Konformitätsbewertung/MessEV) für diese Strahlungsfelder zu höheren Energien zu erweitern.

- Bei Beschleunigeranlagen mit genügend hoher Beschleunigungsenergie entstehen hochenergetische gepulste Strahlungsfelder. Für diese kann nicht grundsätzlich von der Eignung eines Messgerätes ausgegangen werden, selbst wenn die Energien im Messbereich des jeweiligen Gerätes liegen. Integral ausgelesene Ionisationskammern, ggf. mit Korrekturen bzgl. Einflussgrößen wie z. B. Luftdichte und Photonenenergie, sind für Messungen in gepulsten hochenergetischen Strahlungsfeldern grundsätzlich geeignet. Insbesondere bei Systemen, die auf zählenden und zählspektrometrischen Messprinzipien beruhen, kann es bedingt durch die Totzeitverluste zu einem deutlichen Unteransprechen bis hin zu einer Nullanzeige kommen (Helbig und Henniger 2012). Für Messgeräte mit einer Baumusterprüfung kann aber von einer Brauchbarkeit ausgegangen werden, wenn die Parameter des zu messenden Strahlungsfeldes insbesondere hinsichtlich Energie, Dosisleistung und Pulsung im bei der Baumusterprüfung ermittelten Nenngebrauchsbereich des jeweiligen Gerätes liegen. Die Anwendung des Mess- und Eichgesetzes ist nach dem § 1 Satz 1 Nummer 13 der Mess- und Eichverordnung derzeit auf eine maximale Photonenenergie von 7 MeV beschränkt, daher sind darüber hinaus keine Baumusterprüfungen möglich.

  Die SSK empfiehlt abzuschätzen, welcher Fehler durch eine Vernachlässigung des Beitrages von Komponenten mit Energien von über 7 MeV von in der Praxis relevanten gepulsten Strahlungsfeldern in der ermittelten Dosis entsteht.

  Die SSK empfiehlt außerdem zu prüfen, ob die Notwendigkeit besteht, die gesetzliche Grundlage (Konformitätsbewertung/MessEV) zu höheren Energien für gepulste Strahlungsfelder zu erweitern.

- Die SSK empfiehlt, in der Praxis vorhandene Strahlungsfelder an Beschleunigeranlagen zu charakterisieren. Dies schließt die Bestimmung des Spektrums, des Strahlungsqualitätsindex[5] und der mittleren Energie durch ggf. zu entwickelnde, geeignete Messtechnik ein. Dieses Wissen ist für eine Aussage zur Eignung von Dosimetern von wesentlicher Bedeutung.

- Weiterhin empfiehlt die SSK, Referenzstrahlungsfelder für gepulste Photonenstrahlung mit Energien bis mindestens 21 MeV, besser bis 25 MeV, mit mittleren Dosisleistungen von 0,5 $\mu Sv\ h^{-1}$ bis mindestens 3 $mSv\ h^{-1}$ zu entwickeln, deren Strahlparameter typischen Feldern in der Praxis entsprechen. Die Prüfung von Messgeräten in diesen Referenzstrahlungsfeldern ermöglicht die realistische Prüfung und auch die Quantifizierung der metrologischen Unsicherheiten.

- Auch wenn der Energiebereich des Strahlungsfeldes nicht vollständig in den Messbereich des jeweiligen Gerätes fällt, kann die Brauchbarkeit des Messgerätes für den Messzweck in

[5] Strahlungsqualitätsindex für Nutzstrahlung entsprechend DIN 6800-2

der Regel als erwiesen angesehen werden, wenn die mittlere Energie des Spektrums am Messort bekannt ist und sich innerhalb des bei der Baumusterprüfung festgelegten Energiebereichs des Messgerätes befindet, und die Vorgaben hinsichtlich Dosisleistung und Pulsung eingehalten sind. Generell ist festzuhalten, dass bei Messungen in hochenergetischen Strahlungsfeldern, insbesondere, wenn diese gepulst sind, weniger die eigentlichen Messunsicherheiten ein Problem darstellen als vielmehr die durch unzulängliche Messsysteme fehlerhaften Messungen. Eine Angabe eines allgemeinen Korrekturfaktors oder eines Verfahrens zur Ermittlung eines Korrekturfaktors im Einzelfall ist bei jetzigem Kenntnisstand nicht möglich.

Die SSK empfiehlt, Einflüsse, die durch die Verwendung unzulänglicher Messsysteme bedingt sind, durch angemessene Konservativitäten bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

– Passive Dosimetersysteme (OSL-, TL-, Film- und Glasdosimeter) können, ggf. mit Korrekturen, für Messungen in gepulsten hochenergetischen Strahlungsfeldern grundsätzlich verwendet werden.

  Daher empfiehlt die SSK, für die amtliche Personendosimetrie sowie für die Ortsdosimetrie mit passiven, über einen längeren Zeitraum integrierenden Dosimetern solche Systeme einzusetzen, die auf einem dieser Messprinzipien beruhen und hinsichtlich des energetischen Ansprechvermögens den Anforderungen genügen. Auf der Webseite der PTB sind aktuelle Listen von baumustergeprüften Dosimetern erhältlich – die entsprechenden Links zu den seitens PTB baumustergeprüften Personen- und Ortsdosimetern sind in der Fußnote[6] angegeben.

  Die SSK weist darauf hin, dass die Praktikabilität der Nutzung von passiven Systemen insbesondere für die Ortsdosimetrie vom Einzelfall abhängt. Bei Prüfungen durch Sachverständige sind diese passiven Systeme in der Regel nur begrenzt geeignet, da sie aufgrund der Nachweisgrenzen[7] für die Dosis sehr lange Integrationszeiten und außerdem ein Auswertegerät erfordern. Diese Auswertegeräte sind nur begrenzt als mobile Systeme verfügbar, da sie sehr unhandlich und schwer sind.

– Die SSK empfiehlt, auf zählenden oder zählspektrometrischen Messprinzipien beruhende Systeme nur dann einzusetzen, wenn das Ansprechvermögen für die zu messenden Strahlungscharakteristika ausdrücklich geprüft ist.

---

[6] Personendosimeter:
https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_6/6.3/bap/lst23_2n.pdf
Ortsdosimeter:
https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_6/6.3/bap/lst23_3n.pdf

[7] Nachweisgrenze gemäß DIN EN ISO 11929-1: „*Die Nachweisgrenze gibt an, welcher kleinste wahre Wert der Messgröße mit einem anzuwendenden Messverfahren noch nachgewiesen werden kann. Sie erlaubt damit eine Entscheidung darüber, ob das Messverfahren gestellten Anforderungen genügt und damit für den vorgesehenen Messzweck geeignet ist.*“

4 Wissenschaftliche Begründung

Bei den in dieser Empfehlung betrachteten Beschleunigeranlagen werden Photonen durch Abbremsung von quasi monoenergetischen Elektronen mit Energien von 2 MeV bis 25 MeV erzeugt. Die maximale Photonenenergie in den Bremsstrahlungsfeldern ist gleich der Elektronenenergie, die mittlere Energie des Photonenspektrums ist deutlich kleiner. In der Beschleunigereinheit werden die Elektronen in Paketen („Bunches“) durch Hochfrequenzwellen mit etwa 3 GHz beschleunigt (Mikropulsung). Die Hochfrequenzwellen werden mit einer Frequenz von etwa 200 Hz in die Beschleunigungsstrecke eingespeist (Makropulsung).

Medizinisch genutzte Elektronen-Linearbeschleuniger befinden sich in der Regel in Bestrahlungsräumen, die eine hinreichende Abschirmung gegen Photonen- und Elektronenstrahlung gewährleisten müssen. Betreibern, Aufsichtsbehörden und Sachverständigen obliegt es, einen ausreichenden baulichen Strahlenschutz sicherzustellen bzw. diesen zu verifizieren. Hierzu werden unter anderem Messungen der Dosisleistung durchgeführt. Dabei werden i. A. geeichte Messgeräte eingesetzt, die die wesentlichen Anforderungen des Mess- und Eichrechtes (MessEG 2013, MessEV 2014) erfüllen und deren Eignung für einen bestimmten Parameterbereich (Dosis, Dosisleistung, Strahlungsenergie etc.) deshalb über eine Baumusterprüfung bescheinigt ist.

Zu beachten ist, dass auch hinter massiven Abschirmwänden die hochenergetischen Anteile im Strahlungsfeld erhalten bleiben und daher messtechnisch erfasst werden müssen. Monte-Carlo-Simulationen und Messungen zeigten übereinstimmend, dass die Form des Spektrums hinter einer 2 m dicken Betonabschirmung im Wesentlichen der im Isozentrum[8] entspricht und nur die Intensität reduziert wird (Behrens et al. 2021).

Die Strahlungsfelder sind bei Beschleunigeranlagen in der Regel gepulst, was insbesondere bei aktiven Dosimetern (und hier gerade bei Ortsdosisleistungs-Messgeräten) eine technisch bedingte zu niedrige Anzeige – oder gar ein vollständiges Versagen – verursachen kann (Helbig und Henniger 2012). Wesentliche Parameter hierbei sind die Zeitstruktur der Strahlungsemission, d. h. Pulswiederholfrequenz und Pulsdauer, sowie die Dosis pro Puls. Typisch für z. B. medizinische Linearbeschleunigeranlagen sind 4 µs Pulsdauer und 4 ms Pulsabstand. Die Eigenschaft der Pulsung ist im Sinne des Mess- und Eichrechtes als Störeinfluss bei der Messung anzusehen.

Generell sind auch für ungepulste Strahlung bisher für die Baumusterprüfung nur Photonenenergien bis 7 MeV (obere Grenze MessEV, § 1 Absatz 1 Nr. 13) zu betrachten. Für viele Dosimeter, die für kontinuierliche Strahlung baumustergeprüft sind, wurden Anforderungen der Baumusterprüfung sogar nur für niedrigere Maximalenergien (1,3 MeV bis 4,4 MeV) geprüft. Bei einigen Dosimeterarten ist für höhere Energien aus physikalischen Gründen mit einem energiebedingten Überansprechen zu rechnen.

Für die gepulsten Felder an Beschleunigeranlagen existieren gegenwärtig weder baumustergeprüfte Messgeräte noch die zur Prüfung des Ansprechvermögens[9] notwendigen Referenzstrahlungsfelder. Letztere stehen auch international noch nicht zur Verfügung[10]. Das bedeutet, dass ein Gerät, welches für einen bestimmten Parameterbereich eine aktuelle Eichung vorweisen kann, trotzdem für den hier genannten Messzweck (hohe Energien und gepulste Strahlung) ungeeignet sein kann. Die Eichung ist nur gültig für Messungen innerhalb des

---

[8] Punkt, der durch den Schnittpunkt zwischen der Rotationsachse des Tragarms und der Strahlmittelachse eines linearen Beschleunigers festgelegt ist (siehe DIN EN ISO 16645:2020 bzw. DIN Terminologie).

[9] Das Ansprechvermögen ist das Verhältnis von angezeigtem Messwert zu richtigem Wert der Messgröße. Ein Ansprechvermögen kleiner als 1 wird als Unteransprechen und größer als 1 als Überansprechen bezeichnet.

[10] Ein nationales Projekt wird seit Anfang 2020 über das BMU Ressortforschungsprogramm im Rahmen einer Verwaltungsvereinbarung gefördert.

geprüften Parameterbereichs, z. B. max. 7 MeV und den geprüften Bereich der Störeinflüsse (Pulsung).

Bei der Baumusterprüfung wird der Parameterbereich bestimmt, in dem das Messgerät die Anforderungen des Eichrechtes vollumfänglich erfüllt. Ob der im Anwendungsfall vorliegende Parameterbereich (Energie, Pulsung) innerhalb der in der Baumusterprüfung ermittelten Werte liegt, ist vom Anwender zu entscheiden und zu verantworten. Dieser hat die für den Messzweck geeignete Messtechnik auszuwählen. Gerade bei Beschleunigern mit mittleren Energien oberhalb 7 MeV und gepulster Strahlung existiert kein baumustergeprüftes Ortsdosimeter, weder für den Bereich der Energie noch den der Pulsung.

Es kann zum Beispiel sein, dass ein Messgerät für Energien bis 7 MeV geprüft ist, aber für Messungen bei Energien von 12 MeV verwendet werden soll. Ob die Messungen korrekte Ergebnisse erwarten lassen, kann nicht ohne weiteres aus der Baumusterprüfung abgeleitet werden.

Sachverständige können sich oft nur mit verschiedenen Plausibilitätsbetrachtungen (Abstandsgesetz, Variation der Strahlerzeugungsparameter usw.) behelfen, um die angezeigten Messwerte selbst zu überprüfen.

4.1 Funktionsprinzipien und Verhalten von Messgeräten bei hochenergetischer und gepulster Strahlung

Bei den passiven Verfahren (OSL-, TLD-, Film- und Glasdosimeter) wird die Wechselwirkung der ionisierenden Strahlung mit Festkörpern genutzt, um die Dosis integrierend über einen festgelegten Zeitraum zu bestimmen (IEC 62387:2020) Beim Ionisationskammer-Messprinzip werden die durch die ionisierende Strahlung erzeugten Ladungen auf einem Elektrometer gesammelt oder als Strom gemessen. Allerdings kann es hier durch die nachgeschaltete Messelektronik bei gepulster Strahlung Probleme geben, z. B. durch automatische Messbereichsumschaltungen. Daher ist das im Prinzip für gepulste Strahlung geeignete Messverfahren noch keine Garantie für tatsächlich korrekte Ergebnisse. Hier muss das Gesamtsystem betrachtet werden. Bei gasgefüllten Zählrohren, Szintillationsdetektoren und Halbleiterdetektoren werden die erzeugten Impulse in der Auswerteelektronik zählend erfasst. Hierbei kann es zu gerätespezifischen Totzeitverlusten kommen. Diese treten schon bei vergleichsweise geringen mittleren Dosisleistungen von einigen $\mu Sv\,h^{-1}$ oder m $Sv\,h^{-1}$ auf, können jedoch bei kontinuierlicher Strahlung leicht korrigiert werden (IEC 61526:2010).

Im Rahmen der Erarbeitung dieser Empfehlung wurden orientierende Messungen mit handelsüblichen Ortsdosisleistungsmessgeräten im Umfeld medizinischer Beschleuniger durchgeführt. Die Experimente und deren Ergebnisse sind in Anhang A2 beschrieben. Es zeigte sich, dass die untersuchten Messgeräte in den verwendeten Feldern bei niedriger Dosisleistung größtenteils die Ortsdosisleistung überschätzten. Bei den für den Strahlenschutz relevanten Dosisleistungen in einer Größenordnung von $1\,mSv\,h^{-1}$ waren andererseits deutliche Unterschätzungen zu beobachten.

Aus physikalischen Gründen ist bei nicht-gewebeäquivalenten Detektoren, z. B. metallumschlossenen Geiger-Müller-Zählrohren, mit einem Überansprechen des Messgeräts im hochenergetischen Bereich zu rechnen, sofern dies nicht kompensiert wird (Knoll 2000, Kapitel 7 Abb. 7.9). Durch Pulsung kann allerdings ein Unteransprechen hervorgerufen werden.

Dieses Unteransprechen ist bei zählenden Messprinzipien durch die Verarbeitungszeit der Auswerteelektronik zur Detektion eines Ereignisses bedingt. In dieser gerätespezifischen Zeit kann ein weiteres, während dieser Zeitspanne auftretendes Ereignis nicht erfasst werden (Totzeit). Die zur Ereigniszahl proportionale Dosis wird dadurch unterschätzt.

Unabhängig davon kann es durch die Messelektronik zu einer Fehlinterpretation von sehr kurzen Strahlungspulsen kommen. Diese werden u. U. fälschlicherweise als elektromagnetische Störimpulse oder Erschütterungspulse durch einen Sturz verworfen.

Darüber hinaus kann durch Pile-up[11] innerhalb eines Pulses – auch schon bei niedrigen mittleren Dosisleistungen (wenige $\mu Sv\,h^{-1}$) – eine falsche dosimetrische Wichtung (Energiezuordnung) der gemessenen Ereignisse auftreten. Dies ist eine systematische Messabweichung, die nur aufwendig oder gar nicht zu korrigieren ist.

Wann welcher Effekt bei den realen Messungen vorliegt und ob diese Effekte sich in Kombination auch kompensieren könnten, ist ohne umfangreiche weitere Untersuchungen der Messgeräte in verifizierten Referenzfeldern nicht zu entscheiden. Der Wissensstand wird aktuell als nicht ausreichend bewertet.

Für Messungen in Feldern mit höheren mittleren Energien (> 7 MeV) kann es derzeit keine baumustergeprüften Messgeräte geben. Für Messungen bei höheren mittleren Photonenenergien ist der Nutzer auf Angaben der Messgerätehersteller, anerkannter Organisationen oder die in der wissenschaftlichen Literatur angewiesen, welche eine Verwendbarkeit im benötigten Energiebereich bestätigen. Eine Ableitung der Verwendbarkeit aus den Prüfungsergebnissen bei niedrigeren Energien ist nur in sehr begrenzten Situationen möglich. Dafür müssen sowohl die physikalischen Eigenschaften des Dosimeters hinreichend bekannt sein als auch alle relevanten Strahlungsfeldparameter. Nur auf dieser Grundlage sind dann Extrapolationen möglich, die auf jeden Fall mittels Transportrechnungen – auch für alle Komponenten der Sekundärstrahlung – validiert werden sollten.

Liegt keine Baumusterprüfung vor, ist der Verwender eines Messgeräts immer auf Vermutungswirkung[12] (§§ 7, 34 MessEG) angewiesen. Dabei ist es im Allgemeinen leichter nachzuweisen, dass ein Gerät nicht geeignet ist (durch die Kompetenz des Sachverständigen bzgl. nicht plausibler oder fehlerhafter Anzeigewerte), als dass es geeignet ist.

Jenseits der formalrechtlichen Frage des Eignungsnachweises durch die Baumusterprüfungen belegt die Tabelle A-3 mit der Zusammenfassung der im Rahmen der Erarbeitung dieser Empfehlung durchgeführten Messungen, unter welchen Bedingungen (Energie, Pulswiederholfrequenz und Pulsdosis) die aufgeführten Messgeräte ein im Sinne des Strahlenschutzes akzeptables, also konservatives Ergebnis lieferten. Unter vergleichbaren Bedingungen kann die Vermutungswirkung gelten, dass dann auch mit ähnlichen Ergebnissen zu rechnen ist. Bis eine gerätespezifische Eignung für einen bestimmten Parameterbereich bestätigt ist, kann diese Erkenntnis bei der Bewertung der Situation hilfreich sein. Eine grundsätzliche Eignung ist daraus aber nicht ableitbar.

Als Zwischenlösung bleibt zu prüfen, ob bestehende Messgeräte für diesen Messzweck gezielt ertüchtigt werden könnten.

4.2 Prüfung von Messgeräten in gepulsten Strahlungsfeldern

Im Allgemeinen ist die grundsätzliche Eignung eines Messgerätes durch eine vollständige Konformitätsbewertung unter Beachtung des zulässigen Nenngebrauchsbereiches nachgewiesen. Die Messzuverlässigkeit wird durch die Eichung regelmäßig alle zwei Jahre überprüft. Um der Entwicklung von Wissenschaft und Technik Rechnung zu tragen, sind die Baumusterprüfungen auf eine Gültigkeit von zehn Jahren beschränkt. Spätestens dann muss eine erneute

---

[11] Pile-up: Mehrere Ereignisse werden als ein einzelnes Ereignis mit höherer Intensität detektiert (siehe Henniger 2009).

[12] Vermutungswirkung: Es kann davon ausgegangen (vermutet) werden, dass Vorgaben, eine Pflicht, wesentliche Anforderung oder andere Anforderung, z. B. nach MessEG/MessEV, erfüllt sind, wenn die Bedingungen in den genannten Paragraphen oder genannten Regelwerken eingehalten werden.

Prüfung vor dem Inverkehrbringen von neuen Messgräten erfolgen. Bei einer Änderung der wesentlichen Anforderungen des Mess- und Eichgesetzes (MessEG) kann eine erneute Prüfung schon vor Ende dieser Frist notwendig werden. Die alleinige Betrachtung des Messprinzips zur Beurteilung der grundsätzlichen Eignung reicht nicht aus.

Seit 2009 betreibt die PTB eine Anlage zur Prüfung von Dosimetern in gepulsten Strahlungsfeldern bei niedrigen Energien (<125 keV) und hat entsprechende Prüfverfahren und Kriterien für die Eignung von Dosimetern in solchen Strahlungsfeldern entwickelt. Auch das französische Metrologieinstitut LNE-LNHB betreibt eine ähnliche Anlage. Beide Anlagen decken den typischen Parameterbereich medizinischer Röntgenstrahler, u. a. in Bezug auf die Energie, Dosis, mittlere Dosisleistung, Pulsdauer und Pulswiederholfrequenz ab. Die im Betrieb beider Anlagen gewonnenen Erfahrungen führten zur Erarbeitung der Technischen Spezifikation (ISO/TS 18090-1), die den Begriff „gepulste Strahlung“ definiert und die Eigenschaften beschreibt, die ein gepulster Referenz-Röntgenstrahler erfüllen sollte, und wie diese überprüft werden können.

Die Problematik der gepulsten Felder in der Personendosimetrie wird im EURADOS-Report 2012-02 zusammengefasst (Vanhavere et al. 2012). Die Untersuchung dieser Problematik fand im Rahmen des ORAMED-Projektes statt. Eine Lösung für die sichere Bestimmung der Personendosis (Ortsdosimetrie wird dort nicht betrachtet) bzw. die metrologische Rückführung der Dosisleistung in gepulsten Photonenfelder bei hohen Energien kann daraus aber nicht abgeleitet werden, denn es wurden zum einen Vergleichsmessungen von aktiven Personendosimetern (APDs) in kontinuierlichen Feldern (im Vergleich zu einen Referenzdosimeter) nach IEC 61526 und zum anderen dieselben APDs in einem gepulsten Feld mit niedrigen Energien (< 70 keV) und einer Pulsdauer von 20 ms durchgeführt. Diese Ergebnisse sind nicht auf den Fall hoher Energien übertragbar, geben aber bereits wichtige Hinweise auf das veränderte Ansprechvermögen von APDs in gepulsten Feldern, insbesondere die Unterschätzung der Dosisleistung bzw. die Möglichkeit des völligen Versagens der Messtechnik (keine Anzeige der zusätzlichen Dosisleistung).

Für die Bereitstellung von hochenergetischen gepulsten Referenzstrahlungsfeldern besteht keine gesetzliche Grundlage in Deutschland. International gibt es kein solches Referenzfeld. Mit einer Verwaltungsvereinbarung, im Rahmen der Ressortforschung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), wird die PTB ein solches Referenzfeld entwickeln: „Aufbau und Charakterisierung eines Referenzfeldes zur Sicherstellung des Strahlenschutzes an Beschleunigeranlagen in Medizin und Forschung und zur Prüfung und Kalibrierung entsprechender Messgeräte“, Kennzeichen 3619S22364, Laufzeit 01.01.2020 bis 31.12.2022.

5 Literatur

Ankerhold 2006 — Ankerhold U. Optimisation of a secondary standard chamber for the measurement of the ambient dose equivalent, *H**(10), for low photon energies. Radiat. Prot. Dosim. 2006; 118(1):16–21, doi: 10.1093/rpd/nci334, Epub 2005/08/11

Behrens et al. 2021 — Behrens R, Zutz H, Busse J. Spectrometry of Pulsed Photon Radiation. Sensor and Measurement Science International 2021

BMU 2020 — Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung: Jahresbericht 2019. http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2022041232235, Dezember 2020

Brinkmann 2012 — Brinkmann B. Internationales Wörterbuch der Metrologie (VIM). Deutsch-englische Fassung. ISO/IEC-Leitfaden 99:2007, 4. Aufl. Beuth-Verlag, Berlin 2012

Caresana et al. 2014 — Caresana M, Denker A, Esposito A, Ferrarini M., Golnik N, Hohmann E, Leuschner A, Luszik-Bhadra M, Manessi G, Mayer S, Ott K, Röhrich J, Silari M, Trompier F, Volnhals M, Wielunski M. Intercomparison of radiation protection instrumentation in a pulsed neutron field, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 737, 2014, Pages 203-213, ISSN 0168-9002, https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.11.073

DIN 6800-2:2020-08 — Deutsche Institut für Normung e.V. (DIN). Dosismessverfahren nach der Sondenmethode für Photonen- und Elektronenstrahlung - Teil 2: Dosimetrie hochenergetischer Photonen- und Elektronenstrahlung mit Ionisationskammern. https://dx.doi.org/10.31030/3152276

DIN EN ISO 11929-1 — Deutsche Institut für Normung e.V. (DIN). Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Überdeckungsintervalls) bei Messungen ionisierender Strahlung - Grundlagen und Anwendungen - Teil 1: Elementare Anwendungen (ISO 11929-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 11929-1:2021

DIN EN ISO 16645:2020 — Deutsche Institut für Normung e.V. (DIN). Strahlenschutz - Medizinische Elektronenbeschleuniger-Anlagen - Anforderungen und Empfehlungen an die Ausführung der Abschirmung und deren Bewertung (ISO 16645:2016, korrigierte Fassung 2016-11-15); Deutsche Fassung EN ISO 16645:2019. https://dx.doi.org/10.31030/3161590

Helbig und Henniger 2012 — Helbig K, Henniger J. Dead-time losses in pulsed radiation fields. Radiation Measurements, vol. 47, no. 5, pp. 383-388, ISSN 1350-4487, https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2012.03.002, May 2012

Henniger 2009	Henniger, J. Dosimetrie mit elektronischen Dosimetern in gepulsten Photonen-Strahlungsfeldern: Abschlussbericht; Teil 1; Vorhaben 3608S02002
Hupe und Ankerhold 2006	Hupe O, Ankerhold U. Determination of ambient and personal dose equivalent for personnel and cargo security screening. Radiation Protection Dosimetry. 2006 May; 121 (4):429-37, doi: 10.1093/rpd/ncl047
IEC 61526:2010	Radiation protection instrumentation – Measurement of personal dose equivalents $H_p(10)$ and $H_p(0,07)$ for X, gamma, neutron and beta radiations – Direct reading personal dose equivalent meters
IEC 62387:2020	Radiation protection instrumentation - Dosimetry systems with integrating passive detectors for individual, workplace and environmental monitoring of photon and beta radiation
ISO 4037-1:2019	International Organization for Standardization (ISO). Strahlenschutz – Röntgen- und Gamma-Referenzstrahlungsfelder zur Kalibrierung von Dosimetern und Dosisleistungsmessgeräten und zur Bestimmung ihres Ansprechvermögens als Funktion der Photonenenergie. Teil 1: Strahlungseigenschaften und Erzeugungsmethoden (ISO 4037-1:2019). Ausgabedatum: 2019-11
ISO/TS 18090-1	Radiological protection - Characteristics of reference pulsed radiation - Part 1: Photon radiation
JCGM 2012	Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). 3rd edition, 2008 version with minor corrections. JCGM 200:2012. https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_200_2012.pdf/f0e1ad45-d337-bbeb-53a6-15fe649d0ff1?version=1.11&download=true
Knoll 2000	Knoll GF. Radiation Detection and Measurement, Third Edition 2000, Wiley India Pvt. Ltd. (1. Januar 2009), ISBN 8126522607
Krieger 2012	Krieger, Hanno. Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes. 4. Aufl, ISBN 3834818151; Radiological Safety Aspects of Operation of Electron Linear Accelerators, Technical Report Series 188, IAEA
Leuschner 2005	Leuschner A. The ^{12}B counter: an active dosemeter for high-energy neutrons, Radiat. Prot. Dosim. 116 (2005) 144
MessEG 2013	Gesetz über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt, ihre Verwendung und Eichung sowie über Fertigpackungen (Mess- und Eichgesetz - MessEG) vom 25. Juli 2013 (BGBl. I S. 2722, 2723), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 9. Juni 2021 (BGBl. I S. 1663) geändert worden ist

MessEG 2013	Gesetz über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt, ihre Verwendung und Eichung sowie über Fertigpackungen (Mess- und Eichgesetz - MessEG) vom 25. Juli 2013 (BGBl. I S. 2722, 2723), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 9. Juni 2021 (BGBl. I S. 1663) geändert worden ist
MessEV 2014	Verordnung über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt sowie über ihre Verwendung und Eichung (Mess- und Eichverordnung - MessEV) vom 11. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2010, 2011), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 26. Oktober 2021 (BGBl. I S. 4742) geändert worden ist
MessEV 2014	Verordnung über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt sowie über ihre Verwendung und Eichung (Mess- und Eichverordnung - MessEV) vom 11. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2010, 2011), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 26. Oktober 2021 (BGBl. I S. 4742) geändert worden ist
Richtlinie 2014/31/EU	Richtlinie 2014/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten betreffend die Bereitstellung nichtselbsttätiger Waagen auf dem Markt
Richtlinie 2014/32/EU	**Fehler! Linkreferenz ungültig.**
SSK 2016	Strahlenschutzkommission (SSK). Methodik zur Berücksichtigung von Messunsicherheiten bei messtechnischen Prüfungen im Geltungsbereich der Röntgenverordnung und der Strahlenschutzverordnung. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 283. Sitzung der SSK am 15./16. September 2016. urn:nbn:de:101:1-201703064227. Bekanntmachung im BAnz AT 24.02.2017 B2
StrlSchG 2017	Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz - StrlSchG) vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 20. Mai 2021 (BGBl. I S. 1194) geändert worden ist
StrlSchV 2018	Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 8. Oktober 2021 (BGBl. I S. 4645) geändert worden ist

Vanhavere et al. 2012 Vanhavere F, Carinou E, Gualdrini G, Clairand I, Sans Merce M, Ginjaume M, Nikodemova D, Jankowski J, Bordy J-M, Rimpler A, Wach S, Martin P Struelens L, Krim S, Koukorava C, Ferrari P, Mariotti F, Fantuzzi E, Donadille L, Itié C, Ruiz N, Carnicer A, Fulop M, Domienik J, Brodecki M, Daures J, Barth I, Bilski P: ORAMED: Optimization of Radiation Protection of Medical Staff, EURADOS Report 2012-02, ISSN 2226-8057, ISBN 978-3-943701-01-2

Anhang

A1 Gesetzliches Messwesen

Das gesetzliche Messwesen hat das Ziel, ein hochentwickeltes und zuverlässiges Messwesen als Grundlage für neue Technologien, für einen fairen Handel sowie für die Sicherung der Lebensqualität der Bürgerinnen und Bürger bereit zu stellen. Diesem Ziel und der angemessenen Berücksichtigung technischer Weiterentwicklungen dienen die umfangreichen Vorschriften des gesetzlichen Messwesens. In Deutschland unterliegen über 150 verschiedene Messgerätearten dem Mess- und Eichrecht. Sie betreffen alle Lebensbereiche. Das **Fehler! Linkreferenz ungültig.** ist zum 1. Januar 2015 in Kraft getreten (MessEG 2013). Zum 1. Januar 2015 trat ebenfalls eine neue **Fehler! Linkreferenz ungültig.** in Kraft (MessEV 2014). Mit dem neuen Mess- und Eichrecht wurden u. a. die europäischen Richtlinien (Richtlinie 2014/31/EU9 und Richtlinie 2014/32/EU) umgesetzt. Die Neuregelungen beinhalten folgende Eckpunkte:

- Nunmehr gelten für europäisch und national geregelte Messgeräte die gleichen Anforderungen, wenn sie auf den Markt gebracht werden. Das bringt eine deutliche Vereinfachung für die Wirtschaftsakteure.
- Die innerstaatliche Bauartzulassung und die Ersteichung von national geregelten Messgeräten wurden seit dem 1. Januar 2015 durch eine Konformitätsbewertung ersetzt. Diese werden von Konformitätsbewertungsstellen durchgeführt.
- Die Aufgaben der Nacheichung von verwendeten Messgeräten bleiben auch zukünftig im bisherigen Umfang den Eichbehörden der Länder und den staatlich anerkannten Prüfstellen vorbehalten. Die Eichung ist die amtliche Prüfung eines Messgeräts in periodischen Abständen oder aus Anlass eines Fehlers oder eines Eingriffs in das Messgerät.

Das „Verzeichnis gemäß § 18 Absatz 1 Mess- und Eichgesetz der anerkannten Konformitätsbewertungsstellen für national geregelte Messgeräte“ ist unter dem angegeben Link[13] zu finden.

Konformitätsbewertungsstellen für europäisch geregelte Messgeräte finden sich in der Nando-Datenbank der Europäischen Kommission. Das Angebot der Konformitätsbewertungsstelle der PTB findet sich unter dem angegebenen Link[14].

Konformitätsbewertungen von national geregelten Messgeräten nach dem Gesetz über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt, ihre Verwendung und Eichung sowie über Fertigpackungen (Mess- und Eichgesetz – MessEG) umfasst die Strahlenschutzmessgeräte für Photonen und Diagnostikdosimeter. Die Konformitätsbewertung ist der PTB exklusiv übertragen. Das Bestehen der Baumusterprüfung (Modul B) ist Voraussetzung für die vollständige Konformitätsbewertung (Modul B & Modul F) eines Strahlenschutzdosimeters. Die vollständige Konformitätsbewertung ist die Voraussetzung für das Inverkehrbringen und die spätere Eichung.

[13] https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/verzeichnis-anerkannte-konformitaetsbewertungsstellen-national-geregelte-messgeraete.pdf

[14] https://www.ptb.de/cms/metrologische-dienstleistungen/kbs.html

A2 Orientierende Messungen mit Ortsdosisleistungsmessgeräten im Umfeld von Beschleunigeranlagen

Aufgrund fehlender belastbarer Daten wurden von Mitgliedern der Arbeitsgruppe mit verschiedenen Dosimetern und einem Referenzinstrument umfangreiche Messungen in hochenergetischen gepulsten Strahlungsfeldern im Umfeld medizinischer Beschleunigeranlagen durchgeführt. Die Experimente und die Ergebnisse sind nachfolgend zusammengefasst.

Die Messungen erfolgten an Beschleunigeranlagen dreier strahlentherapeutischer Einrichtungen an verschiedenen Standorten in Deutschland. Die Messorte wurden nach den erwarteten Dosisleistungen, ihrer Erreichbarkeit und Zugänglichkeit ausgewählt. Orientierende Messungen bei Strahlungsqualitäten infolge von Beschleunigerspannungen bis zu 18 MV wurden außerhalb der Bestrahlungsräume hinter der jeweiligen Strahlenschutzabschirmung vorgenommen. Die bei den Messungen verwendeten Messgeräte sind in Tabelle A-1 aufgeführt. Eine systematische Erfassung aller in der Praxis befindlichen Energie- und Pulsverteilungen experimentell durchzuführen, war nicht das Ziel der Messungen.

Die Auswahl der Messgeräte ergab sich aus der Verfügbarkeit für die beabsichtigten Messungen im Rahmen der Erarbeitung dieser Empfehlung. Die PTB stellte das Referenzmessgerät zur Verfügung, mit dem ein Referenzwert für die Ortsdosisleistung bestimmt wurde. Bei diesem Referenzmessgerät (Bezeichnung HS01, vgl. Hupe und Ankerhold 2006, Ankerhold 2006) handelt es sich um eine integrierende Ionisationskammer, die ein Sekundärnormal[15] für die Messgröße Umgebungs-Äquivalentdosis darstellt. Die Kalibrierung erfolgte rückführbar zum Primärnormal der PTB. Eine Kalibrierung in einem hochenergetischen gepulsten Referenzfeld ist noch nicht möglich, da ein solches bisher nicht vorhanden ist. Die Beeinflussung durch Pulsung wurde durch entsprechende Messungen und Parameter-Variationen bei den Messungen untersucht. Der Einfluss der Pulsung war bei den Messungen vernachlässigbar, da trotz der hohen Puls-Dosisleistung die bei der Messung mit der Ionisationskammer begrenzende Pulsdosis gering war. Die Ionisationskammer wurde auf eine geringe Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens optimiert. Das Ansprechvermögen der HS01 im Energiebereich bis 7 MeV zeigt Abbildung A-1. Nach Ankerhold (Ankerhold 2006) kann das zugrundeliegende Messprinzip auch bei den hier zu erwartenden höheren Energien verwendet werden.

[15] Die genaueste Referenz, die in einem Land existiert, nennt man „Nationales Normal“. Gemäß der Definition 5.3 im VIM (Brinkmann 2012) ist ein Nationales Normal ein Normal, das durch eine nationale Behörde anerkannt ist, in einem Land oder einer Volkswirtschaft als Grundlage dafür zu dienen, Größenwerte anderen Normalen für die betreffende Größenart zuzuordnen. Nationale Normale werden in Nationalen Metrologie Instituten (NMI) betrieben, in Deutschland beispielsweise von der PTB. Für Messgrößen, welche das NMI selbst nicht abdeckt, werden häufig spezialisierte Institute formell designiert („Designiertes Institut“ = DI). Diese DIs unterstützen das NMI, nationale Normale für die wichtigsten in dem Land benötigten Messgrößen bereitzustellen. Nationale Normale können Primärnormale sein. Gerade in kleineren NMIs begnügt man sich aber häufig damit, die Einheit über ein Sekundärnormal oder ein Normal noch niedrigerer Ordnung zu bewahren, welches auf ein Primärnormal eines anderen Landes rückgeführt ist. Da Primärnormale häufig nicht transportabel sind, nutzt man für wichtige Messungen national auch Sekundärnormale.

Tab. A-1: verwendete Messgeräte für kontinuierliche Strahlung

Dosimetertyp	**Messprinzip**	**Energiebereich**	**Dosisleistungsbereich**
mit Bauartzulassung bzw. Baumusterprüfung			
FH40G-10	Proportionalzählrohr, zählendes Messprinzip	30 keV bis 4400 keV	0,5 µSv h^{-1} bis 1 Sv h^{-1}
FH40G-L10	Proportionalzählrohr, zählendes Messprinzip	30 keV bis 4400 keV	0,5 µSv h^{-1} bis 0,1 Sv h^{-1}
GammaTwin	GM-Zählrohr, zählendes Messprinzip	45 keV bis 1300 keV	0,5 µSv h^{-1} bis 70 mSv h^{-1}
X5Cplus	GM-Zählrohr, zählendes Messprinzip	40 keV bis 1300 keV	1 µSv h^{-1} bis 20 mSv h^{-1}
6150AD6/E	GM-Zählrohr, zählendes Messprinzip	60 keV bis 1300 keV	0,5 µSv h^{-1} bis 9,99 mSv h^{-1}
6150AD-b/E	Szintillator, zählendes Messprinzip	20 keV bis 7000 keV	100 nSv h^{-1} bis 100 µSv h^{-1}
ohne Baumusterprüfung			
FHT 192	Ionisationskammer	nicht definiert	nicht definiert
GammaTRACER	Zählrohr, zählendes Messprinzip	nicht definiert	nicht definiert

In Tabelle A-2 sind die Daten zu den Strahlungsqualitäten und Pulswiederholfrequenzen für die verwendeten Beschleuniger zusammengestellt.

Tab. A-2: verwendete Beschleuniger

Ort, Beschleuniger	**Beschleunigerspannung in MV (Strahlungsqualität bei Photonen)**	**Pulswiederholfrequenz[16] in Hz**
Beschleuniger A, **Varian Clinac 2100 C/D**	18	180
Beschleuniger B, **Siemens Artiste**	6 15	220
Beschleuniger C, **Siemens Oncor Expression**	6 15	200 (Herstellerangabe[17]) 125 (Herstellerangabe[14])

[16] Die Pulswiderholfrequenz ist abhängig von den Beschleunigereinstellungen und liegt typischerweise im Bereich 50 Hz bis 400 Hz. Die exakte Pulsdauer des Makropulses wird nicht angegeben, liegt meist bei ca. 3 µs bis 4 µs. Angaben zur Mikropulsung dieser Makropulse waren nicht verfügbar.

[17] Vermutlich beide jedoch 220 Hz, bestimmt aus parallel erfolgten Messungen einer anderen Gruppe der TU Dresden

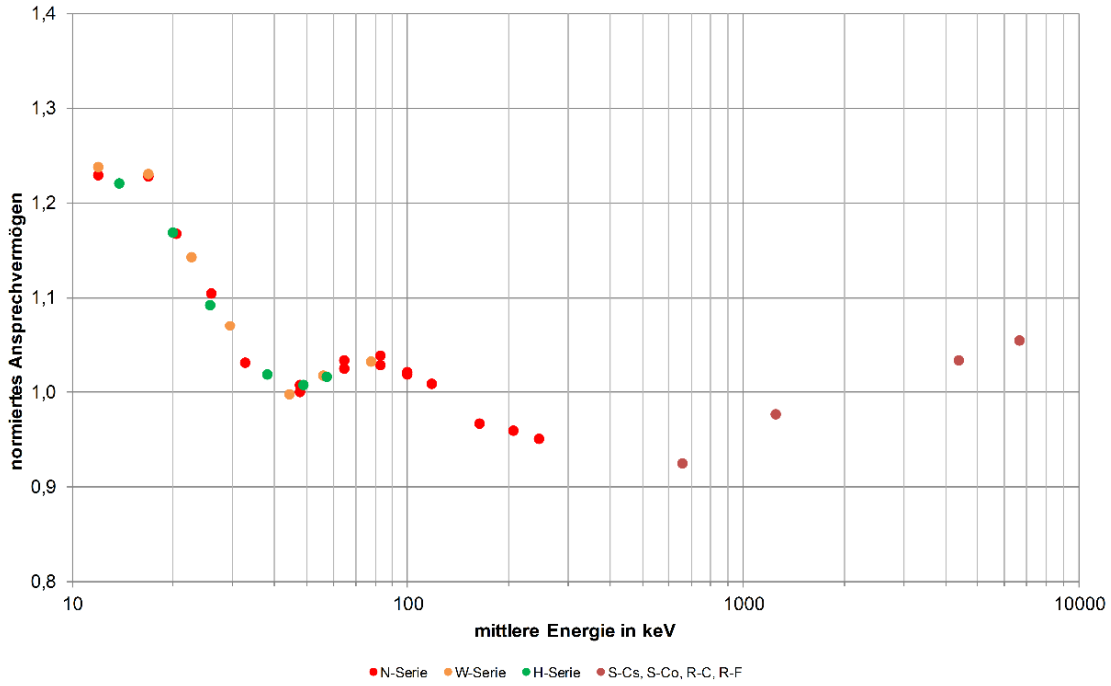

Abb. A-1: Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens des Referenzmessgerätes HS 01 mit Makrolon-Kappe, gemessen bei verschiedenen Röntgen-Strahlungsqualitäten (N-, W-, und H-Serie) nach ISO 4037-1 und normiert auf den Messwert bei der Strahlungsqualität N-60 (mittlere Photonenenergie von ca. 48 keV.) Die erweiterte relative Messunsicherheit (k = 2) beträgt u = 4 % bzw. u = 7 % bei R-C und R-F.

Mit dem Referenzmessgerät wird bei der Messung der jeweilige Referenzwert ermittelt. Der Referenzwert dient zur Bestimmung des Ansprechvermögens der an der Messung beteiligten Ortsdosimeter.

Die aktuellen elektronischen Strahlenschutzdosimeter sind für die nicht-gepulsten Strahlungsfelder der Kernkraftwerke entwickelt und können die Pulsung nicht auflösen. Sie basieren meist auf einer kostengünstigen, langsamen Zählelektronik. Daher waren die zur Verfügung stehenden Angaben zur Pulsung hier ausreichend gewesen.

In Tabelle A-3 sind die ermittelten Ergebnisse zusammengefasst. Angegeben ist das relative Ansprechvermögen, d. h. das Verhältnis von angezeigtem Messwert des Messgeräts und dem Referenzwert für Strahlungsqualitäten der Beschleuniger von 6 MV, 15 MV und 18 MV. Es wurde an drei Einrichtungen, bezeichnet als A, B und C, Messungen durchgeführt. Es wurde teilweise bei gleichen Beschleunigerparametern an unterschiedlichen Messorten (Positionen P1 und P2) gemessen.

Tab. A-3: Zusammenfassung der Messergebnisse. Die verschiedenen Einrichtungen sind als A, B und C bezeichnet, unterschiedliche Messorte bei derselben Einrichtung als Positionen P1 und P2; u bezeichnet die Unsicherheit.

	Referenzwerte und nominelle Beschleunigerparameter							
	6 MV			15 MV			18 MV	
	B P1	C P1	C P2	B P1	C P1	C P2	A P1	A P2
Referenzwert $\dot{H}^*(10)$ in µSv h^{-1}	0,6	44	57	6,9	749	948	3,6	6,7
u($\dot{H}^*(10)$) in %	± 25	± 20	± 20	± 20	± 20	± 20	± 20	± 20
Pulswieder-holfrequenz in Hz	220	200	200	220	125	125	180	180
berechnete Puls-Dosis in pSv[18]	0,75	61	79	8,7	1664	2106	5,5	10,3
Messgeräte	**Relatives Ansprechvermögen**							
X5Cplus	1,90	---	---	1,82	---	---	1,25	1,27
GammaTwin	1,64	1,25	1,33	1,85	0,21	0,16	1,24	1,10
FH 40 G-L10	---	1,03	1,13	---	0,70	0,60	---	---
FH 40 G-10	1,30	---	---	1,26	---	---	0,95	0,85
6150AD6/E	---	---	---	---	---	0,14	---	---
Szint.6150AD	---	1,68	1,43	---	---	---	0,87	---
FHT 192+FHT 6020	1,5	---	---	1,26	---	---	---	---
GammaTracer	2,41	---	---	2,1	---	---	---	---

Tabelle A-3 zeigt, dass die Messgeräte die Ortsdosisleistung in vielen der oben genannten Messungen überschätzen (Ansprechvermögen > 1,0). Hieraus abgeleitete Maßnahmen für den Strahlenschutz sind demnach konservativ und in diesem Sinne unproblematisch. Das Überansprechen der Messgeräte liegt möglicherweise in der Energieabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit, die für höherenergetische Photonen ansteigt. Das Überansprechen der Geräte lässt sich auch aus den in den Gebrauchsanweisungen bzw. in den Baumusterprüfungen dokumentierten Energieabhängigkeiten der Geräte ablesen.

In einigen Konstellationen mit höherer Dosisleistung und Photonenenergie sind auch u. U. erhebliche Unterschätzungen zu verzeichnen (Ansprechvermögen < 1,0), d. h. die für den Strahlenschutz daraus abgeleiteten Maßnahmen sind nicht konservativ. Vermutlich werden diese Unterschätzungen durch die Pulsung des Strahlungsfeldes verursacht. In diesen Fällen kann auf

[18] Nach gemessener Dosisleistung und verfügbaren Herstellerangaben zur Zeitstruktur der Pulse.

Grundlage dieser Messwerte nicht nachgewiesen werden, dass der bauliche Strahlenschutz korrekt ausgeführt wurde und die Grenzwerte eingehalten werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass nach den Ergebnissen aus Tabelle A-3 eine Angabe von allgemeinen Korrekturfaktoren für bestimmte Geräte nicht möglich ist.

Für eine systematische Erfassung aller Parameter reicht die Datenlage nicht aus. Einige Beispiele dazu:

- Durch den Einfluss des Wandmaterials der Detektoren könnte ein monotoner Anstieg oberhalb von 2 MeV erwartet werden. Die Messungen zeigen aber ein Maximum bei 6 MV und eine Abnahme bei 15 MV Beschleunigungsspannung.
- Neben den Einflussgrößen Energie und Pulsung könnten unter anderem die Zählstatistik oder das Verhältnis von Pulswiederholfrequenz des Beschleunigers zum Auslesetakt des Dosimeters weitere Einflussgrößen sein. Diese Einflussgrößen wurden nicht erfasst.
- In der folgenden Abbildung sind beispielhaft die energieabhängigen Ansprechvermögen für die Dosimeter FH40 G10 und FH40 G-L10 dargestellt, welche bei den Messungen verwendet wurden. Sie lassen ein Überansprechen bei hohen Energien erwarten, welches nicht immer beobachtet wurde.

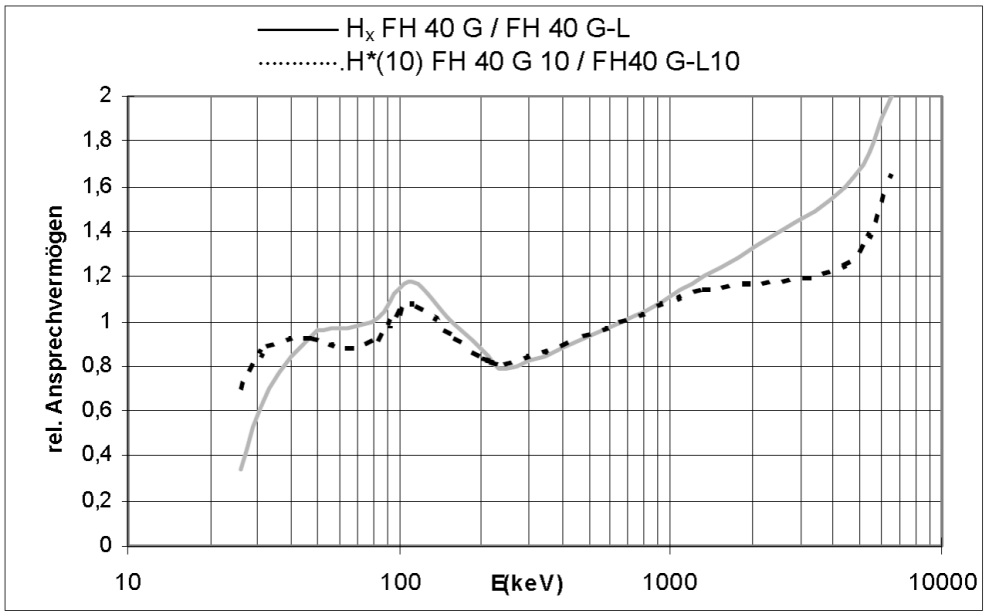

Abb. A-2: Relatives Ansprechvermögen abhängig von der Photonenenergie bezogen auf ^{137}Cs (für FH 40 G, FH 40 G-L, FH 40 G-L10 und FH 40 G-10 PTB baumustergeprüft)

Damit ist eine Verallgemeinerung der Ergebnisse nur begrenzt möglich. Belegt ist, dass es zu Überschätzungen und in bestimmten Parameterkonfigurationen zu Unterschätzungen kommen kann und dass die aktuelle Kenntnis über das Verhalten der Messgeräte im Parameterraum (Energie, Pulswiederholfrequenz und Pulsdosis) nicht ausreicht, um ihr Verhalten zuverlässig vorherzusagen und Kompensationseffekte aus- oder einzuschließen.

Diese Empfehlung beschäftigt sich im Wesentlichen mit Photonenstrahlungsfeldern. Für eine umfassende Betrachtung der Strahlenschutzmessungen an medizinischen Beschleunigeranlagen darf die Aktivierung ursächlich durch den Kernphotoeffekt[19] und das dadurch erzeugte Strahlungsfeld nicht vernachlässigt werden. Dieses Strahlungsfeld ist nicht gepulst und kann mit der existierenden Messtechnik gut erfasst werden.

Ursächlich für die Aktivierung ist der Photoeffekt am Atomkern (Kernphotoeffekt), bei dem Kernprodukte, z. B. Protonen, Neutronen oder Alphateilchen, aus dem Kern gestoßen werden. Der Kernphotoeffekt tritt ab Energien um 2,2 MeV auf und nimmt, da moderne Linearbeschleuniger Energien im Bereich von 4 MeV bis 25 MeV verwenden, folglich eine bedeutende Rolle im Strahlenschutz ein: Zum einen erfolgt eine Aktivierung der Bauteile des Linearbeschleunigers, insbesondere solcher, an denen die Photonenstrahlung wechselwirkt (z. B. Blenden, Kollimatoren, Target, Keilfilter). Zum anderen wird die Luft (und auch der Patient), die sich während der Bestrahlung im Therapiefeld befindet, aktiviert. Die Art der produzierten Radionuklide resultiert aus den verwendeten Materialien. Der Großteil der aktivierten Materialien besitzt eine eher geringe Halbwertszeit im Bereich von einigen Sekunden bis Minuten. Seltener entstehen aufgrund von Materialverunreinigungen auch langlebige Radionuklide (z. B. ^{60}Co).

Die Aktivierungsschwelle liegt bei ca. 2,2 MeV, allerdings sind an Linearbeschleunigern aufgrund der Materialabhängigkeit der Schwelle eher Energien ab 10 MeV strahlenschutzrelevant. Werden hauptsächlich Photonenenergien im Bereich von ca. 6 MeV bis 10 MeV verwendet, ist dieser Effekt deutlich kleiner als bei Energien im Bereich von ca. 15 MeV bis 25 MeV. Zur Optimierung des Strahlenschutzes ist ein definierter Luftumsatz vorgeschrieben. Die Belüftung sorgt für eine Verminderung der Personalexposition durch die Luft. Übliche Dosisleistungen im Bestrahlungsbunker liegen als Folge der Aktivierung bei ca. 0,1 $\mu Sv\,h^{-1}$ bis 10 $\mu Sv\,h^{-1}$. Bei den im Rahmen des Beratungsauftrags durchgeführten Messungen wurde diese Komponente deshalb nicht experimentell untersucht.

Zur Vollständigkeit sei erwähnt, dass es an Hochenergie-Beschleunigeranlagen wie z. B. am DESY, GSI oder CERN beobachtbare Strahlverluste gibt, die zu einer Neutronendosisleistung von 20 $\mu Sv\,h^{-1}$ bis 40 $\mu Sv\,h^{-1}$ führen können. Diese Dosisleistung wird mit passiven, integrierenden Detektoren – z. B. mit TLDs oder mit Blasendetektoren – gemessen. Hier ist eine ähnliche Problematik wie bei den gepulsten Photonenfeldern zu beobachten: Wegen der hohen gerätespezifischen Totzeit, bedingt durch die elektronische Signalverarbeitung in der kurzen Pulszeit, versagen die aktiven Messgeräte i. A. (Leuschner 2005, Caresana et al. 2014). Die Energie liegt im GeV-Bereich. Des Weiteren liegen diese Anlagen auch nicht im Rahmen des Beratungsauftrags, da dieser sich auf die häufigsten Anwendungsfälle (Medizin) beschränkt.

[19] Zum Kernphotoeffekt, also der (ɣ,n)-Reaktion liegt die Schwellenergie bei der Bindungsenergie des am schwächsten gebundenen Nukleons im Kern, bei ca. 2 MeV. Relevant für den Strahlenschutz wird es ab einer Beschleunigungsspannung von ca. 7 MV bei Elektronenbeschleunigern (siehe Krieger 2012).