

Sonderdruck „Gleitschatten-Filmdosimetrie“ aus:

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben St.Sch.4059

Weiterentwicklung von Personendosimetern zur Verwendung bei amtlichen Meßstellen einschließlich deren Erprobung

P. Ambrosi, J. Böhm, G. Hilgers, M. Jordan, K.-H. Ritzenhoff

30.06.1996

Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen, Dortmund
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

INHALT

3 FILMDOSIMETRIE	15
3.1 Die Gleitschattenmethode.....	15
3.2 Aufbau der neuen Filmdosimeterkassette.....	17
3.3 Ansprechvermögen der Sonde bezüglich der Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ und der Photonen- Äquivalentdosis H_x	18
3.4 Untersuchung einiger Einflußgrößen auf die Dosisbestimmung.....	21
3.4.1 Dosisabhängigkeit des Ansprechvermögens.....	21
3.4.2 Verschiebung der Meßfläche.....	22
3.4.3 Ansprechvermögen für verschiedene Phantome.....	23
3.4.4 Wahl des Kunststoffmaterials der Kassette.....	24
3.5 Zusatzinformationen.....	25
3.5.1 Energieanalyse.....	25
3.5.2 Beta-Exposition.....	26
3.6 Densitometermeßplatz.....	26

3 Filmdosimetrie

3.1 Die Gleitschattenmethode

Für durchdringende Strahlung wird von der ICRU die Personendosismessgröße $H_p(10)$ als Messgröße empfohlen und verbindlich in der Euratom Grundnorm ("Richtlinie zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlungen") vom 13.5.96 verbindlich festgelegt [Euratom, 1996]. Zur Messung von $H_p(10)$ wurde ein Filmdosimeter entwickelt, das auf einem völlig neuartigen Konstruktionsprinzip beruht, nämlich der Gleitschattenmethode [Ambrosi, 1995].

Die Gleitschattenmethode ermöglicht eine Optimierung des Ansprechvermögens von Dosimetern für Strahlung aus verschiedenen Einfallsrichtungen. Bild 9 zeigt das Prinzip der Gleitschattenmethode. Wesentlich für die korrekte Funktion ist, dass das Gleitschattenfilter und der Detektor kreisförmig und von gleichem Durchmesser sind und dass das Gleitschattenfilter im Abstand d vor dem Detektor angebracht ist. Bei senkrecht einfallender Strahlung deckt der Schatten des Filters den Detektor vollständig ab. Bei schräg einfallender Strahlung fällt der Filterschatten teilweise neben den Detektor und dieser ist partiell der ungeschwächten Strahlung ausgesetzt. Je schräger der Einfallswinkel wird, um so weiter gleitet der Filterschatten zur Seite, und das Ansprechvermögen des Detektors wächst mit wachsendem Einfallswinkel.

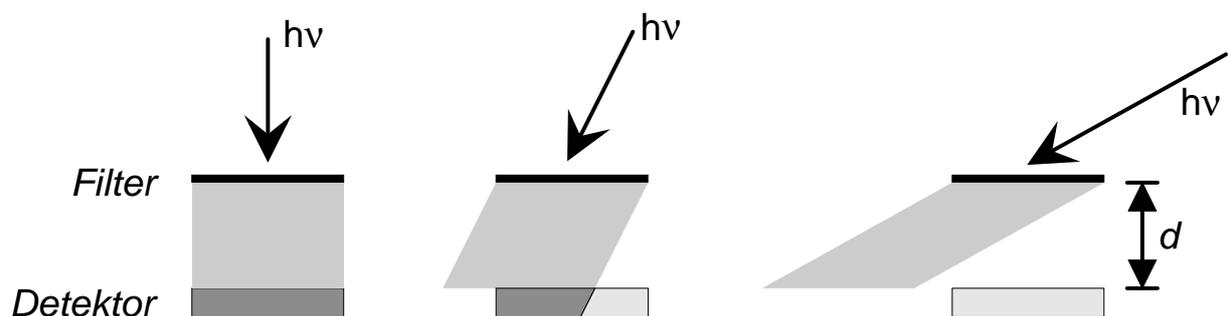


Bild 9: Prinzip der Gleitschattenmethode. Mit zunehmend schrägem Einfallswinkel gleitet der Filterschatten, abhängig vom Abstand d zwischen Filter und Detektor, über den Detektor und bedeckt ihn immer weniger.

Ein konventionelles Filter ist im Gegensatz zu einem Gleitschattenfilter viel größer als der Detektor und möglichst dicht vor dem Detektor angebracht. Das Ansprechvermögen eines konventionell gefilterten Detektors sinkt mit wachsendem Einfallswinkel, da die Absorption durch den längeren Strahlweg im Filter mit wachsendem Einfallswinkel ansteigt, und steht im Gegensatz zur Winkelabhängigkeit eines mit einem Gleitschattenfilter versehenen Detektors, so dass sich durch die Kombination eines Gleitschattenfilters mit einem konventionellen Filter die gegensätzlichen Winkelabhängigkeiten der Ansprechvermögen kompensieren lassen. Wie diese Kompensation genau erfolgt, hängt von den Materialien und der Geometrie der Filter ab. Bild 10 zeigt die Dosisverteilungen eines solchen Kombinationsfilters in der Detektorebene bei senkrechtem und bei schrägem Strahleneinfall. Deutlich ist zu sehen, dass der Detektor bei schrägem Einfall über Bereiche unterschiedlicher Dosis mittelt und dass daher weder Größe noch Position des Detektors verändert werden dürfen.

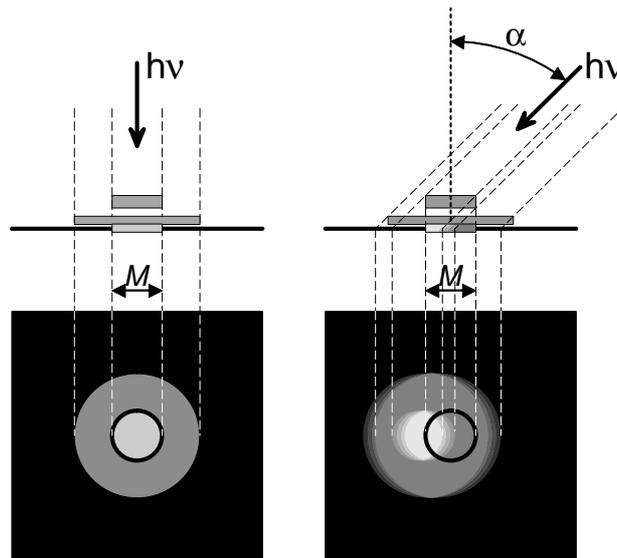


Bild 10: Dosisverteilung in der Detektorebene bei senkrechtem und bei schrägem Strahleneinfall für eine Kombination aus Gleitschattenfilter (oberes Filter) und konventionellem Filter (unteres Filter). Die Abbildung spiegelt die Filmschwärzung wider: je schwärzer der Film, um so höher die Dosis. M : Detektorfläche, in der die optische Dichte gemessen wird.

3.2 Aufbau der neuen Filmdosimeterkassette

In der Filmkassette werden zwei nach der Gleitschattenmethode optimierte Filter, ein Plastikfilter und ein Metallfilter, verwendet (Bild 11). Sie sind symmetrisch zum Film angeordnet. Die "Detektoren" sind kreisförmige Filmflächen mit einem Durchmesser von 8 mm zwischen den Filtern, deren Lage durch die Filmkassette geometrisch fixiert ist. Vorteilhaft ist, dass die neue Filmdosimeterkassette dadurch für eine automatische Auswertung in der Routine geeignet ist. Beide Filter sind rotations-symmetrisch bezüglich einer vertikalen Achse durch das Filterzentrum. Das Metallfilter ist aus zwei konzentrischen Scheiben aufgebaut, die ihrerseits aus je einer Schicht Blei und einer Schicht Zinn bestehen. Als Abstandshalter zwischen beiden Scheiben dient eine Polyethylen (PE)-Scheibe. Das Plastikfilter besteht aus einer dünnen PE-Schicht mit einem dickeren PE-Ring. Bei diesem Filter gleitet nicht der Schatten, sondern die durch die dünne PE-Schicht transmittierende Strahlung ("inverser" Gleitschatten).



Bild 11: Aufbau und Abmessungen von Metall- (links) und Plastikfilter (rechts) in der neuen Filmkassette.

Um Fehlmessungen bei extrem schrägem Einfall (d.h. parallel zur Filmebene) zu vermeiden, ist die Kassette von einem Abschirmrahmen aus Blei der Stärke 1 mm umgeben. Der Film hat Raum für weitere Messfelder. Durch zwei zusätzliche, nicht zur Dosismessung herangezogene Filter lässt sich Beta- von Photonenstrahlung unterscheiden (siehe Abschnitt 3.5.2). Vier Richtungsanzeiger aus Blei dienen der Bestimmung des Einfallswinkels der Photonenstrahlung. Bild 12 zeigt eine schematische Darstellung der neuen Filmkassette.

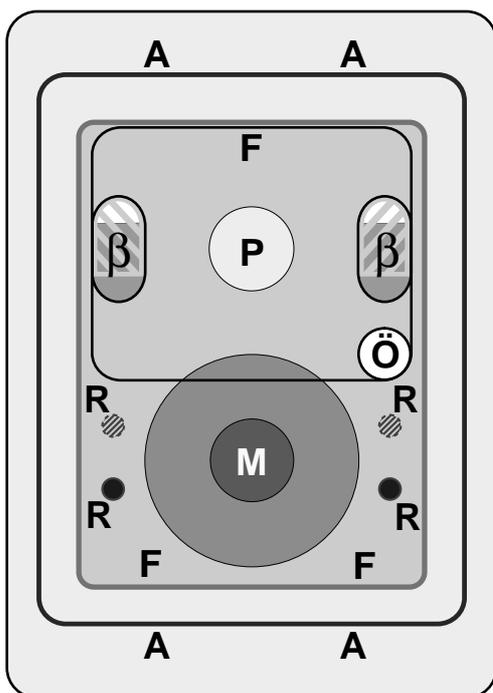


Bild 12: Schematische Darstellung der neuen Filmkassette.

Bedeutung der Symbole:

F: Dosimetriefilm

M: Metallfilter

P: Plastikfilter

A: Abschirmrahmen

R: Richtungsanzeiger

β: Betastrahlungsindikator

Ö: Filmeinlegekontrollöffnung

3.3 Ansprechvermögen der Sonde bezüglich der Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ und der Photonen-Äquivalentdosis H_x

Es zeigt sich, dass bereits mit diesen beiden Messfeldern und einer Linearkombination der Messwerte des Plastikfeldes m_{pla} und des Metallfeldes m_{met} eine ausreichend geringe Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens des Dosimeters erzielt wird [Ambrosi, 1996 und Ritzenhoff, 1996]. Die Eigenschaften der Filmkassette wurden in Strahlungsfeldern mit mittleren Photonenenergien zwischen 17 keV und 6500 keV untersucht. Die Bestrahlungen wurden auf einem Streukörper, dem ISO-Wasserquaderphantom (Abmessungen 30 cm x 15 cm x 15 cm), und frei in Luft mit hart gefilterter Röntgenstrahlung und mit Gammastrahlung durchgeführt. Bild 13 zeigt das Ansprechvermögen bezüglich $H_p(10)$ für das Plastik- und das Metallfeld in dem genannten Energiebereich und im Winkelbereich von 0° bis 75°. Die Kurven bis zu Winkeln von 60° fallen nahezu übereinander und zeigen, dass die Optimierung mittels der Gleitschattenmethode gelungen ist.

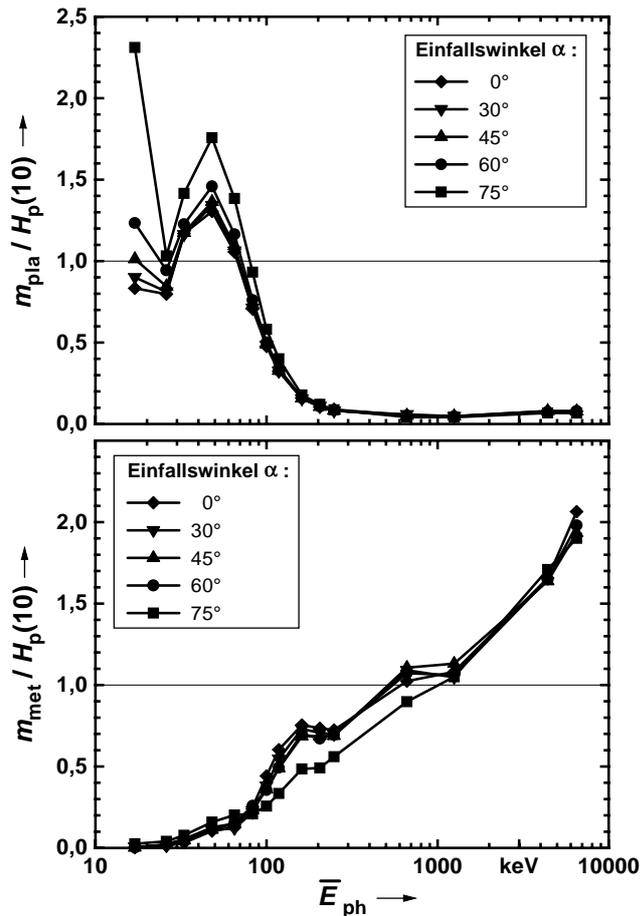


Bild 13: Ansprechvermögen des Plastikfeldes (oben) und des Metallfeldes (unten) bezüglich $H_p(10)$. \bar{E}_{ph} ist die mittlere Photonenenergie der verwendeten Strahlung, m_{pla} und m_{met} sind die Messwerte des Plastik- und des Metallfeldes.

Bild 14 zeigt die Energie- und Winkelabhängigkeit des Ansprechvermögens des Dosimeters bezüglich der Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ (oben) und bezüglich der Photonen-Äquivalentdosis H_x (unten). Die maximale Abweichung des Ansprechvermögens des gesamten Dosimeters bezüglich $H_p(10)$ beträgt weniger als $\pm 34\%$ (gepunktete Linien) vom Sollwert im Energiebereich von 17 keV bis 1250 keV und im Winkelbereich von 0° (senkrechter Einfall) bis 60° . Für das Ansprechvermögen bezüglich H_x wird eine maximale Abweichung vom Sollwert von weniger als $\pm 27\%$ im Energiebereich von 33 keV bis 1250 keV und im Winkelbereich von 0° bis 45° erreicht.

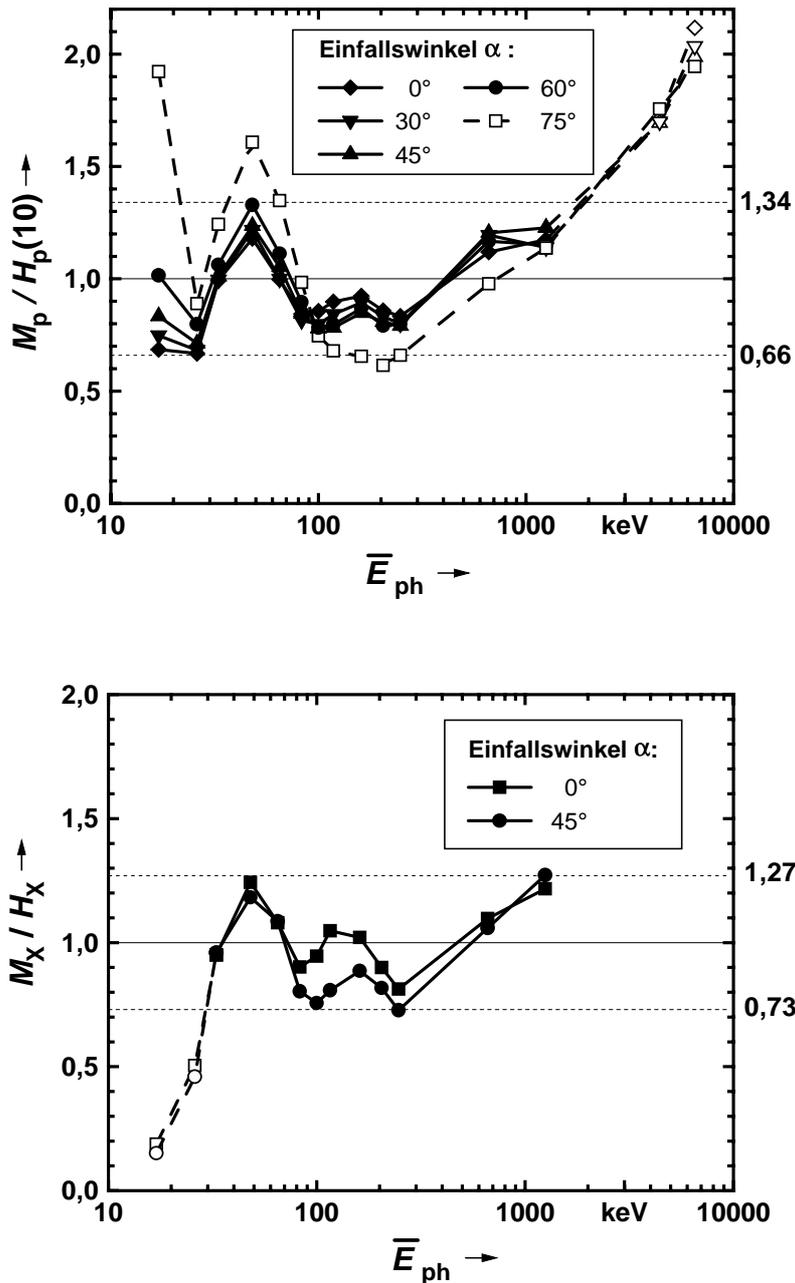


Bild 14: (oben) Ansprechvermögen des Dosimeters bezüglich $H_p(10)$.

(unten) Ansprechvermögen des Dosimeters bezüglich H_x .

Der Messwert M_p bzw. M_x errechnet sich aus den Messwerten des Plastikfeldes m_{pla} und des Metallfeldes m_{met} nach der Linearkombination

$M_p = 0,82 \cdot m_{pla} + 1,05 \cdot m_{met}$ bzw. $M_x = 0,86 \cdot m_{pla} + 1,11 \cdot m_{met}$. \bar{E}_{ph} ist die mittlere Photonenenergie der verwendeten Strahlung. Die mit gestrichelten Linien verbundenen offenen Symbole kennzeichnen Datenpunkte außerhalb des vorgeschlagenen Gebrauchsbereichs von 17 keV bis 1250 keV und 0° bis 60° für $H_p(10)$ und von 33 keV bis 1250 keV und 0° bis 45° für H_x .

3.4 Untersuchung einiger Einflussgrößen auf die Dosisbestimmung

3.4.1 Dosisabhängigkeit des Ansprechvermögens

Bedingt durch den Aufbau des Metall- und des Plastikfilters als Kombination aus einem Gleitschattenfilter und einem konventionellem Filter mittelt der Detektor (das ist der Teil der Filmfläche, die sich direkt unterhalb des Gleitschattenfilters befindet) bei schrägem Strahleneinfall über Bereiche unterschiedlicher optischer Dichte und damit unterschiedlicher Dosis. Da der Zusammenhang zwischen der gemessenen Größe, der optischen Dichte, und der daraus abgeleiteten Größe, der aufgebrachten Dosis, in hohem Maße nichtlinear ist, ist eine Abhängigkeit des Ansprechvermögens von der Dosis bei schrägem Strahleneinfall nicht von vorn herein auszuschließen. Es wurden daher Messungen durchgeführt, die der Untersuchung dieser Fragestellung dienen. Dazu wurden bei verschiedenen Energien unter Einfallswinkeln von 0° und von 55° Filme mit verschiedenen Dosen bestrahlt. Der Winkel von 55° wurde gewählt, da sich hier der Übergangsbereich zwischen dem Bereich hoher Dosis und dem Bereich niedriger Dosis (siehe auch Bild 10) ungefähr in der Mitte des Detektors befindet und sich daher in dieser Geometrie eine Dosisabhängigkeit der Mittelung, so vorhanden, deutlich zeigen sollte. Die Bestrahlungen wurden frei in Luft und nicht auf einem Phantom durchgeführt, um eine "Verwischung" durch die vom Phantom zurückgestreute Strahlung zu vermeiden. Bild 15 zeigt beispielhaft eine derartige Bestrahlungsreihe bei der Strahlenqualität C200. Sowohl im Plastikfeld wie auch im Metallfeld ist praktisch keine Dosisabhängigkeit des Ansprechvermögens zu erkennen. Das Ansprechvermögen des Metallfeldes zeigt bei 55° für den empfindlichen Film einen leichten Abfall mit steigender Dosis. Dieser Abfall hat nur geringe Auswirkungen auf den Messwert, da bei höheren Dosen der wenig empfindliche Film zur Bestimmung der Personendosis herangezogen wird. Die Ansprechvermögen für den empfindlichen und den wenig empfindlichen Film sind beim Plastikfeld gegeneinander parallel verschoben. Dieser Tatsache ist durch eine geeignete Wahl der Linearkombinationsparameter in Abhängigkeit von der zur Auswertung benutzten Filmemulsion Rechnung zu tragen.

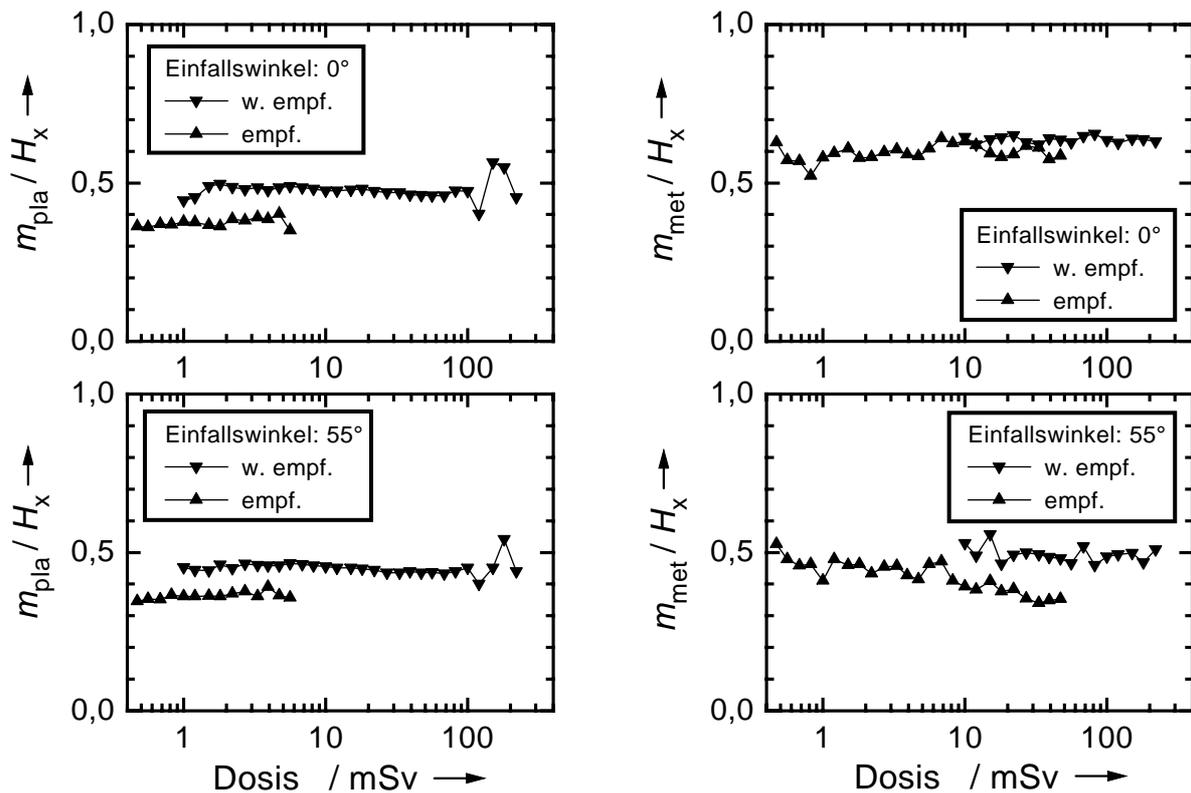


Bild 15: Dosisabhängigkeit des Ansprechvermögens des Plastikfeldes (m_{pla} , links) und des Metallfeldes (m_{met} , rechts) der neuen Filmkassette für die verschiedenen Filmemulsionen für 0° (oben) und für 55° (unten) bei der Strahlenqualität C200. Die Bestrahlungen

3.4.2 Verschiebung der Messfläche

Die automatische Messung der optischen Dichte erfolgt in genau definierten, festgelegten Bereichen, nämlich in den Bereichen des Films direkt unterhalb des Gleitschattenfilters. Daher hat eine Verschiebung des Films aus seiner Sollposition, sei es durch unsauberes Einlegen des Films in die Filmkassette oder durch eine nicht einwandfreie Positionierung des Films unter dem Messkopf des Densitometers, einen fehlerhaften Messwert zur Folge. Die Auswirkung einer derartigen Verschiebung zeigt Bild 16. Die Verschiebungen aus der Sollposition erfolgten parallel (positives Vorzeichen) bzw. antiparallel (negatives Vorzeichen) zur Wanderungsrichtung des Gleitschattens. Selbst bei Verschiebungen von 2 mm zeigen sich deutliche Effekte auf den DosisMesswert im Plastikfeld erst bei Einfallswinkeln von mehr als 60° , also außerhalb des vorgeschlagenen Nenngebrauchsbereichs, und im Metallfeld im Winkelbereich von 0° bis 60° erst bei Verschiebungen von ± 2 mm und bei Einfallswinkeln von mehr als 60° .

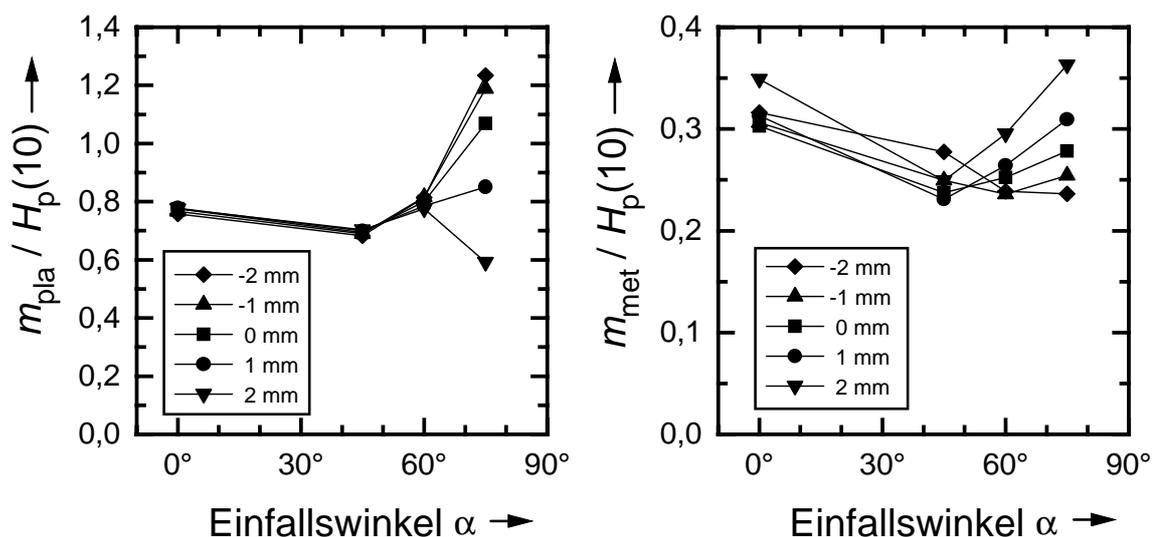


Bild 16: Einfluss einer parallelen bzw. antiparallelen Verschiebung der Messfläche aus ihrer Sollposition für das Plastikfeld (links, Strahlenqualität A30) und das Metallfeld (rechts, Strahlenqualität A120) in Abhängigkeit vom Einfallswinkel.

3.4.3 Ansprechvermögen für verschiedene Phantome

Um die Praxistauglichkeit der neuen Filmkassette zu untersuchen, wurden Bestrahlungen auf verschiedenen Phantomen (ISO-Wasserquaderphantom und Aldersonphantom) mit unterschiedlichen Abständen (0 mm und 20 mm) zwischen Filmkassette und Phantom durchgeführt. Als Strahlenqualität wurde C150 gewählt, da deren mittlere Energie von 75 keV im Maximum der Rückstreuung des Phantoms liegt und daher für diese Strahlenqualität die größten Phantomeinflüsse zu erwarten sind. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigt Bild 17. Die Änderungen des Ansprechvermögens der neuen Filmkassette betragen im Winkelbereich von 0° bis 75° weniger als 10 %, lediglich bei einem Einfallswinkel von 90° ist ein größerer Effekt zu sehen, so dass sowohl der Einfluss des Phantoms als auch der Einfluss des Abstandes zwischen Filmkassette und Phantom als vernachlässigbar angesehen werden können.

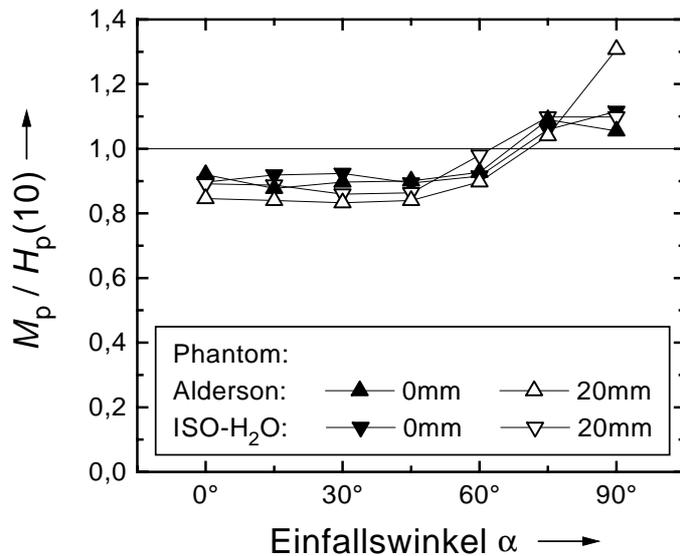


Bild 17: Ansprechvermögen der neuen Filmkassette in Abhängigkeit vom Einfallswinkel für verschiedener Phantome und Abstände bei der Strahlenqualität C150.

3.4.4 Wahl des Kunststoffmaterials der Kassette

PE ist ein für die Serienfertigung nicht optimaler Werkstoff. Ein Werkstoff, der für die maschinelle Massenproduktion wesentlich geeigneter ist, ist Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) - Kunststoff. Daher wurden einige Prototypen aus ABS-Kunststoff gefertigt und hinsichtlich ihres Ansprechvermögens insbesondere bei niedrigen Photonenenergien im Plastikfeld untersucht, da nur für diesen Detektor und in diesem Energiebereich signifikante Abweichungen vom bisher benutzten PE auftreten können. Die Untersuchungen (Bild 18) zeigen, dass das Ansprechvermögen bei ABS-Kunststoff um ca. 8 % bei niedrigen Energien und um ca. 4 % bei mittleren Energien niedriger ist als bei PE. Dieser Effekt lässt sich ohne eine Vergrößerung der GesamtMessunsicherheit durch eine entsprechende Anpassung des Linearkombinationsparameters des Plastikfeldes von 0,82 für PE auf 0,90 für ABS-Kunststoff kompensieren. ABS-Kunststoff ist also ohne Probleme für die neue Filmkassette einsetzbar.

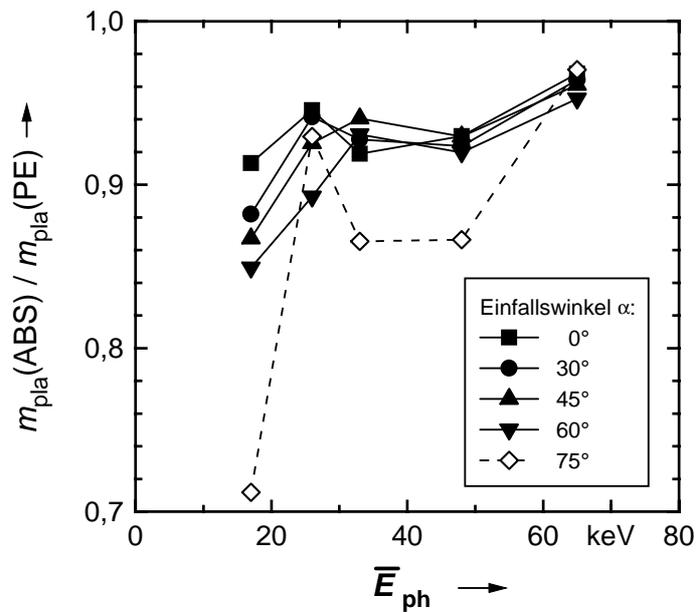


Bild 18: Verhältnis des Ansprechvermögens des Plastikfeldes aus PE zum Ansprechvermögen des Plastikfeldes aus ABS-Kunststoff in Abhängigkeit von der Photonenenergie für verschiedene Einfallswinkel.

3.5 Zusatzinformationen

3.5.1 Energieanalyse

Weiterhin erlaubt die neue Filmkassette die Bestimmung der mittleren Photonenenergie aus dem Verhältnis der Messwerte der Plastikfeldes m_{pla} und des Metallfeldes m_{met} für Energien unterhalb von 300 keV in einem großen Winkelbereich (Bild 19).

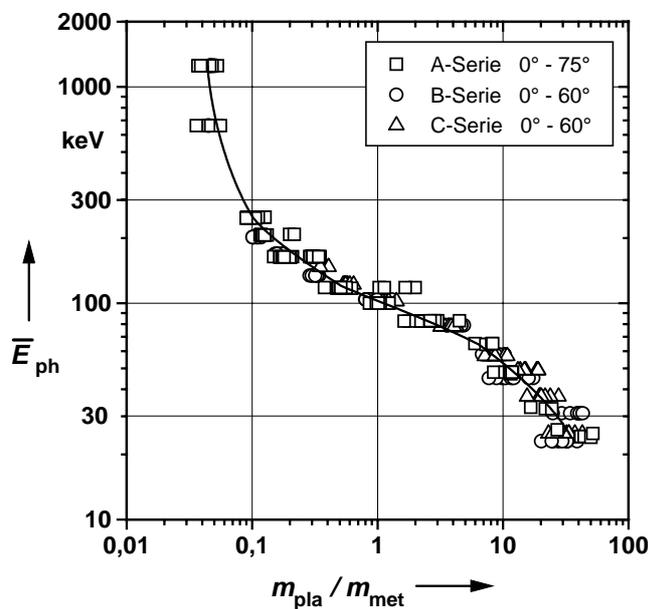


Bild 19: Bestimmung der mittleren Photonenenergie \bar{E}_{ph} aus dem Verhältnis der Messwerte m_{pla} / m_{met} für die A-, B- und C-Serien nach DIN 6818-1 [DIN, 1992].

3.5.2 Beta-Exposition

Da die Filmkassette Raum für weitere Komponenten bietet, wurden neben den Richtungsanzeigern, welche durch den Schattenwurf eine Abschätzung des Einfallswinkels ermöglichen, zwei Beta-Indikatoren in die Kassette integriert. Die Beta-Indikatoren sind so konstruiert, dass die Massenbelegung der Metallschicht (0,15 mm Sn bzw. 0,2 mm Cu) und der darüber liegenden Kunststoffschicht (0,5 mm PE) identisch mit der des umgebenden Kunststoffs (2,5 mm PE) ist, so dass eine Bestrahlung mit reiner Beta-Strahlung zu einer homogenen Schwärzung der Filmfläche ohne optischen Kontrast zwischen Beta-Indikator und umgebendem Kunststoff führt, während bei Photonenstrahlung ein deutlicher optischer Kontrast zwischen Beta-Indikator und umgebendem Kunststoff zu sehen ist.

3.6 DensitometerMessplatz

Die zuvor beschriebenen Untersuchungsergebnisse wurden mit einem einfachen Densitometer erzielt, bei dem in einem Messfeld von 8 mm Durchmesser homogen die Schwärzung festgestellt wird. Damit können aber die mit der neuentwickelten Sonde gegebenen Möglichkeiten zur Teilautomatisierung nicht realisiert werden.

Im Rahmen des Vorhabens sollte daher ein entsprechender DensitometerMessplatz zur automatischen Messwertaufnahme und visuellen Beurteilung von Dosisfilmen, die in einem Leitergurt (Bild 20) angeordnet sind, entwickelt werden. Aufgrund der Ergebnisse einer Ausschreibung wurde eine Firma beauftragt, einen Messplatz mit den durch den Vorhabensnehmer gegebenen Spezifikationen zu bauen. Eine erste Version wurde im Mai 1996 den Teilnehmern einer Sitzung von Leitern der deutschen Personendosismessstellen in Dortmund vorgeführt. Nach einigen noch erforderlichen Umbauten konnte der Densitometermessplatz gegen Ende des Vorhabens an die Messstelle Dortmund ausgeliefert werden (Bild 21).

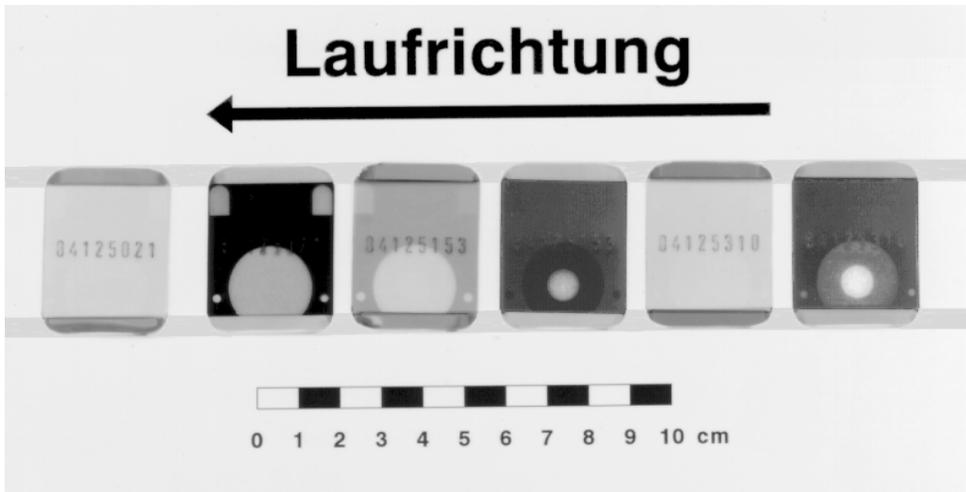


Bild 20: Anordnung der Filme in einem Leitergurt
Der Leitergurt wird in der Dunkelkammer vor der Filmentwicklung durch seitliches Bördeln von Klebestreifen bei der automatischen Filmvorbereitung erzeugt.

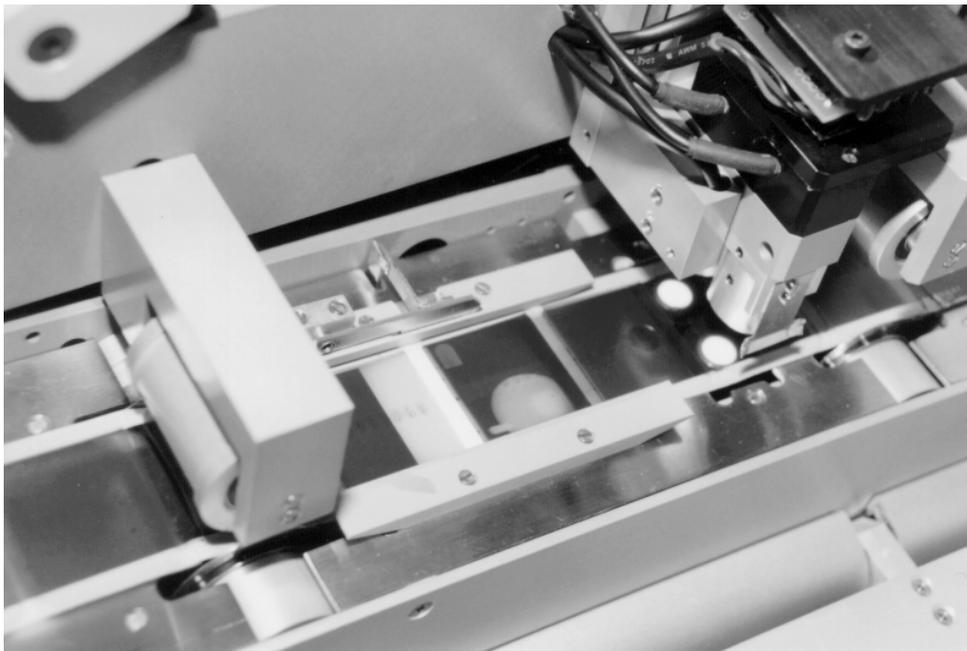


Bild 21: Automatischer Densitometermessplatz
Zu sehen ist der Leitergurt in der Führungsschiene des Messgerätes. Die beiden beleuchteten Felder (rechts) sind die Messfelder des Messkopfes. Nach der Positionierung des zu messenden Films senkt sich der Messkopf auf dem Leitergurt. Dadurch wird der Film plan in einer Ebene gehalten und das Streulicht begrenzt.

Beim Vortransport des Leitergurtes im Densitometermessplatz werden die Filme nacheinander automatisch in gleicher Weise unter dem Messkopf positioniert. Dazu werden Filmvorder- und -hinterkante bezogen auf die Laufrichtung detektiert. Der Messkopf enthält zwei Densitometer (Durchmesser des Messfeldes jeweils 8 mm, optische Dichte bis 6), die senkrecht zur Laufrichtung des Leitergurtes fest nebeneinander so angeordnet sind, dass die durch die Filter der Gleitschattenkassette vorgegebenen Positionen der Messfelder auf jedem Film genau von den Densitometern erfasst werden. Die Taktzeit (Positionierung und Messung) beträgt im automatischen Betrieb bei optischen Dichten bis 4 weniger als 1 s pro Film. Bei höheren optischen Dichten ist die Taktzeit ca. 2 s. Jeder Film wird gemessen und seine Reihenfolgennummer im Leitergurt wird durch automatisches Mitzählen der Messvorgänge festgestellt.

Die Messfelder werden jeweils über eine geregelte Lichtquelle, einen Lichtwellenleiter und eine Streuscheibe beleuchtet. Das transmittierte Licht wird mit einer Anordnung aus Si-Photoelementen gemessen, deren relative spektrale Empfindlichkeit, der des menschlichen Auge angepasst ist.

Der Messvorgang wird durch einen externen Auswerterechner gesteuert. Die Übermittlung der Steuerbefehle und der Datenaustausch erfolgt über eine serielle Schnittstelle. Die Steuerprogramme werden von der Messstelle Dortmund noch erstellt.

Bei Überschreiten der unteren Nachweisgrenze soll der automatische Messvorlauf des Filmgurts in einer Position ("Filmbetrachter") angehalten werden, in der dieser Film visuell bzgl. Zusatzinformationen analysiert werden kann. Zugleich kann die vom Auswerterechner anhand der Reihenfolgennummer im Leitergurt und eines gespeicherten zugehörigen Reihenfolgenprotokolls ermittelte Filmdosimeternummer visuell kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert werden. Erst nachdem der Befund der visuellen Analyse und Kontrolle im Rechner dokumentiert wurde, wird der automatische Messlauf wieder gestartet.