

KfK 5110
Februar 1993

Erprobung eines Phosphatglasdosimetriesystems mit gepulster UV-Laseranregung

B. Burgkhardt, E. Piesch, M. Vilgis
Hauptabteilung Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Hauptabteilung Sicherheit

KfK 5110

**Erprobung eines Phosphatglasdosimetriesystems mit gepulster
UV-Laseranregung**

B. Burgkhardt, E. Piesch und M. Vilgis

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Das vollautomatische PLD-System, bestehend aus dem Einelement-Phosphatglasdosimeter und dem Auswertesystem Toshiba FGD-10, wurde im Hinblick auf das Auswerte- und Kalibrierverfahren optimiert und sowohl für einen Routineeinsatz in der Personen- und Umgebungsüberwachung getestet als auch bei dem IAEO-Vergleich 1990/91 für Personendosimeter eingesetzt. Der Vergleich der dosimetrischen Eigenschaften des PLD-Systems zeigt die deutlichen Vorteile gegenüber TL- und Filmdosimetern wie beispielsweise die Subtraktion der individuellen Vordosis von etwa $30\mu\text{Sv}$, die untere Nachweisgrenze bei $0,1\text{mSv}$ für die Anwendung in der Personendosimetrie für akkumulierte Dosen bis zu 3mSv und bei $0,01\text{mSv}$ für regenerierte Gläser in der Ortsdosimetrie, die Langzeitstabilität des Auswertesystems (1%) und die Stabilität des Glasdetektors gegenüber Einflüssen der Umgebungstemperatur innerhalb der Routineüberwachung (2%). Das Einelementdosimeter erlaubt die gleichzeitige Anzeige unterschiedlicher Dosisgrößen, beispielsweise der Photonen-Äquivalentdosis H_x oder der Personendosis $H_p(10)$ in einem weiten Energiebereich oberhalb Photonenenergien von 15keV und die Interpretation der Bestrahlungsbedingungen durch Angaben der Strahlenqualität und der Strahleneinfallrichtung. Innerhalb der Routinedosimetrie ist das Phosphatglasdosimeter eine Alternative bzw. ein Ersatz für die bisherigen Filmdosimeter und TL-Dosimeter. Das kommerziell erhältliche PLD-System erhielt bei der PTB die Bauartzulassung und kann damit auch von den nach Landesrecht zuständigen Meßstellen in Deutschland als amtliches Personendosimeter in Gamma- und Röntgenstrahlenfeldern eingesetzt werden.

Test of a phosphate glass dosimetry system using pulsed UV-laser excitation

Abstract

The fully automatic PLD system consisting of a one-element photoluminescent glass dosimeter and the readout system Toshiba FGD-10 was optimized in the readout and calibration technique and with respect to a routine application tested in personnel and environmental monitoring as well as at the IAEA Intercomparison 1990/91 of individual dosimeters. The dosimetric properties of the PLD system show significant advantages in comparison to TL and film dosimeters such as automatic subtraction of the individual detector pre-dose of 30 μSv , a lower limit of detection at 0.1 mSv for the application in personnel dosimetry for accumulated doses up to 3 mSv and at 0.01 mSv for annealed glasses in area dosimetry, a long-term stability of the readout system (1%) and the stability of the glass detector against effects of ambient temperature within routine monitoring (2%). The one-element dosimeter allows the simultaneous indication of different dose quantities, such as the photon dose equivalent H_x or the personnel dose $H_p(10)$ in a wide energy range above photon energies of 15 keV and the interpretation of the irradiation conditions by the indication of radiation quality and direction of the radiation incidence. Within routine dosimetry the phosphate glass dosimeter turned out to be an alternative and replace, respectively for film dosimeters and TL dosimeters used up to now. The commercially available PLD system was type tested at the PTB and can thus be applied from the governmental services in Germany as an official personnel dosimeter in Gamma and X-ray radiation fields.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Einleitung	1
2. Aufgabenstellung und Durchführung	2
3. Dosimetriesystem	4
3.1 Systemkomponenten	4
3.2 UV-Laseranregung	6
3.3 Kalibrierverfahren	8
4. Auswerteverfahren	9
5. Dosimetrische Eigenschaften	13
5.1 Dosisbereich, Variationskoeffizient	13
5.2 Photonenenergiebereich und Richtungsabhängigkeit	15
5.3 Empfindlichkeit gegenüber β -Strahlung und thermischen Neutronen	19
5.4 Empfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen	21
6. Routineerprobung	23
6.1 Ergebnisse beim IAEO-Vergleich 1990/91 für Personendosimeter	23
6.2 Langzeitstabilität des Dosimetriesystems	29
6.3 Einfluß der Umgebungstemperatur in der Routineüberwachung	31
6.4 Einsatz innerhalb der Personendosimetrie	33
6.5 Einsatz innerhalb der Umgebungsüberwachung	36
7. Meßunsicherheiten bei kleinen Dosen	37
8. Bewertung des PLD-Systems im Hinblick auf eine Anwendung in der Personendosimetrie	41
8.1 Anforderungen aufgrund der Bauartzulassung	42
8.2 Dosisbereich, Variationskoeffizient im unteren Dosisbereich	43
8.3 Meßverfahren	44
8.4 Photonenenergiebereich	45
8.5 Umgebungseinflüsse	46
8.6 Zusätzliche Aussagen des Personendosimeters	46
8.7 Zuverlässigkeit der Dosisanzeige in der Routineüberwachung	47
9. Zusammenfassung	48
10. Literaturverzeichnis	51
Anhang: Merkblatt für Dosimeterbenutzer	55

1 Einleitung

Phosphatglasdosimeter in der Kugelkapselung werden seit mehr als 25 Jahren mit Erfolg innerhalb der Personendosimetrie und Umgebungsüberwachung zur Messung der Photonen-Äquivalentdosis im Photonenenergiebereich oberhalb 45 keV eingesetzt [1,2]. Im Vergleich zu Film- und Thermolumineszenzdosimetern bietet das Phosphatglas insbesondere den Vorteil, daß der Meßwert des Dosimeters bei der Auswertung nicht gelöscht wird und damit Messungen wiederholbar und Zwischenausmessungen während einer langzeitigen Dosisakkumulierung möglich sind. Der große Meßbereich in Verbindung mit dem geringen Meßwertschwund lassen die Messung einer Jahresdosis bzw. Lebensaltdosis zu, wobei sowohl kleinste Dosen von weniger als 10 % der natürlichen jährlichen Strahlenexposition als auch hohe Unfalldosen oberhalb 10 Sv meßbar sind.

Nachteile des bisherigen Meßverfahrens waren die Beschränkung auf einen Photonen-Energiebereich oberhalb 45 keV und die Notwendigkeit, die Gläser vor der Messung zu reinigen sowie eine nichtstrahleninduzierte Voranzeige von etwa 1 mSv zu subtrahieren. Dies führte zu einer unteren Nachweisgrenze von etwa 0,2 mSv.

Grundsätzlich neue Gesichtspunkte zur Verbesserung des Auswerteverfahrens von Glasdosimetern ergaben sich in den 80er Jahren, als leistungsstarke Stickstofflaser auf den Markt kamen und die Entwicklung eines automatischen Auswertesystems mit einem neuen Flachglasdosimeter besonders aussichtsreich erschien [3,4]. Innerhalb einer Zusammenarbeit zwischen KfK und Toshiba Glass wurde 1987/88 ein vollautomatisches Auswertesystem mit gepulster UV-Laseranregung entwickelt, welches die Nachteile des bisherigen Meßverfahrens nicht mehr zeigt [5-7].

Ein im KfK bereits in den Jahren 1980 bis 1985 entwickeltes Flachglasdosimeter bietet in Verbindung mit der gepulsten UV-Laseranregung den Vorteil, die Voranzeige auf etwa 30 μ Sv herabzusetzen und gegenüber einer Verschmutzung der Glasoberfläche unempfindlich zu sein [8,9]. Damit werden Photonen-Äquivalentdosen im Dosisbereich oberhalb 10 μ Sv meßbar. Das Flachglasdosimeter ermöglicht jetzt erstmalig auch eine energie- und richtungsunabhängige Dosisanzeige im uneingeschränkten Energiebereich oberhalb 10 keV.

Innerhalb der Strahlenschutzdosimetrie ist beabsichtigt, die bisherige Meßgröße Photonen-Äquivalentdosis H_x frei in Luft in naher Zukunft durch die phantombegozene Meßgröße Personendosis $H_p(10)$ in 10 mm Gewebetiefe an der Tragestelle des Personendosimeters zu ersetzen [10-13]. Die Einführung dieser auf einen ICRU-Vorschlag beruhenden Meßgröße erfordert insbesondere in der Personendosimetrie für die vorhandenen Film- und Thermolumineszenzdosimeter die Änderung des Meßverfahrens bzw. der Dosimeterkonstruktion [9,14,34]. Für eine Übergangszeit werden dann beide Meßgrößen Gültigkeit haben.

Ein besonderer Vorteil der neuen Flachglasdosimeter ist die Möglichkeit, mit der selben Dosimeterkapselung durch Wahl einer anderen Blende vor dem Photomultiplier die Dosimeteranzeige einer vorgegebenen Meßgröße anzupassen oder den Energiekompensationsfilter so zu optimieren, daß gleichzeitig beide Meßgrößen angezeigt werden. Bei dem neu entwickelten, hier erprobten Auswertesystem wurde der 2. Lösungsvorschlag verfolgt, mit demselben Dosimeter die gleichzeitige Anzeige der alten und neuen Meßgröße zu ermöglichen. Mit einem zusätzlichen Auswertemodus konnten durch die Aktivierung weiterer veränderlicher Blenden im Anregungs- und Meßteil u.a. auch die Strahlenqualität der Photonenstrahlung und die Richtung des Strahleneinfalls angezeigt werden.

Die vollautomatische Auswertung schafft andererseits die Voraussetzungen für eine zuverlässige Routinedosimetrie und die Messung großer Dosimeterchargen vergleichbar mit entsprechenden TLD-Systemen. In Verbindung mit den herausragenden dosimetrischen Eigenschaften bietet das Glasdosimeter heute viele Vorteile gegenüber den bisher in der amtlichen Personendosimetrie eingesetzten Filmdosimetern und Thermolumineszenzdosimetern.

2. Aufgabenstellung und Durchführung

Ziel des Vorhabens*) war die Erprobung dieses neuen Phosphatglasdosimetriesystems, insbesondere die Untersuchung der dosimetrischen Eigenschaften bei gepulster UV-Laserauswertung unter Berücksichtigung einer gleichzeitigen Messung der bisherigen Meßgröße Photonen-Äquivalentdosis H_x und der neuen Meßgröße $H_p(10)$ mit dem selben Dosimeter, sowie die Erprobung des neuen Meßverfahrens innerhalb der Personenüberwachung.

*) Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Förderkennzeichen: StrLSch 1.076) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Entsprechend der Zielsetzung waren mit dem Prototyp des neuen kommerziellen Auswerteautomaten u.a. folgende Untersuchungen vorgesehen:

- Optimierung und Festlegung der Auswerteparameter, der Gerätekalibrierung, der Meßwertverarbeitung und der Datenausgabe am Rechner,
- Untersuchung der dosimetrischen Eigenschaften, u.a. Voranzeigeverhalten, untere Nachweisgrenze innerhalb einer über mehrere Überwachungsperioden gehende Dosisakkumulierung, Zufallsmeßunsicherheit bei diskontinuierlicher Bestrahlung und wiederholter Messung der akkumulierten Dosis, wie dies u.U. bei einer täglichen Eingangs- und Ausgangskontrolle zu erwarten ist, Dosisbereich, Energie- und Richtungsabhängigkeit der Dosisanzeige, Messung verschiedener Meßgrößen mit dem selben Dosimeter, Temperaturverhalten, Fadingeinfluß, zusätzliche Angaben einer Strahlenqualität und Strahleneinfallrichtung.

Nach Auslieferung des kommerziellen Auswertesystems war daran anschließend eine Erprobung des Dosimeters unter Routinebedingungen in der Personen- und Umgebungsüberwachung mit monatlichem Dosimeterwechsel in den insbesondere für eine Personendosimetrie interessierenden Strahlenfeldern (bzw. Arbeitsplätzen) vorgesehen. Nach Bereitstellung der entsprechenden Unterlagen sollte gleichzeitig eine Bauartprüfung (Musterprüfung) des Dosimetriesystems bei der PTB beantragt werden.

Wegen verspäteter Auftragserteilung und Auslieferung des kommerziellen Auswertesystems FGD-10 im Jahre 1990 verzögerte sich die vorgesehene Erprobung des Flachglasdosimetriesystems innerhalb der Routineüberwachung.

Die Überprüfung des Auswertegerätes führte zu einer Verbesserung der Blendenmechanik, zur endgültigen Festlegung der Photomultiplier-Blenden und der beim horizontalen und vertikalen Abtasten des Dosimeters erforderlichen Kalibrierkurven. Die ursprünglich vorgesehene Anschaffung eines zweiten Auswertegerätes zur Langzeiterprobung war nicht möglich. Zur vorgesehenen Durchführung der Bauartzulassung bei der PTB stand deshalb das einzige Gerät in der zweiten Jahreshälfte 1991 für eine weitere Erprobung nicht zur Verfügung, so daß insbesondere der langzeitige Test des Dosimetriesystems in der Personen- und Umgebungsüberwachung mit monatlichem Dosimeterwechsel im Vergleich zu einem Langzeiteinsatz nur in kleinem Umfange durchgeführt werden konnte.

Für die Antragstellung zur Bauartzulassung war die Bereitstellung einer Gebrauchsanweisung erforderlich, die alle Bauteile und die zur Dosiermittlung durchzuführenden Schritte beschreibt und in der insbesondere das Kalibrierverfahren für die interne/externe Kalibrierung des Systems eindeutig festgelegt wird.

Dem Photolumineszenzdosimetriesystem mit dem Auswertegerät Toshiba Glass FGD-10 und dem Flachglasdosimeter SC-1 wurde zwischenzeitlich die allgemeine Bauartzulassung (Musterprüfung) für eine Anwendung in der Personendosimetrie und eine Anwendung in der Ortsdosimetrie erteilt [15]. Es erfüllt damit die in der Eichordnung vom 12. August 1988 in §2, Abs. 1 und 2 festgelegten Anforderungen an geeichte Strahlenschutzdosimeter, die innerhalb der physikalischen Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosis beruflich strahlenexponierter Personen verwendet werden [16]. Damit kann das Dosimetriesystem auch von den nach Landesrecht zuständigen Meßstellen als Personendosimeter eingesetzt werden, ohne daß die sonst übliche Bauartzulassung aufgrund einer erweiterten Vergleichsmessung für jede Meßstelle erforderlich wird.

3. Dosimetriesystem

3.1 Systemkomponenten

Das Flachglasdosimeter (Abb. 1) besteht aus einem Glasdetektor ($16 \times 16 \times 1,5 \text{ mm}^3$) in einer "Glaskarte" aus Edelstahl, welche innerhalb der Dosimeterkapsel ($40 \times 30 \times 9 \text{ mm}^3$) von einer Plastik-Zinnfilterkombination abgedeckt wird. Das Flachglasdosimeter ist ausgestattet mit einem Barcode an der Außenseite der Kapselung und einem Lochkode an der Glaskarte. Die beidseitig angeordneten Flachfilter aus 0,75 mm dickem Zinn und einem Plastikzwischenteil von 3 mm Breite sind durch seitliche Filter zur Anpassung der Richtungsabhängigkeit an die neue Meßgröße $H_p(10)$ ergänzt. Die symmetrische Anordnung der Filter an der Vorder- und Rückseite des Flachglasdosimeters führt zu zwei gleichwertigen Vorzugsrichtungen jeweils senkrecht auf der Vorder- bzw. Rückseite.

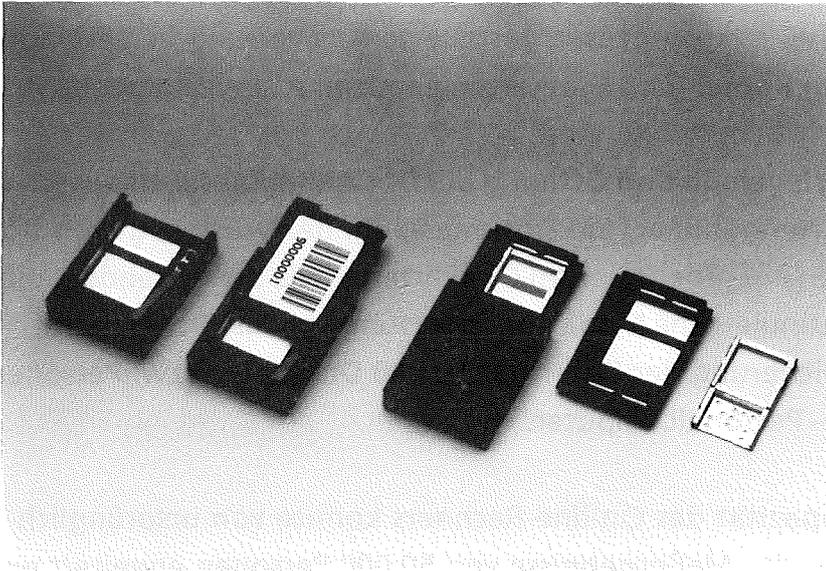


Abb. 1: Flachglasdosimeter mit getrennter Kodierung von Kapsel und Glaskarte. Allseitige Abdeckung mit perforierten Zinnfiltern

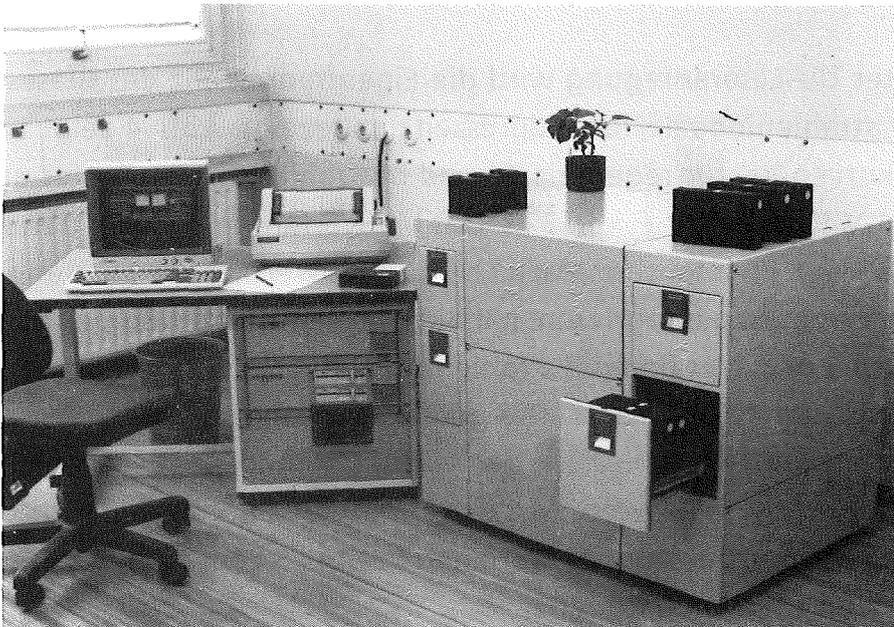


Abb. 2: Das vollautomatische Glasdosimeter-Auswertegerät Toshiba FGD-10

Das Auswertesystem Toshiba FGD-10 (Abb. 2 und 3) verwendet Magazine für die Dosimeter (Kapselmagazine) und für regenerierte Glaskarten (Kartenmagazine), so daß die Dosimeterkapseln mit neuen Glaskarten bestückt werden können. Die vollautomatische, mikroprozessorgesteuerte Auswertung in Verbindung mit einem getrennten Kapsel- und Glaskartenmagazin, schließt folgende Arbeitsschritte mit ein:

- Die Entriegelung und Öffnung der Dosimeterkapsel, das Lesen der Kapsel- und Kartenummer, die Dosismessung, den Austausch von hochdosisbestrahlten mit regenerierten Glaskarten sowie die laufende Kalibrierung,
- die kontinuierliche Magazinauswertung von 500 Dosimetern,
- die Speicherung der Daten für 50.000 Dosimeter bzw. Personen in einem On-line- Personalcomputer.

Die Speicherkapazität des On-line-Rechners konnte von ursprünglich 10.000 auf die Bearbeitung der Meßergebnisse von 50.000 Personen erweitert werden. Entsprechend den Anforderungen der Bauartzulassung wurde das Gerät gegenüber Störeinflüssen, u.a. elektrostatische Entladungen von 6 KV Hochspannung, Netzspannungsänderungen von +15% und -10%, Störimpulsen von 500 V und Netzunterbrechungen von 10 ms ertüchtigt.

3.2 UV-Laseranregung

Bei gepulster UV-Laseranregung wird die Eigenfluoreszenz des Glases gleichzeitig mit der strahleninduzierten Fluoreszenz angezeigt. Abb. 4 zeigt typische PL-Intensitätskurven $I(t)$ für regenerierte und bestrahlte Glasdosimeter unmittelbar nach einer UV-Pulsanregung von 3 ns. Das Meßverfahren benutzt den zeitabhängigen Abfall der PL-Intensität dazu, beide Meßwertanteile zu trennen und in zwei Zeitintervallen zu integrieren, nämlich die PL-Kurzzeitkomponente im Intervall zwischen 2 und 7 μs und die strahlenunabhängige Langzeitkomponente der Vordosis zwischen 40 und 45 μs . Die gemessene Langzeitkomponente, multipliziert mit einem Faktor f_{ps} , wird von der Kurzzeitkomponente subtrahiert, um den strahleninduzierten Meßwert M zu erhalten. Ein solcher Vordosisunterdrückungsfaktor f_{ps} , der nur bei fabrikneuen Dosimetern zu bestimmen ist, würde zu einer Vordosis $H_0 = 0$ führen.

Zur Vermeidung negativer Meßwerte infolge Differenzbildung wird der f_{ps} -Faktor so festgelegt, daß eine Vordosis von etwa 30 μSv angezeigt wird. Die Häufigkeitsverteilung für die gemessene Vordosis zeigt, daß diese Festlegung

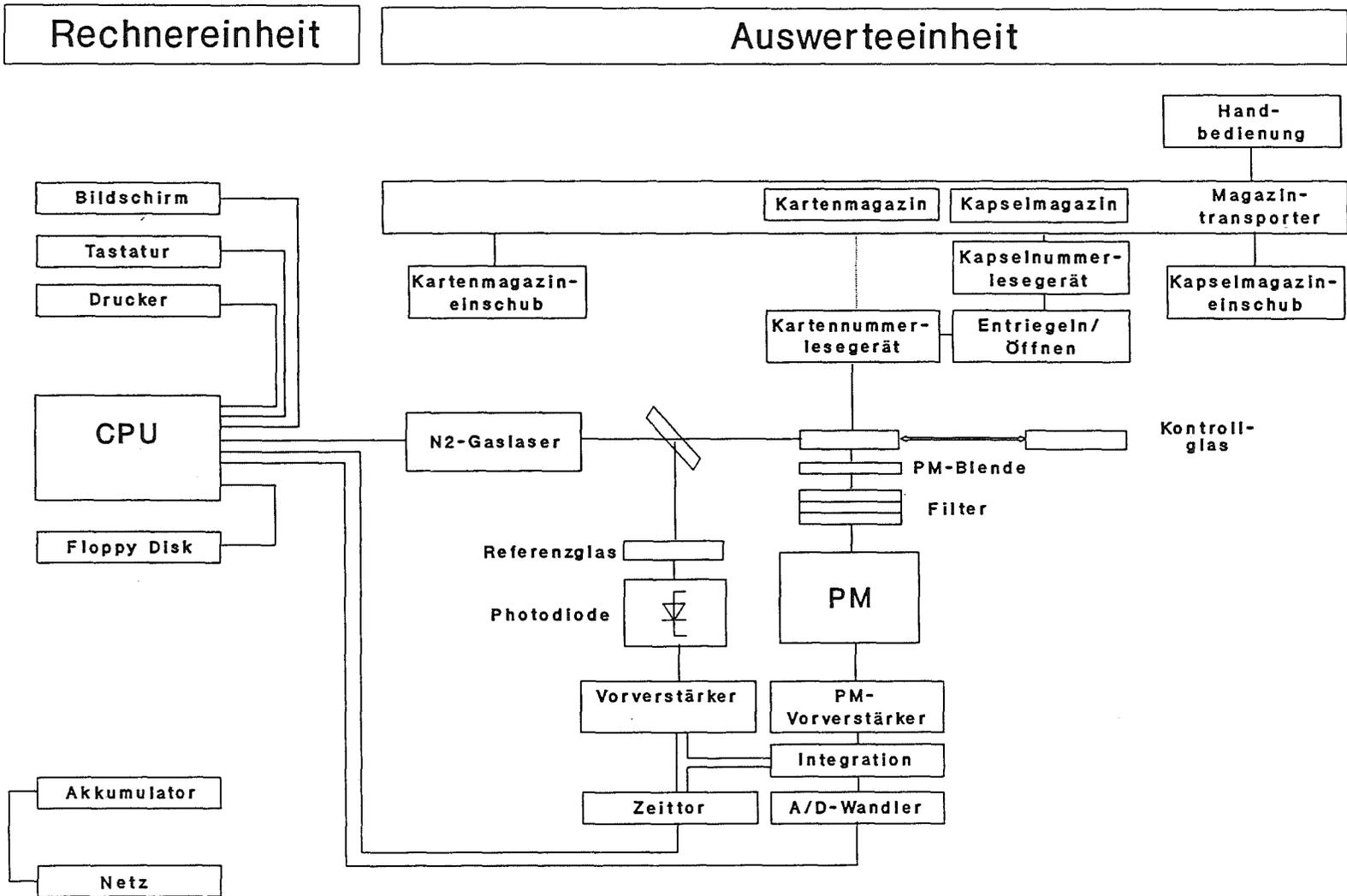


Abb. 3: Gepulste UV-Laseranregung und automatische Ausmessung des Flachglasdosisimeters im Auswertegerät Toshiba FGD-10

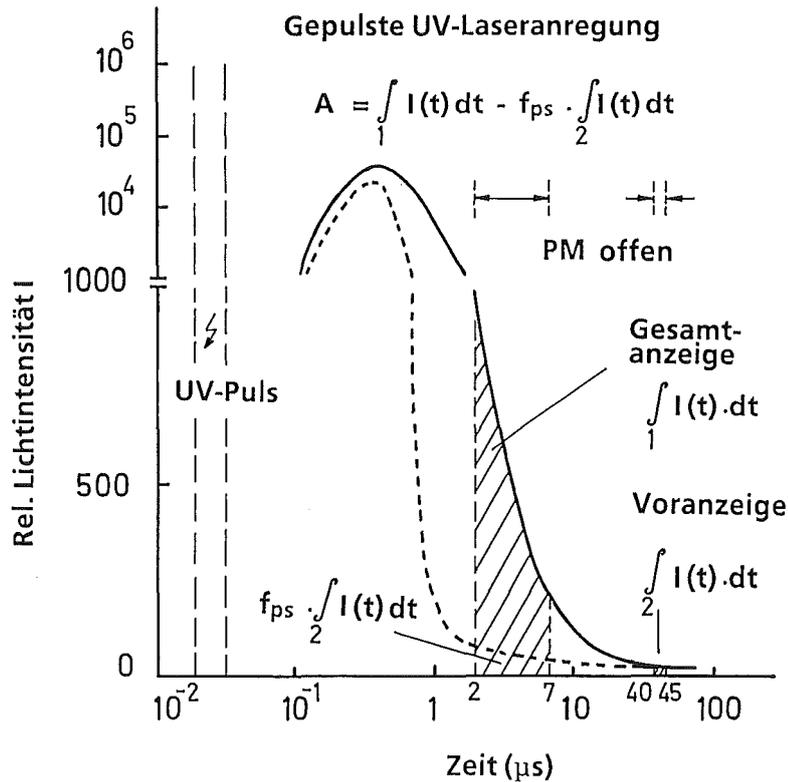


Abb. 4: Subtraktion der Voranzeige von Glasdosimetern bei gepulster UV-Laseranregung

sehr konservativ ist und die kleine Streuung der Vordosiswerte prinzipiell auch einen Wert von $10 \mu Sv$ zuläßt (siehe Abschnitt 5.1, Abb. 9).

3.3 Kalibrierverfahren

Das für die Anwendung von Flachglasdosimetern zugrundegelegte Kalibrierverfahren verwendet ein externes, definiert bestrahltes Kalibrierglas zur täglichen Ermittlung des Gerätekalibrierfaktors und ein internes Kontrollglas für eine kontinuierliche Kalibrierung beispielsweise nach jeweils 25 Auswertungen, das zur Korrektur von Geräteschwankungen im Laufe eines Tages benutzt wird. Das Kalibrierverfahren berücksichtigt das zeit- und temperaturabhängige Build-up-Verhalten des PL-Meßwertes. Diesbezügliche Unterschiede des Meßwertes zwischen Kalibriergläsern und Routinegläsern sind geringer als 1%, wenn das Routedosimeter ohne weitere Wärmebehandlung frühestens fünf Tage nach Bestrahlung gemessen wird. Die genaue Kalibriervorschrift wurde für die Gebrauchsanweisung festgelegt. Die Reduzierung des statistischen Meßfehlers bei der Bestimmung des internen Teilkalibrierfaktors auf Werte von weniger als 0,5% wurde durch Mittelwertbildung von drei Auswertungen erreicht. Durch Ein-

führung eines Passwort-Systems wurde der Schutz der relevanten Auswerteparameter sichergestellt.

4. Auswerteverfahren

Bei der routinemäßigen Auswertung von Flachglasdosimetern mit dem Toshiba FGD-10-System werden das Standardverfahren, für höhere Dosen die Zusatzauswertung zur Interpretation der Expositionsbedingungen und die Niederenergieauswertung zur Erweiterung des Energiebereiches bei der Messung der Photonen-Äquivalentdosis unterschieden [6]. Außerdem ist eine Interpretation der Meßwerte im Hinblick auf Körperdosen möglich.

Die Routineauswertung basiert auf einem einzigen Meßwert nach UV-Anregung im Gesamtglas und ermöglicht die gleichzeitige Messung von zwei Dosisgrößen, nämlich der Photonen-Äquivalentdosis H_x frei in Luft [12] und der Personendosis $H_p(10)$ [13], wobei zur Kalibrierung die von der ICRU empfohlene Meßgröße Richtungs-Äquivalentdosis $H'(10)$ auf einem Phantom verwendet wird [10,11] (Abb. 5). Die PTB-Bauartzulassung beschränkt sich auf das Routineauswerteverfahren und fordert die Anzeige der Dosisgröße H_x (siehe Abschnitt 5.3).

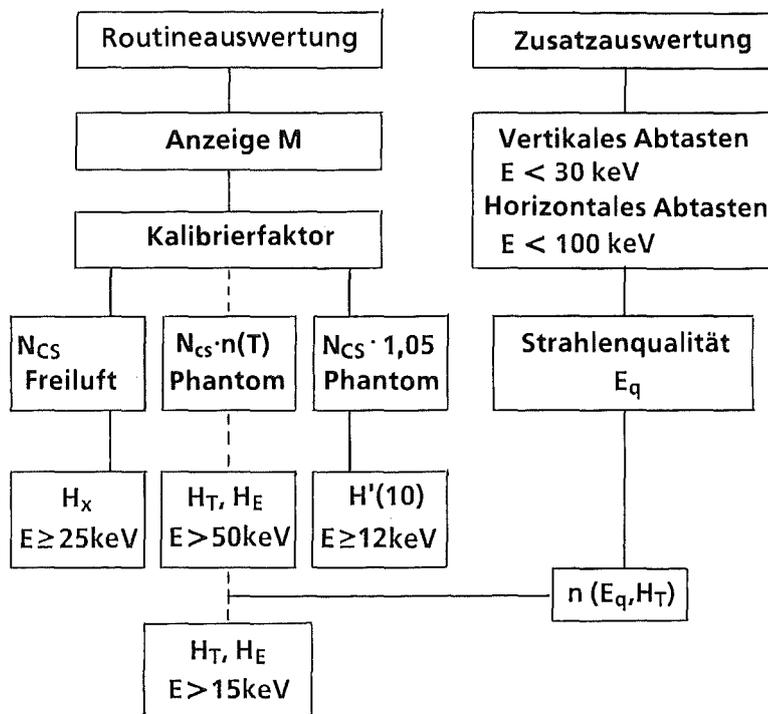


Abb. 5: Gleichzeitige Anzeige verschiedener Meßgrößen bei der Routineauswertung von Flachglasdosimetern sowie Anzeige der Bestrahlungsbedingungen über eine Zusatzauswertung im Auswertegerät Toshiba FGD-10

Über eine Zusatzauswertung in Teilbereichen des Glases besteht oberhalb eines vorgegebenen Dosiswertes die Möglichkeit, eine Aussage über die Strahlenqualität zu erhalten und diese mit dem Meßwert anzuzeigen. Bei der Zusatzauswertung erfolgt eine vertikale und horizontale Abtastung des Flachglasdetektors. Dies wird durch bewegliche Blenden erreicht (Abb. 6).

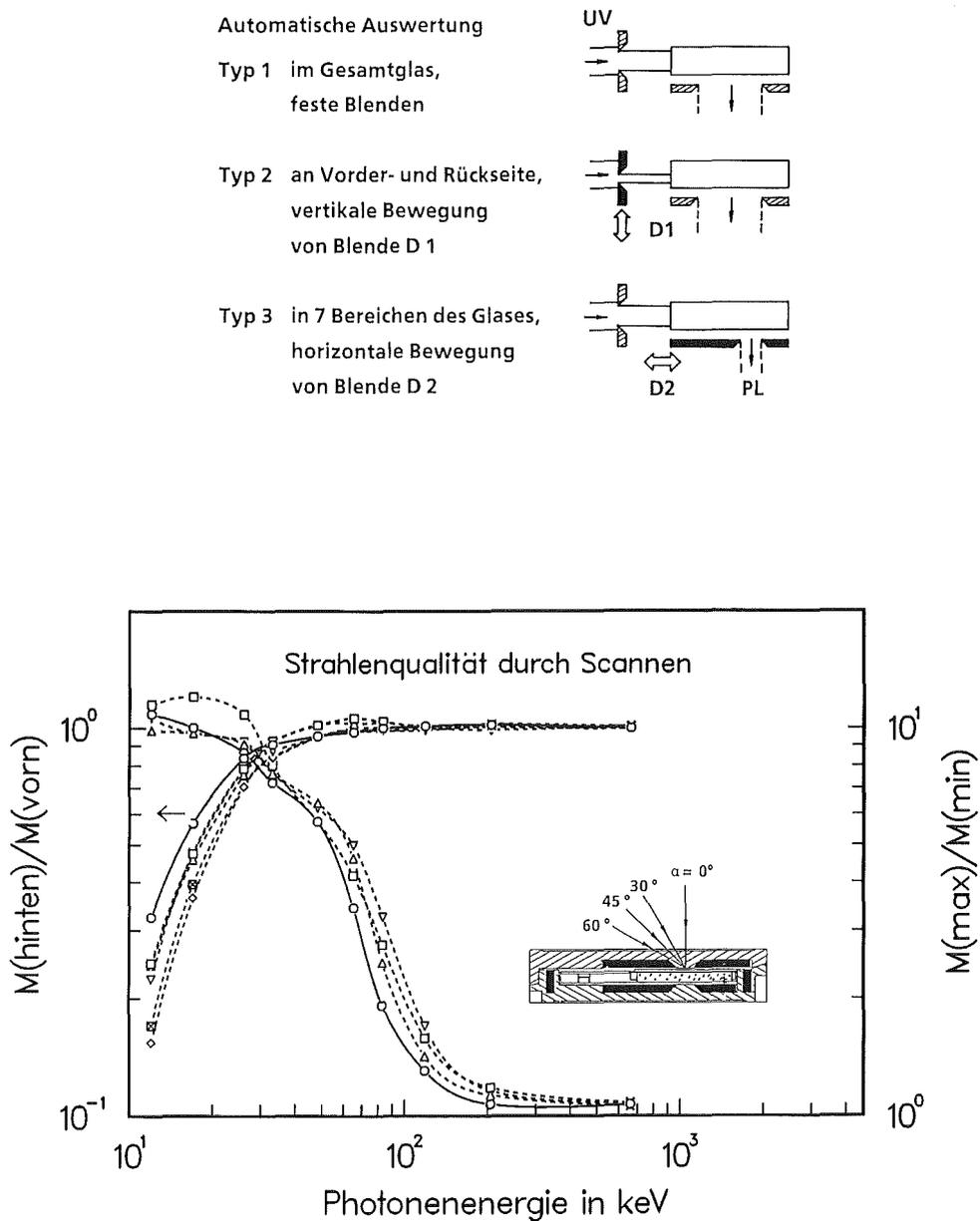


Abb. 6: Zusatzauswertung zur automatischen Anzeige der Strahlenqualität

Über eine vertikale Änderung der UV-Lichtblende im Anregungslicht erfolgt die Zusatzauswertung im vorderen bzw. hinteren Glasvolumen in Bezug auf die Vorzugsrichtung des Strahleneinfalls. Über eine horizontale Bewegung der Blende vor dem Photomultiplier wird das Glas in horizontaler Richtung in sieben Teilbereichen abgetastet. Die vorgesehenen Zusatzauswertungen ermöglichen die Ermittlung einer Strahlenqualität, die sich im Energiebereich unterhalb 30 keV und unterhalb 150 keV aus dem Quotienten der Meßwerte $M(\text{hinten})$ und $M(\text{vorn})$ der vertikalen bzw. $M(\text{max.})$ und $M(\text{min.})$ der horizontalen Meßwertverteilung ergibt. Oberhalb einer einzustellenden Dosisanzeige erfolgt der unmittelbare Ausdruck der Strahlenqualität für die Energiebereiche < 30 keV, 30 bis 70 keV, 70 bis 150 keV und > 150 keV.

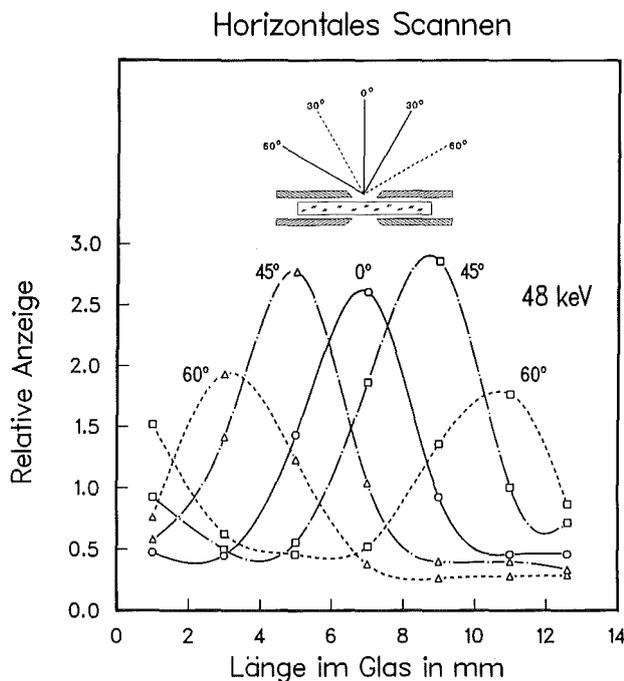


Abb. 7: Horizontale Meßwertverteilung im Flachglasdosimeter für verschiedene Einfallswinkel der Photonenstrahlung bei 48 keV

Die bei horizontaler Abtastung des Glases gefundene Meßwertverteilung kann zur Ermittlung der Strahleneinfallsrichtung herangezogen werden (Abb. 7, siehe auch Abschnitt 6.1). Durch die teilweise Abdeckung des Glases mit einem Plastik- bzw. Zinnfilter erwartet man z. B. bei einer Einstrahlung von der linken Bildseite das Intensitätsmaximum hinter dem Plastikfilter auf die rechte Bildseite verschoben bzw. umgekehrt. Die vom Auswertegerät ausgedruckten Meßergebnisse werden am Beispiel einer Zusatzauswertung in Tab. 3 wiedergegeben (siehe Abschnitt 6.1).

Im Auswertesystem vorgesehen ist eine Erweiterung des Routineauswerteverfahrens (Niederenergieauswertung), die im Bedarfsfall bei höheren Dosen zur Erweiterung des Photonenenergiebereiches für die Anzeige H_x unterhalb 25 keV herangezogen werden kann. Dies ermöglicht eine Dosismessung von H_x bis 15 keV [6].

Weitere Untersuchungen galten der Interpretation des Dosimetermeßwertes im Hinblick auf die Abschätzung der interessierenden Körperdosen bei einer Ganzkörperexposition der Person. Das in Abb. 5 beschriebene Auswerteverfahren verdeutlicht, daß auf der Grundlage einer Cs-137-Freiluftkalibrierung des Flachglasdosimeters, die den Kalibrierfaktor N_{Cs} ergibt, durch meßgrößenspezifische, relative Kalibrierfaktoren $n(T) = N_{Cs}(T)/N_{Cs}$ grundsätzlich auch eine ausreichend energieunabhängige Anzeige von Körperdosen H_T im Photonenenergiebereich oberhalb 50 keV möglich wird (Abb. 8).

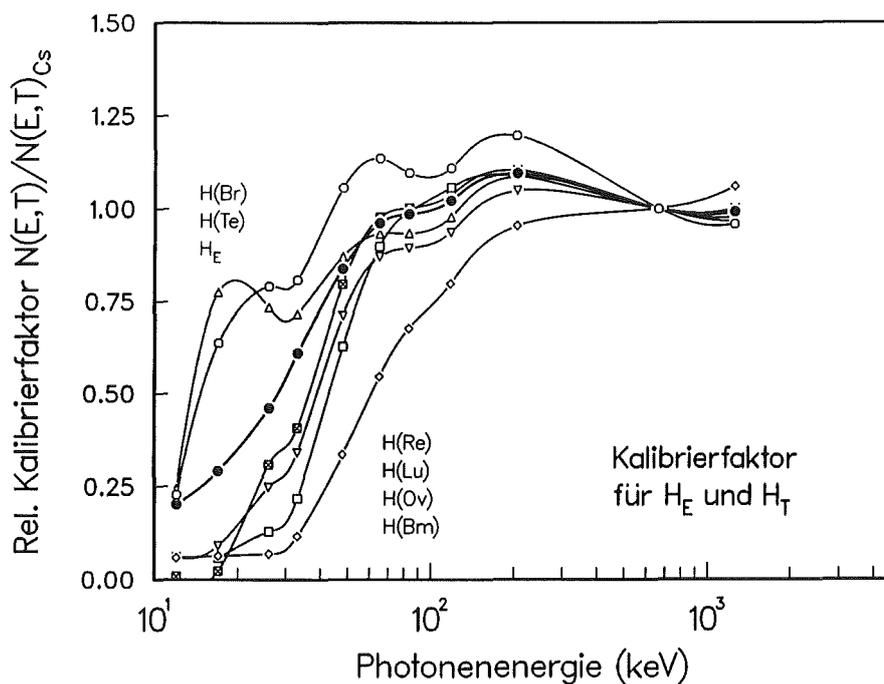


Abb. 8: Relativer Kalibrierfaktor zur Interpretation von Körperdosen für frontalen Strahleneinfall unter Verwendung der Meßwertanzeige des Flachglasdosimeters

Mit Hilfe der bei der Zusatzauswertung bestimmten Strahlenqualität können die effektive Äquivalentdosis H_E bzw. Organdosen H_T auch im Photonenenergiebereich unterhalb 50 keV bewertet werden. Dies trifft insbesondere für Organdosen zu, die zur Definition von H_E zugrundegelegt werden [2,17].

Bei Verdacht auf Überschreiten des Grenzwertes erhält man damit innerhalb der Personendosimetrie u. U. auch eine Aussage über die interessierenden Organdosen, wenn bei gleichmäßiger Einstrahlung aus dem vorderen Halbraum der Meßwert des Personendosimeters repräsentativ für die Strahlenexposition ist. Diese Möglichkeit ist im Hinblick auf die zu erwartende Änderung der H_E -Definition durch die ICRP 60 [18] von besonderer Bedeutung, da hier eine entsprechende Anpassung möglich ist.

5. Dosimetrische Eigenschaften

5.1 Dosisbereich, Variationskoeffizient

Eine der herausragenden Eigenschaften des neuen PLD-Systems ist die Möglichkeit, kleine Dosen im Bereich von 0,01 mSv zu messen. Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, führt die Unterdrückung der Eigen- und Fremdfloreszenz zu einer Herabsetzung der Vordosis bei regenerierten Gläsern auf einen nominellen Wert von $(30 \pm 1) \mu\text{Sv}$.

Die Häufigkeitsverteilung der bei etwa 6000 Flachglasdosimetern gemessenen Vordosis sowie des für unterschiedliche Fertigungs- und Meßchargen gefundenen Variationskoeffizienten in Abb. 9 verdeutlichen die Genauigkeit des Meßverfahrens. Die Standardabweichung für die Messung der individuellen Vordosis ergab sich für die verschiedenen Auswertchargen zu 1 bis 2 μSv .

Das Auswertprogramm subtrahiert automatisch sowohl die Dosis H_1 der letzten Messung (bzw. die individuelle Vordosis H_0 nach Regenerierung) als auch den Betrag der natürlichen Strahlung H_{nat} für den Zeitraum zwischen der letzten Messung und der aktuellen Messung M_2 :

$$H = N \cdot M_2 - H_1 - H_{\text{nat}}$$

In der Routineüberwachung werden Phosphatglasdosimeter wiederholt bis zu einer akkumulierten Dosis H_1 von 3 mSv eingesetzt. Dadurch erhält man für die Messung einer Photonen-Äquivalentdosis von $H=0,1$ mSv einen Variationskoeffizienten von ca. 3% bei regenerierten Glasdetektoren und ca. 25% bei Detektoren mit einer zuvor akkumulierten Dosis von 3 mSv. Oberhalb von 0,6 mSv liegt der

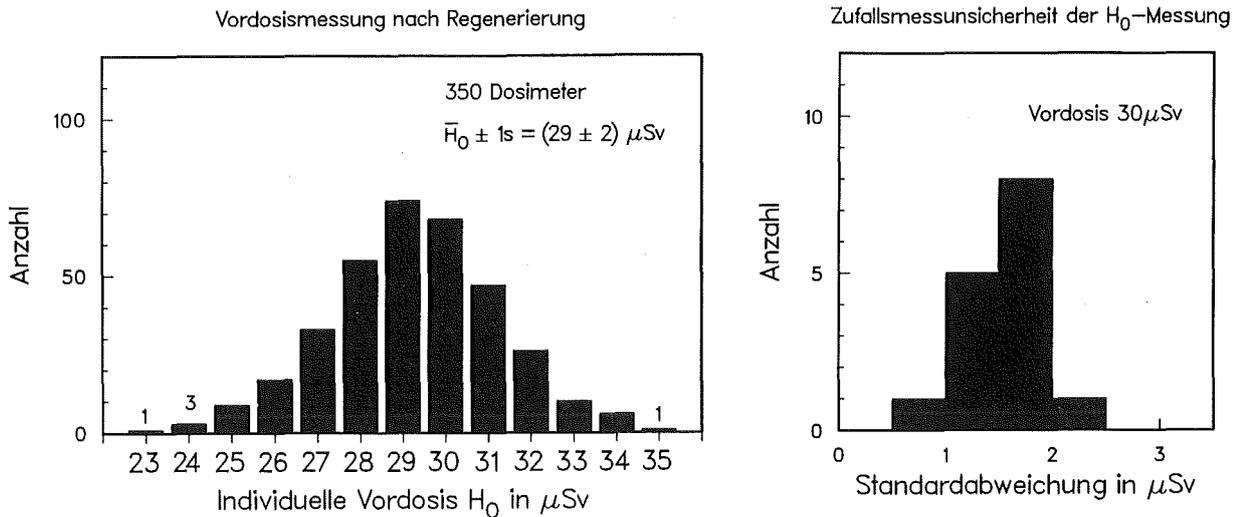


Abb. 9: Häufigkeitsverteilung (a) der Vordosis von unbestrahlten Flachglasdosimetern einer Teilcharge, sowie (b) der Standardabweichung der Vordosismessung von verschiedenen Teilchargen

Variationskoeffizient, der sich für den einzelnen Detektor bei Wiederholungsmessungen ergibt, bei ca. 0,5% (Abb. 10).

Wegen der fertigungsbedingten Streuung des Ansprechvermögens der Phosphatglasdetektoren erhält man für eine Dosimetergruppe oberhalb 0,6 mSv auch bei langzeitiger Dosisakkumulierung und häufiger Zwischenauswertung einen Variationskoeffizienten von etwa 1%.

Unter Berücksichtigung des Erwartungswertes für die empirische Standardabweichung s der Dosismessung ergibt sich für die kleinste Dosis an der Nachweisgrenze $H_{NWG} = (t_{1-\alpha} + t_{1-\beta}) \cdot s(H_0)$ mit $t_{1-\alpha} = t_{1-\beta} = 1,65$ für ein Vertrauensniveau von 95% ein Wert von 0,1 mSv für das Personendosimeter, wenn für einen erneuten Einsatz des Dosimeters Vordosen $H_0 < 3$ mSv noch zugelassen werden, und ein Wert von 0,01 mSv für das Personen- und Ortsdosimeter, wenn die Phosphatglasdetektoren vor der Messung regeneriert werden (Vordosis $H_0 = 0,03$ mSv).

Das Phosphatglasdosimetriesystem erlaubt die Messung der Photonen-Äquivalentdosis H_x im Dosisbereich von 0,1 mSv bis 8 Sv gemäß der Bauartzulassung durch die PTB für die Anwendung als Personen-Ganzkörperdosimeter. Wird das Dosimeter als Ortsdosimeter eingesetzt, sind damit Photonen-Äquivalentdosen von 0,03 mSv bis 8 Sv meßbar, da der Phosphatglasdetektor vor jedem Einsatz regeneriert wird.

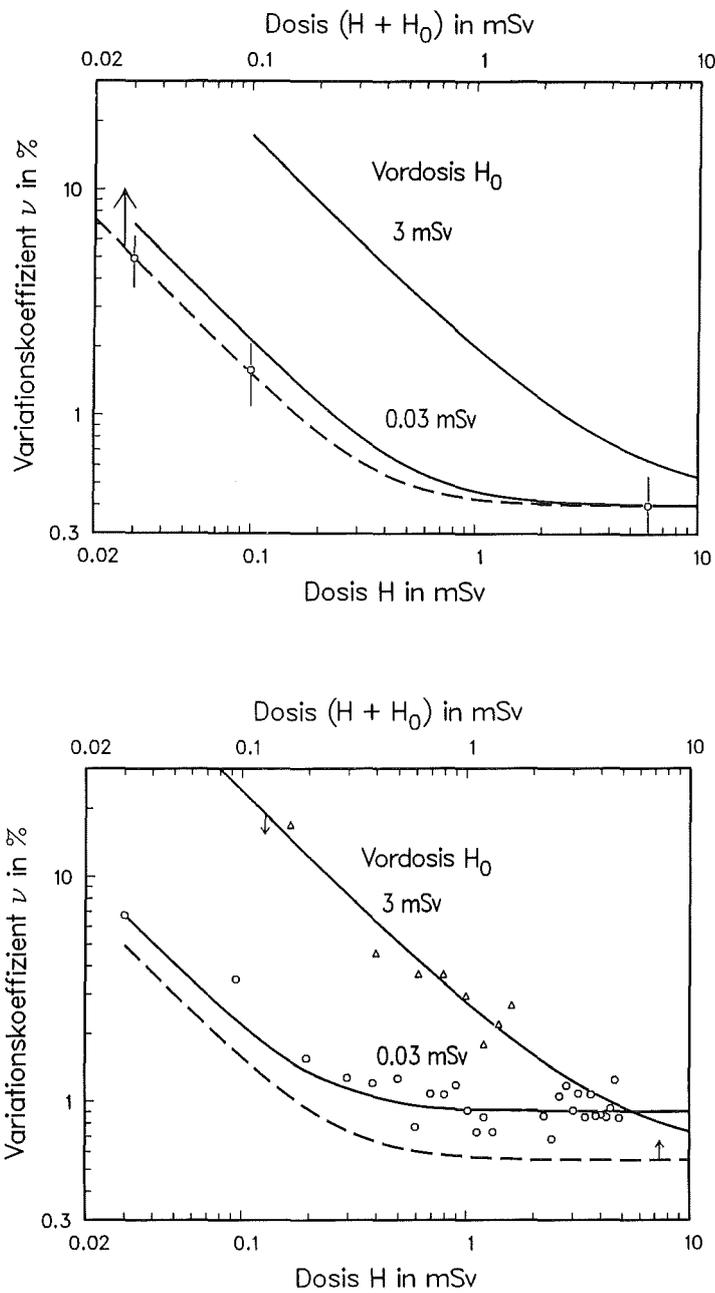


Abb. 10: Variationskoeffizient der Dosismessung für Flachglasdosimeter mit einer Vordosis von 0,03 und 3 mSv für Wiederholmessungen eines Dosimeters (a) und für eine Gruppe von 10 Dosimetern (b)

5.2 Photonenenergiebereich und Richtungsabhängigkeit

Zur Bauartzulassung wird als Meßgröße die Photonen-Äquivalentdosis H_x (Standardionendosis frei in Luft multipliziert mit dem Konversionsfaktor 0,01Sv/R) zu-

grundegelegt [12]. Im Hinblick auf die in Kürze zu erwartende Einführung neuer Meßgrößen wird im Entwurf zu DIN 6814, Teil 3, Änderung 1 (April 1992) [13] die Personendosis $H_p(d)$ als Äquivalentdosis in Weichteilgewebe an der Tragestelle des Personendosimeters in der Bezugstiefe 10 mm und 0,07 mm definiert. Für die Anwendung in der Personendosimetrie wird das Dosimeter am Phantom kalibriert. Diese Definition dient dem Zweck, für durchdringende Strahlung mit $H_p(10)$ bzw. für Strahlung geringer Eindringtiefe mit $H_p(0,07)$ konservative Schätzwerte der effektiven Dosis H_E bzw. der interessierenden Teilkörperdosen der Haut bzw. der Extremitäten zu liefern. Als Strahlung geringer Eindringtiefe gilt z.B. Photonenstrahlung unter 15 keV, bei der die Hautdosis bei senkrechtem Einfall mehr als das Zehnfache der effektiven Dosis beträgt.

Die Bauartzulassung des Flachglasdosimeters als Personen- und Ortsdosimeter bezieht sich auf einen Photonenenergiebereich von 25 keV - 1,3 MeV und die Meßgröße H_x frei in Luft. Für die neue Meßgröße Personendosis $H_p(10)$ erweitert sich der Photonenenergiebereich des Flachglasdosimeters bis zu 15 keV, was auch durch neuere PTB-Bestrahlungen am Plattenphantom bestätigt wird (Abb.11-13).

Das Flachglasdosimeter ermöglicht als Personendosimeter die gleichzeitige Anzeige beider Meßgrößen ohne Änderung der Dosimeterkonstruktion bzw. des Auswerteverfahrens. Die bevorstehende Änderung der Meßgrößen erfordert daher nur die Vorgabe des jeweiligen Cs-137-Kalibrierfaktors (siehe auch Abb. 5). "Alte Personendosen" können daher jederzeit in "neue Personendosen" umgerechnet werden:

$$H_p(10) = 1,05 \cdot H_x$$

Das in Abb. 14 dargestellte Ansprechvermögen des Flachglasdosimeters, bezogen auf $H'(10)$ als Ersatzgröße für $H_p(10)$ sowie auf die effektive Dosis H_E nach ICRP 51 [19], verdeutlicht, daß die Anzeige des Flachglasdosimeters die interessierende Körperdosis H_E im Photonenenergiebereich unterhalb 25 keV um mehr als einen Faktor 2,5 überbewertet. Damit ist die Anzeige des Flachglasdosimeters, unabhängig von der Wahl der beiden Meßgrößen, ein ausreichend konservativer Schätzwert der effektiven Dosis bis zu Photonenenergien von 15 keV. Vom Flachglasdosimeter wird daher schon jetzt der gesamte interessierende Photonenenergiebereich für durchdringende Strahlung ohne Einschränkung abgedeckt, der in Bezug auf eine Ganzkörperexposition zur Ermittlung der Personendosis nach § 63 Abs.3 Satz 1 StrlSchV und § 35 Abs.2 RöV erforderlich ist [20,21].

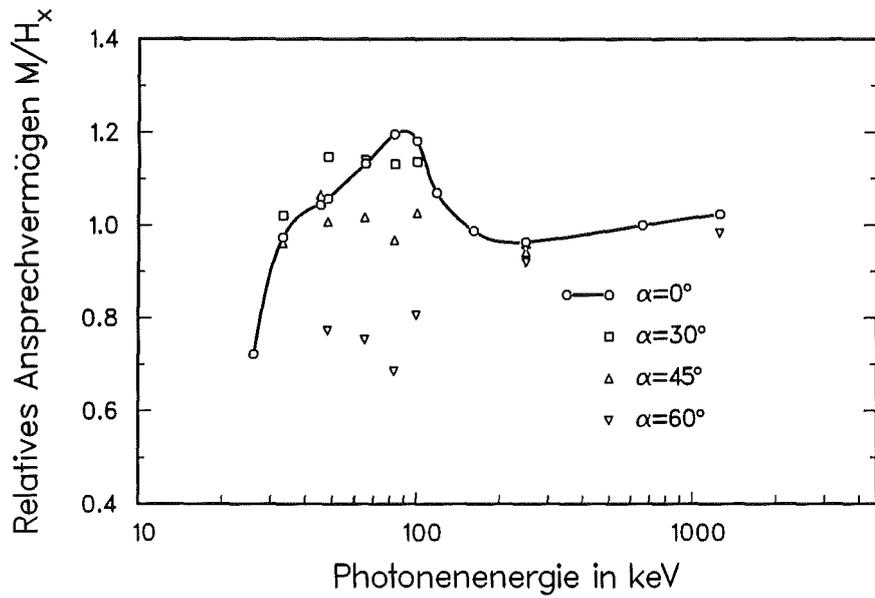


Abb. 11: Energie- und Richtungsabhängigkeit des Personenganzkörperdosimeters Toshiba Glass PGD FGD-10 & SC-1 auf die Meßgröße Photonen-Äquivalentdosis H_x

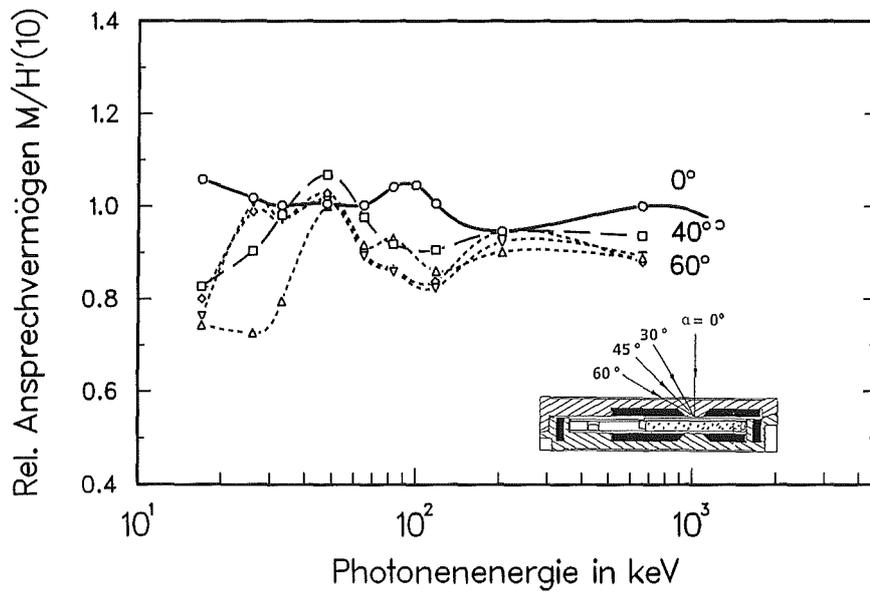


Abb. 12: Energie- und Richtungsabhängigkeit des Personendosimeters bei Bestrahlung auf einem Kugelphantom von 30 cm \varnothing auf die Meßgröße Richtungs-Äquivalentdosis $H'(10)$

Der Nennbereich der Strahleneinfallrichtung beträgt aufgrund der Bauartzulassung 0° bis 60° gegenüber einem Mindestnennbereich von 0° bis 45° der Bauartanforderung [22].

Die Richtungsabhängigkeit des Ansprechvermögens des Flachglasdosimeters wurde für verschiedene Strahleneinfallrichtungen für beide Meßgrößen bestimmt (Abb. 11 und Abb. 12). Bis zur Strahleneinfallrichtung von 60° wird demnach ein ausreichendes Ansprechvermögen oberhalb 15 keV bzw. 25 keV erhalten. Im Nennbereich der Photonenenergie darf aufgrund der Anforderungen an die Dosimeter zur Bauartzulassung die Gesamtmeßunsicherheit für die Einflußgrößen Photonenenergie und Strahleneinfallrichtung 40% für Personendosimeter und 30% für Ortsdosimeter betragen.

Für den Einsatz des Flachglasdosimeters in der Ortsdosimetrie ist aufgrund der Bauartzulassung der Nennbereich für die Photonenenergie 25 keV-1,3 MeV. Bei einer Bestrahlung frei in Luft erhält man bei Rotation der Dosimeter in zwei senkrecht aufeinanderstehenden Ebenen die in Abb. 13 wiedergegebene Energieabhängigkeit für die Meßgröße Photonen-Äquivalentdosis. Bei einer Anwendung in der Ortsdosimetrie ist es jedoch nicht möglich, gleichzeitig auch die Meßgröße $H^*(10)$ anzuzeigen.

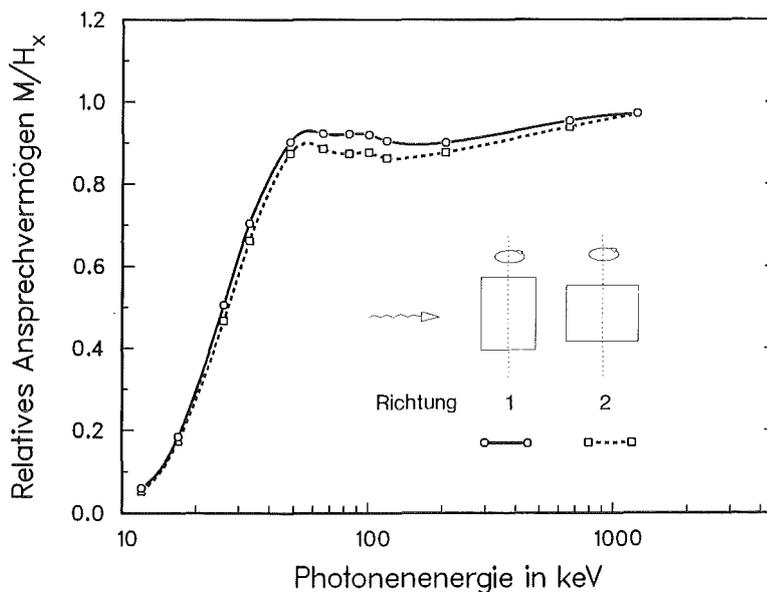


Abb. 13: Energieabhängigkeit bei Rotation des Flachglasdosimeters in zwei senkrecht aufeinanderstehenden Ebenen bei Freiluftbestrahlung

Im Hinblick auf die Energie- und Richtungsabhängigkeit des Ansprechvermögens sind weitere Vorteile des Einelement-Dosimeters gegenüber anderen Mehrkomponentendosimetern mit einem Auswertalgorithmus u. a.

- die dosisrichtige Anzeige von Röntgenstrahlung unterschiedlicher Aufhärtung bzw. von beliebigen Strahlungsgemischen mit unterschiedlichen Strahlenqualitäten im Nennenergiebereich (z.B. Strahlenqualitäten A,B,C) [23].
- der gegenüber der PTB- Mindestanforderung [22] von 45° auf 60° erweiterte Nennbereich des Strahleneinfalls auch bei energieärmerer Photonenstrahlung,
- die Dosisanzeige auch unter einer Strahleneinfallsrichtung von 90° von der Vorzugsrichtung (Abb. 15). Im Gegensatz zum Flachglasdosimeter lassen Mehrkomponentendosimeter bei Anwendung eines Auswertalgorithmus insbesondere im Energiebereich unterhalb 50 keV wegen unterschiedlicher bzw. gegenseitiger Abdeckung der Einzeldetektoren u. U. Fehlanzeigen erwarten,
- oberhalb einer vorgegebenen Dosischwelle die automatische Angabe einer Strahlenqualität unter anderem auch für Photonenenergien unterhalb 30 keV einschließlich einem Strahleneinfall bis 60° (siehe auch Abb. 6 und Tab. 3),
- die Erkennung eines frontalen Strahleneinfalls bzw. eines u. U. gerichteten Strahleneinfalls (siehe auch Abb. 7, Tab. 3 und Abschnitt 6.1),
- die gute Übereinstimmung der Dosisanzeige bei Bestrahlung am Plattenphantom und am Alderson - Menschphantom (siehe Abschnitt 6.1).

5.3 Empfindlichkeit gegenüber β -Strahlung und thermischen Neutronen

Durch die Dicke des Plastik- bzw. Zinnfilters in der Dosimeterkapselung von Flachglasdosimetern wird energiearme β -Strahlung absorbiert, so daß eine entsprechende β -Empfindlichkeit nicht zu erwarten ist. Zur Ermittlung des Ansprechvermögens gegenüber β -Strahlung wurden Flachglasdosimeter im Strahlungsfeld einer Sr-90/Y-90- und Tl-204-Quelle mit einer Maximalenergie $E_{\beta, \max}$ von 2,27 MeV und 0,763 MeV bestrahlt. Der Quotient R_{β}/R_{γ} des Ansprechvermögens für β -Strahlung und Cs-137-Photonenstrahlung ergab für Sr-90/Y-90 einen Wert von 0,08 und für Tl-204 einen Wert von 0,01.

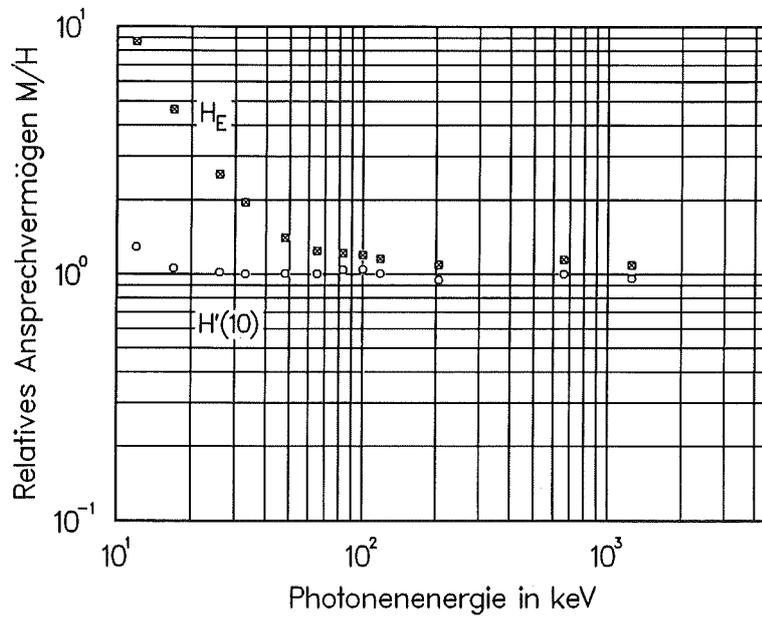


Abb. 14: Vergleich der Anzeige M des Flachglasdosimeters an der Phantomoberfläche bei senkrechtem Strahleneinfall bezogen auf die Meßgröße $H'(10)$ und die effektive Dosis H_E nach ICRP 51 [19]

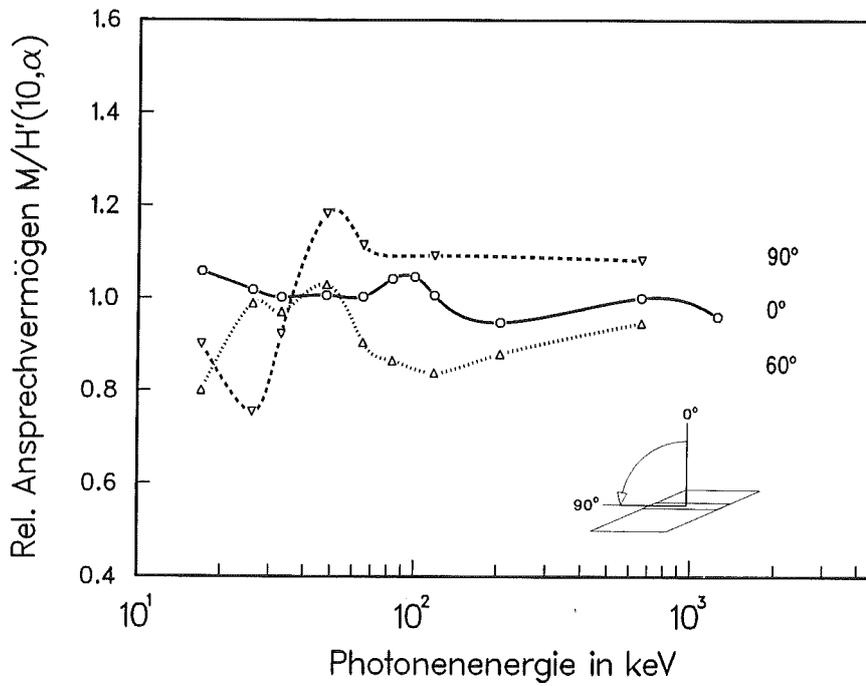


Abb. 15: Energie- und Richtungsabhängigkeit des Flachglasdosimeters für eine Bestrahlung am Kugelphantom

Bedingt durch den Silberanteil in der Glaszusammensetzung zeigen Phosphatglasdosimeter eine gewisse Empfindlichkeit gegenüber thermischen Neutronen. Entsprechende Kalibrierbestrahlungen mit thermischen Neutronen erfolgten bei der PTB in Braunschweig. Das relative Ansprechvermögen gegenüber thermischen Neutronen R_{th}/R_Y betrug bei Freiluftbestrahlung 0,19. Durch den Anteil zusätzlicher Albedoneutronen erhöht sich dieser Wert auf 0,39 bei Bestrahlungen auf einem Plattenphantom. Eine Bestrahlung der Glaskarte ohne Dosimeterkapselung ergab hier einen Wert von 0,3. Wird in der Routine in einem Photonen-Neutronen-Mischstrahlungsfeld im ungünstigsten Fall ein Verhältnis von $H_{th}/H_Y=0,15$ erwartet, würde das Flachglasdosimeter die Photonen-Äquivalentdosis um den Faktor 1,06 überschätzen.

Die geringe Empfindlichkeit des Flachglasdosimeters gegenüber β -Strahlung und thermischen Neutronen läßt daher auch in Mischstrahlungsfeldern keine Verschlechterung des Photonennachweises erwarten.

5.4 Empfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen

Die durch Umwelteinflüsse zu erwartende Änderung der Dosisanzeige und der dadurch bedingte Einfluß auf die Meßgenauigkeit ist beim Flachglasdosimeter eingehend untersucht worden. Dies betrifft insbesondere den Einfluß eines temperaturabhängigen Anstieges der Fluoreszenzintensität unmittelbar nach der Bestrahlung (Build-up- Effekt), den Einfluß von Luftfeuchtigkeit, insbesondere aber den Temperatureinfluß während der Bestrahlung, der Lagerung bzw. der Messung als auch der Einfluß einer Meßwertlöschung bei UV-Lichtbestrahlung. Tab. 1 zeigt eine Zusammenstellung dieser im folgenden ausführlicher dargestellten Einflußgrößen sowie entsprechende Empfehlungen zur Herabsetzung der hier zu erwartenden Fehlereinflüsse.

Der temperaturabhängige Anstieg der strahleninduzierten Fluoreszenzintensität nach Bestrahlung des Glases kann in der Routineüberwachung zu Meßunsicherheiten führen, wenn die Messung unmittelbar nach der Bestrahlung bzw. in den ersten Tagen nach Bestrahlung erfolgt und das Build-up noch nicht abgeschlossen ist. Bei einer Meßstelle kommen Dosimeter zur Auswertung, die innerhalb des Überwachungszeitraumes 10 bis 40 Tage vorher bestrahlt worden sind. Noch 10 Tage nach einer Bestrahlung kann die entsprechende Meßunsicherheit bis zu 2% betragen. Zur Verringerung dieses Einflusses können die Dosimeter vor der Messung kurzzeitig bei 35 °C gelagert werden.

Tabelle 1: Einfluß der Umgebungstemperatur auf die Meßwertanzeige von silberaktivierten Phosphatgläsern

Parameter	Änderung der Anzeige	Effekt
Build-up der PL-Intensität bei 20 °C zwischen 10/40 Tagen nach Bestrahlung	+2%	vernachlässigbar bei Wärmebehandlung vor der Messung
Luftfeuchtigkeit 90% / 80 °C/7 Tage	kein Effekt	Glasreinigung nicht erforderlich
Temperatur T während der Bestrahlung	<0,1%/°C	<2% bis zu 40 °C
Lagerung 63 °C/100 Tage 30 °C/8 Jahre	<0,5% -2%	Fading vernachlässigbar
Messung ΔT zwischen Kalibrier- und Routineglas	-0,56%	vernachlässigbar wegen gleicher T
UV-Lichteinfluß auf Meßwert nach 3500 Messungen	-1%	vernachlässigbar

Beim Glasdosimeter ergeben Einflüsse der Umgebungstemperatur und der Luftfeuchtigkeit während der Lagerung keine nennenswerte Änderung des Ansprechvermögens bzw. der strahleninduzierten Meßwertspeicherung. Unsere Untersuchungen zeigten keine Änderung des Meßwertes nach 8 Tagen Lagerung bei 80 °C und einer relativen Luftfeuchte von 90% bzw. nach 100 Tagen Lagerung bei 63 °C. Ältere Untersuchungen ergaben ein Langzeitfading von -2% nach 8 Jahren Lagerung bei 30 °C [28]. Glasdosimeter zählen daher zu den stabilsten Festkörperdosimetern mit einem vernachlässigbaren Fading, so daß hier eine Langzeitdosimetrie beispielsweise zur Messung einer personenbezogenen "Lebensalterdosis" möglich erscheint.

Glasdosimeter zeigen hingegen eine Temperaturabhängigkeit unmittelbar während der Bestrahlung, die den Dosismeßwert bis zu 0,1%/°C erhöhen kann. Unter der Annahme, daß innerhalb der Personenüberwachung eventuelle Bestrahlungen nicht nur bei Zimmertemperatur erfolgen, sondern auch an Arbeitsplätzen an kerntechnischen Anlagen Temperaturen bis zu 40 °C nicht auszuschließen sind, kann die maximale Änderung der Dosisanzeige innerhalb der Routinedosimetrie im Vergleich zum Kalibrierdosimeter bis zu +2% betragen (siehe auch Abschn. 6.3).

Die entsprechenden Ergebnisse der PTB-Bauartprüfung ergaben insbesondere auch für die Anwendung des Flachglasdosimeters als Ortsdosimeter im untersuchten Bereich von -10 °C bis 50 °C bzw. 10% bis 90% relativer Luftfeuchte eine temperatur- und luftfeuchtigkeitsbedingte Meßwertänderung von 5% [15].

Den größten Einfluß der Umgebungstemperatur von $0,56\%/^{\circ}\text{C}$ erwartet man während der Messung. In der Routineüberwachung können jedoch Temperaturunterschiede zwischen dem Kalibrierglas und dem Routinedosimeter vermieden werden, wenn die in den entsprechenden Magazinen zur Auswertung bereitgestellten Dosimeter kurzzeitig, d.h. beispielsweise einen Tag vor der Messung im Meßlabor abgestellt werden. Örtliche Temperaturunterschiede bzw. kurzzeitige Temperaturänderungen, beispielsweise verursacht durch Heizkörper bzw. Heizöfen zur Regenerierung von Dosimetern, müssen daher im Meßlabor ausgeschlossen werden können. Bei einer konstanten Umgebungstemperatur kann im Labor andererseits eine Temperatur zwischen 10 °C und 40 °C toleriert werden.

Durch die Kapselung des Glasdetektors ist eine UV-Lichteinwirkung und eine damit verbundene Meßwertlöschung innerhalb der Routineüberwachung auszuschließen. Die Kinetik des Fluoreszenzverhaltens von silberaktivierten Phosphatgläsern zeigt bei der Messung unmittelbar nach einer langzeitigen UV-Lichtanregung bzw. nach anschließenden Wiederholmessungen einen zeitabhängigen Verlust bzw. Wiederanstieg der Fluoreszenzintensität (Quenching). Bei der kurzzeitigen gepulsten UV-Laseranregung (3ns) sind etwa 3500 Auswertungen des selben Dosimeters erforderlich, um eine Meßwertlöschung von 1% zu ergeben.

6. Routineerprobung

6.1 Ergebnisse beim IAEO-Vergleich 1990/91 für Personendosimeter

Auf Einladung der IAEO beteiligte sich KfK in den Jahren 1990/91 mit dem neuen Phosphatglasdosimetriesystem an einer internationalen Vergleichsbestrahlung für Personendosimeter [24,25]. Innerhalb dieses Vergleichs wurden Dosimetriesysteme eingesetzt, die auf die neue, von der ICRU empfohlene Meßgröße $H_p(10)$ optimiert worden sind. Die Bestrahlungen der Dosimeter erfolgte auf einem Plattenphantom sowie auf einem Alderson-Mensch-Phantom mit unterschiedlichen Photonenenergien im Photonenenergiebereich 20 keV bis 1,3 MeV (Strahlenqualität C für Röntgenbremsstrahlung mit mäßig harter Filterung) [23] und Strahlen-

einfallrichtungen unter 0°, 30° und 60° bzw. bei rotierendem Phantom. Die besonderen Möglichkeiten des Einelement-Flachglasdosimeters zur Analyse der Bestrahlungsbedingungen kamen auch hier beim IAEA-Vergleich zum Tragen.

Abb. 16 vergleicht die Ergebnisse der verschiedenen Dosimetriesysteme für eine Frontalbestrahlung der Dosimeter. Danach zeigt das Flachglasdosimeter (PLD) eine geringe Abweichung der gemessenen Äquivalentdosis H von dem Sollwert der interessierenden Größe $H_{sl}(10,0^\circ)$, d.h. der Dosisgröße $H'(10)$ für senkrechten Strahleneinfall am Plattenphantom (slab). Für die Bestrahlungen im Photonenenergiebereich 20 keV bis 1,3 MeV ergab sich ein Variationskoeffizient $v(H-H_{sl})$ der Dosismessung von 8 %. Der entsprechende Mittelwert der Meßwerte lag bei 0,99 (siehe Tab. 2). Für alle Strahleneinfallrichtungen einschließlich der

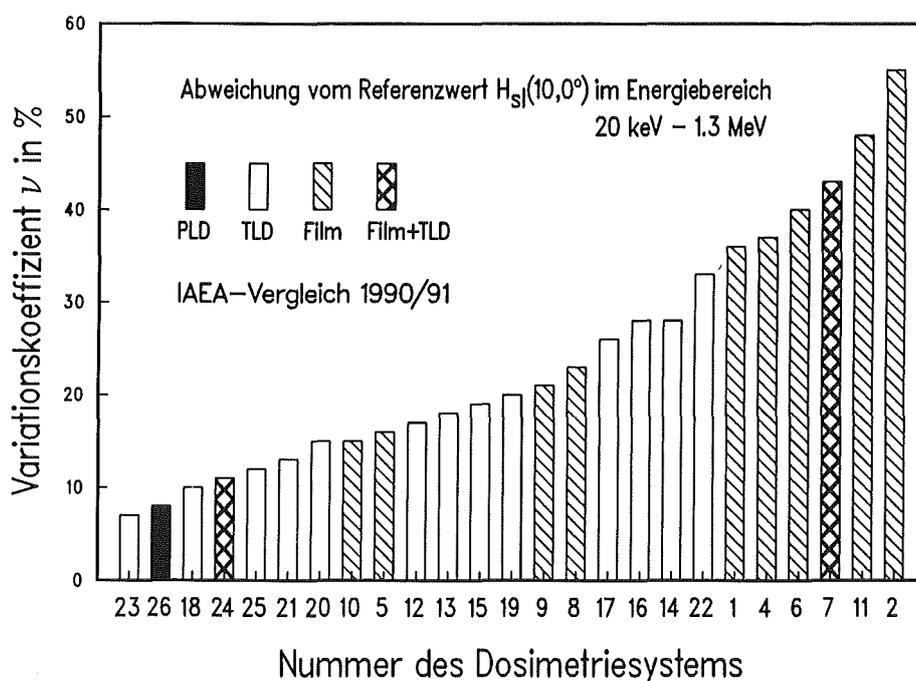


Abb. 16: Verteilung des Variationskoeffizienten der Dosismessung für die am IAEA-Vergleich 1990/91 teilgenommenen Personendosimetriesysteme

Rotation am Plattenphantom und Alderson-Phantom ergab sich ein Mittelwert von 0,95 und ein Variationskoeffizient von 16 %. Die KfK-Ergebnisse des Vergleichs verdeutlichen die hervorragenden Eigenschaften des Einkomponenten-Glasdosimeters im Vergleich zu Filmdosimetern und Thermolumineszenzdosimetern [26]. Bei den besten dieser Systeme werden zur Dosisbestimmung mindestens 5 unterschiedlich gefilterte Detektoren zur Superposition der Anzeigen herangezogen.

Tab. 2: KfK-Ergebnisse für das Flachglasdosimeter beim IAE0-Vergleich 1990/91

E (keV)	H/H _{sl} (10,0°)	H/H _{sl} (0,07) ¹⁾
20	0,81	-
37	1,06	0,99
57	1,04	1,11
104	1,00	1,08
205	0,93	0,98
374	0,97	0,98
662	1,04	1,04
1 250	0,99	0,98
37 + 662	1,06	1,03
Mittelwert	0,99	1,03
Variationskoeffizient	± 8 %	± 5 %

1) Nennbereich der Photonenenergie 25 keV bis 1,3 MeV

Die automatische Messung des Dosisprofils im Glas unmittelbar nach der Routineauswertung wird zur Interpretation von Strahlenqualität und Strahleneinfallrichtung herangezogen. Tabelle 3 zeigt einen Ausdruck der automatischen Auswertung der Flachglasdosimeter beim IAE0-Vergleich. In der jeweils ersten Zeile finden sich Ergebnisse der Routineauswertung entsprechend dem Tabellenkopf. In der zweiten Zeile werden die 7 relativen Meßwerte der horizontalen Auswertung und der ermittelte Energiebereich ausgedruckt und in der dritten Zeile stehen die Meßwertverhältnisse für eine vertikale Abtastung. Abb. 17 zeigt hierzu die bei horizontaler Abtastung des Glases ermittelten Dosisprofile am Beispiel der IAE0-Bestrahlung bei 57 keV an verschiedenen Phantomen bei einem Strahleneinfall unter 0°, 30°, 60° und bei Rotation.

Aus der Lage des Intensitätsmaximums und dem Verhältnis zum Minimum läßt sich die Strahleneinfallrichtung bzw. die Strahlenqualität ermitteln. Aus Tab. 4 geht hervor, daß für alle Bestrahlungen die Strahlenqualität richtig angegeben wurden. Die von einer Frontaleinstrahlung abweichenden Eintrittswinkel von 30° bzw. 60° wurden mit Ausnahme des 30°-Wertes bei 104 keV bzw. bei höheren Energien richtig erkannt.

Im Vergleich zur Bestrahlung am Plexiglasplattenphantom zeigt das Flachglasdosimeter bei Bestrahlung am gewebeäquivalenten Alderson-Mensch-Phantom im

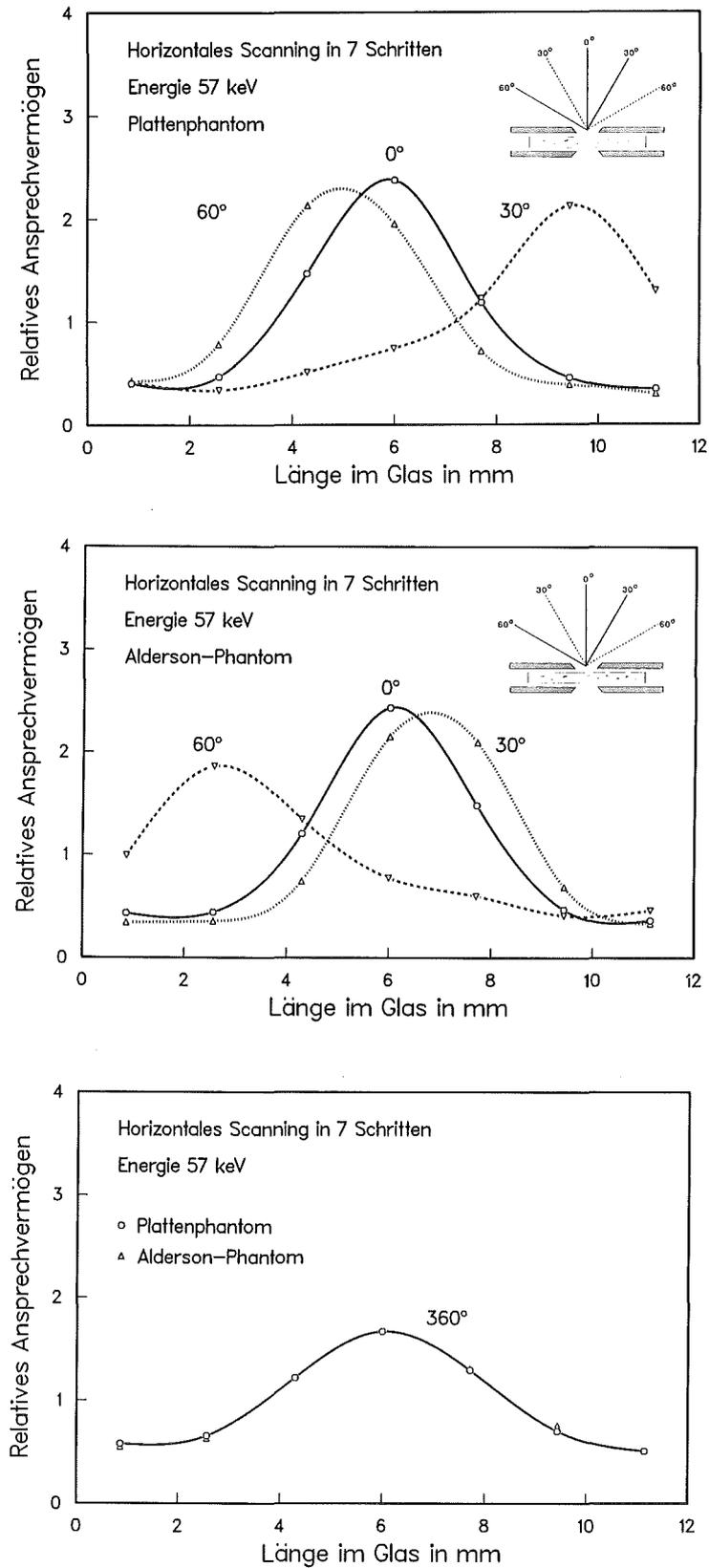


Abb. 17 Horizontales Dosisprofil im Flachglasdosimeter für Photonenstrahlung von 57 keV, IAEA-Vergleich 1990/91 für Bestrahlungen am (a) Plattenphantom, (b) Aldersonphantom für unterschiedliche Einfallswinkel sowie (c) bei Rotation der Phantome

Tab. 4: KfK-Angaben zur Strahlenqualität und Strahleneinfallrichtung im Vergleich zu den IAE0-Solldaten

Nr.	E _q (keV) 1)		Winkel	
	IAEO	KfK	IAEO	KfK
1	B20	<30	0°	
2		<30	30°	30°
3		<30	60°	60°
4	B37	30-70	0°	
5	B57	30-70	0°	
6		30-70	30°	30°
7		30-70	60°	60°
8		30-70	360°	
9	B57/Al	30-70	0°	
10		30-70	0°	
11		30-70	30°	30°
12		30-70	60°	60°
13		30-70	360°	
14	B104	70-150	0°	
15		70-150	30°	
16		70-150	60°	60°
17	N205	> 150	0°	
21	G662/Al	> 150	0°	
22		> 150	0°	
23		> 150	30°	
24		> 150	60°	
25		> 150	360°	
26		> 150	0°	
27		> 150	30°	
28		> 150	60°	
29		> 150	360°	
34		G1250	Co-60	0°
35	G662/B37	70-150	0°	

1) Zahlenwert entspricht der mittleren Photonenenergie

Bereich der Lungen bzw. des Abdomen einen um 6 bis 10 % geringeren Rückstreuungseffekt. Die Ergebnisse dieses Vergleiches mit dem jetzt kommerziell erhältlichen PLD-System fanden allgemeine internationale Beachtung, zumal das Dosimeter wegen seiner hohen Empfindlichkeit, seiner geringen Meßunsicherheit im Bereich unterhalb 0,1 mSv und der Langzeitstabilität des Meßwertes gegenüber Einflüssen der Umgebungstemperatur und der Luftfeuchtigkeit nicht nur als Routinedosimeter, sondern auch als Referenzdosimeter zur Analyse von Strahlungsfeldern wie z.B. zur Qualitätssicherung von Röntgenanlagen in der Röntgendiagnostik eingesetzt werden kann.

6.2 Langzeitstabilität des Dosimetriesystems

Die Einsatzmöglichkeiten des Flachglasdosimeters zur langzeitigen Akkumulierung kleiner Dosen wurden über einen Zeitraum von drei Monaten untersucht. Bei verschiedenen Teilchargen von je 8 Dosimetern wurde der Zuwachs des Dosismesswertes durch die natürliche Strahlung (Abb. 18) sowie eine zusätzlich laufende Bestrahlung mit einer Dosis von 0,05 mSv bzw. 0,1 mSv bestimmt (Abb. 19).

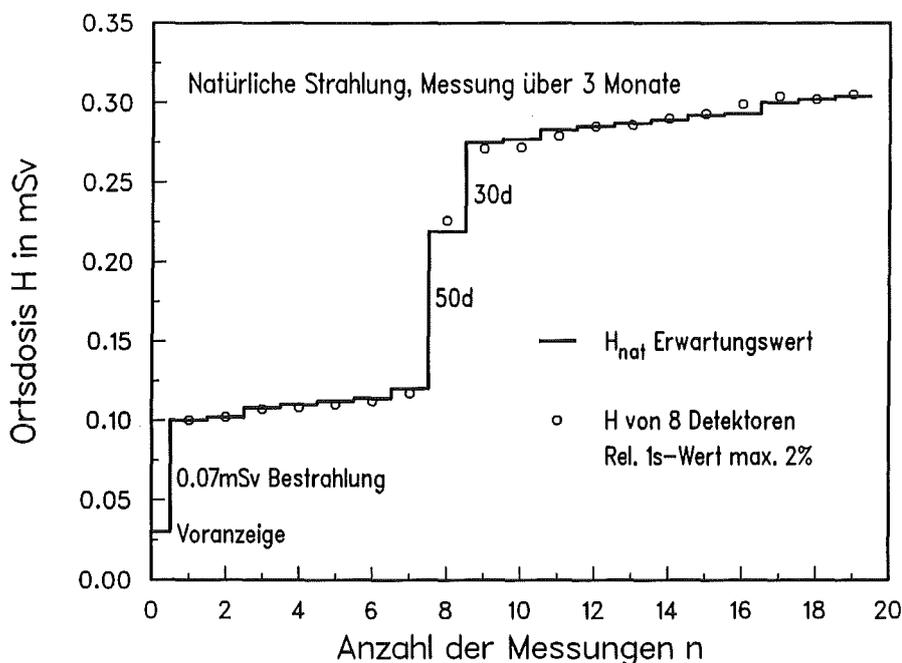


Abb. 18: Messung der Ortsdosis mit Flachglasdosimetern bei 18 Zwischenauswertungen innerhalb eines Zeitraumes von 3 Monaten

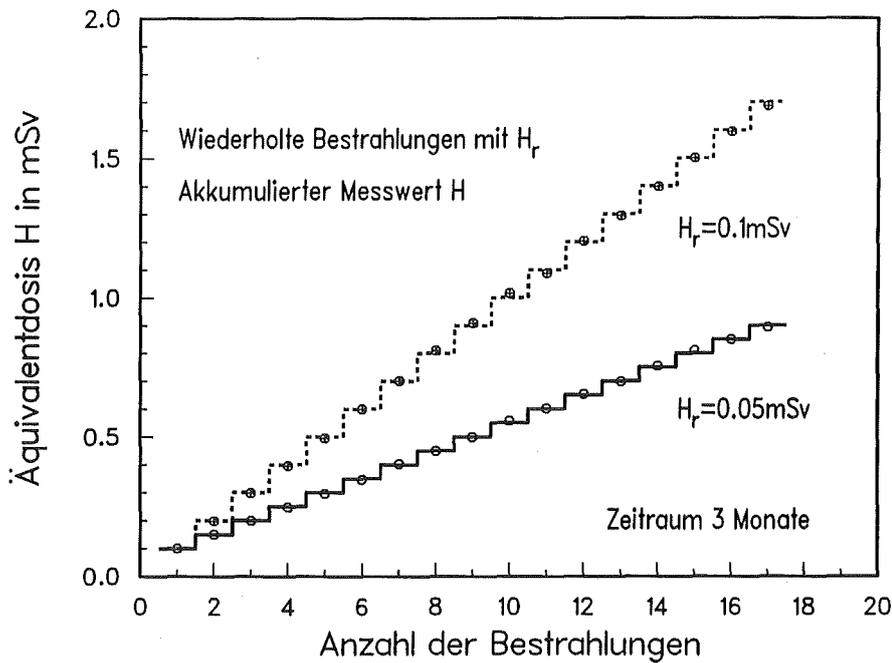


Abb. 19: Wiederholte Bestrahlung und Auswertung von Flachglasdosimetern mit einer Referenzdosis H_r

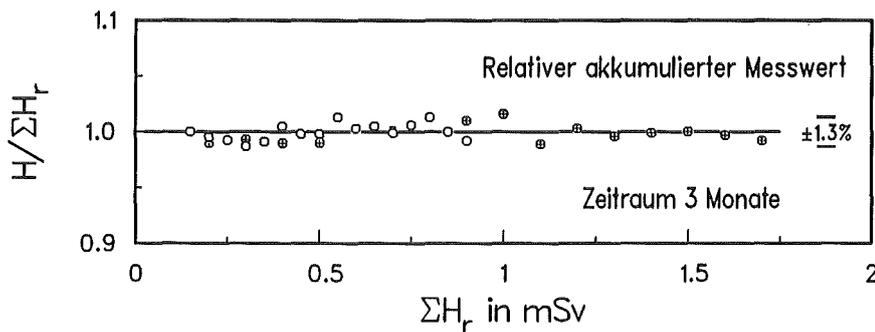


Abb. 20: Mittelwert der relativen akkumulierten Dosisanzeige nach wiederholter Bestrahlung einer Flachglasdosimetercharge

Mit einem in der Umgebungsüberwachung üblicherweise eingesetzten Dosimeterpaar kann danach die natürliche Strahlungsdosis nach Abzug einer Voranzeige von 0,03 mSv (Variationskoeffizient der Messung 5%) schon nach einer Akkumulierungszeit von 10 Tagen mit einer Meßunsicherheit von 25% angezeigt werden [27]. Bei der wiederholten Dosisakkumulierung und Messung der Dosimeterchar-

ge zeigt das Verhältnis Istdosis/Solldosis eine maximale Abweichung von 1,3% für alle Meßergebnisse innerhalb eines Zeitraumes von drei Monaten (Abb. 20). Diese Ergebnisse sind u.a. repräsentativ für eine wiederholte Kontrollauswertung eines "personenbezogenen" Personendosimeters (Tagesauswertung, Monatsauswertung) innerhalb der Routineüberwachung am Arbeitsplatz bzw. bei der amtlichen Meßstelle, aber auch für einen Einsatz als Ortsdosimeter innerhalb der Umgebungsüberwachung. Diese langzeitige Meßgenauigkeit des Dosimetriesystems von etwa 1% berücksichtigt sowohl Meßfehler einer wiederholten Bestrahlung und einer wiederholten Kalibrierung des Auswertesystems, als auch Einflüsse eines zeitabhängigen Build-up-Verhaltens der PL-Intensität.

6.3 Einfluß der Umgebungstemperatur in der Routineüberwachung

Beim Einsatz von Festkörperdosimetern innerhalb der Personenüberwachung werden unterschiedliche Temperaturen erwartet, die jahreszeitlich bedingt mindestens zwischen 20 °C und 40 °C betragen können. Bei Thermolumineszenzdosimetern wird der Temperatureinfluß während des Überwachungszeitraumes durch eine Wärmebehandlung nach der Bestrahlung bzw. vor der Auswertung herabgesetzt. Bei erhöhter Umgebungstemperatur ist ein Fading des Meßwertes jedoch nicht zu vermeiden. PLD-Systeme sind hingegen unempfindlich gegenüber Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüssen. Nach 100 Tagen Lagerung bei 63 °C konnte kein Fading festgestellt werden. Frühere Experimente zeigten ein Fading von -2% nach acht Jahren Lagerung bei 30 °C [28]. Untersuchungen im Rahmen dieses Vorhabens ergaben bei Glasdosimetern insbesondere während der Bestrahlung im Temperaturbereich 0 °C bis 100 °C einen Temperatureinfluß von weniger als +0,1% / °C.

Abb. 21 zeigt die zu erwartende Änderung der Dosisanzeige für einen monatlichen Überwachungszeitraum in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Innerhalb der Routineüberwachung kann hierbei eine Bestrahlung in einem Zeitraum zwischen 7 Tagen bzw. 40 Tagen vor der Auswertung bei der Meßstelle erwartet werden. Während beim Phosphatglasdosimeter nur der Einfluß der Temperatur zum Tragen kommt, zeigen TLD-Systeme im Vergleich ein zeit- und temperaturabhängiges Fading-Verhalten [29]. Der Meßwert wird hierbei auf Kalibrierdosimeter bezogen, die vor Beginn des Überwachungszeitraumes mit den Routinedosimetern gleichzeitig wärmebehandelt, danach bei 20 °C gelagert und 1 Tag vor der Auswertung mit der Referenzdosis bestrahlt wurden. Beim Glasdosimeter wird hingegen ein Kalibrierdosimeter über einen Zeitraum von etwa

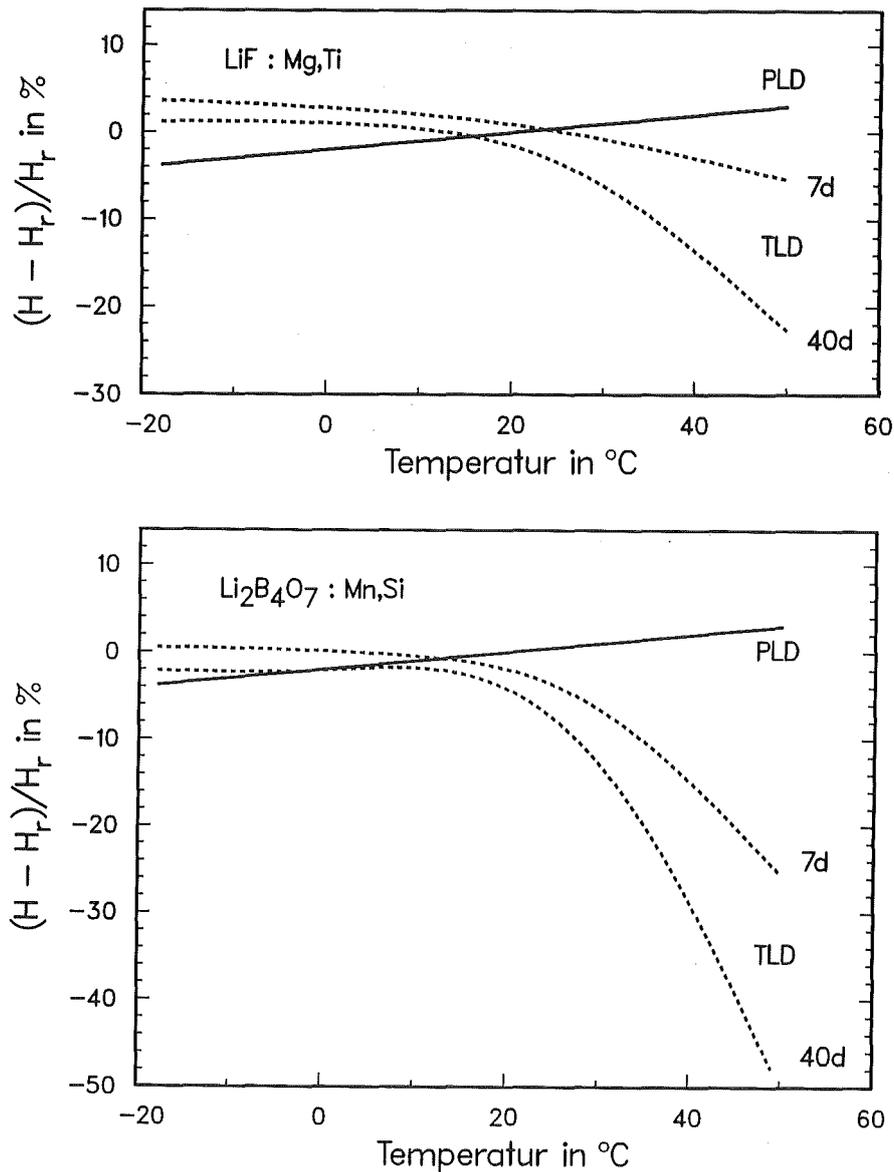


Abb. 21: Einfluß der Umgebungstemperatur auf die Dosisanzeige von Flachglasdosimetern und (a) LiF-Dosimetern bzw. (b) $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ -Dosimetern

6 Monaten eingesetzt und der Meßwert auf den Referenzwert für eine Bestrahlung bei 20 °C bezogen. Bei Umgebungstemperaturen zwischen 20 °C und 40 °C kann die temperaturbedingte Meßunsicherheit innerhalb der Routineüberwachung beim Glasdosimeter +2 %, bei LiF-Dosimetern bis zu -15 % und bei $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ -Dosimetern bis zu -30 % betragen.

Innerhalb der Personen- und Umgebungsüberwachung erwartet man mit Phosphatglasdosimetern daher eine Dosisanzeige, die gegenüber umweltbedingten Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüssen weitgehend stabil ist.

6.4 Einsatz innerhalb der Personendosimetrie

Das Phosphatglasdosimetriesystem bietet aufgrund der Bauartzulassung die Möglichkeit, Personendosen im Bereich von 0,1 mSv bis 8 Sv zu messen. Dieser Dosisbereich schließt ein, daß Dosimeter mit einer Vordosis bis zu 3 mSv zum Routineeinsatz kommen. In der Praxis wird jedoch immer nur ein kleiner Teil diese Schwelle erreichen, so daß bei monatlichem Dosimeterwechsel auch kleinere Dosen meßbar sind (siehe auch Abschnitt 5.1 und Abschnitt 7).

Im Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf (ZfK) wurde über einen Zeitraum von 3 Monaten eine Gruppe von ca. 350 Personen mit monatlichem Dosimeterwechsel überwacht. Die Häufigkeitsverteilung in Abb. 22 zeigt deutlich Unterschiede der monatlichen Personendosisverteilung, die durch die Art der Tätigkeit und der Tätigkeitsdauer in strahlenschutzrelevanten Bereichen bestimmt sind. Phosphatglas- und Filmdosimeter, die in diesem Zeitraum parallel getragen wurden, zeigten nur für höhere Dosen eine gute Übereinstimmung. Die ungünstigere untere Nachweisgrenze bei Filmdosimetern, aber auch die Rundung der Personendosisergebnisse durch die amtliche Meßstelle sind dafür verantwortlich, daß bei kleinen Dosen unterhalb 0,2 mSv sowohl im Einzelfall als auch bei der Häufigkeitsverteilung der Monats- bzw. Dreimonatsdosis keine ausreichende Übereinstimmung gefunden werden konnte.

Ein weiterer Test in der Personendosimetrie mit monatlichem Dosimeterwechsel fand im KfK mit einer Gruppe von ca. 60 Personen statt. Abb. 23 zeigt nach Abzug des natürlichen Strahlungsanteiles die Verteilung der monatlichen Dosiswerte in Dosisintervallen von 0,02 mSv. Wegen der geringeren Meßunsicherheit des Systems bei Dosiswerten von 0,1 mSv und darunter ist eine detailliertere Darstellung und Interpretation der Personendosen möglich, zumal in diesem Test jeweils regenerierte Glaskarten zum Einsatz kamen.

Das Phosphatglasdosimeter kann wegen des geringen Fadings und der guten Langzeitstabilität auch für eine langzeitige Überwachung von Personen eingesetzt werden. So wurden im KfK ca. 1.400 Personen über einen Zeitraum von 1 Jahr mit einem Flachglasdosimeter überwacht. Für eine Langzeitüberwachung werden immer regenerierte Personendosimeter eingesetzt. Abb. 24 zeigt die gemessenen Personendosen nach Abzug des natürlichen Backgrounds. Bei einer solchen langzeitigen Überwachung wird ein beträchtlicher Teil des Meßwertes durch natürliche Strahlung erzeugt, besonders dann, wenn Personen überwacht

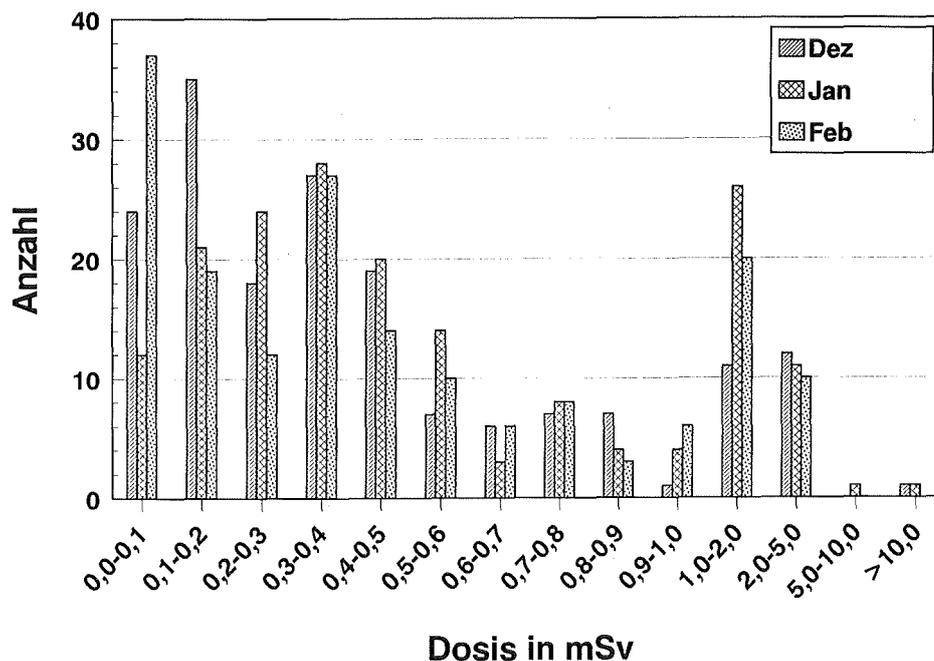


Abb. 22: Häufigkeitsverteilung der Personendosen für drei aufeinanderfolgende monatliche Überwachungen am Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf

werden, die nur selten und dann nur kurzzeitig in strahlenschutzrelevanten Bereichen tätig und dort kaum einer Strahlenexposition ausgesetzt sind.

Zur Bestimmung der beruflichen Strahlenexposition ist die Kenntnis des natürlichen Backgrounds erforderlich. Zum Abzug von H_{nat} wird für alle Dosimeter die gleiche Backgrounddosisleistung, z.B. die bei der Meßstelle, zugrundegelegt. Die Auswertung der Meßergebnisse hinsichtlich eines unterschiedlichen natürlichen Strahlungsanteiles ergab, daß je nach Gebäudeart (z. B. Leichtbauweise, Betonwände) für H_{nat} eine entsprechende Jahresdosis von $(0,8 \pm 0,25)$ mSv zu erwarten ist. Entspricht H_{nat} bei einer Meßstelle nicht dem mittleren, sondern im Extremfall dem maximalen bzw. minimalen Wert, könnten bei einer Jahresauswertung negative Dosisdifferenzen auftreten bzw. eine berufliche Strahlenexposition von bis zu 0,6 mSv vorgetäuscht werden.

Bei einer monatlichen Überwachung (2 Monate Exposition) erwartet man mit $H_{nat} = (0,13 \pm 0,04)$ mSv im Einzelfall durch die Subtraktion von H_{nat} eine zusätzliche Meßunsicherheit, die bei einer Personenexposition maximal 0,04 mSv betragen kann. In der Routinedosimetrie erscheint daher eine Rundung der Meßergebnisse in Stufen von 0,1 mSv sinnvoll zu sein. Auf eine Rundung sollte jedoch ver-

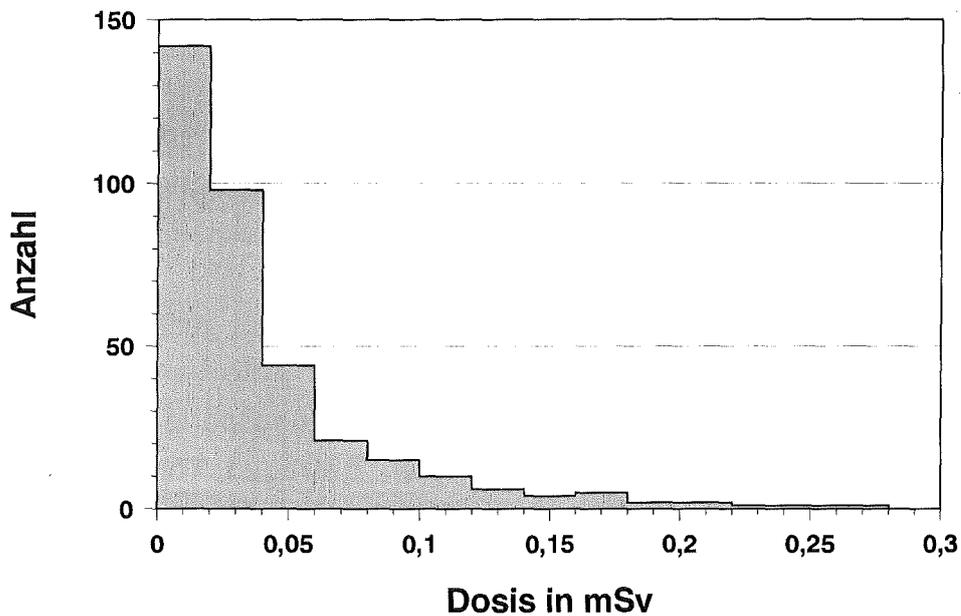


Abb. 23: Häufigkeitsverteilung der Personendosen in Dosisintervallen von nur 0,02 mSv für eine monatliche Überwachung bei KfK

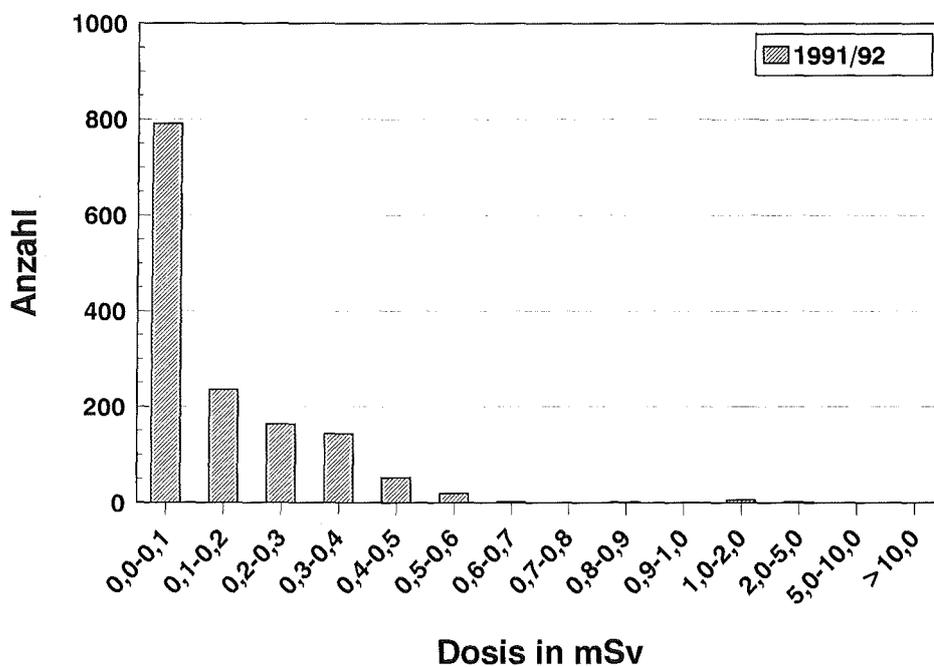


Abb. 24: Häufigkeitsverteilung der Personendosen für eine jährliche Überwachung bei KfK

zichtet werden, wenn z.B. $H_{\min} < 0,1$ mSv ist bzw. im Vergleich mit anderen Dosimetern eine genauere Dosisangabe gewünscht wird.

Für das Flachglasdosimeter mit einer hohen Meßgenauigkeit auch bei kleinen Dosen scheint deshalb eine individuelle Kenntnis des natürlichen Backgroundes am Ort der Überwachung u.U. vorteilhaft zu sein, wenn Dosisangaben noch unterhalb 0,1 mSv wünschenswert bzw. erforderlich sind.

Die Erprobung des Flachglasdosimeters in der Routine hat gezeigt, daß schon bei einer monatlichen Überwachungsperiode die Messung kleiner Dosen auch unterhalb von 0,1 mSv möglich ist. Für längere Überwachungsperioden, die bei amtlichen Personendosimetern bis zu 6 Monaten betragen können (§63 Abs. 4 StrlSchV) [20], ist die genauere Kenntnis des natürlichen Backgrounds wünschenswert, um die in der Bauartzulassung vorgegebene untere Grenze des Dosisbereiches von 0,1 mSv mit der zulässigen Gesamtmeßunsicherheit $G(H)$ nachzuweisen (siehe auch Abschnitt 7 und Abb. 27).

6.5 Einsatz innerhalb der Umgebungsüberwachung

Die Ergebnisse des langzeitigen Tests des Flachglasdosimetriesystems innerhalb der Umgebungsüberwachung liegen bisher nur in kleinem Umfang vor und sind erst im 4. Quartal 1992 zu erwarten. In einem Versuch wurden an 10 Meßorten entlang des KfK-Zaunes innerhalb des vorhandenen Meßstellennetzes an jedem 4. Meßort 2 Flachglasdosimeter zusammen mit 2 TL-Dosimetern über einen Zeitraum von 6 Monaten ausgehängt. Die Meßergebnisse zeigen für beide Dosimeterarten eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der ortsabhängigen Schwankung insbesondere des natürlichen Strahlenpegels (Abb. 25). Vergleicht man die einzelnen Meßwerte der Detektorpärchen, ergibt sich für das Phosphatglasdosimeter eine kleinere Streuung aufgrund der hier zu erwartenden besseren Meßgenauigkeit gegenüber dem TLD-System.

Im Vergleich zum Flachglasdosimeter, bei dem ein Fading nicht zu erwarten ist, wird z.B. bei den hier eingesetzten LiF:Mg,Ti-Detektoren das tatsächliche Fading durch im Freien exponierte Kalibrierdosimeter ermittelt und der Meßwert entsprechend korrigiert. Beim Flachglasdosimeter entfällt aber auch das bei TLD-Systemen erforderliche, aufwendige Kalibrierverfahren (siehe auch Abschnitt 6.3 und 3.3).

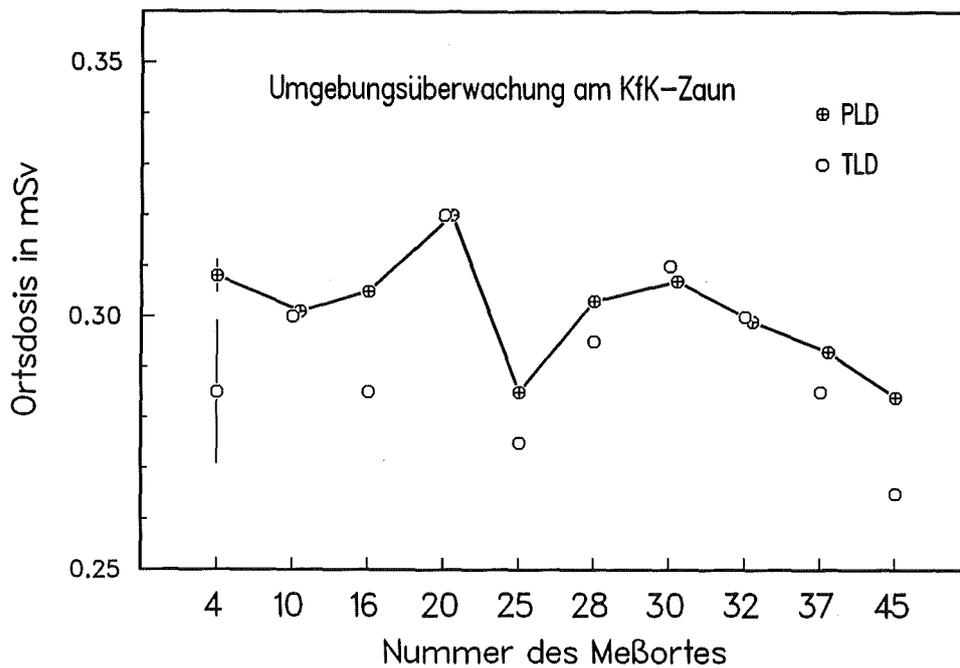


Abb. 25: Meßergebnisse der TL- und Flachglasdosimeter nach halbjährlicher Exposition in der Umgebung

In der Umgebungsüberwachung werden, wie bei einer Langzeitdosimetrie in der Personenüberwachung, jeweils regenerierte Glasdosimeter eingesetzt. Da die in der Personenüberwachung erforderliche Korrektur von H_{nat} entfällt und die Zufallsunsicherheit der Dosismessung für ein Einzeldosimeter bei 0,1 mSv etwa 3% und für den Mittelwert von 2 Dosimetern 1,7% beträgt, können Halbjahresdosen innerhalb der Umgebungsüberwachung mit einer bisher mit Festkörperdosimetern nicht erreichten Meßgenauigkeit im Photonenenergiebereich oberhalb 25 keV nachgewiesen werden (siehe auch Abb. 28).

7. Meßunsicherheit bei kleinen Dosen

Für die Bauartzulassung von Personen- und Ortsdosimetern wird aufgrund der PTB-Anforderungen [15,22] der maximal zulässige Wert der Gesamtmeßunsicherheit $G_{max}(H)$ mit

$$G_{max}(H) = k \cdot t(H)$$

vorgegeben, wobei $t(H)$ eine festgelegte Funktion mit dem Parameter der unteren Grenze des Dosisbereiches H_{min} ist und für Personen- und Ortsdosimeter die zulässige Gesamtmeßunsicherheit im oberen Dosisbereich durch $k=0,4$ bzw. $0,3$

begrenzt wird. Beim Personendosimeter muß die untere Grenze des Dosisbereiches mindestens $H_{\min}=0,2$ mSv und die obere Grenze $H_{\max}=2$ Sv betragen. Zu berücksichtigen sind ferner Strahleneinfallrichtungen innerhalb eines Konus von 45° zur Vorzugsrichtung. Die maximal zulässige Gesamtmeßunsicherheit $G_{\max}(H)$ ist in Abb. 26 als Funktion der Dosis wiedergegeben. Personendosimeter müssen aufgrund der Eichordnung [16] diese Mindestanforderungen bei der Bauartzulassung und den regelmäßigen Vergleichsmessungen erfüllen.

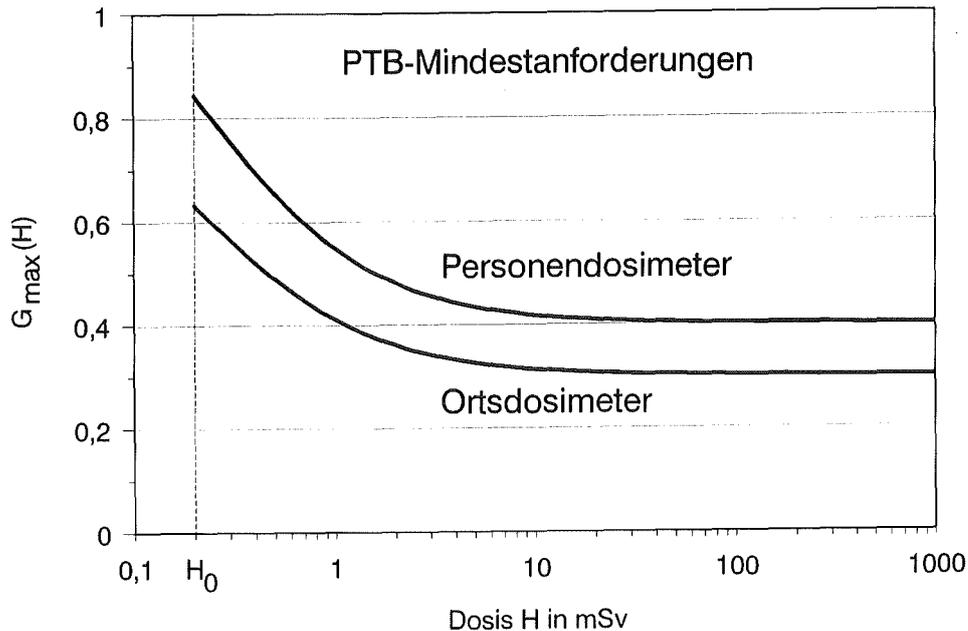


Abb. 26: Maximal zulässige Gesamtmeßunsicherheit $G_{\max}(H)$ für Personen- und Ortsdosimeter für die untere Grenze des Dosisbereiches von $H_{\min}=0,2$ mSv gemäß den PTB-Anforderungen für die Bauartzulassung [22]

Die bei der Bauartprüfung experimentell ermittelte Gesamtmeßunsicherheit $G(H)$ ergibt sich zu

$$G(H) = \sqrt{\sum_i (f_{ex,i})^2 + Q^2 + 3v(H)^2}$$

Hierbei ist $f_{ex,i}$ der Absolutbetrag für die größte Änderung des Ansprechvermögens, der durch die i-te von den 9 hier zu untersuchenden systematischen Einflußgrößen, z.B. Photonenenergie und Strahleneinfallrichtung, verursacht wird, Q ist der Koeffizient der Nichtlinearität und $v(H)$ der Variationskoeffizient der Dosismessung, ermittelt mit einer Dosimetercharge.

Die Bauartzulassung des Flachglasdosimeters als Personendosimeter ergab für den Einsatz von Dosimetern mit einer Vordosis von $H_0 < 3$ mSv eine untere Grenze des Dosisbereiches von $H_{\min} = 0,1$ mSv mit $H_{\max} = 8$ Sv und $\alpha = 60^\circ$ im Vergleich zur Mindestanforderung der PTB-Bauartzulassung von $H_{\min} = 0,2$ mSv, $H_{\max} = 2$ Sv und $\alpha = 45^\circ$. Abb. 27 zeigt für das Flachglasdosimeter den bei der Bauartprüfung ermittelten Variationskoeffizient $v(H)$, die ermittelte Gesamtmeßunsicherheit $G(H)$ sowie diejenige maximal zulässige Gesamtmeßunsicherheit $G_{\max}(H)$, die von einem Personendosimeter mit $H_{\min} = 0,1$ mSv mindestens einzuhalten ist. Die Bauartzulassung des Ortsdosimeters ergibt mit $H_{\min} = 0,03$ mSv die in Abb. 28 wiedergegebenen Meßunsicherheiten.

Wird andererseits zur Definition der unteren Nachweisgrenze die Standardabweichung der Vordosismessung $s(H_0)$ zugrundegelegt (siehe Abschn. 5.1), ergibt sich in der Routine für Gläser mit Vordosen zwischen $0,03 \text{ mSv} \leq H_0 < 3 \text{ mSv}$ eine Dosis an der unteren Nachweisgrenze H_{NWG} von $0,01 \text{ mSv} \leq H_{\text{NWG}} \leq 0,1 \text{ mSv}$. Innerhalb der Personenüberwachung kann die Gesamtmeßunsicherheit bei kleinen Dosen daher in einem Bereich erwartet werden, der durch die Gesamtmeßunsicherheit für wiederholt eingesetzte Gläser bis zu einer Vordosis von 3 mSv und für regenerierte Gläser in Abb. 29 als Ergebnis der Bauartprüfung ermittelt wurde. Diese Gesamtmeßunsicherheit des Flachglases ist bei $H_{\min} = 0,1$ mSv daher wesentlich kleiner als die zulässige Meßunsicherheit von 0,84, aber auch nur halb so groß wie die zulässige Gesamtmeßunsicherheit, die bei der Bauartzulassung von Personendosimetern gefordert wird und die bei den regelmäßigen Vergleichsmessungen aufgrund der Eichordnung für Personendosimeter erst bei $H_{\min} = 0,2$ mSv einzuhalten ist.

Die derzeit gültigen Anforderungen an die nach Landesrecht zuständigen Meßstellen aus dem Jahre 1979 [31] schreiben vor, daß abweichend von den bauartzugelassenen Meßverfahren die Meßwerte im unteren Dosisbereich von 0,1 mSv bis 5,25 mSv in Intervallen von 0,2 mSv und Meßwerte $< 0,1$ mSv nicht anzugeben sind. Die kleinste anzugebende Personendosis beträgt demnach 0,2 mSv für Meßwerte zwischen 0,1 mSv und $< 0,3$ mSv mit einer maximalen Abweichung von 0,1 mSv. Damit werden zusätzliche Meßunsicherheiten berücksichtigt, die sich durch die Subtraktion von H_{nat} ergeben.

Bei Dosimetriesystemen, die wie das Flachglasdosimeter oder ein elektronisches Dosimeter einen Nachweis von $H_{\min} \leq 0,1$ mSv erlauben (Abb.29), ist es zweckmä-

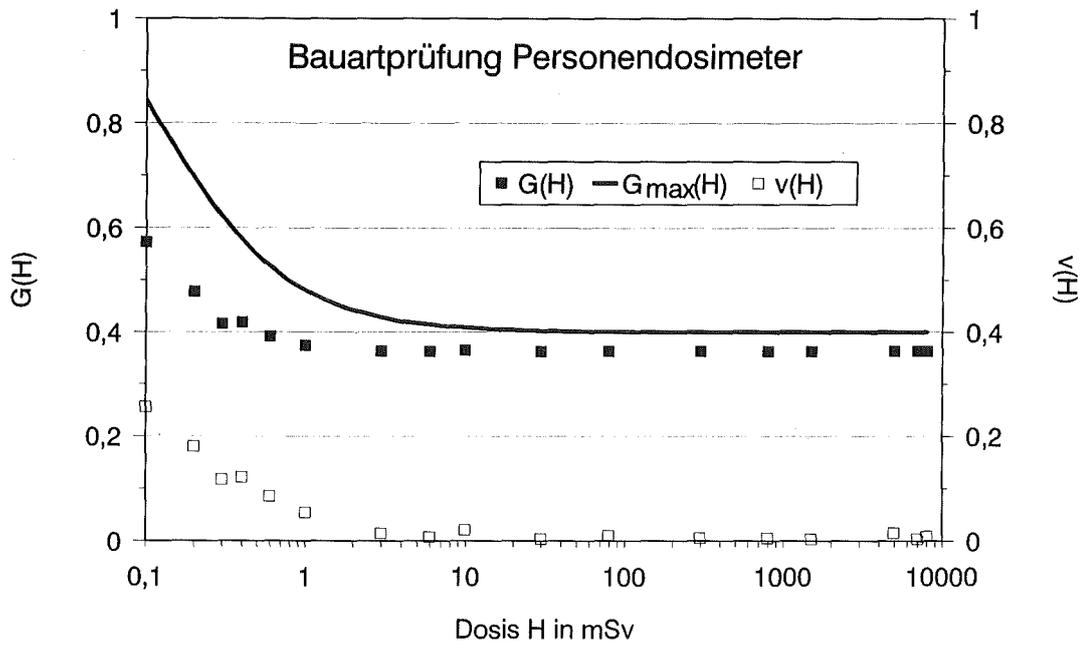


Abb. 27: Variationskoeffizient $v(H)$ und Gesamtmeßunsicherheit $G(H)$ des Flachglasdosimeters für $H_0 < 3$ mSv aufgrund der Bauartprüfung als Personendosimeter und maximal zulässige Gesamtmeßunsicherheit $G_{max}(H)$ für $H_{min} = 0,1$ mSv

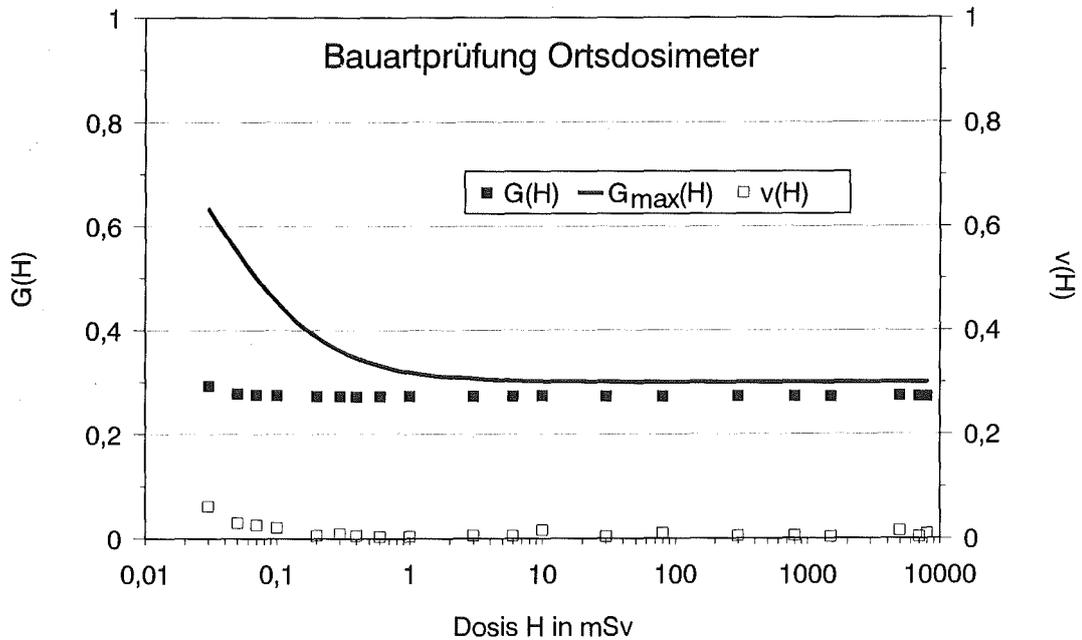


Abb. 28: Variationskoeffizient $v(H)$ und Gesamtmeßunsicherheit $G(H)$ des Flachglasdosimeters für $H_0 = 0,03$ mSv aufgrund der Bauartprüfung als Ortsdosimeter und maximal zulässige Gesamtmeßunsicherheit für $H_{min} = 0,03$ mSv

ßig, den Meßwert oberhalb H_{\min} nicht abzurunden und die tatsächlich gemessene Personendosis direkt, d.h. auf zwei Kommastellen genau, anzugeben bzw. bei einem Personendosimeter mit $H_{\min}=0,1$ mSv Rundungsstufen von 0,1 mSv zugrunde zu legen, anderenfalls die Vorzüge einer größeren Meßgenauigkeit zugunsten der Mindestanforderung ($H_{\min}=0,2$ mSv und Rundungsstufen von 0,2 mSv) nicht zum Tragen kommen. Nur der Verzicht auf obige Rundung würde die Einhaltung der Mindestanforderungen der Bauartzulassung, beispielsweise für ein Personendosimeter mit $H_{\min}=0,1$ mSv, auch in der Routine gewährleisten. Auch die in der Eichordnung vorgesehenen regelmäßigen Vergleichsbestrahlungen von Personendosimetern sehen keine Rundung vor.

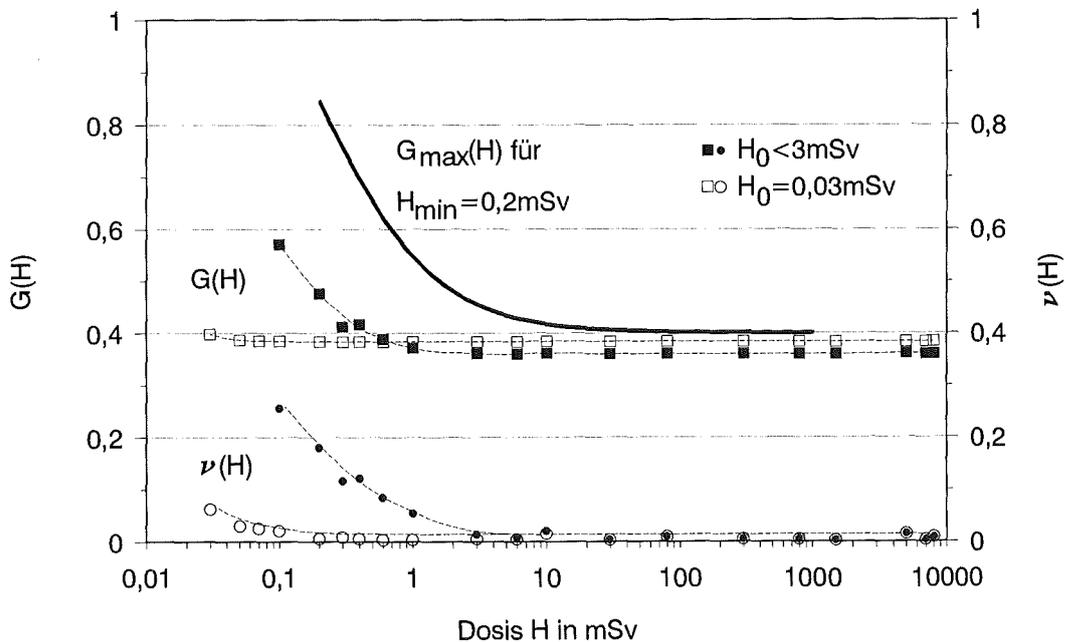


Abb 29: Maximal zulässige Gesamtmeßunsicherheit $G_{\max}(H)$ für ein Personendosimeter mit $H_{\min}=0,2$ mSv, Gesamtmeßunsicherheit $G(H)$ des Flachglasdosimeters aufgrund der Bauartzulassung sowie Variationskoeffizienten der Dosismessung $\nu(H)$ für eine Vordosis von $0,03 \text{ mSv} \leq H_0 < 3 \text{ mSv}$.

8. Bewertung des PLD-Systems im Hinblick auf eine Anwendung in der Personendosimetrie

Die Ergebnisse des Vorhabens sollen u.a. auch zu einer Bewertung des neuen Dosimetriesystems im Hinblick auf einen Einsatz in der Personendosimetrie herangezogen werden. Zur Bewertung des neuen Flachglasdosimeters werden im folgenden für die verschiedenen in der Personenüberwachung eingesetzten Dosimeter-

typen die spezifischen Eigenschaften des Auswerteverfahrens sowie die Fehler- einflußgrößen bei der Ermittlung der Personendosis gegenübergestellt. Zum Ver- gleich stehen hier insbesondere Filmdosimeter, Thermolumineszenzdosimeter und elektronische Dosimeter, die von amtlichen Meßstellen ausgegeben bzw. von Benutzern in Eigenüberwachung ausgewertet werden.

8.1 Anforderungen aufgrund der Bauartzulassung

Rechtliche Grundlage für die Bereitstellung und den Einsatz eines Dosimeters in der amtlichen Personendosimetrie ist u.a. die Eichordnung [16] und die daraus re- sultierende Überprüfung der PTB-Mindest-Bauartanforderungen bei dem jeweili- gen Dosimeter [22]. Neue Gesichtspunkte ergeben sich hierbei durch die unmit- telbar bevorstehende Änderung der Meßgröße für Personendosimeter [13]. Im Vergleich zum Flachglasdosimeter, das beide Meßgrößen, nämlich H_x und $H_p(10)$ gleichzeitig anzeigt, sind die Meßverfahren der TL- und Filmdosimetrie, falls schon bauartzugelassen, nur noch zeitlich begrenzt anwendbar. Eine Änderung des Auswerteverfahrens bzw. der Dosimeterkonstruktion wird sich durch die un- mittelbar bevorstehende Änderung der Meßgröße für alle anderen Dosimeterty- pen zwingend ergeben.

Das Flachglasdosimeter bietet andererseits eine allgemein gültige Bauartzulas- sung im Gegensatz zu TL- und Filmdosimetern, deren Bauart aufgrund einer er- weiterten Vergleichsmessung von jeder Meßstelle beantragt und mit erhebli- chem Dokumentier- und Meßaufwand begleitet werden muß. Letztere Bauartzu- lassung gilt ausschließlich für die beantragende Meßstelle. Ein einheitliches Film- dosimeter im Sinne der Bauartanforderungen wird auch in Zukunft nicht zur Ver- fügung stehen. Dies führt dazu, daß die fünf nach Landesrecht zuständigen Filmdosimetrie-Meßstellen in der BRD für die zwei vorliegenden Filmdosimeter- sonden (Plaketten) und u.U. auch für zwei verschiedene Auswerteverfahren (fil- teranalytisches Meßverfahren und Linearkombination) nach erfolgter Anpassung an die neue Meßgröße für mindestens 10 verschiedene Filmdosimetriesysteme ei- ne erneute Bauartzulassung beantragen müssen.

Bei der Anpassung des Meßverfahrens an die neue Meßgröße ist zu beachten, daß die Kalibrierung des Personendosimeters bisher frei in Luft erfolgte, in Zu- kunft aber der Rückstreuereffekt bei einer Phantombestrahlung zu berücksichtigen ist (bis zu Faktor 1,6). Die Ergebnisse einer Vergleichsmessung von Personendosi- metern für Bestrahlungen an einem Alderson-Menschphantom (Brust- und Gür-

telbereich), an einem 30 cm-ICRU-Kugelphantom und für Freiluftbestrahlungen zeigten, daß Filmdosimeter diesen Rückstreuungseffekt mit einer höheren Empfindlichkeit anzeigen als PLD- und TLD-Systeme sowie elektronische Dosimeter. Die Unterschiede zwischen einer Phantombestrahlung im Brust- bzw. Gürtelbereich des Menschphantoms und am Kugelphantom betragen bei Filmdosimetern mehr als 50% gegenüber 3% bei PLD-Systemen [32]. Diese Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit einer sorgfältigen Auswahl und Optimierung des Filmdosimetermeßverfahrens zur Anpassung an die neue Meßgröße $H_p(10)$.

Im Vergleich zu der insbesondere beim Filmdosimeter noch ausstehenden Entwicklung und Bereitstellung neuer Auswerteverfahren bzw. Dosimeterkonstruktionen und deren arbeitsintensive Überprüfung bzw. Verbesserung im Rahmen des Bauartzulassungsverfahrens durch jede Meßstelle wird beim Einelement-Glasdosimeter lediglich die nochmalige Überprüfung bereits vorhandener Ergebnisse von Phantombestrahlungen (Kugel-, Plexiglas- bzw. Wasser-Plattenphantom) durch die PTB erforderlich. Die zukünftige Änderung der Meßgröße würde bei den Meßstellen, die Flachglasdosimeter auswerten, keine besonderen Aktivitäten erfordern und nur zu einer Änderung des Kalibrierfaktors führen ($N_{\text{neu}}/N_{\text{alt}} = 1,05$).

8.2 Dosisbereich, Variationskoeffizient im unteren Dosisbereich

Der Dosisbereich des Flachglasdosimeters (0,1 mSv bis 8 Sv), vergleichbar mit dem von TLD-Systemen mit LiF-Detektoren, ist größer als der des Filmdosimeters (0,2 mSv bis 1 Sv), jedoch im Vergleich zu hochempfindlichen elektronischen Dosimetern eingeschränkt im unteren Dosisbereich, falls nicht regenerierte Gläser zum Einsatz kommen ($30\mu\text{Sv}$).

Ein Vergleich der Variationskoeffizienten $v(H)$ für das Flachglasdosimeter, für ein elektronisches Dosimeter und ein Thermolumineszenzdosimeter zeigt, daß regenerierte Flachglasdosimeter im unteren Dosisbereich vergleichbar sind mit elektronischen Dosimetern. Die Reproduzierbarkeit der Dosismessung ist beim Flachglasdosimeter im Dosisbereich > 1 mSv um mindestens einen Faktor 2 besser als bei Filmdosimetern und TLD-Systemen mit automatischer Auswertung.

8.3 Meßverfahren

Das Flachglasdosimeter verwendet ein perforiertes Energiekompensationsfilter, um die Photonenenergieabhängigkeit des Ansprechvermögens (Faktor 3,5) auf den zulässigen Wert im Nennbereich der Photonenenergie herabzusetzen. Bei diesem Enelement-Dosimeter ergibt sich die Photonen-Äquivalentdosis unmittelbar aus dem Meßwert. Die Messung einschließlich dem Öffnen der Dosimeterkapselung erfolgt vollautomatisch, die Messung ist wiederholbar. Eine Auswertung des Dosimeters, d.h. die irreversible Änderung der Meßwertspeicherung wie beispielsweise bei der Entwicklung der Filmemulsion bzw. beim Ausheizen des TL-Detektors ist nicht erforderlich, so daß hier entsprechende Auswertefehler nicht auftreten. Auch elektronische Personendosimeter ermitteln die Dosis unmittelbar aus dem Meßwert. Sie ermöglichen eine automatische Übertragung des Meßwertes in einen Rechner.

Bei TLD-Systemen wird die Anzeige der Personendosis $H_p(10)$, anders als bei der bisherigen Meßgröße H_x , i.a. mit einer Kombination von 4 Detektoren hinter unterschiedlicher Filterabdeckung aus der Linearkombination der Meßwertanzeigen erhalten [26]. Für die kleinen Detektoren der Fläche $3 \times 3 \text{ mm}^2$ können u.U. auch perforierte, flächige Filter eingesetzt werden, deren Herstellung und Einbau in Kapselungen zur automatischen Auswertung nicht für alle TLD-Systeme möglich ist [34]. Abgesehen von der Handauswertung bei Fingerringdosimetern wird die Messung vollautomatisch durchgeführt.

Meßverfahren zur Herabsetzung der Energieabhängigkeit des Filmdosimeters (Faktor 30) benutzen bis zu 5 Meßwerte aus Filmfeldern hinter unterschiedlichen Filtern (Plastik, Kupfer, Blei). Die Schwärzungsmessung nach automatischer Entwicklung des Filmes wird auch von Hand durchgeführt. Das filteranalytische Verfahren erfordert zunächst die Ermittlung von drei unterschiedlichen Strahlenqualitäten mit Hilfe von Meßwertverhältnissen zur Korrektur der entsprechenden Meßwertanteile, die aus Meßwertdifferenzen gefunden wurden. Die Anwendung einer Linearkombination unter Zugrundelegung eines Auswertalgorithmus erfordert bis zu 5 Meßwerte zur Ermittlung der Dosis [33].

Zur täglichen Kalibrierung des PLD-Systems wird dasselbe Kalibrierglas über einen Zeitraum von 6 Monaten eingesetzt. TLD-Systeme benötigen zur täglichen Kalibrierung jeweils bis zu 10 bestrahlte bzw. regenerierte Detektoren. Zur Kalibrierung bzw. Auswertung des Filmdosimeters muß wegen der Nichtlinearität

des Meßwertes (optische Dichte) eine vollständige Kalibrierkurve vorliegen. Für jede Filmdosimetercharge werden außerdem die Korrektionsfaktoren für die entsprechenden Energiebereiche in Abhängigkeit von der Photonenenergie erneut bestimmt.

Grundsätzlich kann die Dosisermittlung aus mehreren Meßwerten wegen der unterschiedlichen Wichtung der Meßwerte und der entsprechenden Meßunsicherheit der Einzeldetektoren, aber auch wegen einer Teilabdeckung der Einzeldetektoren bei unterschiedlichem Strahleneinfall mit größeren Meßfehlern behaftet sein. Im Vergleich zum Einelement-Dosimeter ist der Dosismeßwert bei Filmdosimetern u.U. nicht additiv bezüglich Strahlungsanteilen mit unterschiedlichen Energien und Strahlenqualitäten oder Strahleneinfallsrichtungen. Die Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens kann sich daher in der Personenüberwachung unterscheiden von den Ergebnisse mit vorgegebenen Strahlenqualitäten bei der Bauartzulassung.

8.4 Photonenenergiebereich

Im Rahmen der Bauartzulassung nützen alle Personendosimeter die vorgegebene zulässige relative Energie- und Richtungsabhängigkeit des Ansprechvermögens von etwa $\pm 40\%$ mehr oder weniger aus. Unterschiede ergeben sich insbesondere für die Energieabhängigkeit bei frontaler Einstrahlung und im unteren Bereich der Photonenenergie.

Bezogen auf die zur Zeit gültige Meßgröße Photonen-Äquivalentdosis H_x zeigen das bauartzugelassene Flachglasdosimeter wie auch TLD-Systeme eine untere Energieschwelle bei $E_{\min} = 25$ keV, Filmdosimetern hingegen zwischen $E_{\min} = 15$ und 25 keV. Da nach §35 Abs 2 der RÖV die Anzeige des Personendosimeters als Maß für die Körperdosis gelten soll und die Körperdosis mit dem Flachglasdosimeter bis unterhalb 15 keV konservativ, d.h. bis zu einem Faktor 5 überbewertet wird (siehe Abb. 14), entspricht das Flachglasdosimeter grundsätzlich den Anforderungen an den Photonenenergiebereich. Das Flachglasdosimeter ist daher ohne Einschränkung im gesamten unteren Photonenergiebereich einsetzbar.

Das im Filmdosimeter verwendete Bleifilter führt bei Änderung der Strahlenqualität wegen einer unterschiedlichen Anregung der K-Kante zu einer unerwünschten Änderung des Ansprechvermögens in dem für die medizinische Überwachung wichtigen Photonenenergiebereich von etwa 80 keV.

Bei elektronischen Personendosimetern mit GM-Zählern liegt die Energieschwelle bei 45 bis 60 keV, bei neueren Systemen mit Dioden-Detektor hingegen bei 25 keV für $H_p(10)$.

8.5 Umgebungseinflüsse

Flachglasdosimeter bieten trotz der Möglichkeiten einer wiederholten Messung die beste Stabilität der Meßwertspeicherung mit dem geringsten temperaturabhängigen Fading (-2% nach 8 Jahren Lagerung bei 30 °C). Innerhalb der monatlichen Personenüberwachung erwartet man eine temperaturbedingte Meßunsicherheit, die beim Flachglasdosimeter bis zu +2% und bei TLD-Systemen bis zu -15% (TLD 700) und -30% ($Li_2B_4O_7$) betragen kann. Eine Empfindlichkeit gegenüber Lichteinflüssen und relativer Luftfeuchte ist bei Flachglasdosimetern nicht nachweisbar.

Im Vergleich zu Glasdosimetern zeigt das Filmdosimeter eine ausgeprägte Temperaturempfindlichkeit, insbesondere bei höheren Temperaturen, die bei unbestrahlten Filmen auch während des Transportes und der Lagerung zu einer Erhöhung des Grundschleiers (Dosisanzeige) und bei bestrahlten Filmen zu einer Herabsetzung des latenten Bildes (Fading) führen kann. Die Bauartprüfung fordert für alle passiven Dosimeter eine maximal zulässige Meßunsicherheit von 20% gegenüber Einflüssen der Umgebungstemperatur und relativen Luftfeuchte, die für elektronische Dosimeter bei jeweils 20% für beide Einflußgrößen liegt.

8.6 Zusätzliche Aussagen des Personendosimeters

Bei höheren Strahlenexpositionen, insbesondere bei Überschreitung der Überprüfungsschwellen innerhalb der Personenüberwachung, ist es wünschenswert, wenn das Personendosimeter zusätzliche Aussagen über die Expositionsbedingungen bzw. die zu erwartenden Körperdosen ermöglicht. Als Einkomponentendosimeter bietet das Glasdosimeter unabhängig von der Dosismessung trotzdem die Möglichkeiten eines Vielkomponentendosimeters, nämlich zusätzliche Aussagen über die Strahlenqualität und Strahleneinfallsrichtung zu erhalten. Die horizontale und vertikale Abtastung des Glases in verschiedenen Glasbereichen, die innerhalb der Routineauswertung bei höheren Dosen automatisch vorgesehen ist, ermöglicht die Angabe der Strahlenqualität für alle Strahleneinfallrichtungen innerhalb eines Strahleneinfallswinkels von $\pm 60^\circ$ (Ausdruck < 30 keV, 30 bis 70 keV, 70 bis 150 keV, > 150 keV). Die Anwendung eines im Auswertegerät be-

reits vorgesehen Auswerteverfahrens bietet bei höheren Dosen und der Kenntnis der Strahlenqualität eine korrigierte Anzeige der Photonen-Äquivalentdosis bis zu Energien von 15 keV [6]. Bei höheren Dosen kann die horizontale Dosisverteilung zur Beurteilung einer Strahleneinfallsrichtung bis herunter zu Photonenenergien von 15 keV herangezogen werden. Insbesondere unterhalb 40 keV ist eine Vorderseiten- bzw. Rückseitenbestrahlung des Dosimeters erkennbar.

Anders als bei Vielkomponentendosimetern ermöglicht das Flachglasdosimeter, insbesondere wegen der Additivität der Meßwertanzeigen bezüglich Teilbestrahlungen mit verschiedenen Strahlenqualitäten und Strahleneinfallsrichtungen, die unmittelbare Anzeige bzw. Interpretation einer Körperdosis bei einer Ganzkörperexposition (wahlweise H_E bzw. Organdosen). Dies ist vor allem im Photonenenergiebereich unterhalb 50 keV für Personenüberwachungen an Röntgenanlagen von besonderem Interesse, wenn der Verdacht auf Überschreiten des Grenzwertes gegeben ist und die Expositionsbedingungen bzw. H_E abzuschätzen sind.

8.7 Zuverlässigkeit der Dosisanzeige in der Routineüberwachung

Gegenüber TLD-Systemen und Filmdosimetern bietet das Flachglasdosimeter auch bei wiederholter, langzeitiger Dosisakkumulierung und Zwischenauswertung die beste Meßgenauigkeit der Dosismessung von etwa 1%. Dieses ist auf die vernachlässigbaren Unterschiede des individuellen Ansprechvermögens, auf die geringe Streuung und individuelle Subtraktion der nicht-strahleninduzierten Vordosis und die Stabilität der Meßwertspeicherung gegenüber Umwelteinflüssen zurückzuführen.

Zur genaueren Messung kleiner Dosen, insbesondere an Dauerarbeitsplätzen mit einem Jahresgrenzwert von 10 mSv, bietet das Flachglasdosimeter gegenüber dem Filmdosimeter bzw. den Mindestanforderungen der Bauartzulassung einen um den Faktor 0,5 (bis zu Vordosen von < 3 mSv) bzw. Faktor 0,15 (regenerierte Gläser) kleineren Variationskoeffizienten der Dosismessung im unteren Dosisbereich. Die Rundung des Meßergebnisses amtlicher Personendosimeter in Stufen von 0,2 mSv ist auf die Mindestanforderung der Bauartzulassung mit $H_{\min} = 0,2$ mSv abgestimmt. Bei einem Dosimeter mit $H_{\min} = 0,1$ mSv müßte die entsprechende Rundung in Stufen von 0,1 mSv erfolgen. Der bei der Bauartprüfung nicht berücksichtigte Rundungsfehler führt beim Flachglasdosimeter mit $0,03 \text{ mSv} < H_{\min} < 0,1 \text{ mSv}$ (regenerierte Gläser) im unteren Dosisbereich zu einem nicht unerheblichen Meßfehler von mehr als einem Faktor 2. Im Gegensatz zum

Filmdosimeter ermöglicht die ungerundete Angabe des Meßwertes einen zuverlässigen Vergleich der Anzeige von Flachglasdosimetern und elektronischen Dosimetern in Eigenüberwachung, zumal innerhalb der Routineüberwachung nur etwa 20% der eingesetzten Glasdosimeter Vordosen von $H_0 > 2$ mSv erwarten lassen.

Die Bewertung des Flachglasdosimeters im Vergleich zum Film- und TL-Dosimeter verdeutlicht die besonderen dosimetrischen Eigenschaften dieses neuen Dosimetertyps in der Personendosimetrie. Dies kommt insbesondere auch im Hinblick auf die bevorstehende Änderung der Meßgröße zum Tragen. Das Flachglasdosimeter ist ein bauartgeprüftes Personendosimeter, das auch bei anderen Meßstellen ohne weitere Überprüfung anstelle von Film- und Thermolumineszenzdosimetern als Ganzkörperdosimeter in der Personenüberwachung uneingeschränkt eingesetzt werden kann. Der geringe Kalibrieraufwand, die einfache, nicht fehleranfällige Auswertung und das vollautomatische Meßverfahren, das eine Handmanipulation des Glasdetektors während der Auswertung ausschließt, führt bei Glasdosimetern zu einer zuverlässigen, durch spätere Auswertungen überprüfbareren Dosismessung, wie sie vergleichbare Film- und TL-Dosimeter nicht bieten können.

9. Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war die Erprobung des PLD-Systems (Flachglasdosimeter) bestehend aus dem Auswertegerät Toshiba FGD-10 und dem Flachglasdosimeter SC-1. Beim Prototypsystem wurde das Auswerte- und Kalibrierverfahren für einen Routineeinsatz optimiert und im Routineeinsatz innerhalb der Personen- und Ortsdosimetrie getestet. Zur Bestimmung der dosimetrischen Eigenschaften des Flachglasdosimeters wurde ein kommerziell erhältliches Gerät eingesetzt, das anschließend im Juli 1991 der PTB für ein Jahr zur Bauartzulassung überstellt wurde.

Die Erprobung des Flachglasdosimeters erfolgte innerhalb der Personenüberwachung mit monatlichem und jährlichem Dosimeterwechsel und innerhalb der Umgebungsüberwachung mit halbjährlichem Dosimeterwechsel. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen die Vorteile der besonderen dosimetrischen Eigenschaften des Flachglasdosimeters, die von keinem TL - bzw. Filmdosimeter erreicht werden. Hervorzuheben sind hier insbesondere die Einfachheit der Auswertung und Kalibrierung, die Gleichmäßigkeit des Ansprechvermögens, die individuelle Subtraktion der Vordosis, die hohe Empfindlichkeit und die geringe Meßunsicherheit im

Dosisbereich unterhalb 0,1 mSv, die Langzeitstabilität des Auswertesystems (1%) bedingt u.a. durch die langzeitige Verwendung desselben Kalibrierglases (6 Monate) sowie die Langzeitstabilität des Glasdetektors (2 %) gegenüber Einflüssen der Umgebungstemperatur und Luftfeuchte, verbunden mit der Möglichkeit einer wiederholten Auswertung und Langzeitakkumulierung (Lebensaltdosisbestimmung).

Die Ergebnisse des IAEA-Vergleichsprogrammes dienen als Beispiel für die Leistungsfähigkeit des Flachglasdosimeters. Bei der ersten Teilnahme an einem internationalen Test ist das Einkomponentendosimeter nur vergleichbar mit den besten TLD-Systemen, die jedoch bis zu 5 Detektoren mit unterschiedlicher Filterung zur Energiekompensierung einsetzen. Die herausragenden Ergebnisse des Flachglasdosimeters sind hier u.a. der Variationskoeffizient von $\pm 8\%$ für die Energieabhängigkeit im Energiebereich 20 keV bis 1,3 MeV, bezogen auf die Meßgröße $H_p(10)$ und einen frontalen Strahleneinfall, die Konsistenz der Meßergebnisse innerhalb von etwa $\pm 1\%$, die annähernd gleiche Dosisanzeige am Plattenphantom bzw. Alderson-Mensch-Phantom auch bei Rotationsbestrahlungen sowie die zusätzlichen Aussagen über Strahlenqualität und Einfallsrichtung, die beim vorliegenden Meßverfahren nicht berücksichtigt werden, zur Beschreibung der Bestrahlungsverhältnisse jedoch herangezogen werden können.

Für das Flachglasdosimeter wurde der Firma Toshiba Glass zwischenzeitlich eine PTB-Bauartzulassung (Musterprüfung) als Personen- und Ortsdosimeter mit der Zulassungs-Nr. 23.02 / 92.05 bzw. 23.01 / 92.06 erteilt. Diese erste Musterprüfung eines Personendosimetriesystems durch die PTB bestätigt die guten dosimetrischen Eigenschaften des Flachglasdosimeters [15]. Mit der Bauartzulassung erfüllt das Flachglasdosimeter die Anforderungen an Personen- und Ortsdosimeter in Bezug auf § 2 Abs.3 der Eichordnung vom 12.08.1988 [16]. Nach Vorliegen der entsprechenden Zustimmung durch die Länderausschüsse dürfen jetzt auch Meßstellen nach Landesrecht Flachglasdosimeter zur Messung der Personendosis gemäß § 63 Abs.3 Satz 1 StrlSchV und § 35 Abs.2 RöV ausgeben und auswerten [20,21].

Es ist beabsichtigt, bei der nach Landesrecht zuständigen KfK-Meßstelle für Festkörperdosimetrie das bisher eingesetzte Kugeldosimeter mit Beginn des Jahres 1993 durch das neue Flachglasdosimeter zu ersetzen. Vom Flachglasdosimeter wird der gesamte interessierende Photonenenergiebereich von 15 keV - 3 MeV für durchdringende Strahlung abgedeckt, der in Bezug auf H_E bei einer Ganzkör-

perexposition zur Ermittlung der Personendosis nach § 63 Abs.3 Satz 1 StrlSchV und § 35 Abs.2 RöV erforderlich ist. Damit entfällt die für das alte Dosimeter geltende Einschränkung hinsichtlich des Photonenenergiebereiches.

Die gleichzeitige Anzeige verschiedener Meßgrößen bietet beim Glasdosimeter die Möglichkeit, sowohl die in den PTB-Anforderungen zur Bauartzulassung vorgegebene Meßgröße Photonen-Äquivalentdosis H_x als auch die neuen ICRU-Meßgrößen $H_p(10)$ in 10 mm und, wie hier beim Vergleich, $H_p(0,07)$ in 0,07 mm Gewebetiefe anzuzeigen (siehe Tab. 1). Die neuen Meßgrößen werden zur Zeit in der DIN-Normung eingeführt und sollen in nächster Zukunft die gültige Meßgröße H_x ablösen [13]. Bei Änderung der Meßgröße muß hier anders als beispielsweise bei der befristeten Bauartzulassung des Filmdosimeters weder das Auswerteverfahren noch das Energiekompensationsfilter geändert werden, so daß alte bzw. neue Meßergebnisse jederzeit in der gewünschten Meßgröße angegeben werden können.

Die bemerkenswerten dosimetrischen Eigenschaften des Flachglasdosimeters, die bisher von keinem vergleichbaren passiven Routinedosimeter erreicht werden, zeigen aber auch in der praktischen Anwendung insbesondere bei einer Langzeitüberwachung, daß die Meßgenauigkeit im unteren Dosisbereich nur noch im geringeren Maße von der Meßunsicherheit des Dosimetriesystems als vielmehr von den örtlichen und zeitlichen Schwankungen des abzuziehenden Beitrages der natürlichen Strahlung H_{nat} bestimmt wird. Andererseits wird die auf ältere Dosimetriesysteme mit $H_{min} = 0,2$ mSv abgestimmte Rundungsvorschrift für amtliche Personendosimeter [31], nämlich Dosen oberhalb 0,1 mSv in Intervallen von 0,2 mSv anzugeben, modernen Dosimetriesystemen nicht mehr gerecht. Eine solche Vorschrift erhöht beim Flachglasdosimeter die Gesamtmeßunsicherheit der Dosismessung bei kleinen Dosen an der unteren Grenze des Meßbereiches um mehr als einen Faktor 2. Bei Verzicht auf obige Rundung könnten in der Personenüberwachung im Einzelfall, insbesondere im Vergleich mit anderen Dosimetriesystemen, wie z.B. elektronischen Alarmdosimetern, solche Abweichungen vermieden werden.

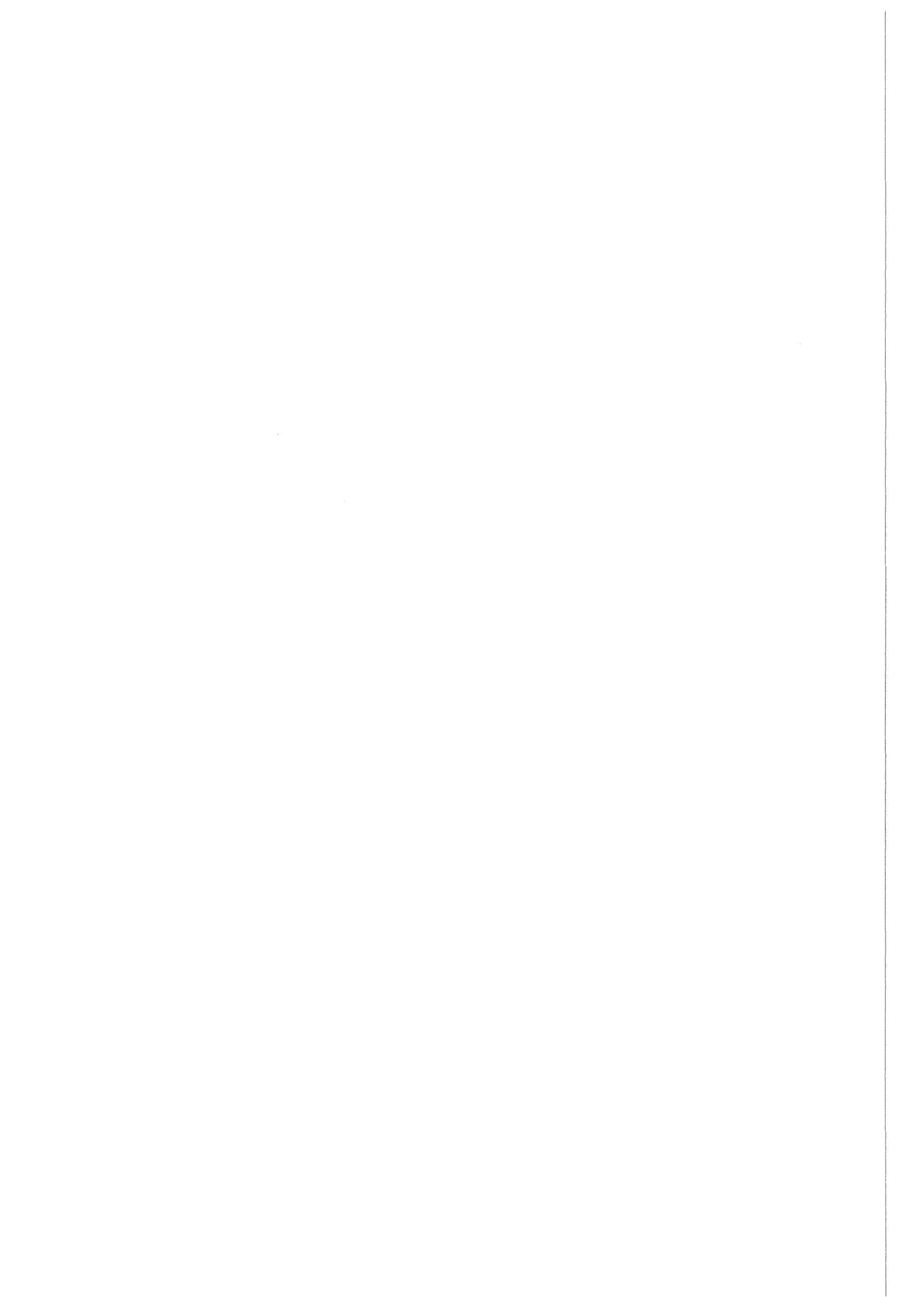
10. Literaturverzeichnis

- [1] E. Piesch, Phosphatglasdosimetrie - nach 25 Jahren Routineinsatz neue Perspektiven für die Personen- und Umgebungsüberwachung, 4th European and Regional IRPA Congress, Salzburg, 578-582, (1986)
- [2] Piesch E., Phosphatglasdosimeter - das Routinedosimeter der Zukunft ? in Kfk 4444, S. 69 - 94, (1988)
- [3] T. Omori, T. Ikegami and T. Ai, Fluoro-Glass-Dosimeter Reader by N₂ Gas Laser Excitation, Rad. Prot. Dosim., Vol. 17, 297 (1986).
- [4] E. Piesch, B. Burgkhardt, M. Fischer, H.G. Röber and S. Ugi, Properties of radiophotoluminescent glass dosimeter systems using pulsed laser UV excitation, Rad. Prot. Dosim., Vol. 17, 293-297 (1986)
- [5] Piesch, E., Burgkhardt, B., Vilgis, M., Omori, T. and Ikegami, M., Automatic phosphate glass dosimetry system using pulsed UV laser evaluation, IRPA 7 Congress, Sydney, Vol. 1, 433-436, (1988)
- [6] E. Piesch, B. Burgkhardt, M. Vilgis, Photoluminescent Dosimetry - Progress and Present State of the Art, Radiat. Prot. Dosim., 33, 215-226 (1990)
- [7] B. Burgkhardt, M. Vilgis, E. Piesch, T. Ishidoya and T. Ikegami, Modern Automatic Readout System for Phosphate Glass Dosimeters Using UV Laser Excitation, Radiat. Prot. Dosim., 34, 369-372 (1990)
- [8] E. Piesch, B. Burgkhardt, One-Element Phosphate Glass Dosimetry Systems for the Simultaneous Indication of Different Dose Quantities in Individual and Area Dosimetry, Rad. Prot. Dosim., Vol 17, 63, 1984.
- [9] B. Burgkhardt, E. Piesch, H.G. Röber, S. Ugi, Modern Photon Energy Compensation Filters for Solid State Dosimeters, Kerntechnik 55, No. 6, pp 361-367, 1990.
- [10] ICRU Report 39, Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources (1985)
- [11] ICRU Report 47, Measurement of Dose Equivalent from External Photon and Electron Radiations (1992)
- [12] DIN 6814, Begriffe und Benennungen in der radiologischen Technik, Teil 3: Dosisgrößen und Dosiseinheiten (1985)
- [13] DIN 6814, Teil 3, Änderung 1, (1993)
- [14] J. Böhm, E. Piesch, D. Regulla, Neue Meßgrößen für Personendosimeter - Ergebnisse des Vergleichsprogramms 1985 - Seminarbericht, PTB-Dos-14/FS-86-39-AKD, Juni 1986.
- [15] P. Ambrosi, R. Neuhaus, E. Piesch, First Experience with Pattern Approvals of Dosimetry Systems in Germany, paper presented at 10th SSD Conf., Washington (1992)
- [16] Eichordnung vom 12. August 1988, Bundesgesetzblatt Teil 1 Nr. 43, 1657-1684 (1988)

- [17] E. Piesch, B. Burgkhardt, M. Vilgis, Can Individual Dosemeters for the Measurement of the Directional Dose Equivalent $H'(10)$ Indicate Organ Doses and the Effective Dose Equivalent?, *Radiat. Prot. Dosim.*, Vol. 28, pp. 21-28 (1989)
- [18] ICRP Publ. 60, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection(1991)
- [19] ICRP Publ. 51, Data for Use in Protection Against External Radiations (1987)
- [20] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung, StrlSchV) vom 30.06.1989, BGBl1, S. 1321
- [21] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen (Röntgenverordnung, RöV) vom 14.01.1987, BGBl1, Nr.3
- [22] PTB-Anforderungen PTB-A 23.2. Strahlenschutzmeßgeräte. Orts- und Personendosimeter mit Detektoren aus Thermolumineszenz- oder Photolumineszenz-Material. April 1988 mit Änderungen vom Mai 1992. Deutscher Eichverlag, D-3300 Braunschweig, pp. 23-39 (1990). Änderungen Mai 1992: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Labor 6.21
- [23] DIN 6818, Teil 1, Strahlenschutzdosimeter, Allgemeine Regeln. Berlin: Beuth Verlag (1992)
- [24] E. Piesch, B. Burgkhardt and M. Vilgis, IAEA Intercomparison 1990/91 for Individual Monitoring: Evaluation procedure and Discussion of the Results for the Photoluminescent Glass Dosimetry System, paper presented at IAEA Research Coordination Meeting Intercomparison for Individual Monitoring, Vienna (1992)
- [25] E. Piesch, B. Burgkhardt, M. Vilgis, Developments in Phosphate Glass Dosimetry for Routine Monitoring, paper presented at IAEA Research Coordination Meeting Intercomparison for Individual Monitoring, Vienna (1992)
- [26] J. Böhm and G. Buchholz, Results of the IAEA Coordinated Research Program on Intercomparison for Individual Monitoring 1990/1991, unpublished (1992)
- [27] E. Piesch, B. Burgkhardt, M. Vilgis, Measurement of Low Photon Exposures Using a Full Automatic Phosphate Glass Dosimetry System with UV Laser Excitation, *Proceedings IRPA 8, International Radiation Protection Association*, Vol. 1, pp 116 -119, Montreal (1992)
- [28] A.M. Chapuis, in *Technical Recommendations for the Use of Radiophotoluminescence Dosimetry in Individual Monitoring*, Report EUR 5655, Luxembourg, CEC (1977)
- [29] B. Burgkhardt, R. Herrera, E. Piesch, Long-Therm Fading Experiment with Different TLD Systems, *Proc. 5th Int. Conf. Lum. Dosimetry*, Sao Paulo, 14.-17.02.1977, pp.75-83 (1977)
- [30] E. Piesch, B. Burgkhardt, M. Vilgis, Progress in Phosphate Glass Dosimetry: Experiences and Routine Monitoring with a Modern Dosimetry System, paper presented at 10th SSD Conf., Washington (1992)

- [31] Richtlinie über Anforderungen an die nach Landesrecht zuständige Meßstelle vom 16.05.79, GMBI, S. 441
- [32] W.G. Alberts, P. Ambrosi, J.Böhm and H. Kluge, Some Implications of the ICRU Quantities on Intercomparison Measurements of Individual Dosemeters, Radiat. Prot. Dosim., 28, 107-110 (1988)
- [33] P. Ambrosi, Auswertung von Filmdosimetern mittels Linearkombination der korrigierten Anzeigen, PTB-DOS-17, (1988)
- [34] Burgkhardt, B.; Piesch, E.; Roeber, H.G.; Ugi, S.; Modern photon energy compensation filters for solid state dosimeters. Kerntechnik, 55 pp. 362-67, 1990

Anhang: Merkblatt für Dosimeterbenutzer



Phosphatglasdosimeter

Anwendung

Das Flachglasdosimeter (Abb. 1) ist ein Photolumineszenzdosimeter zur Messung der Dosis von Gamma- und Röntgenstrahlung. Das Dosimeter wird eingesetzt als

- Personendosimeter ohne Einschränkung des Anwendungsbereiches, z.B. Kerntechnische Anlagen, Radionuklidlabors in Forschung und Industrie, Beschleuniger, Röntgendiagnostik, Strahlentherapie, Nuklearmedizin (amtliches Personendosimeter nach StrlSchV und RöV) [1,2]
- Ortsdosimeter zur Abschätzung der Personendosis an Arbeitsplätzen sowie zur Messung der Strahlenexposition in Gebäuden und im Freien (Umgebungsüberwachung)
- Gleichzeitig Unfalldosimeter zur Messung von Strahlenexpositionen > 8 Sv
- Kontrolldosimeter für Vergleichsmessungen, z.B. Qualitätssicherung von Röntgenanlagen in der Röntgendiagnostik (Dosis, Strahlenqualität)

Die Bauart des Dosimetriesystems ist von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt geprüft worden [4,8]. Das Flachglasdosimeter kann aufgrund der allgemeinen Bauartzulassung von Meßstellen zur Bestimmung der Personen- und Ortsdosis ausgegeben und ausgewertet werden [3].

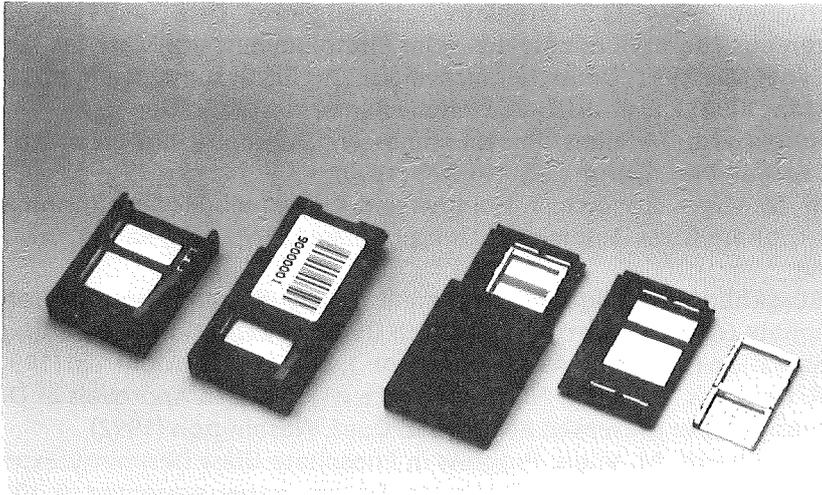


Abb. 1: Flachglasdosimeter mit getrennter Kodierung von Kapsel und Glaskarte. Allseitige Abdeckung mit perforierten Zinnfiltern

Dosimeter und Meßverfahren

Das Dosimetriesystem besteht aus Flachglasdosimetern und dem vollautomatischen Auswertegerät Toshiba FGD-10 [5-10]. Der Detektor ist ein silberaktiviertes Metaphosphatglas, Type Toshiba FD-7. Das Dosimeter wird grundsätzlich in einer Schutzhülle eingesetzt und nur von der Meßstelle geöffnet.

Gemessen wird die nach einer gepulsten UV-Laseranregung im Glasdetektor auftretende strahleninduzierte Fluoreszenzintensität. Diese ist direkt proportional zur Dosis. Der Meßwert wird bei der Auswertung nicht gelöscht, so daß ein mehrfaches Ausmessen und damit eine Langzeitdosimetrie mit Zwischenauswertungen möglich ist. Bei Erreichen einer akkumulierten Dosis von 3 mSv wird der vorhandene Meßwert durch eine Wärmebehandlung bei 400 °C gelöscht. Der Detektor kann in verschiedenen Glasbereichen automatisch ausgemessen werden, um neben der Dosis auch eine Strahlenqualität zu ermitteln. Aussagen über die Richtung des Strahleneinfalles sind möglich.

Literatur

- [1] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung, StrlSchV) vom 30.06.1989, BGBl1, S. 1321
- [2] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen (Röntgenverordnung, RöV) vom 14.01.1987, BGBl1, Nr.3
- [3] Eichordnung vom 12. August 1988, Bundesgesetzblatt Teil 1 Nr. 43, 1657-1684 (1988)
- [4] PTB-Anforderungen PTB-A 23.2. Strahlenschutzmeßgeräte. Orts- und Personendosimeter mit Detektoren aus Thermolumineszenz- oder Photolumineszenz-Material. April 1988 mit Änderungen vom Mai 1992. Deutscher Eichverlag, D-3300 Braunschweig, pp. 23-39 (1990). Änderungen Mai 1992: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Labor 6.21
- [5] E. Piesch, B. Burgkhardt, M. Vilgis, Photoluminescent Dosimetry - Progress and Present State of the Art, Radiat. Prot. Dosim., 33, 215-226 (1990)
- [6] B. Burgkhardt, M. Vilgis, E. Piesch, T. Ishidoya and T. Ikegami, Modern Automatic Readout System for Phosphate Glass Dosemeters Using UV Laser Excitation, Radiat. Prot. Dosim., 34, 369-372 (1990)
- [7] E. Piesch, B. Burgkhardt, M. Vilgis, Measurement of Low Photon Exposures Using a Full Automatic Phosphate Glass Dosimetry System with UV Laser Excitation, Proceedings IRPA 8, International Radiation Protection Association, Vol. 1, pp 116 -119, Montreal (1992)
- [8] P. Ambrosi, R. Neuhaus, E. Piesch, First Experience with Pattern Approvals of Dosimetry Systems in Germany, paper presented at 10th SSD Conf. Washington (1992)
- [9] E. Piesch, B. Burgkhardt, M. Vilgis, Progress in Phosphate Glass Dosimetry: Experiences and Routine Monitoring with a Modern Dosimetry System, paper presented at 10th SSD Conf. Washington (1992)
- [10] B. Burgkhardt, E. Piesch und M. Vilgis, Erprobung eines Phosphatglasdosimetriesystems mit gepulster UV-Laseranregung, Bericht KfK 5110, 1993 in Druck

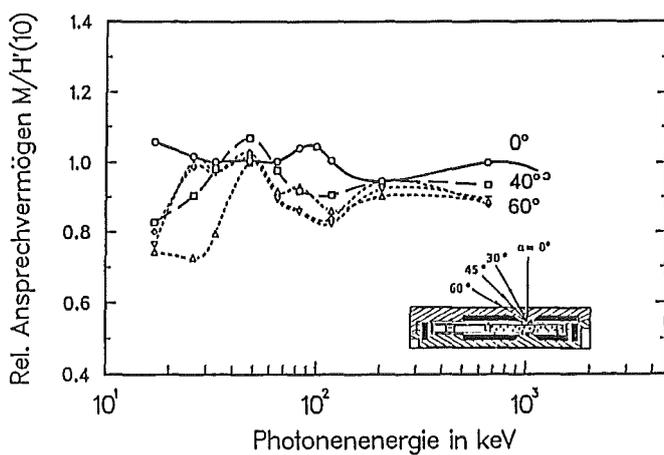
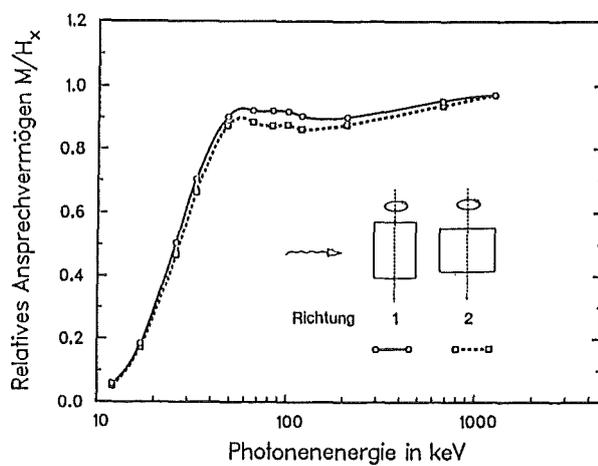
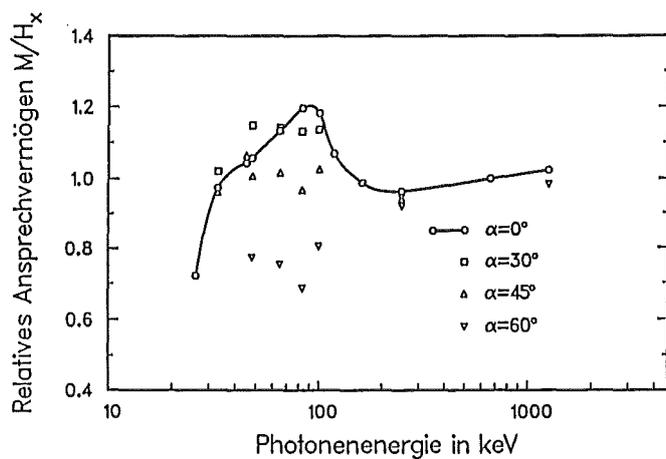


Abb. 2: Energie- und Richtungsabhängigkeit des Flachglasdosimeters bei Bestrahlung frei in Luft auf H_x ¹⁾ (a), als Ortsdosimeter bei Rotationsbestrahlung frei in Luft auf H_x (b) und als Personendosimeter auf einem Kugelphantom von 30 cm \varnothing (c)

1) Ergebnisse der PTB-Bauartzulassung

Technische Daten

Dosimeterabmessungen	40 x 30 x 9 mm ³
Detektorabmessungen	16 x 16 x 1,5 mm ³
Meßgröße	Photonen-Äquivalentdosis H_x ¹⁾ (Standardionendosis x 0,01 Sv/R). Angabe der Personendosis $H_p(10)$ für ICRU-Weichteilgewebe in 10 mm Tiefe an der Tragestelle des Personendosimeters, u.a. auch andere Meßgrößen bzw. Interpretation des Meßwertes bzgl. Körperdosis sind möglich.
Strahlenart	Gamma- und Röntgenstrahlung
Meßbereich	0,1 mSv bis 8 Sv bei Personendosimetern mit akkumulierten Vordosen < 3 mSv ¹⁾ 0,03 mSv bis 8 Sv bei Ortsdosimetern mit regenerierten Glasdetektoren ¹⁾
Vordosis regenerierter Gläser	(30 ± 2) µSv wird individuell subtrahiert
Ansprechvermögen	Streuung von < 0,5% vernachlässigbar
Nenngebrauchsbereich der Energie	25 keV bis 1,3 MeV für H_x ¹⁾ , siehe Abb. 2a/b 12 keV bis 1,3 MeV für $H_p(10)$, siehe Abb. 2c
der Richtung	0° bis 60° zur Vorzugsrichtung ¹⁾
Kalibrierung	mit ¹³⁷ Cs-Gammastrahlung
Variationskoeffizient der Dosismessung	für $H \geq 3$ mSv: etwa 1% für $H = 0,1$ mSv: $5\% \leq v(H_0) \leq 26\%$ bei Vordosen $0,03 \leq H_0 < 3$ mSv
Langzeitreproduzierbarkeit	etwa 1%
Relatives Ansprechvermögen	bezogen auf ¹³⁷ Cs-Photonenstrahlung:
β-Strahlung ⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	$R_\beta/R_Y = 0,08$
thermische Neutronen	$R_{th}/R_Y = 0,39$
schnelle Neutronen (²⁵² Cf)	$R_s/R_Y = 0,04$
Temperaturabhängigkeit	≤ 5% im Bereich von -10 °C bis 50 °C
Umwelteinflüsse	unempfindlich gegenüber Luftfeuchtigkeit und UV-Licht
Fading	2% bei 30 °C nach 8 Jahren
Expositions-dauer	viele Jahre mit Zwischenauswertungen, für Ortsdosimeter ≥ 3 Wochen
Bauartzulassung	Personendosimeter, Zulassungszeichen 23.02/92.05 Ortsdosimeter, Zulassungszeichen 23.01/92.06

¹⁾ gemäß Bauartzulassung