

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6217

**Einsatz von Albedodosimetern zur Messung kleiner Dosen
in gemischten Photonen-Neutronen-Strahlungsfeldern an
Transportbehältern für hochradioaktiven Abfall**

B. Burgkhardt, P. Ambrosi*, A. Rimpler**

Hauptabteilung Sicherheit

*Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

**Bundesamt für Strahlenschutz, Berlin

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2000

Die in diesem Bericht beschriebenen Testbestrahlungen wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt (Z1.5.4 StSch 4203). Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der Autoren wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (BMU) übereinstimmen.

Zusammenfassung

Die Strahlenexposition des Begleitpersonals von Polizei und Bundesgrenzschutz bei Transporten abgebrannter Brennelemente bzw. von hochradioaktivem Abfall aus deren Wiederaufarbeitung (HAW) wird mit Albedodosimetern ermittelt. Dieses Dosimeter wird von den nach Landesrecht zuständigen Messstellen zur Bestimmung der Personendosis insbesondere im Rahmen der Routineüberwachung beruflich strahlenexponierter Personen in gemischten Gamma/Neutronenstrahlungsfeldern eingesetzt.

Dieser Bericht beschreibt ausführlich den Aufbau und die Funktionsweise des Albedodosimeters, das Verfahren zur Bestimmung der Photon- und Neutronen-Personendosis aus den Detektoranzeigen und die Ermittlung der Nachweisgrenze für die Personendosis des Albedodosimeters nach den in aktuellen Normen festgelegten Methoden.

Die Bestimmung der Nachweisgrenze beruht auf den Erfahrungen bisheriger Transporte, auf Messungen an Transportbehältern, auf Ergebnissen von Bauartprüfungen, den gefundenen Messunsicherheiten bei den jährlichen Vergleichsmessungen bei der PTB sowie bei der eigens dafür durchgeführten Testbestrahlung unter Laborbedingungen im Bereich kleiner Neutronen- und Photonendosen.

Für die Dosimetriesysteme der Messstellen und die spezifischen Bedingungen bei Transporten konnte für die Dosisnachweisgrenze ein Richtwert von 100 μSv festgelegt werden.

The use of albedo neutron dosimeters for the measurement of low doses in mixed photon neutron radiation fields at transport casks for high active waste

Abstract

Radiation exposure of the police forces accompanying transports of spent fuel elements and high-active waste from reprocessing (HAW) is determined by means of albedo dosimeters. The official dosimetry services use this type of dosimeter to measure the personal dose in mixed gamma/neutron radiation fields above all for routine monitoring of workers occupationally exposed to radiation.

The present report describes the detailed set-up and functioning of the albedo dosimeter, the process of obtaining the photon and neutron personal dose from the detector indications as well as the determination of the detection limit of the total personal dose of the albedo dosimeter according to the methods specified in the valid standards.

Determination of the detection limit is based on the experience gained during previous transports, on measurements performed at transport casks, on results of type tests at PTB (Federal Physical and Technical Authority), on the measurement uncertainties obtained from the annual intercomparison measurements of the PTB as well as on the test irradiation specially performed in the range of small neutron and photon doses under laboratory conditions.

For the dosimetry systems of the dosimetry services and the specific transport conditions, a reference level of 100 μSv was specified with regard to the dose detection limit.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen

1	Einleitung.....	1
2	Das Albedodosimeter.....	2
2.1	Messverfahren der Albedodosimetrie.....	2
2.2	Thermolumineszenz-Dosimetriesysteme.....	3
2.3	Ermittlung der Personendosis mit Albedodosimetern nach DIN 6802-4.....	5
2.3.1	Äquivalentdosen durch Photonen und Neutronen.....	5
2.3.2	Teilkorrigierte und korrigierte Anzeigen der TL-Detektoren.....	5
2.3.3	Photonenkalibrierfaktor und Dosismesswert.....	6
2.3.4	Photonendosis und natürliche Strahlung.....	7
2.3.5	Neutronenkalibrierfaktoren und Neutronen-Personendosis.....	7
2.3.6	Anwendungsbereiche.....	8
2.3.7	Vereinheitlichtes Auswerteverfahren der Messstellen - Neutronenkorrektionsfaktoren.....	9
2.4	Korrektionsfaktoren für Linearität des Dosismesswertes und Richtung des Strahleneinfalls.....	11
2.5	Die Ermittlung der Tiefen-Personendosis $H_p(10)$	12
2.6	Bisherige Verbesserungsversuche der Albedo-Messtechnik.....	12
3	Vorversuch.....	13
3.1	Allgemeines.....	13
3.2	Photonen.....	13
3.3	Neutronen.....	13
3.4	Ergebnisse der Vorversuche.....	15
4	Testbestrahlung bei kleinen Dosen.....	17
4.1	Durchführung der Bestrahlung.....	17
4.1.1	Bestrahlungsumfang und Zeitplan.....	17
4.1.2	Photonen.....	18
4.1.3	Neutronen.....	18
4.1.4	Bestrahlungszeiten.....	19
4.2	Messergebnisse der Albedo-Dosimetriesysteme.....	20
4.2.1	Tabellen der Messergebnisse.....	20
4.2.2	Graphische Darstellung und Analyse der Messergebnisse.....	21
4.2.3	Zusammengefasste Ergebnisse der Testbestrahlung.....	27
5	Ermittlung der Nachweisgrenzen unter Labor- und Feldbedingungen.....	28
5.1	Schritte zur Ermittlung der Nachweisgrenze.....	28
5.2	Gleichung der Dosisermittlung als Modellfunktion.....	28
5.3	Ermittlung der Teil-Messunsicherheiten mit Typ A Methoden aus Messungen.....	29
5.4	Abschätzung der Teil-Unsicherheiten mit Typ B Methoden.....	30
5.4.1	Allgemeines.....	30
5.4.2	Korrektionsfaktoren für Nichtlinearitäten der Dosismesswerte.....	30
5.4.3	Korrektionsfaktoren für Energie und Richtung.....	30
5.4.4	Natürliche Strahlung.....	32

5.4.5	Umlaufzeit	33
5.4.6	Zusammenfassung der Eingangswerte für Labor- und Feldbedingungen	33
5.5	Ermittlung der Gesamt-Unsicherheit.....	33
5.6	Vergleich der berechneten und gemessenen Standardunsicherheiten unter Laborbedingungen.....	35
5.7	Ermittlung der Nachweisgrenzen	37
5.8	Ermittlung der Nachweisgrenzen für andere Dosimeter	38
6	Zusammenstellung der Nachweisgrenzen	40
6.1	Vorgehensvarianten beim Einsatz von Personendosimetern.....	40
6.2	Ergebnisse.....	40
6.2.1	Erreichbare Nachweisgrenzen	40
6.2.2	Der Einfluss der natürlichen Strahlung	40
6.2.3	Einsatz ausschließlich photonenempfindlicher Dosimeter.....	41
6.2.4	Einsatz ausschließlich neutronenempfindlicher Dosimeter.....	42
6.2.5	Einsatz von Albedodosimetern.....	42
6.3	Einsatz von direktanzeigenden Personendosimetern.....	42
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	44
Literatur		
Anhang A: Messergebnisse der Testbestrahlung		
Anhang B: Grundlagen zur Ermittlung der Messunsicherheit und Nachweisgrenze		

Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
A_j A_{0j}	Unkorrigierte Anzeige eines Detektors j und eines unbestrahlten Detektors j	
$H_p(10)$	Tiefen-Personendosis	mSv
$H_p(10)^*$	Erkennungsgrenze der Tiefen-Personendosis $H_p(10)$	mSv
H^m	Dosismesswert, ermittelt durch Kalibrierung mit einer Photonenreferenzdosis und korrigiert hinsichtlich Voranzeige und individuellem Photonenkorrektionsfaktor der Detektoren	mSv
\dot{H}_{nat}^m	Dosisleistungsmesswert der natürlichen Strahlung, gemessen mit einem Albedodosimeter	mSv/d
$H_j^m(G)$ $H_k^m(NG)$	Dosismesswert des nur photoneneempfindlichen Detektors j der Charge (G) und des neutronen- und photoneneempfindlichen Detektors k der Charge (NG)	mSv
$H_n^m(i)$ $H_n^m(a)$	Dosismesswert durch Neutronen in den Detektor-Positionen (i) und (a)	mSv
H_γ H_n	Photonen-Personendosis Neutronen-Personendosis	mSv
$H_{\gamma r}$ H_{nr}	Referenzwert der Photonen-Personendosis Referenzwert der Neutronen-Personendosis	mSv
$\bar{H}_j^m(n)$	Mittelwert der Dosismesswerte der Detektoren der Teilcharge (n)	mSv
k_n k_{nr}	Neutronenkorrektionsfaktor für verschiedene Anwendungsbereiche bzw. für verschiedene Dosimetriesysteme und (NG)-Chargen	
$k_{\gamma,E,\phi}$ $k_{n,E,\phi}$	Korrektionsfaktor für die Energie E und den Strahleneinfallswinkel ϕ , für Photonen (γ) und Neutron (n)	
$k_{\gamma,lin}$ $k_{n,lin}$	Korrektionsfaktor für die Linearität des Dosismesswertes nach Photonen- bzw. Neutronenbestrahlung	
M'	Teilkorrigierte Anzeige	
$M_j(G)$ $M_k(NG)$	Korrigierte Anzeige des nur photoneneempfindlichen Detektors j der Charge (G) und des neutronen- und photoneneempfindlichen Detektors k der Charge (NG)	
$M_n(i)$ $M_n(a)$	Korrigierte Anzeige durch Neutronen in den Detektor-Positionen (i) und (a)	
$N_{yr}(n)$ $N_{nr}(r)$ N_n	Photonenkalibrierfaktor Neutronenkalibrierfaktor im Referenzstrahlungsfeld Neutronenkalibrierfaktor im Strahlungsfeld	mSv

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
t_e	Expositionszeitspanne (Umlaufzeit)	d
t_γ, t_n	Bestrahlungszeiten an der Photonen- bzw. Neutronenbestrahlungseinrichtung	s
$u(X_i)$	Standardunsicherheit einer Eingangsgröße X_i zum Schätzwert x_i (z.B. alle Teil-Unsicherheiten rechts des Gleichheitszeichens von Gleichung (5.1))	
$u(H_p(10))$	Standardunsicherheit der Tiefen-Personendosis $H_p(10)$	mSv

1 Einleitung

Eines der Hauptprobleme bei der Messung von Personendosen in Neutronenstrahlungsfeldern ist das Fehlen eines über weite Neutronenenergiebereiche in gleicher Weise neutronenempfindlichen Dosimeters. Albedodosimeter erfüllen diese Aufgabe mit Einschränkungen am ehesten. Sie werden in einer zur automatischen Auswertung geeigneten Bauart von Messstellen in Deutschland als amtliches Neutronen-Personendosimeter eingesetzt. Sie besitzen die Bauartzulassung für Photonen nach der Eichordnung und nehmen erfolgreich an den jährlichen PTB-Vergleichsbestrahlungen für Photonen und Neutronen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) teil. Sie werden dann im Strahlenschutz in Gamma/Neutronenmischstrahlungsfeldern eingesetzt, wenn an Aufenthaltsorten die Neutronendosisleistung 20% der Gesamt-Personendosisleistung erreichen kann.

Es bot sich an, Albedodosimeter auch für den Einsatz des Begleitpersonals der *Transportbehälter* (z.B. Castorbehälter) beim *Transport* hochradioaktiven Abfalls, d. h. abgebrannte Brennelemente aus Kernkraftwerken bzw. die bei deren Wiederaufarbeitung anfallenden hochaktiven Rückstände (Glaskokillen), einzusetzen, da dort Photonen/Neutronenmischstrahlungsfelder auftreten. Die kursive Schreibweise *Transport* in diesem Bericht bedeutet grundsätzlich den *Transport* dieses Abfalls in einem genau dafür vorgesehenen *Transportbehälter*.

Bei den bisherigen *Transporten* wurden mehr als 4000 Begleitpersonen mit Albedodosimetern ausgestattet. In keinem einzigen Fall konnte ein Personendosiswert oberhalb der Nachweisgrenze gemessen werden. Um dennoch einen Wert für die kleinste mögliche Exposition dieser Personen abschätzen zu können, ist die Kenntnis der Nachweisgrenze des Albedodosimeters für die bei *Transporten* herrschenden typischen Einsatzbedingungen erforderlich.

Ein Problem bei der Angabe der Nachweisgrenze liegt in den verwendeten Messgrößen. Die Messgröße für die Neutronendosis ist die Richtungsäquivalentdosis $H'(10)$ unter Verwendung der Fluenz-Äquivalentdosis-Konversionsfaktoren [WAG95] mit Qualitätsfaktoren nach ICRP 26, die Messgröße für die Photonendosis ist die „Photonen-Äquivalentdosis“ H_x . Die Messgrößen sind also verschieden und die Messwerte können nicht ohne weiteres addiert werden, um dann für die Summe eine Nachweisgrenze zu bestimmen. Den Ausweg bietet die neue Messgröße Tiefen-Personendosis, $H_p(10)$, die mit der neuen Strahlenschutzverordnung eingeführt werden wird. Diese ist für beide Strahlenarten anwendbar. In den bei den *Transporten* auftretenden Strahlungsfeldern mit hohem Neutronenanteil gilt weiterhin, dass der Zahlenwert der Tiefen-Personendosis, $H_p(10)$, größer ist als der Zahlenwert der Summe aus Neutronen- und Photonendosis in den bisherigen Messgrößen. Wegen der unmittelbar bevorstehenden Einführung der neuen Messgrößen wird deshalb in diesem Bericht im weiteren nur die Messgröße Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ betrachtet.

Eine vom BMU eingesetzte Arbeitsgruppe „Messung der Personendosen im Bereich niedriger Dosen“ hat unter anderem ein einheitliches Verfahren zur Messung, Auswertung und Bewertung der Dosismesswerte der Albedodosimeter erarbeitet [SSK99].

Zu diesem Zweck wurden die Albedodosimeter der Messstellen nach einem Vorversuch am 3. Juli 1998 in einer umfangreichen Testbestrahlungen im Dosisbereich der Nachweisgrenze in Neutronen- und Photonenstrahlungsfeldern unter Laborbedingungen in der Zeit vom 21. Juli bis 24. Juli 1998 getestet. Dieser am Forschungszentrum in Karlsruhe (FZK) in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) und der PTB durchgeführte Test wurde durch das BMU gefördert. Der vorliegende Bericht beschreibt jeweils ausführlich den Aufbau und die Funktionsweise des Albedodosimeters, die Ermittlung der Neutronen- und Photonendosis aus den Messwerten, die Durchführung und Ergebnisse der Testbestrahlung und schließlich die Ermittlung der Nachweisgrenze unter Labor- und Einsatzbedingungen bei *Transporten* nach international anerkannten und in aktuellen nationalen Normen festgelegten Methoden. Die Ermittlung der Nachweisgrenzen anderer Personendosimeter, alternativ zum Albedodosimeter, wird in knapper Form ergänzend angefügt.

2 Das Albedodosimeter

2.1 Messverfahren der Albedodosimetrie

Die höchste Neutronen-Empfindlichkeit der meisten Festkörperdetektoren liegt im Bereich thermischer Neutronen. Das Albedoneutronendosimeter (kurz Albedodosimeter) nutzt die Eigenschaft des menschlichen Körpers aus, energiereiche Neutronen durch Streuung abzubremsen und als thermische Neutronen rückzustreuen, die dann gemessen werden können. Auf diesem Grundprinzip lassen sich verschiedenste Bauarten von Albedoneutronendosimetern [PIE77] und Detektoren [LUS95] realisieren. In Deutschland hat sich in der Praxis ein Albedodosimeter durchgesetzt, das für automatische Thermolumineszenzdosimetrie-systeme geeignet ist [PIE88 und DIN98]. Alle folgenden Beschreibungen beziehen sich auf diesen Albedodosimetertyp, kurz mit Albedodosimeter bezeichnet.

Das Albedodosimeter verwendet Detektoren in zwei verschiedenen Positionen (siehe Abb. 1):

- (i)-Position zum Nachweis der vom Körper moderierten und zurückgestreuten Neutronen (Albedoneutronen)
- (a)-Position zum Nachweis von thermischen Neutronen aus dem äußeren Strahlungsfeld

Die Dosimeterkapsel besteht aus einem für thermische Neutronen undurchlässigen Borplastikgehäuse mit zwei borfreien Fenstern, nämlich einem dem Körper zugewandten Albedofenster auf der Rückseite an der (i)-Position und einem dem Körper abgewandten Außenfenster auf der Vorderseite an der (a)-Position (siehe Abb. 1). Dies erfordert übrigens, dass das Dosimeter mit der richtigen Seite zum Körper getragen wird!

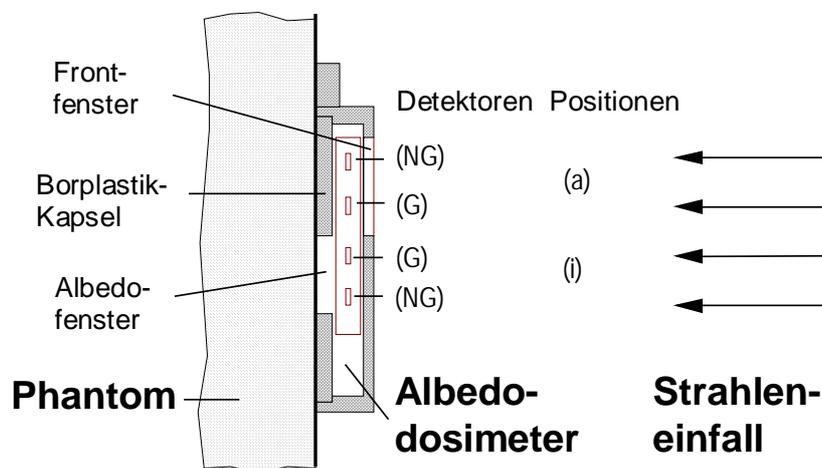


Abb. 1 Schematischer Aufbau eines Albedodosimeters mit zwei Detektorpaaren mit je einem (NG) und (G)-Detektor in der Position (a) bzw. (i)

Sowohl in der (a)- als auch (i)-Position befinden sich jeweils ein Paar Thermolumineszenz (TL)-Detektoren, bestehend aus einem Detektor aus einer nur photonenempfindlichen Charge (G) und einem zweiten aus einer neutronen- und photonenempfindlichen Charge (NG). Der Neutronen-Personendosiswert basiert auf der Messwertdifferenz des (NG)- und (G)-Detektors, die Photonen-Personendosis auf dem Messwert des entsprechenden (G)-Detektors.

Hinweis: In den Formeln werden die geklammerten Großbuchstaben (G) und (NG) für den Bezug zu einer Charge von Detektoren und die geklammerten Kleinbuchstaben wie (n) und (r) für Teilchargen als Teilmenge der Chargen angegeben. Nur die geklammerten Kleinbuchstaben (a) und (i) bezeichnen die Detektorpositionen (siehe auch Formelzeichenverzeichnis).

2.2 Thermolumineszenz-Dosimetriesysteme

Die heute in den Messstellen eingesetzten TL-Dosimetriesysteme für Albedodosimeter sind in Tab. 1 zusammengestellt. Die (G)- und (NG)-Detektoren unterscheiden sich in ihrer Isotopenzusammensetzung. Entscheidend für den (NG)-Detektor sind die Isotope ${}^6\text{Li}$ und ${}^{10}\text{B}$, die insbesondere thermische Neutronen über die Kernreaktionen ${}^6\text{Li} (n, \alpha) {}^3\text{H}$ und ${}^{10}\text{B} (n, \alpha) {}^7\text{Li}$ nachweisen. Die entstehenden α -Teilchen und Kerne werden vollständig im Detektor absorbiert und erzeugen dort TL-Zentren zum TL-Nachweis. Die Isotope ${}^7\text{Li}$ und ${}^{11}\text{B}$ in den (G)-Detektoren zeigen praktisch keine Reaktionen mit Neutronen. Natürliches Bor und Lithium enthält jeweils beide Isotope.

Tab. 1 Eingesetzte TL-Dosimetriesysteme für Albedodosimeter

Messstelle	Dosimetrie system ¹⁾	(G)- Detektor	(NG)- Detektor	Detektordicke mm
FZK-Karlsruhe	Alnor	${}^7\text{LiF: Mg, Ti}$	${}^6\text{LiF: Mg, Ti}$	0,89
MPA-Dortmund	Harshaw			0,89
GSF-Neuherberg	Panasonic	${}^7\text{Li}_2 {}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$	${}^6\text{Li}_2 {}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$	0,07
GSF-Neuherberg	Harshaw	${}^7\text{LiF: Mg, Ti}$	${}^6\text{LiF: Mg, Ti}$	0,38
LPS-Berlin	Harshaw			0,38
SSU-Berlin	Harshaw			0,38

1) Allfällige Namensänderungen der Firmen werden hier nicht berücksichtigt

Abb. 2 zeigt die drei Varianten des Albedodosimetertyps der Messstellen mit den zugehörigen Detektorkarten und Abb. 3 den Aufbau am Beispiel des Albedodosimeters mit der Detektorkarte des Dosimetriesystems Alnor. Die TL-Auswertetechnik für Albedodosimeter ist z. B. in [BUR82 und BUR89 und PIE88] beschrieben.



Abb. 2 Albedodosimeter und die zugehörigen Detektorkarten, von links nach rechts Typ Panasonic, Alnor und Harshaw

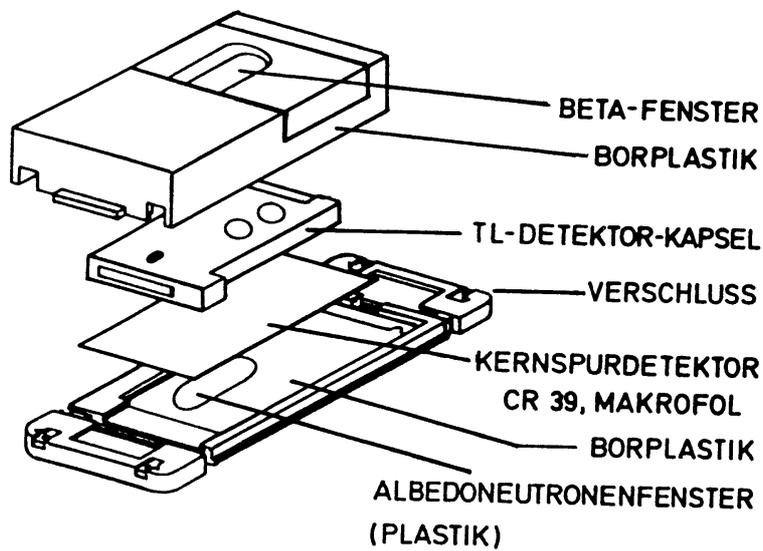


Abb. 3 Typischer Aufbau eines Albedodosimeters, hier mit Detektorkarte des Typs Alnor

2.3 Ermittlung der Personendosis mit Albedodosimetern nach DIN 6802-4

2.3.1 Äquivalentdosen durch Photonen und Neutronen

Die Darstellung der Ermittlung der Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ aus den Messwerten der TL-Detektoren in diesem Bericht ist soweit wie möglich konsistent mit den Normen DIN 6802-4 (Albedodosimeter, Abkürzung A) [DIN98], mit DIN 25 482-11 (Nachweisgrenzen bei Messungen mit Albedodosimetern, Abkürzung N) [DIN00], und teilweise auch mit DIN 25483 (Umgebungsüberwachung mit Festkörperdosimetern, Abkürzung U) [DIN99]. Die Formelzeichen werden weitgehend aus diesen Normen übernommen und die dort angeführten Gleichungsnummern hier zusätzlich in eckigen Klammern angegeben: z. B. DIN 6802-4 Gleichung (B.1) = [A(B.1)], DIN 25482-11 Gleichung (2) = [N(2)] und DIN 25483 Gleichung (1) = [U(1)]. Die Druckfehler in den Formeln von DIN 6802-4, insbesondere in den Indizes der Kalibrierfaktoren N , sind hier korrigiert.

In der speziellen Anwendung der Albedodosimeter werden neben der Tiefen-Personendosis $H_p(10)$, auch ihre durch Photonenstrahlung (hier kurz Photonenpersonendosis H_γ) und durch Neutronenstrahlung (hier kurz Neutronen-Personendosis H_n) erzeugten Anteile betrachtet.

$$H_p(10) = H_\gamma + H_n \quad [\text{N(4)}] \quad (2.1)$$

2.3.2 Teilkorrigierte und korrigierte Anzeigen der TL-Detektoren

Die teilkorrigierte (d. h. weitere Korrekturen folgen) Anzeige M'_j der TL-Detektoren setzt sich aus der unkorrigierten Anzeige A_j des j -ten Detektors und seiner Voranzeige A_{0j} zusammen, die sich durch Auswertung des unbestrahlten Detektors ermitteln lässt.

$$M'_j = A_j - A_{0j} \quad [\text{A(A.1)}] \quad (2.2)$$

Es ist oft ausreichend, anstelle der individuellen Voranzeige A_{0j} den Mittelwert \bar{A}_0 zu subtrahieren, der mit einer regenerierten, unbestrahlten Teilcharge (u) aus der entsprechenden Detektor-Charge ermittelt wird. Eine Teilcharge besteht aus einer Gruppe von Detektoren einer Charge.

Bei der Einführung der Detektoren oder der vollständigen Neukalibrierung des Systems wird zunächst der individuelle Photonenkorrektionsfaktor k_j des j -ten Detektors der Gesamtheit der (NG)-Chargen und (G)-Chargen (siehe Kapitel 2.2) bestimmt.

$$k_j = \frac{M'_j}{\bar{M}'} \quad [\text{A(A.4), A(A.5)}] \quad (2.3)$$

Anmerkung: \bar{M}' ist der Mittelwert aller teilkorrigierten Anzeigen bei der Ermittlung von k_j . Diese Vereinfachung gegenüber DIN 6802-4 hat wohl Auswirkungen auf den Wert von k_j , aber nicht auf die Dosismesswerte, da auch die Kalibrierdosimeter mit k_j korrigiert werden. Die Detektoren müssen vor der Auswertung einheitlich mit der Photonenreferenzdosis $H_{\gamma r}$ bestrahlt werden.

Die korrigierte Anzeige M_j ergibt sich dann aus der teilkorrigierten Anzeige M'_j und dem individuellen Photonenkorrektionsfaktor k_j des j -ten Detektors zu

$$M_j = k_j \cdot M'_j \quad [\text{A(A.2)}] \quad (2.4)$$

Die korrigierte Photonenanzeige $M'_j(G)$ mit Detektoren der nur photonenempfindlichen Charge (G) (z.B. $^7\text{LiF:Mg,Ti}$ -Detektor in der Position (i) des Albedodosimeters) ist demnach

$$M_j(G) = k_j \cdot M'_j(G) \quad [\text{A(B.2)}] \quad (2.5)$$

Die Neutronenanzeige $M_n(i)$ ergibt sich aus der Differenz der korrigierten Anzeigen der Detektoren einer neutronen- und photonenempfindlichen Charge (NG) und nur photonenempfindlichen Charge (G) in der Position (i) des Albedodosimeters zu

$$M_n(i) = M_k(NG) - M_j(G) = k_k \cdot M'_k(NG) - k_j \cdot M'_j(G) \quad [\text{A(B.5)}] \quad (2.6)$$

Dazu analog lässt sich die Neutronenanzeige $M_n(a)$ aus den Anzeigen der (NG)- und (G)-Detektoren in der Position (a) des Albedodosimeters ermitteln.

2.3.3 Photonenkalibrierfaktor und Dosismesswert

Der Photonenkalibrierfaktor $N_{\gamma r}(n)$ ergibt sich aus der Referenzdosis $H_{\gamma r}$ und dem Mittelwert der korrigierten Anzeigen $\overline{M}(n)$ der Detektoren einer Teilcharge (n) aus der Gesamtheit der Detektoren zu

$$N_{\gamma r}(n) = \frac{H_{\gamma r}}{\overline{M}(n) - \overline{M}(u)} \quad [\text{A(A.6)}] \quad (2.7)$$

$\overline{M}(u)$ ist der Mittelwert der korrigierten Anzeige der gleichzeitig regenerierten Teilcharge (u), mit der der Anteil durch die natürliche Strahlung bei längeren Lagerzeiten berücksichtigt wird.

Anmerkung: Der Buchstabe (n) in der Klammer steht für die Teilcharge (n), die aus DIN 25483 übernommen wurde. (n) bezieht sich auf den Kalibrierfaktor N und nicht auf Neutronen.

Moderne Auswertegeräte zeigen nach einer vorangegangenen Kalibrierung mit Photonen direkt einen Messwert in Dosiseinheiten (Dosismesswert H^m) an, bei dem die individuelle Voranzeige A_{0j} bereits subtrahiert und der individuelle Photonenkorrektionsfaktor k_j berücksichtigt ist. Aus Gleichung (2.2) und (2.7) ergibt sich:

$$H_j^m = N_{\gamma r}(n) \cdot M_j = N_{\gamma r}(n) \cdot k_j \cdot (A_j - A_{0j}) \quad [\text{U(2)}] \quad (2.8)$$

Diese Festlegung aus DIN 25483 vereinfacht verschiedene Gleichungen für das Albedodosimeter erheblich. Im Vorversuch (siehe Kapitel 3) haben die Messstellen H^m -Werte angegeben.

2.3.4 Photonendosis und natürliche Strahlung

Bei Festkörperdosimetern wird der Messwert durch die natürliche Strahlung von der Regenerierung bis zur Auswertung in der Umlaufzeit (Expositionszeitspanne) t_e aufintegriert. Die Anzeige der (NG)- und (G)- Detektoren wird täglich etwa um einen Wert entsprechend einer Photonen-Personendosis von $2 \mu\text{Sv}$ erhöht, die Differenz der beiden Detektorarten durch natürliche Neutronen ist hingegen in Höhen bis 500 m über Meeresspiegel, in denen *Transporte* stattfinden, um eine Größenordnung kleiner. Bei der Photonen-Personendosis muss dieser Anteil der natürlichen Strahlung, der nach Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) nicht zur beruflichen Strahlenexposition beiträgt, subtrahiert werden.

Die Photonen-Personendosis H_γ errechnet sich damit aus der korrigierten Anzeige eines nur photoneneempfindlichen Detektors der Charge (G) und dem Photonenkalibrierfaktor $N_{\text{yr}}(n)$ zu:

$$H_\gamma = N_{\text{yr}}(n) \cdot M_j(G) - \dot{H}_{\text{nat}}^m \cdot t_e = H_j^m(G) - \dot{H}_{\text{nat}}^m \cdot t_e \quad [\text{A(B.1)}] \quad (2.9)$$

Die Dosisleistung \dot{H}_{nat}^m der natürlichen Strahlung hängt u. a. von der Geologie des Bodens und in Gebäuden vom Baumaterial ab und steigt mit zunehmender Höhe über dem Meeresspiegel. Innerhalb der Umlaufzeit t_e kann deshalb die Dosisleistung vor allem ortsabhängig verschieden sein. Hier ist übrigens die mit dem gleichen Albedo-Dosimetriesystem gemessene Dosisleistung (hochgestelltes m für Messwert) der natürlichen Strahlung gemeint.

2.3.5 Neutronenkalibrierfaktoren und Neutronen-Personendosis

Analog zu Gleichung (2.7) ergibt sich der Neutronenkalibrierfaktor $N_{\text{nr}}(r)$ im Referenzfeld (z. B. ungestörtes Feld einer ^{252}Cf -Quelle (siehe auch Kapitel 3.3)) aus dem Referenzwert der Neutronen-Personendosis H_{nr} und dem Mittelwert der Neutronenanzeige $\overline{M}_{\text{nr}}(i)$ einiger (NG)-(N)-Detektorpaare einer Teilcharge (r) zu

$$N_{\text{nr}}(r) = \frac{H_{\text{nr}}}{\overline{M}_{\text{nr}}(i)} \quad [\text{A.9}] \quad (2.10)$$

Wiederholt sei angemerkt, dass die Buchstaben (i) und (a) in der Klammer die Bedeutung von Detektorpositionen im Albedodosimeter (siehe Kapitel 2.1 und vorangehendes Kapitel) und nicht von Teilchargen haben.

Leider lässt sich H_n mit einem Albedodosimeter für ein *beliebiges* Neutronenfeld nicht einfach analog zu Gleichung (6) durch Multiplikation der Neutronenanzeige $\overline{M}_n(i)$ mit dem Neutronenkalibrierfaktor im Referenzstrahlungsfeld $N_{\text{nr}}(r)$ bestimmen (vergleiche Formel B.4 in DIN 6802-4). Das Albedodosimeter ist zwar über den gesamten Energiebereich bis etwa 10 MeV neutroneneempfindlich, aber das Ansprechvermögen für monoenergetische Neutronen oberhalb 100 keV verringert sich zunehmend. Durch diese ausgeprägte Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens des Albedodosimeters ist für jedes Strahlungsfeld ein Neutronenkalibrierfaktor N_n mit einer sogenannten Feldkalibrierung im Strahlungsfeld zu ermitteln. Zur Bestimmung eines Referenzwertes der Neutronendosis am Messort dient eine Polyethylenkugel von 30 cm Durchmesser als Neutronendosisimeter („Remcounter“) mit einem neutroneneempfindlichen $^6\text{LiF}/^7\text{LiF}$ -TL-Detektorpaar im Zentrum der Kugel. Der Messwert durch Neutronen für die TL-Detektoren in der Kugel wird in einem Referenzneutronenfeld einer Am-Be-Neutronenquelle kalibriert und gibt dann in guter Näherung energieunabhängig die Neutronendosis am Messort wieder. Die Kugel wird gleichzeitig als Phantom für die Albedodosi-

meter an ihrer Oberfläche verwendet [BUR88]. Der Neutronenkalibrierfaktor N_n im Strahlungsfeld ergibt sich aus den Neutronenanzeigen $M_{n1}(i)$ und $M_{n2}(i)$ von Albedodosimetern in diametralen Positionen auf der Kugeloberfläche und dem Referenzdosiswert H_n aus dem TL-Paar im Zentrum der Kugel zu

$$N_n = \frac{H_n}{M_{n1}(i) + M_{n2}(i)} \quad [\text{A(A.13)}] \quad (2.11)$$

Damit ergibt sich die Neutronen-Personendosis H_n aus der Neutronenanzeige $M_n(i)$ und dem vom Neutronenstrahlungsfeld abhängigen Neutronenkalibrierfaktor N_n .

$$H_n = N_n \cdot M_n(i) \quad (2.12)$$

Die Erfahrung hat gezeigt, dass es ausreichend ist, das Dosimetriesystem in der täglichen Routine mit Photonen zu kalibrieren und den Neutronenkalibrierfaktor N_n im Strahlungsfeld auf die Photonenkalibrierung zu beziehen. Die letzte Gleichung erweitert sich und vereinfacht sich mit Gleichung (2.8) zu

$$H_n = \frac{N_n}{N_{\gamma r}(n)} N_{\gamma r}(n) \cdot M_n(i) = \frac{N_n}{N_{\gamma r}(n)} H_n^m(i) \quad (2.13)$$

2.3.6 Anwendungsbereiche

Die Ergebnisse einer großen Anzahl von Feldkalibrierungen erlauben es, die Vielzahl der möglichen Strahlungsfelder zu wenigen Anwendungsbereichen zusammenzufassen. In Tab. 2 sind vier Anwendungsbereiche N1 bis N4 beschrieben. Im Anwendungsbereich N4 stellt eine Kombination von Albedoneutronendosimetern mit Kernspurätzdosimetern (siehe Abb. 3) gegebenenfalls sicher, dass auch Neutronen-Dosisanteile oberhalb der Energie von etwa 10 MeV erfasst werden. Grundsätzlich ist die Anwendung der Albedodosimeter auf einen der vier anzugebenden Anwendungsbereiche zu beschränken.

Der *Transport* von Brennelementen und hochradioaktivem Abfall ist in den Anwendungsbereich N2 eingeordnet. Innerhalb eines Anwendungsbereiches ist das Ansprechvermögen entweder innerhalb der zugelassenen Messunsicherheit konstant oder es ist eine weitere Korrektur über das Verhältnis der Neutronenanzeigen $M_n(a)/M_n(i) = H_n^m(i)/H_n^m(a)$ anzubringen, die im folgenden näher erläutert wird.

Durch Moderation (mehrmalige Rückstreuung unter Energieverlust der Neutronen an Materialien in der Umgebung der Neutronenquelle) sind in der Praxis die Neutronenfelder am Arbeitsplatz oft von mittelschnellen und thermische Neutronen begleitet, die das Neutronen-Ansprechvermögen des Albedodosimeters erhöhen. Dadurch ist das Albedodosimeter auch in Strahlungsfeldern einsetzbar, in denen die primären Neutronen mit Energien bis in den Bereich von 10 MeV keine ausreichende Anzeige des Albedodosimeters liefern würden. Der Anteil der rückgestreuten Neutronen spiegelt sich im Verhältnis der Neutronenanzeigen $M_n(a)/M_n(i)$ wider, und tatsächlich lassen sich Korrekturkurven des auf die Photonenkalibrierung bezogenen Neutronenkalibrierfaktors in Abhängigkeit von diesem Verhältnis angeben. In Abb. 4 sind die entsprechenden Korrekturkurven für das Alnor-Dosimetriesystem wiedergegeben.

Tab. 2 Anwendungsbereiche des Albedodosimeters in Neutronenstrahlungsfeldern

<p>N1 REAKTOREN UND BESCHLEUNIGER (STARKE MODERATION DER NEUTRONEN)</p> <p>Kernkraftwerke: z.B. In-core-Bereiche, Dampferzeuger, Sumpf, Absetzbecken. Forschungsreaktoren: z.B. an Bestrahlungskanälen, In Experimentierhallen. Betatron, Elektronen-Linearbeschleuniger mit Elektronenenergien > 8 MeV Teilchenbeschleuniger (Therapie): z.B.(d,T)-Generator, 14 MeV-Neutronen, Zyklotron (Prot./Deuteronen-Kernreaktion), Zugang zum Bestrahlungsraum.</p>
<p>N2 BRENNSTOFFZYKLUS (GERINGE MODERATION DER NEUTRONEN)</p> <p>Brennstoffzyklus mit Wiederaufarbeitung: z.B. Umgang mit spaltbarem Material (SM), Fertigung von Brennelementen (BE), Ein- und Ausbau bzw. Transport von abgebrannten BE (CASTOR), Lagerung von BE. Versuchsreaktoren: z.B. an Brennelementanordnungen mit geringer Moderierung/Abschirmung, An Experimentier- und Unterrichtsreaktoren. Kritikalitätsüberwachung: z.B. Umgang mit größeren Mengen SM in wässriger Lösung</p>
<p>N3 RADIONUKLID-NEUTRONENQUELLEN (Am-Be, Pu-Be, Ra-Be, Cf-252)</p> <p>z.B. Quellen ohne/mit Moderierung durch Flüssigkeit, Abschirmung bzw. Boden, Labor-/Feldeinsatz in Forschung und Technik, Transport und Lagerung der Quellen.</p>
<p>N4 BESCHLEUNIGER (FORSCHUNG)</p> <p>z.B. Zyklotrons und 14 MeV-Generatoren an wenig abgeschirmten Bereichen mit häufig wechselnden Targets/Teilchenart, zugängliche Bestrahlungsräume bzw. Versuchsaufbauten.</p>

Aus Abb. 4 ergibt sich für den Anwendungsbereich N2 (beinhaltet Brennelement-*Transporte*), dass zur Ermittlung der Neutronen-Personendosis H_n die Neutronenanzeige $M_n(i)$ des Alnor-Dosimetriesystems mit einem konstanten Kalibrierfaktor multipliziert werden muss.

2.3.7 Vereinheitlichtes Auswerteverfahren der Messstellen - Neutronenkorrektionsfaktoren

Da die Messstellen die gleichen Albedokapseln verwenden, nur modifiziert für die verwendeten Detektorkarten der verschiedenen Dosimetriesysteme (siehe Abb. 3), zeigen sie im allgemeinen einen vergleichbaren Verlauf der Korrektionskurven in den Strahlenfeldern der Anwendungsbereiche.

Ein Korrektionsfaktor k_n wird nun unabhängig von den Neutronenansprechvermögen verschiedener Dosimetriesysteme und auch verschiedener (NG)-Chargen durch Bezug von N_n auf den Kalibrierfaktor $N_{nr}(r)$ im Referenzstrahlungsfeld.

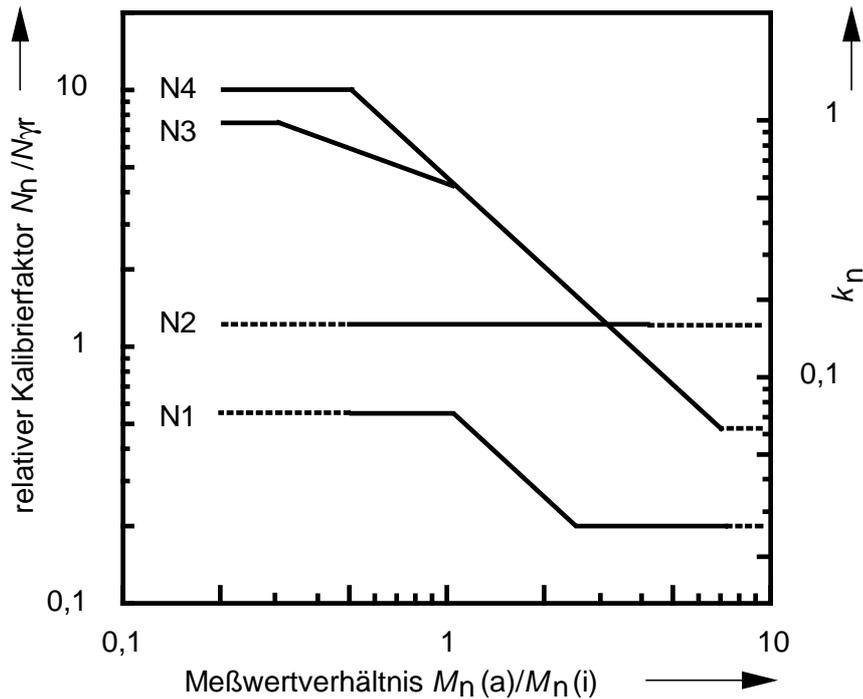


Abb. 4 Korrektionskurven des relativen Neutronenkalibrierfaktors $N_n/N_{\gamma r}(n) = k_n \cdot k_{nr}$ für das Dosimetriesystem Alnor bzw. des systemunabhängigen Korrektionsfaktors k_n für verschiedene Anwendungsbereiche N1 bis N4 in Abhängigkeit vom Messwertverhältnis $M_n(a)/M_n(i) = H_n^m(i)/H_n^m(a)$. k_n gilt für das in Kapitel 3.3 genannte Referenzstrahlungsfeld einer ^{252}Cf -Quelle.

Der Korrektionsfaktor k_n berechnet sich zu

$$k_n = \frac{N_n}{N_{nr}(r)} \quad [\text{A(A.11)}] \quad (2.14)$$

Abb. 4 zeigt k_n auf der rechten Ordinatenachse für das in Kapitel 3.3 genannte Referenzstrahlungsfeld einer ^{252}Cf -Quelle. Die linke Ordinatenachse gilt im Gegensatz zur rechten Achse nur für das Alnor-Dosimetriesystem.

Aus den Gleichungen (2.12) und (2.14) ergibt sich dann die Grundgleichung der Neutronen-Personendosisermittlung mit Albedodosimetern zu

$$H_n = k_n \cdot N_{nr}(r) \cdot M_n(i) \quad [\text{A(1)}] \quad (2.15)$$

Im letzten Schritt wird für die praktische Anwendung wieder auf den Photonenkalibrierfaktor bezogen. Der Korrektionsfaktor k_{nr} ergibt sich aus den Kalibrierfaktoren in den Referenzfeldern für Photonen bzw. Neutronen zu

$$k_{nr} = \frac{N_{nr}(r)}{N_{\gamma r}(n)} \quad [\text{A(A10)}] \quad (2.16)$$

Der Korrektionsfaktor k_{nr} ist eine Konstante für jedes Dosimetriesystem. In Kapitel 3.4 werden die k_{nr} -Faktoren für die Dosimetriesysteme der Messstellen aus den Ergebnissen eines Vorversuchs grob abgeschätzt.

Gleichung (2.15) wird mit Gleichung (2.16) für die Praxis modifiziert zu

$$H_n = k_n \cdot k_{nr} \cdot N_{\gamma r}(n) \cdot M_n(i) = k_n \cdot k_{nr} \cdot H_n^m(i) \quad [\text{A(B.7)}] \quad (2.17)$$

Durch Vergleich mit Gleichung (2.13) ergibt sich, dass $N_n/N_{\gamma r}(n) = k_n \cdot k_{nr}$ ist, d. h. in Abb. 4 ist die Verschiebung der rechten zur linken Ordinatenachse durch den für ein Dosimetriesystem spezifischen Faktor k_{nr} gegeben. Für das Alnorsystem ist $k_{nr} = 7,5$ und $k_n \cdot k_{nr} = 1,25$.

Für die Anwendung des Albedodosimeters nach dem vereinheitlichten Messverfahren [ALB93] müssen die Messstellen vorher den k_{nr} -Faktor aus den Ergebnissen der jährlichen Neutronenvergleichsbestrahlung unter Wiederholbedingungen ermitteln [ALB93].

2.4 Korrekktionsfaktoren für Linearität des Dosismesswertes und Richtung des Strahleneinfalls

Beim Einsatz des Albedodosimeters bei *Transporten* ist nicht mit vorwiegendem Strahleneinfall aus einer Richtung zu rechnen. Deshalb wird hier über DIN 6804-3 [DIN98] hinausgehend ein Richtungskorrektionsfaktor k_ϕ eingeführt. Da hier insbesondere sehr kleine Dosiswerte gemessen werden sollen, wird darüber hinaus ein Korrektionsfaktor k_{lin} für die Linearität des Dosismesswertes bei kleinen Dosen im Vergleich zur Referenzdosis bei der Kalibrierung eingeführt.

Richtungs- und Energieabhängigkeit von Dosimetern sind eng miteinander verknüpft. Für Photonenstrahlung mit der Energie E und dem Einfallswinkel ϕ ist der Korrektionsfaktor $k_{\gamma,E,\phi}$ für Energie und Richtung der Quotient des Kalibrierfaktors $N_\gamma(E, \phi)$ und dem Photonenkalibrierfaktor $N_{\gamma r}(n)$ unter Referenzbedingungen:

$$k_{\gamma,E,\phi} = \frac{N_\gamma(E, \phi)}{N_{\gamma r}(n)} \quad (2.18)$$

Der Korrektionsfaktor $k_{\gamma,lin}$ berücksichtigt eventuelle Unterschiede des Kalibrierfaktors bei kleinen Dosen im Vergleich zum Photonenkalibrierfaktor $N_{\gamma r}(n)$, der mit der Referenzdosis $H_{\gamma r}$ ermittelt wird (vergleiche DIN 25483 Gleichung (6)). Als endgültige Gleichung zur Ermittlung der Photonendosis ergibt sich aus Gleichung (2.9):

$$H_\gamma = k_{\gamma,E,\phi} \cdot k_{\gamma,lin} \cdot N_{\gamma r}(n) \cdot M_j(G) - \dot{H}_{nat}^m \cdot t_e \quad (2.19)$$

$$H_\gamma = k_{\gamma,E,\phi} \cdot k_{\gamma,lin} \cdot H_j^m(G) - \dot{H}_{nat}^m \cdot t_e \quad (2.20)$$

Für Neutronen wird der Korrektionsfaktor k_n für die Energie um den der Richtung $k_{n,\phi}$ erweitert, wobei gilt:

$$k_{n,E,\phi} = k_n \cdot k_{nr} \cdot k_{n,\phi} \quad (2.21)$$

Mit den Gleichungen (2.6), (2.17) und (2.21) und dem Korrektionsfaktor für die Linearität der Dosismesswertes nach Neutronenbestrahlung ergibt sich die endgültige und hier gerahmte Gleichung für die Neutronen-Personendosis:

$$H_n = k_{n,E,\phi} \cdot k_{n,lin} \cdot N_{\gamma r}(n) \cdot (M_k(NG) - M_j(G)) \quad (2.22)$$

$$H_n = k_{n,E,\phi} \cdot k_{n,lin} \cdot (H_k^m(NG) - H_j^m(G)) \quad (2.23)$$

2.5 Die Ermittlung der Tiefen-Personendosis $H_p(10)$

Aus der Sicht des Strahlenschutzes interessiert bei den *Transporten* nur die Tiefen-Personendosis $H_p(10)$. Sie berechnet sich unter Verwendung von Gleichung (2.1), (2.20) und (2.23) zu

$$H_p(10) = H_n + H_\gamma = (k_{\gamma,E,\phi} - k_{n,E,\phi}) k_{\gamma,\text{Lin}} \cdot H_j^m(\text{G}) + k_{n,E,\phi} \cdot k_{n,\text{Lin}} \cdot H_k^m(\text{NG}) - k_{\gamma,E,\phi} \cdot \dot{H}_{\text{nat}}^m \cdot t_e \quad (2.24)$$

Die letzte Gleichung wird zur Ermittlung der Nachweisgrenze nach DIN 25482-11 eingesetzt. Sie lässt sich in die dort aufgeführte Gleichung [N(B.30)] überführen, wenn man $H_k^m(\text{NG})$ bzw. $H_j^m(\text{G})$ und \dot{H}_{nat}^m rückwärts auflöst in die entsprechenden Anzeigen A und dann das Produkt $N_{\text{yr}}(n) \cdot A$ abweichend von der hier verwendeten Definition mit M bezeichnet.

2.6 Bisherige Verbesserungsversuche der Albedo-Messtechnik

Verschiedene messtechnische Verfahren, die die Trennung und den Nachweis der Neutronendosen im TLD-Albedodosimeter verbessern sollten, haben sich in der Routineanwendung nicht bewährt.

Dazu gehört die Glowkurvenanalyse zur Trennung der Neutronen über das Verhältnis von Glowpeak 5 zu Glowpeak 6 für ^6LiF -Detektoren [z.B. BUR86]. Es zeigt sich, dass insbesondere bei kleinem Neutronenanteil und geringen Dosen auch bei aufwendiger Glowkurven-Analysetechnik [z.B. HOR86 und HOR95] die Messunsicherheit der Ergebnisse dieser Methode nicht an die in der Routineanwendung übliche Differenzbildung von TLD600/700-Pärchen heranreichen.

Dünne bzw. graphitierte Detektoren [BUR94, BUD95] zeigen wegen der Absorption der thermischen Neutronen bevorzugt an der Detektoroberfläche ein so bezwecktes erhöhtes Verhältnis der Neutronen- zur Photonenanzeige um etwa den Faktor 2 an. Wegen der geringeren Lichtausbeute bei der TL-Messung erhöht sich aber gleichzeitig auch die Nachweisgrenze (Vergleiche Kapitel 3.4.).

Die Verwendung hochempfindlicher LiF: Mg, Cu, P-Detektoren erhöht zwar die Nachweisgrenze für Photonen, jedoch auf Kosten des Neutronennachweises [BIL94, OLK94]. Denn wegen ihrer speziellen LET-Abhängigkeit weisen sie α -Teilchen aus der (n, α) -Reaktion im Detektor zur Neutronenmessung mit einer wesentlich geringeren Empfindlichkeit nach als die üblichen LiF:Mg,Ti-Detektoren.

Zur Überwindung des Nachteils der hohen Photonenempfindlichkeit wurden auch Kernspurdetektoren mit (n, α) -Konvertern im Albedodosimeter eingesetzt [HOF89]. Diese Detektoren weisen die durch thermischen Albedoneutronen im Konverter erzeugten Alphateilchen als auszählbare Spuren hochempfindlich nach. Das sehr aufwendige Verfahren wird nicht routinemäßig eingesetzt.

Auch eine Vielzahl anderer Albedokapselentwicklungen [PIE77, BUR77] konnten am Ende die typisch ausgeprägte Energieabhängigkeit des Albedodosimeters nicht überwinden.

3 Vorversuch

3.1 Allgemeines

Ziel des Vorversuches in Karlsruhe war es, im kleineren Umfang den gesamten Ablauf der geplanten Testbestrahlung und die Bestrahlungsbedingungen insbesondere im Neutronenstrahlungsfeld mit den Messstellen zu testen.

Wie in Kapitel 3.3 erläutert, war es ausreichend, anstelle vollständiger Albedodosimeter nur die Detektorkarten zur Bestrahlung nach Karlsruhe zu schicken, und zwar zehn Detektorkarten zur Neutronenbestrahlung, fünf zur Photonenkalibrierung und eine zur Kontrolle der Dosis durch natürliche Strahlung.

Die Photonen-Bestrahlung erfolgte unter Verwendung der derzeit gültigen Dosismessgröße Photonen-Äquivalentdosis H_X , die Neutronenbestrahlung in der Messgröße $H'(10)$ (siehe Einleitung). Die Änderungen, die sich durch Umrechnung der Werte in die neue Messgröße Tiefen-Personendosis $H_p(10)$, gültig für Photonen und Neutronen, ergeben würden, sind bei der Ermittlung der Nachweisgrenzen berücksichtigt worden. Für Photonen betragen sie nur wenige Prozent und für Neutronen sind sie im Faktor $k_{n,E,\phi}$ (siehe Kapitel 5.4.3) enthalten.

3.2 Photonen

Im Vorversuch wurden die für die Photonenkalibrierung vorgesehenen Detektorkarten mit einer Referenz-Photonen-Äquivalentdosis von $H_X = 5$ mSv in einem kollimierten und kalibrierten ^{137}Cs -Strahlungsfeld unter den Routinekalibrierbedingungen der Karlsruher Messstelle bestrahlt.

3.3 Neutronen

Die Neutronenbestrahlungen erfolgten im Referenzstrahlungsfeld der Karlsruher Messstelle mit einer ^{252}Cf -Quelle der Quellstärke $0,3737 \cdot 10^7 \text{s}^{-1}$ am 10.6.1998. Die Bestrahlungseinrichtung aus Aluminium hängt während der Bestrahlung in Raummitte einer Halle und hat mindestens 4 m Abstand zu allen Wänden und dem Hallenboden. Der Dosisanteil durch rückgestreute Neutronen ist deshalb in Quellnähe im Abstand bis zu einem Meter sehr gering [SIN85]. Dies ist Voraussetzung für ein Referenzstrahlungsfeld zur Bestimmung des Neutronenkalibrierfaktors $N_{nr}(r)$.

Albedodosimeter werden an Phantomen bestrahlt. Um möglichst viele Dosimeter gleichzeitig unter gleichen Bedingungen bestrahlen zu können, werden zwei PE-Zylinder-Phantome von 15 cm Zylinderachsenlänge und Radius gegenüberstehend mit den Stirnflächen zur Quelle positioniert (siehe Abb. 5). Die Quelle befindet sich genau in der Mitte auf der gemeinsamen Achse beider Zylinderphantome mit einem Quellabstand von je 39 cm zu den Stirnflächen.

Vormessungen haben gezeigt, dass sich die Bestrahlungszeiten auf etwa 1/10 verkürzen lassen, wenn die Detektorkarten nicht in der Albedokapsel an der Oberfläche, sondern in 20 mm Tiefe des Phantoms ohne die Albedokapsel exponiert werden. In dieser Tiefe erreicht die Fluenz moderierten thermischen Neutronen ihren Maximalwert.

Einen Querschnitt der verwendeten Phantome mit einem zugänglichen Hohlraum für die Detektorkarten zeigt Abb. 5, die Lage der Detektorkarten im Phantom Abb. 6 links. Die Detektorkarten wurden im Phantom konzentrisch und im gleichen Abstand voneinander mit der Frontseite zur Quelle angeordnet. Die Befestigung erfolgte mit zweiseitig klebenden Band, wobei darauf geachtet wurde, dass keine Klebstoffreste auf den Karten verblieben. Der Grund

für die geänderte Anordnung bei der Testbestrahlung (Abb. 6 rechts) wird in Kapitel 4.1.3 erläutert.

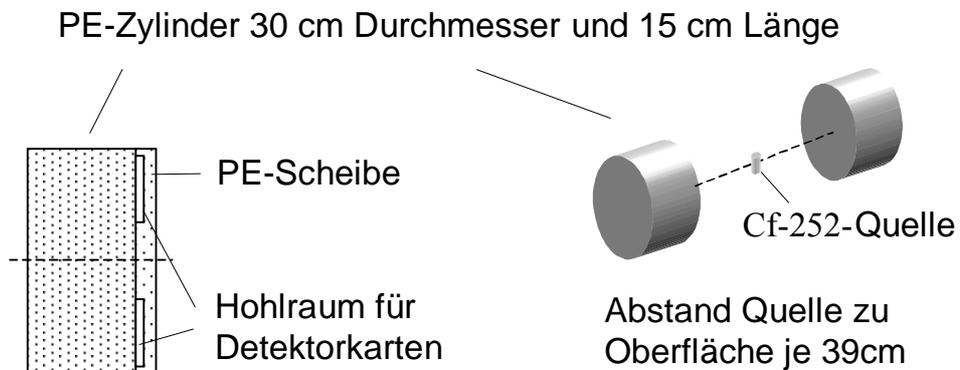


Abb. 5 Querschnitt durch das PE-Zylinderphantom zur Neutronenbestrahlung von Detektorkarten und Bestrahlungsanordnung mit jeweils zwei Phantomen

Zur Untersuchung der Messunsicherheit in Abhängigkeit von H_n ist es gleichgültig, wie der Dosismesswert durch Neutronen erzeugt wird.

Im Vorversuch war lediglich die Abhängigkeit zwischen der Bestrahlungszeit und dem $H_n^m(i)$ -Wert für die gewählte Geometrie zu ermitteln. Aus ähnlichen Experimenten [BUR97] konnte für den Vorversuch die ungefähre Bestrahlungszeit für einen Dosismesswert durch Neutronen von 5 mSv abgeschätzt werden.

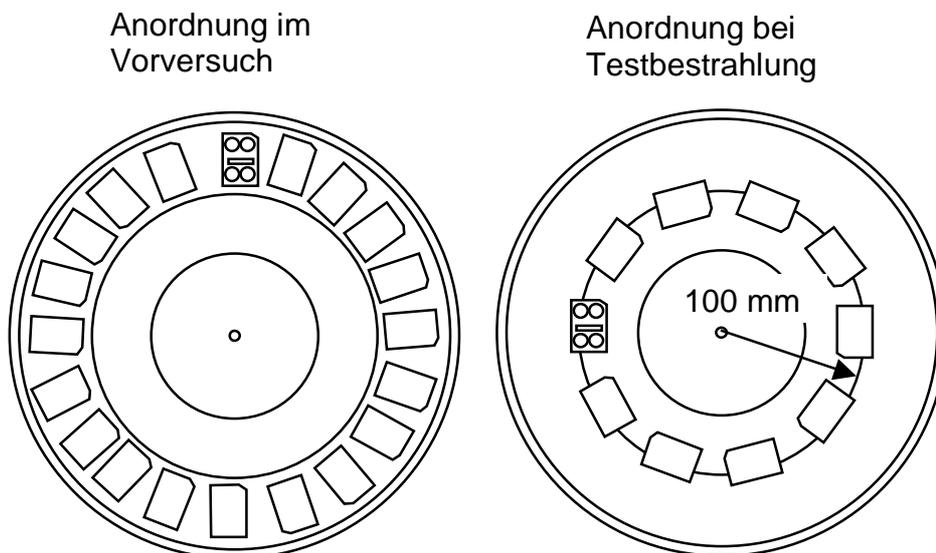


Abb. 6 Anordnung der Detektorkarten Typ Harshaw im Zylinderphantom beim Vorversuch und bei der Testbestrahlung

3.4 Ergebnisse der Vorversuche

Die Auswertergebnisse der Vorversuche sind in Tab. 3 wiedergegeben. Die Spalten der Tabelle sind mit den Abkürzungen der Messstellen überschrieben. Darunter stehen die Namen der dort für diesen Vorversuch verwendeten TL-Dosimetriesysteme und die Dicke der eingesetzten TL-Detektoren in den Detektorkarten.

Die mit den Albedodosimetern gemessene Photonendosis H_γ nach einer Bestrahlung mit der ^{137}Cs -Photonenreferenzdosis $H_{\gamma r} = 5 \text{ mSv}$ dient dem Vergleich der Photonenkalibrierung in den verschiedenen Messstellen, d.h. der Ermittlung von $N_{\gamma r}(n)$ an der gleichen Kalibriereinrichtung. Die Dosismesswerte H_n^m für Neutronen in Tab. 3 sind einheitlich auf die ^{137}Cs -Kalibrierung in Karlsruhe bezogen worden.

Tab. 3 Ergebnisse des Vorversuches

Untersuchter Parameter	Einheit	Wert des Parameters für (Messstelle und Dosimetriesystem)				
		FZK Alnor	MPA Harshaw	GSF Panasonic	LPS Harshaw	SSU Harshaw
Detektordicke	mm	0,89	0,89	0,07	0,38	0,38
Photonendosis H_γ $H_{\gamma r} = 5 \text{ mSv}$	mSv	5,2	5,1	4,5	5,0	5,1
H_n^m (a)	mSv	4,35	3,49	11,7	5,99	6,02
Radius im Phantom	mm	136	136	104,5	136	136
H_n^m (i)	mSv	5,79	5,83	7,48	10,3	10,07
Radius im Phantom	mm	116	109	128	110	110
H_n^m (i) korrigiert	mSv	6,53	5,83	10,9	10,3	10,1
Abschätzungen:						
$k_{nr(\text{SYSTEM})}$		7,5	8,4	4,5	4,8	4,8
k_n für Anwend.-Ber. N2		0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
$k_{nr} \cdot k_n = N_n / N_{\gamma r}(n)$		1,25	1,4	0,7	0,8	0,8
$R_n = k_{nr(\text{ALNOR})} / k_{nr(\text{SYSTEM})}$		1,00	0,9	1,7	1,6	1,6

Bei der Neutronenbestrahlung zum Vorversuch waren die Detektorkarten im Phantom radial angeordnet (siehe Abb. 6a), d.h. der durch den Mittelpunkt einer Detektorkarte gehende Phantomradius wäre durch die dazugedachte Albedokapsel von unten nach oben gelaufen (Ausnahme Panasonickapsel, dort von oben nach unten). Der radiale Abstand von der Phantomachse zu den einzelnen (NG)-Detektoren ist in Tab. 3 unterhalb der entsprechenden Neutronenanzeigen eingetragen. Die Abb. 7 zeigt die Abnahme der Dosismesswerte durch Neutronen in der Position (i) H_n^m (i) und Position (a) H_n^m (a) mit zunehmendem Radius. Die Ursache für diese Abnahme ist in der sich verringernden Moderatormasse um einen Punkt im Randbereich des Phantoms zu suchen. Unter Verwendung dieser Abbildung wurde deshalb die Neutronenanzeige H_n^m (i) der Panasonic- und Alnor-(NG)-Detektoren auf einen einheitli-

chen Phantomradius von 110 mm umgerechnet und in der Tabelle als korrigierte $H_n^m(i)$ -Werte angegeben.

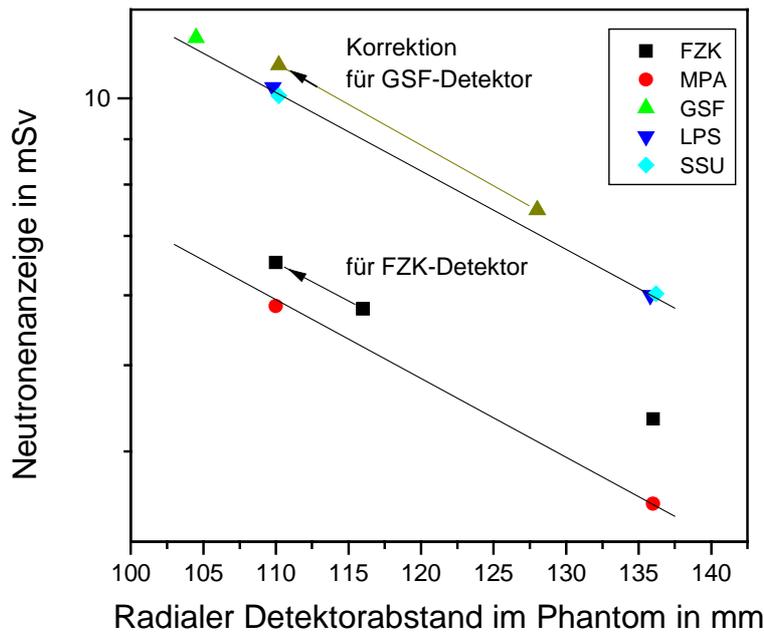


Abb. 7 Neutronendosismesswert in Abhängigkeit vom Abstand der (NG)-Detektoren von der Phantomachse

Mit den korrigierten $H_n^m(i)$ -Werten und dem k_{nr} -Wert von 7,5 für das Alnor-System (siehe Abb. 4) lassen sich die k_{nr} -Werte anderer Dosimetriesysteme abschätzen. Wegen der gleichen Bestrahlung der Detektorkarten der verschiedenen Systeme ergibt sich nach Gleichung (2.17) mit $H_{n[ALNOR]}$ gleich $H_{n[SYSTEM]}$ und gleichem k_n zu.

$$k_{nr[SYSTEM]} = \frac{[H_n^m(i)]_{ALNOR} \cdot k_{nr[ALNOR]}}{[H_n^m(i)]_{SYSTEM}} \quad (3.1)$$

Die abgeschätzten Werte von $k_{nr[SYSTEM]}$ sind in Tab. 3 aufgeführt.

Aus den relativen R_n -Werten, bezogen auf den des Alnor-Systems, in der letzten Zeile von Tab. 3 erkennt man die enge Korrelation des Neutronenansprechvermögens mit der Detektordicke. Dies hat seine Ursache darin, dass die thermischen Neutronen in den Detektoren einer (NG)-Charge stark absorbiert und nur in Oberflächennähe des Detektors über die Thermolumineszenz nachgewiesen werden [OLK94]. Ab Detektordicken größer als 0,3 mm wächst nur noch das Ansprechvermögen gegenüber Photonen aber nicht mehr das gegenüber Neutronen (siehe Abb. 8) Zur besseren Trennung von Neutronen und Photonen werden in neueren Albedosimetriesystemen deshalb die dünneren Detektoren eingesetzt.

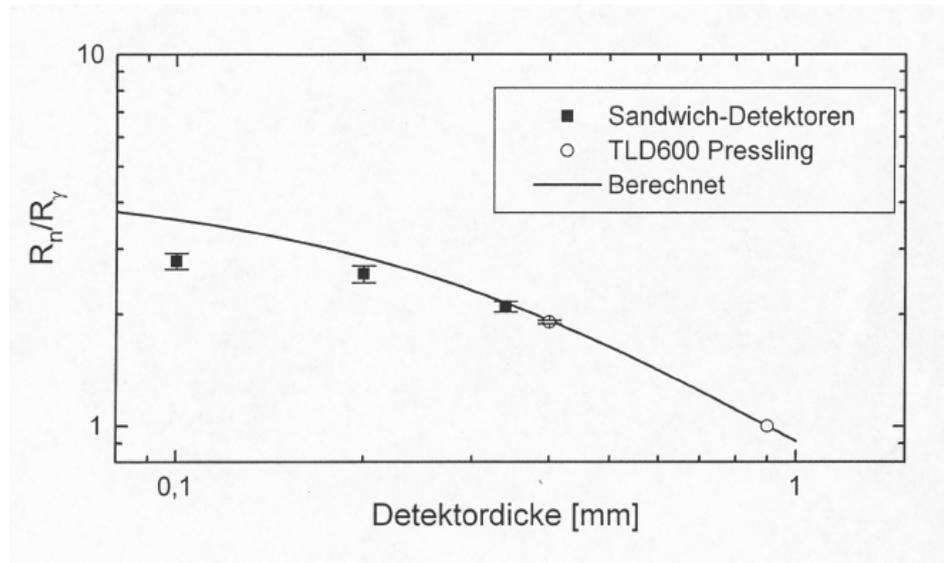


Abb. 8 Relatives Neutronenansprechvermögen $R_n/R_n(0,89)$ von ${}^6\text{LiF}$ -Detektoren verschiedener Dicke bezogen auf das Neutronenansprechvermögen eines Detektors der Dicke 0,89 mm [BUR92]

Die Dosis durch natürliche Strahlung spielte bei den hohen Dosen im Vorversuch keine Rolle. Zur Berechnung der Bestrahlungszeiten in der Testbestrahlung (siehe Kapitel 4.1.4) wurde der $\dot{H}_n^m(i)$ -Wert von 0,17 mSv/h für das Alnor-Dosimetriesystem herangezogen.

4 Testbestrahlung bei kleinen Dosen

4.1 Durchführung der Bestrahlung

4.1.1 Bestrahlungsumfang und Zeitplan

Entsprechend den zu erwartenden Nachweisgrenzen wurden Tiefen-Personendosen $H_p(10)$, von 25 μSv , 50 μSv und 75 μSv in Photonen-Neutronen-Mischstrahlungsfeldern gewählt, wobei der Anteil der Neutronen-Personendosis jeweils 0 %, 25 %, 50 %, und 100 % betrug. Zusammen mit der Gruppe zur Ermittlung der Dosis durch die natürliche Strahlung ergaben sich so 13 Bestrahlungsgruppen. Die Dosimeter der zuletzt genannten Gruppe werden üblicherweise Transportdosimeter genannt, da sich die Dosimeter während des Transportes von der Messstelle zum Anwender in Bereichen befinden, in denen der Messstelle die Dosisleistungen nicht bekannt sind. Das Wort Transport bezieht sich hier also nicht auf den *Transport* hochradioaktiver Abfälle. Die Dosiswerte dieser Gruppen sind in Tab. 5 in den Spalten mit der Überschrift Neutronen, Photonen und Gesamt angegeben. Die Gruppennummer wird bei der Ergebnisdarstellung in den darauffolgenden Kapiteln immer mitgeführt. Der Messwertanteil durch die Photonenstrahlung der ${}^{252}\text{Cf}$ -Quelle betrug in der Moderatoranordnung weniger als 2 % der Neutronenanzeige und wurde hier nicht berücksichtigt.

Für jede Bestrahlungsbedingung und zur Messung der natürlichen Umgebungsstrahlung wurden hier pro Dosimetriesystem eine Gruppe zu je 10 Detektorkarten eingesetzt.

Als minimale Umlaufzeit (Expositionszeitspanne) der Personendosimeter bei *Transporten* sind etwa 2 Wochen anzusehen. Mit den Erfahrungen des Vorversuchs entsprach dies auch der Zeitspanne, in der die Testbestrahlung durchgeführt werden konnte. Der Zeitplan, an den sich alle Messstellen hielten, ist in Tab. 4 wiedergegeben.

Tab. 4 Zeitplan der Testbestrahlung

Tag	Termine (1998)	Aufgabe
	Ab 13. Juli	Vorbereitung der Detektorkarten bei den Messstellen
0	Nacht 14./15. oder 15., Juli	Regenerierung der Detektorkarten
1	15. Juli	Versand
2	Spätestens am 16. Juli	Ankunft der Detektorkarten in Karlsruhe
3	17. Juli	Einteilung der Detektorkarten in Gruppen
6-10	20. Juli bis 24. Juli	Neutronen- und Photonenbestrahlung
10	24. Juli	Rückversand der Detektorkarten von Karlsruhe
13	27. Juli	Ankunft der Detektorkarten bei den Messstellen
15	29. Juli vormittags	Auswertung der Detektorkarten bei den Messstellen
	Summe der Tage: 15	entsprechend ca. 30 μSv natürliche Strahlung

Die in der Zeit zwischen Regenerierung und Auswertung der Detektoren akkumulierte Dosis durch die natürliche Strahlung wurde von jeder Messstelle mit einer Gruppe von Transportdosimeterkarten bestimmt (Gruppe 10 in Tab. 5). Für die auf 15 Tage festgesetzte Testbestrahlung war bei einer mittleren Dosisleistung von etwa 2 $\mu\text{Sv}/\text{Tag}$ eine Dosis durch natürliche Strahlung von 30 μSv zu erwarten.

4.1.2 Photonen

Die hier erforderlichen kleinen Dosiswerte erlaubten keine Bestrahlung unter den Routinebedingungen der Karlsruher Messstelle wie im Vorversuch, sondern es musste ein kollimiertes und kalibriertes ^{137}Cs -Strahlungsfeld mit einer Quelle niedrigerer Aktivität herangezogen werden. Der Abstand zur Quelle betrug 1,5 m, der Nutzstrahlenkegel hatte einen Durchmesser von 30 cm. Die Referenzdosisleistung von 0,1703 mSv/h basierte auf einer Messung mit einer bei der PTB kalibrierten Ionisationskammer. Die zehn Detektorkarten je einer Detektorkartengruppe wurden in Kontakt miteinander konzentrisch um die Bestrahlungssachse hinter einer Plexiglasabdeckung von 3 mm Dicke (Elektronen-Gleichgewichtsbedingungen) bestrahlt. Messgröße war die Photonen-Äquivalentdosis H_X . Die Bestrahlungsgeometrie blieb für alle Bestrahlungen unverändert. Die gewünschten Dosiswerte ergaben sich allein durch die Veränderung der Bestrahlungszeiten t_γ .

4.1.3 Neutronen

Zur Neutronenbestrahlung konnte die gleiche Kalibriereinrichtung wie für den Vorversuch verwendet werden. Die beim Vorversuch erforderliche Korrektur der Neutronenanzeige in Abhängigkeit vom Abstand zur Phantomachse konnte hier umgangen werden, indem man alle (NG)-Detektoren der verschiedenen Detektorkarten einheitlich in einem Abstand von 100 mm

von der Phantomachse positionierte (siehe Abb. 6 und Abb. 9). Das führte zu einer gleichwertigen Bestrahlung der Detektorpaare in den Positionen (i) und (a) in der Detektorkarte. In den Routineprogrammen der Messstellen wird im allgemeinen zur Dosisermittlung $H_n^m(i)$ zur Dosismessung und $H_n^m(a)$ nur zur Korrektur herangezogen. Die geänderte Anordnung der Dosimeterkarten ermöglichte wegen des höheren Platzbedarfs jeweils nur die gleichzeitige Bestrahlung der Dosimeterkarten eines Dosimetriesystems in einem Phantom. Unterschiedliche Neutronen-Personendosiswerte ergaben sich durch Variationen der Bestrahlungszeiten.

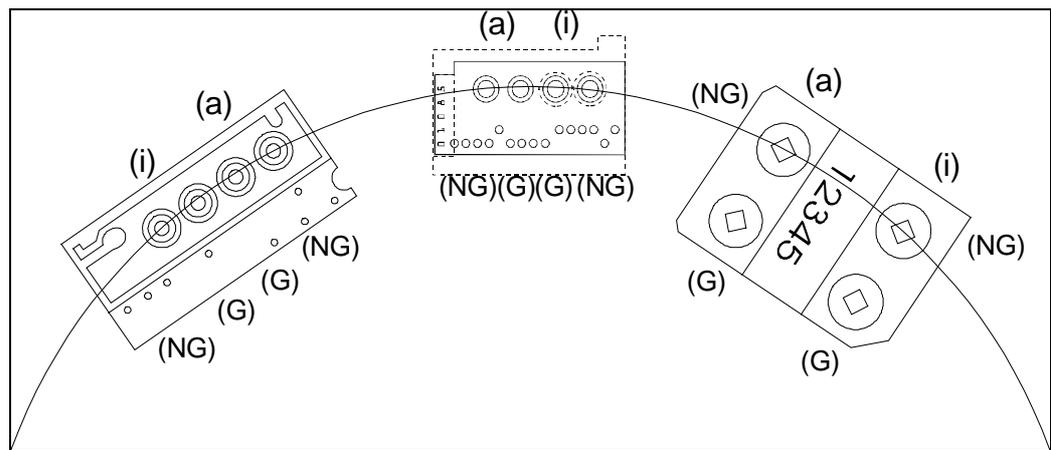


Abb. 9 Anordnung der (G)- und (NG)-Detektoren in den Detektorkarten der TL-Dosimetriesysteme Panasonic, Alnor und Harshaw (von links nach rechts) mit Kennzeichnung der zugehörigen Positionen (i) und (a) und des Radius von 100 mm in der PE-Scheibe für das Phantom

4.1.4 Bestrahlungszeiten

Die Bestrahlungszeiten für die gewünschten Photonendosen errechneten sich direkt aus der Referenzdosisleistung am Messort der Kalibriereinrichtung.

Ziel der Neutronenbestrahlung war es, eine Neutronenanzeige in Dosisseinheiten $H_n^m(i)$ zu erzeugen, die einer gewünschten Neutronen-Personendosis H_n im Neutronenstrahlungsfeld des Anwendungsbereiches N2 entspricht. Sie berechnet sich nach Gleichung (2.17) zu:

$$H_n^m(i) = \frac{H_n}{k_n \cdot k_{nr}} \quad (4.1)$$

Im Anwendungsbereich N2 ist nach Abb. 4 der für das Alnorsystem gültige Wert $k_n \cdot k_{nr} = 1,25$. Aus dem sich aus Gleichung (4.1) ergebenden $H_n^m(i)$ -Wert und dem in Kapitel 3.4 ermittelten $\dot{H}_n^m(i)$ -Wert von 0,17 mSv/h lassen sich für jede gewünschte Neutronen-Personendosis H_n im Anwendungsbereich N2 die Bestrahlungszeiten t_n bestimmen.

$$t_n = \frac{H_n^m(i)}{\dot{H}_n^m(i)} \quad (4.2)$$

Die Bestrahlungszeiten t_n und t_γ an der Neutronen- bzw. Photonenbestrahlungseinrichtung bei der Testbestrahlung sind in Tab. 5 angegeben und gelten einheitlich für alle Dosimetriesysteme.

Tab. 5 Bestrahlungszeiten für die Gruppen an der Neutronen- und Gammaquelle

Gruppe Nr.		Neutronen	Messwert	Bestr.-Zeit	Photonen	Bestr.-Zeit	Gesamt
		Dosis H_n μSv	$H_n^m(i)$ μSv	t_n s	Dosis H_γ μSv	t_γ s	Dosis $H_p(10)$ μSv
1		25	20	423	0	0	25
2		50	40	845	0	0	50
3		75	60	1268	0	0	75
4		0	0	0	25	152	25
5		0	0	0	50	304	50
6		0	0	0	75	456	75
7		12,5	10	211	12,5	76	25
8		25	20	423	25	152	50
9		37,5	30	634	37,5	228	75
10	BG	0	0	0	0	0	0
11		5	4	85	20	122	25
12		10	8	169	40	243	50
13		15	12	254	60	365	75

Die gleiche Neutronenbestrahlung führt bei den Dosimetriesystemen zu unterschiedlichen Neutronendosismesswerten, wie im praktischen Einsatz auch. Da aber die Detektorkarten von den Messstellen unter der Annahme einer Bestrahlung in der Albedokapsel in einem Strahlungsfeld des Anwendungsbereiches N2 routinemäßig ausgewertet und die entsprechenden Korrekturfaktoren k_{nr} angewandt wurden, ergaben sich für gleiche Bestrahlungen (Gruppen) auch vergleichbare Neutronen-Personendosen H_n .

4.2 Messergebnisse der Albedo-Dosimetriesysteme

4.2.1 Tabellen der Messergebnisse

Die Messstellen haben ihre Dosimeter routinemäßig ausgewertet und die Photonen-Personendosis H_γ , die Neutronen-Personendosis H_n und die Summe der beiden als Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ ermittelt. Dies erfolgte unter Verwendung der Korrekturfaktoren k_{nr} für das entsprechende Dosimetriesystem (Näherungswerte siehe Tab. 3) und $k_n=0,17$ für den Anwendungsbereich N2. Die entsprechenden Mittelwerte und Standardabweichungen der Messwerte der Dosimeter je einer Gruppe sind in Tabellen in Anhang A wiedergegeben. Die

Reihenfolge der Ergebnisdarstellung richtet sich hier nach der Dicke der Detektoren, Tab. A1 für die dicken, Tab. A2 für die dünnen LiF:Mg,Ti-Detektoren und Tab. A3 und Tab. A4 für die dünnen Li₂B₄O₇-Detektoren.

Die Ergebnisse des GSF/Panasonic-Systems waren zunächst nicht zufriedenstellend, da alle Neutronendosen im Mittel um 35% zu hoch angegeben wurden (Tab. A.3). Durch die nachträgliche Anwendung des einheitlichen Auswerteverfahrens mit den im Vorversuch gefundenen Faktoren (siehe Tab. 3, Panasonic Rn = 0,6) konnte diese Überbewertung korrigiert werden (Tab. A4). Jedoch sind die Standardabweichungen der Dosismittelwerte der einzelnen Gruppen deutlich höher als die aller anderen Dosimetriesysteme. Da dies von der GSF-Messstelle erwartet worden war, hatte sie Prototypen von Dosimetern des Systems GSF/Harshaw, das im Vorversuch noch nicht beteiligt war, zu den Testbestrahlungen zusätzlich eingeschickt.

Aufgrund dieses Sachverhaltes wurde festgelegt, dass das Messsystem GSF/Panasonic für die Verwendung bei *Transporten* ungeeignet ist und dort nicht mehr eingesetzt wird. Dieses Dosimetriesystem bleibt daher bei den folgenden Ergebnisbetrachtungen unberücksichtigt, d.h. alle weiteren Ergebnisse beruhen auf den Werten von Tab. A.1 und Tab. A.2.

An diesen von den Messstellen mitgeteilten Ergebnissen wurde grundsätzlich nichts mehr geändert, obwohl sich kleine Korrekturen nachträglich angeboten hätten und von den Messstellen auch begründbar gewesen wären. Damit wurden Routinebedingungen eingehalten.

Die Transportdosen durch natürliche Strahlung wurden unterschiedlich von den Messstellen berücksichtigt: durch Subtraktion des Mittelwertes der Photonendosis der Gruppen 1-3 (MPA), der Gruppe 10 (GSF, LPS, SSU) oder von 2 µSv/Tag mittlere Dosisleistung der natürlichen Strahlung und der Umlaufzeit wie in der Routineüberwachung (FZK).

4.2.2 Graphische Darstellung und Analyse der Messergebnisse

Die graphische Darstellung der Ergebnisse in den Abb. 10 bis Abb. 13 fasst jeweils auf einer Seite drei Gruppen mit dem gleichen Verhältnis von Neutronen- zu Photonen-Personendosis für Tiefen-Personendosen von 25 µSv, 50 µSv und 75 µSv zusammen. Abb. 10 enthält die Ergebnisse nach Bestrahlung nur mit Photonen, Abb. 11 nur mit Neutronen, Abb. 12 jeweils mit der halben Dosis durch Neutronen und Photonen und Abb. 13 schließlich mit 20 % Neutronen-Personendosisanteil. An den Bestrahlungen unter den Bedingungen von Abb. 13 hatten sich zwei Messstellen nicht beteiligt.

Der für höhere Referenzdosen übliche Quotient Messwert/Sollwert liefert bei sehr kleinen Dosiswerten keine vernünftige Aussage. Zur Bewertung der Ergebnisse der Testbestrahlungen im hier betrachteten niedrigen Dosisbereich ist es zweckmäßiger, den Absolutwert der Abweichung zwischen Mess- und Referenzwert (Sollwert) der Dosis aufzutragen.

In Abb. 10 bis Abb. 13 sind deshalb für jede Messstelle und Gruppe die mittlere Abweichung der jeweiligen Messwerte vom Referenzwert aufgetragen, und zwar jeweils für die Messung der Photonendosis, der Neutronen-Personendosis und der Tiefen-Personendosis (Summe aus Photonen- und Neutronen-Personendosis). Die Fehlerbalken geben die Standardabweichungen der Messwerte einer Gruppe wieder.

Pauschal lässt sich aus Abb. 10 bis Abb. 13 ableiten, dass für alle Bestrahlungsbedingungen (Gruppen) mit Gesamtdosen von 25 µSv und 50 µSv die mittlere Abweichung der Gruppen nicht mehr als 10 µSv beträgt. Bei Berücksichtigung der Bestrahlungen mit 75 µSv erreicht die Abweichung vom Referenzwert maximal 15 µSv. Dieser erhöhte Wert bei 75 µSv lässt sich aus dem zusätzlichen Beitrag der Messunsicherheit des Ansprechvermögens der Detekto-

ren zur Gesamt-Standardabweichung erklären, die etwa 5% beträgt. Bei 75 μSv entspricht dies etwa einem Dosiswert von 4 μSv , die die Schwankungen der Voranzeige der Detektoren merkbar überlagern. Diesen Maximalabweichungen vom Referenzwert steht ein Mittelwert aller Abweichungen für alle Systeme von weniger als 1,5 μSv bei einer Standardabweichung von 5 μSv gegenüber. Das Verhältnis dieser Standardabweichung von 5 μSv zur maximaler Abweichung von etwa 15 μSv deutet auf eine Normalverteilung hin.

Diese pauschalen Ergebnisse der Testbestrahlung gelten für die Photonen- und die Neutronen-Personendosis als auch für die im Strahlenschutz wesentliche Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ (Gesamtdosis). Sie bestätigen, dass bei den Dosimetriesystemen der Messstellen weder grobe Nichtlinearitäten noch Kalibrierfehler auftraten.

Im praktischen Einsatz interessiert die Messunsicherheit eines einzelnen Dosimeters. Die Abweichung der Messwerte innerhalb der Gruppen wird durch die Standardabweichung, in den Abbildungen als Fehlerbalken, wiedergegeben. Auch hier werden Einzelwerte von 15 μSv nicht überschritten

In Tab. 6 sind diese Standardabweichungen der Messwerte jeweils einer Gruppe zusammengefasst. Für eine Bestrahlungsbedingung wurden die gefunden Standardabweichungen der gemessenen Abweichungen vom Sollwert jeweils für Photonen, Neutronen und deren Summe für verschiedene Dosimetriesysteme gemittelt, einmal für dicke TL-Detektoren (MPA und FZK), für dünne TL-Detektoren (GSF, LPS und SSU) und für alle TL-Detektoren.

In Tab. 6 überrascht zunächst, dass die Standardabweichungen für die Tiefen-Personendosis geringer ist, als durch Fortpflanzung der Messunsicherheit des Photonen- und Neutronen-Personendosisanteils zu erwarten wäre. Dies hängt mit der Korrelation des Photonen-Personendosisanteils zusammen, der für die Neutronendosismessung subtrahiert und bei der Ermittlung der Tiefen-Personendosis wieder addiert wird. Die Berechnungen der Standardunsicherheiten geben diesen Sachverhalt noch deutlicher wieder (siehe Tab. 12).

In der letzten Zeile von Tab. 6 wird nochmals pauschal über alle Bestrahlungsbedingungen gemittelt und es beweist sich hier die Konsistenz der Daten. Die dicken TL-Detektoren zeigen tatsächlich in der Tendenz eine geringere Standardabweichung für die Photonen ($2,9 < 4,8$), die dünnen hingegen für die Neutronen ($5,0 < 6,1$), wie in den Kapiteln 2.6 und 3.4 erläutert wird.

Die Unterschiede sind aber sehr klein. Wesentlich ist, dass alle hier betrachteten Dosimetriesysteme im Mittel eine Standardabweichung von 5 μSv für die Ermittlung der Tiefen-Personendosis im Bereich kleiner Dosen unter 100 μSv aufweisen.

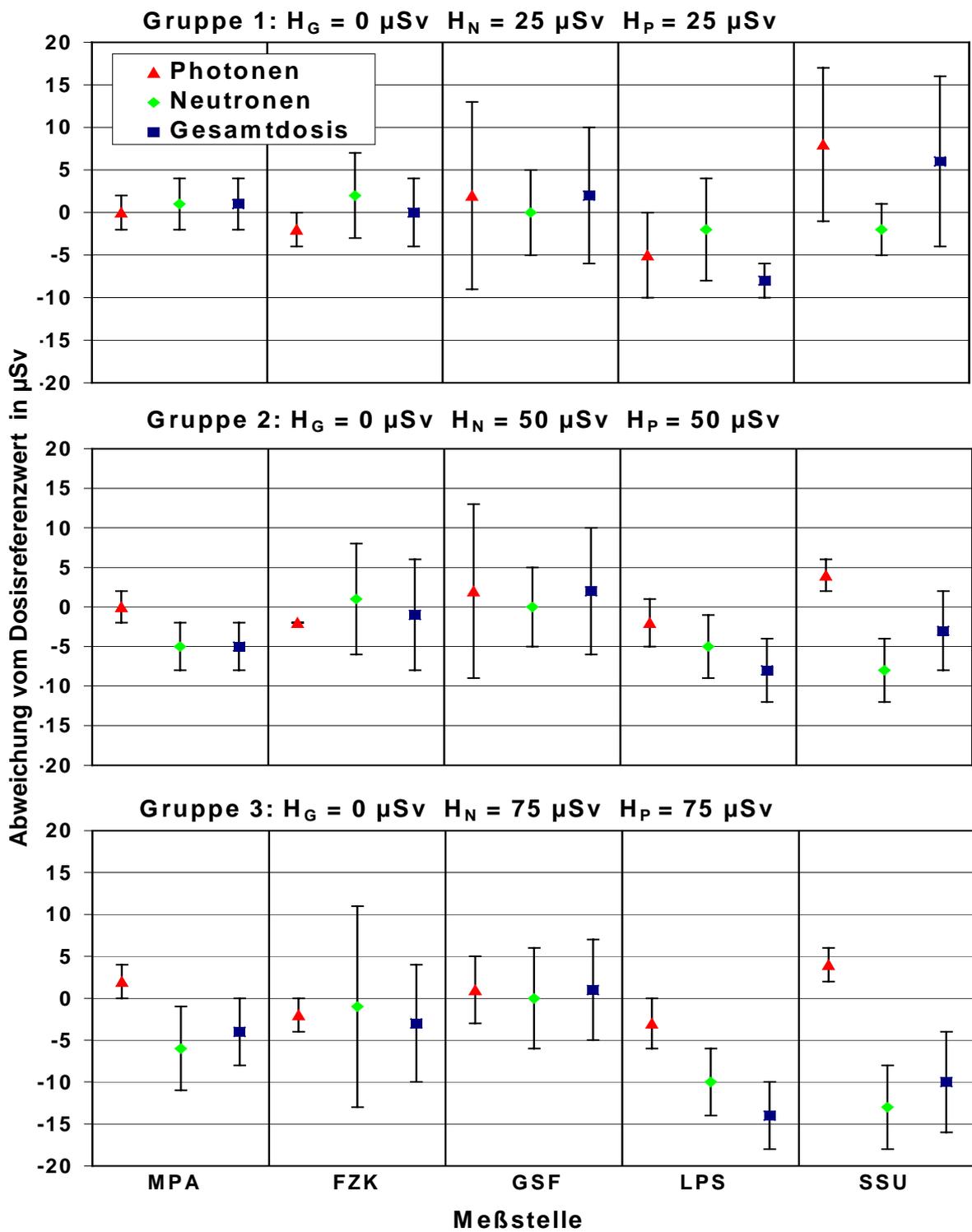


Abb. 10 Messergebnisse der Testbestrahlung mit ausschließlich Neutronen, Gruppe 1 - 3

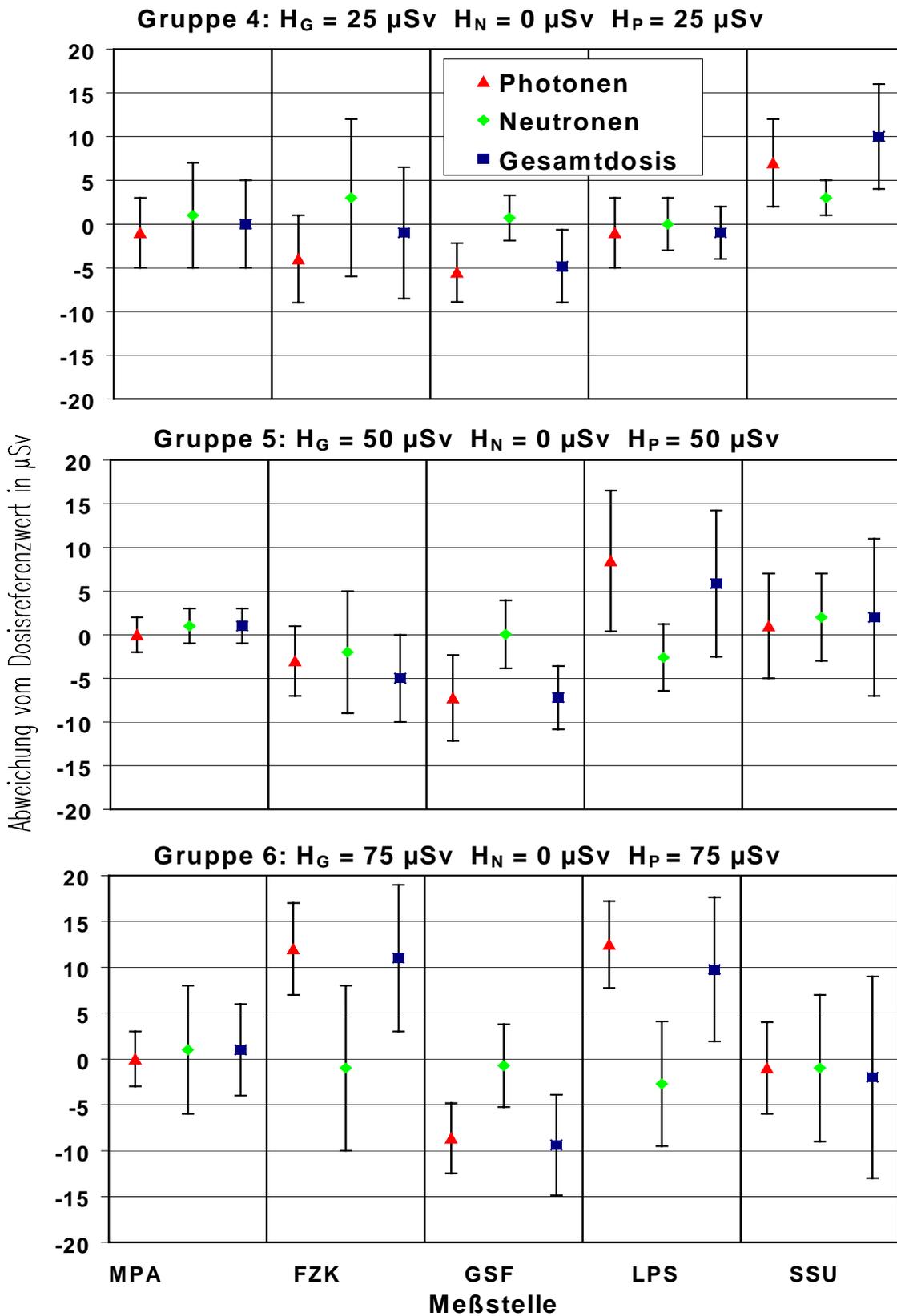


Abb. 11 Messergebnisse der Testbestrahlung mit ausschließlich Photonen, Gruppe 4 - 6

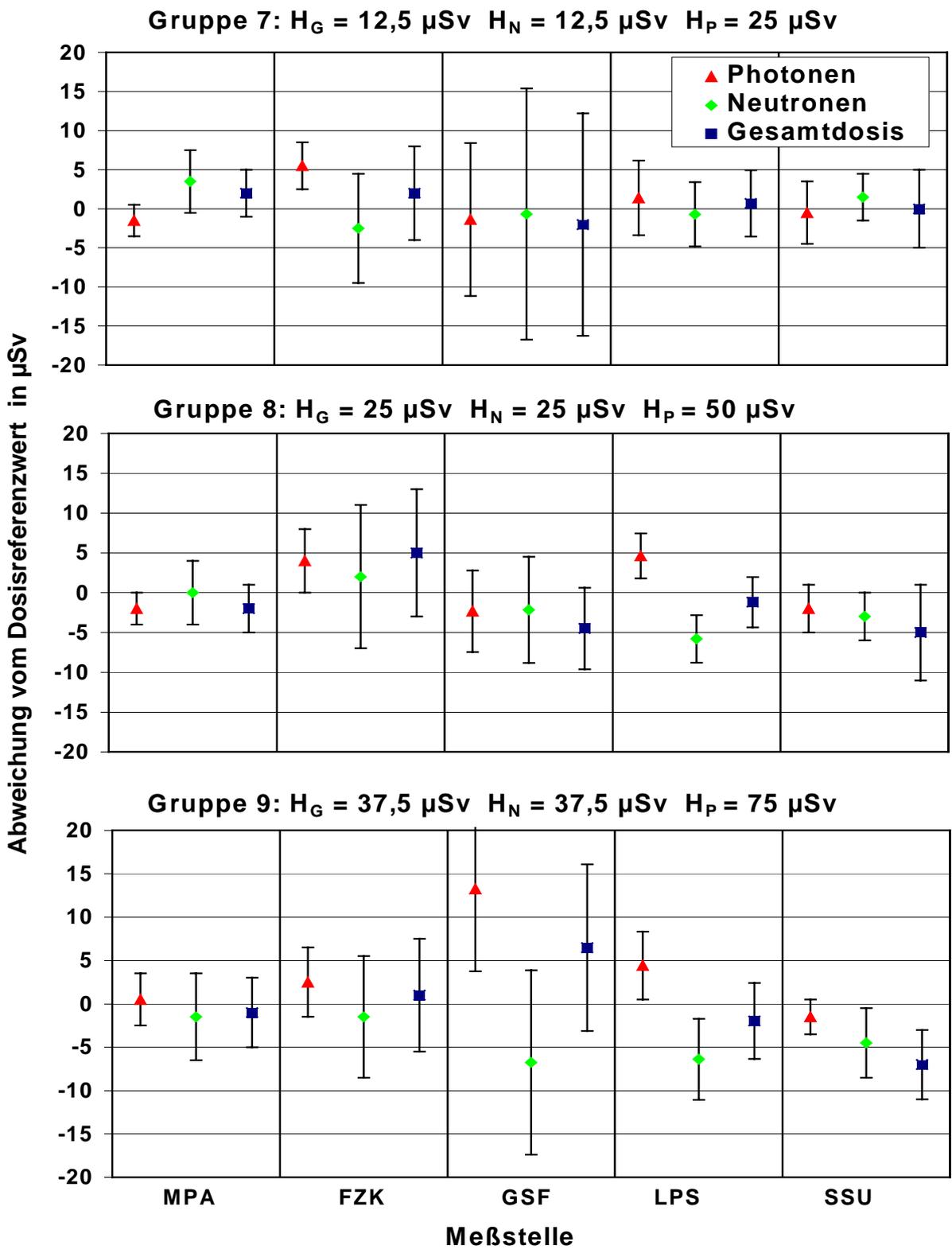


Abb. 12 Messergebnisse Testbestrahlung mit einem Dosisanteil von 50 % Photonen und 50 % Neutronen, Gruppe 7 - 9

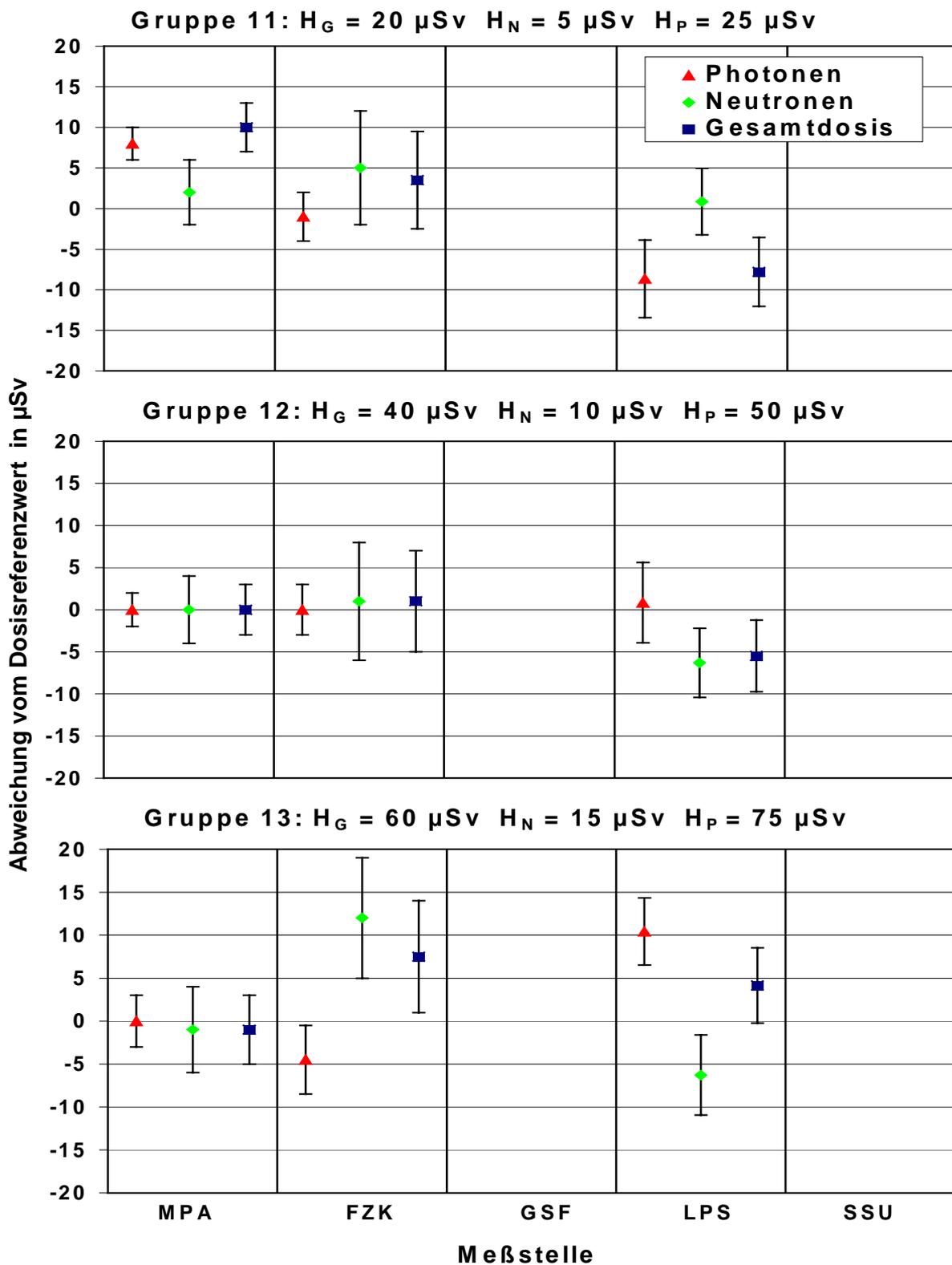


Abb. 13 Messergebnisse der Testbestrahlung mit einem Dosisanteil von 80 % Photonen und 20 % Neutronen, Gruppe 11 – 13

Tab. 6 Standardabweichungen der Messwerte innerhalb einer gleichbestrahlten Gruppe, gemittelt über die jeweils angegebenen Dosimetriesysteme

Gruppe	Dosis in μSv		Mittlere Standardabweichungen in μSv								
			MPA und FZK ¹⁾			GSF, LPS, SSU ²⁾			Alle		
	H_γ	H_n	H_γ	H_n	$H_p(10)$	H_γ	H_n	$H_p(10)$	H_γ	H_n	$H_p(10)$
1	0	25	1,8	4,0	3,0	8,2	4,5	6,6	5,6	4,3	5,2
2	0	50	1,0	5,0	4,8	2,0	2,9	3,5	1,6	3,7	4,0
3	0	75	1,8	8,5	5,3	3,0	5,0	5,3	2,5	6,4	5,3
4	25	0	4,5	7,5	6,3	4,1	2,5	4,4	4,3	4,5	5,1
5	50	0	3,0	4,5	3,5	6,3	4,2	7,0	5,0	4,3	5,6
6	75	0	4,0	8,0	6,5	4,5	6,4	8,1	4,3	7,1	7,5
7	12,5	12,5	2,5	5,5	4,5	6,2	7,7	7,8	4,7	6,8	6,5
8	25	25	3,0	6,5	5,5	3,6	4,2	4,8	3,4	5,1	5,1
9	37,5	37,5	3,5	6,0	5,3	5,1	6,4	6,0	4,5	6,3	5,7
10	0	0	3,0	5,5	4,0	2,9	2,8	4,4	3,0	4,2	4,2
11	20	5	3,5	6,5	5,3	4,0	6,1	4,0	3,8	6,3	4,6
12	40	10	2,0	5,0	4,8	6,4	5,8	7,3	4,6	5,5	6,3
13	60	15	4,0	7,0	5,8	5,6	6,2	7,3	4,9	6,5	6,7
Mittel			2,9	6,1	4,9	4,8	5,0	5,9	4,0	5,5	5,5

1) Dicke TL-Detektoren 2) Dünne TL-Detektoren

4.2.3 Zusammengefasste Ergebnisse der Testbestrahlung

Die Ergebnisse der Testbestrahlungen haben bewiesen, dass alle betrachteten Dosimetriesysteme in der Lage sind, Personendosen kleiner $100 \mu\text{Sv}$ für die erwarteten Photonen- und Neutronenanteile zuverlässig nachzuweisen.

Die gefundenen Abweichungen der gemittelten Messwerte einer Gruppe vom Sollwert zeigen eine Standardabweichung von etwa $5 \mu\text{Sv}$. Auch die Standardabweichung der Messwerte innerhalb einer Gruppe liegen im Mittel in diesem Bereich. Die Feinanalyse der Ergebnisse, die unterhalb dieser Standardabweichung $5 \mu\text{Sv}$ oder unterhalb der Maximalabweichungen von $15 \mu\text{Sv}$ Unterschiede in den Dosimetriesystemen und Bestrahlungsbedingungen aufzeigen könnten, sollte den jeweiligen Messstellen überlassen bleiben, die ihr Dosimetriesystem, d.h. ihre Auswerte-Geräte und -Verfahren am besten kennen.

Jedoch allein der Augenschein der Messergebnisse lässt die Aussage zu, dass ein einzelnes Albedodosimeter der betrachteten Dosimetriesysteme unter den gegebenen Bedingungen der Laborbestrahlung und der 2-wöchigen Laufzeit die Tiefen-Personendosis im Bereich von $20 \mu\text{Sv}$ bis $50 \mu\text{Sv}$ mit hoher Wahrscheinlichkeit nachweisen kann. In Kapitel 5 wird die genaue Ermittlung der Nachweisgrenzen mit den zur Verfügung stehenden wissenschaftlichen Methoden sowohl für die Laborbedingungen als auch für die Feldbedingungen beim praktischen Einsatz während eines *Transportes* durchgeführt.

5 Ermittlung der Nachweisgrenzen unter Labor- und Feldbedingungen

5.1 Schritte zur Ermittlung der Nachweisgrenze

Die Nachweisgrenze für die Tiefen-Personendosis wird in folgenden Schritten ermittelt (siehe auch Anhang B):

- Aufstellung der Modellfunktion, d.h. hier die Gleichung (2.24) zur Bestimmung der Tiefen-Personendosis.
- Ermittlung der Teilunsicherheiten mit Methoden des Typs A und B (Begriffe siehe Anhang B) für die Eingangsgrößen der Gleichung zur Bestimmung der Tiefen-Personendosis
- Ermittlung der Gesamt-Standardunsicherheit aus den Teilunsicherheiten. Hilfreich ist hier eine übersichtliche Tabelle der Unsicherheitsbeiträge der einzelnen Eingangsgrößen.
- Vergleich der gemessenen und berechneten Messunsicherheiten der Testbestrahlung zur Ermittlung der Teilunsicherheiten der Auswertung unter Laborbedingungen
- Ermittlung der Erkennungsgrenze und Nachweisgrenze auf der Grundlage der Gesamt-Standardunsicherheiten im Dosisbereich von $H_p(10) = 0$ und $H_p(10) >$ Erkennungsgrenze.

5.2 Gleichung der Dosisermittlung als Modellfunktion

Als Modellfunktion zur Ermittlung der Messunsicherheit der Tiefen-Personendosis liegt Gleichung (2.24) vor:

$$H_p(10) = H_n + H_\gamma = (k_{\gamma,E,\phi} - k_{n,E,\phi}) \cdot k_{\gamma,\text{lin}} \cdot H_j^m(G) + k_{n,E,\phi} \cdot k_{n,\text{lin}} \cdot H_k^m(\text{NG}) - k_{\gamma,E,\phi} \cdot \dot{H}_{\text{nat}}^m \cdot t_e \quad (5.1)$$

Die Messunsicherheit der Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ lässt sich nicht durch eine einfache Fehlerfortpflanzung der Messunsicherheiten des Photonen- und Neutronendosisanteils bestimmen, da der Messwert $H_j^m(G)$ sowohl bei der Bestimmung der Photonen- als auch Neutronen-Personendosis herangezogen wird (siehe Gleichung 2.20 und 2.23) und dadurch die Standardunsicherheiten der Neutronen-Personendosis und der Photonen-Personendosis korreliert sind. Deshalb dient für die Ermittlung der Messunsicherheit der Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ allein die Gleichung (5.1) als Modellfunktion.

Die Gesamt-Standardunsicherheit $u(H_p(10))$ ergibt sich nach DIN 25482-11 (siehe auch Anhang B) zu:

$$\begin{aligned} u^2(H_p(10)) = & u^2(k_{\gamma,E,\phi}) \cdot [k_{\gamma,\text{lin}} \cdot H_j^m(G) - \dot{H}_{\text{nat}}^m \cdot t_e]^2 + u^2(k_{n,E,\phi}) \cdot [k_{n,\text{lin}} \cdot H_k^m(\text{NG}) - k_{\gamma,\text{lin}} \cdot H_j^m(G)]^2 + \\ & u^2(k_{\gamma,\text{lin}}) \cdot [(k_{\gamma,E,\phi} - k_{n,E,\phi}) \cdot H_j^m(G)]^2 + u^2(H_j^m(G)) \cdot [(k_{\gamma,E,\phi} - k_{n,E,\phi}) \cdot k_{\gamma,\text{lin}}]^2 + \\ & u^2(k_{n,\text{lin}}) \cdot [k_{n,E,\phi} \cdot H_k^m(\text{NG})]^2 + u^2(H_k^m(\text{NG})) \cdot [k_{n,E,\phi} \cdot k_{n,\text{lin}}]^2 + u^2(\dot{H}_{\text{nat}}^m) \cdot [k_{\gamma,E,\phi} \cdot t_e]^2 + \\ & u^2(t_e) \cdot [k_{\gamma,E,\phi} \cdot \dot{H}_{\text{nat}}^m]^2 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Die Ermittlung der Unsicherheiten nach Gleichung (5.2) lässt sich in übersichtlicher Form tabellarisch (siehe Tab. 9) durchführen. Jedes Glied in Gleichung (5.2) steht für die Messunsicherheit einer Eingangsgröße und findet sich in einer Zeile der Tabelle wieder. Der Ausdruck in eckiger Klammer stellt den jeweiligen Sensitivitätskoeffizienten dar.

Zur Berechnung der Erkennungsgrenze wird die Messunsicherheit $u(H_p(10)=0)$ für $H_\gamma = H_n = H_p(10) = 0$ benötigt. Für $H_p(10) = 0$ ist $k_{\gamma, \text{lin}} \cdot H_j^m(G) = k_{n, \text{lin}} \cdot H_k^m(\text{NG}) = \dot{H}_{\text{nat}} \cdot t_e$. Damit entfallen die beiden ersten Glieder in Gleichung (5.2) und für $u(H_p(10)=0)$ gilt:

$$u^2(H_p(10)=0) = u^2(k_{\gamma, \text{lin}}) \cdot [(k_{\gamma, E, \phi} - k_{n, E, \phi}) \cdot H_j^m(G)]^2 + u^2(H_j^m(G)) \cdot [(k_{\gamma, E, \phi} - k_{n, E, \phi}) \cdot k_{\gamma, \text{lin}}]^2 + u^2(k_{n, \text{lin}}) \cdot [k_{n, E, \phi} \cdot H_k^m(\text{NG})]^2 + u^2(H_k^m(\text{NG})) \cdot [k_{n, E, \phi} \cdot k_{n, \text{lin}}]^2 + u^2(\dot{H}_{\text{nat}}) \cdot [k_{\gamma, E, \phi} \cdot t_e]^2 + u^2(t_e) \cdot [k_{\gamma, E, \phi} \cdot \dot{H}_{\text{nat}}]^2 \quad (5.3)$$

5.3 Ermittlung der Teil-Messunsicherheiten mit Typ A Methoden aus Messungen

Die zur Gesamt-Messunsicherheit der Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ beitragenden Teil-Messunsicherheiten $u(H_k^m(\text{NG}))$ und $u(H_j^m(G))$ werden durch eine statistische Auswertung von Messungen nach Typ A Methoden bestimmt. Dazu wird eine Gruppe von wenigstens $n=10$ Detektoren gleich behandelt und ausgewertet. Die Standardabweichung der n Dosis-messwerte dieser Gruppe ist dann repräsentativ für die empirische Standardunsicherheit einer Einzelmessung mit einem beliebigen Detektor aus der Gruppe.

Die Teil-Messunsicherheiten $u(H_k^m(\text{NG}))$ und $u(H_j^m(G))$ enthalten bereits die Teil-Messunsicherheiten der in Gleichung (2.8) herangezogenen Eingangsgrößen, wie die der subtrahierten Voranzeige $A_{0,j}$ und des individuellen Photonenkorrektionsfaktors k_j bzw. k_k . Die Teil-Messunsicherheit des Photonenkalibrierfaktors $N_{\gamma}(n)$ geht hingegen hier noch nicht ein. Die Teil-Messunsicherheiten $u(H_k^m(\text{NG}))$ lässt sich grundsätzlich nach Neutronen- und Photonenbestrahlung ermitteln. In der Praxis wird man die höhere der beiden für die Messunsicherheitsabschätzung verwenden.

Umfangreiche Ergebnisse eines europäischen Vergleichsprogramms [PIE80 und PIE84] haben gezeigt, dass es zur Ermittlung der Messunsicherheit $u(H_j^m(G))$ in Abhängigkeit vom Dosismesswert $H_j^m(G)$ in guter Näherung ausreichend ist, die Standardunsicherheit $u(H_j^m(u))$ für eine unbestrahlte Teilcharge (u) und die Standardunsicherheit $u(H_j^m(n))$ und den Mittelwert $\bar{H}_j^m(n)$ der Dosismesswerte für eine mit der Referenzdosis bestrahlten Teilcharge (n) jeweils aus der Charge (G) heranzuziehen. Die Teil-Messunsicherheit für eine beliebigen Dosismesswert $H_j^m(G)$ lässt sich dann wie folgt berechnen:

$$u(H_j^m(G)) = \sqrt{u^2(H_j^m(u)) + \left(\frac{u(H_j^m(n))}{\bar{H}_j^m(n)} \cdot H_j^m(G) \right)^2} \quad (5.4)$$

Analoges gilt für die Teil-Messunsicherheit $u(H_k^m(\text{NG}))$.

Die Teil-Messunsicherheiten $u(H_j^m(u))$ und $u(H_j^m(n))$ der (G)-Charge bzw. $u(H_k^m(u))$ und $u(H_k^m(n))$ der (NG)-Charge wurden aus den Testbestrahlungen (siehe Tab. 8) ermittelt. Im Dosisbereich der Testbestrahlung unter $100 \mu\text{Sv}$ bestimmt praktisch der $u(H_j^m(u))$ - bzw. $u(H_k^m(u))$ -Werte den $u(H_j^m(G))$ -Wert bzw. $u(H_k^m(\text{NG}))$ -Wert, wie man leicht durch Einsetzen in Gleichung (5.4) nachprüfen kann.

5.4 Abschätzung der Teil-Unsicherheiten mit Typ B Methoden

5.4.1 Allgemeines

Alle weiteren Teil-Standardunsicherheiten für die Gleichung (5.2) sind mit Typ B Methoden zu bestimmen, bei deren Ermittlung die Kenntnisse und Erfahrungen des Experimentators wesentlich mit eingehen (siehe Anhang B). Im folgenden wird die Abschätzung dieser Teil-Messunsicherheiten begründet.

5.4.2 Korrektionsfaktoren für Nichtlinearitäten der Dosismesswerte

Die Ergebnisse der Testbestrahlung lassen Nichtlinearitäten der Dosismesswerte H_k^m (NG) und H_j^m (G) nicht erkennen. Bei Dosismesswerten im Bereich kleiner 50 μSv gehen sie in der Messunsicherheit der Dosismesswerte unter, bei höheren Dosen werden sie mit maximal 10% angenommen, ein Wert, der bei ordentlich gewarteten Auswertegeräten erfahrungsgemäß unterschritten wird. Die Korrektionsfaktoren $k_{\gamma, \text{lin}}$ und $k_{n, \text{lin}}$ können deshalb gleich 1 gesetzt werden. Hier wurde eine relative Standardunsicherheit von 5% für die (G)-Detektoren und 3% für die (NG)-Detektoren angenommen. Wahrscheinlicher ist die gleiche Standardunsicherheit von 4% für beide Detektorchargen. Dies würde die im Kapitel 5 angegebenen Ergebnisse der Rechnungen nur um den unwesentlichen Betrag von etwa 0,5 μSv ändern. Die ursprünglich angenommenen Standardunsicherheiten wurden deshalb belassen.

5.4.3 Korrektionsfaktoren für Energie und Richtung

Den größten Beitrag zur Gesamt-Standardunsicherheit liefern die Korrektionsfaktoren für Energie und Richtung. Die Korrektionsfaktoren $k_{\gamma, E, \phi}$ und $k_{n, E, \phi}$ für Photonen bzw. Neutronen berücksichtigen die Energie- und die Richtungsabhängigkeit kombiniert, da die Richtungsabhängigkeit im allgemeinen auch von der Energie der Strahlung abhängt. Zur Abschätzung dieser Teil-Messunsicherheit wird in Tab. 7 die Energie- und Richtungsabhängigkeit zunächst getrennt betrachtet. Dazu wurden neben der bekannten Energieabhängigkeit des Albedodosimeters für Photonen [BUR95] (siehe Abb. 14) und Neutronen [PIE88] insbesondere Ergebnisse von Phantommessungen mit Albedodosimetern an Strahlungsfeldern einiger *Transportbehälter* und Lagerbehälter in der Asse, in Gorleben und in Ahaus herangezogen [LUS95, LUS96, RIT98].

Maßgebend für die Standardunsicherheiten dieser Korrektionsfaktoren ist die Richtungsabhängigkeit. Im ungünstigsten Fall der Bestrahlung von hinten wurden bei den o.g. Untersuchungen an *Transportbehältern* relative Ansprechvermögen des Albedodosimeters, bezogen auf frontale Einstrahlung, von 0,33 für Neutronen und 0,42 für Photonen gefunden. Aus diesen Werten ergibt sich der Bereich der Maximalwerte der Korrektionsfaktoren der Richtungsabhängigkeit $k_{n, \phi}$ für Neutronen und $k_{\gamma, \phi}$ für Photonen in Zeile 2 und der Mittelwerte in Zeile 3 der Tab. 7.

Die entsprechenden Werte von $k_{n, E}$ für den Anwendungsbereich N2 sind aus Abb. 3 in [PIE88] entnommen, die Ergebnisse von Feldkalibrierungen in verschiedenen Anlagen des gesamten Brennstoffkreislaufes enthält. Messungen an einem *Transportbehälter* [LUS96] haben jedoch für $k_{n, E}$ einen deutlich kleineren Wert von 0,44 außerhalb des Bereiches 0,9 bis 1,6 ergeben. Dementsprechend wurde für den abgeschätzten Korrektionsfaktor $k_{n, E, \phi}$ der Wert 2 aus der Richtungsabhängigkeit übernommen und nicht weiter erhöht – entsprechend einem

Mittelwert von $k_{n,E} = 1$ statt 1,25. Außerdem sind bei Neutronenbestrahlungen größere Werte für $H_p(10)$ im Vergleich $H'(10)$ zu erwarten (siehe Einleitung). Die bisherigen Kalibrierungen bezogen sich auf $H'(10)$.

Tab. 7 Detaillierte Abschätzung der Eingangswerte $k_{\gamma,E,\phi}$ und $k_{n,E,\phi}$ und ihrer Standardunsicherheiten

	$k_{n,\phi}$	$k_{n,E}$	$k_{\gamma,\phi}$	$k_{\gamma,E}$
Bereich (a. bis a+)	1 bis 3	0,9 bis 1,6	1 bis 2,4	0,6 bis 1
Mittelwert	2	1,25 (1)	1,7	0,8
Maximale Abweichung vom Mittelwert	± 1	$\pm 0,35$	$\pm 0,7$	$\pm 0,2$
Rechteckverteilung	$\pm 0,58$	$\pm 0,20$	$\pm 0,4$	$\pm 0,12$
Dreieckverteilung	$\pm 0,41$	$\pm 0,14$	$\pm 0,28$	$\pm 0,08$
Abgeschätzte Korrekturfaktoren	$k_{n,E,\phi} \pm u(k_{n,E,\phi})$ $2 \pm 0,5$		$k_{\gamma,E,\phi} \pm u(k_{\gamma,E,\phi})$ $1,5 \pm 0,3$	

Der Bereich für $k_{\gamma,E}$ kann z.B. aus Abb. 14 entnommen werden, wobei zur Zeit noch die Energieabhängigkeit von H_x (siehe Kapitel 1) herangezogen werden sollte.

Mit der maximalen Abweichung vom Mittelwert (Zeile 4) wird nach den im Anhang B angegebenen Verfahren die Standardunsicherheit bei einer Rechteckverteilung (Zeile 5) und bei einer Dreieckverteilung (Zeile 6) berechnet.

Bei der Energieabhängigkeit ist eine Dreiecksverteilung anstelle der Rechtecksverteilung wahrscheinlicher [AMB99]. Auch die Richtungsabhängigkeit tendiert zur Dreiecksverteilung, wenn das Begleitpersonal häufiger neben dem *Transportbehälter* läuft, d.h. vorwiegend seitwärts bestrahlt wird, und nicht ständig mit dem Rücken zum Behälter steht. Bei Seitwärtseinstrahlung ist die Richtungsabhängigkeit geringer als bei Rückwärtseinstrahlung.

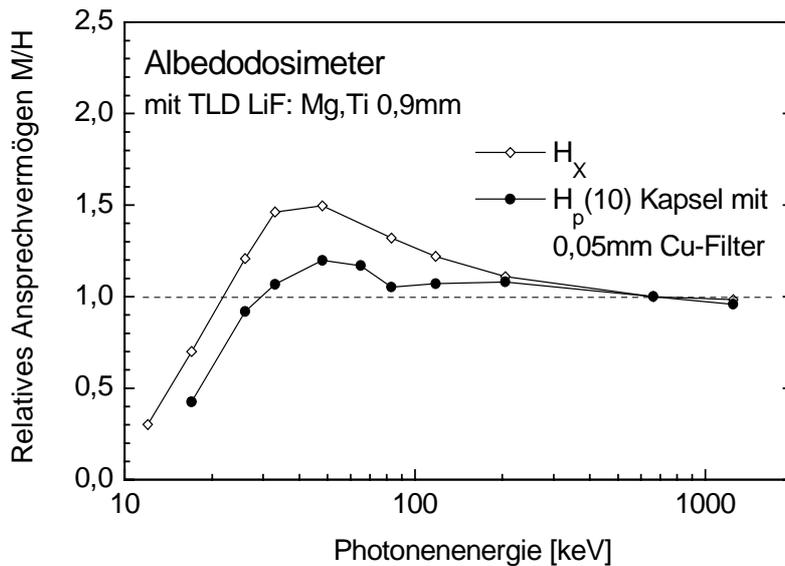


Abb. 14 Photonenenergieabhängigkeit des Albedodosimeters Typ Alnor

Mit diesen Überlegungen wurden die Korrekturfaktoren zu $k_{\gamma,E,\phi} = 1,5 \pm 0,3$ und $k_{n,E,\phi} = 2 \pm 0,5$ abgeschätzt (Zeile 7). Bei Verwendung dieser Werte wird die gemessene Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ innerhalb der Messunsicherheit bei Einstrahlung von vorn überbewertet und bei Einstrahlung von hinten unterbewertet. Die mit Gleichung (5.3) nicht explizit berücksichtigte Teil-Unsicherheit für den Photonenkalibrierfaktor $N_{\gamma}(n)$ von wenigen Prozent ist hier in $k_{\gamma,E,\phi}$ enthalten.

Unter Laborbedingungen (wie z.B. bei der Testbestrahlung) ist die Energie und Richtung der Strahlung festgelegt. Zur Berechnung der Gesamt-Standardunsicherheit werden hier die Werte $k_{\gamma,E,\phi} = 1 \pm 0,02$ und $k_{n,E,\phi} = 1,25 \pm 0,02$ verwendet. Die Standardunsicherheiten berücksichtigen hier nach Gleichung (2.18) die Standardunsicherheit von $N_{\gamma}(n)$.

5.4.4 Natürliche Strahlung

Der zu subtrahierende Dosisanteil durch die **natürliche Strahlung** wird im allgemeinen über die Abschätzung einer mittleren Dosisleistung \dot{H}_{nat}^m und deren Standardunsicherheit $u(\dot{H}_{\text{nat}}^m)$ in der Umlaufzeit t_e der Dosimeter ermittelt. Der \dot{H}_{nat}^m -Wert von $(2 \pm 0,5) \mu\text{Sv}/\text{Tag}$ beruht auf langjährigen Messungen der Messstellen mit ihren Albedodosimetern. Ist die Dosisleistung an den Lagerorten unbekannt oder liegt u.U. jedes Dosimeter an einem anderen Lagerort (z.B. zu Hause beim Anwender), dann können keine verlässlichen Aussagen über \dot{H}_{nat}^m für das Einzeldosimeter gemacht werden und die Standardunsicherheit ist entsprechend hoch anzusetzen. Sie lässt sich durch gemeinsames Lagern der Dosimeter und Messung der Ortsdosis mit zusätzlichen Albedodosimetern als Ortsdosimeter verringern. Die Standardunsicherheit $u(\dot{H}_{\text{nat}}^m)$ bei kontrollierbaren Laborbedingungen kann deutlich geringer abgeschätzt werden. Hier wird ein Dosisleistungswert von $\dot{H}_{\text{nat}}^m = (2 \pm 0,1) \mu\text{Sv}/\text{Tag}$ verwendet.

5.4.5 Umlaufzeit

Die Standardunsicherheit $u(t_e)$ der **Umlaufzeit** t_e spielt bei der Ermittlung der Gesamt-Standardunsicherheit keine große Rolle. Unter Berücksichtigung der Regenerierung der Detektoren, die über Nacht geschehen kann, ergibt sich eine Standardunsicherheit von etwa einem Arbeitstag gleich 8 Stunden gleich 0,3 Tage - auch unter Laborbedingungen.

5.4.6 Zusammenfassung der Eingangswerte für Labor- und Feldbedingungen

Die Eingangswerte und ihre Standardunsicherheiten für die Labor- und Feldbedingungen, die in den vorangegangenen Kapiteln abgeschätzt wurden, sind in Tab. 8 zusammengefasst. Sie enthält alle Eingangswerte, die zur Ermittlung der Unsicherheit für eine Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ nach Gleichung (5.2) benötigt werden.

Tab. 8 Zusammenstellung der Eingangswerte zur Berechnung der Standardunsicherheit unter Labor- und Feldbedingungen

Größe X	Unsicherheit $u(X_i)$	Laborbedingungen		Feldbedingungen	
		Schätzwert x_i	Unsicherheit $u(x_i)$	Schätzwert x_i	Unsicherheit $u(x_i)$
$k_{\gamma,E,\phi}$	$u(k_{\gamma,E,\phi})$	1	0,02	1,5	0,3
$k_{n,E,\phi}$	$u(k_{n,E,\phi})$	1,25	0,02	2	0,5
\dot{H}_{nat}^m	$u(\dot{H}_{nat}^m)$	2 $\mu\text{Sv/d}$	0,1 $\mu\text{Sv/d}$	2 $\mu\text{Sv/d}$	0,5 $\mu\text{Sv/d}$
t_e	$u(t_e)$	15 d	0,3 d	Wie Laborbedingungen	
$k_{\gamma,lin}$	$u(k_{\gamma,lin})$	1	0,05		
$k_{n,lin}$	$u(k_{n,lin})$	1	0,03		
$H_j^m(G)^{1)}$ $H_k^m(NG)^{1)}$	$u(H_j^m(u))$		4 μSv		
	$u(H_k^m(u))$		4 μSv		
	$\frac{u(H_j^m(n))}{\bar{H}_j^m(n)}$		0,035		
	$\frac{u(H_k^m(n))}{\bar{H}_k^m(n)}$		0,025		

1) Diese Teil-Messunsicherheiten werden in Gleichung (5.3) zur Ermittlung von $u(H_k^m(NG))$ und $u(H_j^m(G))$ verwendet.

5.5 Ermittlung der Gesamt-Unsicherheit

Die Ermittlung der Gesamt-Standardunsicherheit der Tiefen-Personendosis nach Gleichung (5.2) erfolgt zweckmäßigerweise in einer übersichtlichen tabellarischen Form. Ein Beispiel für eine derartige Bilanz der Unsicherheiten unter Verwendung der im vorherigen Kapitel abgeschätzten Teil-Unsicherheiten wird in Tab. 9 gegeben. Die Zahlenwerte gelten für ein Albedodosimeter bei 15 Tagen Umlaufzeit und 80% Neutronenanteil unter Verwendung der in Tab. 8 abgeschätzten Teil-Standardunsicherheiten unter Feldbedingungen.

Die ersten beiden Spalten enthalten die Formelzeichen der Eingangsgrößen und die dazugehörigen Schätzwerte bzw. in der letzten Zeile das Ergebnis für $H_p(10)$. Zur Ermittlung der Gesamt-Standardunsicherheit für einen bestimmten *Transport* sind vorab entsprechend dem Neutronen- zu Photonen-Dosisverhältnis die Dosisanteile H_n und H_γ zu bestimmen. Daraus lassen sich die zu erwartenden Dosismesswerte H_j^m (G) und H_k^m (NG) mit den entsprechend umgeformten Gleichungen (2.20) und (2.23) und den Schätzwerten in Tab. 8 unterer Teil und der Gleichung (5.4) berechnen. Der hier beispielhaft verwendete Wert von $H_p(10) = 48,2 \mu\text{Sv}$ ergibt sich aus der Rechnung in Kapitel 5.7 könnte aber auch das Ergebnis einer Bestrahlung sein.

In der dritten Spalte von Tab. 9 stehen die abgeschätzten Standardunsicherheiten, wobei in der letzten Spalte angegeben ist, ob die Typ A- oder Typ B- Methode zur Ermittlung der Teil-Standardunsicherheiten angewandt wurde.

Die vierte Spalte gibt den Sensitivitätskoeffizienten an, der ein Maß für die Änderung der Ergebnisgröße (hier $H_p(10)$) bei Änderung der jeweiligen Eingangsgröße ist. Sie ergeben sich aus der partiellen Ableitung der entsprechenden Eingangsgröße nach der Ergebnisgröße in der Modellfunktion als Gleichung (5.2) und sind in Gleichung (5.3) als Faktor nach jeder Teil-Unsicherheit aufgeführt.

Tab. 9 Beispiel einer tabellarischen Zusammenstellung zur Ermittlung der Standardunsicherheit für $H_p(10)$ unter Feldbedingungen gemäß Gl. (5.2) , weitere Bedingungen siehe Text

Größe	Eingangswert	Standardmessunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Methode zur Bestimmung der Unsicherheit
$k_{\gamma,E,\phi}$	1,5	0,3	6,4 μSv	1,92 μSv	Typ B
$k_{n,E,\phi}$	2,0	0,5	19,25 μSv	9,6 μSv	Typ B
$k_{\gamma,\text{lin}}$	1,0	0,05	-18,2 μSv	-0,9 μSv	Typ B
H_j^m (G)	36,4 μSv	4,3 $\mu\text{Sv}^{1)}$	-0,5	-2,1 μSv	Typ A
$k_{n,\text{lin}}$	1,0	0,03	111,3 μSv	3,3 μSv	Typ B
H_k^m (NG)	55,7 μSv	4,9 $\mu\text{Sv}^{1)}$	2	9,8 μSv	Typ A
\dot{H}_{nat}^m	2 $\mu\text{Sv/d}$	0,5 $\mu\text{Sv/d}$	22,5 d	11,3 μSv	Typ B
t_e	15 d	0,3 d	3 $\mu\text{Sv/d}$	0,9 μSv	Typ B
$H_p(10)$	48,2 μSv	—	—	18,3 μSv	

1) Berechnet nach Gleichung (5.4)

Multipliziert man den Sensitivitätskoeffizienten von Spalte 4 mit der Standardunsicherheit von Spalte 3, erhält man den Unsicherheitsbeitrag in Spalte 5. In diesem Beispiel sind die Unsicherheitsbeiträge von $k_{n,E,\phi}$, H_k^m (NG) und \dot{H}_{nat}^m für die Gesamt-Standardunsicherheit maßgebend. Diese ist in der letzten Zeile dieser Spalte angegeben und berechnet sich aus der

Wurzel der Quadratsumme der Unsicherheitsbeiträge. Kleinere Unsicherheitsbeiträge haben daher nur einen geringen Einfluss auf das Ergebnis.

Zur Berechnung der Erkennungsgrenze muss die Standardmessunsicherheit des Dosimetrie-systems $u(H_p(10) = 0)$ nach Gleichung (5.3) bestimmt werden. Die Ergebnisse einer solchen Berechnung für die in Tab. 8 angegebenen Eingangswerte unter Feldbedingungen sind in Tab. 10 zusammengestellt.

Tab. 10 Ermittlung der Messunsicherheit für $H_p(10) = 0$ unter Feldbedingungen nach Gleichung (5.3)

Größe	Eingangswert	Standardmessunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Methode zur Bestimmung der Unsicherheit
$k_{\gamma,lin}$	1,0	0,05	-15 μSv	-0,8 μSv	Typ B
H_j^m (G)	30 μSv	4,2 $\mu\text{Sv}^{1)}$	-0,5	-2,1 μSv	Typ A
$k_{n,lin}$	1,0	0,03	60 μSv	1,8 μSv	Typ B
H_k^m (NG)	30 μSv	4,4 $\mu\text{Sv}^{1)}$	2	8,9 μSv	Typ A
\dot{H}_{nat}^m	2 $\mu\text{Sv/d}$	0,5 $\mu\text{Sv/d}$	22,5 d	11,3 μSv	Typ B
t_e	15 d	0,3 d	3 $\mu\text{Sv/d}$	0,9 μSv	Typ B
$H_p(10)$	0 μSv	—	—	14,6 μSv	

1) Berechnet nach Gleichung (5.4)

5.6 Vergleich der berechneten und gemessenen Standardunsicherheiten unter Laborbedingungen

Berechnet man, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, die Gesamt-Standardunsicherheit von $H_p(10)$ für alle Testbestrahlungen unter Verwendung der Eingangswerte in Tab. 8 für Laborbedingungen, erhält man die Werte in der letzten Spalte von Tab. 11. Sie werden in der vorletzten Spalte den Messergebnissen der Testbestrahlung von Tab. 6 gegenübergestellt. Die tendenziell gute Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Standardabweichungen für $H_p(10)$ zeigt, dass die verwendete Modellfunktion mit den geschätzten Eingangswerten die Eigenschaften der eingesetzten Dosimetriesysteme gut widerspiegelt und unter allen Umständen einen konservativen Wert der Standardunsicherheit liefert.

Zur Ermittlung der Nachweisgrenzen des Albedodosimeters unter Einsatzbedingungen bei *Transporten* wird im nächsten Kapitel die Standardunsicherheit von $H_p(10)$ nach dem gleichen Verfahren, jedoch mit den Daten aus Tab. 8 für die Feldbedingungen bestimmt.

Tab. 11 Gegenüberstellung der bei der Testbestrahlung gemessenen und der mit der Modellfunktion berechneten Standardunsicherheiten $u(H_p(10))$ der Tiefen-Personendosen unter Laborbedingungen

Gruppe	Referenzdosis			Neutronen- dosisanteil	$u(H_p(10))$	
	H_γ μSv	H_n μSv	$H_p(10)$ μSv		Messung ¹⁾ μSv	Rechnung μSv
1	0	25	25	100	5,2	6,6
2	0	50	50	100	4,0	7,4
3	0	75	75	100	5,3	8,3
4	25	0	25	0	5,1	6,8
5	50	0	50	0	5,6	7,9
6	75	0	75	0	7,5	9,2
7	12,5	12,5	25	50	6,5	6,7
8	25	25	50	50	5,1	7,6
9	37,5	37,5	75	50	5,7	8,6
10	0	0	0	0	4,2	6,0
11	20	5	25	20	4,6	6,8
12	40	10	50	20	6,3	7,8
13	60	15	75	20	6,7	8,9
				Mittel	5,5	7,6

1) Aus Tab. 6 letzte Spalte

Die Messergebnisse in Tab. 6 haben im Mittel eine höhere Standardunsicherheit für die Neutronen-Personendosis als für die Tiefen-Personendosis gezeigt. Die Rechnungen nach der Modellfunktion Gleichung (5.2) geben dies noch deutlicher in Tab. 12 wieder und bestätigen damit auch die Richtigkeit der Modellfunktion. Man erkennt in Gleichung (5.3), dass die Messunsicherheit der Photonenmessung $u(H_j^m(G))$ im Fall $k_{\gamma,E,\phi} = k_{n,E,\phi}$ sich formal nicht mehr auf die Unsicherheit von $H_p(10)$ auswirkt. Sie ist in $H_j^m(NG)$ enthalten.

Tab. 12 Berechnete Standardunsicherheiten unter Laborbedingungen für die Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ und ihrer Photonen- und Neutronen-Personendosisanteile

Gruppe	Referenzdosis			Rechnung		
	H_γ μSv	H_n μSv	$H_p(10)$ μSv	$u(H_\gamma)$ μSv	$u(H_n)$ μSv	$u(H_p(10))$ μSv
1	0	25	25	4,8	8,8	6,6
2	0	50	50	4,8	9,7	7,4
3	0	75	75	4,8	10,8	8,3
4	25	0	25	5,5	9,6	6,8
5	50	0	50	6,6	11,5	7,9
6	75	0	75	7,9	13,6	9,2
7	12,5	12,5	25	5,1	9,2	6,7
8	25	25	50	5,5	10,5	7,6
9	37,5	37,5	75	6,1	12,0	8,6
10	0	0	0	4,8	8,1	6,0
11	20	5	25	5,4	9,4	6,8
12	40	10	50	6,2	11,0	7,8
13	60	15	75	7,1	12,9	8,9
			Mittel	5,7	10,5	7,6

5.7 Ermittlung der Nachweisgrenzen

Das Verfahren zur Ermittlung der Nachweisgrenze soll am Beispiel der Exposition eines Albedodosimeters für 15 Tage Umlaufzeit und 80% Neutronenanteil erläutert werden. Die Ergebnisse dieses Beispiels und die Nachweisgrenzen für weitere Expositionsszenarien und Dosimetriesysteme sind in Tab. 14 zusammengefasst.

Zur Berechnung der Nachweisgrenze von $H_p(10)$ muss zunächst die Erkennungsgrenze $H_p(10)^*$ (der Stern kennzeichnet hier die Erkennungsgrenze und bedeutet kein Hinweis auf die Ortsdosisgröße $H^*(10)$) nach folgender Gleichung (siehe Anhang B) bestimmt werden:

$$H_p(10)^* = 1,645 \cdot u(H_p(10)=0) \quad (5.5)$$

Tab. 10 liefert nach Gleichung (5.3) mit den Eingangswerten $H_\gamma = H_n = H_p(10) = 0$ die Standardmessunsicherheit $u(H_p(10)=0) = 14,6 \mu\text{Sv}$ und damit eine Erkennungsgrenze $H_p(10)^*$:

$$H_p(10)^* = 1,645 \cdot 14,6 \mu\text{Sv} = 24,1 \mu\text{Sv}. \quad (5.6)$$

Die Nachweisgrenze δ_p^* für $H_p(10)$ errechnet sich nach folgender Gleichung (siehe Anhang B):

$$\delta_p^* = H_p(10)^* + 1,645 \cdot u(\delta_p^*) \quad (5.7)$$

Die Gleichung (5.7) kann zweckmäßigerweise durch eine Iteration mit dem Anfangswert für die Standardmessunsicherheit bei der Nachweisgrenze von $u(\delta_p^*) = u(2 H_p(10)^*) = u(48,2 \mu\text{Sv})$ gelöst werden. Der $H_p(10)$ -Wert von $48,2 \mu\text{Sv}$ teilt sich entsprechend dem Neutronen-Personendosisanteil von 80 % auf in $H_\gamma = 9,6 \mu\text{Sv}$ und $H_n = 38,6 \mu\text{Sv}$. Mit diesen Werten errechnet sich nun in Tab. 9 eine Standardmessunsicherheit $u(\delta_p^*) = 18,3 \mu\text{Sv}$ und nach Gleichung (5.7) eine Nachweisgrenze δ_p^* für $H_p(10)$ von:

$$\delta_p^* = 24,1 \mu\text{Sv} + 1,645 \cdot 18,3 \mu\text{Sv} = 54 \mu\text{Sv}. \quad (5.8)$$

Auf einen weiteren Iterationsschritt konnte verzichtet werden, da sich das Ergebnis nur noch etwa um $1 \mu\text{Sv}$ ändert. Nach dem gleichen Verfahren wurden alle anderen in Tab. 14 angegebenen Nachweisgrenzen ermittelt.

In DIN 25482-11 [DIN00] wird ein Verfahren zur Ermittlung der Nachweisgrenze angegeben, das auf der linearen Interpolation der Messunsicherheit zwischen $u(H_p(10)=0) = u(0)$ und $u(H_p)$ für einen bestimmten gemessenen Tiefen-Personendosiswert $H_p > H_p(10)^*$. Gleichung (5.7) erweitert sich dann zu:

$$\delta_p^* = H_p(10)^* + 1,645 \cdot \sqrt{u^2(0) \cdot (1 - \delta^* / H_p) + u^2(H_p) \cdot (\delta^* / H_p)} \quad (5.9)$$

Auch diese Gleichung lässt sich durch Iteration lösen. Für $H_p = 40 \mu\text{Sv}$ wird gemäß Gleichung (5.2) ein Wert $u(H_p) = 17,4 \mu\text{Sv}$ erwartet. Mit dem gleichen Anfangswert $\delta_p^* = 48,2 \mu\text{Sv}$ wie für Gleichung (5.5) errechnet sich die Nachweisgrenze nach Gleichung (5.9):

$$\delta_p^* = 24,1 + 1,645 \cdot \sqrt{(14,6)^2 \cdot (1 - 48,2/40) + (17,4)^2 \cdot (48,2/40)} = 53,5 \mu\text{Sv} \quad (5.10)$$

Schon nach 3 Iterationsschritten ändert sich das Ergebnis um weniger als $0,1 \mu\text{Sv}$, liegt dann bei $54,0 \mu\text{Sv}$ und stimmt somit gut überein mit der nach Gleichung (5.5) ermittelten Nachweisgrenze. Dieses Verfahren, wenn die Anwendbarkeit geprüft ist, lässt die Iterationen mit geringerem Rechenaufwand zu.

5.8 Ermittlung der Nachweisgrenzen für andere Dosimeter

Die Ermittlung der Nachweisgrenzen für andere Dosimeter als Albedodosimeter ist nicht Gegenstand dieses Berichtes und soll nur wegen der Analogie des Verfahrens und der Vergleichbarkeit der Ergebnisse angedeutet werden.

Für den Einsatz elektronischer Photonen-Personendosimeter unter Verwendung eines bekannten Verhältnisses von Photonen- zu Neutronen-Personendosis lässt sich die Nachweisgrenze für die Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ mit der Modellfunktion entsprechend folgender Gleichung berechnen:

$$H_p(10) = k_{\gamma,E,\phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}} \cdot H_\gamma^m (1 + H_n / H_\gamma) \quad (5.11)$$

Die Abschätzung der Messunsicherheiten der Eingangswerte wurde konservativ vorgenommen. Grundsätzlich wurden Rechteckverteilungen angenommen.

Bei den hier betrachteten kleinen Dosen bestimmt insbesondere die übliche Schrittweite von $1 \mu\text{Sv}$ die Messunsicherheit der Anzeige. Hier wurde eine Standardmessunsicherheit von $0,58 \mu\text{Sv}$ angenommen.

Erheblichen Einfluss hat die Richtungsabhängigkeit. Nimmt man für Einstrahlung von hinten ein relatives Photonenansprechvermögen von nur 25 % gegenüber Bestrahlung von vorn an, dann entspricht dies einem Korrektionsfaktor $k_{\gamma,E,\phi} = 2,5$ mit einer Maximalabweichung von $\pm 1,5$ und bei Rechteckverteilung mit einer Standardunsicherheit von $\pm 0,72$. Eine konservativ angenommene Energieabhängigkeit von maximal $\pm 0,3$ ergibt bei einer Rechteckverteilung die Standardunsicherheit von $\pm 0,17$, die sich durch Fehlerfortpflanzung zu einer Standardunsicherheit von $\pm 0,75$ für den Korrektionsfaktor für Energie und Richtung $k_{\gamma,E,\phi}$ addiert.

Der Korrektionsfaktor $k_{\gamma,\text{lin}} = 1$ soll hier eine maximale Abweichung von $\pm 0,35$ entsprechend einer Standardunsicherheit von $\pm 0,2$ besitzen, um der Statistik von kleinen Impulszahlen der üblichen GM-Zählrohre bei geringen Dosen Rechnung zu tragen. Auch diese Annahme ist konservativ.

Die Standardunsicherheit des vor dem Einsatz abzuschätzenden Dosisverhältnisses H_n/H_γ (hier $0,25 \pm 0,125$) trägt zur Standardunsicherheit von $H_p(10)$ erst bei einem höheren Neutronen-Personendosisanteil wesentlich bei.

Eine tabellarische Zusammenstellung der Unsicherheiten für ein Strahlungsfeld mit 20 % Neutronenanteil ist in Tab. 13 für eine angenommene Anzeige des Dosimeters von $0,95 \mu\text{Sv}$ wiedergegeben. Die Ergebnisse fließen in Tab. 15 ein.

Tab. 13 Ermittlung der Standardunsicherheit für $H_p(10)$ auf der Grundlage des Modells nach Gleichung (5.11) für ein elektronisches Photonen-Personendosimeter, Bedingungen im Text

Größe	Eingangswert	Standardmessunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Bemerkung
$k_{\gamma,E,\phi}$	2,5	0,75	$1,2 \mu\text{Sv}$	$0,89 \mu\text{Sv}$	Typ B Rechteckverteilung
$k_{\gamma,\text{lin}}$	1	0,2	$3,0 \mu\text{Sv}$	$0,59 \mu\text{Sv}$	
H_γ^m	$0,95 \mu\text{Sv}$	$0,58 \mu\text{Sv}$	3,13	$1,80 \mu\text{Sv}$	
H_n/H_γ	0,25	0,125	$2,38 \mu\text{Sv}$	$0,297 \mu\text{Sv}$	
$H_p(10)$	$2,97 \mu\text{Sv}$	—	—	$2,1 \mu\text{Sv}$	

Die Ermittlung der Nachweisgrenze erfolgt gemäß Kapitel 5.7. Die dazu erforderliche Standardunsicherheit bei der Dosis $H_p(10) = 0 \mu\text{Sv}$ erhält man mit Hilfe von Tab. 13, jedoch mit $H_\gamma^m = 0$. Das Ergebnis von $1,8 \mu\text{Sv}$ führt zu einer Erkennungsgrenze von $3 \mu\text{Sv}$. In Tab. 13 wird für $H_p(10) = 2,97 \mu\text{Sv}$ die Standardunsicherheit zu $2,1 \mu\text{Sv}$ ermittelt. Die Nachweisgrenze entsprechend Gleichung (5.7) errechnet sich dann zu $6,5 \mu\text{Sv}$ und aufgerundet zu $7 \mu\text{Sv}$. Für einen Neutronenanteil von 80 % liegt der Wert bei $31 \mu\text{Sv}$. Diese Nachweisgrenzen (vergleiche Tab. 15) gelten für ein elektronisches Photonen-Personendosimeter, dessen Messwert wegen der starken Richtungsabhängigkeit mit dem Faktor 2,5 zu multiplizieren ist.

Auch die weiteren Werte in Tab. 15 sind analog nach diesem Verfahren berechnet worden.

6 Zusammenstellung der Nachweisgrenzen

6.1 Vorgehensvarianten beim Einsatz von Personendosimetern

Folgende Vorgehensvarianten, die Tiefen-Personendosis im gemischten Photonen-Neutronenstrahlungsfeld von einem oder mehreren *Transportbehältern* zu bestimmen, werden betrachtet:

- 1) Messung der Photonen- und der Neutronen-Personendosis,
- 2) Messung der Photonendosis und rechnerische Ermittlung der Neutronen-Personendosis unter Berücksichtigung eines für den jeweiligen *Transport* repräsentativen Photonen-zu-Neutronen-Ortsdosisleistungsverhältnisses,
- 3) Messung der Neutronen-Personendosis und rechnerische Ermittlung der Photonendosis unter Berücksichtigung eines für den jeweiligen *Transport* repräsentativen Photonen-zu-Neutronen-Ortsdosisleistungsverhältnisses.

Vorgehensvariante 1 ist naheliegend. Jedoch ist messtechnisch die Photonendosimetrie der Neutronendosimetrie überlegen, worauf Vorgehensvariante 2 beruht. Bei der Messung sehr kleiner Dosiswerte trägt die örtlich unterschiedliche natürliche Strahlung insbesondere zur Photonendosis bei, weshalb Vorgehensvariante 3 unter Umständen die besseren Ergebnisse liefern könnte.

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Erreichbare Nachweisgrenzen

Die erreichbaren Nachweisgrenzen für die Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ bei verschiedenen Vorgehensvarianten in Abhängigkeit von der Umlaufzeit und dem Neutronen-Personendosisanteil sind in Tab. 14 wiedergegeben.

6.2.2 Der Einfluss der natürlichen Strahlung

Sobald zur Tiefen-Personendosisermittlung ein photonenempfindlicher Detektor eingesetzt wird, entweder ausschließlich wie in **Vorgehensvariante 2** oder zusätzlich wie in **Vorgehensvariante 1**, muss der Dosisanteil der natürlichen Umgebungsstrahlung auf der Basis von Messwerten (Transportdosimetern) korrigiert werden. Er hat hier einen großen Einfluss auf die erreichbare Nachweisgrenze der Tiefen-Personendosis. Die Umlaufzeit des Dosimeters beinhaltet die Zeiten für die Vorbereitung der Dosimeter, den Transport von der Messstelle zum Einsatzort und zurück, für ihre Lagerung und für den Einsatz am *Transportbehälter*. Dabei werden die Dosimeter durch die ortsabhängige, natürliche Umgebungsstrahlung unterschiedlich exponiert. Tab. 14 zeigt, dass eine Verlängerung der Umlaufzeit von 15 Tagen auf 30 Tage die Nachweisgrenze relevant erhöht, sobald photonenempfindliche Dosimeter eingesetzt werden. Dabei sind folgende Bedingungen günstig für die Nachweisgrenze:

- möglichst kurze Umlaufzeit,
- geringe und für alle Dosimeter einheitliche, gut bekannte Dosis durch die natürliche Umgebungsstrahlung sowie
- geringer Neutronenanteil im Strahlungsfeld der *Transportbehälter*.

Tab. 14 Erreichbare Nachweisgrenzen für unterschiedliche Varianten bei der Messung der Tiefen-Personendosis in gemischten Photonen-Neutronenstrahlungsfeldern an *Transportbehältern*

Nr.	Vorgehensvariante	Nachweisgrenze für $H_p(10)$ in μSv			
		15 Tage		30 Tage	
	Umlaufzeit				
	Neutronenanteil an $H_p(10)$	20 %	80 %	20 %	80 %
1	Messung der Photonen- und der Neutronen-Personendosis mit einem Albedodosimeter				
	Photonen- und neutronenempfindliches $^6\text{LiF} / ^7\text{LiF}$ -Dosimeter	53	54 ¹⁾	91	93
	<i>Zum Vergleich: Für Photonen und Neutronen empfindliches $^6\text{LiF} / ^7\text{LiF}$-Dosimeter bei definierten Laborbedingungen</i>	21	20	-	-
2	Messung der Photonendosis und rechnerische Ermittlung der Neutronendosis				
	Beispiel: $^7\text{LiF}:\text{Mg}, \text{Ti}$ -Detektoren	75	299	99	409
	Beispiel: Flachglasdosimeter	49	203	74	303
3	Messung der Neutronen-Personendosis und rechnerische Ermittlung der Photonendosis				
	Photonen-unempfindliches Neutronendosimeter (Beispiel Kernspurätzdetektor mit (n, α)-Konverter, bei den Messstellen zur Zeit nicht verfügbar)	67	16	67	16

1) Die Ermittlung dieses Wertes wird als Beispiel ausführlich in Kapitel 5 erläutert.

6.2.3 Einsatz ausschließlich photonenempfindlicher Dosimeter

In der **Vorgehensvariante 2** wird der Neutronen-Personendosisanteil aus der gemessenen Netto-Photonendosis (natürliche Strahlung ist subtrahiert) und dem ortsdosimetrisch bestimmten Verhältnis der Photonen- zur Neutronen-Personendosis ermittelt. Im angenommenen Extremfall von 80% Neutronen-Personendosisanteil ist die Photonendosis und ihre Messunsicherheit mit dem Faktor 4 zu multiplizieren. Dies führt unter Berücksichtigung der abgeschätzten Messunsicherheit von 50 % für das Neutronen-/Photonendosisverhältnis zwangsläufig auch zu hohen Messunsicherheiten der Tiefen-Personendosis.

Für die Ermittlung der Nachweisgrenzen der Photonendosimeter wurden als Beispiele die Messunsicherheiten für ^7LiF -Detektoren (wie im Albedodosimeter) und des Flachglasdosimeters herangezogen. Trotz der besseren dosimetrischen Eigenschaften des Flachglasdosimeters ist die damit erreichbare Nachweisgrenze nur wenig niedriger. Hier zeigt sich der große Einfluss der natürlichen Umgebungsstrahlung.

6.2.4 Einsatz ausschließlich neutronenempfindlicher Dosimeter

Ein ausschließlich neutronenempfindliches Festkörperdosimeter für die Vorgehensvariante 3 ist ein Albedodosimeter, das an Stelle der TL-Detektoren Kernspurätzdetektoren im Kontakt mit einem (n, α)-Konverter verwendet. (siehe Kapitel 2.6). Das Verfahren wurde schon versuchsweise eingesetzt [HOF89], steht aber zur Zeit bei den Messstellen für den Einsatz nicht zur Verfügung. Die Berechnungen der Nachweisgrenzen in Tab. 14 beruht auf den damaligen Erfahrungen.

Ein solcher photonenunempfindlicher Neutronendetektor wäre geeignet, die Tiefen-Personendosis über das Neutronen-/Photonendosisverhältnis ausreichend empfindlich und unabhängig von der Umlaufzeit zu bestimmen, da die natürliche Umgebungsstrahlung in diesem Fall keine Rolle spielt.

Kernspurätzdetektoren ohne (n, α)-Konverter und Kernspurfilm sind wegen ihrer Energieschwelle bei etwa 2 MeV für den Einsatz an den hier diskutierten *Transportbehältern* ungeeignet.

6.2.5 Einsatz von Albedodosimetern

Beim Einsatz von Albedodosimetern für die Vorgehensvariante 1 entfällt die rechnerische Ermittlung der Neutronen-Personendosis aus der Photonendosis und dem ortsdosimetrisch ermittelten Photonen-zu-Neutronen-Dosisverhältnis. Damit wird das Verfahren auch unabhängig von schwankenden Photonen-zu-Neutronen-Dosisverhältnissen z. B. bei einem Konvoi-*Transport* mehrerer Behälter. Die ersten beiden bei der Vorgehensvariante 2 genannten Bedingungen sind auch für das Albedodosimeter gültig. Bei einer Dosimeterumlaufzeit von der Ausgabe bis zur Auswertung von 30 Tagen ergibt sich nahezu unabhängig vom Neutronanteil eine Nachweisgrenze von etwa 100 μ Sv.

Vergleicht man die unterschiedlichen Vorgehensvarianten 1, 2 und 3 einschließlich der dazugehörigen Dosimetriesysteme, so ist unter Berücksichtigung der gegenwärtigen Möglichkeiten bei den Messstellen die erreichbare Nachweisgrenze für die Messung der Photonen- und der Neutronen-Personendosis mit einem Albedodosimeter am niedrigsten.

6.3 Einsatz von direktanzeigenden Personendosimetern

Direktanzeigende Personendosimeter sind elektronische Geräte, die eine Dosisleistung oder eine über eine bestimmte Zeitspanne integrierte Dosis unmittelbar anzeigen können. Der Träger des Dosimeters wird so in die Lage versetzt, jederzeit die aktuelle Dosis (-leistung) abzulesen. Diese Geräte benötigen eine elektrische Energieversorgung (Batterie), die die Betriebszeit des Messgerätes zeitlich begrenzt.

Auch in diesem Fall sind die unterschiedlichen Vorgehensvarianten grundsätzlich möglich (Tab. 15). Je nach Art des verwendeten elektronischen Detektors sind diese Geräte in der Lage, eine Photonen- und/oder Neutronen-Personendosis (-leistung) zu messen. Direktanzeigende Neutronendosimeter, die zur Messung einer Tiefen-Personendosis eingesetzt werden können, sind derzeit noch in der Entwicklung [ALB98].

Tab. 15 Erreichbare Nachweisgrenzen für elektronische direktanzeigende Dosimeter bei der Messung der Tiefen-Personendosis in gemischten Photonen-Neutronen-Strahlungsfeldern bei *Transportbehältern*

Nr.	Vorgehensvariante	Nachweisgrenze für $H_p(10)$ bei einer Expositionszeit von ca. 0,2 d und einem Neutronenanteil von	
		20%	80%
1	Messung der Photonen- und der Neutronen-Personendosis	z. Z. nicht verfügbar	
2	Messung der Photonendosis und rechnerische Ermittlung der Neutronen-Personendosis	7 μ Sv	31 μ Sv
3	Messung der Neutronen-Personendosis und rechnerische Ermittlung der Photonendosis	z. Z. nicht verfügbar	

Vorteilhaft bei einem Einsatz von elektronischen Verfahren ist die Möglichkeit, das Dosimeter nur für die interessierende Zeitspanne einschalten zu können. Die bei der Messung mit Festkörperdosimetern über die gesamte Umlaufdauer integrierte natürliche Photonendosis als Störgröße für die Ermittlung einer kleinen Dosis entfällt. Dies führt zu den niedrigen Nachweisgrenzen.

Die fehlende Prüfung auf ausreichende Störfestigkeit gegen elektromagnetische Felder (z. B. Sprechfunkgerät oder Handy) trotz Bauartzulassung für Photonen, die Möglichkeit von technischem Ausfall während des Einsatzes und von Bedienungsfehlern durch die zu überwachende Person lässt diese Geräte derzeit noch als ungeeignet für die vorliegende Messaufgabe erscheinen.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Beim *Transport* von abgebrannten Brennelementen und von Glaskokillen mit hochradioaktivem Abfall auf der Straße und Schiene, hier kurz als *Transport* bezeichnet, wird für die beteiligten Einsatzkräfte von Polizei und Bundesgrenzschutz die Dosis durch Neutronen- und Photonenstrahlung mit Albedodosimetern gemessen, mit denen sowohl die Photonen- als auch Neutronen-Personendosiskomponente ermittelt werden kann. Diese Dosimeter werden von den nach Landesrecht zuständigen Messstellen ausgegeben, sind durch die PTB für die Verwendung in Photonenstrahlungsfeldern bauartzugelassen, sind nach Zustimmung durch den zuständigen Länderausschuss amtliche Dosimeter für Photonen- und Neutronenstrahlungsfelder und nehmen erfolgreich an den jährlichen Vergleichsbestrahlungen für Photonen und Neutronen teil.

Bisher konnten mit den Albedodosimetern bei den genannten Einsatzkräften keine individuellen Strahlenexpositionen gemessen werden. In der amtlichen Dosimetrie beruflich strahlenexponierter Personen wird die Dosis in Schritten von 0,2 mSv gerundet, d.h. in den hier diskutierten Fällen würde die Personendosis auf kleiner 0,2 mSv festgelegt. Für eine realistischere Abschätzung der individuellen Personendosen in diesem Dosisbereich wird deshalb der Wert für die Nachweisgrenze benötigt.

Die Nachweisgrenze der Personendosisbestimmung beruht auf der Bestimmung der Gesamtmessunsicherheit und setzt sich aus Anteilen zusammen, die sich einerseits auf das verwendete Dosimetriesystem und andererseits auf die Expositionsbedingungen beim *Transport* zurückführen lassen.

Zur Ermittlung der Nachweisgrenzen unter Laborbedingungen wurde am Forschungszentrum in Karlsruhe in Zusammenarbeit mit der PTB und dem BfS eine Testbestrahlung aller von den Messstellen eingesetzten Albedodosimetertypen im Bereich kleiner Dosen durchgeführt. Die Summen der Photonen- und Neutronen-Personendosen (Tiefen-Personendosen) betragen 25 μ Sv, 50 μ Sv und 75 μ Sv in Photonen-Neutronen-Mischstrahlungsfeldern, mit einem Anteil der Neutronen-Personendosis von jeweils 0 %, 25 %, 50 %, und 100 %.

Die Ergebnisse der unter Laborbedingungen und mit 2-wöchiger Umlaufzeit durchgeführten Testbestrahlungen haben gezeigt, dass die betrachteten Dosimetriesysteme in der Lage sind, die erwarteten Neutronen/Photonenanteile an der Dosis mit einer maximalen Unsicherheit von $\pm 15 \mu$ Sv zu messen. Bei Ortsdosismessungen an vielen *Transportbehältern* lag in der Regel der Neutronendosisanteil an der Gesamtdosis im Bereich zwischen 20 % und 80 %. Die Nachweisgrenze für die Tiefen-Personendosis unter Laborbedingungen wurde zu 20 μ Sv und zu 21 μ Sv bei einem Neutronendosisanteil 20 % bzw. 80 % an der Personendosis errechnet.

Zur Ermittlung der Nachweisgrenze unter den Bedingungen des *Transportes* flossen die Erfahrungen der bereits durchgeführten *Transporte*, Messungen der Messstellen, der PTB und des BfS an *Transportbehältern*, Daten der unter Laborbedingungen durchgeführten Bauartprüfungen, Ergebnisse der Vergleichsmessungen bei der PTB und nicht zuletzt die Ergebnisse der Testbestrahlung ein. Berücksichtigt wurden die Einflüsse auf die Messunsicherheit durch:

- die Trageweise der Dosimeter und die zu erwartenden Richtungen des Strahleneinfalls,
- die Energieabhängigkeit der Albedodosimeter für Photonen und Neutronen und die zu erwartenden Variationen der Neutronenspektren,
- das Verhältnis der Photonen- zur Neutronen-Personendosis,
- die örtlichen und zeitlichen Schwankungen der natürlichen Strahlung.

Die Berechnungen nach den Methoden, die sich aktuell und ausführlich in DIN 1319-3, DIN 25483-10 und DIN 25483-11 finden, ergaben Nachweisgrenzen mit einem Vertrauensniveau von 95% von 54 μ Sv und 93 μ Sv für eine Überwachungszeit von 15 bzw. 30 Tagen.

Die ermittelten Nachweisgrenzen sind deshalb in jedem Fall kleiner als der von der SSK Arbeitsgruppe „Messung der Personendosen im Bereich niedriger Dosen“ empfohlene Richtwert von 100 μ Sv.

Zur Sicherstellung, dass dieser Richtwert für den Schwankungsbereich aller hier aufgeführten Einflüsse auf die Messunsicherheit bei *Transporten*, wie z.B. Strahleneinfall von hinten, nicht überschritten wird, benutzen die Messstellen für die Auswertung von Albedodosimetern bei *Transporten* höhere Korrekturfaktoren für Energie und Richtung als in der Routineüberwachung im Strahlenschutz.

Die Berechnungen haben jedoch auch gezeigt, dass für die Einhaltung des Richtwertes beim Einsatz von Albedodosimetern zur Personendosismessung einige, die richtige Handhabung betreffende Voraussetzungen zu beachten sind:

1. Die einheitliche Trageposition des Dosimeters am Rumpf vorne auf Brusthöhe mit der richtigen Orientierung des Dosimeters zum Körper muss in jedem Fall eingehalten werden.
2. Die Umlaufzeit, d.h. die Zeit zwischen Ausgabe und Auswertung der Dosimeter durch die Messstellen darf keinesfalls 30 Tage überschreiten. Sie sollte jedoch so kurz sein, wie aus logistischen Gründen machbar.
3. Dosimeter, die nicht beim Einsatz getragen wurden, sollen als solche gekennzeichnet und an die Messstelle zusammen mit den benutzten Dosimetern zurückgegeben werden, da die Messstelle auf diese Weise eine genauere Berücksichtigung der natürlichen Umgebungsstrahlung vornehmen kann.

Zum Vergleich zeigt dieser Bericht auch die analoge Vorgehensweise zur Ermittlung der Nachweisgrenze für direktanzeigende, elektronische Personendosimeter.

In Zukunft wäre es vorstellbar, diese als Alternative zum Albedodosimeter einzusetzen, wenn

- sie nach jeweils der Entwicklung vorausschauenden Anforderungen hinsichtlich ihrer elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) und ihrer dosimetrischen Eigenschaften durch die PTB bauartgeprüft sind,
- diese einer regelmäßigen unabhängigen Qualitätskontrolle unterliegen und
- der Aufwand für die Beschaffung in großer Stückzahl sowie für Wartung und Instandhaltung in angemessenem Verhältnis zum strahlenschutzmäßigen Nutzen bleibt.

Bis dahin wird von den Messstellen zur Messung der Tiefen-Personendosis des Begleitpersonals das Albedodosimeter bei *Transporten* eingesetzt.

Danksagung

Die Autoren danken insbesondere allen Mitarbeitern der S-116 Arbeitsgruppe, die mit Ihren Diskussionsbeiträgen zu den Ergebnissen dieses Berichtes beigetragen haben, nämlich vom BfS Dr. Olaf Sarenio und Dr. Gerd Henning Schnepel, von der PTB Prof. Dr. Wolfgang G. Alberts und Prof. Dr. Günther Dietze, von der Universität Hannover Prof. Dr. Klaus Kirchhoff, von den Messstellen Dr. Ekkehard Martini, Dipl.-Phys. Karl-Heinz Ritzenhoff, Dipl.-Phys. Reinhard Seifert, Dipl.-Ing. Siegfried Ugi und Dr. Wolfgang Wahl sowie vom Forschungszentrum Karlsruhe Dr. Manfred Urban. Dank gilt auch den Mitarbeitern der Laboratorien für Ihre tatkräftige Unterstützung bei den Bestrahlungen und Auswertungen der Detektoren für die Testbestrahlungen und Frau Hannelore Brecht bei der Formatierung des Berichtes.

Literatur

- [ALB93] Alberts, W.G., Kluge, H.; PTB-Vergleichsbestrahlung an Personendosimetern für Neutronenstrahlung, PTB-N-15, 1993
- [ALB98] Alberts, W. G., Schuhmacher, H.; Advanced Methods of Active Neutron Dosimetry for Individual Monitoring and Radiation Field Analysis, PTB-N-32, 1998
- [AMB99] Ambrosi, P.: Messunsicherheiten im Strahlenschutz in: Fortbildungstagung "Dosimetrie externer Strahlung: Aktuelle Entwicklungen" 24.-26. Februar 1999 in Tabarz/Thüringen, PTB-Bericht PTB-Dos-31, Herausgeber Peter Ambrosi, Jürgen Böhm und Birgit Dörschel. Braunschweig, Seiten 8-1 bis 8-12, 1999
- [BIL94] Bilski, P.; Olko, P.; Burgkhardt, B.; Piesch, E.; Waligorski, M.P.R.; Thermoluminescence efficiency of LiF:Mg,Cu,P (MCP-N) detectors to photons, beta electrons, alpha particles and thermal neutrons. Radiation Protection Dosimetry, 55, S. 31-38, 1994
- [BMU94] Richtlinie über Anforderungen an Personendosismessstellen nach Strahlenschutz- und Röntgenverordnung vom 26. April 1994; BMU-RS II 3(A)-1530/1 und BMA-VIII b6-35737-22, 1994
- [BUD93] Budzanowski, M.; Bilski, P.; Olko, P.; Niewiadomski, T.; Burgkhardt, B.; Piesch, E.; New TL detectors for personal neutron dosimetry. Radiat. Prot. Dosim., 47, pp. 419-423, 1993
- [BUR77] Burger, G., Morhart, A.; A personnel albedo monitor for neutrons. Sixth ER-DA Workshop on Personnel Neutron Dosimetry, July 11-12, 1977, PNL-2449 pp 32-39(1977)
- [BUR82] Burgkhardt, B.; Piesch, E.; A Computer Assisted Evaluation Technique for Albedo Thermoluminescence Dosimeters, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 2, No. 4, pp. 221-230, 1982
- [BUR86] Burgkhardt, B.; Schwarz, W.; Evaluation Techniques for Different TL Albedo Dosimeter Systems Using Automatic Read-out, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 17, pp. 131-134, 1986
- [BUR88] Burgkhardt, B.; Piesch, E.; Field Calibration Technique for Albedo Neutron Dosimeters, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 23, pp. 121-126, 1988
- [BUR94] Burgkhardt, B.; Piesch, E.; Bilski, P.; Budzanowski, M.; Olko, P.; Eigenschaften neuer dünn-schichtiger Sandwich-Detektoren zur Beta- und Neutronendosimetrie, . Koelzer, W. [Hrsg.], Strahlenschutz: Physik und Messtechnik, 26. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Karlsruhe, 24.-26. Mai 1994Verl. TÜV Rheinland, FS-94-71-T, Bd. I, S. 521-26, 1994

- [BUR97] Burgkhardt, B., Ugi, S., Biegard, N.; Ergebnisse der Personendosisüberwachung mit Albedodosimetern der FZK-Messstelle für das Begleitpersonal beim Castorbehälter-Transport Ende Februar 1997. Ergebnismitteilung der Messstelle, 1997
- [BUR99] Burgkhardt, B., Private Mitteilung: Excel-Datei Uns_95_6.doc, 1998
- [DIN00] E DIN 25482, Teil 10: Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen (Entwurfsfassung August 1999), Teil 11: Messungen mit Albedodosimetern, Vorlage zum Gelbdruck, November 1999
- [DIN94] DIN 1338, Formelschreibweise und Formelsatz, August 1994
- [DIN96] DIN 1319-3, Grundlagen der Messtechnik – Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit, 1996
- [DIN99] DIN 25483, Verfahren zur Umgebungsüberwachung mit integrierenden Festkörperdosimetern, im Druck, 1999
- [DIN98] DIN 6802-4; Neutronendosimetrie-Verfahren zur Personendosimetrie mit Albedoneutronendosimetern, 1998
- [DKD98] Physikalisch-Technische-Bundesanstalt – Deutscher Kalibrierdienst – Angabe der Meßunsicherheit bei Kalibrierungen. Deutsche Übersetzung von [EAL-R2], dort auch Beispiele, Bezugsquelle: Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven, 1998
- [EAL97] Expression of Uncertainty of Measurement in Calibration, European cooperation for Accreditation of Laboratories, edition 1, April 1997
- [EUR96] Richtlinie 96/29/ Euratom des Rates vom 13.05.96 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlung, Amtsblatt der EG 39, L 159/1-114, 1996
- [HOF89] Hofmann, B.; Schwarz, W.; Burgkhardt, B.; Piesch, E.; Neutronendosimetrie in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren, KfK-4499, Febr. 1989
- [HOR86] Horowitz, Y.; Moscovitch, M. and Wilt, M.; Computerized Glow Curve Deconvolution Applied to Ultra-low Dose Thermoluminescence Dosimetry, Nuclear Instrum. Methods a244, 556-564, 1986
- [HOR95] Horowitz, Y. S., Yossian, D.; Computerized Glow Curve Deconvolution. Application to Thermoluminescence Dosimetry, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 60, No. 1, 120 pages, Monograph, 1995
- [ICR91] International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 60, Annals of the ICRP Vol. 21, No. 1 - 3, Pergamon Press, Oxford, 1991
- [LUS95] Luszik-Bhadra, M., Alberts, W. G., Dietz, E., Piesch, E., Siebert, B. R. L.; CR-39 Track Neutron Dosimeter/Spectrometer: Investigations in the Thermal, E-

pithermal and Intermediate Energy Region. Radiation Measurements, Vol. 25, Nos 1-4, pp. 441-444, 1995

- [LUS96] Luszik-Bhadra, M. Matzke,; Messungen mit Personendosimetern auf einem Kugelphantom in der Umgebung eines Castor IIA-Behälters, PTB 7.2-9/95. Beitrag in Alevra, A.V., Klein, H., Knauf, K., Luszik-Bhadra, M. Matzke, M. Schrewe, U.J. Wittstock, J.; Neutronen- und Photonen-Äquivalentdosisleistungen in der Umgebung eines beladenen Castor IIA-Behälters in dem Brennelementelager Gorleben, Bericht der PTB für das BfS, 1996
- [OLK94] Olko, P.; Budzanowski, M.; Bilski, P.; Burgkhardt, B.; Piesch, E.; ^6LiF sandwich type detectors for low dose individual monitoring in mixed neutron-photon fields. Radiat. Prot. Dosim., 54, S. 349-52, 1994
- [PIE77] Piesch, E.; Progress in Albedo Neutron Dosimetry, Nuclear Instruments and Methods, 145, pp. 613-619, 1977
- [PIE80] Piesch, E.; Burgkhardt, B.; Seguin, H.; Some results of an European Interlaboratory Test Programme of Integrating Dosimeter Systems for Environmental Monitoring, Nucl. Instr. Meth., 175, pp. 183-185, 1980
- [PIE84] Piesch, E., Burgkhardt, B.; Environmental Monitoring - European Interlaboratory Test Programme for Integrating Dosimeter System, Report EUR-8932-EN, 1984
- [PIE88] Piesch, E., Burgkhardt, B., Erprobung eines Albedoneutronen-Dosimetriesystems: TLD-Kalibrier- und Messverfahren, Neutronenkalibrierung, dosimetrische Eigenschaften, Routineanwendung, KfK 4303, 1988
- [RIT98] Ritzenhoff, K.H.; Private Mitteilung über Messungen mit Albedodosimetern an einem Castorbehälter in Ahaus, 1998
- [SIN85] Singh, D.; Piesch, E.; Burgkhardt, B.; Investigation of Room Scattered Neutrons and their Importance for the Calibration of Albedo Dosimeters, Proc. 5th Symp. on Neutron Dosimetry, Neuherberg 1984, pp. 617-628, 1985
- [SSK99] Bestimmung der Personendosis des Begleitpersonals bei Transporten von abgebrannten Brennelementen und hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung, Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 162. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 15.10.1999
- [WAG95] Wagner, S.R.; Grosswendt, B.; Harvey, J.R.; Mill, A.J.; Selbach, H.-J.; Siebert B.R.L.: Unified conversion functions for the new ICRU operational radiation protection quantities, Rad. Prot. Dosim. **12**, No. 2, 231-235, 1995

Anhang A: Messergebnisse der Testbestrahlung

Tab. A.1 Messergebnisse der Dosimetrie-
systeme mit 0,89 mm dicken Detektoren

Gruppe	Sollwert μSv		Mittelwert und Standard- abweichung SD in μSv					
	H_T	H_n	H_T	SD	H_n	SD	$H_p(10)$	SD
MPA/Harshaw								
1	0	25	0	2	26	3	26	3
2	0	50	0	2	45	3	45	3
3	0	75	2	2	69	5	71	4
4	25	0	24	4	1	6	25	5
5	50	0	50	2	1	2	51	2
6	75	0	75	3	1	7	76	5
7	12,5	12,5	11	2	16	4	27	3
8	25	25	23	2	25	4	48	3
9	37,5	37,5	38	3	36	5	74	4
10	0	0	-1	2	-1	3	-2	3
11	20	5	18	2	7	3	26	3
12	40	10	40	2	10	3	50	3
13	60	15	60	3	14	5	74	4
FZK/Alnor								
1	0	25	-2	2	27	5	25	4
2	0	50	-2	0	51	7	49	7
3	0	75	-2	2	74	12	72	7
4	25	0	21	5	3	9	24	8
5	50	0	47	4	-2	7	45	5
6	75	0	87	5	-1	9	86	8
7	12,5	12,5	18	3	10	7	27	6
8	25	25	29	4	27	9	55	8
9	37,5	37,5	40	4	36	7	76	7
10	0	0	-1	4	2	8	2	6
11	20	5	19	5	10	10	29	8
12	40	10	40	2	11	7	51	7
13	60	15	56	5	27	9	83	8

Tab. A.2 Messergebnisse der Dosimetrie-
systeme mit 0,38mm dicken Detektoren

Gruppe	Sollwert μSv		Mittelwert und Standard- abweichung SD in μSv					
	H_T	H_n	H_T	SD	H_n	SD	$H_p(10)$	SD
GSF/Harshaw								
1	0	25	2	11	25	5	27	8
2	0	50	-3	3	50	4	47	4
3	0	75	1	4	75	6	76	6
4	25	0	19	3	1	3	20	4
5	50	0	43	5	0	4	43	4
6	75	0	66	4	-1	5	66	5
7	12,5	12,5	11	10	12	16	23	14
8	25	25	23	5	23	7	46	5
9	37,5	37,5	51	9	31	11	81	10
LPS/Harshaw								
1	0	25	-5	5	23	6	17	2
2	0	50	-4	1	43	1	39	1
3	0	75	-3	3	65	4	61	4
4	25	0	24	4	0	3	24	3
5	50	0	58	8	-3	4	56	8
6	75	0	87	5	-3	7	85	8
7	12,5	12,5	14	5	12	4	26	4
8	25	25	30	3	19	3	49	3
9	37,5	37,5	42	4	31	5	73	4
10	0	0	0	3	-1	2	-1	3
11	20	5	11	3	6	6	17	6
12	40	10	41	11	4	7	45	10
13	60	15	70	6	9	6	79	7
SSU/Harshaw								
1	0	25	8	9	23	3	31	10
2	0	50	4	2	42	4	47	5
3	0	75	4	2	62	5	65	6
4	25	0	32	5	3	2	35	6
5	50	0	51	6	2	5	52	9
6	75	0	74	5	-1	8	73	11
7	12,5	12,5	12	4	14	3	25	5
8	25	25	23	3	22	3	45	6
9	37,5	37,5	36	2	33	4	68	4
10	0	0	0	3	3	4	3	6

Tab. A.3 Messergebnisse des Dosimetriesystems mit 0,07 mm dicken Detektoren

Gruppe	Sollwerte μSv		Mittelwert und Standardabweichung SD in μSv -					
	H_T	H_n	H_T	SD	H_n	SD	$H_p(10)$	SD
GSF/Panasonic: Originalmesswerte ¹⁾								
1	0	25	5	20	33	48	38	40
2	0	50	-6	15	110	39	104	34
3	0	75	-4	18	131	44	127	49
4	25	0	20	23	27	36	47	50
5	50	0	59	26	7	35	66	35
6	75	0	86	33	6	45	92	44
7	12,5	12,5	15	15	22	36	36	33
8	25	25	25	20	35	37	60	32
9	37,5	37,5	45	20	55	39	100	41
10	0	0	6	25	0	44	6	45
11	20	5	23	16	14	44	37	39
12	40	10	46	38	32	35	77	48
13	60	15	59	19	43	34	102	31

1) kein einheitliches Messverfahren

Tab. A.4 Messergebnisse des Dosimetriesystems mit 0,07 mm dicken Detektoren

Gruppe	Sollwerte μSv		Mittelwert und Standardabweichung SD in μSv					
	H_T	H_n	H_T	SD	H_n	SD	$H_p(10)$	SD
GSF/Panasonic: H_n korrigiert ¹⁾								
1	0	25	-1	20	20	29	19	24
2	0	50	-12	15	66	23	54	20
3	0	75	-10	18	78	27	68	33
4	25	0	14	23	16	21	30	38
5	50	0	53	26	4	21	57	27
6	75	0	80	33	4	27	83	33
7	12,5	12,5	9	15	13	21	22	20
8	25	25	19	20	21	22	40	21
9	37,5	37,5	39	19	33	23	72	28
10	0	0	0	25	0	27	0	32
11	20	5	17	16	8	26	25	24
12	40	10	40	38	19	21	58	40
13	60	15	53	19	26	21	79	21

1) Nachträgliche Anwendung des einheitlichen Messverfahrens durch Anwendung der Faktoren aus dem Vorversuch

Anhang B: Grundlagen zur Ermittlung der Messunsicherheit und Nachweisgrenze

B1 Allgemeines

Die Festlegung der charakteristischen Größen, die die Leistungsfähigkeit eines Messverfahrens beschreiben, erfolgt nach DIN 25482 [DIN 00]. In dieser Norm wird die Bayes-Statistik angewendet, um auf der Basis vorgewählter Irrtumswahrscheinlichkeiten und unter Berücksichtigung der relevanten Messunsicherheiten folgende Kenngrößen zu definieren:

- die Erkennungsgrenze, die für jede Messung bei vorgegebener Irrtumswahrscheinlichkeit eine Entscheidung darüber zulässt, ob zu der gemessenen Dosis auch Strahlung beigetragen hat, die nicht der Umgebungsstrahlung zuzuordnen ist,
- die Nachweisgrenze, die angibt, welche kleinste zusätzliche Dosis mit dem betrachteten Messverfahren und den ihm eigenen Unsicherheiten unter Beachtung einer vorgegebenen Irrtumswahrscheinlichkeit bei der vorliegenden Umgebungsstrahlung noch nachgewiesen werden kann und damit eine Entscheidung zulässt, ob das betrachtete Messverfahren im Sinne dieser Norm bestimmten Anforderungen (einem Richtwert) genügt und damit für den Messzweck geeignet ist.

B2 Modell

Jede Messung kann durch eine Modell, wie in Abb. B1 gezeigt, dargestellt werden. Die Eingangsgrößen X_i ($i = 1, 2, \dots, N$) werden teilweise direkt gemessen, teilweise aus externen Quellen (z. B. Datenblatt eines Messgeräts, Korrektionsfaktor aus einer Tabelle) in die Messung eingebracht. Mit der Modellfunktion, hier mit f bezeichnet, wird zugleich das Messverfahren und das Verfahren der Auswertung beschrieben. In den meisten Fällen wird sie, wie in Abb. B1, aus einem analytischen Ausdruck bestehen, sie kann aber auch experimentell ermittelt oder als Computeralgorithmus gegeben sein.

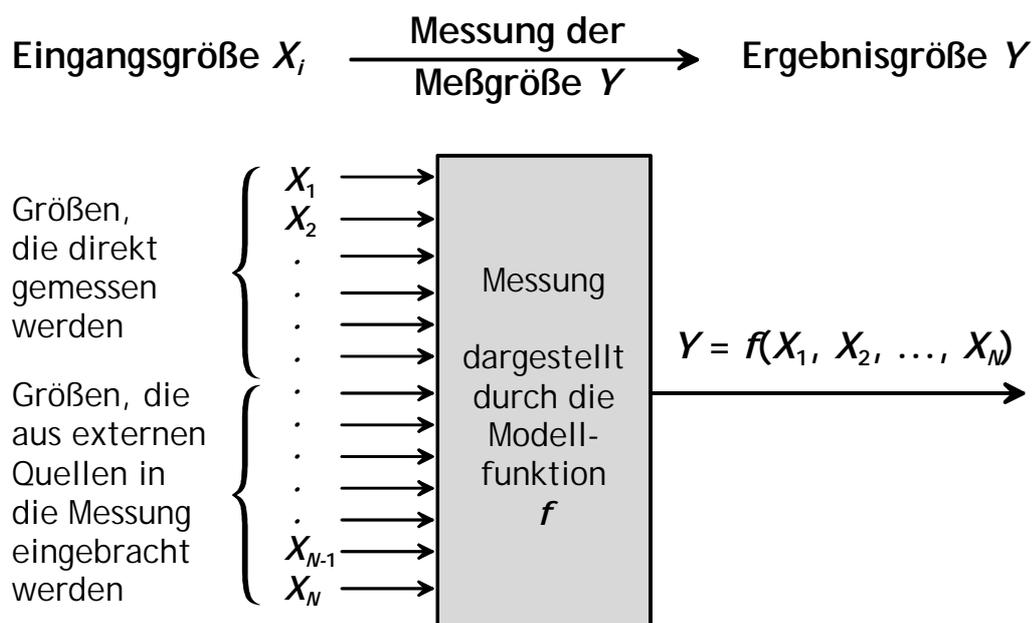


Abb. B1: Modell einer Messung

Bei der Durchführung einer Messung sind für die Eingangsgrößen nur die (besten) Schätzwerte x_i ($i = 1, 2, \dots, N$) bekannt, aus denen mittels der Modellfunktion f der (beste) Schätzwert für die Messgröße oder Ergebnisgröße ermittelt wird. Die Größen, wie z. B.: Tiefen-Personendosis $H_p(10)$, werden mit großen Buchstaben bezeichnet, ihre Schätzwerte, wie z. B. 3,2 mSv, mit kleinen Buchstaben.

B3 Bestimmung der Messunsicherheit

Für alle Eingangsgrößen müssen Standardunsicherheiten $u(x_i)$ bekannt sein. Wie diese bestimmt werden wird in Kapitel B4 beschrieben. Für jede Eingangsgröße bewirkt diese Standardunsicherheiten $u(x_i)$ einen Anteil $u_i(y)$ der Standardunsicherheit des Schätzwertes y der Ausgangsgröße. Die gesamte Standardunsicherheit der Messung, $u(y)$, ergibt sich dann gemäß Gl. (1).

$$u(y) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_N^2} \quad (\text{B1})$$

Noch zu beantworten ist die Frage, wie die $u_i(y)$ aus den $u(x_i)$ berechnet werden. Dies erfolgt für analytische Modellfunktionen f in der „klassischen Methode der Fehlerfortpflanzung nach Gauss“:

$$u_i(y) = c_i u_i(x) \quad \text{mit} \quad c_i = \left. \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \right|_{X_1=x_1, \dots, X_N=x_N} \quad (\text{B2})$$

Dabei wird c_i als Sensitivitätskoeffizient bezeichnet. Bei anderen Modellfunktionen muss die Ableitung durch geeignete Differenzenquotienten ersetzt werden und numerisch berechnet werden.

Sind die Eingangsgrößen korreliert, d. h. sind sie auf die eine oder andere Art voneinander abhängig, so muss auch ihre Kovarianz unter den Unsicherheitsbeiträgen berücksichtigt werden. Durch geeignete Wahl der Modellfunktion in diesem Bericht konnte die Korrelation der Eingangsgrößen eliminiert werden.

Das Modell beschreibt ein Messverfahren durch die mathematischen Beziehungen zwischen allen bei der Auswertung einer Messung beteiligten Messgrößen und weiteren Eingangsdaten und der oder den Ergebnisgröße(n). Das Modell kann auch als Computerprogramm vorliegen.

$$Y = G(X_i) \quad (\text{B3})$$

Anhand des Modells werden die Varianzen der Ergebnisgröße(n) ermittelt. Wenn davon ausgegangen werden kann, dass die Varianzen der Eingangsgrößen voneinander unabhängig sind, können durch Bildung der partiellen Ableitungen der Modellgleichung nach den Eingangsgrößen Sensitivitätskoeffizienten als Wichtungsfaktoren der verschiedenen Varianzen errechnet werden. Für Modelle, die als Computerprogramm vorliegen, werden die Sensitivi-

tätskoeffizienten empirisch durch Aufgabe von Störgrößen bzw. Variation der Eingangsgrößen ermittelt.

$$u(Y)^2 = \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2}{\partial(X_i)^2} G(X_i) \cdot u(X_i)^2 \quad (\text{B4})$$

B4 Bestimmung der Messunsicherheiten der Eingangsgrößen

Neben der Aufstellung der Modellfunktion f besteht die wesentliche Arbeit bei der Bestimmung der Messunsicherheit in der Bestimmung der Standardunsicherheit der Eingangsgrößen $u(x_i)$. Hierzu finden zwei im Ergebnis gleichwertige Methoden Verwendung, die mit A und B bezeichnet werden. Die Ermittlungsmethode A ist eine Methode, bei der die Messunsicherheit aus der statistischen Analyse einer Beobachtungsreihe gewonnen wird, die Ermittlungsmethode B verwendet hingegen andere Methoden.

Die bei der **Ermittlungsmethode A** verwendeten statistischen Analysen sind hinreichend bekannt. Ist die Eingangsgröße x_i als Mittelwert von n Messungen ($n \geq 10$) bestimmt worden, so ist die Standardabweichung eine verlässliche Angabe einer Standardmessunsicherheit.

Bei der **Ermittlungsmethode B** gehen die Kenntnisse und Erfahrungen des Experimentators wesentlich in die Bestimmung der Messunsicherheit ein. Die Wirkungen aller Einflussgrößen (z. B. Photonenenergie, Strahleneinfallrichtung) auf die Messunsicherheit wird mit diesen Typ B Ermittlungsmethoden bestimmt. Hierzu müssen Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Korrektionsfaktoren zu diesen Einflussgrößen angenommen werden mit deren Hilfe dann die Messunsicherheit bestimmt werden kann. Der Schätzwert x_i der Eingangsgröße ist dann der Erwartungswert der Wahrscheinlichkeitsverteilung und die Standardmessunsicherheit $u(x_i)$ ergibt sich aus der Quadratwurzel der Varianz dieser Verteilung. Im folgenden werden zwei wichtige Wahrscheinlichkeitsverteilungen näher beschrieben:

Bei einer **rechteckigen Wahrscheinlichkeitsverteilung** wird angenommen, dass die zu analysierende Größe (z.B. der Korrektionsfaktor für die Korrektion der Photonenenergie) innerhalb der Grenzen a_- und a_+ liegt und jeder Wert der Größe (des Korrektionsfaktors) innerhalb dieser Grenzen gleich wahrscheinlich ist. Dies zeigt graphisch das Abb. B2.

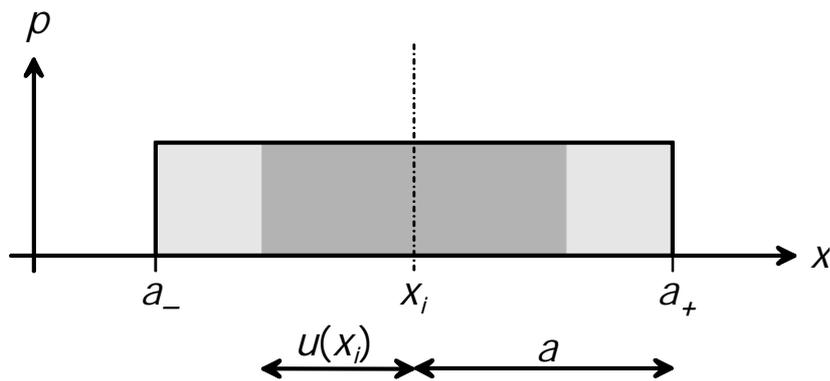


Abb. B2: Rechteckige Wahrscheinlichkeitsverteilung

Für den Schätzwert x_i der Eingangsgröße ergibt sich hier

$$x_i = \frac{1}{2}(a_+ + a_-) \quad (\text{B5})$$

und für die Standardmessunsicherheit $u(x_i)$ ergibt sich

$$u(x_i) = \frac{a_+ + a_-}{2\sqrt{3}} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (\text{B6})$$

Für die **dreieckige Wahrscheinlichkeitsverteilung** ergibt sich analog für die Standardmessunsicherheit $u(x_i)$ ein kleinerer Wert von

$$u(x_i) = \frac{a_+ + a_-}{2\sqrt{6}} = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (\text{B7})$$

B5 Ermittlung der Erkennungsgrenze und der Nachweisgrenze

Die Erkennungsgrenze X^* ist in DIN 25482 definiert als das obere einseitige Quantil $k(1-\alpha)$ der Umgebungsstrahlungs-Messwerte zum vorgegebenen Fehler erster Art α . Nach DIN 25482-10 bedeutet das, die Erkennungsgrenze errechnet sich aus dem Faktor $k(1-\alpha)$ und der Messunsicherheit $u(x)$ an der Stelle $x = 0$

$$X^* = k(1-\alpha) \cdot u(0) \quad (\text{B8})$$

Nach DIN 25482 wird die Nachweisgrenze δ^* errechnet aus der Erkennungsgrenze und dem einseitigen unteren Quantil der Verteilung der Bruttomesswerte zum vorgegebenen Fehler zweiter Art β . Nach DIN 25482-10 bedeutet das, die Nachweisgrenze errechnet sich aus der Erkennungsgrenze sowie aus dem Faktor $k(1-\beta)$ und der Messunsicherheit $u(x)$ an der Stelle $x = \delta^*$.

$$\delta^* = X^* + k(1-\beta) \cdot u(\delta^*) \quad (\text{B9})$$

Mit Gleichung (B8) ergibt sich

$$\delta^* = k(1 - \alpha) \cdot u(0) + k(1 - \beta) \cdot u(\delta^*) \quad (\text{B10})$$

Diese implizite Gleichung kann im allgemeinen durch Iteration gelöst werden.

Auf die Faktoren $k(1 - \alpha)$ und $k(1 - \beta)$ wird hier nicht näher eingegangen. Es werden die Wahrscheinlichkeiten $\alpha = \beta = 0,05$ für die der Fehler erster und zweiter Art empfohlen (siehe 5.4 in DIN 25482-10). Damit ergibt sich für $k(1 - \alpha) = k(1 - \beta) = 1,645$. Die in diesem Bericht verwendete Gleichung für die Nachweisgrenze ergibt sich dann zu :

$$\delta^* = 1,645 \cdot u(0) + 1,645 \cdot u(\delta^*) \quad (\text{B11})$$

Die Messunsicherheiten $u(0)$ und $u(\delta^*)$ werden nach den oben angegebenen Methoden ermittelt.