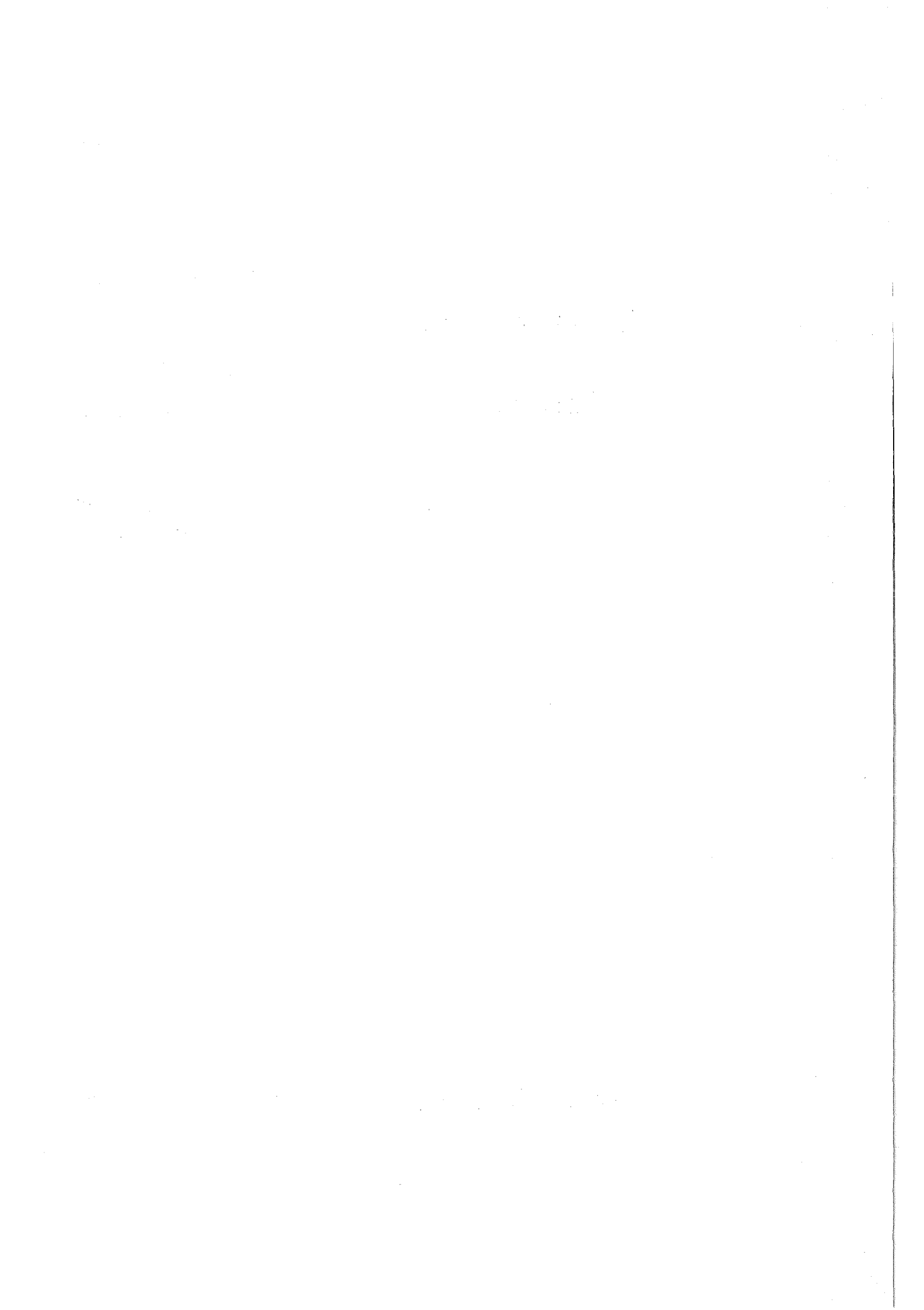


KfK 4631
Juli 1990

Neutronen- Äquivalentdosisleistungsmesser nach dem Einkugelalbedomeßverfahren

B. Burgkhardt, M. I. Al-Jarallah, E. Piesch
Hauptabteilung Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe



**Kernforschungszentrum Karlsruhe
Hauptabteilung Sicherheit**

KfK 4631

**Neutronen-Äquivalentdosisleistungsmesser
nach dem Einkugelalbedomeßverfahren**

B. Burgkhardt, M. I. Al-Jarallah*) und E. Piesch

***) King Fahd University of Petroleum and Minerals,
Physics Department, Dharan, Saudi Arabia**

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Der Neutronen-Äquivalentdosisleistungsmesser nach dem Einkugelalbedomeßverfahren ist ein erweiterter Remcounter, der durch zusätzliche Detektoren an der Moderatoroberfläche eine geringere Energieabhängigkeit der Neutronen-Äquivalentdosisanzeige und zusätzliche Aussagen über das Neutronenstrahlenfeld ermöglicht. Die Linearkombination der Anzeigen von mindestens drei ^3He -Neutronendetektoren erlaubt die simultane Ermittlung der Neutronenfluenz, der Energiedosis, der Äquivalentdosis sowie die qualitative Angabe einer Neutronenenergie. Darüber hinaus ist das Gerät auch unmittelbar zur Ermittlung von Kalibrierfaktoren für Albedoneutronendosimeter in der Personendosimetrie einsetzbar. Die Richtungsabhängigkeit der Anzeige kann durch die Verwendung zusätzlicher Detektoren oder durch aufeinanderfolgende Messungen in verschiedenen Richtungen verbessert werden.

Das Labormuster eines Neutronen-Äquivalentdosisleistungsmessers wurde mit monoenergetischen Neutronen bei der PTB in Braunschweig kalibriert. Der Einsatz des Gerätes ist besonders dort von Interesse, wo Neutronenfelder für Strahlenschutz Zwecke analysiert werden sollen und eine Personenüberwachung mit Albedoneutronendosimetern vorgesehen ist.

Neutron Dose Equivalent Rate Meter using the Single Sphere Albedo Technique

Abstract

The neutron dose equivalent rate meter on the basis of the single sphere albedo technique is an improved rem-counter which makes use of additional detectors at the surface of the moderator sphere in order to realize a flat energy response curve of the neutron dose equivalent reading and the additional interpretation of neutron radiation fields. The linear combination of at least three ^3He -neutron counters allows the simultaneous estimation of neutron fluence, absorbed dose, dose equivalent as well as qualitatively the indication of a neutron energy. In addition the survey meter may be used directly to estimate calibration factors for albedo neutron dosimeters within individual monitoring. The angular response of the reading may be improved by using additional detectors or by subsequent measurements in various directions of the radiation incidence.

The laboratory type of a neutron dose equivalent rate meter was calibrated with monoenergetic neutrons at the PTB Braunschweig. The use of the survey meter is of special interest whenever neutron radiation fields should be analyzed with respect to radiation protection purposes and an individual monitoring with albedo neutron dosimeters is considered.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Einkugelalbedomeßverfahren	5
3. Laboraufbau eines Dosisleistungsmessers nach dem Einkugelalbedomeßverfahren	10
3.1. Detektoren	10
3.2. Meßtechnik	14
3.3. Moderator	17
4. Optimierung von Detektoranordnung und Moderator	17
4.1. Meßprogramm	17
4.2. Optimierung der Position der Detektoren an der Moderatoroberfläche	19
4.3. Ergebnis der Optimierung	25
5. Entwicklung eines tragbaren Meßgerätes	25
5.1. Aufgabe	25
5.2. Anforderungen an das Meßgerätes	26
5.3. Durchführung	27
6. Ergebnis des Entwicklungsvorhabens	28
6.1. Laborprototyp	28
6.2. Energieabhängigkeit der Einzeldetektoren	28
6.3. Direktanzeige der Neutronen-Äquivalentdosisleistung	30
6.4. Richtungsabhängigkeit der Neutronen-Äquivalentdosis- leistungsanzeige	33
7. Zusammenfassung	35
8. Literaturverzeichnis	39

1 Einleitung

Innerhalb der Strahlenschutzüberwachung besteht u.a. die Aufgabe, Ortsdosismessungen am Arbeitsplatz durchzuführen und Kontrollbereiche abzugrenzen. Zur Messung der Neutronen-Äquivalentdosisleistung werden bevorzugt Neutronen-Moderator Typgeräte ("Rem-Counter") eingesetzt, die Neutronen im gesamten interessierenden Energiebereich anzeigen (Abb. 1). Ein solches Meßgerät besteht aus einem Detektor für thermische Neutronen z.B. (^6Li -Szintillationszähler, BF_3 -Zählrohr, ^3He -Zählrohr) im Zentrum eines Moderators (z.B. Polyäthylenkugel bzw. Zylinder von $\leq 30\text{ cm } \varnothing$), welcher zur Abbremsung bzw. Thermalisierung schneller Neutronen dient. Bedingt durch die Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens wird die Neutronen-Äquivalentdosis bei Bestrahlung mit monoenergetischen Neutronen im Bereich mittel schneller Neutronen bis zu einem Faktor 8 - für die neue Meßgröße $H^*(10)$ bis zu einem Faktor 15 - überempfindlich angezeigt (1). Thermische Neutronen und 14 MeV Neutronen werden hingegen unterbewertet (siehe Abb. 1).

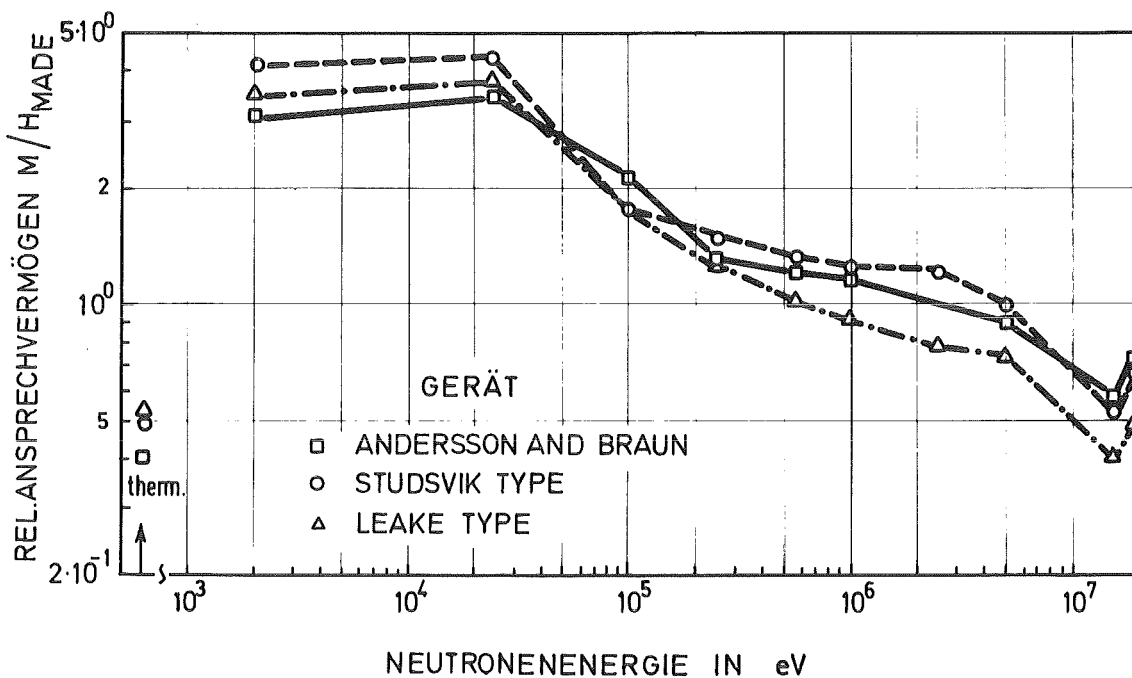


Abb. 1: Energieabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens von kommerziellen Neutronen-Äquivalentdosisleistungsmessern ("Rem-Counter") nach (1)

Zur Herabsetzung der Energieabhängigkeit von Neutronendosisleistungsmessern stehen in neuester Zeit u.a. folgende Verfahren zur Verfügung:

- Gewebeäquivalente Proportionalzähler,
- Vielkugelmeßtechnik,
- Einkugelalbedomeßverfahren.

Gewebeäquivalente Proportionalzähler (tissue equivalent proportional counter, TEPC) mit gewebeäquivalentem Gas und niederem Druck messen die Energiedosisleistung über die Ionisation in einem kleinen simulierten Gewebeelement. Das Impulshöhenspektrum gibt in guter Näherung die Verteilung des linearen Energieübertragungsvermögens (LET) wieder, so daß mit LET-abhängigen Konversionsfaktoren die Äquivalentdosisleistung u. U. getrennt für Neutronen- und Photonenstrahlung ermittelt werden kann. Die zur Zeit von verschiedenen Instituten entwickelten Meßgeräte zeigen jedoch alle eine Unterbewertung der Neutronen-Äquivalentdosis insbesondere im Energiebereich unterhalb von 0,1 MeV (Abb. 2). Die Optimierung der Energieabhängigkeit ist bei diesem Gerätetyp jedoch noch nicht abgeschlossen und läßt Verbesserungen erwarten (2).

Die Vielkugel-Meßtechnik verwendet jeweils einen thermischen Neutronendetektor im Zentrum von mehreren - bis zu 7 - Moderatorkugeln unterschiedlichen Durchmessers. Bei Kenntnis des Neutronenansprechvermögens dieser Detektorkombinationen läßt sich eine genauere, energieunabhängigere Neutronen-Äquivalentdosis, durch Anwendung einer Linearkombination der Meßwerte ermitteln (3). Diese recht aufwendige Meßtechnik ist für einen Routineeinsatz nicht geeignet und wurde bisher nur zu wissenschaftlichen Experimenten in Neutronenstreustrahlungsfeldern herangezogen.

Eine Alternativmethode ist das Einkugel-Albedomeßverfahren (Abb. 3). Es verwendet drei thermische Neutronendetektoren, die im Zentrum einer 30 cm Polyäthylenkugel zur getrennten Messung von Albedoneutronen bzw. thermischen Feldneutronen an der Kugeloberfläche angeordnet sind (4). Die Linearkombination der drei Meßwerte führt zu einer um eine Größenordnung geringeren Energieabhängigkeit der Neutronen-Äquivalentdosis Anzeige. Die Eigenschaften dieses Meßverfahrens wurden mit passiven Thermolumineszenzdosimetern in verschiedenen Kalibrier- und Streustrahlungsfeldern erprobt. Anstelle passiver TL-Detektoren würde der Einsatz von Zählrohren in Verbindung

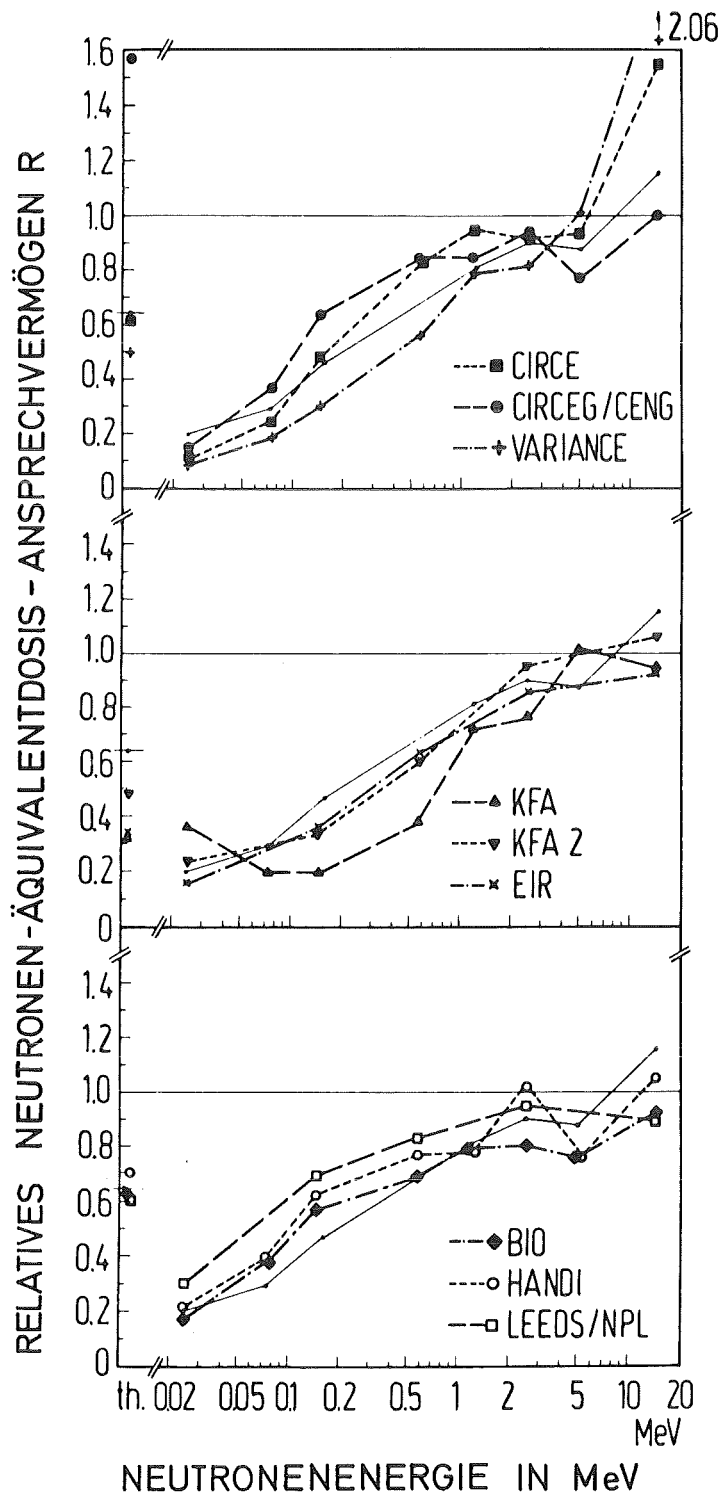


Abb. 2: Energieabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens von gewebe-äquivalenten Proportionalzählern unterschiedlicher Bauart nach (2)

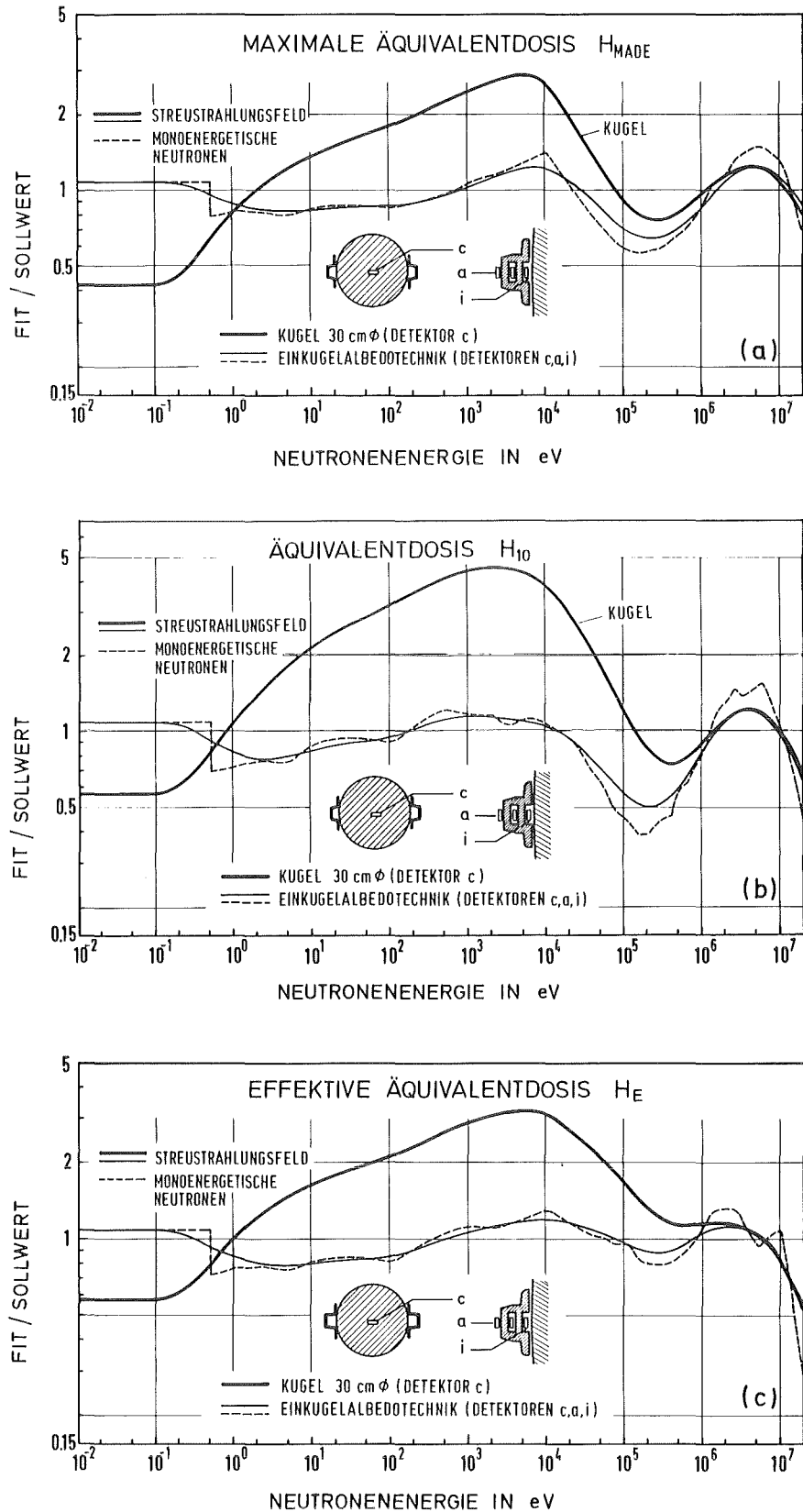


Abb. 3: Energieabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens eines Neutronen-Äquivalentdosisleistungsmessers mit einem Moderator von 30 cm Durchmesser und der Einkugelalbedomeßtechnik (4)

mit Mikroprozessoren und einer kompakten Elektronik eine Direktanzeige der Neutronen-Äquivalentdosisleistung ergeben. Ein solches dem "Rem-Counter" vergleichbares Routine meßgerät bietet darüberhinaus den Vorteil, auch bei Änderung der Linear- kombination andere interessierende Meßgrößen anzuzeigen. Ziel des vom BMU geförderten Forschungsvorhabens "Neutronen-Äquivalentdosisleistungsmesser nach dem Einkugelalbedomeßverfahren"*^{*)} war die Entwicklung eines Einkugelalbedomeßgerätes zur Messung der Neutronen-Äquivalentdosisleistung sowie zur Bestimmung von Kalibrierfaktoren für Albedoneutronendosimeter. Auf der Grundlage des im KfK entwickelten Meßverfahrens sollte ein Neutronen- Äquivalentdosisleistungsmesser für den Routineeinsatz in Neutronenstreu- strahlungsfeldern entwickelt werden, der anstelle der bisher erprobten passiven LiF-Detektoren aktive ³He-Zähler verwendet. Anstelle der Albedokapsel sollen entsprechende Borplastik-Abschirmungen für die aktiven Detektoren entwickelt werden.

Innerhalb des Vorhabens waren folgende Arbeitsschritte vorgesehen:

- Laboraufbau eines Meßgerätes einschließlich Auswahl des Detektortyps, der Detektor-Absorber-Moderatoranordnung und der Software für die vorgesehene Verknüpfung von mindestens drei Detektoranzeigen.
- Bestimmung des Ansprechvermögens der ³He- Neutronendetektoren für verschiedene Detektor-Borplastik- und Moderatoranordnungen.
- Erprobung und Kalibrierung des optimierten Laboraufbaues mit thermischen und monoenergetischen Neutronen.
- Nach erfolgreicher Erprobung die Entwicklung eines kommerziellen Prototyps, d. h. eines kompakten batteriebetriebenen Handgerätes mit integrierten Auswerteeinheiten.

2 Einkugelalbedomeßverfahren

Zur Ausmessung von Neutronenstreustrahlungsfeldern werden heute vorwiegend Neutronen-Äquivalentdosisleistungsmesser mit einem Detektor für thermische Neutronen im Zentrum eines Polyäthylenmoderators eingesetzt. Bei Verwendung von "Rem-Countern" zur Kalibrierung von Personenneutronendosimetern an Arbeitsplätzen müssen hier jedoch, bedingt durch die Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens, Meßunsicherheiten von mehr als einem Faktor 3 in Kauf genommen werden. Die Verwendung von zwei zusätzlichen Detektoren an der Moderatoroberfläche verbessert diese Meßbedingungen.

^{)} Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Förderkennzeichen: St.Sch. 1.015) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Das Einkugelalbedomeßverfahren benutzt die Anzeige von TL-Neutronendetektoren im Zentrum (c) einer 30-cm-Polyäthylenkugel und von zwei an der Kugel diametral angeordneten Albedoneutronendosimetern mit TL-Neutronendetektoren in den Meßpositionen (i) und (a) (siehe Abb. 3) (4). Das Ansprechvermögen der drei Neutronendetektoren wurde experimentell über Kalibrierbestrahlungen in Abhängigkeit von der Neutronenenergie mit monoenergetischen und thermischen Neutronen bestimmt. Für den Energiebereich mittelschneller Neutronen wurden berechnete Ergebnisse verwendet, die von Awshalom (3) für den Detektor (c) in der Polyäthylenkugel bzw. von Alsmiller (5) für einen Albedoneutronendetektor erhalten wurden. Die Berechnungen zeigten gute Übereinstimmung zu den vorliegenden Meßergebnissen (Abb. 5).

Unter Zugrundelegung des berechneten bzw. experimentell ermittelten Neutronenansprechvermögens für die vorliegende Detektor-Absorber-Moderator-Kombination konnte über eine Linearkombination der drei Meßwertanzeigen bei Verwendung jeweils unterschiedlicher Wichtungsfaktoren k_i eine energieunabhängige Anzeige wahlweise der Neutronenfluenz ϕ , der Energiedosis D und der Äquivalentdosis H erhalten werden:

$$\begin{aligned}\phi &= k_1 \cdot M(a) + k_2 \cdot M(i) + k_3 \cdot M(c) \\ D &= k_4 \cdot M(a) + k_5 \cdot M(i) + k_6 \cdot M(c) \\ H_{MADE} &= k_7 \cdot M(a) + k_8 \cdot M(i) + k_9 \cdot M(c)\end{aligned}$$

Die Wichtungsfaktoren k_i wurden mit Hilfe eines Least-Square-Fit-Verfahrens unter Zugrundelegung des Neutronenansprechvermögens der drei Detektoren als Funktion der Neutronenenergie ermittelt (Tab. 1). Vor der Ermittlung der

Wichtungsfaktoren wurde das Neutronenansprechvermögen der drei Detektoren bezogen auf die Neutronenfluenz unter Verwendung von Fluenz-Dosis-Konversionsfaktoren in das Ansprechvermögen für die interessierende Meßgröße umgerechnet. Im Hinblick auf die Einführung neuer Meßgrößen wurden die entsprechenden Wichtungsfaktoren für die bisher gültige maximale Äquivalentdosis H_{MADE} sowie für die Neutronen-Äquivalentdosis $H^*(10)$ in einer Tiefe von 10 mm der ICRU-Kugel und für die effektive Äquivalentdosis H_E im MIRD-Phantom ermittelt.

Abb. 3 zeigt die Energieabhängigkeit der aus der Linearkombination von drei Detektoranzeigen ermittelten Äquivalentdosis für die interessierenden Meßgrößen als Funktion der Neutronenenergie. Im Vergleich zu monoenergetischen

Neutronen-detektor	Wichtungsfaktoren k_i				
	ϕ (10^{-6} cm^2)	D (10^{-2} mGy)	H_{MADE} (10^{-1} mSv)	H_{10} (10^{-1} mSv)	H_E (10^{-1} mSv)
a	$k_1 = 1,1$	$k_4 = 0,62$	$k_7 = 0,16$	$k_{13} = 0,13$	$k_{10} = 0,084$
i	$k_2 = 5,9$	$k_5 = 1,4$	$k_8 = -1,2$	$k_{14} = -1,5$	$k_{11} = -0,9$
c	$k_3 = 1,4$	$k_6 = 8,8$	$k_9 = 8,3$	$k_{15} = 8,3$	$k_{12} = 5,8$

Tab. 1: Wichtungsfaktoren k_i für Linearkombinationen zur Ermittlung von Neutronenfeldgrößen mit der Einkugelalbedomeßtechnik

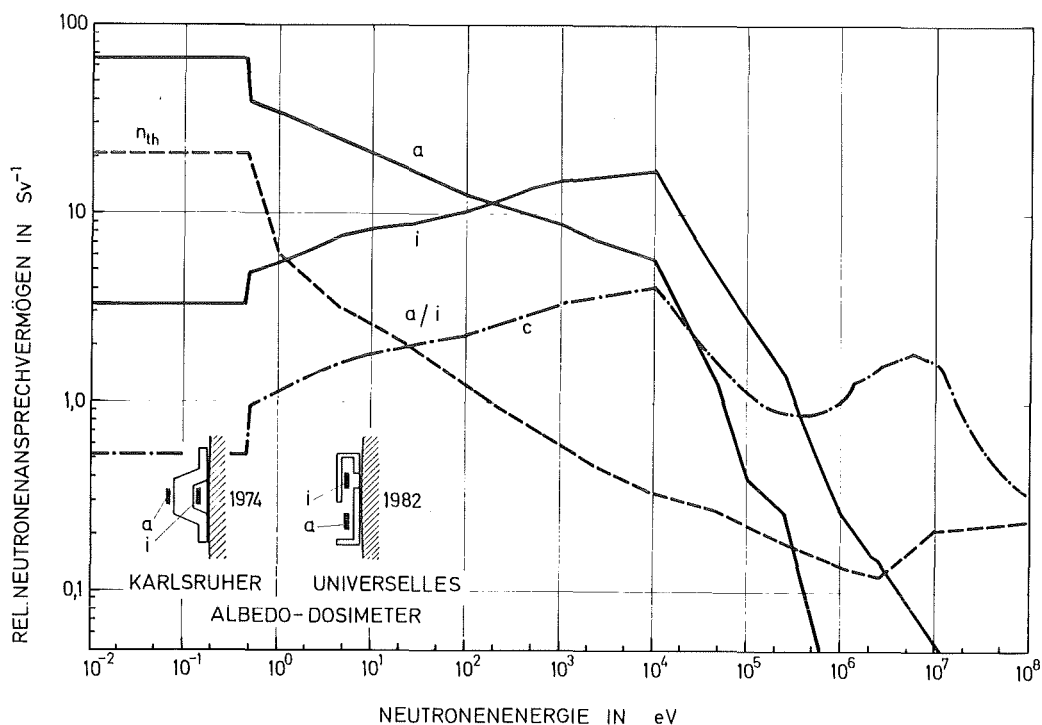


Abb. 4: Energieabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens für die Neutronendetektoren (i) und (a) im Albedoneutronendosimeter sowie dem Neutronendetektor (c) im Zentrum einer Moderator-kugel von 30 cm Durchmesser

Neutronen erwartet man bei Neutronenspektren in Streustrahlungsfeldern eine geringere Energieabhängigkeit, wie dies hier für Neutronenspektren mit einer Halbwertsbreite des Cf-252-Spektrums dargestellt ist. Im Vergleich zur 30-cm-Polyäthylen-Kugel ("Rem-Counter") zeigt die Einkugelalbedomeßtechnik eine wesentlich geringere Energieabhängigkeit der Neutronendosisanzeige von nur etwa $\pm 25\%$. Insbesondere bei Kalibrierung auf die Meßgröße H_E wird die geringste Energieabhängigkeit erhalten.

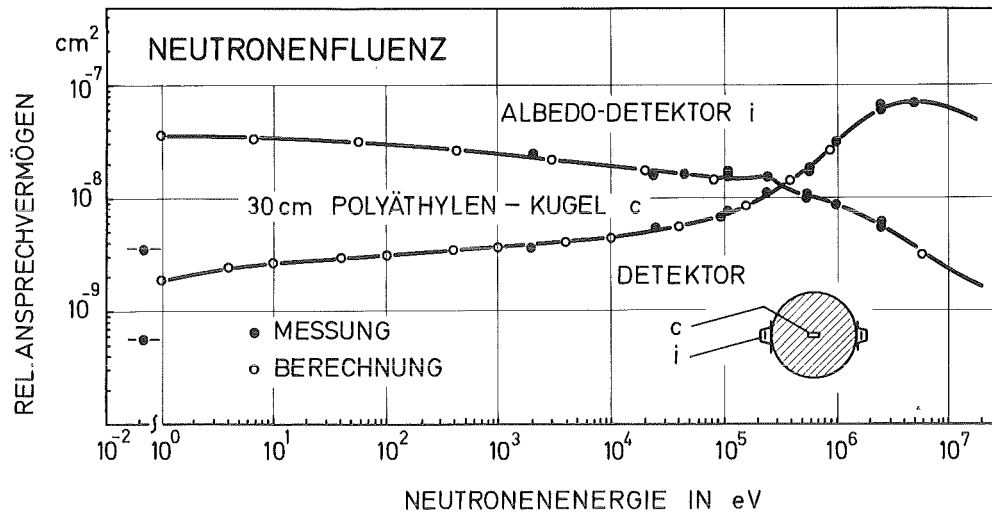


Abb. 5: Energieabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens zur Messung der Neutronenfluenz für den Albedodetektor (i) und dem Detektor (c) im Zentrum einer Moderator-Kugel von 30 cm Durchmesser

Das Einkugelalbedomeßverfahren, zunächst als Standardmethode zur Kalibrierung von Albedodosimetern im Streustrahlungsfeld angewandt, kann auch zur Analyse von Neutronenstreustrahlungsfeldern herangezogen werden (4,6). Das erweiterte Verfahren ermöglicht in Neutronenstreustrahlungsfeldern die Bestimmung der für den Strahlenschutz interessierenden Größen, zusätzlich u.a. der Neutronenfluenz ϕ , der Energiedosis (Abb. 6) sowie eines effektiven Qualitätsfaktors Q_{eff} , eines effektiven Neutronenfluenz-Äquivalentdosis-Umrechnungsfaktors h_{eff} sowie eines Energieparameters für jeweilige das Streustrahlungsspektrum am Meßort.

Der praktische Einsatz der neuen Meßtechnik in der Umgebung verschiedenster Neutronenquellen, u.a. auch am Health Physics Research Reactor in Oak Ridge, bestätigte die geringe Energieabhängigkeit des Meßverfahrens (7). Tab. 2 vergleicht die aus dem Neutronenspektrum errechneten Sollwerte für die Neutronenfeldgrößen ϕ , D und H mit den Ergebnissen, die durch Linearkombinationen unter Verwendung berechneter und gemessener Detektoranzeigen ermittelt wurden. Abweichungen bei zwei HPRR-Spektren sind auf Ungenauigkeiten des berechneten Neutronenspektrums zurückzuführen.

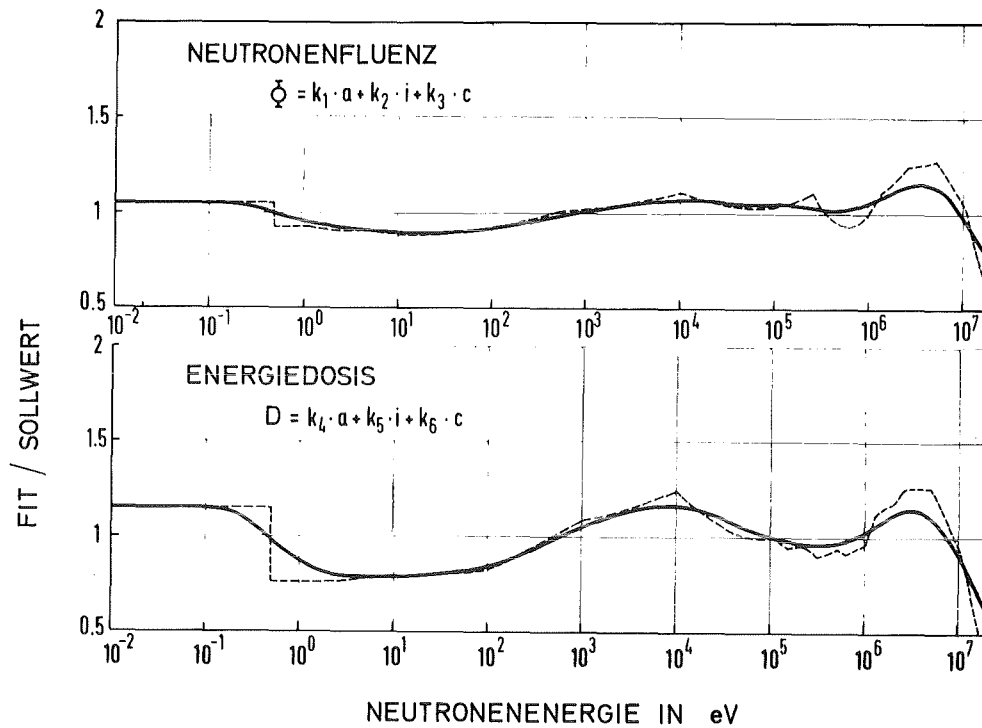


Abb. 6: Energieabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens für die Anzeige der Neutronenfluenz und der Neutronenenergiedosis unter Verwendung einer Linearkombination von drei Detektoranzeigen

Neutronenspektrum	Quotient FIT/Sollwert ¹⁾					
	Detektoranzeigen berechnet			Detektoranzeigen gemessen		
	ϕ	D	H _{MADE}	ϕ	D	H _{MADE}
Am-Be (KfK)	1,26	1,19	1,33	1,11	0,98	1,08
CF-252 (KfK)	1,23	1,16	1,14	1,11	1,02	1,00
CF-252 + D ₂ O (NBS)	1,29	1,15	1,06	0,97	1,00	0,98
HPRR						
NO SHIELD SP1	1,07	1,10	1,03	1,00	0,96	0,88
SP2	1,07	1,10	1,02	1,03	1,01	0,93
LUCITE	1,05	1,12	1,09	1,26	1,33	1,29
CONCRETE	1,03	1,08	1,02	0,79	0,84	0,81

Tab. 2: Vergleich von Neutronenfeldgrößen ermittelt mit der Einkugelalbedotechnik aus der Linearkombination (FIT) von drei Meßwerten

Auch bei Verringerung des Moderatorokugeldurchmessers von 30 cm auf 20 cm und der damit verbundenen Erhöhung der Energieabhängigkeit des Detektors (c) im Kugelzentrum (Abb. 7 a) kann bei Anwendung der Linearkombination mit drei Detektoranzeigen u. U. noch mit einer ausreichenden Energieunabhängigkeit gerechnet werden. Dies zeigt Abb. 7b für die Linearkombination der drei Detektoranzeigen bei einem Kugeldurchmesser von 20 cm und 25 cm. Für die Energieabhängigkeit des Detektors (c) wurden hierbei Berechnungen von Awshalom (3) zugrundegelegt. Bei den Detektoren (i) und (a) wird angenommen, daß mit Ausnahme des Energiebereiches schneller Neutronen im Energiebereich mittelschneller Neutronen keine wesentliche Änderung des Ansprechvermögens mit dem Moderatorokugeldurchmesser zu erwarten ist.

Für die Meßaufgabe, die Neutronen-Äquivalentdosisleistung möglichst genau zu messen und darüber hinaus auch Kalibrierfaktoren für Personendosimeter im Streustrahlungsfeld zu erhalten, erschien es besonders aussichtsreich, anstelle passiver TL-Detektoren aktive Neutronendetektoren einzusetzen. Die Bereitstellung eines solchen aktiven Meßgerätes würde eine empfindliche Lücke in der Neutronendosimetrie schließen.

3 Laboraufbau eines Dosisleistungsmessers nach dem Einkugelalbedomeßverfahren

3.1 Detektoren

Von den kommerziell erhältlichen Neutronendetektoren wurde ein ^3He - Proportionalzählrohr (Typ 0.5 NH1/1K der Firma Thomson) ausgewählt, das mit einer Gesamtlänge von 63 mm, einer effektiven Länge von 10 mm und einem äußeren Durchmesser von 10 mm das kleinste auf dem Markt angebotene Zählrohr war. Im Vergleich dazu sind BF_3 -Zählrohre, z.B. vom Typ 20122 LND, mit einer Gesamtlänge von 140 mm, einer effektiven Länge von 24 mm und einem äußeren Durchmesser von 12,8 mm schon wegen ihrer Größe für den vorgesehenen Zweck ungeeignet. Darüber hinaus ist der Wirkungsquerschnitt der $^3\text{He}(n,p)$ -Reaktion größer verglichen mit der $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ -Reaktion. ^3He Zählrohre lassen sich auch bei höherem Druck betreiben als BF_3 -Zählrohre (800 kPa bzw. 73 kPa.) Beides führt zu einem höhern Neutronenansprechvermögen bezogen auf das Detektorvolumen. Prinzipiell zeigen ^3He - und BF_3 -Zählrohre mit Durchmessern von 1 cm und kleiner sogenannter Wandeffekte durch unvollständige Absorption der ionisierenden Teilchen im Gasvolumen. Dadurch überlappt das

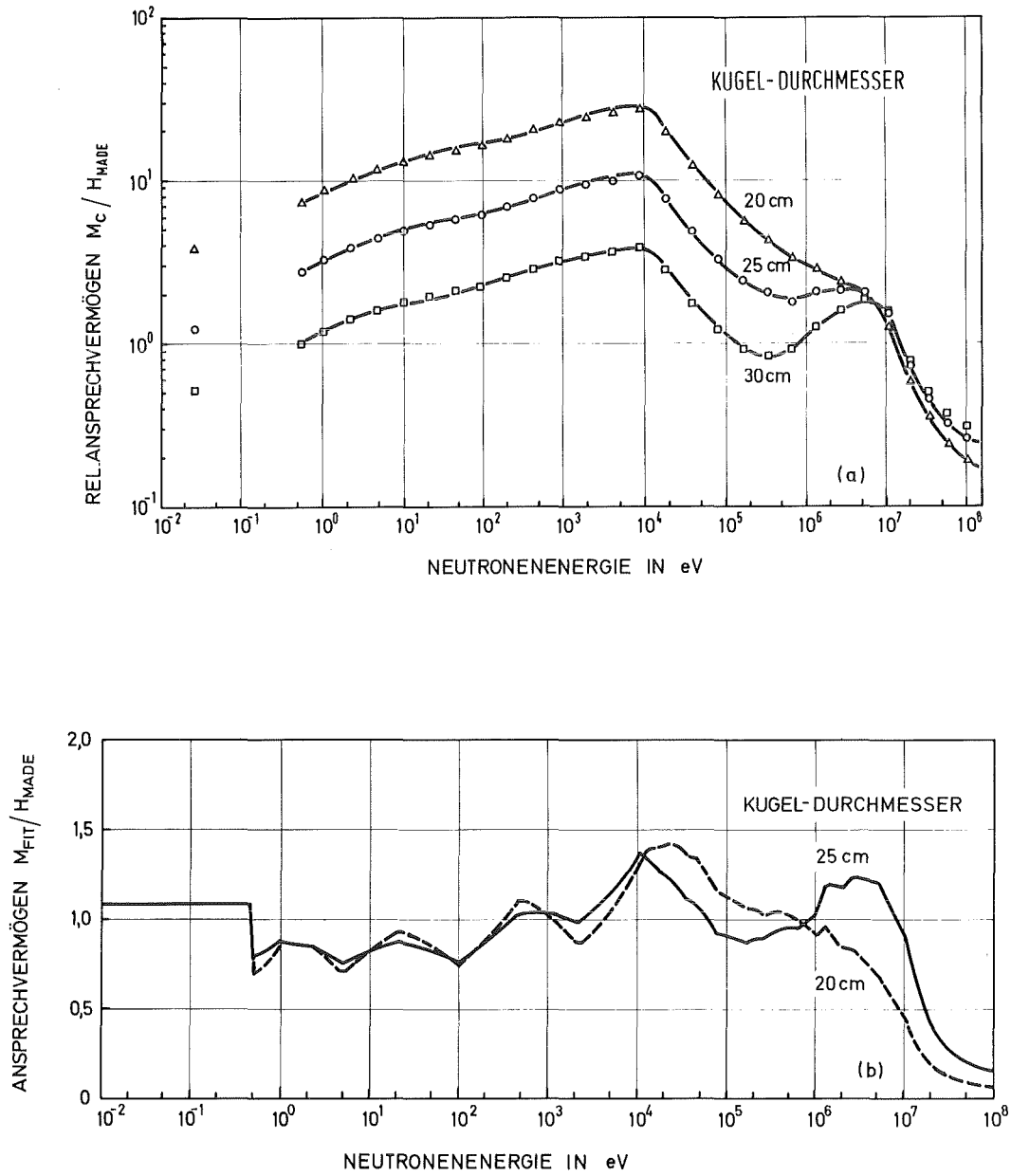


Abb. 7: Energieabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens für einen Moderatordurchmesser von 20 cm, 25 cm und 30 cm, (a) Berechnungen nach Awshalom (3), (b) bei einer Linearkombination von drei Detektoren

neutroneninduzierte Impulshöhenspektrum den photonen-induzierten Spektrumteil insbesondere beim ^3He -Zählrohr mit Protonenenergien von $\leq 0,574$ MeV verglichen mit α -Energien von $\leq 1,47$ MeV für das BF_3 -Zählrohr. Untersuchungen des Impulshöhenspektrums beider Zählrohre zeigten, daß das BF_3 -Zählrohr zwar die bessere γ -Diskriminierung besitzt, daß aber auch beim ^3He -Zählrohr bei Messungen oberhalb von Kanal 36 eine ausreichende Impuls-höhendiskriminierung der γ -Strahlung unter geringem Verlust der Neutronenempfindlichkeit möglich ist (Abb. 8). Kanal 36 in Abb. 8 entspricht der im Vorverstärker eingestellten Schwelle von 730 mV bei einer Hochspannung von 1550 V. Die eingestellte Schwelle diskriminiert 17 mSv/h einer Cs-137-Photonenstrahlung vollständig. Oberhalb Kanal 10 ist das Impulshöhenspektrum für die Photonen-Neutronen-Mischstrahlung innerhalb der statistischen Schwankungen nicht zu unterscheiden vom Impulshöhenspektrum durch Neutronen. Die verwendeten individuellen ^3He -Detektoren schwanken bei gleicher Hochspannung und Schwelle in ihrem Neutronenansprechvermögen um $\pm 15\%$. Dies kann durch einen Korrektionsfaktor berücksichtigt werden. Eine unterschiedliche Photonendiskriminierung muß u. U. durch Änderung der Schwelle korrigiert werden, um gleiche Diskriminierungseigenschaften aller Detektoren zu erreichen. Abb. 9 zeigt, daß für eine Schwelle von 730 mV - entsprechend Kanal 36 - auch bei Photonen-Äquivalentdosisleistungen von 170 mSv/h nur eine geringe Zählrate von $0,15 \text{ s}^{-1}$ erhalten wird, die einer Neutronen-Äquivalentdosisleistung von $4,5 \mu\text{Sv/h}$ vortäuschen würde. Der entsprechende Diskriminierungsfaktor für Photonenstrahlung beträgt etwa 3×10^{-5} .

Vorteilhaft ist, daß der aktive Teil des ^3He -Zählrohres mit einem Durchmesser und einer Länge von jeweils 1 cm (entspricht etwa $0,8 \text{ cm}^3$) wegen seiner Geometrie keine Richtungsabhängigkeit des Neutronennachweises erwarten läßt.

Im Vergleich zum BF_3 -Zählrohr zeigten ^3He -Detektoren zusammenfassend

- ein geringeres aktives Volumen,
- einen geringeren Eigeneffektanteil bei Nulleffekt-Messungen,
- ein höheres Neutronenansprechvermögen bezogen auf das Zählrohrvolumen,
- eine ausreichende Photonen-Diskriminierung,
- eine ausreichende Richtungsabhängigkeit durch das annähernd kubische Volumen.

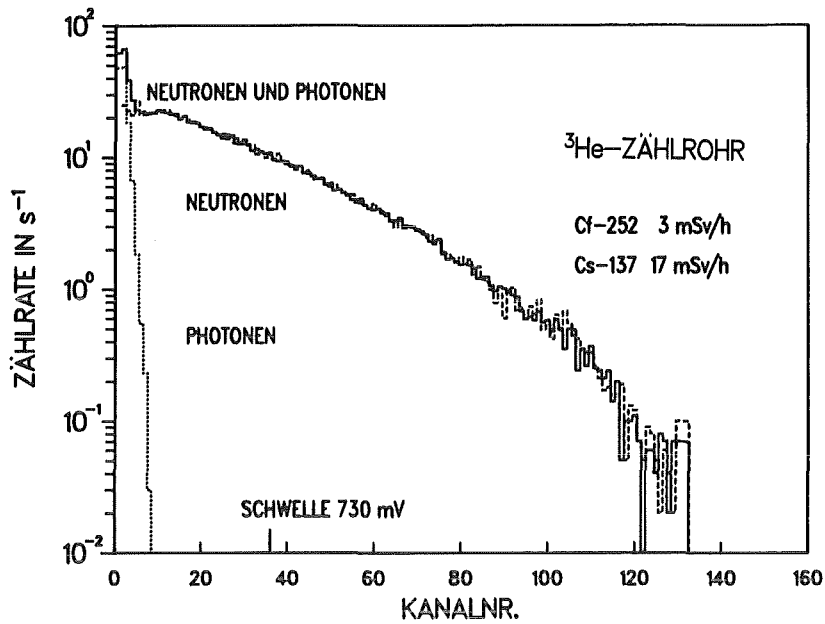


Abb. 8: Impulshöhenspektrum eines ^3He -Proportionalzählers für ein Neutronen-Photonen-Mischstrahlungsfeld sowie für Photonenstrahlung

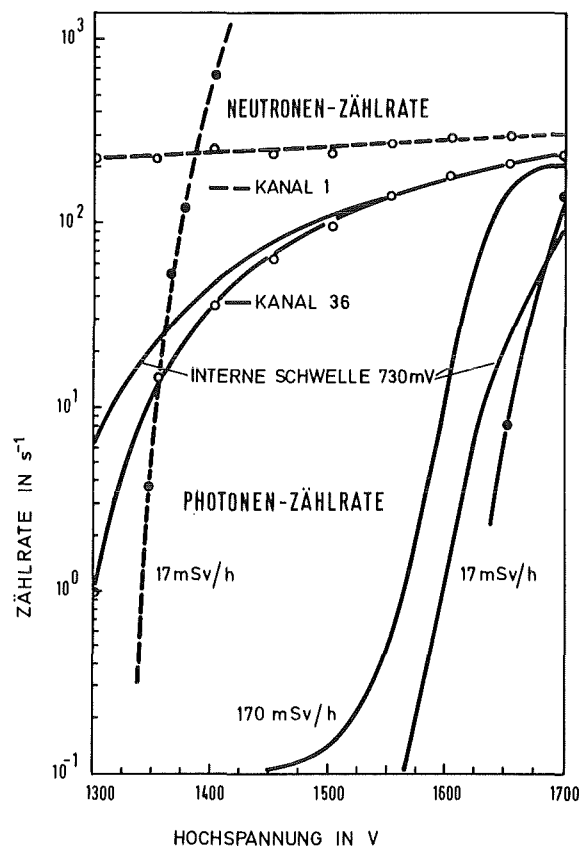


Abb. 9: Neutronen- und Photonen-Zählraten eines ^3He -Proportionalzählers in Abhängigkeit von der Hochspannung für eine unterschiedliche Impulshöhendiskriminierung und eine Photonen-Äquivalentdosisleistung von 17 mSv/h und 170 mSv/h, Neutronen-Äquivalentdosisleistung von 3 mSv/h

3.2 Meßtechnik

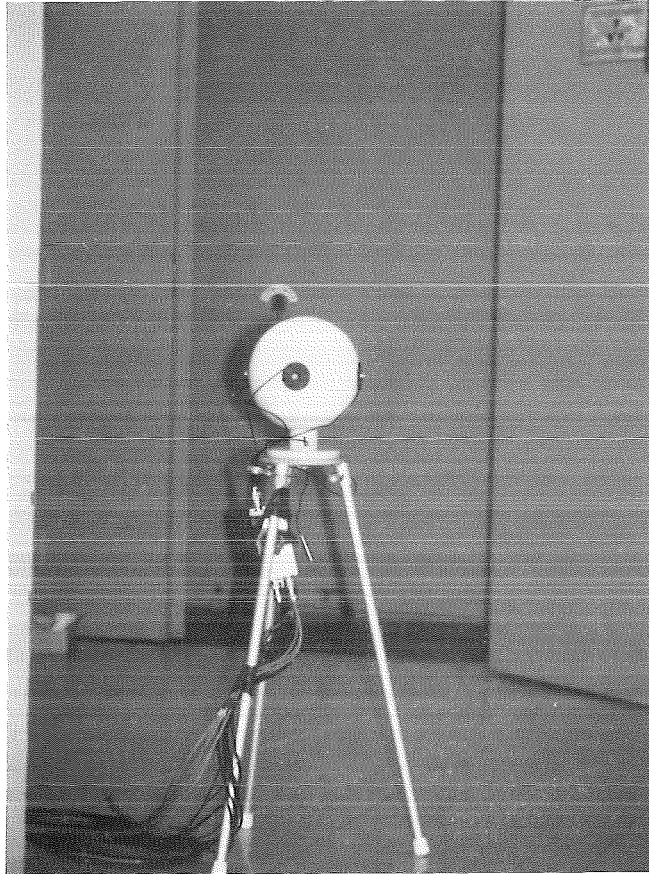
Der Laboraufbau des aktiven Einkugelalbedomeßsystems ist in Abb. 10 wiedergegeben. Hierbei ist der Verstärker und die Meßelektronik vom Moderator getrennt angeordnet. Das Blockschaltbild des Meßgeräteteiles ist in Abb. 11 dargestellt.

Bei Einsatz des ladungsempfindlichen Verstärkers ACH der Fa. Thomson zeigte sich, daß

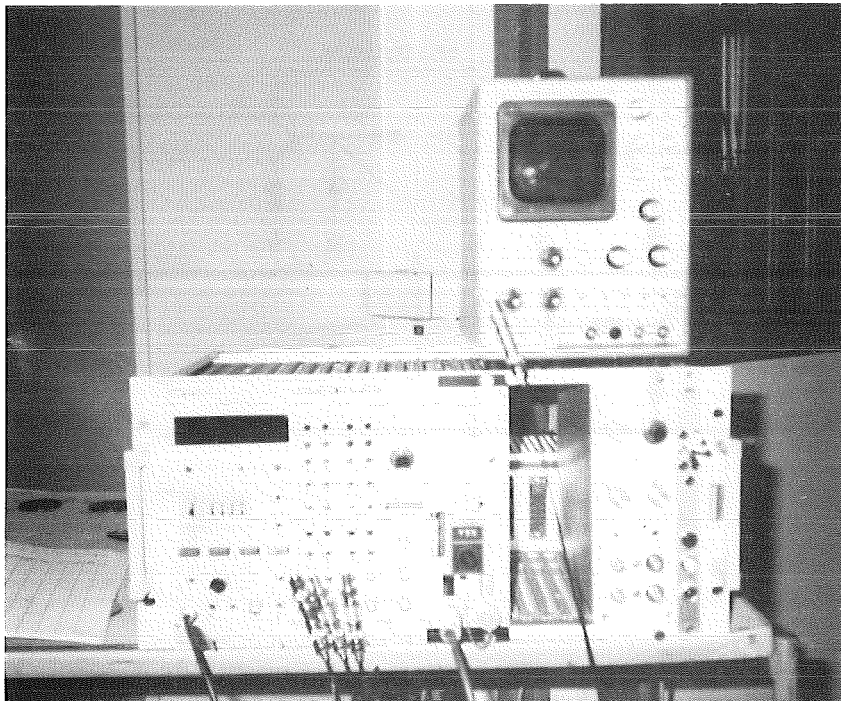
- der eingebaute Operationsverstärker OP die Photonenkomponente wegen der hohen Amplituden der α -Impulse nicht ausreichend diskriminieren konnte und
- die Ausgangsimpulse des ACH-Verstärkers wegen unterschiedlicher Aufstockung und nicht normgerechter Form vom angeschlossenen TTL-Impulszähler nicht reproduzierbar registriert werden konnten.

Diese Mängel wurden durch nachträgliche Verbesserungen der elektronischen Schaltung behoben (Abb. 11b). Zur Reduzierung der Impulsamplitude am OP-Eingang wurde ein Widerstandsteiler ($2,4 \text{ k}\Omega$) eingebaut. Um am OP-Ausgang für alle am OP-Eingang ankommenden Impulsformen eindeutige TTL-Impulse zu erhalten, war eine zusätzliche Mitkopplung (100 pF) von OP-Ausgang auf OP-Eingang erforderlich.

Mit diesem Laboraufbau wurden die nachfolgend beschriebenen Experimente zur Optimierung der Detektorpositionen durchgeführt.

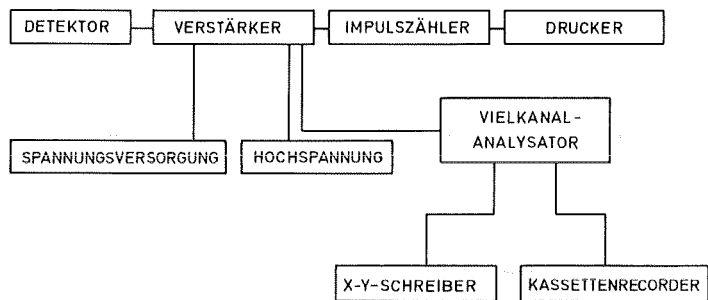


(a)

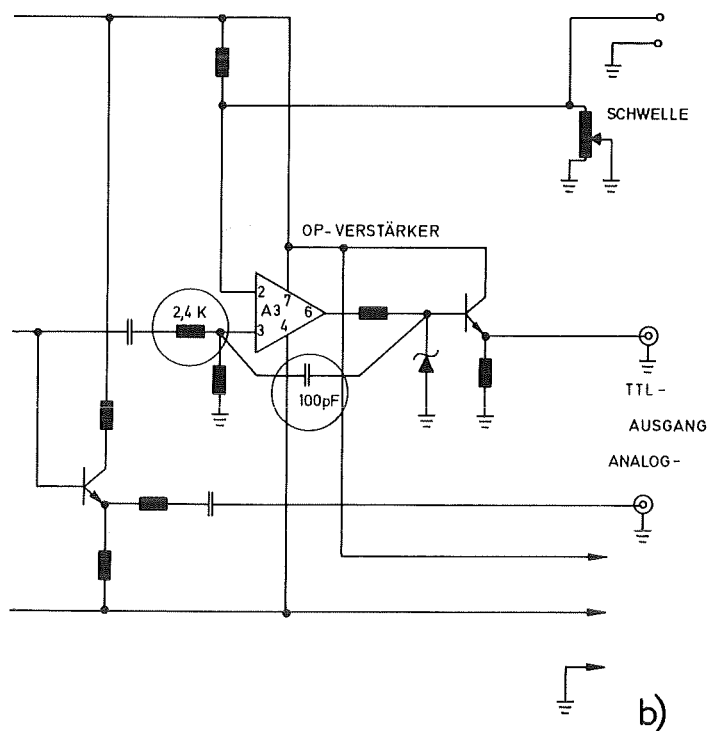


(b)

Abb. 10: Labormesssystem des aktiven Einkugelalbedomeßsystems mit ^3He -Proportionalzählern (a) und die verwendete Elektronik (b)



d)



b)

Abb. 11: a) Blockschaltbild der Elektronikeinheit und b) Schaltbild (Ausschnitt) des ladungsempfindlichen Verstärkers ACH der Fa. Thomson in der benutzten Modifikation

3.3 Moderator

Für die Versuche zur Optimierung der Detektorposition und des Moderator-durchmessers wurden drei Polyäthylenkugeln von 20 cm, 25 cm und 30 cm mit vier jeweils unter 90° angeordneten zylindrischen Öffnungen von 5 cm Durchmesser und 6 cm Tiefe in Richtung der Kugelmitte versehen, und zwar an der Unterseite der Kugel, sowie an vier Stellen am waagerechten Umfang der Kugel mit der Kennzeichnung 0°, 90°, 180° und 270° (Abb. 12). Diese Öffnungen werden mit einem Polyäthyleneinsatz geschlossen, der die Zählrohre umschließt. Für die Detektorpositionen (a) und (i) sind zusätzliche Borplastikteile an der Innenseite der Öffnung bzw. unmittelbar an der Kugeloberfläche vorgesehen.

Abb. 12 zeigt die unterschiedlichen Anordnungen der verwendeten Borplastikabsorber Nr. 1 - Nr. 9. Innerhalb der Experimente zur Optimierung der Detektoranordnung sollte die Position des Detektors (i) zwischen +d und -d, die Position des Detektors (a) zwischen 0 und +d verändert werden.

Obige Kugeldurchmesser wurden ausgewählt, da auch Kugeln mit einem kleineren Durchmesser zwischen 30 cm und 20 cm über eine Linearkombination der drei Detektoren eine ausreichend gute Energieunabhängigkeit für die Anzeige der Neutronen-Äquivalentdosisleistung erwarten lassen (Abb. 7). Bevorzugt wird ein Moderator mit kleinstem Durchmesser bzw. geringstem Gewicht. Die Kugel von 30 cm Durchmesser dient hierbei zum Vergleich der Ergebnisse mit dem passiven Dosimetersystem.

4 Optimierung von Detektoranordnung und Moderator

4.1 Meßprogramm

Mit dem im Kapitel 3 beschriebenen Laboraufbau wurden an den Bestrahlungsanlagen der PTB in Braunschweig die entsprechenden Einflußgrößen unter folgenden Gesichtspunkten untersucht:

- Variation der Detektorposition innerhalb bzw. außerhalb des Moderators, um die Änderung der Neutronenempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Detektorposition zu bestimmen und die entsprechende Detektorposition zu optimieren,

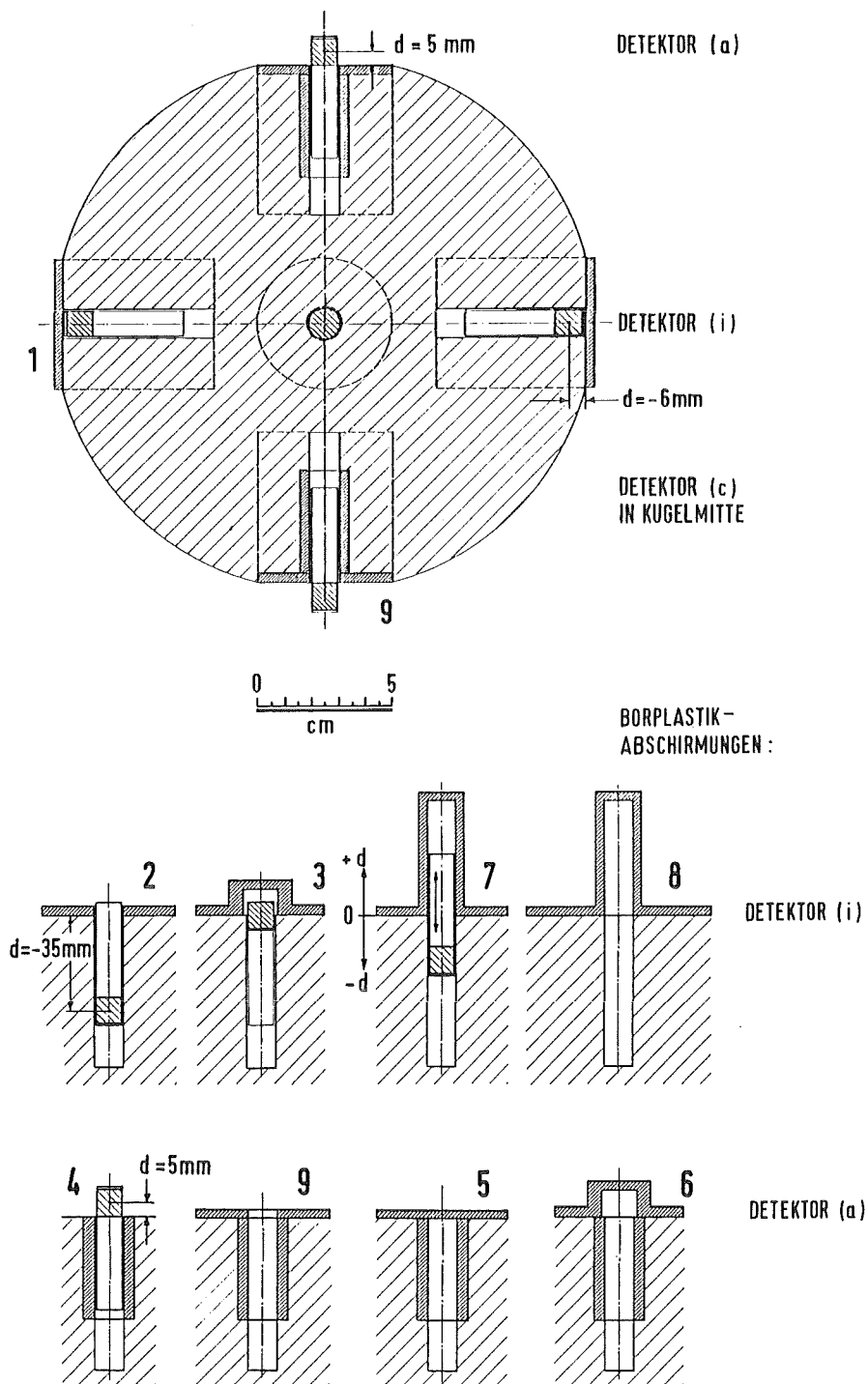


Abb. 12: Querschnitt der Moderator-Absorber-Kombination des Labormeßgerätes mit fünf ^3He -Proportionalzählern in den Detektorpositionen Nr. 1 bis Nr. 9

- Auswahl einer geeigneten Borplastikabschirmung insbesondere unter Berücksichtigung der Richtungsabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens,
- Anpassung der Neutronenempfindlichkeit an diejenige des passiven Albedoneutronendosimeters, da der aktive Albedodosisleistungsmesser mit den Anzeigen der Detektoren (i) und (a) u. a. auch zur Kalibrierung des Personalalbedodosimeters im Streustrahlungsfeld herangezogen werden soll,
- Bestimmung der Energieabhängigkeit für den Neutronendetektor in der Position (c) im Zentrum der Moderatorkugel sowie der Energie- und Richtungsabhängigkeit der an der Kugeloberfläche angeordneten thermischen Neutronendetektoren in den Positionen (i) und (a).

Die Bestrahlungsversuche erfolgten bei der PTB in Braunschweig mit monoenergetischen Neutronen der Energie 0,144 MeV, 0,25 MeV, 0,57 MeV, 1,2 MeV, 2,5 MeV, 5,5 MeV und 14,8 MeV in 1,5 m Abstand vom Target. Nach Inbetriebnahme des PTB-Reaktors konnten 1988 abschließende Kalibrierbestrahlungen mit 2 keV, 24 keV und 144 keV sowie mit thermischen Neutronen durchgeführt werden. Zwischenzeitliche Bestrahlungen mit thermischen Neutronen erfolgten im EIR Würenlingen am Reaktor Saphir.

4.2 Optimierung der Position der Detektoren an der Moderatoroberfläche

In unmittelbarer Nähe der Moderatoroberfläche ändert sich das Ansprechvermögen des ^3He -Zählrohres um 20 % bezogen auf eine Änderung der Detektortiefe von 5 mm. Dies ist in Abb. 13 für die Detektoranordnung Nr. 1 und Nr. 2 wiedergegeben. Kurve Nr.2 wurde aus technischen Gründen mit geöffneten Borplastik-Ring gemessen, weil sich das Zählrohr nur bei Verwendung der Borplastik-Scheibe bis -12 mm in den Einsatz zurückziehen läßt. Offensichtlich erhöhen jetzt thermische Feldneutronen, die durch die Ringöffnung das Zählrohr erreichen, die Anzeige in Oberflächennähe um den Faktor 2, wie die Kurve Nr.1 für eine Borplastik-Scheibe erkennen läßt. Der Sprung im Ansprechvermögen wird durch den Austausch der Borplastik-Absorber und die Änderung der Zählrohrrichtung verursacht. Die Änderung des Ansprechvermögens mit der Detektortiefe ist in Abb. 14 für die verschiedenen Neutronenenergien wiedergegeben. Sie ist für hohe Energien ausgeprägter und für thermische Neutronen am geringsten. Das Ansprechvermögen steigt für alle Detektortiefen nur geringfügig mit dem Kugeldurchmesser an.

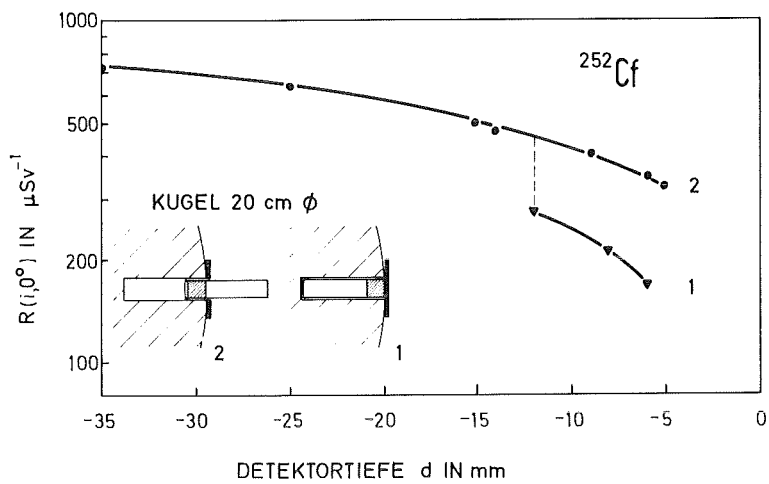


Abb. 13: Änderung des Neutronenansprechvermögens für den Neutronendetektor (i) in Abhängigkeit von der Detektortiefe für zwei unterschiedliche Detektoranordnungen Nr.1 und Nr. 2.

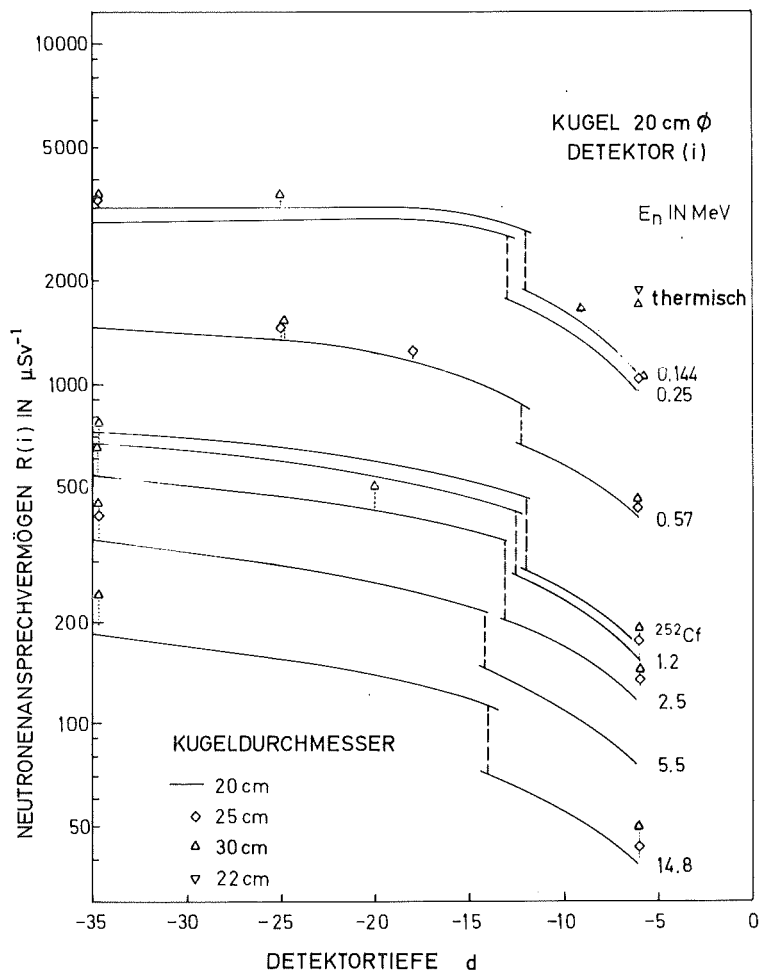


Abb. 14: Neutronenansprechvermögen $R(i, 0^\circ)$ in Abhängigkeit von der Detektortiefe für verschiedene Kugeldurchmesser und Neutronenenergien

In Abb. 15 und Abb. 16 ist die innerhalb der Bestrahlungsversuche ermittelte Energieabhängigkeit bzw. Richtungsabhängigkeit des Ansprechvermögens für die zwei Detektortiefen $d = -6$ mm und $d = -35$ mm nur für die 20 cm-Kugel wiedergegeben, da sie vom Moderatordurchmesser nahezu unabhängig ist. Erwartungsgemäß ist die Richtungsabhängigkeit, die für den Detektor (c) ein Minimum hat, für eine Detektortiefe von 35 mm geringer als für -6 mm.

Die Richtungsabhängigkeit des Ansprechvermögens ist in Abb. 17 für die Summe zweier an der Kugeloberfläche diametral angeordneten Detektoren für die unterschiedlichen Detektortiefen wiedergegeben. Die Ergebnisse geben die Richtungsabhängigkeit des Albedoeffektes wieder, wie dies für passive TL-Detektoren bekannt ist. Sie ist auch hier für die größere Moderatortiefe geringer. Abb. 18 zeigt andererseits, daß sich die Energieabhängigkeit für verschiedene Detektortiefen oberhalb 100 KeV nur geringfügig unterscheidet und deshalb die Detektortiefe nicht zur Anpassung des aktiven Albedodetektors (i) an die Energieabhängigkeit des passiven Albedodosimeters bzw. zur Verbesserung des Ansprechvermögens der Linearkombination herangezogen werden kann. Zur Anpassung an den passiven Albedodetektor wurde die Detektortiefe $d = -6$ mm gewählt.

In Abb. 19 ist zum Vergleich die Energieabhängigkeit des Neutronen-Ansprechvermögens von Detektor (i) und Detektor (a) sowie das entsprechende Verhältnis $R(a) / R(i)$ wiedergegeben. Die Borplastik-Abdeckung Nr. 4 (Abb. 12) absorbiert die Albedoneutronen. Das Ansprechvermögen des Detektors (a) gegenüber Feldneutronen ist stark vom Anteil des aktiven Detektorvolumens abhängig, das nicht von Borabsorbieren abgedeckt wird. Die Änderung der Detektortiefe um 7 mm (von $d = +5$ mm nach $d = -2$ mm) verringert das Ansprechvermögen um den Faktor 2,5. Bei Detektortiefe -2 mm (3 mm empfindliches Detektorvolumen ragen aus der Kugeloberfläche, siehe auch Abb.12) wird das gleiche Ansprechvermögen gefunden wie bei der Borplastik-Abdeckung (Nr. 6) Das Ansprechvermögen des Detektors außerhalb der Kugel im Abstand von etwa 20 cm ("Freiluftbestrahlung") ist nochmals um den Faktor 2 verringert, d.h. um den von der Moderatorkugel rückgestreuten und nicht von Bor absorbierten Anteil. Bei Rotation der Kugel wird dagegen die Energieabhängigkeit von $R(i)$ unterhalb 1 MeV um den Faktor 2,5 (siehe Abb.18) herabgesetzt. Da das Ansprechvermögen vom Detektor (a) stark von der Detektortiefe abhängt, wurde für das Labormuster eine Tiefe von +5 mm (gesamtes empfindliches Detektorvolumen außerhalb der Kugel) gewählt.

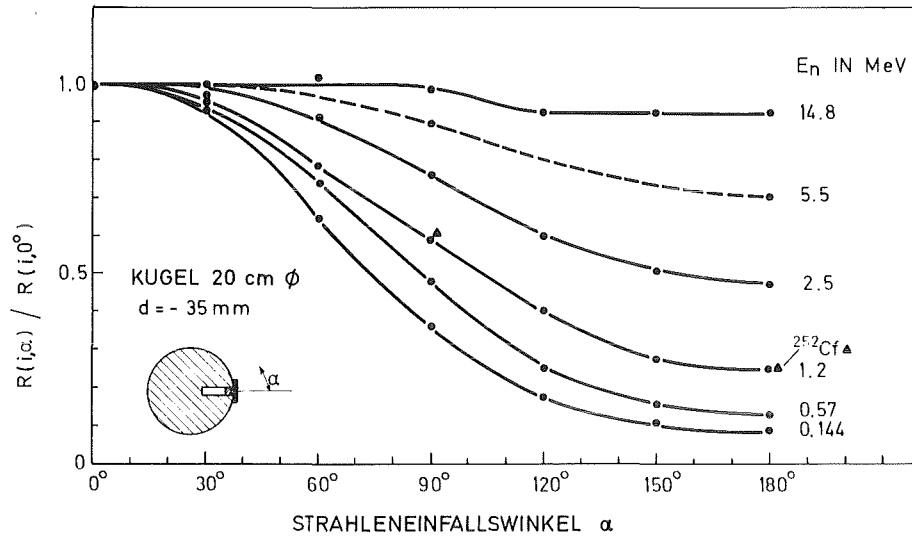


Abb. 15: Richtungsabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens für den Neutronendetektor (i) für eine Detektortiefe von $d = -35$ mm

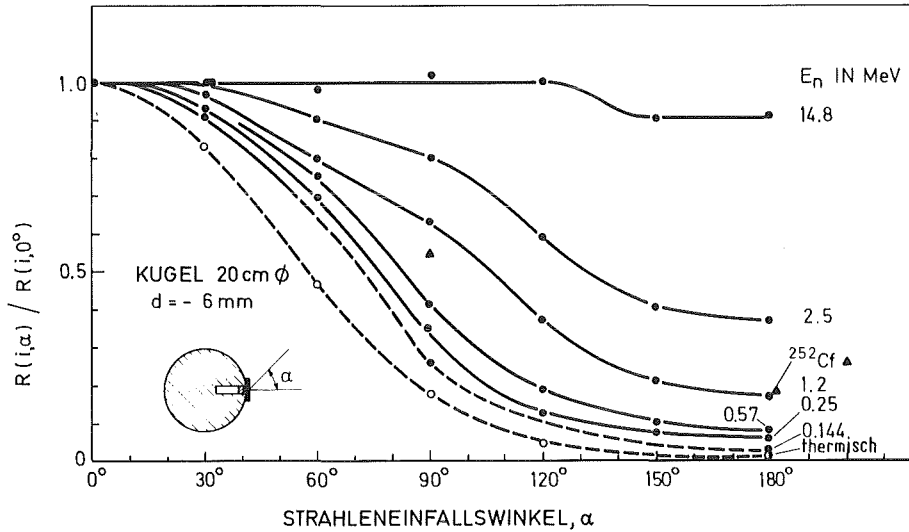


Abb. 16: Richtungsabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens für den Neutronendetektor (i) für eine Detektortiefe von $d = -6$ mm

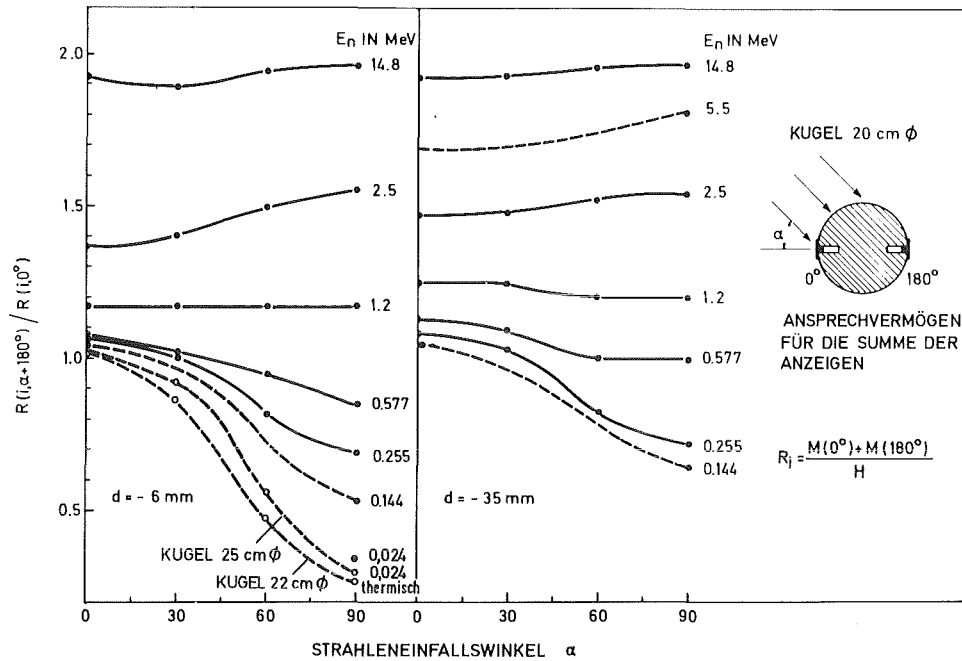


Abb. 17: Richtungsabhängigkeit des relativen Neutronenansprechvermögens für die Summe der Anzeigen von zwei diametral angeordneten Detektoren (i) bezogen auf das Neutronenansprechvermögen bei frontalem Strahleneinfall für die Detektortiefen -6 mm und -35 mm

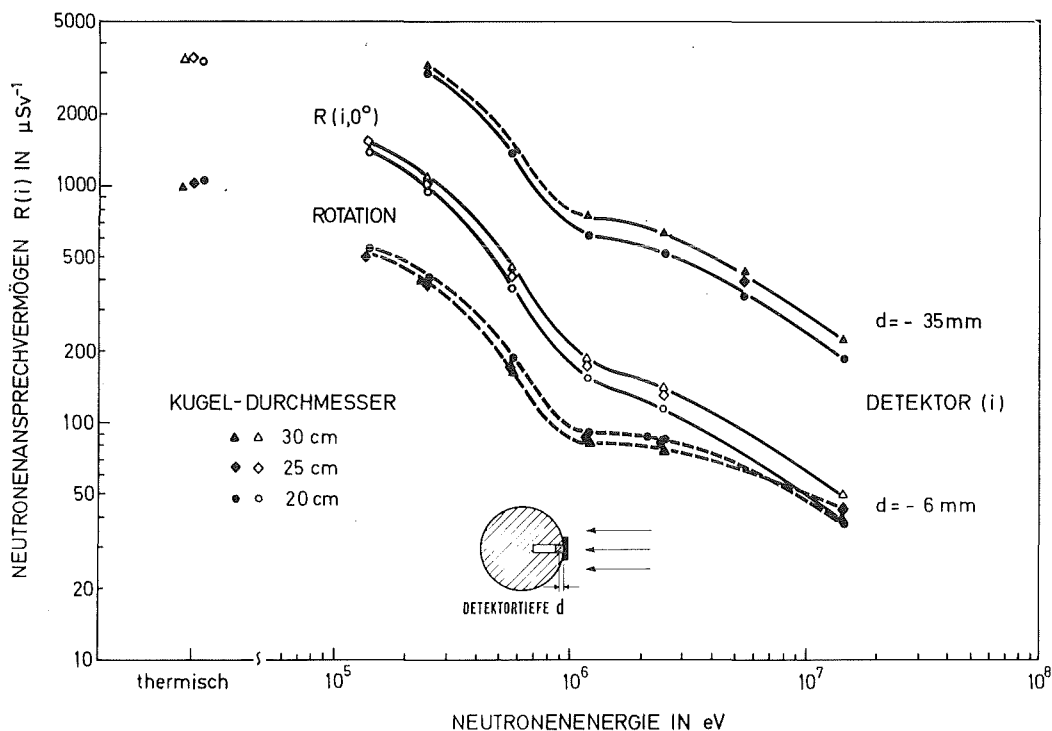


Abb. 18: Energieabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens von Detektor (i) für Kugeldurchmesser von 20 cm, 25 cm und 30 cm bei frontalem Strahleneinfall bzw. isotropen Strahleneinfall ("Rotation") des Einkugelalbedo-Dosisleistungsmessers

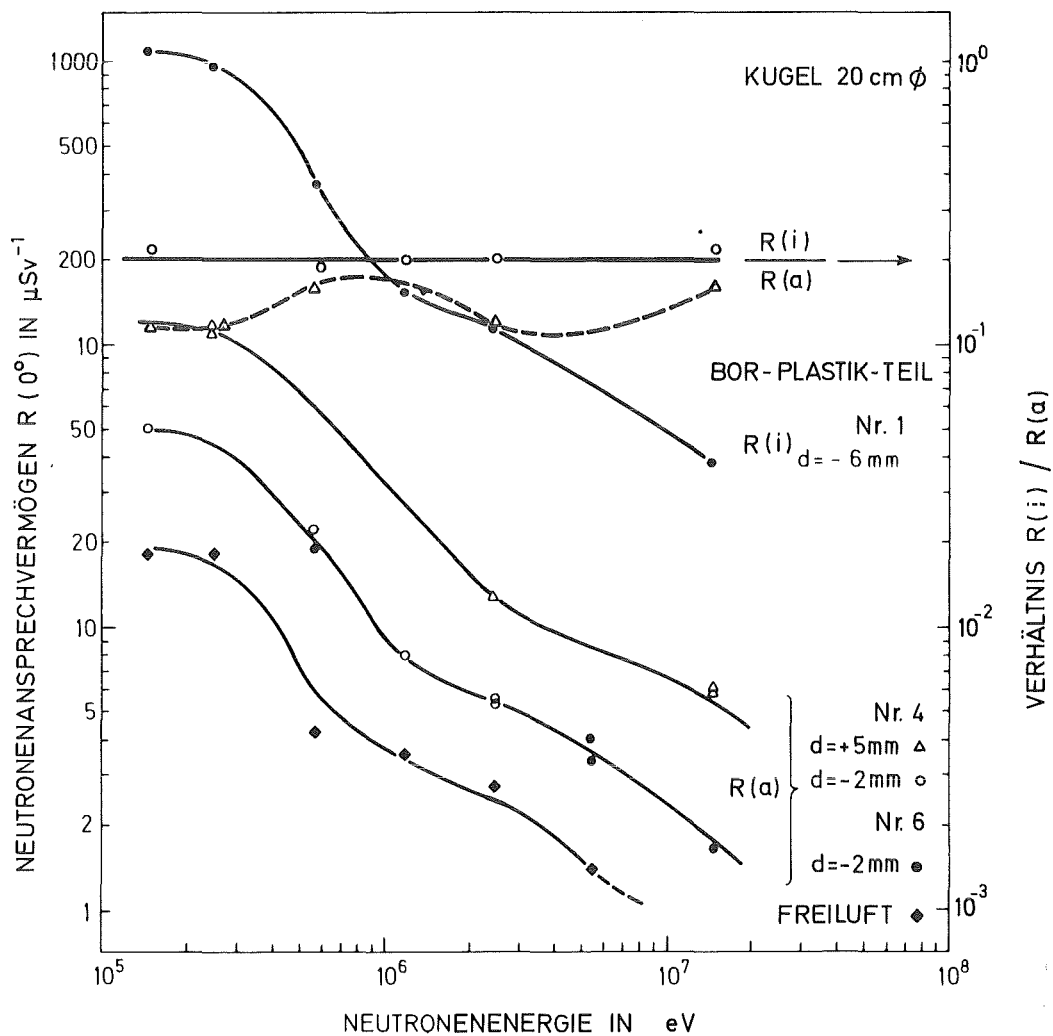


Abb. 19: Energieabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens für die Detektoren (i) und (a) sowie das Verhältnis $R(i) / R(a)$ für den Bor-Plastikteil Nr. 4 mit $d = -2\text{mm}$ (o - o) und $d = +5\text{mm}$ (-)

Um in diesem Fall den Nachweis von Rückstreuanteilen von der Kugeloberfläche zu verhindern, wurde für das Labormuster die Borplastik-Kombination Nr. 9 mit einem zusätzlichen Borplastikring versehen siehe Abb. 12.

4.3 Ergebnis der Optimierung

Im Hinblick auf den entwickelten Einkugelalbedodosisleistungsmesser wurde folgende Optimierung der Detektoranordnung (siehe auch Abb. 12) erreicht:

- Für die Position des Albedodetektors (i) wurde eine Tiefe $d = -6$ mm innerhalb des Moderators gewählt.
- Als Borplastikabdeckung des Albedodetektors (i) an der Moderatoroberfläche wurde insbesondere wegen eines hohen Detektoransprechvermögens gegenüber thermischen Neutronen anstelle eines Ringes (Nr. 2) eine Scheibe (Nr. 1) verwendet.
- Der thermische Neutronendetektor (a) wurde mit $d = +5$ mm außerhalb des Moderators angeordnet. Das Meßwertverhältnis $M(a) / M(i)$ ist vergleichbar mit demjenigen des passiven TL-Detektors in der Albedoneutronendosimeterkapselung, die in der Personendosimetrie eingesetzt wird.
- Die Borplastikabschirmung des thermischen Neutronendetektors (a) erfolgt durch eine zylindrische Abdeckung Nr. 9, die an der Moderatoroberfläche eine zusätzliche Ringabdeckung aufweist.
- Bei der Moderatorkugel wird aus Gewichtsgründen ein kleiner Durchmesser angestrebt, der eine hohe Überempfindlichkeit im Energiebereich mittelschneller Neutronen bedingt. Kriterium für die Festlegung des Moderatordurchmessers ist jedoch die Linearkombination der drei Meßwerte, die zu einer noch akzeptierbaren Energieabhängigkeit der Äquivalentdosisanzeige führt.

5 Entwicklung eines tragbaren Meßgerätes

5.1 Aufgabe

Nach der in Kap. 4 beschriebenen Optimierung des aktiven Dosisleistungsmessers hinsichtlich Detektoranordnung und Moderatorgröße sollte das Laborgerät zu einem tragbaren batteriebetriebenen Meßgerät mit integrierter Auswerteeinheit weiterentwickelt werden. Im Vergleich zu kommerziellen "Rem-

Countern“ mit einem Detektor müssen hier ein dreifacher Detektor-Elektronik-aufbau in Kompaktbauweise, eine rechnergestützte Meßwertverarbeitung von drei Meßwerten sowie die Anzeige mehrerer Meßgrößen vorgesehen werden. Da größtenteils keine fertigen Elektronikbauteile verwendet werden können, erfordert die spätere kommerzielle Fertigung eines Meßgerätes einen gewissen Entwicklungsaufwand.

Das Arbeitsprogramm des an einen Lizenznehmer vergebenen Entwicklungsauftrages umfaßte die Entwicklung und Fertigung eines Prototyps. Nach dessen Kalibrierung und Erprobung sollte die kommerzielle Fertigung von drei Meßgeräten erfolgen. Die Auslieferung des Prototyps war im Jahre 1987 vorgesehen. Die Entwicklung umfaßte im einzelnen:

- die Auslegung und Programmierung des integrierten Auswerte- und Steuerrechners,
- die Auslegung der batteriegestützten Spannungsversorgung einschließlich Netzteil,
- die Konstruktion und den Test der Gesamtschaltung der Meß- und Auswerteelektronik unter Verwendung der im Laboraufbau getesteten Baugruppen,
- die Konstruktion der mechanischen Komponenten.

5.2 Anforderungen an das Meßgerät

Das Pflichtenheft sah für die Entwicklung des kommerziellen Meßgerätes insbesondere folgende Meßaufgaben vor:

- Direktanzeige der Neutronen-Äquivalentdosisleistung ermittelt aus der Linearkombination von drei Meßwertanzeigen, wahlweise die Anzeige der Meßgrößen H_{MADE} , $H^*(10)$ bzw. H_E ,
- Direktanzeige des Albedoneutronenkalibrierfaktors für Personendosimeter mit $N = H/M(i) \times k$.

Weitere Anforderungen an das Meßgerät sind in Tab. 3 wiedergegeben.

Tab. 3 Charakteristik des Neutronen-Äquivalentdosisleistungsmessers nach dem Einkugelalbedomeßverfahren

Anzeige	digital, dreieinhalbstellig mit automatischer Bereichsumschaltung in $\mu\text{Sv/h}$
Meßbereich	1 $\mu\text{Sv/h}$ bis 0,1 Sv/h
Neutronenenergiebereich	0,025 eV bis 14 MeV
Energieabhängigkeit für 25 cm-Kugel	$\pm 50\%$
Richtungsabhängigkeit	vernachlässigbar bei Rotation der Detektoranordnung bzw. bei 4 Messungen
Nullanzeige	$\cong 0,01 \mu\text{Sv/h}$
Gammadiskriminierung	$3 \cdot 10^{-5}$
Ansprechzeit bei 1 $\mu\text{Sv/h}$ und 30% stat. Fehler	< 1 min
Lebensdauer des Zählrohres (-10% Abfall)	$10^{19} \text{ n}_{\text{th}}/\text{cm}^2$
Temperaturbereich	0 °C bis 50 °C
Batterie-Einsatzdauer	> 20 h

5.3 Durchführung

Für die Entwicklung und Fertigung des Prototyps sah die Terminplanung einen Zeitraum von sieben Monaten vor. Nach zehnmonatiger Laufzeit wurde vom Lizenznehmer ein erster Laboraufbau vorgestellt, der nicht funktionsfähig war und nicht den vertraglich festgelegten Leistungsumfang entsprach. Danach bestand keine Aussicht, einen funktionsfähigen Prototyp in absehbarer Zeit zu erhalten. Aus diesen Gründen wurde der innerhalb der Terminplanung vorgesehene Entscheidungspunkt über die Fortsetzung des Vorhabens wahrgenommen und der Entwicklungsauftrag vorzeitig beendet. Da auch kein neuer Lizenznehmer kurzfristig interessiert werden konnte, war es im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens nicht möglich, den kommerziellen Prototyp eines batteriebetriebenen Handgerätes bereitzustellen.

6 Ergebnis des Entwicklungsvorhabens

6.1 Laborprototyp

Das bereitgestellte Labormeißgerät besteht aus einer Moderatorkugel mit fünf ^3He -Zählrohren und der entsprechenden Meßelektronik. Hierbei werden vier Zählrohre am Umfang der Moderatorkugel angeordnet. Jeweils zwei diametral angeordnete Zählrohre sind mit der gleichen Absorberkombination versehen. Abb. 12 zeigt die entsprechenden Borplastikkombinationen Nr. 1 und Nr. 9 für den Albedoneutronendetektor (i) in einer Moderatortiefe $d = -6$ mm bzw. den thermischen Neutronendetektor (a) in $d = 5$ mm Höhe über der Moderatoroberfläche.

Zur Verringerung der Richtungsabhängigkeit wird die Meßwertanzeige gleichartiger, diametral angeordneter Zählrohre addiert und zur Anzeige gebracht. Das Labormeißgerät kann mit verschiedenen Moderatorkugeln eingesetzt werden.

Von besonderer Bedeutung war hierbei die Verbesserung des kommerziell erhältlichen, ladungsempfindlichen Verstärkers, die zu einer reproduzierbaren Impulsform und einer ausreichenden Diskriminierung der Photonenstrahlung führte.

6.2 Energieabhängigkeit der Einzeldetektoren

Abb. 20 und Abb. 21 zeigen die mit dem Labormeißgerät ermittelte Energieabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens für die Detektoren (i) und (a) bzw. (c) für eine Frontaleinstrahlung. Die Meßergebnisse der PTB- Kalibrierbestrahlungen mit monoenergetischen und thermischen Neutronen wurden hierbei im Bereich mittelschneller Neutronen durch entsprechende Berechnungen ergänzt, die von Awshalom (3) für verschiedene Moderatorkugeln durchgeführt wurden.

Mit dem Kugeldurchmesser ändert sich insbesondere das Ansprechvermögen des Detektors (c), während die Detektoren (a) und (i) nur eine geringe Änderung im Bereich schneller Neutronen zeigen. Die Ergebnisse für die ^3He -Zählrohre in der Moderatorkugel von 30 cm Durchmesser sind hinsichtlich Energieabhängigkeit vergleichbar mit denjenigen von Thermolumineszenzdosimetern (siehe auch Abb. 3). Das ^3He -Zählrohr zeigt jedoch im Vergleich zu dem passiven TL-Dektoren ein etwas höheres relatives Ansprechvermögen in der Detektorposition (a) und (i) bezogen auf das Ansprechvermögen in Position (c).

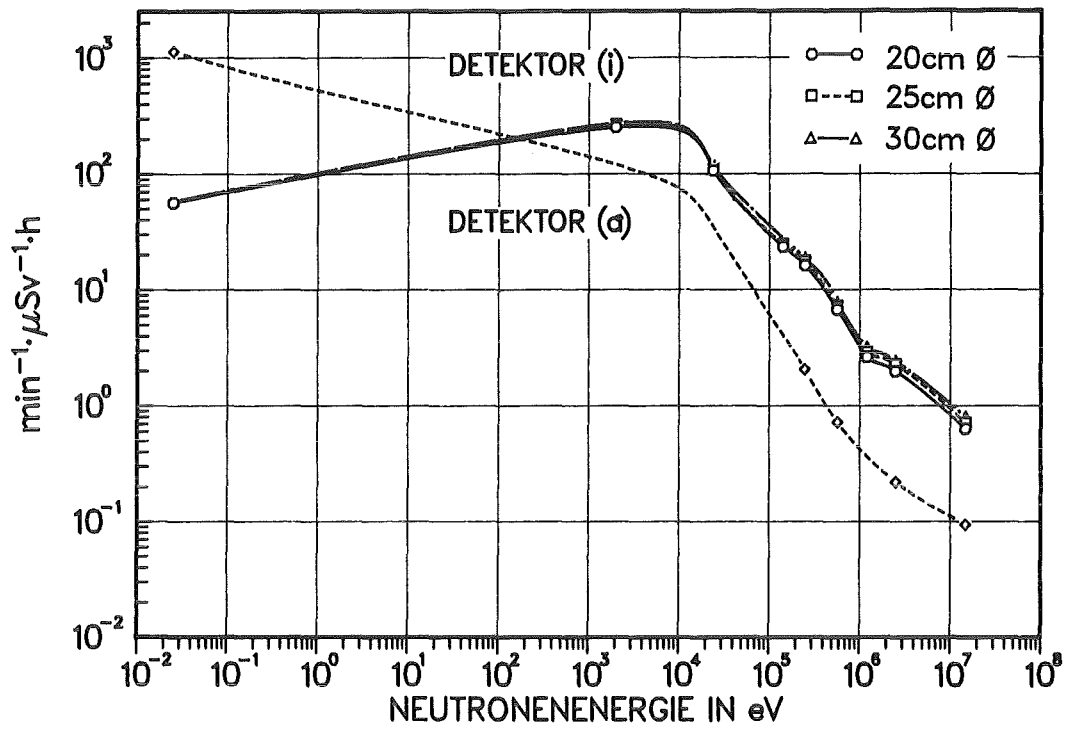


Abb. 20: Ansprechvermögen des ³He-Zählrohres in Detektorposition (i) und (a) für verschiedene Kugeldurchmesser bei Frontaleinstrahlung

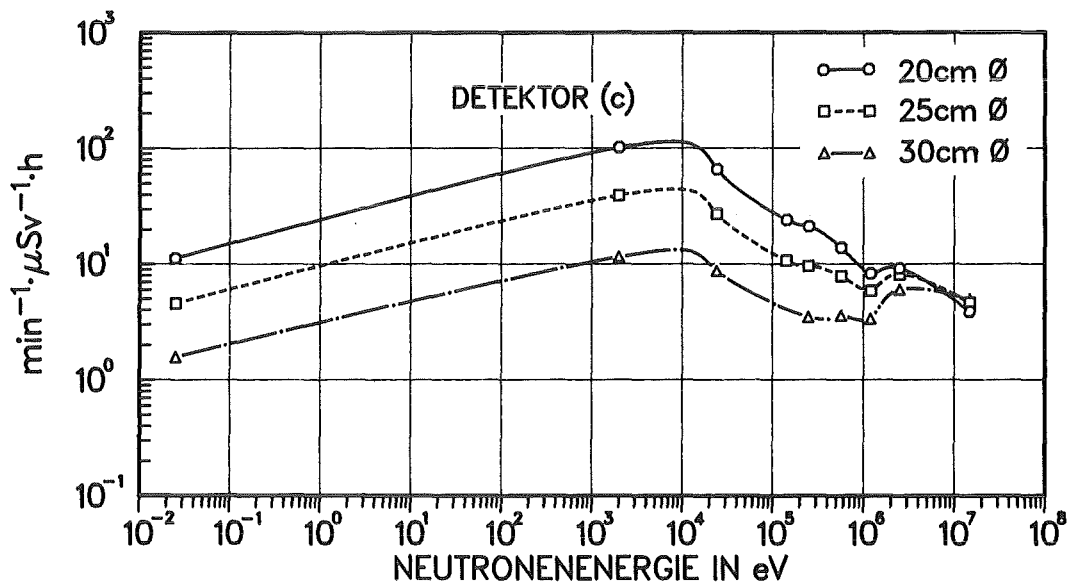


Abb. 21: Ansprechvermögen des ³He-Zählrohres in Detektorposition (c) für verschiedene Kugeldurchmesser bei Frontaleinstrahlung

6.3 Direktanzeige der Neutronen-Äquivalentdosisleistung

Zur energieunabhängigen Anzeige der Neutronen-Äquivalentdosisleistung werden die Meßwerte der Detektoren in den Positionen (c), (i), und (a) mit je einem konstanten Faktor multipliziert und über eine Linearkombination aufaddiert. Mit der in Kap. 2 beschriebenen Least-Square-Fit-Technik werden die konstanten Faktoren k_i bestimmt (siehe auch Tab. 2). Die über die Linearkombination ermittelte Energieabhängigkeit der Neutronen-Äquivalentdosisleistungsanzeige bezogen auf die Meßgröße H_{MADE} ist in Abb. 22 für die entsprechenden Kugeldurchmesser und einem frontalen Strahleneinfall wiedergegeben.

Die Darstellung berücksichtigt hierbei eine relative Zufallskomponente der Meßunsicherheit von $\pm 10\%$ für den Detektor (c) bzw. von jeweils $\pm 3\%$ für die Detektoren (i) und (a) mit höherem Ansprechvermögen, die bei Anwendung der Linearkombination zu einer Änderung der Energieabhängigkeit führen kann. Dieser Einfluß ist bei einem Kugeldurchmesser von 30 cm gering, erhöht sich jedoch bei 25 cm und 20 cm insbesondere im Energiebereich unterhalb 10 keV. Diese Meßunsicherheit erhöht jedoch nicht den Gesamtbetrag der Energieabhängigkeit und ist im interessierenden Energiebereich oberhalb 10 keV vergleichsweise gering.

Das Ansprechvermögen für die Anzeige H_{MADE} ist in Abb. 23 für verschiedene Kugeldurchmesser bei "Rotation" der Detektoranordnung (Mittelung der Anzeigen unter 0° , 90° , 180° , 270°) wiedergegeben. Bei Anwendung des Einkugelalbedomeßverfahrens auf einen Kugeldurchmesser von 30 cm zeigen TL-Detektoren und ^3He -Detektoren eine vergleichbare Energieabhängigkeit. Auch bei einer 25 cm-Kugel zeigt das Ansprechvermögen bis 10 MeV eine Energieabhängigkeit von + 100% und -30% gegenüber einem Faktor 8 bei kommerziellen "Rem-Countern".

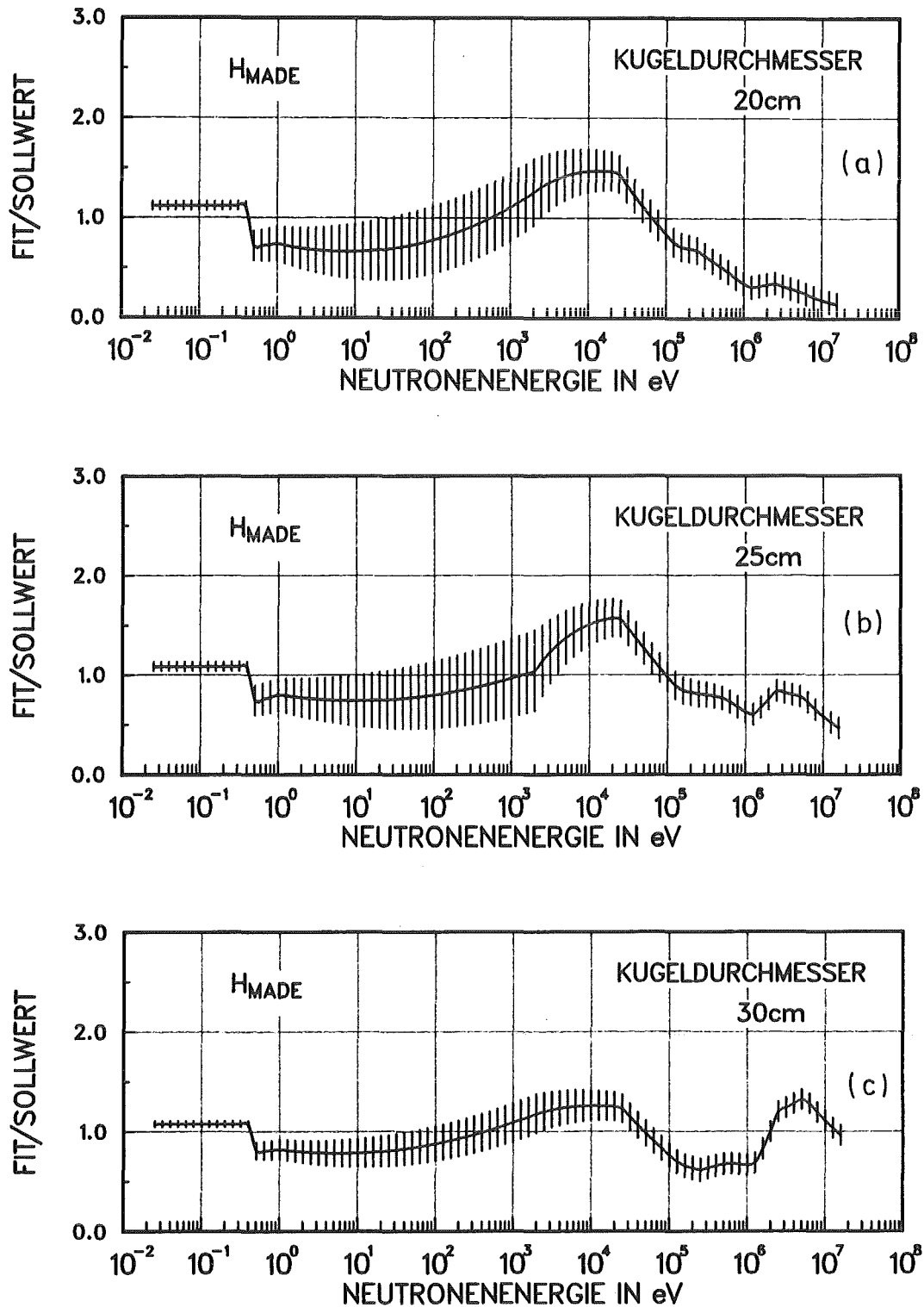


Abb. 22: Energieabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens eines Neutronen-Äquivalentdosisleistungsmessers nach dem Einkugelalbedomeßverfahren zur Messung von H_{MADE} mit einem Kugeldurchmesser von 20 cm (a), 25 cm (b) und 30 cm (c) für Frontaleinstrahlung und Addition der Meßwerte zweier diametral angeordneter Detektoren

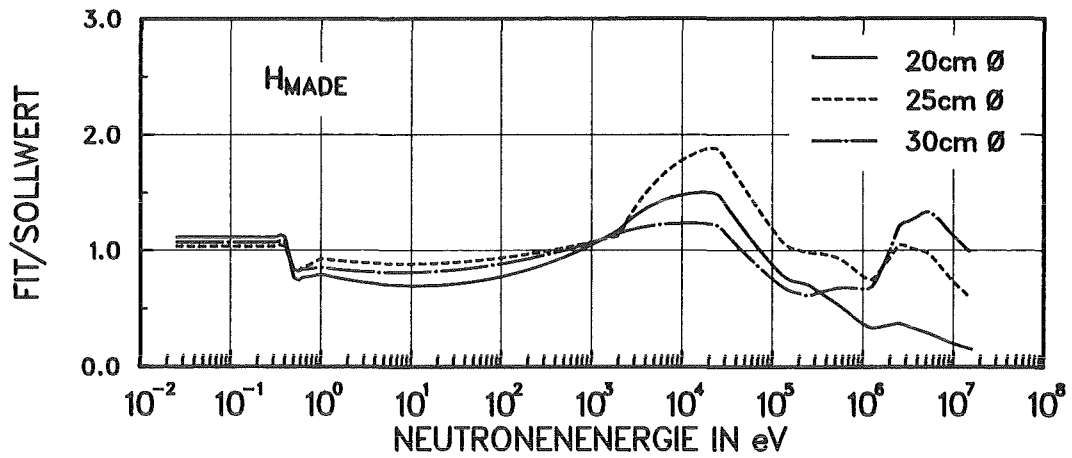


Abb. 23: Relatives Neutronenansprechvermögen des Einkugelalbedo-Dosisleistungsmessers zur Messung von H_{MADE} mit einem Kugeldurchmesser von 20 cm, 25 cm und 30 cm für einen isotropen Strahleneinfall ("Rotation" der Detektoranordnung) als Funktion der Neutronenenergie, ermittelt aus der Linear-kombination von drei Detektoren.

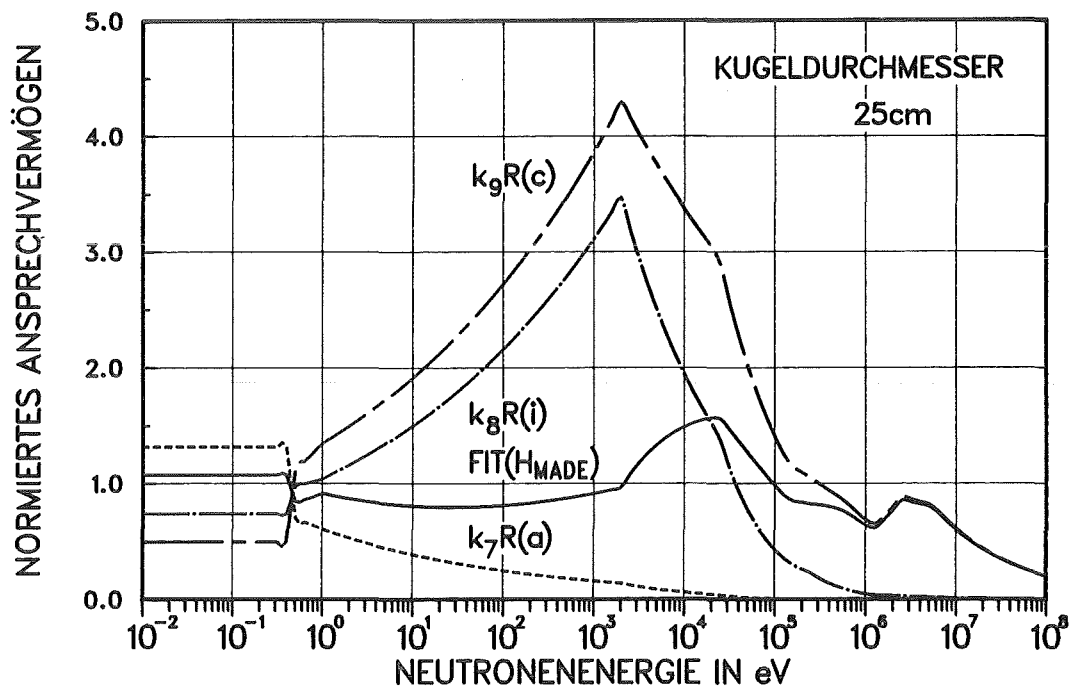


Abb. 24: Normiertes Ansprechvermögen für die Detektoren (c), (i) und (a) sowie für die Linearkombination FIT (H_{MADE}) als Funktion der Neutronenenergie

Zur Verdeutlichung des Einkugelalbedomeßverfahrens insbesondere des unterschiedlichen Einflusses der Detektoranzeigen auf das Ergebnis der Linearkombination werden in Abb. 24 die mit den entsprechenden Faktoren k_i gewichteten Meßwertanteile getrennt dargestellt. Ausgehend vom Ansprechvermögen des Detektors (c) wird das gewichtete Ansprechvermögen des Detektors (i) subtrahiert (negativer Faktor k) und das des Detektors (a) addiert. Hier wird deutlich, daß die Detektoranzeige (i) ausschließlich im Energiebereich unterhalb 10 keV zur Korrektur der Energieabhängigkeit des Detektors (c) herangezogen wird. Die Subtraktion der Meßwerte führt oberhalb 100 keV zu keiner wesentlichen Änderung der Energieabhängigkeit, die hier durch das Ansprechvermögen des Detektors (c) bestimmt wird. Der Beitrag des Detektors (a) beschränkt sich auf den Energiebereich energiearmer Neutronen.

Die Darstellung der Ergebnisse in Abb. 23 verdeutlicht, daß eine 20 cm-Kugel oberhalb 500 keV im Ansprechvermögen rasch abfällt. Bei entsprechender Interpolation der Meßwerte ist zu erwarten, daß ein Kugeldurchmesser von etwa 22 cm hinsichtlich Energieunabhängigkeit der Neutronen-Äquivalentdosisanzeige noch ein ausreichend günstiges Verhalten aufweist. Ein Kugeldurchmesser von etwa 27 cm könnte andererseits die Unterbewertung der 30-cm-Kugel im Energiebereich 0,1 bis 1 MeV verbessern.

Abb. 25 zeigt für die 25 cm-Kugel die entsprechende Energieabhängigkeit für die Meßgrößen H_{MADE} , $H^*(10)$ und H'_E . Bei Änderung der Linearkombination kann demnach auch die Meßgröße $H^*(10)$ mit einer vergleichbaren Energieabhängigkeit angezeigt werden, während die Anzeige von H'_E oberhalb 1 MeV rasch abfällt.

6.4 Richtungsabhängigkeit der Neutronen-Äquivalentdosisleistungsanzeige

Bei passiven TL-Detektoren und einer Moderator-Kugel von 30 cm Durchmesser zeigte sich, daß bei Verwendung von jeweils zwei diametral an der Kugeloberfläche angeordneten Detektoren (i) und (a) insbesondere in Streustrahlungsfeldern keine Unterbewertung der Neutronen-Äquivalentdosis bei der Bestimmung des Kalibrierfaktors für Albedodosimeter zu erwarten ist (9).

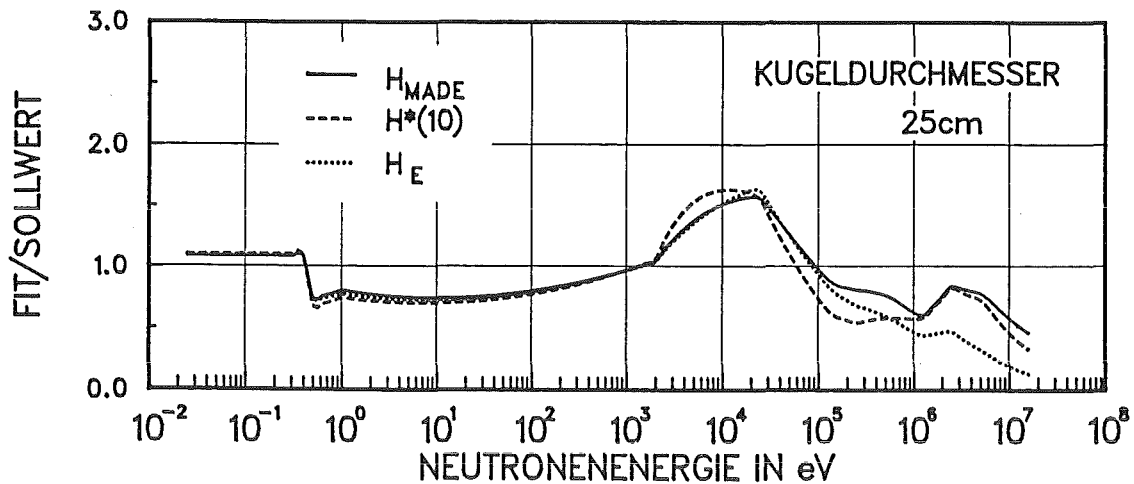


Abb. 25: Energieabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens des Einkugelalbedo-Dosisleistungsmessers mit einem Kugeldurchmesser von 25 cm zur Messung von H_{MADE} , $H^*(10)$ und H_E .

Diese Ergebnisse sind nicht unmittelbar auf eine Ortsdosismessung mit drei ^3He -Detektoren übertragbar, da die Richtungsabhängigkeit der aktiven Detektoren (i) und (a) zu einer anderen Energieabhängigkeit für die Linearkombination führt.

Zur Erzielung einer isotropen Anzeige des Neutronen-Äquivalentdosisleistungsmessers nach dem Einkugelalbedomeßverfahren ergibt sich bei Verwendung von nur drei Detektoren die Notwendigkeit, die Detektoranordnung zu rotieren bzw. vier Messungen in Schritten von 90° durchzuführen. Der entsprechende Meßmodul, der die dafür vorgesehene Linearkombination von drei Meßwerten anzeigt, müßte in diesem Fall die Summe von vier zeitlich aufeinanderfolgenden Meßwertanzeigen verarbeiten.

Auch bei Anwendung der Linearkombination für eine rotierende Detektoranordnung wird bei Verzicht auf Rotation eine Richtungsabhängigkeit für den Fall erwartet, daß die Strahlung nicht isotrop sondern nur aus einer Richtung einfällt. Ähnlich der Vielkugelmeßtechnik erfordert das dann hier angewandte Meßverfahren eine Vierfachmessung. Eine Reduzierung auf weniger als vier Messungen muß wie bei der Vielkugelmeßtechnik zwangsläufig zu Fehlanzeigen führen.

Im Vergleich zur Vielkugelmeßtechnik bietet der beschriebene Dosisleistungsmesser den Vorteil, anstelle von drei auszuwechselnden Kugeln und drei aufeinanderfolgenden Messungen nur eine Kugel zu verwenden, die bei Rotation nur eine Messung, bei schrittweiser Drehung jedoch vier Messungen bzw. für eine isotrope 4π -Anzeige sechs Messungen erfordert.

7 Zusammenfassung

Der Einsatz des Einkugelalbedomeßverfahrens beschränkte sich zunächst auf die genaue Bestimmung der Ortsdosis zur Kalibrierung von Albedoneutronendosimetern in Neutronenstreustrahlungsfeldern. Der Ersatz der passiven TL-Detektoren durch ^3He -Zählrohre führte zu einem Neutronen-Äquivalentdosisleistungsmesser mit vergleichbaren dosimetrischen Eigenschaften, der sowohl zur Messung der Ortsdosisleistung als auch unmittelbar zur Ermittlung von Kalibrierfaktoren für Personendosimeter einsetzbar ist. Ein tragbares Meßgerät, ausgerüstet mit einer modernen Elektronik in Kompaktbauweise, könnte innerhalb der Strahlenschutzüberwachung die bisher eingesetzten Moderator-typdetektoren ersetzen und die Energieabhängigkeit um mindestens eine Größenordnung verringern.

Der vorliegende Bericht gibt die Ergebnisse von Kalibrierbestrahlungen wieder, die im Rahmen eines Forschungsvorhabens mit dem Ziel durchgeführt wurden, die Anordnung der Detektoren auf der Kugeloberfläche zu optimieren und den Moderator-kugeldurchmesser von bisher 30 cm zu verringern. Dazu sollte die Energie- und Richtungsabhängigkeit eines Neutronen-Äquivalentdosisleistungsmessers mit ^3He -Detektoren bestimmt werden.

Die Optimierung der Detektoranordnung an der Kugeloberfläche führte beim Albedoneutronendetektor (i) und beim thermischen Neutronendetektor (a) zu einer entsprechenden Borplastikkapselung mit Detektortiefen innerhalb bzw. außerhalb des Moderators von $d_i = -6$ mm und $d_a = 5$ mm.

Für die bisherige Moderator-kugel von 30 cm Durchmesser konnte mit passiven TL-Detektoren und aktiven ^3He -Detektoren Übereinstimmung in der Energieabhängigkeit des Neutronenansprechvermögen der Detektoren (i) und (a) an der Kugeloberfläche gefunden werden. Das für passive Detektoren der Größe $3 \times 3 \times 0,9$ mm³ gefundene Meßverfahren zur Herabsetzung der Energieabhängigkeit

des Detektors (c) in der Moderatorkugelmittle läßt sich daher auch auf aktive Detektoren der Größe 10 mm x 10 mm \varnothing übertragen

Die Kalibrierbestrahlungen im interessierenden Energiebereich mit Moderatorkugeln von 20 cm, 25 cm und 30 cm Durchmesser zeigten, daß die Linearkombination der Meßwertanzeigen des Detektors (c) im Moderatorzentrum sowie des Albedoneutronendetektors (i) und des thermischen Neutronendetektors (a) auf Moderatoroberfläche bei der kleinsten Kugel von 20 cm Durchmesser noch eine Energieabhängigkeit bis zu einem Faktors 4 aufweist. Bei einer 25 cm-Kugel führt die Linearkombination zu einer Energie-abhängigkeit der Neutronen-Äquivalentdosisleistungsanzeige, die mit einer maximalen Meßwertabweichung von +50% bei 30 KeV und -50% bei 14 MeV eine wesentliche Verbesserung gegenüber den bisherigen "Rem-Countern" mit einer Energieabhängigkeit von etwa einem Faktor 8 für H_{MADE} und einem Faktor 15 für H^* (10) darstellt.

Neuere Meßergebnisse im Streustrahlungsfeld eines Leichtwasserreaktors zeigten, daß im Vergleich zur Einkugelalbedomeßtechnik die Anzeige H (c) eines "Rem-Counters" von 30 cm Durchmesser die Neutronen-Äquivalentdosis im Mittel um 20% überbewertet (8). Bei kommerziellen Geräten mit einem kleineren Moderator wird im Vergleich zur 30 cm-Kugel die Neutronen-Äquivalentdosisleistung um einen Faktor 1,6 bis 1,8 überschätzt.

Im Vergleich zu bisherigen Dosisleistungsmessern muß als vorteilhaft herausgestellt werden, daß das Einkugelalbedomeßverfahren eine Änderung der Linearkombination und damit die gleichzeitige Anzeige der Neutronen-Äquivalentdosisleistung in verschiedenen Meßgrößen insbesondere H_{MADE} , H^* (10) und H_E zuläßt. Darüber hinaus ergeben sich auch andere Größen zur Beschreibung des Streustrahlungsfeldes wie z.B. die Energiedosis D_{MADE} , D^* (10), ein effektiver Q-Wert bzw. eine angenäherte effektive Neutronenenergie.

Andererseits kann die Anzeige des Dosisleistungsmessers bei Änderung der Qualitätsfaktoren für Neutronen bzw. der entsprechenden Neutronenfluenz-Äquivalentdosis-Konversionsfaktoren - was in den nächsten Jahren zu erwarten ist - über die Änderung der Linearkombination auf die jeweils neu definierten Meßgrößen H_{MADE} , H^* (10) und H_E angepaßt werden.

Die Verwendung eines ^3He -Zählrohres mit ladungsempfindlichen Vorverstärkern erlaubt eine ausreichende Diskriminierung des Photonenstrahlenanteiles in Neutronen-Photonen-Mischstrahlungsfeldern bis zu Photonendosisleistungen von mehr als 200 mSv/h entsprechend einer Photonen-diskriminierung von 3×10^{-5} bezogen auf den Neutronen-Äquivalentdosisanteil.

Das vorliegende Pflichtenheft für ein tragbares Meßgerät zeigt, daß ein Neutronen-Äquivalentdosisleistungsmesser nach dem Einkugelalbedomeßverfahren allen wesentlichen Anforderungen hinsichtlich einer Bauartprüfung genügt. Gegenüber kommerziellen, batteriebetriebenen "Rem-Contern" mit einem Gesamtgewicht von etwa 6,5 kg für die Moderator-Detektoranordnung einschließlich Elektronik ist hier mit einem etwas höherem Gewicht zu rechnen.

Im Hinblick auf eine Anwendung innerhalb der Strahlenschutzüberwachung ergeben sich für den Neutronen-Äquivalentdosisleistungsmesser nach dem Einkugelalbedomeßverfahren zusammenfassend folgende Gesichtspunkte:

- Die Energieabhängigkeit der Neutronen-Äquivalentdosisleistungsanzeige ist im Vergleich zu kommerziellen Meßgeräten um mehr als eine Größenordnung geringer.
- Das Meßgerät ermöglicht die Direktanzeige von Albedoneutronen-Kalibrierfaktoren für die Personenüberwachung sowie zusätzliche Aussagen über das Streustrahlungsfeld (9).
- Die Änderung der Linearkombination (Software) ermöglicht die Anzeige unterschiedlicher Meßgrößen insbesondere aber die jederzeit mögliche, nachträgliche Anpassung bzw. Optimierung der Meßgeräteanzeige auf eine neue Meßgröße.
- Innerhalb des Strahlenschutzes ergibt sich die Möglichkeit, mit einem relativ einfachen Meßgerät Streustrahlungsfelder auszumessen und zu interpretieren, wie dies bisher nur mit der Vielkugelmeßtechnik möglich war.
- Der Dosisleistungsmesser ist andererseits eine Alternative zur Vielkugelmeßtechnik sowie zu gewebeäquivalenten Proportionalzählern, die durch Wichtung des LET-proportionalen Impulshöhenspektrums und entsprechender Meßwertverarbeitung u.U. vergleichbare Aussagen ermöglichen.

Die Autoren bedanken sich bei Herrn B. Reinhardt und Herrn A. Schmitt für die Modifizierung des ladungsempfindlichen Verstärkers bzw. die Bereitstellung der Elektronik, bei Herrn M. Hauser für seine Mithilfe bei Kalibrierbestrahlungen und Herrn M. Vilgis für die computerunterstützte Darstellung der Meßergebnisse.

8 Literaturverzeichnis

- (1) Cosack M. and Lesiecki H., Dose Equivalent Survey Meters, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 10, 1-4, p. 111-119, (1985)
- (2) Alberts W.G., Dietz E., Guldbakke S., Kluge H. and Schuhmacher H., Radiation Protection Instruments Based on Tissue Equivalent Proportional Counters: Part II of an International Intercomparison, PTB-FMRB-117, (1988)
- (3) Awshalom M. and Sanna R.S., Application of Bonner Sphere Detectors in Neutron Field Dosimetry, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 10, 1-4, P. 89, (1985)
- (4) Piesch E., Burgkhardt B. and Comper W., The Single Sphere Albedo System - A Useful Technique in Neutron Dosimetry in Radiation Protection, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 10, 1-4, p. 147 (1985)
- (5) Alsmiller R. G. and Barish J., The Calculated Response of ^6LiF Albedo Dosimeters to Neutrons with Energies < 400 MeV. Health Phys. 26, 13-38, (1974)
- (6) Gibson I.A.B. and Piesch E., Neutron Monitoring for Radiological Protection, IAEA Technical Reports Series No 252, chapter 9, p. 161-181, (1985)
- (7) Piesch E., Burgkhardt B. and Venkataraman G., Experimental Study of Standardised Fluence and Dose Data, Neutron Fluence-to-Dose Conversion Factors and Quality Factors for the Health Physics Research Reactor Using the Single Sphere Albedo Technique, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 3 No. 1-2, p. 25-38, (1982)
- (8) Hofmann B., Burgkhardt B., Schwarz W., Piesch E., Neutronendosimetrie in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren, KfK 4499, (1989)
- (9) Piesch E., Burgkhardt B., Erprobung eines Albedoneutronen-Dosimetrie-systems, KfK 4303, (1988)