

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

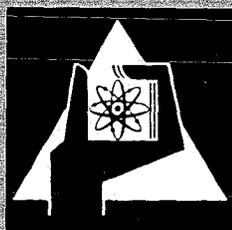
September 1971

KFK-1462

Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit

**Eigene Ergebnisse beim Ersten I.A.E.A.-Vergleich
von Neutronenunfalldosimetersystemen
in Valdue, Frankreich, Juni 1970**

E. Piesch



**GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M.B.H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

September 1971

KFK-1462

Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit

Eigene Ergebnisse beim Ersten I.A.E.A. Vergleich von
Neutronenunfalldosimetersystemen
in Valduc, Frankreich, Juni 1970

E. Piesch

Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe

Zusammenfassung

Es werden die Ergebnisse wiedergegeben, die bei einer internationalen Vergleichsbestrahlung von Neutronen-Kritikalitätsdosimetern mit dem im Kernforschungszentrum Karlsruhe benutzten Personendosimeter erhalten wurden. Die Bestrahlung der Dosimeter erfolgte Freiluft und am Mensch-Phantom mit einer gemischten Neutronen-Gamma-Strahlung an der CRAC-Kritikalitätsanlage in Valduc. Die Neutronendosis wurde aus der Aktivierung des Phosphatglas- γ -Dosimeters sowie mit Hilfe konventioneller Aktivierungsdetektoren ermittelt. Als zusätzliche Detektoren dienten eine Polycarbonatfolie als Kernspurdetektor zum Nachweis schneller Neutronen über C,O Rückstoßkerne und ein Arsensulfidglas zum Nachweis thermischer und mittelschneller Neutronen.

Die Energiedosis an der Oberfläche des Phantoms betrug 348 rd durch Rückstoßkerne und 384 rd durch Gammastrahlung, hinter einer 20 cm dicken Betonabschirmung 159 rd bzw. 245 rd.

Ein Vergleich der Ergebnisse aller Teilnehmer ergibt für die Mehrzahl der Ergebnisse eine Meßwertstreuung von weniger als $\pm 25\%$ vom Mittelwert.

Abstract

This report gives the results which were obtained during an international intercomparison of nuclear accident dosimetry systems with the personnel dosimeter used in the Karlsruhe Nuclear Research Center. Free air and phantom irradiations were performed with mixed neutron and gamma radiation of the CRAC criticality facility in Valduc. The neutron dose was received by activation of the phosphate glass gamma dosimeter and by means of conventional activation detectors.

Additional detectors were a polycarbonate foil which serves as a nuclear track detector for the detection of fast neutrons via C,O recoils and an arsenic glass for the detection of thermal and intermediate neutrons.

The surface absorbed dose received by the man phantom was 348 rad due to heavy recoil particles and 384 rad due to gamma radiation, behind a concrete shielding of 20 cm thickness the doses were 159 rad and 245 rad respectively.

The comparison of the results of all participants shows that the majority of the results are found with a deviation of better than $\pm 25\%$ from the mean values.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. CRAC-Bestrahlungsanlage
3. Personendosimeter
4. Meßergebnisse der Gfk-Dosimeter
5. Diskussion der Vergleichsmessung

Verzeichnis der Abbildungen

<u>No.</u>	<u>Titel</u>	<u>Seite</u>
1	Die vom Kernforschungszentrum Karlsruhe benutzte Personendosimeterkombination	2
2	Das Phosphatglas-Kugeldosimeter	3
3	Anordnung der Aktivierungsdetektoren in der Personendosimeterkassette	5
4	Zuordnung des Verhältnisses Indium und Schwefel-Schein- dosis $\frac{D_{In}}{D_s}$ und des Verhältnisses tatsächliche Dosis schneller Neutronen und der Indium-Scheinosis $\frac{D}{D_{In}}$ für ein Maxwell-Spektrum schneller Neutronen mit der effektiven Energie E nach (8)	9
5	Meßwertabweichung der Dosimeter vom Mittelwert der Ver- gleichsmessung bei Freiluftbestrahlung für Kerma und Gammadosis	24
6	Meßwertabweichung der Dosimeter vom Mittelwert der Ver- gleichsmessung bei Freiluftbestrahlung für die Fluenz im Energiebereich $> 2,5$ MeV und $< 0,5$ eV	25
7	Meßwertabweichung der Dosimeter vom Mittelwert der Ver- gleichsmessung bei Phantombestrahlung für Kerma und Gammadosis	26

Verzeichnis der Tabellen

<u>No.</u>	<u>Titel</u>	<u>Seite</u>
1	Neutronenaktivierungsdetektoren in Gfk-Personendosimeter	6
2	Kalibrierfaktoren für den Neutronennachweis	7
3	Konversionsfaktoren für die Umrechnung der Energiedosis an der Körperoberfläche in Fluenz und Kerma nach (8)	11
4	Ergebnis der Dosisermittlung	13
5	Ermittlung der Dosis schneller Neutronen	14
6	Ermittlung der Neutronendosis aus den verschiedenen Aktivierungsdetektoren	15
7	Ermittlung der Fluenz mittelschneller Neutronen	16
8	Vergleich der Ergebnisse von I.A.E.A. und Gfk-Phosphatglasdosimetern	17
9	Meßergebnisse der Schwellwertdetektoren in n/cm^2	18
10	Messung schneller Neutronen über Rückstoßkerne in Makrofol E	18
11	Meßergebnisse der Freiluftbestrahlung	21
12	Meßergebnisse der Phantombestrahlung	22
13	Relative Meßwertabweichung der Gfk-Dosimeter vom Mittelwert der Vergleichsmessung	23

1. Einleitung

Aufgrund von Empfehlungen eines Panels (1) wurde von der I.A.E.A. ein Co-ordinated Research Programm organisiert, welches Vergleichsmessungen an verschiedenen Kritikalitätsanlagen vorsieht und aufgrund der erzielten Ergebnisse u.a. eine Vereinheitlichung der Detektorkalibrierungen sowie Empfehlungen über eine Mindestdetektorkombination anstrebt. An der ersten Internationalen Vergleichsmessung von Unfalldosimetersystemen, die im französischen Atomforschungszentrum Valduc stattfand, nahmen Kernforschungszentren von 11 verschiedenen Staaten teil und zwar aus Kanada, Tschechoslowakei, Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Ungarn, Indien, Italien, Polen, USA, Jugoslawien. Die Vergleichsmessung bestand aus einer gleichzeitigen Bestrahlung der Dosimeter an der CRAC-Kritikalitätsanlage mit gepulster Neutronen-Gamma-Strahlung und einem Vergleich der Meßergebnisse, die mit den verschiedenen Detektorsystemen erzielt wurden.

Das Kernforschungszentrum Karlsruhe beteiligte sich erstmalig an einer solchen Vergleichsmessung. Das Experiment bot eine willkommene Gelegenheit, das Karlsruher Routinedosimeter und neuere Detektoren mit einem Spaltspektrum unterschiedlicher Moderierung zu kalibrieren. Im Anschluß daran fand in Paris eine Diskussion über die verschiedenen Dosimetersysteme und Konzepte in der Kritikalitätsdosimetrie statt.

Im folgenden werden die Ergebnisse wiedergegeben, die bei der Vergleichsmessung mit dem Karlsruher Dosimeter gewonnen wurden. Da in der Zwischenzeit die Ergebnisse der anderen Teilnehmer vorliegen (2), ist ein Vergleich der Meßergebnisse untereinander möglich.

2. CRAC-Bestrahlungsanlage

Bei der kritischen Anordnung in Valduc (3) wird Uranylнитrat in wässriger Lösung in einen zylindrischen Stahltank von 30 cm Durchmesser und 60 cm Höhe hochgepumpt. Nach Erreichen der kritischen Masse erfolgt ein Kritikalitätsblitz, dem in den nächsten Minuten etwa 10 weitere Blitze folgen.

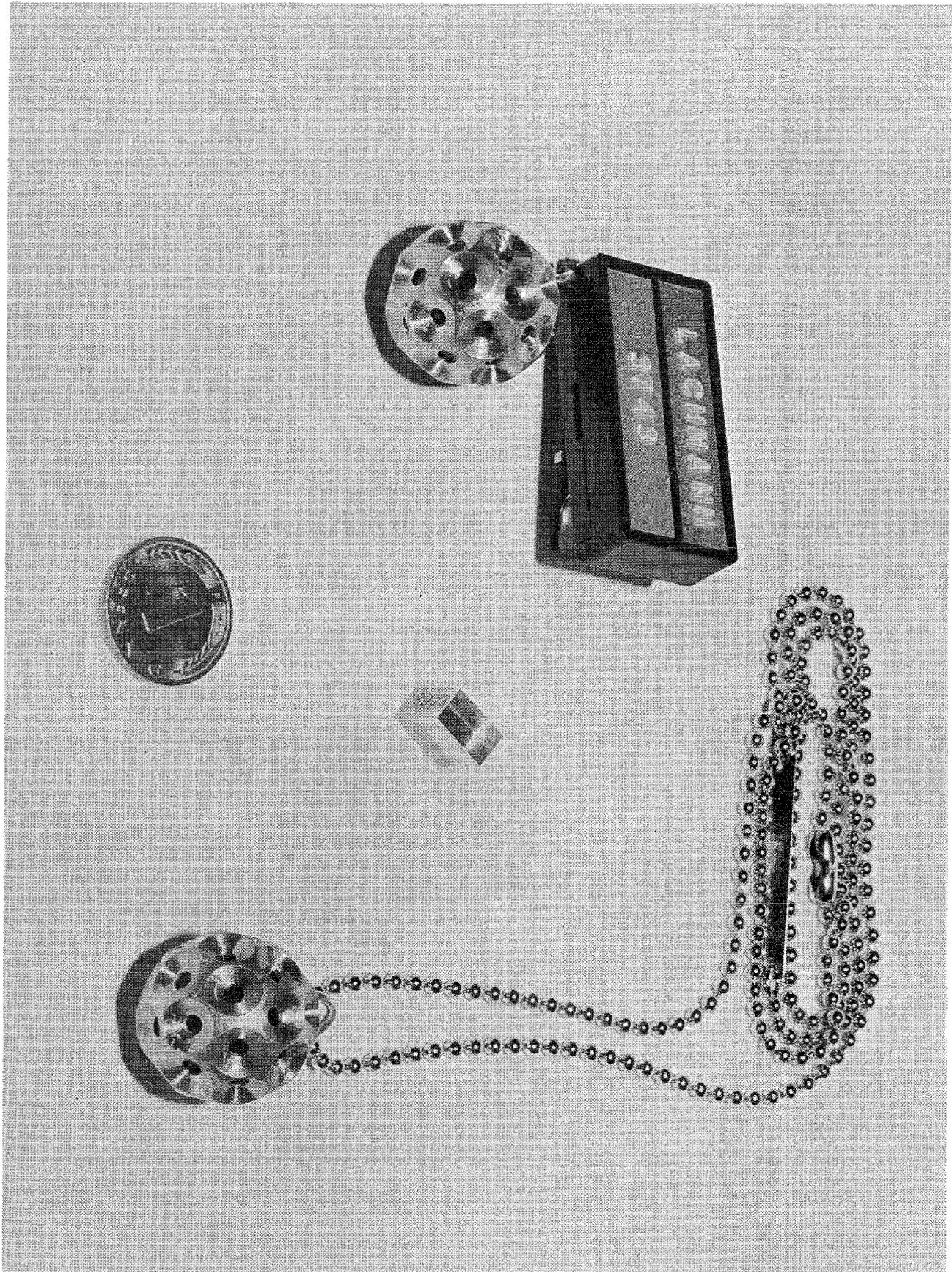


Abb. 1: Die vom Kernforschungszentrum Karlsruhe benutzte Personendosimeterkombination

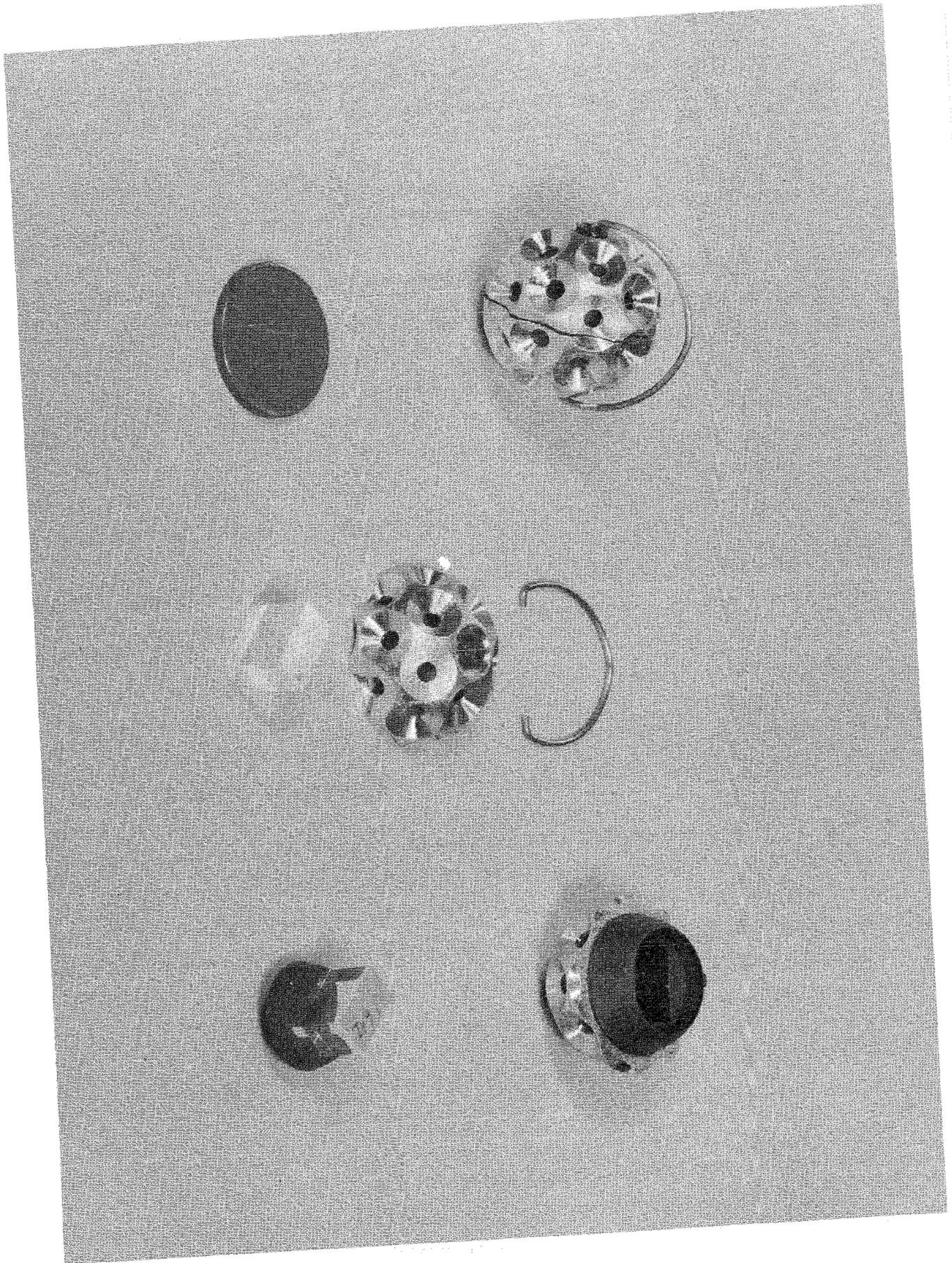


Abb.: 2: Das Phosphatglas-Kugeldosimeter

Mit einer Urankonzentration von 90 g/l und einer Flüssigkeitshöhe von etwa 50 cm erhält man insgesamt 5×10^{17} Spaltungen. Die Anlage besitzt ein zweites verschlossenes Containment, das aus einem zylindrischen Stahltank von 1,3 m Durchmesser besteht.

Die Bestrahlungsanlage steht in einem Raum, der 19 m x 12 m x 10 m groß ist und von einer 1,5 m dicken Betonwand umgeben ist. Beim ersten Puls wurden die Dosimeter direkt vor der Anlage bestrahlt, beim zweiten Puls war zwischen der Anlage und den Dosimetern eine Abschirmung von 20 cm Beton. Die Bestrahlungen erfolgten jeweils Freiluft und an zwei Remcal-Typ-Phantomen in Position R (rechts) und L (links). Bei Puls I erfolgte die Bestrahlung von Phantom R seitlich unter einem Winkel von 45° zur Frontalseite. Bei Puls I betrug der Abstand Kritikalitätsanlage zur Freiluftmeßstelle 3,8 m bzw. 3,67 m und zum Phantom 5,05 m bzw. 4,87 m, bei Puls II waren es 5 m bzw. 4,87 m zur Freiluftmeßstelle und zum Phantom.

Für den Vergleich der Meßergebnisse untereinander wurde auf die Meßergebnisse in Position R bezogen. Dabei wurden die Ergebnisse der Dosimeter von Position L mit einem Faktor 1,2 (für Puls I) bzw. 1,06 (für Puls II) multipliziert.

3. Personendosimeter

Die Vergleichsbestrahlung erfolgte mit dem Routinedosimeter, welches von allen Personen im Kernforschungszentrum Karlsruhe getragen wird, gleichzeitig aber auch als fest installiertes Ortsdosimeter eingesetzt wird. Dieses Personendosimeter besteht aus einem Phosphatglas-Kugeldosimeter zur Routine- γ -Dosimetrie und einer Kombination von Aktivierungsdetektoren in einer Plastikkassette (siehe Abb. 1 + 2) (4 - 6). Die Aktivierungsdetektoren sind eine Schwefeltablette, eine Goldfolie, ferner eine Goldfolie und eine Kupferfolie, die in einem Cadmium-Schälchen beiderseitig von einer Indiumfolie abgedeckt sind. Die benutzte Anordnung der Aktivierungsdetektoren ist aus Abb. 3 zu ersehen. Als zusätzliches Versuchsdosimeter wurden eine Kunststoffolie (Makrofol E) und ein Arsensulfidglas in der Kassette aufgenommen. Die zum Nachweis von Neutronen benutzten Kernreaktionen wurden in Tab. 1 zusammengestellt.

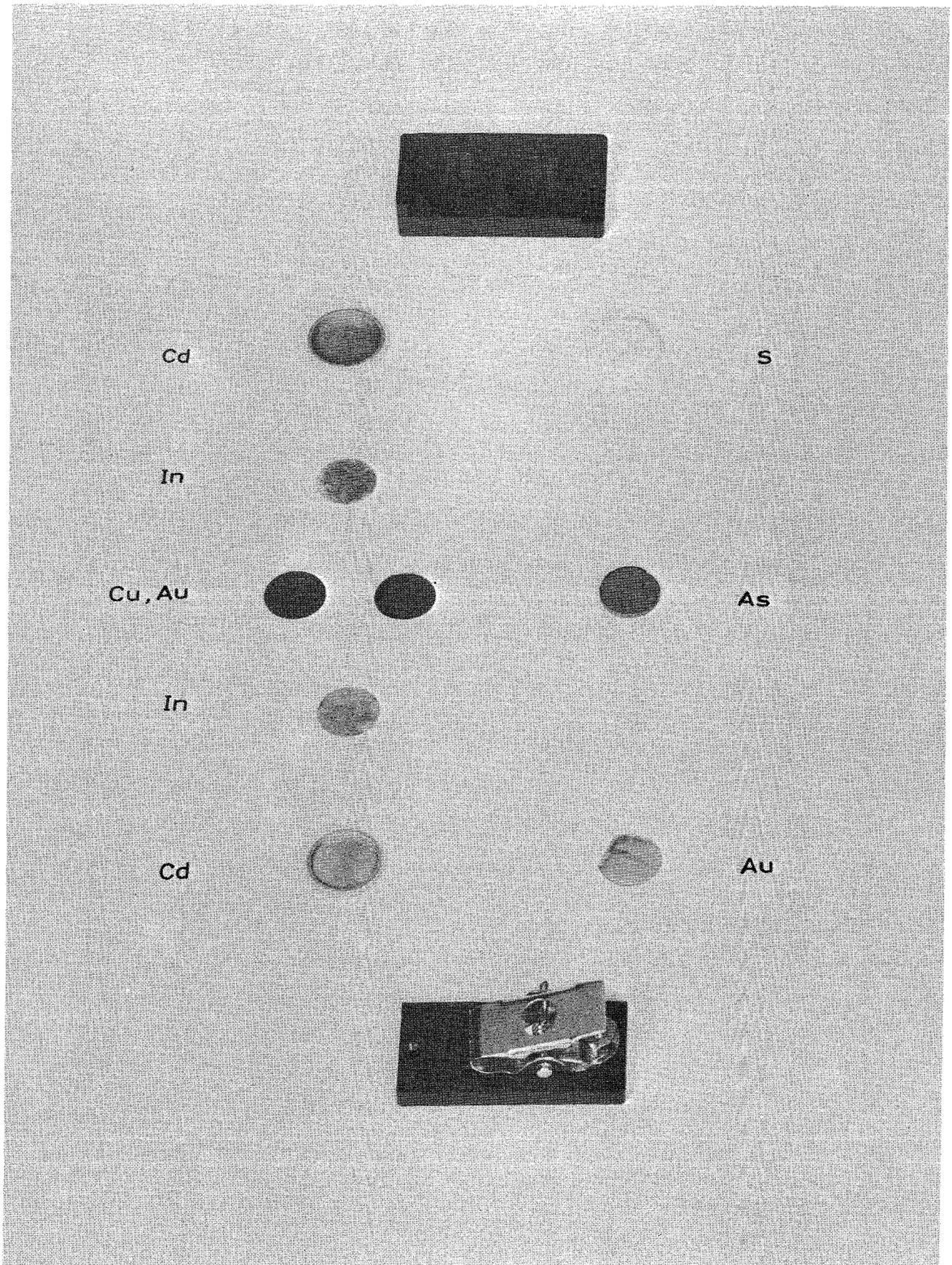


Abb. 3: Anordnung der Aktivierungsdetektoren in der Personendosimeterkassette

Tab. 1: Neutronenaktivierungsdetektoren im GfK-Personendosimeter

DETEKTOR	GRÖSSE		DICKE	GEWICHT	KERNREAKTION	HALBEWERTS- ZEIT	EMISSION PRO ZERFALL
	mm	mm					
Schwefeltablette	12 ϕ	2,4	0,5	$^{32}\text{S} (n,p) ^{32}\text{P}$	14.3 d	1,7 MeV β^- , 100 %	
Indiumfolie	10 ϕ	0,25	0,14	$^{115}\text{In}(n,n') ^{115m}\text{In}$	4.5 h	0,34 MeV γ , 47,5 %	
Kupferfolie	10 ϕ	0,12	0,085	$^{63}\text{Cu}(n,\gamma) ^{64}\text{Cu}$	12.8 h	0,66 MeV β^+ , 19 %	
Goldfolie	10 ϕ	0,05	0,073	$^{197}\text{Au}(n,\gamma) ^{198}\text{Au}$	2.7 d	0,96 MeV β^- , 99 % 0,41 MeV γ , 100 %	
Phosphatglas	8 x 8	4,7	0,77	$^{31}\text{P}(n,p) ^{31}\text{Si}$	2.6 h	1,5 MeV β^- , 100 %	
				$^{31}\text{P}(n,\gamma) ^{32}\text{P}$	14.3 d	1,7 MeV β^- , 100 %	
Arsensulfidglas	10 ϕ	1	0,25	$^{75}\text{As}(n,\gamma) ^{76}\text{As}$	26,4 h	3 MeV β^- , 100 % 0,56 MeV γ , 43 %	
Polykarbonatfolie (Makrofol E)	10 ϕ	0,3		C,O-Rückstoß- kerne und α - Teilchen	--	--	

Tab. 2: Kalibrierfaktoren für den Neutronennachweis

DETEKTOR	NUKLID	T _H	KALIBRIERFAKTOR ⁺⁾
Schwefel	³² P	14.3 d	4,5 $\frac{\text{Zerf}}{\text{min} \cdot \text{rd}}$
Indium	^{115m} In	4.5 h	73 $\frac{\gamma}{\text{min} \cdot \text{rd}}$ (2 Folien)
Kupfer	⁶⁴ Cu	12.8 h	69 $\frac{\text{Zerf}}{\text{min} \cdot \text{rd}}$
Gold	¹⁹⁸ Au	2.7 d	$10^5 \frac{\text{Zerf}}{\text{min}} \cong 2,58 \cdot 10^{10} \frac{n_{\text{th}}}{\text{cm}^2}$ $10^5 \frac{\text{Zerf}}{\text{min}} \cong 1,03 \cdot 10^{11} \frac{n_{\text{m}}}{\text{cm}^2}$
Phosphatglas	³¹ Si	2.6 h	88 $\frac{\text{Zerf}}{\text{min} \cdot \text{rd}}$
	³² P	14.3 d	30 $\frac{\text{Zerf}}{\text{min}} \cong 10^{10} \frac{n_{\text{th+m}}}{\text{cm}^2}$
Arsensulfidglas	⁷⁶ As	26.4 h	$10^5 \frac{\text{Zerf}}{\text{min}} \cong 4 \cdot 10^{10} \frac{n_{\text{th+m}}}{\text{cm}^2}$
Makrofol E	--	--	$n_{\text{s}} > 1 \text{ MeV}: 1,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Spuren}}{\text{neutron}}$

+) für die Messung der Energiedosis im Standardgewebe der Körperoberfläche bzw. der Neutronenfluenz bezogen auf ein Unfallspektrum.

Dieses Dosimeter wurde Freiluft und an der Phantomvorderseite in Brusthöhe bzw. an einer Halskette bestrahlt. Für die Phantombestrahlung wurde zusätzlich ein Gürtel mit je 4 Dosimetern verwendet.

Die Aktivierungsdetektoren des Personendosimeters wurden direkt auf ein Unfallspektrum kalibriert (siehe Tab. 2), welches sich im wesentlichen aus drei Komponenten zusammensetzt, nämlich

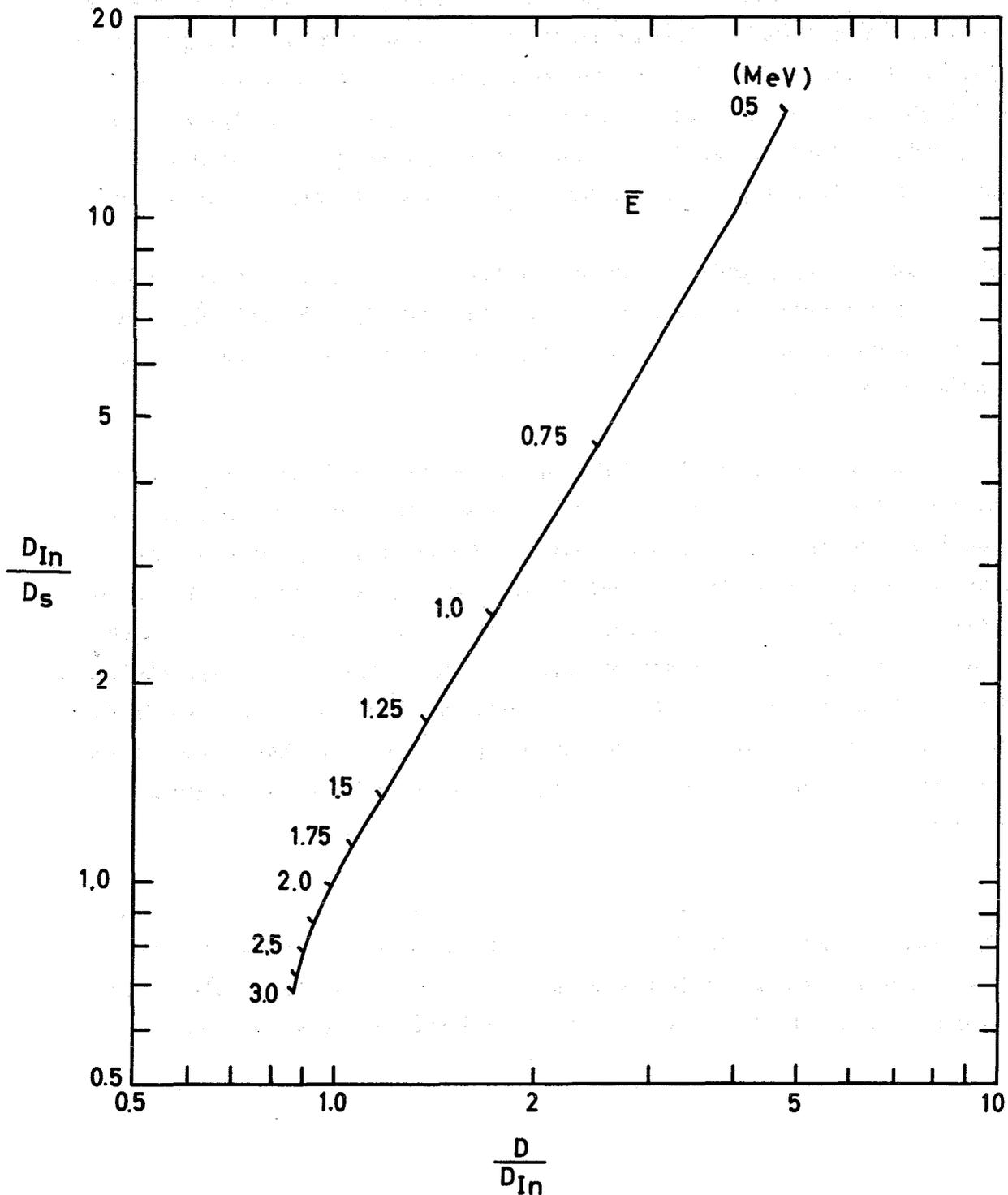
- einem unmoderierten Spaltspektrum im Bereich schneller Neutronen, welches als Maxwell-Spektrum mit einer mittleren Energie von 1,96 MeV angenommen wird,
- einem $1/E$ Spektrum im Bereich mittelschneller Neutronen von 1 MeV bis 0,5 eV
- einem thermischen Maxwell-Spektrum (20°C) im Bereich unterhalb 0,5 eV.

Die Neutronendosis läßt sich aus der Aktivierung der Einzeldetektoren nach drei verschiedenen Verfahren ermitteln:

1. Die Messung der schnellen Neutronen erfolgt über die Aktivierung von Schwefel, die Messung der Neutronen in den beiden anderen Energiebereichen über die Aktivierung der Goldfolien mit und ohne Cadmium-Abschirmung. Zusätzliche Information über mittelschnelle Neutronen liefert die Kupferfolie. Die Gesamtdosis ergibt sich aus der Summe der drei Komponenten.
2. Die Bestimmung der Neutronendosis erfolgt ausschließlich über die Aktivierung des Phosphors im Phosphatglas- γ -Dosimeter (7). In Analogie zum Kritikalitätsdosimeter werden schnelle Neutronen über die Reaktion $^{31}\text{P}(n,p)^{31}\text{Si}$ (Zeitpunkt der Messung in den ersten 15 Stunden nach der Aktivierung), mittelschnelle und thermische Neutronen über die Reaktion $^{31}\text{P}(n,\gamma)^{32}\text{P}$ (Zeitpunkt der Messung mindestens 24 Stunden nach Aktivierung) voneinander getrennt gemessen. Die Gesamtdosis ergibt sich aus der Summe der 2 Komponenten.
3. Die Abschätzung der Dosis schneller Neutronen erfolgt aus der Aktivierung von Schwefel und der Indiumfolie über $^{115\text{m}}\text{In}$, welche beide auf ein unmoderiertes Spaltspektrum kalibriert wurden (Schwelle bei 2,5 MeV bzw. 1,2 MeV). Bei Vorhandensein desselben Spektrums ergeben beide Detektoren dieselbe Dosis. Infolge Moderierung verändert sich die effektive Energie des Neutronenspektrums, damit aber auch das Verhältnis $\frac{D_{\text{In}}}{D_{\text{S}}}$

der betreffenden Scheindosen und das Verhältnis $\frac{D}{D_{In}}$ der tatsächlichen Dosis zur Indiumdosis. Die von Adams und Dennis (8) aus Maxwell-Spektren unterschiedlicher effektiver Energie berechneten Korrekturfaktoren zur Ermittlung der Dosis schneller Neutronen können der Abb. 4 entnommen werden. Die Gesamtdosis ergibt sich aus der Summe der drei Komponenten nach Verfahren 1.

Die γ -Dosis wurde mit dem Phosphatglasdosimeter über eine Fluoreszenzmessung ermittelt. Eine entsprechende Korrektur für die Neutronenempfindlichkeit des Phosphatglases erfolgt mit dem jeweiligen Meßergebnis der Aktivierungsmessung (zweite Messung nach 24 Stunden).



In Ergänzung zum Routinedosimeter wurden zusätzlich Detektoren zur Erprobung eingesetzt. Es sind dies ein Arsensulfidglas zum Nachweis mittelschneller und thermischer Neutronen über die Kernreaktion $^{75}\text{As}(n,\gamma)^{76}\text{As}$ sowie eine Polykarbonatfolie (Makrofol E), die als Kernspurdetektor zum direkten Nachweis von schnellen Neutronen über C-Rückstoßkerne und α -Teilchen im Energiebereich oberhalb 1 MeV dient (siehe auch 9, 10). Beide Detektoren waren in der Unfalldosimeterkassette enthalten.

4. Meßergebnisse der Gfk-Dosimeter

Die Detektoren wurden unmittelbar nach der Bestrahlung in Valduc ausgemessen. Die dort gewonnenen Meßergebnisse wurden zu einer ersten vorläufigen Dosisabschätzung herangezogen. Eine teilweise Nachmessung der Goldfolie, der Schwefeltabletten und der Glasdosimeter erfolgte danach in Karlsruhe. Im vorliegenden Bericht wurden für die Dosisberechnungen die Karlsruher Meßergebnisse zugrundegelegt, wenn Abweichungen zur ersten Messung vorlagen.

Ausgehend von der gemessenen Detektoraktivität wurde zunächst direkt unter Verwendung eines Kalibrierfaktors die Oberflächendosis bestimmt (Energiedosis im Standardgewebe hervorgerufen durch Rückstoßkerne und Protonen an der Körperoberfläche).

Die Energiedosis, die durch Neutronen an der Körperoberfläche im Standardgewebe erzeugt wird, setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, nämlich derjenigen Energiedosis, die durch Rückstoßkerne und Protonen hervorgerufen wird sowie jenem Anteil, der ausschließlich auf eine Einfang- γ -Strahlung der Kernreaktion $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{D}$ im Phantom bzw. Körper zurückgeführt wird. Da der (n,γ) -Anteil mit dem γ -Dosimeter nachgewiesen wird, ist es aus meßtechnischen Gründen zweckmäßig, ausschließlich den Energiedosisanteil von Rückstoßkernen als Neutronendosis an der Körperoberfläche anzusehen. Personendosimeter zum Nachweis von Neutronen werden daher meistens auf diese Oberflächendosis kalibriert.

Um einen Vergleich der Ergebnisse aller Teilnehmer zu ermöglichen, welche zum Teil recht unterschiedliche Dosiskonzepte benutzen, wurde vereinbart, die Ergebnisse als Kerma im Standardgewebe in der Einheit Rad (rd) oder in Hektoerg/g anzugeben. Bei einer Phantombestrahlung ist dies diejenige

Tab.: 3 Konversionsfaktoren für die Umrechnung der Energiedosis an der Körperoberfläche in Fluenz und Kerma nach (8)

	FLUENZ FÜR 1 RAD	KERMA
<u>schnelle Neutronen:</u> Unmoderiertes Spalt- spektrum ($E_{\text{eff}} = 1,96 \text{ MeV}$)	$2,76 \cdot 10^8 \frac{\text{neutronen}}{\text{cm}^2}$	$0,762 \times D(\text{Oberfläche})$
<u>mittelschnelle Neutronen:</u> 1/E Spektrum von 0,5 eV bis 1 MeV	$2,81 \cdot 10^9 \frac{\text{neutronen}}{\text{cm}^2}$	$0,716 \times D(\text{Oberfläche})$
<u>thermische Neutronen:</u> Maxwell-Spektrum bei 20°C	$1,59 \cdot 10^{10} \frac{\text{neutronen}}{\text{cm}^2}$	$0,32 \times D(\text{Oberfläche})$

Dosis, die man Freiluft am Ort des Phantoms messen würde.

Die Umrechnung Kerma/Oberflächendosis bzw. Fluenz/Oberflächendosis erfolgte für die drei Komponenten des Neutronenspektrums mit den in Tab. 3 wiedergegebenen Faktoren.

Die Ergebnisse der Personendosimeterauswertung sind für die Freiluftbestrahlungen und die Phantombestrahlungen in Tab. 4 wiedergegeben.

Die Dosisermittlung schneller Neutronen (Tab. 5) erfolgte über die Aktivitätsmessung von ^{31}Si im Phosphatglasdosimeter, von ^{32}P in der Schwefeltablette und von $^{115\text{m}}\text{In}$. Die Moderierung des Neutronenspektrums wurde über den Korrektionsfaktor $\frac{D}{D_{\text{In}}}$ berücksichtigt, der aus dem Dosisverhältnis $D_{\text{In}}/D_{\text{s}}$ ermittelt wurde.

Tab. 6 zeigt zum Vergleich diejenigen Meßergebnisse, die mit den Aktivierungs-

detektoren des Personendosimeters (Methode 3) sowie nur mit dem Phosphatglas (Methode 2) erzielt wurden.

Tab. 7 zeigt einen Vergleich der mit den verschiedenen Aktivierungsdetektoren ermittelten Neutronenfluenz mittelschneller Neutronen. Eine Trennung von mittelschnellen und thermischen Neutronen ist mit dem Phosphatglas nicht möglich, da es wohl in einer borhaltigen Kapselung getragen wird, aber auch thermische Neutronen anzeigt. Ein genauer Vergleich mit den Ergebnissen der Resonanzdetektoren ist sowohl beim Phosphatglas als auch beim Arsensulfidglas schwierig, da für diese Detektoren nur eine Reaktorkalibrierung mit einem anderen Neutronenspektrum vorliegt. Die Detektoren zeigen jedoch befriedigende Ergebnisse bei der Dosimeterbestrahlung am Phantom.

Die γ -Dosis wurde mit dem Phosphatglas-Kugeldosimeter bestimmt. Sie entspricht bei den Phantombestrahlungen der an der Phantomboberfläche am Ort des Dosimeters gemessenen γ -Dosis, die sich aus dem äußeren γ -Strahlungsanteil und einer Einfang- γ -Strahlung der (n,γ) -Reaktion im Phantom zusammensetzt. Die Anzeige des Phosphatglas-Kugeldosimeters ist wegen der Bedingungen eines Einsatzes in der Routineüberwachung gegenüber γ -Strahlung und langsamen Neutronen rem-dosisäquivalent. Da die Neutronenfluenz bzw. Dosis thermischer und mittelschneller Neutronen über die Aktivierung des Phosphatglases ermittelt werden kann, läßt sich die Neutronenempfindlichkeit des Phosphatglases korrigieren (10^{10} R entsprechen einer Fluenz von $10^{10}n/cm^2$). Der Meßwert des Phosphatglas-Kugeldosimeters wurde von Ionen-dosis auf Energiedosis im Standardgewebe umgerechnet (1 R entsprechen 0,95 rd). Die I.A.E.A. war an den Vergleichsmessungen mit demselben Phosphatglas-Kugeldosimeter beteiligt. Die Ergebnisse der Phosphatglas-Auswertungen zeigt Tab. 8.

Die Erprobung von Makrofol-E-Folien als Kernspurdetektoren zum Nachweis schneller Neutronen über C-Rückstoßkerne und α -Teilchen führte zu annehmbaren Ergebnissen (Tab. 10). Die Meßergebnisse der Freiluftbestrahlungen werden in Tab. 9 mit den Ergebnissen verglichen, die mit ^{237}Np und ^{238}U als Schwellwertdetektoren erhalten wurden. Es handelt sich hierbei um die Mittelwerte aller vorliegenden Ergebnisse. Danach hat Makrofol E als Kernspurdetektor eine Schwelle von etwa 1 MeV.

Tab. 4 : Ergebnis der Dosisermittlung

BESTRAHLUNG	KERMA IN STANDARDGEWEBE (rd)				
	PERSONENDOSIMETER NEUTRONEN	PHOSPHATGLASDOSIMETER		PROVISORISCHES ERGEBNIS	
		NEUTRONEN	GAMMA	NEUTRONEN	GAMMA
<u>Puls I</u>					
Freiluft R	449	347	508	393	394
Phantom R					
Gürtel vorn	262	238	384	234	303
hinten	104	42	183		
Personendosimeter	324	180	391		
Phantom L					
Personendosimeter	234	205	357	223	282
<u>Puls II</u>					
Freiluft R	147	108	236	119	211
Phantom R					
Gürtel vorn	134	112	240		
hinten	51	41	143		
Personendosimeter	117	104	245	114	225
Phantom L					
Gürtel vorn	129	104	241	119	224
hinten	39	42	150		
Personendosimeter	141	109	238		

Tab. 5 : Ermittlung der Dosis schneller Neutronen

BESTRAHLUNG	KERMA IN STANDARDGEWEBE (rd)				
	Phosphat- glas	S	In	Korrektions- faktor +)	Dosis schneller Neutronen
<u>Puls I</u>					
Freiluft R	320	338	391	1,1	430
Phantom R					
Gürtel vorn	209	210	230	1,06	244
hinten	26	30	61	1,6	98
Personendosimeter	150	189	256	1,22	312
Phantom L					
Personendosimeter	175	186	206	1,06	218
<u>Puls II</u>					
Freiluft	83	85	111	1,2	133
Phantom R					
Gürtel vorn	76	82	105	1,16	122
hinten	20	14	28	1,6	45
Personendosimeter	68	84	97	1,08	105
Phantom L					
Gürtel vorn	71	73	96	1,2	115
hinten	23	17	25	1,28	32
Personendosimeter	75	79	106	1,22	129

+) Korrektionsfaktor ermittelt aus dem Verhältnis der Scheindosen in Indium und Schwefel (siehe AERE - R 6008)

Tab. 6 : Ermittlung der Neutronendosis aus den verschiedenen Aktivierungsdetektoren

BESTRAHLUNG	KERMA IN STANDARDGEWEBE (rd)								
	PERSONENDOSIMETER						PHOSPHATGLASDOSIMETER		
	Au Thermisch	Au (Cd,In)	In Schein- dosis	S Schein- dosis	Wahre Dosis n_s	Totale Neutronen- dosis	Langsame Neutronen	schnelle Neu- tronen	Totale Dosis
<u>Puls I</u>									
Freiluft R	1.1	18	391	338	430	449	27	320	347
Phantom R									
Gürtel vorn	1.5	12	230	210	248	262	29	209	238
hinten	0,8	5	61	30	98	104	16	26	42
Personendosimeter	1.3	11	256	189	312	324	30	150	180
Phantom L									
Personendosimeter	1.4	15	206	186	218	234	30	175	205
<u>Puls II</u>									
Freiluft R	1.5	12	111	85	133	147	26	83	108
Phantom R									
Gürtel vorn	1.9	11	105	82	122	134	36	76	112
hinten	1.2	5	28	14	45	51	21	20	41
Personendosimeter	2.1	10	97	84	105	117	36	68	104
Phantom L									
Gürtel vorn	2	12	96	73	115	129	33	71	104
hinten	1.2	6	25	19	32	39	19	23	42
Personendosimeter	2.1	10	106	79	129	141	34	75	109

Tab. 7 : Ermittlung der Fluenz mittelschneller Neutronen

	FLUENZ MITTELSCHNELLER NEUTRONEN (10^{10} n/cm ²)			
	Au in Cd, In	Cu in Cd, In	As	Phosphatglas in B
<u>Puls I</u>				
Freiluft R	22	19	12.6	10.6
Phantom R				
Gürtel 1	14.1	14.2	11.8	11.4
2	7.7	8.9	7.22	8.6
3	5.9	6.8	5.5	6.1
4	8.0	9.1	8.2	8.1
Personendosimeter	13.4	15.8	10.8	11.7
Phantom L				
Personendosimeter	17.7	13.5	13.2	11.7
<u>Puls II</u>				
Freiluft R	14.2	14.3	11.4	10.1
Phantom R				
Gürtel vorn	13.9	14.4	12.8	14.3
hinten	6.5	7.8	6.95	8.2
Personendosimeter	12.5	14.8	--	14.2
Phantom L				
Gürtel vorn	14.0	14.0	13.3	13.1
hinten	6.8	8.5	7.3	7.5
Personendosimeter	11.7	13.7	13.3	13.5

Tab. 8 : Vergleich der Ergebnisse von IAEA und GfK-Phosphatglasdosimetern

	KERMA IN STANDARDGEWEBE (rd)			
BESTRAHLUNG	P H O S P H A T G L A S D O S I M E T E R			
	NEUTRONENDOSIS		GAMMA-DOSIS	
	IAEA	GfK	IAEA	GfK
<u>Puls I</u>				
Freiluft R	353	347	542	508
L	358		445	
Phantom R	219	238	388	384
Phantom L	225	205	296	357
<u>Puls II</u>				
Freiluft R	112	108	220	236
L	116		240	
Phantom R	102	104	304	245
Phantom L	92	109	258	238

Tab. 9 : Meßergebnisse der Schwellwertdetektoren in n/cm^2

	^{237}Np $\Phi > 0,75 \text{ MeV}$	Makrofol E (Rückstoßkerne) ca. $> 1 \text{ MeV}$	^{238}U $\Phi > 1,5 \text{ MeV}$
Puls I	$11,7 \cdot 10^{10}$	$8,7 \cdot 10^{10}$	$7,6 \cdot 10^{10}$
Puls II	$3,34 \cdot 10^{10}$	$2,2 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^{10}$

Tab. 10 : Messung schneller Neutronen über Rückstoßkerne in Makrofol E

	NEUTRONENFLUENZ (10^{10} n/cm^2)	
	Puls I	Puls II
Freiluft R	8,7	2,2
Phantom L		
Personendosimeter	4,1	2,3
Gürtel vorn	4,0	2,0
Gürtel hinten	0,59	0,33
Phantom R		
Personendosimeter	4,9	2,4
Gürtel vorn	-	2,0
Gürtel hinten	-	0,46

5. Diskussion der Vergleichsmessung

Bei der vorliegenden Vergleichsmessung kann eine praktisch gleichmäßige Bestrahlung der Dosimeter zumindest für die Freiluftbestrahlungen angenommen werden, so daß die Meßergebnisse der verschiedenen Teilnehmer direkt vergleichbar sind.

Systematische Fehler u.a. bei der Kalibrierung des Detektors, bei der Übertragung dieser Kalibrierung auf ein anderes Meßgerät am Ort der Vergleichsmessung, bei der Ermittlung der notwendigen Dosis- bzw. Fluenzumrechnungsfaktoren, bedingt durch eine unterschiedliche Definition der Personendosis sowie einer unterschiedlichen Interpretation der Meßergebnisse der jeweiligen Detektorkombination hinsichtlich Energiebereich und Kalibrierung lassen eine relativ große Streubreite der Meßergebnisse erwarten.

So können beispielsweise für die Ermittlung der Personendosis u.a. folgende Definition zugrundegelegt werden

- Energiedosis von Rückstoßkernen an der Phanttoberfläche,
- Energiedosis von Rückstoßkernen und des (n,γ) -Anteiles an der Phanttoberfläche,
- Maximale Energiedosis im Element 57 von Snyders-Phantom,
- Freiluftdosis am Ort des Phantoms.

Statistische Zählfehler sowie Fehler der Kalibrierung und Dosiszuordnung werden bei 5 - 15 % liegen.

Das Ergebnis der Vergleichsmessung ist in den Tab. 11 u. 12 getrennt für Freiluftbestrahlung und Phantombestrahlung wiedergegeben. Tab. 13 zeigt die relative Abweichungen der Karlsruher Meßwerte vom entsprechenden Mittelwert der Ergebnisse aller Teilnehmer.

Die Streubreite der Meßergebnisse für n_{th} , $n_s > 2,5$ MeV, Kerma und der Gammadosis sind für die Teilnehmer an der Vergleichsmessung in den Abb. 5-7 nach (2) dargestellt. Die relative Abweichung wurde auch hier auf den Mittelwert bezogen.

Die Streuung der Kermawerte insbesondere bei der Freiluftbestrahlung ist auf die Benutzung unterschiedlicher Detektorkombinationen und einer dementsprechend anderen Kalibrierung der Einzeldetektoren zurückzuführen. Da hauptsächlich Schwefel ($> 2,5$ MeV) als Basis für die Dosisberechnung zugrunde liegt, erhält man mit zusätzlichen Aktivierungsdetektoren z.B. Rhodium, Neptunium, Indium, Uran (Schwelle von 0,5 MeV, 0,75 MeV, 1,2 MeV bzw. 1,5 MeV) höhere Werte im Vergleich zum Einfachdosimeter, das zum Nachweis schneller Neutronen nur Schwefel oder Phosphor enthält (die entsprechenden Phosphatglasdosimeterergebnisse der Karlsruher Auswertung wurden in den Darstellungen extra markiert).

Bei der Bestimmung der Fluenz thermischer Neutronen sind demgegenüber örtliche Schwankungen am Bestrahlungsort der Dosimeter für die große Meßwertstreuung verantwortlich. Das gleiche muß auch für die Phantombestrahlungen angenommen werden.

Die Streuung der γ -Dosiswerte ist für den Einzelteilnehmer relativ gering. Die Verwendung unterschiedlicher γ -Dosimeter, insbesondere aber die Korrektur der Neutronenempfindlichkeit führen vor allem bei den Phantombestrahlungen zu einer relativ großen Abweichung.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Meßwertabweichung vom Mittelwert trotz der obenangeführten Fehlereinflüsse bei der Mehrzahl der Meßergebnisse kleiner als ± 25 % ist. Die Vergleichsmessung und die daran anschließende Diskussion zeigte, daß sowohl eine Kalibrierung der verschiedenen Dosimetersysteme an derselben Anlage als auch eine Vereinheitlichung der Interpretation von Meßergebnissen sinnvoll und notwendig sind.

Das Phosphatglas- γ -Dosimeter, welches gleichzeitig zur Ermittlung der Neutronendosis herangezogen wurde, ersetzt konventionelle Kombinationen von Aktivierungsdetektoren (Schwefel, Gold, Kupfer). Die zusätzliche Verwendung von Indium vermag die Nachweisverhältnisse trotz der niederen Schwellenenergie von 1,2 MeV - vorallem wegen der hohen Meßunsicherheit der γ -spektroskopischen Messung - nicht wesentlich zu verbessern. Dies ist auf den hohen γ -Untergrund von ^{116}In zurückzuführen, welcher trotz einer Cadmium-Abschirmung eine selektive Messung von $^{115\text{m}}\text{In}$ erst 10 - 20 Stunden nach der Aktivierung zuläßt. Bessere Ergebnisse sind mit Polykarbonatfolien als

Tab. 11: Meßergebnisse der Freiluftbestrahlung

FREILUFTBESTRAHLUNG

BESTRAHLUNG	NEUTRONENFLUENZ ($10^{10} \frac{n}{cm^2}$)						KERMA (rd)	Neutronendosis (rd)		GAMMA DOSIS (rd)
	n_{th}	>0,4 eV	>8 keV	>0,75 MeV	>1,5 MeV	>2,5 MeV		Rückstoß- kerne	H(n, γ)D	
<u>Puls I</u>										
Aktivierungsdosimeter (Au - In - S)	5,5					3,2	449	594		
Phosphatglasdosimeter						4,05	347	456		508
Mittelwert aller Teilnehmer	7,48	28,8	17,3	12,6	7,6	4,16	410	505	143	537
<u>Puls II</u>										
Aktivierungsdosimeter (Au - In - S)	7,6					0,81	147	196		
Phosphatglasdosimeter						1,05	108	142		236
Mittelwert aller Teilnehmer	8,05	12,9	6,53	3,30	1,81	0,97	120	153	90	234

Tab. 12: Meßergebnisse der Phantombestrahlung

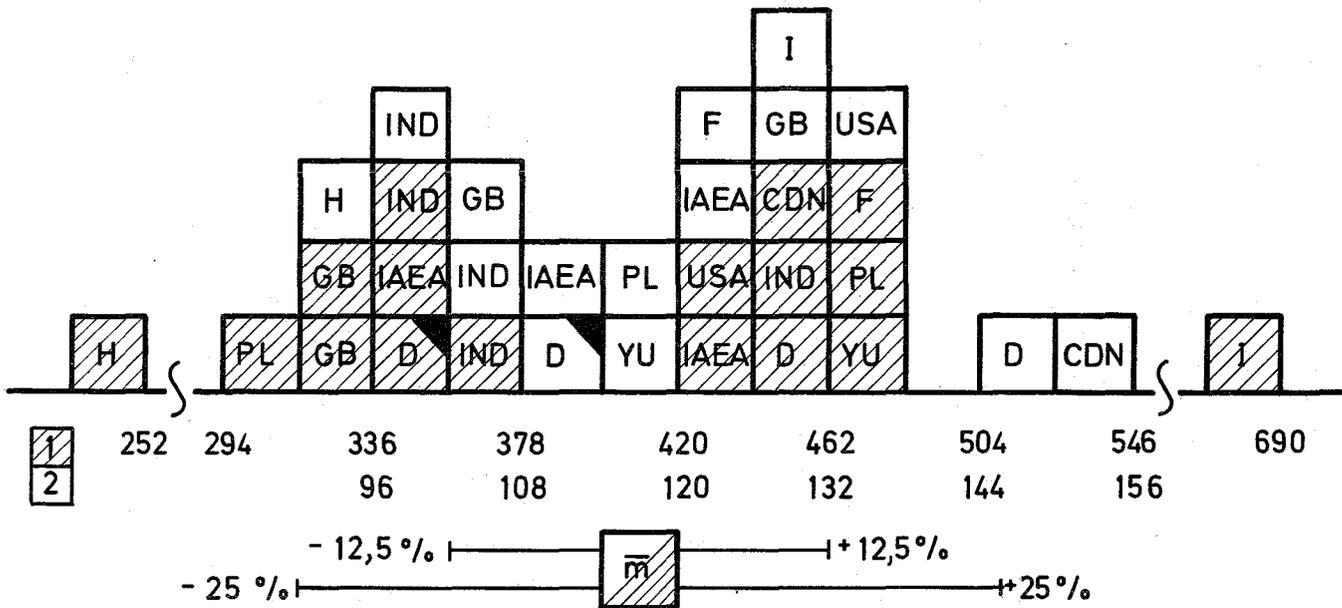
P H A N T O M B E S T R A H L U N G				
	KERMA (rd)	NEUTRONENDOSIS (rd)		GAMMA- DOSIS (rd)
		Rückstoßkerne	H(n,γ)D	
<u>Puls I</u>				
Aktivierungsdosimeter R	262	348	-	
Aktivierungsdosimeter L	281	373	-	
Phosphatglasdosimeter R	238	314	384	
Phosphatglasdosimeter L	246	324	429	
Mittelwert aller Teilnehmer	243	303	415	
<u>Puls II</u>				
Aktivierungsdosimeter R	117	159	-	
Aktivierungsdosimeter L	149	202	-	
Phosphatglasdosimeter R	104	137	245	
Phosphatglasdosimeter L	115	153	252	
Mittelwert aller Teilnehmer	110	137	291	

Tab. 13: Relative Meßwertabweichung der Gfk-Dosimeter vom Mittelwert der Vergleichsmessung

BESTRAHLUNG	Au - In - S			PHOSPHATGLASDOSIMETER					
	Φ_{th}	$\Phi_{>2,5 \text{ MeV}}$	TOTAL KERMA	$\Phi_{>2,5 \text{ MeV}}$		TOTAL-KERMA		γ -Dosis	
				GfK	IAEA	GfK	IAEA	GfK	IAEA
<u>Puls I</u>									
Freiluft R	-26 %	-22 %	+10 %	-2,5 %	± 0 %	-16 %	-14 %	-5 %	+1 %
L	-	-	-	-	+21 %	-	+5 %	-	-0,6 %
Phantom R	-	-	+8 %	-	-	-2 %	-10 %	-7 %	-6 %
L	-	-	+15 %	-	-	+1 %	+11 %	+3 %	-12 %
<u>Puls II</u>									
Freiluft R	-6 %	-16 %	+22 %	+8 %	+11 %	-10 %	-6 %	+1 %	-14 %
L	-	-	-	-	+13 %	-	+3 %	-	+8 %
Phantom R	-	-	+6 %	-	-	-5 %	-7 %	-16 %	+5 %
L	-	-	+35 %	-	-	+5 %	-11 %	-13 %	-6 %
Max. Abweichung	-6 %	-16 %	+35 %	+8 %	+21 %	+5 %	+11 %	+3 %	+8 %
Min. Abweichung	-26 %	-22 %	+6 %	-2,5 %	± 0 %	-16 %	-14 %	-16 %	-14 %
Rel. Streubreite	± 10 %	± 3 %	± 15 %	± 5 %	± 11 %	± 10 %	± 13 %	± 10 %	± 11 %

FREILUFTDOSIMETER

KERMA



GAMMADOSIS

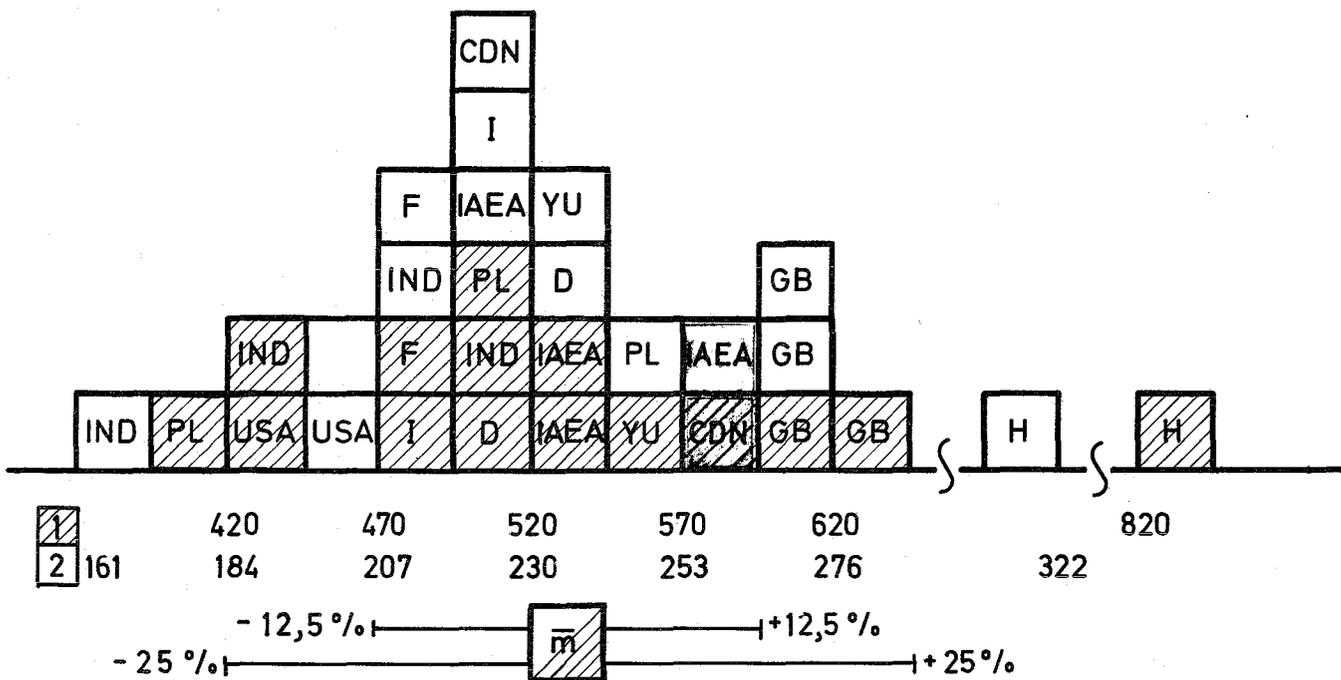
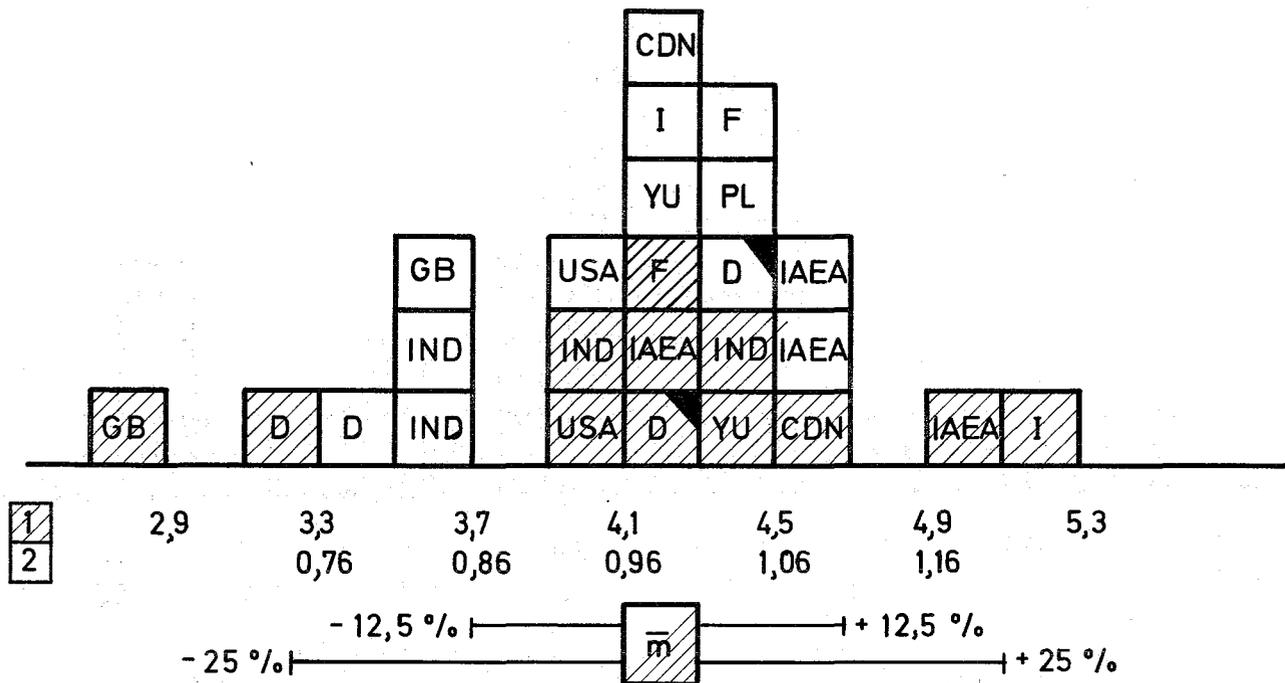


Abb. 5: Meßwertabweichung der Dosimeter vom Mittelwert der Vergleichsmessung bei Freiluftbestrahlung für Kerma und Gammadosis

FREILUFTDOSIMETER

FLUENZ > 2,5 MeV



FLUENZ < 0,5 eV

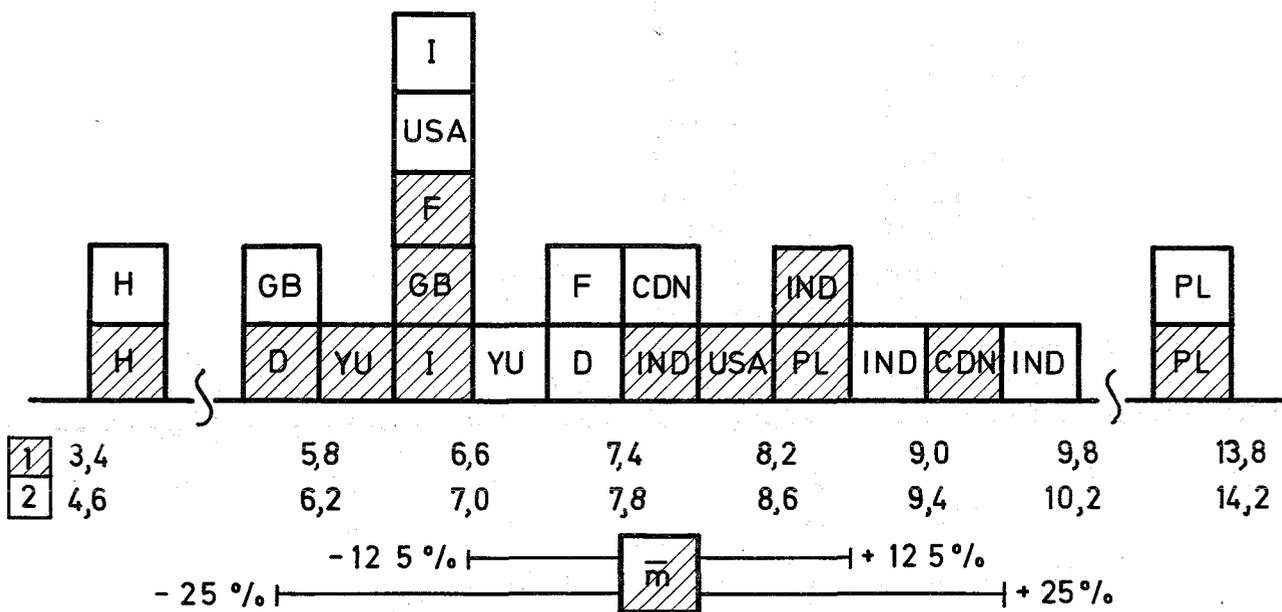
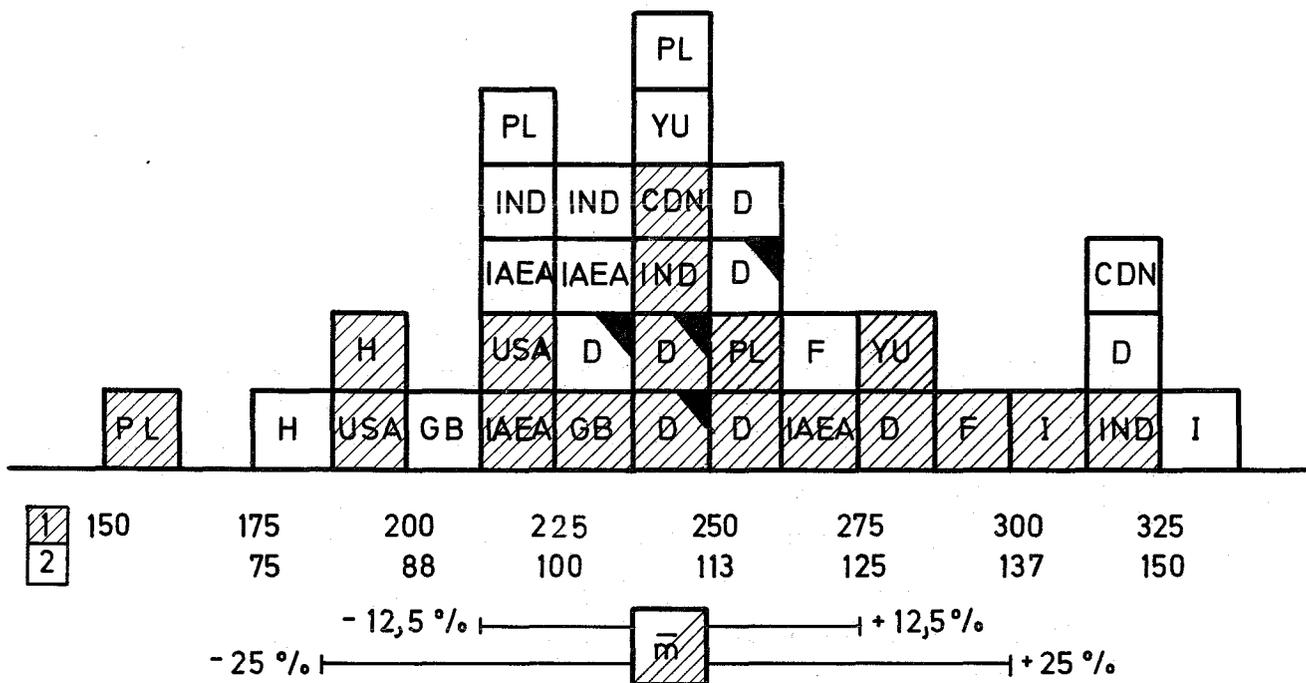


Abb. 6: Meßwertabweichung der Dosimeter vom Mittelwert der Vergleichsmessung bei Freiluftbestrahlung für die Fluenz im Energiebereich > 2,5 MeV und < 0,5 eV

PERSONENDOSIMETER

KERMA



GAMMADOSIS

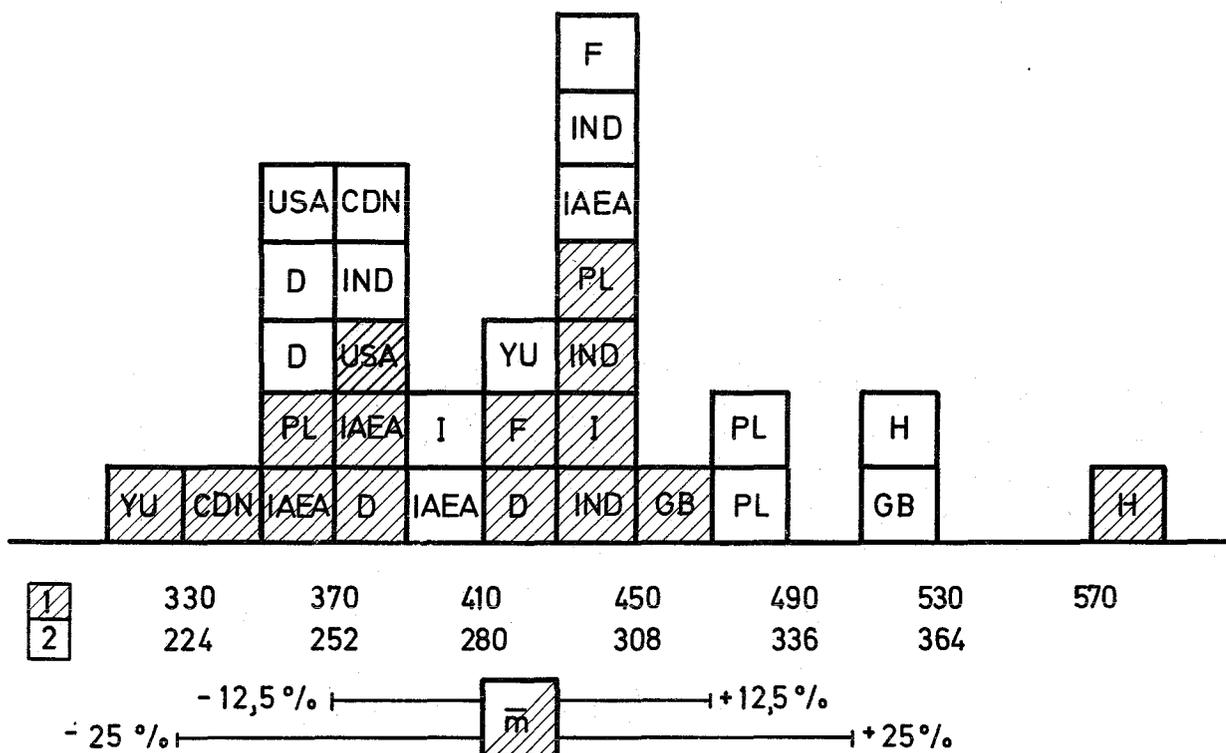


Abb. 7: Meßwertabweichung der Dosimeter vom Mittelwert der Vergleichsmessung bei Phantombestrahlung für Kerma und Gammadosis

Kernspurdetektoren (Schwelle ca. 1 MeV) insbesondere aber über die (n,f)-Reaktion mit Neptunium (Schwelle 0,75 MeV) zu erzielen.

Eine Ausmessung der ²⁴Na-Aktivität der Remcal-Phantome führte im Vergleich zu älteren Bestrahlungen in Valduc zu geringeren Werten, so daß hierfür keine Daten vorliegen. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, daß das Phantom durch eine Vielzahl von Dosimetern abgedeckt war, wodurch die Flußdichte der einfallenden Neutronen durch das Cadmium in den Dosimetern geschwächt wurde.

Literaturverzeichnis

- (1) Nuclear Accident Dosimetry Systems, I.A.E.A. Vienna 1970, ST I/PUB/241
- (2) Final Report of First I.A.E.A. Intercomparison Measurement Valduc (France) - Juni 1970, in press
- (3) "Quelques éléments sur CRAC", Commissariat à l'Énergie Atomique, SEEC, No. 82
- (4) Maushart, R., Piesch, E.: Proc. of Luminescence Dosimetry Symposium Stanford 1965
- (5) Personnel Dosimetry Systems for External Radiation Exposure Technical Reports Series Nr. 109, I.A.E.A., Vienna 1970
- (6) Piesch, E.: Proc. of Int. Summer School on Radiation Protection Cavtat, Jugoslavia, 1970
- (7) Piesch, E.: Proc. of I.A.E.A. Symposium on Neutron Monitoring, p. 471, I.A.E.A., Vienna 1967
- (8) Adams, N., Dennis, J.A.: Report AERE - R 6008
- (9) Piesch, E.: Atompraxis, Direct Information 2/70, Heft 5, 1970
- (10) Piesch, E.: Proc. of I.A.E.A. Symposium New Developments in Physical and Biological Radiation Detection, (in press) I.A.E.A. Vienna 1971

