

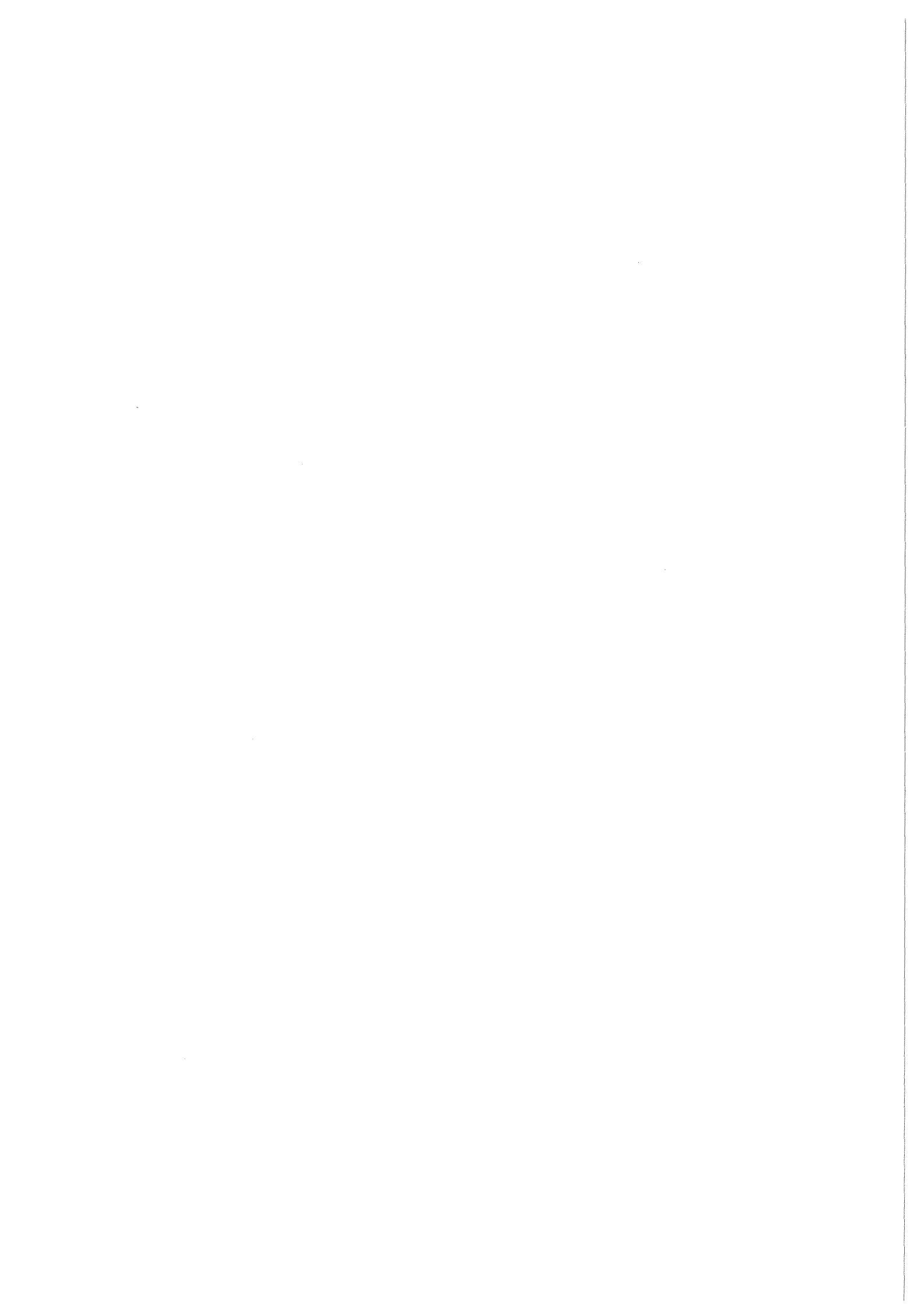


KfK 4456
Oktober 1988

Untersuchungen des Beta-Photonen- Mischstrahlungsfeldes im Anlagenbereich des Dampferzeugers im Kernkraftwerk Obrigheim

B. Burgkhardt, E. Piesch
Hauptabteilung Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Hauptabteilung Sicherheit

KfK 4456

**Untersuchungen des Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeldes im
Anlagenbereich des Dampferzeugers im Kernkraftwerk Obrigheim**

B. Burgkhardt und E. Piesch

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Zur Untersuchung des Beta-Photonenstrahlungsfeldes in Anlagenteilen des Primärkreislaufs wurden Bestrahlungsexperimente in verschiedenen Abständen von ausgebauten Dichtscheiben des Dampferzeugers unter Verwendung von LiF-Thermolumineszenzdetektoren unterschiedlicher Dicke und Abdeckung durchgeführt. Die Tiefendosisverteilung für einen masselosen Detektor ergibt sich aus den Meßwerten durch Anwendung eines standardisierten Extrapolationsverfahrens.

Die Meßergebnisse zeigen, daß die Tiefendosisverteilung unter Berücksichtigung von Luft- und Detektorabsorption vom Abstand zur Strahlenquelle unabhängig ist, so daß eine Analyse des niederenergetischen Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeldes generell aus dem Meßergebnis in einem Abstand von etwa 5 cm möglich ist. Für die Strahlenschutzüberwachung am Arbeitsplatz werden entsprechende Transmissionsfaktoren für Schutzkleidung und Detektoren unterschiedlicher Dicke bestimmt. Die Ermittlung der Äquivalentdosen $H'(0,07)$, $H'(10)$ sowie der Äquivalentdosen für die interessierenden Organe Augenlinse und Hoden zeigt, daß die energiearme Betastrahlungskomponente im wesentlichen nur zur Teilkörperdosis $H'(0,07)$ beiträgt und durch eine Abschirmung von $100 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ absorbiert wird.

Investigation of the mixed beta-photon radiation field in plant areas of the heat steam generator of the Obrigheim Nuclear Power Station

Abstract

The investigations of the beta-photon radiation field in parts of the plant in the primary circuit were performed by irradiation experiments in different distances of exhausted disks of the heat steam generator using LiF thermoluminescence detectors. The depth dose distribution for a detector free of mass is found on the basis of the measurement results by using a standardized extrapolation procedure.

The measurement results show that the depth dose distribution is more or less independent of the detector-to-source distance if the absorption in air and the detector is taken into account. Thus low energy beta-photon fields can be analyzed, in general, using the results found in one distance of about 5 cm from the source. For the purpose of radiation protection at working places transmission factors for protective clothes and detectors of different thicknesses were determined. The estimation of the dose equivalents $H'(0.07)$ and $H'(10)$ and the dose equivalents in the lens of the eye and the testes shows that the low energy beta radiation component contributes only to the partial dose equivalent $H'(0.07)$ and will be absorbed by a protective layer of $100 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Meßprogramm	2
3	Strahlungsfeld am Dampferzeuger	3
3.1	Tiefendosisverteilung an der Dichtscheibe	3
3.2	Ermittlung des Abstandseffektes	5
3.3	Analyse des Betastrahlungsfeldes	9
4	Teilkörperexposition an der Oberfläche der Dichtscheibe	11
5	Personenüberwachung im Bereich des Dampferzeugers	13
5.1	Ermittlung von Transmissionsfaktoren für die Schutzkleidung	13
5.2	Messung von Teilkörperexpositionen	14
5.3	Personendosis-Meßergebnisse während der Revision	17
6	Bewertung des Meßergebnisses	18
7	Literatur	20

1 Einleitung

Am Druckwasserreaktor des Kernkraftwerkes Obrigheim (KWO) ist bei Revisionsarbeiten insbesondere am Dampferzeuger und anderen Anlagenteilen des Primärkreislaufes mit einem Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeld zu rechnen, in welchem die Beta-Äquivalentdosis ein Vielfaches der Photonen-Äquivalentdosis betragen kann. Wegen der dort vorherrschenden hohen Dosisleistung sind signifikante Strahlenexposition durch Betastrahlung nicht auszuschließen.

Da Messungen im Dampferzeuger wegen der hohen Ortsdosisleistung nur kurzzeitig möglich sind und zusätzliche Strahlenexpositionen vermieden werden sollten, wurden die Experimente an zwei ausgebauten Dichtscheiben des Dampferzeugers durchgeführt. Diese Dichtscheiben lassen als Teile des Primärkreislaufes eine in der Nuklidzusammensetzung vergleichbare Oberflächenkontamination erwarten wie diejenige im vorübergehend zugänglichen Bereich des Dampferzeugers.

Es war Ziel der vorliegenden Bestrahlungsversuche¹⁾, das Strahlungsfeld im Dampferzeuger in verschiedenen Abständen von der kontaminierten Oberfläche hinsichtlich der vorhandenen Beta- und Photonenstrahlungsanteile zu untersuchen und Aussagen über die Betastrahlenqualität und die zu erwartende Betastrahlungsexposition zu erhalten. Eine weitere Aufgabe bestand darin, festzustellen, ob die vorhandenen TLD-Systeme zur Messung der Teilkörperexposition insbesondere das von der amtlichen Meßstelle eingesetzte TL-Fingerringdosimeter eine hinreichend genaue Ermittlung der durch Beta- und Photonenstrahlung herrührenden Äquivalentdosis $H'(0,07)$ in 0,07 mm Gewebetiefe ermöglichen.

1) Die Untersuchungen wurden von KfK im Auftrag des Kernkraftwerkes Obrigheim durchgeführt.

2 Meßprogramm

Zur Analyse des Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeldes insbesondere hinsichtlich einer dosimetrischen Bewertung wird die experimentell ermittelte Tiefendosisverteilung im Gewebe herangezogen. Hierzu wurden in einer Polyäthylenplatte von 5 cm \varnothing auf der dem Strahlungsfeld zugewandten Seite Thermolumineszenzdetektoren unterschiedlicher Dicke unter einer flächenbezogenen Masse von 2 bis ca 2 000 mg·cm⁻² angeordnet. Zum Einsatz kamen LiF:Mg,Ti-Detektoren, deren Dicke einer flächenbezogenen Masse von 10, 30, 100 und 240 mg·cm⁻² entsprachen. Tab. 1 gibt Angaben über die Detektorgeometrien sowie die entsprechenden unteren Nachweisgrenzen. Die Bestrahlungen zur Ermittlung der Tiefendosisverteilungen wurden jeweils vor Ort in einem Abstand von 5 cm, 10 cm, 30 cm über einer etwa vor 2 Jahren ausgebauten Dichtscheibe und in 5 cm und 50 cm Abstand über einer etwa 1 Monat alten kontaminierten Dichtscheibe durchgeführt. Zusätzliche Bestrahlungen an Fingerphantomen dienen der Ermittlung des Ansprechvermögens insbesondere von Fingerringdosimetern, die zur Bestimmung der Teilkörperdosis eingesetzt werden. Hierbei wurden gebräuchliche Fingerringdosimeter - Edelstahlring mit TL-Detektoren und Abdeckung durch Schrumpfschlauch - mit unterschiedlich dicken Detektoren bzw. Abdeckfolien ausgerüstet und insbesondere im Kontakt zur Strahlenquelle (Dichtscheibe) bestrahlt. Während der Revision wurden von beruflich strahlenexponierten Personen darüberhinaus verschiedene Personendosimeter am Körpertrumpf, am Kopf sowie am Finger getragen.

Tab. 1: Detektoreigenschaften der verwendeten LiF-Detektoren

LiF-Detektor			Standardabweichung		Untere Nachweisgrenze ²⁾ mSv
Typ	Größe mm	Flächenbezogene Masse mg·cm ⁻²	Voranzeige mSv	Reproduzierbarkeit ¹⁾ %	
Chip	3x3x0,9	240	0,03	2	0,06
Chip	3x3x0,4	100	0,04	3	0,08
Teflon	6 \varnothing x0,13	30	1,5	4	3
Teflon	6 \varnothing x0,03	10	3,0	7	6
Chip + Graphit	3x3x0,9	~ 20	0,1	3	0,2

1) beim 100fachen der Voranzeige; 2) 2 σ -Wert der Voranzeige

3 Strahlungsfeld am Dampferzeuger

3.1 Tiefendosisverteilung an der Dichtscheibe

Als repräsentatives Strahlungsfeld für Revisionsarbeiten in Anlagenteilen des Primärkreislaufs wurde das Strahlungsfeld in unmittelbarer Nähe der aus dem Dampferzeuger ausgebauten Dichtscheibe angesehen. Für andere Bestrahlungsgeometrien, die von einer ebenen Flächenquelle abweichen, wird das Dosisverhältnis Beta- zu Photonenbestrahlung wegen der höheren Absorption der Betastrahlung nicht größer sein als das an der Dichtscheibe ermittelte. Es standen zwei Dichtscheiben mit unterschiedlichem Kontaminationsanteil für kurzzeitige Bestrahlungen zur Verfügung. In Abb. 1 und 2 ist die mit den TL-Detektoren gemessene Äquivalentdosis (Tiefendosis) in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse (Gewebetiefe) für einen Detektor-Quellenabstand von 5 cm für die Dichtscheiben Nr. 1 bzw. Nr. 2 wiedergegeben. Die Tiefendosisverteilung für einen masselosen Detektor von $0 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ wurde unter Verwendung aller Meßwerte mit Hilfe eines Extrapolationsverfahrens berechnet.

Unter Einbeziehung aller mit unterschiedlich dicken Detektoren erhaltenen Meßergebnisse wurde mit Hilfe eines Rechenprogrammes die wahre Tiefendosisverteilung für einen masselosen Detektor (Detektormasse $0 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$) bestimmt. Unter Berücksichtigung einer Absorption der Strahlung sowie des TL-Lichtes im Detektor konnte dann der Erwartungswert für die verschiedenen Detektoren in Abhängigkeit von der Abdeckung berechnet werden. Die so berechneten Tiefendosiskurven in den Abbildungen stimmen gut überein mit den jeweiligen Meßwerten. Die Streuung der Meßwerte kann u. a. auf Meßfehler und Bestrahlungsunsicherheiten zurückgeführt werden, wie z. B. Unterschiede im Detektor-Quellenabstand (max. 1 cm bei Abdeckungen bis zu $1000 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$), u.U. verschiedene Detektorpositionen in Bezug auf die Strahlenquelle und den Photomultiplier während der Bestrahlung bzw. Auswertung, ungleichmäßige Bestrahlung der Dosimeteranordnung bedingt durch Inhomogenitäten der Radionuklide auf der Dichtscheibe.

Beide Dichtscheiben ergaben vergleichbare Tiefendosisverteilungen und unterscheiden sich nur im Betrag der Dosisleistung. Für die Teilkörperdosis der Haut $H'(0,07)$ in 0,07 mm Gewebetiefe in 5 cm Quellenabstand beträgt die Äquivalentdosisleistung $550 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$ bei Dichtscheibe Nr. 1 und $1500 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$ bei Dichtscheibe Nr. 2, und für die Ganzkörperdosis $H'(10)$ in 10 mm Gewebetiefe

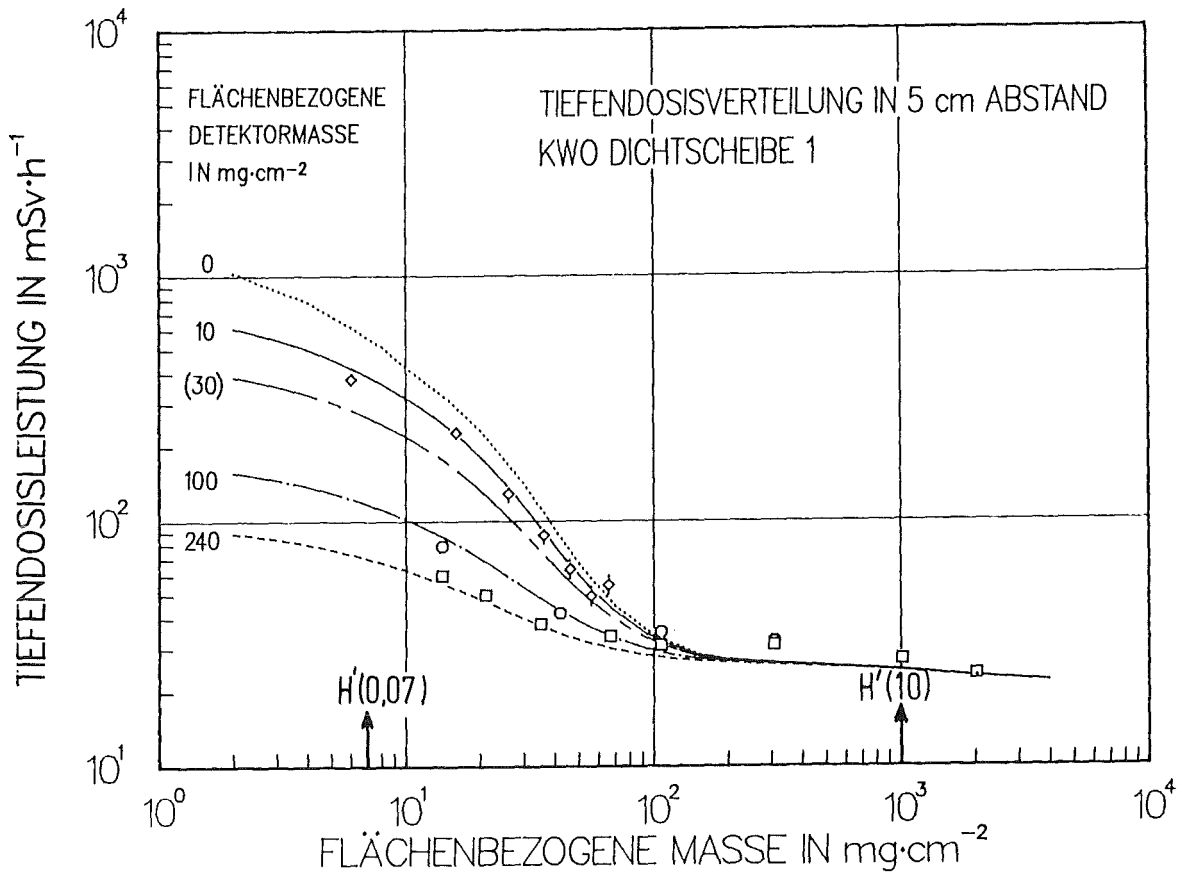


Abb. 1: Tiefendosisverteilung des Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeldes der Dichtscheibe Nr. 1 für einen Detektor-Quellenabstand von 5 cm

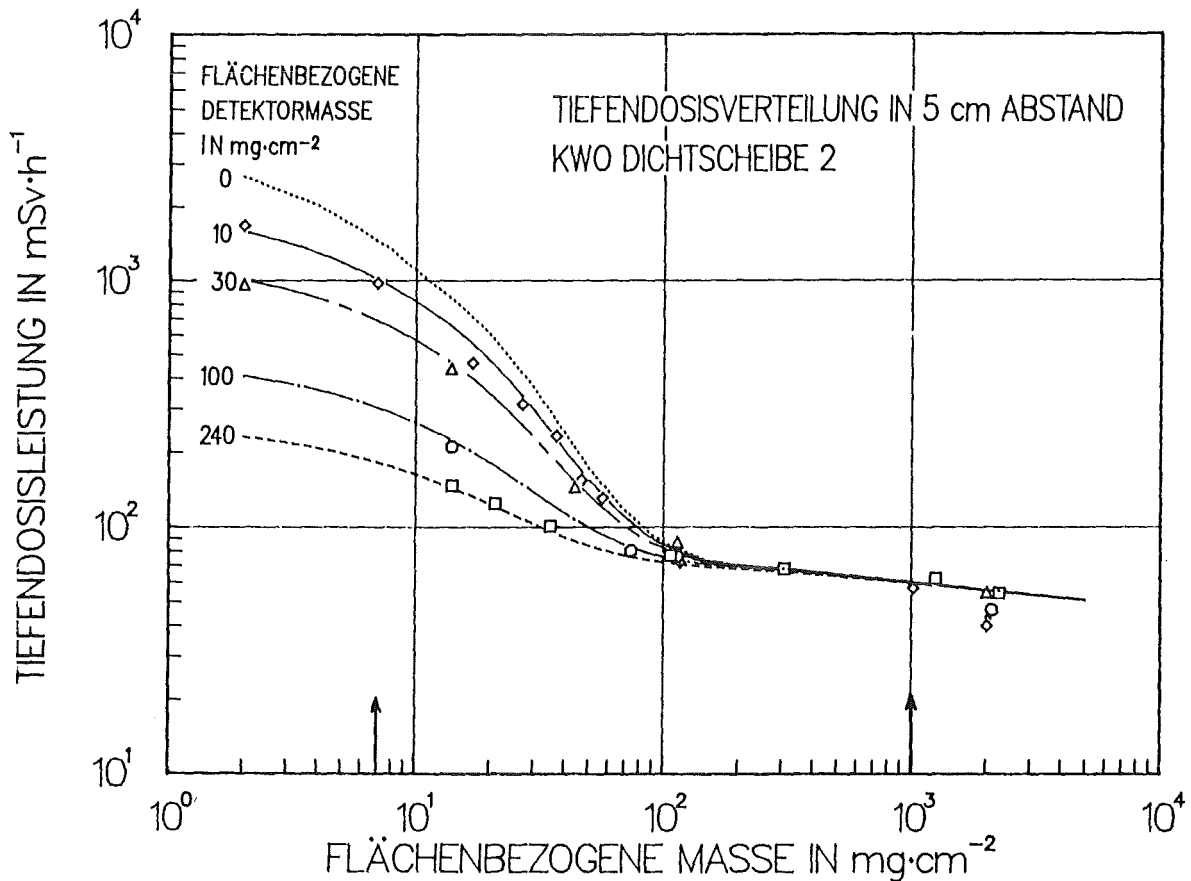


Abb. 2: Tiefendosisverteilung des Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeldes der Dichtscheibe Nr. 2 für einen Detektor-Quellenabstand von 5 cm

beträgt die entsprechende Äquivalentdosisleistung $23 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$ bzw. $60 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$. Das Verhältnis der Äquivalentdosen $H'(0,07)$ insbesondere durch Betastrahlung und $H'(10)$ durch Photonenstrahlung beträgt in 5 cm Quellenabstand Faktor 24, so daß der Photonen-Äquivalentdosisanteil nur mit etwa 4 % zur Teilkörperdosis beiträgt. Der energiearme Betastrahlungsanteil wird durch eine flächenbezogene Masse von etwa $100 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ praktisch vollständig absorbiert. In einem Abstand von 1 m von der Dichtscheibe erwartet man wegen der Absorption der Betastrahlung in der Luftschicht entsprechend einer Gewebemasse von etwa $115 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ keinen Beitrag einer Betastrahlung.

3.2 Ermittlung des Abstandseffektes

Zur Ermittlung der Äquivalentdosis in Abhängigkeit vom Quellenabstand wurden zusätzliche Tiefendosismessungen in 10 cm, 30 cm und 50 cm Abstand von der Dichtscheibe durchgeführt. Die Änderung der Tiefendosisverteilung in Abb. 3 zeigt, daß sich das entsprechende Äquivalentdosisverhältnis von Betastrahlung und Photonenstrahlung von einem Faktor 24 in 5 cm auf einen Faktor 17 in 10 cm, einen Faktor 4 in 30 cm bzw. einen Faktor 2,5 in 50 cm reduziert.

Zur Ermittlung einer vom Abstand Detektor-Quelle unabhängigen Tiefendosisverteilung wurden die vorliegenden Tiefendosisverteilungen für verschiedene Detektor-Quellenabstände aus Abb. 3 zum Vergleich

- auf den $H'(10)$ -Wert im Abstand von 5 cm normiert und
- entsprechend der zusätzlichen Luftabsorption in Abständen größer 5 cm in eine tiefere Gewebeschicht verschoben (10 cm Luft = $11,5 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ Gewebe).

Die so erhaltenen Kurvenscharen für den KWO-Druckwasserreaktor und das Strahlungsfeld von Uranoxyd-Pellets (1, 2) sind in Abb. 4 wiedergegeben. Abb. 4 zeigt eine gute Übereinstimmung der so gewonnenen relativen Tiefendosisverteilungen, die insbesondere im Bereich von $100 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ wegen der schlechten Auflösung der experimentellen Meßwerte im Wendepunkt der Kurve bei größerem Detektor-Quellenabständen erwartungsgemäß eine größere Streuung zeigen. Eine ähnliche Übereinstimmung hinsichtlich einer Berücksichtigung der Luftabsorption zeigen in Abb. 4 die Meßergebnisse im Betastrahlungsfeld von UO_2 -Pellets, welches als typisches energiereiches Betastrahlungsfeld anzusehen ist (1,2).

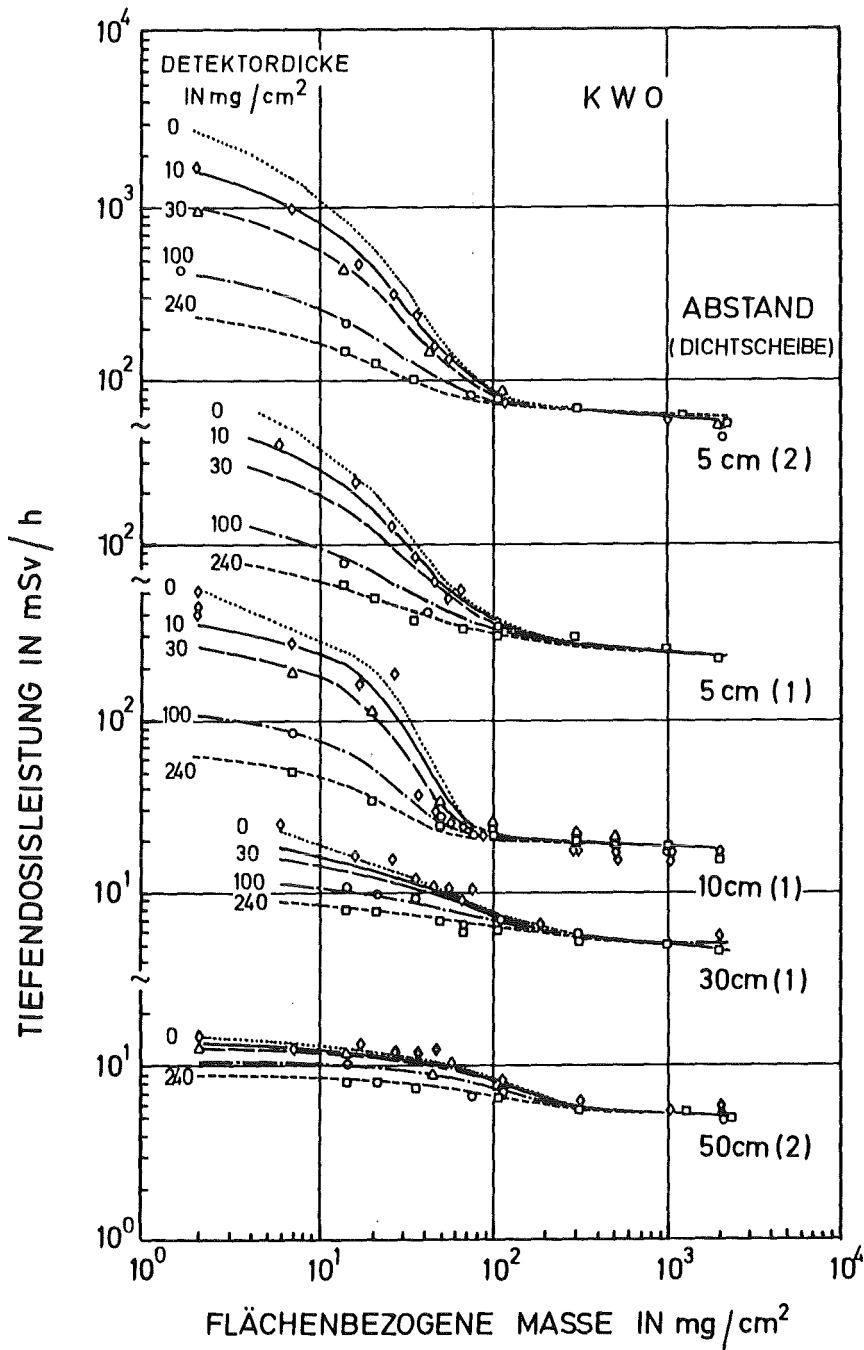


Abb. 3: Tiefendosisverteilungen des Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeldes an den Dichtscheiben Nr. 1 und 2 in verschiedenen Detektor-Quellenabständen. Die Meßwerte für die verschiedenen Detektordicken wurden durch entsprechende Symbole gekennzeichnet (siehe z. B. Meßergebnisse in 5 cm Abstand).

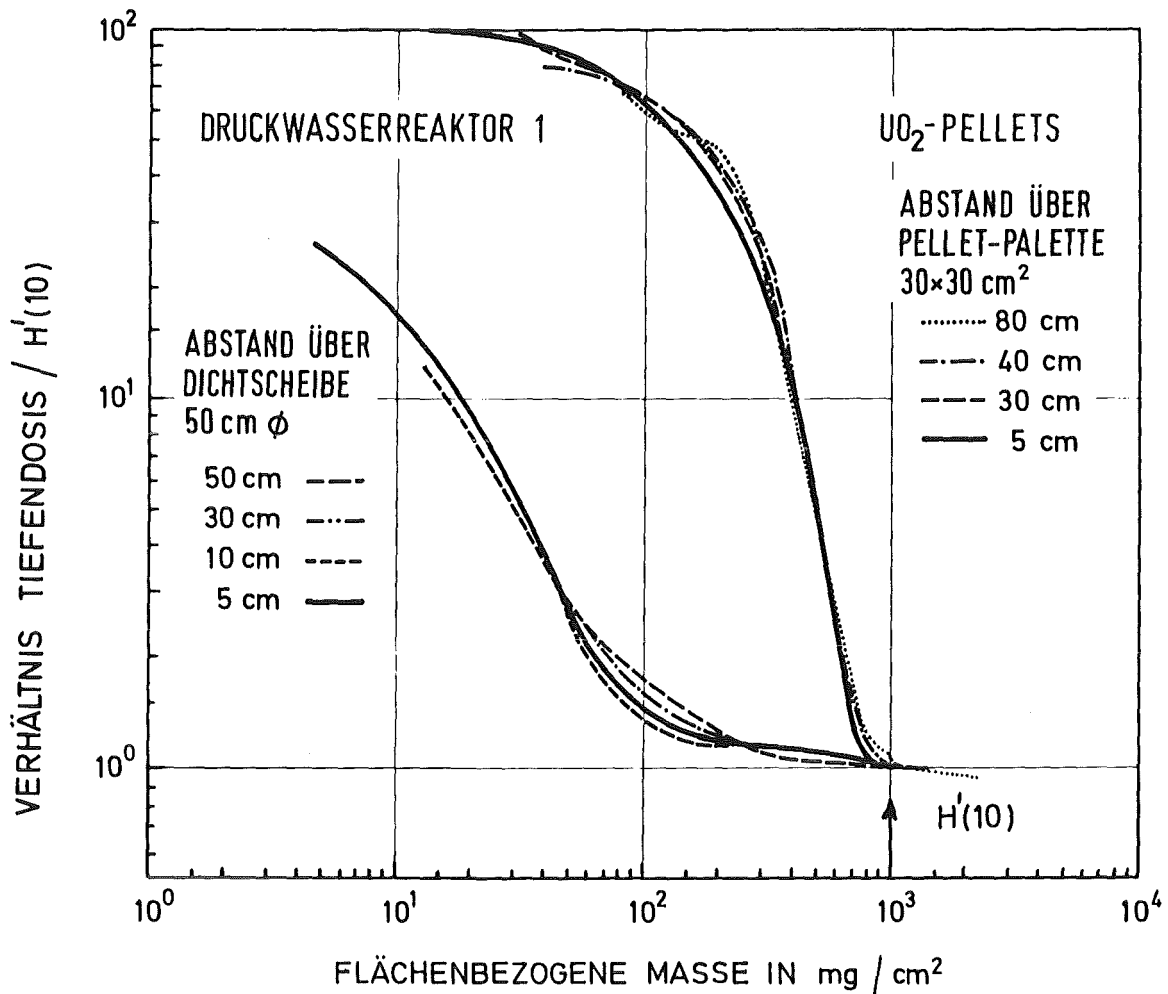


Abb. 4: Vergleich der relativen abstandskorrigierten Tiefendosisverteilung normiert auf $H'(10)$ für verschiedene Quellenabstände gemessen am KWO-Druckwasserreaktor und an Uranoxyd-Pellets nach (1)

Aufgrund dieser Ergebnisse ist es daher ausreichend, zur Analyse eines Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeldes die Tiefendosisverteilung grundsätzlich nur in einem einzigen, möglichst kleinen Detektor-Quellenabstand von etwa 5 cm (siehe Abschnitt 4) experimentell zu bestimmen und auf andere Detektor-Quellenabstände bzw. flächenbezogenen Massen umzurechnen. Ein Abstand von 5 cm wurde gewählt, um eventuelle Inhomogenitäten der Aktivität auf der Dichtscheibe auszugleichen.

Die Tiefendosisverteilung in 5 cm Abstand ergibt andererseits eine obere Abschätzung des Beta-Photonendosisverhältnisses für größere Detektor-Quellenabstände auch bei anderen Quellengeometrien als einer Scheibe, weil die Betastrahlung in jedem Fall stärker absorbiert wird als die Photonenstrahlung. Abb. 5 zeigt die Äquivalentdosis $\dot{H}'(0,07)$, $\dot{H}'(0,07)$ hinter einer Abdeckung von $30 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ und $\dot{H}'(10)$ in Abhängigkeit vom Abstand zu zwei Dichtscheiben. Die Äquivalentdosiswerte wurden den Tiefendosisverteilungen in Abb. 3 bei $7 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ bzw. $1000 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ entnommen. Die Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(0,07)$ in Kontakt zur Quelle ergibt sich aus den Messungen am Fingerphantom (siehe Tab. 3) in Kontakt zur Dichtscheibe Nr. 2. Bei Verwendung von Stoffhandschuhen mit einer flächenbezogenen Masse von $30 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ verringert sich die Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(0,07)$ insbesondere bei geringem Quellenabstand bis zu einem Faktor 5.

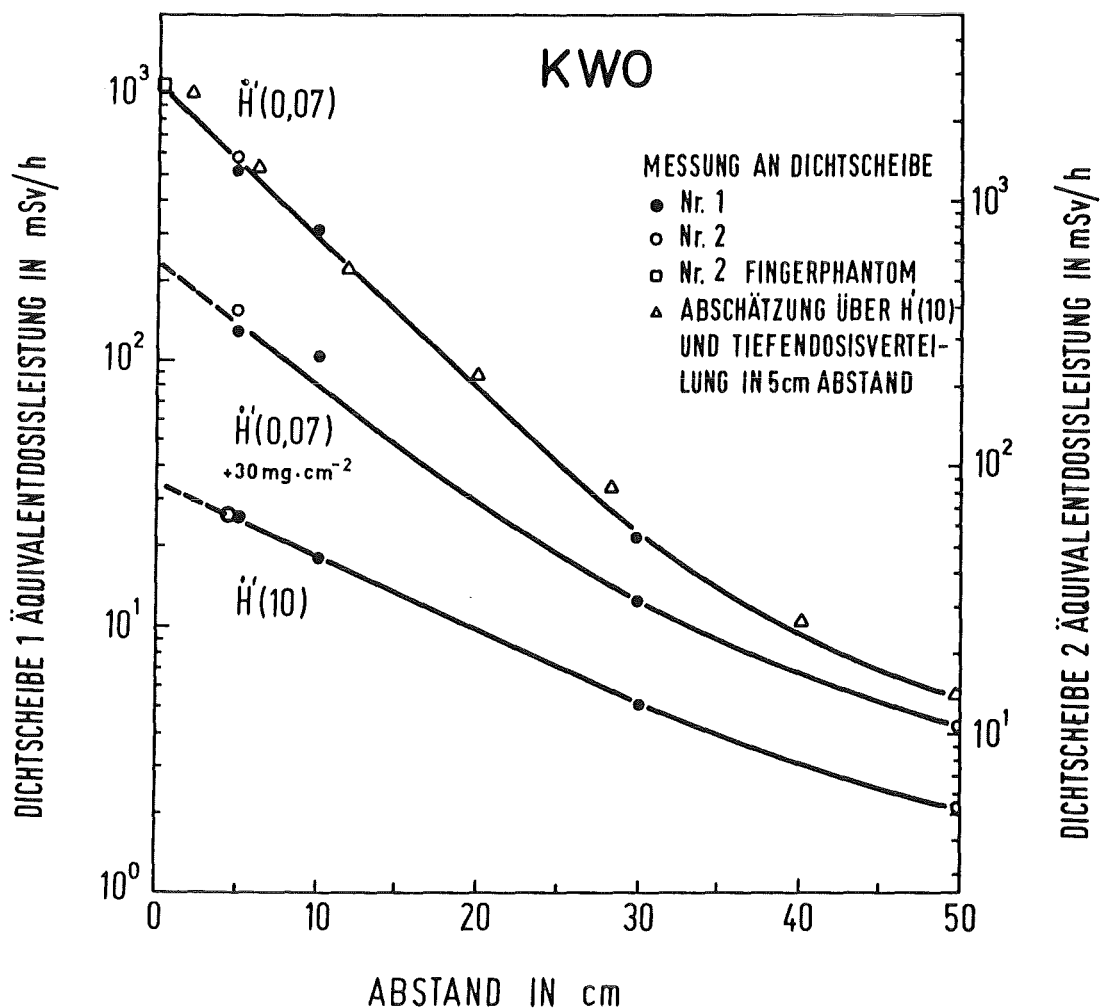


Abb. 5: Die Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(0,07)$ und $\dot{H}'(10)$ in Abhängigkeit vom Abstand zu den Dichtscheiben

Die Dreiecke in Abb. 5 zeigen eine Abschätzung von $H'(0,07)$ unter Verwendung von $H'(10)$ -Meßwerten in verschiedenen Abständen bis 50 cm und der Tiefendosisverteilung in 5 cm Abstand. Zur Bestimmung des maximalen Beta-Photo-nendosisverhältnisses an der Oberfläche sind jedoch zusätzliche Messungen von $H'(0,07)$ an der Oberfläche und Messungen von $H'(10)$ in quellnahen Abständen zur Extrapolation auf die Oberfläche erforderlich.

3.3 Analyse des Betastrahlungsfeldes

Aufgrund gammaspektrometrischer Messungen ist die Radionuklidzusammensetzung der Oberflächenkontamination an den Dichtscheiben bekannt. Dies sind hier insbesondere die Radionuklide Co-60, Co-58 und u. U. La-140. Unter Berücksichtigung der entsprechenden Nuklidanteile sowie der Halbwertszeit läßt sich die entsprechende Beta-Tiefendosisverteilung für das Nuklidgemisch rechnerisch ermitteln. Zugrundegelegt wurden hierbei die von Cross (3) für die einzelnen Radionuklide berechneten Tiefendosiscurven von Flächenquellen für eine Oberflächenaktivität von $1 \text{ MBq}\cdot\text{cm}^{-2}$. Abb. 6a zeigt, wie sich die berechnete Tiefendosisverteilung für das Radionuklidgemisch aus den entsprechenden Komponenten zusammensetzt.

Zum Vergleich der experimentellen und berechneten Beta-Tiefendosisverteilung in 5 cm Abstand wurde in Abb. 6b die Tiefendosisverteilung aus Abb. 2 einer aus einem Betastrahlungsanteil und Photonenstrahlungsanteil zusammengesetzten Tiefendosisverteilung gegenübergestellt. Der Photonenanteil wurde durch Extrapolation aus den Meßwerten in Gewebetiefen größer als $100 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ gewonnen, in der der Beitrag durch Betastrahlung vernachlässigbar ist. Der Betastrahlungsanteil ist aus Abb. 6a unter Berücksichtigung der Absorption von 5 cm Luft und Multiplikation mit dem Faktor 3,9 ermittelt worden. Aufgrund des Vergleiches der gemessenen und berechneten Tiefendosisverteilungen in Abb. 6b kann die Oberflächenkontamination an der Dichtscheibe Nr. 2 mit $3,9 \text{ MBq}\cdot\text{cm}^{-2}$ angegeben werden. Die relativ gute Übereinstimmung von berechneten und gemessenen Tiefendosisverteilungen in Abb. 6b für einen Quellenabstand von 5 cm bestätigt die Zuverlässigkeit und die relativ geringe Meßunsicherheit des hier eingesetzten Meß- und Berechnungsverfahrens, bei dem eine Vielzahl von Meßergebnissen mit unterschiedlich dicken Detektoren zur Ermittlung einer extrapolierten Tiefendosisverteilung für masselose Detektoren herangezogen wurden.

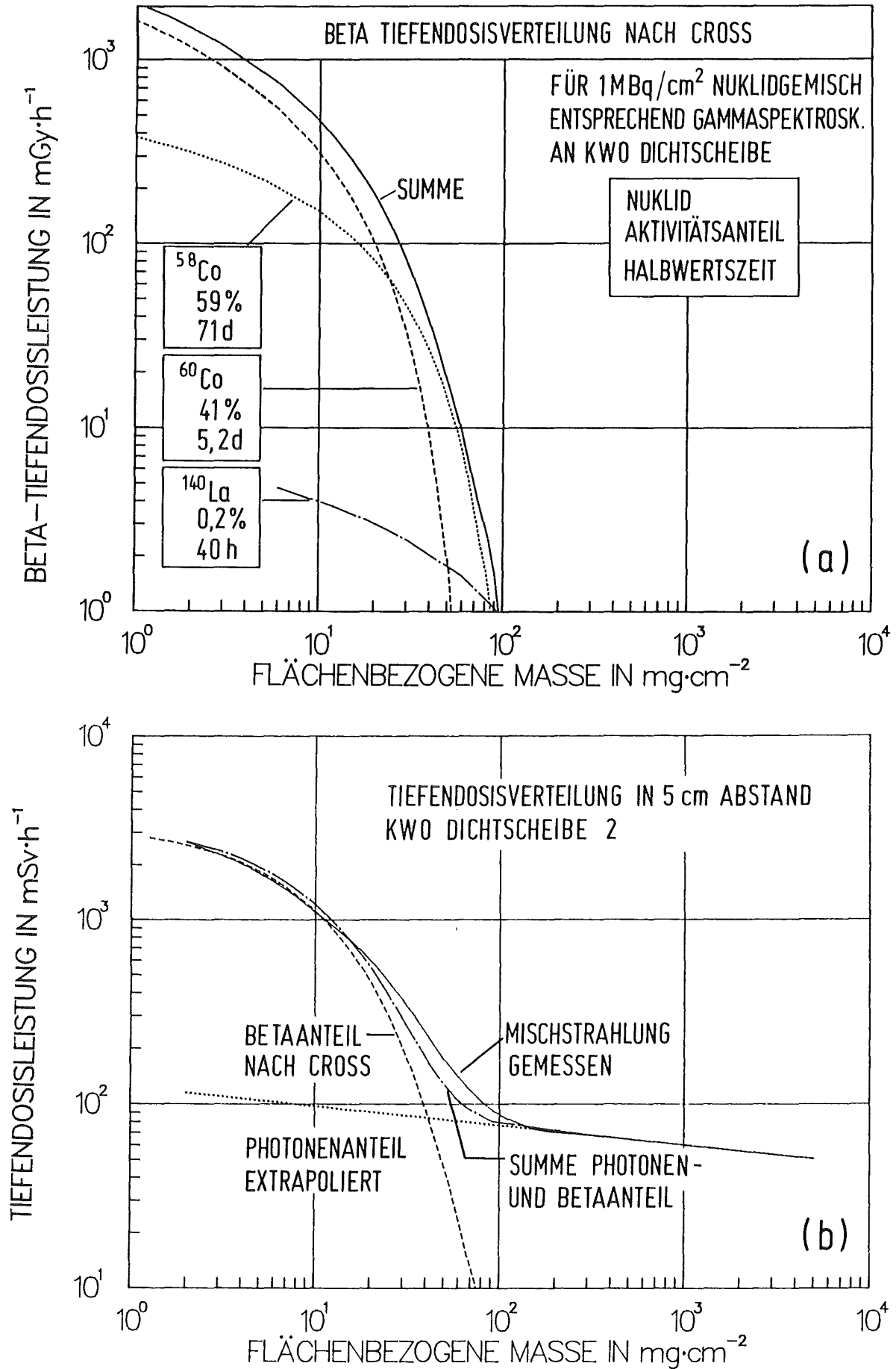


Abb. 6: Vergleich von (a) berechneten und (b) gemessenen Tiefendosisverteilungen durch Betastrahlung für die Dichtscheibe Nr. 2

Die verbleibenden geringen Unterschiede zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen können mit einer Absorption der Betastrahlung in der kontaminierten Oberfläche sowie einem energiearmen Photonenstrahlungsanteil (u. U. Bremsstrahlung) erklärt werden.

Im Betastrahlungsfeld des Dampferzeugers ist in geringen Abständen zunächst das Radionuklid Co-60 mit $E_{\beta\max} = 0,32 \text{ MeV}$, in größeren Abständen das Radionuklid Co-58 mit $E_{\beta\max} = 0,47 \text{ MeV}$ dominierend. Eine flächenbezogene Masse von $100 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ reduziert die Beta-Äquivalentdosis bereits um den Faktor 100. Ein Betastrahlungsnachweis wäre in der Teilkörperdosimetrie nicht erforderlich, wenn Kleidung bzw. Schutzhandschuhe und/oder der Abstand in Luft zu kontaminierten Teilen des Dampferzeuger mindestens dieser flächenbezogenen Masse entspricht.

4 Teilkörperexposition an der Oberfläche der Dichtscheibe

Zur Ermittlung der interessierenden Teilkörperexpositionen an der Oberfläche der Dichtscheibe wurde in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse einer zusätzlichen Abdeckung die Äquivalentdosis $H'(0,07)$ der Haut, $H_{Au}(3)$ der Augenlinse und H_{Ho} der Hoden bestimmt. Für die Ermittlung von $H_{Au}(3)$ der Augenlinse wurde die Äquivalentdosis in 3 mm Gewebetiefe herangezogen. Die Gonadendosis H_{Ho} wurde durch Mittelung der Äquivalentdosis in diesem Organ unter Verwendung des gemessenen Tiefendosisprofiles bestimmt.

Die Äquivalentdosis $H'(0,07)$ an der Oberfläche der Dichtscheibe läßt sich aus der für einen masselosen Detektor ermittelten Tiefendosiskurve in 5 cm Abstand (Abb. 2) unter Berücksichtigung von Abstandsgesetz und Luftabsorption abschätzen:

- (a) Zur Korrektur des Abstandes wird für Photonen und Betastrahlung - zunächst unter Vernachlässigung einer Absorption in Luft - dieselbe Abstandsabhängigkeit angenommen. Die Änderung des Photonendosisanteiles von 5 cm auf 0 cm (siehe Abb. 5) wird daher auf den Betadosisanteil übertragen. Damit ergibt sich der Abstandskorrekturfaktor f_a zu

$$f_a = \frac{H(10)_{0\text{cm}}}{H(10)_{5\text{cm}}} \quad (1)$$

- (b) Zur Korrektur einer Absorption in 5 cm Luft wird die hinter einer gewebeäquivalenten Luftschicht von $5,35 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ in $1,65 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ Gewebetiefe gemessene Äquivalentdosis $H'(0,0165)_{5\text{cm}}$ in 5 cm Abstand formal der zur Bestimmung von $H'(0,07)_{0\text{cm}}$ erforderlichen Gewebetiefe von $7 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ gleichgesetzt, die sich aus der Summe von $5,35 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ Luft und $1,65 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ Abdeckung ergeben.
- (c) Die Berücksichtigung der Abstandsabhängigkeit sowie der Luftabsorption mit $f_a = 1,35$ ergibt für die Äquivalentdosis $H'(0,07)_{0\text{cm}}$ an der Oberfläche:

$$H'(0,07)_{0\text{cm}} = f_a \cdot H'(0,0165)_{5\text{cm}} = 1,35 \cdot H'(0,0165)_{5\text{cm}} \quad (2)$$

Die aus dem Tiefendosisverlauf von Abb. 2 unter Berücksichtigung von Gl. (2) ermittelte Äquivalentdosis $H'(0,07)$ an der Oberfläche der Dichtscheibe Nr. 2 ist zusammen mit den anderen interessierenden Äquivalentdosen in Abb. 7 in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse einer zusätzlichen Abdeckung des Dosimeters, beispielsweise durch Schutzhandschuhe bzw. Kleidung wiedergegeben.

An der Oberfläche der Dichtscheibe ist ein maximaler Wert des Äquivalentdosisverhältnisses von $H'(0,07)$ und $H'(10)$ zu erwarten. Der hier ermittelte Faktor 35 entspricht dem in Abb. 5 gemessenen Wert von 30.

Die entsprechenden Äquivalentdosen der Augenlinse und Gonaden sind mit $H'(10)$ vergleichbar, so daß, falls keine ungünstigeren Geometrieverhältnisse bei den Wartungsarbeiten vorliegen, die Ganzkörperdosis - gemessen in Brusthöhe - hinsichtlich der Grenzwerte für Augenlinse und Gonaden dosislimitierend ist.

5 Personenüberwachung im Bereich des Dampferzeugers

5.1 Ermittlung von Transmissionsfaktoren für die Schutzkleidung

Für das Beta-Gamma-Strahlungsfeld am Dampferzeuger wurden in getrennten Bestrahlungsexperimenten Transmissionsfaktoren für die entsprechende Schutzkleidung insbesondere für Unterwäsche, Overalls und deren Kombinationen ermittelt. Die Messung des Transmissionsfaktors erfolgte mit entsprechenden Stoffproben und je einem Detektor von $10 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ flächenbezogener Masse über bzw. unter der Stoffprobe. Die Proben wurden auf einer Plexiglasplatte in 5 cm Abstand von der Dichtscheibe Nr. 2 bestrahlt. Die flächenbezogene Masse der Stoffprobe wurde durch Auswiegen je eines 25 cm^2 großen Quadrates ermittelt.

Den gemessenen Transmissionsfaktoren in Tab. 2 werden die aus der Tiefendosiskurve in Abb. 1 für die entsprechenden flächenbezogenen Massen berechneten gegenübergestellt. Die Angaben gelten für eine Detektordicke $10 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$. Die gemessenen Transmissionsfaktoren liegen bis auf eine Ausnahme tiefer als die aus der Tiefendosiskurve ermittelten, d. h. für Absorptionsabschätzungen ergeben die Tiefendosiskurven konservative Werte. Die Meßwerte für die Unterwäsche zeigen insbesondere wegen einer ungleichmäßigen Flächenbelegung eine 25 % geringere Abschirmwirkung als aufgrund der flächenbezogenen Masse zu erwarten wäre. Korrigiert man auf eine masselose Detektordicke, dann wird die Äquivalentdosisleistung durch die Arbeitskleidung (dicker Overall und Unterwäsche) insbesondere wegen der Absorption der Betastrahlung auf etwa 5 % reduziert. In 5 cm Abstand von der Oberfläche des Dampferzeugers sind danach die Äquivalentdosisanteile durch Betastrahlung und Photonenstrahlung etwa gleich groß (siehe auch Abb. 2 für eine flächenbezogene Masse von $50 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$).

Tab. 2: Beta-Transmissionsfaktoren für Kleidung

Material	Flächen- bezogene Masse mg·cm ⁻²	Transmission Detektor 10 mg·cm ⁻²	
		berechnet ¹⁾	gemessen ²⁾
1 Overall dünn	13,6	0,42	0,38
2 Unterwäsche	25,6	0,23	0,30
3 Overall dick	24,5	0,24	0,22
1 und 2	37,2	0,14	0,10
3 und 2	48,1	0,10	0,06

1) ermittelt aus der gemessenen Tiefendosisverteilung

2) Plexiglasplatte mit aufgeklebten Stoffproben mit je einem Detektor unter und auf der Stoffprobe in 5 cm Abstand der Dichtscheibe Nr. 2

5.2 Messung von Teilkörperexpositionen

Wegen der in der Betadosimetrie zu überwachenden Grenzwerte der Augenlinse und Gonaden wurden die entsprechenden Dosiswerte auch für das hier vorliegende Mischstrahlungsfeld in Abhängigkeit vom Quellenabstand in Luft oder einer zusätzlichen Abschirmung berechnet (Abb. 7). Beide Teilkörperdosen entsprechen dem Wert bei 1000 mg·cm⁻², also praktisch dem Photonen-dosisanteil und brauchen nicht extra überwacht werden.

Zur Ermittlung der Teilkörperexposition der Hände wurden Fingerringdosimeter an Fingerphantomen in Kontakt mit bzw. in 5 cm Abstand von der Dichtscheibe exponiert. Die Bestrahlungszeit betrug 87 bzw. 65 min. Hinsichtlich der Möglichkeit eines Einsatzes von Fingerringdosimetern mit dicken Detektoren wurden neben dünnen LiF-Teflondetektoren auch LiF-Detektoren von 0,4 mm Dicke und unterschiedlicher Abdeckung eingesetzt. Als zusätzliche Abdeckung dienten Stoffhandschuhe bzw. Stoff- und Gummihandschuhe. Die Ergebnisse von 2 Meßreihen sind in den Tabn. 3 und 4 wiedergegeben. Das Tragen von Stoff- bzw. Stoff- und Gummihandschuhen reduziert die Äquivalentdosis H'(0,07) an der Fingeroberfläche auf etwa 10 % bzw. 4 %.

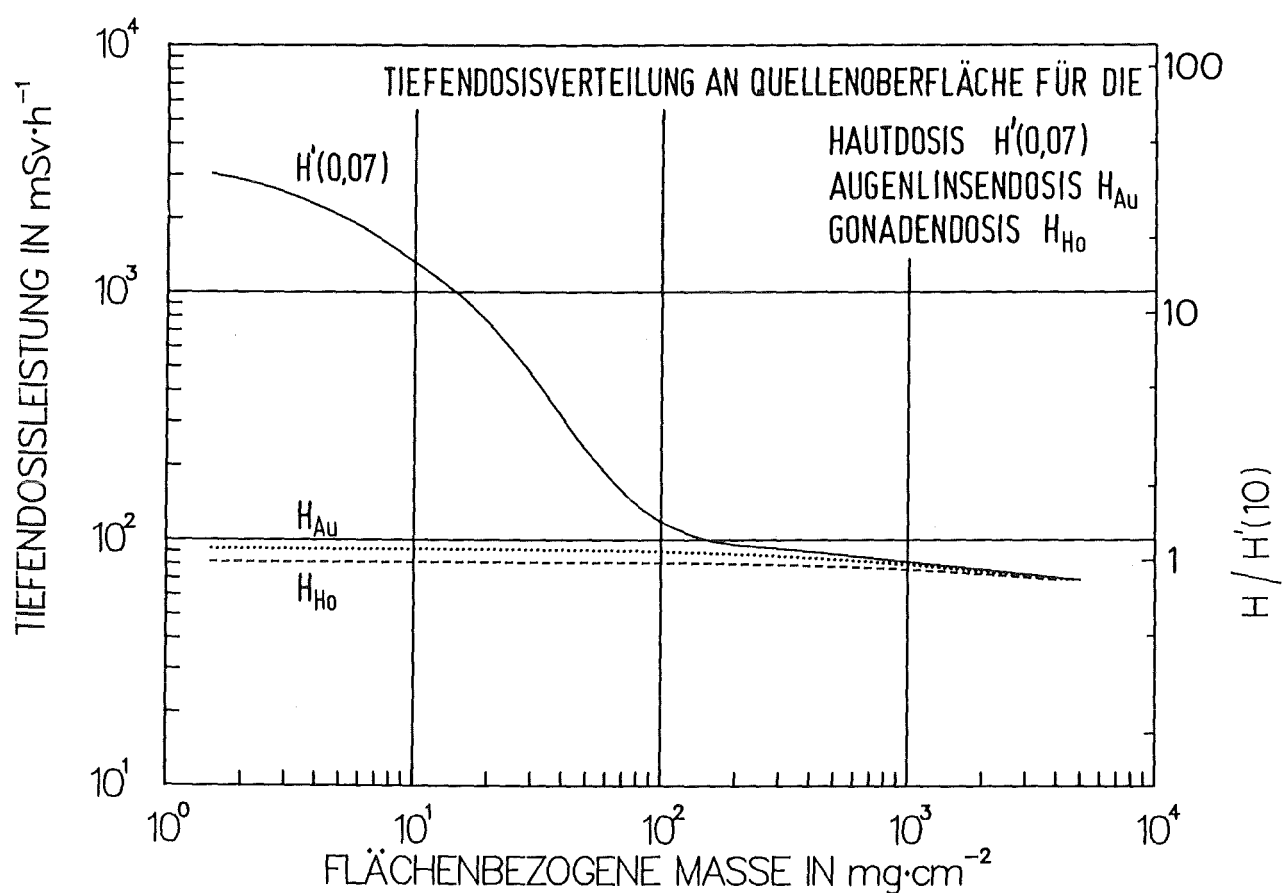


Abb. 7: Ermittelte Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(0,07)$, H_{Au} und H_{Ho} an der Oberfläche der Dichtscheibe Nr. 2 in Abhängigkeit der flächenbezogenen Masse einer Schutzschicht (Schutzhandschuhe bzw. Kleidung)

Im Vergleich zu dünnen LiF-Detektoren würde die Verwendung von 0,4 mm dicken Detektoren (flächenbezogene Masse von 100 mg·cm⁻²) die interessierende Teilkörperexposition durch Beta- und Photonenstrahlung ohne Tragen von Schutzhandschuhen nur mit etwa 10 %, bei Tragen von dünnen Stoffhandschuhen (30 mg·cm⁻²) bzw. Stoff- und Gummihandschuhen (115 mg·cm⁻²) gleichzeitig mit 45 % bzw. mit 100 % anzeigen.

Bei Tragen beider Schutzhandschuhe würden Fingerringdosimeter mit 0,4 mm dicken Detektoren (flächenbezogene Masse von 100 mg·cm⁻²) die Teilkörperdosis durch Beta- und Photonenstrahlung richtig anzeigen. Werden nur dünne Stoffhandschuhe getragen, müßte der Meßwert mit einem Faktor 2,2 multipliziert werden.

Tab. 3: Meßergebnisse von Teilkörperdosimetern bestrahlt am Fingerphantom in Kontakt zur Dichtscheibe Nr. 2

Dosimeter/ Detektordicke/ gewebeäquivalente Abdeckung		Meßwert ¹⁾ in mSv			
		Fingerphantom 1		Fingerphantom 2	
		ohne	mit SH	ohne	mit SH + GH
LiF Teflon 0,03 mm mit Abdeckung 0,02 mm	M ₀	3464	258,8	1930	176,5
Mittelwert		2582	327,4	1033	175,6
Fingerring, zwei LiF 0,4 mm Abdeckung 0,07 mm Abdeckung 1 mm	M ₁	337,4	209,1	328,3	200,5
	M ₂	226,8	158,8	269,4	181,2
Meßwertverhältnis	M ₁ /M ₀	0,11	0,71	0,22	1,14
	M ₁ /M ₂	1,49	1,32	1,22	1,11

1) SH = Stoffhandschuh weiß, ~ 30 mg·cm⁻², SH + GH = Stoff- und Gummihandschuh rot, übereinander, ~ 115 mg·cm⁻²

Tab. 4: Meßergebnisse von Teilkörperdosimetern bestrahlt am Fingerphantom in 5 cm Abstand zur Dichtscheibe

Dosimeter/ Detektordicke/ gewebeäquivalente Abdeckung		Meßwert ¹⁾ in mSv			
		Fingerphantom 1		Fingerphantom 2	
		ohne	mit SH	ohne	mit SH + GH
LiF Teflon 0,03 mm mit Abdeckung 0,02 mm	M ₀	2341	261,1	2427	102,5
Mittelwert		2357	271,6	2221	95,46
Fingerring zwei LiF 0,4 mm Abdeckung 0,07 mm Abdeckung 1 mm	M ₁	231,3	119,6	223,4	100,1
	M ₂	129,4	99,19	128,5	92,43
Fingerring zwei LiF 0,4 mm	M ₁ /M ₀	0,098	0,45	0,096	1,01
Meßwertverhältnis	M ₁ /M ₂	1,79	1,21	1,74	1,08
Mit/ohne Handschuh ¹⁾			0,11		0,043

1) SH = Stoffhandschuh weiß, ~ 30 mg·cm⁻², SH + GH = Stoff- und Gummihandschuh rot, übereinander, ~ 115 mg·cm⁻²

Bei Verwendung von jeweils zwei 0,4 mm dicken Detektoren im Fingerring führt die Absorption der Betastrahlung im ersten Detektor zu einer Änderung des Meßwertverhältnisses beider Detektoren. Das Meßwertverhältnis könnte u. U. zur Ermittlung der Teilkörperdosis herangezogen werden. Hierbei müßten jedoch für jedes Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeld entsprechende Kalibrierkurven vorliegen.

5.3 Personendosis-Meßergebnisse während der Revision

Während der Revisionsarbeiten im Dampferzeuger wurden von fünf Personen Dosimeter am Kopf bzw. in Brusthöhe an der Körpervorderseite getragen.

Tab. 5 gibt die Ergebnisse für 0,4 bzw. 0,9 mm dicke LiF-Detektoren mit einer zusätzlichen Abdeckung von 7 bzw. 500 mg·cm⁻² wieder.

Tab. 5: Ergebnisse der Personendosimetrie im KWO. Verwendung von 0,4 mm und 0,9 mm dicken TL-Detektoren und zusätzliche Abdeckungen

Person	Trageort	Messwert in mSv		
		Detektor 100 mg·cm ⁻²	Detektor 240 mg·cm ⁻²	
		+ 7 m·cm ⁻²	+ 7mg·cm ⁻²	+ 500 mg·cm ⁻²
1	Kopf	0,60	0,62	
	Brust	0,66	0,66	0,61
2	Kopf	2,70	2,25	
	Brust	1,61	1,94	1,85
3	Kopf	2,47	2,10	
	Brust	1,56	1,52	1,40
4	Kopf	2,09	2,01	
	Brust	1,85	1,72	1,60
5	Kopf	4,07	3,90	
	Brust	3,04	2,85	2,35

Die Ganzkörperdosen lagen hierbei zwischen 0,6 und 4 mSv. Wegen der zu erwartenden Absorption des Betastrahlungsanteiles in der Luft betragen die Unterschiede zwischen beiden unterschiedlich dicken Detektoren erwartungsgemäß weniger als 20 %. Aus praktischen Gründen wurden die 500 mg·cm⁻² abgedeckten Dosimeter nur an der Brust getragen. Die zusätzliche Abdeckung verringert den Meßwert nur noch unwesentlich, wie es wegen des geringen β -Anteils in der Personendosisüberwachung zu erwarten ist.

Die Anzeigen der dünnen Detektoren von 10 bzw. 30 mg·cm⁻² lagen bei diesen geringen Expositionen unter der jeweiligen Nachweisgrenze von 5 bzw. 10 mSv (siehe auch Tab. 1).

6 Bewertung des Meßergebnisses

Die durchgeführten Bestrahlungsexperimente an Dichtscheiben des Dampferzeugers lassen für das Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeld bei Wartungsarbeiten am geöffneten Hauptkühlsystem folgende Aussagen zu:

- (1) Hinsichtlich der Betastrahlungskomponente ist zunächst das relative energiearme Radionuklid Co-60 dominierend. Hinter einer Abschirmung von 30 mg·cm⁻² oder einem Abstand in Luft von 30 cm liefert das Radionuklid Co-58 den größten Anteil.

Der Beta-Äquivalentdosisanteil dieser Radionuklide ist an der Quellenoberfläche etwa 30mal größer als der Photonen-Äquivalentdosisanteil.

- (2) Der hier auftretende Beta-Äquivalentdosisanteil wird hinter einer flächenbezogenen Masse von etwa 100 mg·cm⁻² praktisch vollständig absorbiert, so daß hier nur der Photonen-Äquivalentdosisanteil gemessen werden muß. Dies trifft schon für einen Abstand von 1 m zur Strahlenquelle zu.
- (3) Bei Arbeiten im Dampferzeuger ist daher eine Messung der Betastrahlungskomponente insbesondere an den Händen erforderlich, wenn nur dünne Stoffhandschuhe (etwa 30 mg·cm⁻²) getragen werden. Als Fingerringdosimeter kommen z.B. neuere LiF-Graphitdosimeter in Frage (siehe Tab. 1).

- (4) Bei Tragen von Stoff- und Gummihandschuhen, die zusammen eine flächenbezogene Masse von mindestens $90 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ aufweisen, ist die Messung einer Teilkörperexposition durch Betastrahlung nicht erforderlich.
- (5) Das Tragen eines zusätzlichen geeigneten Teilkörperdosimeters am Kopf zur Messung der Teilkörperdosis ist nur bei ungeschützter Haut im Gesicht erforderlich, wenn der Kopf-Quellenabstand bei Wartungsarbeiten weniger als 1 m beträgt. Darauf kann verzichtet werden, wenn sichergestellt ist, daß der Abstand von 1 m nicht unterschritten wird bzw. die flächenbezogene Masse der absorbierenden Schicht aus Luft und einer Abdeckung des Gesichts (z. B. Atemmaske, Schweißschild, Vollschutzanzug) $100 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ entspricht.
- (6) Augenlinsendosis und Gonadendosis werden praktisch nur durch den Photonenstrahlungsanteil bestimmt.
- (7) Hinsichtlich der Photonenstrahlungskomponente ist die zu erwartende Photonen-Äquivalentdosisleistung an der Oberfläche der Dichtscheibe etwa um den Faktor 10 höher als diejenige in 50 cm Abstand. Für Arbeiten unmittelbar an der Oberfläche der Dichtscheibe wären diese Abstände repräsentativ hinsichtlich der Meßorte des Ganzkörperdosimeters in Brusthöhe bzw. des Teilkörperdosimeters an der Hand. Auch wenn, wie im Falle dieses speziellen Abstandsverhältnisses, das Ganzkörperdosimeter in Brusthöhe wegen der um den Faktor 10 unterschiedlichen Grenzwerte für Ganzkörper- und Teilkörperdosis auch für Teilkörperexpositionen dosislimitierend ist, wird das Tragen zusätzlicher Teilkörperdosimeter erforderlich, wenn der Erwartungswert der Teilkörperdosis $1/3$ des Jahresgrenzwertes beträgt.
- (8) Die Beantwortung der Frage, ob und wieviel Teilkörperdosimeter eingesetzt werden müssen, hängt wegen des stark inhomogenen Strahlungsfeldes von den Bestrahlungsumständen des Einzelfalles ab. Hierbei sind hinsichtlich einer Dosislimitierung Beta- und Photonenexpositionen in gleicher Weise in Betracht zu ziehen.

Wir danken Herrn Dr. Stephan, Kernkraftwerk Obrigheim, für die Anregung zu dieser Untersuchung und Herrn Briesen für seine tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der Bestrahlungen im Kernkraftwerk Obrigheim.

7 Literatur

- (1) Piesch, E., Burgkhardt, B. and Anton, R., Dose Rate Measurements in the beta-photon radiation field from UO₂ pellets and glazed ceramics containing uranium, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 14, No. 2, S. 109 (1986)
- (2) Piesch, E., Burgkhardt, B., Anton, R., Rudolph, W., Schäfer, R. und Güldner, R., Interpretation der Personendosen in Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeldern bei der Fertigung von Brennelementen aus niedrig angereichertem Uran für Leichtwasserreaktoren, KfK 4194 (1988)
- (3) Cross, W.G. et. al., Tables of beta-ray dose distributions in water, air and other media, AECL-7617 (1982)