

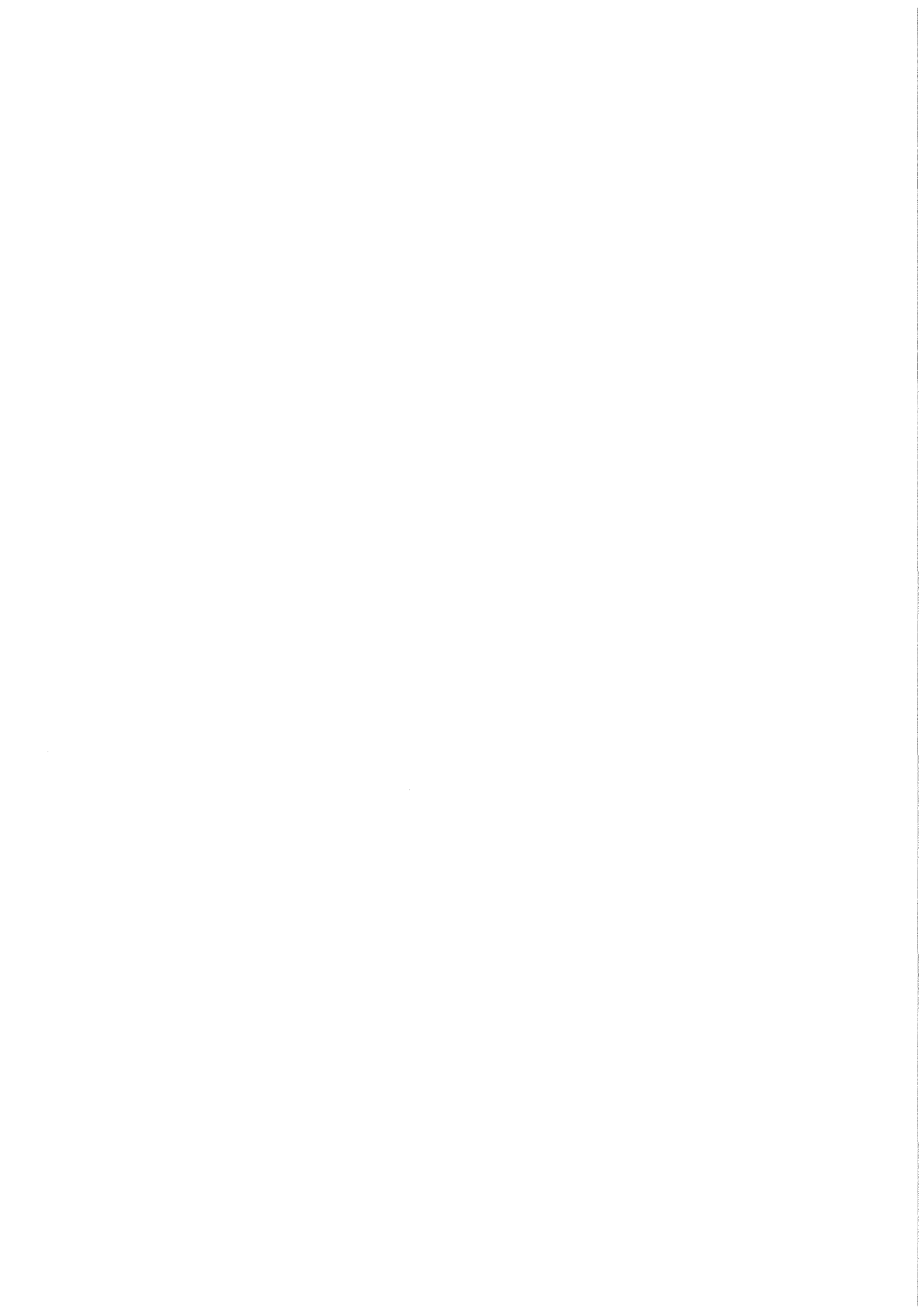


KfK 4194  
Dezember 1988

# **Interpretation der Personendosen in Beta- Photonen-Mischstrahlungsfeldern bei der Fertigung von Brennelementen aus niedrig angereichertem Uran für Leichtwasserreaktoren**

**E. Piesch, B. Burgkhardt, R. Anton,  
W. Rudolph, R. Schäfer, R. Guldner  
Hauptabteilung Sicherheit**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



Kernforschungszentrum Karlsruhe  
Hauptabteilung Sicherheit

KfK 4194

Interpretation der Personendosen in Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeldern bei  
der Fertigung von Brennelementen aus niedrig angereichertem Uran für  
Leichtwasserreaktoren

E. Piesch und B. Burgkhardt

R. Anton\* und W. Rudolph\*

R. Schäfer\*\* und R. Güldner\*\*

\*NUKEM GmbH, Hanau, Abteilung Nukleare Sicherheit

\*\*RBU GmbH, Hanau, Hauptabteilung Keramik

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

Bei der Fertigung von Brennelementen aus niedrig angereichertem Uran setzt sich das Strahlungsfeld aus einem Beta- und Photonenstrahlungsanteil zusammen. Beruflich strahlenexponierte Personen, die am Arbeitsplatz diesem Mischstrahlungsfeld ausgesetzt sind, werden mit Personendosimetern überwacht. Die Ermittlung der Beta- und Photonen-Äquivalentdosis wird zur Zeit folgendermaßen durchgeführt:

- Messung der Beta- und Photonenstrahlung mittels Filmdosimeter in Brusthöhe,
- der mit dem Dosimeter gemessene Photonendosisanteil wird als Ganzkörperdosis angesehen,
- der mit dem Dosimeter gemessene Beta-Dosisanteil wird mit einem experimentell ermittelten Schwächungsfaktor für Betastrahlung in Arbeitskleidung (0,625) gewichtet und dann zur Ganzkörperdosis hinzuaddiert.

Um eine genauere Zuordnung der gemessenen Dosisanteile zu den für Teilkörper- bzw. Ganzkörperdosis vorgesehenen Jahresdosisgrenzwerten der Strahlenschutzverordnung zu erhalten sowie zur Kontrolle der Dosimetertrageorte hinsichtlich der geforderten Repräsentativität von Teil- und Ganzkörperdosis wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit das Strahlungsfeld am Arbeitsplatz insbesondere mit Thermolumineszenzdosimetern ausgemessen.

Die durchgeführten Untersuchungen ergaben, daß das derzeitige Bewertungsverfahren für den Betadosisanteil die Ganzkörperdosis überschätzt, da dieser nur als Teilkörperdosis der Haut wirksam wird. Als Bewertungsverfahren für die Zukunft wird vorgeschlagen, die Photonendosisanteile als Ganzkörperdosis und die Betadosisanteile als Teilkörperdosis der Haut zu bewerten.

Eine Addition der Teilkörperdosisanteile der Haut zur Ganzkörperdosis bzw. zur effektiven Äquivalentdosis ist nach Strahlenschutzverordnung bzw. ICRP 26 nicht durchzuführen.

Die Untersuchungen ergaben darüberhinaus, daß im vorliegenden Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeld der Trageort des Dosimeters in Brusthöhe für die Ermittlung der Ganzkörperdosis sowie der Teilkörperdosen der Augenlinse und der Gonaden repräsentativ ist. Die Ermittlung der Teilkörperdosis an den Händen ergab, daß die zu erwartenden Dosiswerte unterhalb 3/10 der Dosisgrenzwerte liegen.

## Interpretation of Individual Exposures in Mixed Beta-Photon Radiation Fields at the Production of Fuel Elements of Low-enriched Uranium for Light Water Reactors

### Abstract

During the production of fuel elements of low and enriched uranium the radiation field consists of a beta and photon radiation contribution. Occupationally exposed individuals exposed at the work places in this mixed radiation field are monitored by individual dosimeters. The beta and photon dose equivalents are estimated at present in the following way:

- Measurement of the beta and photon radiation using film dosimeters worn in the height of the breast.
- The photon dose equivalent contribution indicated by the dosimeters will be interpreted as the exposure of the whole body.
- The beta dose contribution indicated by the dosimeter will be weighted by an experimentally found attenuation factor for beta rays behind the work clothes (0.625), and added to the whole body exposure.

In the following report the radiation fields at work places have been investigated using thermoluminescence dosimeters in order to find an exact relationship between the indicated dose contributions for partial or whole body exposure and the relevant annual dose limits given by the Radiation Protection Ordinance as well as to check the dosimeter locations with respect to the required representativity for partial and whole body exposures.

The performed investigations have shown that the present weighting procedure for the beta dose contribution overestimates the whole body dose because the contribution affects only the partial body dose of the skin. As a future procedure it is proposed to evaluate the photon dose contribution as the whole body exposure and the beta dose contribution as a partial body exposure of the skin.

According to the Radiation Protection Ordinance and the ICRP 26, respectively, the partial body exposure of the skin can not be added to the whole body exposure or the effective dose equivalent.

The experiments in addition showed that in the actual mixed beta-photon radiation field the location of the dosimeter in the height of the breast was

found to be representative for the estimation of the whole body exposure as well as of partial body exposures of the lens of the eye and the gonades. The estimation of partial body exposure of the hands showed that the expected dose results are below 3/10 of the dose limits.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Einleitung	1
2. Meßgrößen, Grenzwerte für Körperdosen	2
3. Strahlungsfeld	2
4. Untersuchungsprogramm	5
4.1. Ortsdosismessungen	5
4.2. Abschirmwirkung durch Schutzkleidung	8
4.3. Teilkörperdosismessungen	8
5. Darstellung und Auswertung der Meßergebnisse	8
5.1. Ortsdosismessung	8
5.1.1. Ortsdosisleistung in unterschiedlichen Gewebetiefen senkrecht zur Strahlenquelle	8
5.1.2. Ortsdosisleistung bei verschiedenen Einfallrichtungen	13
5.1.3. Äquivalentdosis in interessierenden Gewebetiefen	15
5.2. Transmissionsfaktoren für Schutzkleidung	19
5.3. Teilkörperdosismessungen	19
5.4. Einfluß des $\beta$ -Strahlungsfeldes auf die Kalibrierung von $\beta$ -empfindlichen Detektoren	21
6. Bewertung der Personendosis in der Routineüberwachung	22
6.1. Strahlenexposition am Arbeitsplatz	22
6.2. Bewertung der mittels Filmdosimeter gemessenen Personendosis	24
7. Interpretation von Teilkörperdosen	28
8. Schlußfolgerungen zur Personenüberwachung	29
9. Literatur	31
Anhang 1: Meßgrößen	32
Anhang 2: Körperdosisgrenzwerte	35
Anhang 3: Körperdosisermittlung bei Beta-Strahlungsanteilen	38



## 1. Einleitung

In den Fertigungsstätten der Reaktor-Brennelemente-Union (RBU) werden nach dem sogenannten AUC (Ammoniumuranylcarbonat)-Verfahren jährlich ca. 750 Tonnen niedrig angereichertes Uran mit einem Uran-235-Gehalt im Mittel von 3 Gew. % verarbeitet. Innerhalb des Fertigungsprozesses wird hierbei hauptsächlich aus Uranhexafluorid ( $\text{UF}_6$ ) über die AUC-Fällung der Brennstoff Urandioxid ( $\text{UO}_2$ )-Pulver hergestellt.

Die Verarbeitung des  $\text{UO}_2$ -Pulvers zu Pellets sowie deren Weiterverarbeitung zu Brennstäben sind die wesentlichen Arbeitsschritte, bei denen Beta-Photonen-Mischstrahlungsfelder auftreten.

Während die Verarbeitung des Urans als  $\text{UF}_6$  und AUC im Bereich Chemie weitgehend in geschlossenen Apparaten und Behältern erfolgt, ist im Bereich der Pellet-Herstellung und im Bereich der Brennstabfertigung eine Handhabung in offener Form bei großflächiger Anordnung erforderlich.

Zur Strahlenschutzüberwachung des Personals werden Filmdosimeter eingesetzt. Sie zeigen in diesen Arbeitsbereichen relativ geringe Photonen-, jedoch beträchtliche Beta-Äquivalentdosisanteile.

Bei der Ermittlung der Personendosis wird die Beta-Äquivalentdosis als Beitrag zur Ganzkörperdosis ausgewiesen. Für die Wichtung des mit dem Filmdosimeter angezeigten Beta-Äquivalentdosisanteils wird hierbei ein Schwächungsfaktor von 0,625 zugrundegelegt. Dieser ergab sich durch Vergleichsmessung der Beta-Äquivalentdosen auf der Kleidung sowie unter der Kleidung direkt auf der Hautoberfläche. Ausgewiesen wird eine Ganzkörperdosis, die sich aus der Summe von Photonen-Äquivalentdosis und der mit dem Faktor 0,625 multiplizierten Beta-Äquivalentdosis ergibt.

Beta-Strahlung liefert jedoch aufgrund ihrer im Vergleich zur Photonenstrahlung geringen Reichweite zum überwiegenden Teil einen Beitrag zur Teilkörperdosis der Haut und nicht zur Ganzkörperdosis.

Ziel der Untersuchungen war, Dosismessungen im Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeld durchzuführen und anhand der erhaltenen Tiefendosisverteilungen die Filmdosimeterergebnisse so zu bewerten, daß der tatsächliche Beitrag zur Ganzkörperdosis und Teilkörperdosis der Haut ausgewiesen werden kann.

Weiteres Ziel war, im inhomogenen Beta-Photonenstrahlungsfeld den repräsentativen Ort für die Ermittlung der Ganz- und Teilkörperdosis herauszufinden.

## 2. Meßgrößen, Grenzwerte für Körperdosen

Nach ICRP 26(5) und in den deutschen Strahlenschutzverordnungen StrSchV (4) und RöV (10) ist bei Vorliegen einer Ganzkörperexposition die effektive Äquivalentdosis (siehe Anlage 1-3) zu ermitteln. Eine Strahlenexposition der Haut, z.B. durch Betastrahlung, ist hierbei nicht zur effektiven Äquivalentdosis hinzuzuzählen. Es sind lediglich die Teilkörperdosen der in Tab. 1 angegebenen Körperbereiche zu berücksichtigen.

Tab. 1 Für den Strahlenschutz relevante Teilkörperdosen bei externer Strahlenexposition durch Beta-Strahlung und die entsprechenden Jahresgrenzwerte für Personen der Kategorie A nach (6)

Teilkörperdosis	Jahresgrenzwert <sup>1)</sup>	Gewebetiefe nach Berechnungsmodell <sup>2)</sup> (mg/cm <sup>2</sup> )
Teilkörperdosis an den Händen, Füßen, Unterschenkeln, Knöcheln einschl. der dazugehörenden Haut	500 mSv	7
Teilkörperdosis der Haut, falls nur diese der Strahlenexposition unterliegt, ausgenommen die Haut der Hände, Unterarme, Füße, Unterschenkel und Knöchel	300 mSv	7
Äquivalentdosis der Augenlinsen	150 mSv	300
Äquivalentdosis der Gonaden	50 mSv	200 - 3200

1) für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie A, StrlSchV, Anlage X, Spalte 2

2) hinter einer entsprechenden flächenbezogenen Masse von Weichteilgewebe

## 3. Strahlungsfeld

Das durch die Verarbeitung von niedrig angereichertem Uran entstehende Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeld wird bestimmt durch die nachfolgend dargestellten Nuklide aus den Zerfallsreihen von U-238 und U-235 (Tab. 2 und Abb. 1).

Tab. 2: Zerfallsreihen von U-238 und U-235

Nuklid	Halbw.zeit	Hauptenergien der Strahlung (MeV)				
		α		β <sup>2)</sup>		γ
<sup>238</sup> U <sub>92</sub>	4,68·10 <sup>9</sup> a	4,196 (77%) 4,15 (23%)	---	0,050 (0,32%)		
<sup>234</sup> Th <sub>90</sub>	24,1 d	---	0,199 (72,5%) 0,104 (20,7%)	0,063 (3,5%) 0,092 (4%)		
<sup>234</sup> Pa <sub>91</sub> <sup>m</sup>	1,17 m	---	2,29 (98%)	0,765 (0,3%) 1,001 (0,9%)		
<sup>234</sup> Pa <sub>91</sub>	6,75 h	---	0,680 (19%) 0,512 (63%) 0,280 (12%)	0,131 (20%) 0,569 (10%) 0,883 (16,3%) 0,927 (23%) 0,946 (20%)		
<sup>234</sup> U <sub>92</sub>	2,46·10 <sup>5</sup> a	4,77 (72%) 4,72 (28%)	---	0,053 (0,12%)		
<sup>230</sup> Th <sub>90</sub> <sup>1)</sup>	8·10 <sup>4</sup> a	4,69 (76,3%) 4,62 (23,4%)	---	---		
<sup>235</sup> U <sub>92</sub>	7,04·10 <sup>8</sup> a	4,37 (18%) 4,40 (57%) 4,22 (5,7%)	---	0,143 (10,5%) 0,163 (4,7%) 0,185 (54%) 0,205 (4,7%)		
<sup>231</sup> Th <sub>90</sub>	25,52 h	---	0,138 (22%) 0,218 (20%) 0,302 (52%)	0,026 (14,8%) 0,027 (10,1%) 0,084 (6,5%) 0,300 (2,5%) 0,303 (2,5%)		
<sup>231</sup> Pa <sub>91</sub> <sup>1)</sup>	3,28·10 <sup>4</sup> a	5,03 (20%)	---	0,284 (1,7%)		

- 1) wegen chemischer Abtrennung in nicht meßbaren Mengen vorhanden  
 2) angegebene Energien sind maximale β-Zerfallsenergien

Die nicht aufgeführten Zerfallsprodukte ab Thorium-230 (U-238-Reihe) und Protaktinium-231 (U-235-Reihe) sind durch die chemische Abtrennung bei der Uranerzaufbereitung und der nachfolgenden UF<sub>6</sub>-Konversion sowie der Anreicherung nur in nicht meßbaren Mengen vorhanden. Aufgrund ihrer langen Halbwertszeiten bilden sie sich während normaler Fertigungszeiträume nicht nach.

Durch die Verarbeitungsschritte im Fertigungsbereich UF<sub>6</sub> bis AUC wird chemisch in die Zerfallsreihen eingegriffen, wobei die Folgeprodukte Th-234, Pa-234 und Th-231 teilweise abgetrennt werden. Diese Folgeprodukte verbleiben zum

überwiegenden Anteil in den  $\text{UF}_6$ -Behältern, beziehungsweise in den Filtraten aus der AUC-Fällung.

Zur Durchführung der nachfolgend beschriebenen Experimente wurde etwa 5 Jahre gelagertes Uran verwendet, bei dem der Beta-Dosisanteil durch Gleichgewichtseinstellung der Folgeprodukte dem Maximal-Wert entspricht, der während der in Tab. 3 aufgeführten Verarbeitungsschritte erreicht werden kann. Die Ergebnisse bezüglich des Beta-Dosisanteils im Mischstrahlungsfeld sind daher als konservativ anzusehen, weil bei dem Uran-Produkt u.U. wesentlich kürzere Zeiträume zwischen Abtrennung der Folgeprodukte und der Verarbeitung vorliegen können. Abb. 1 verdeutlicht die bei der U-238-Zerfallsreihe entstehenden Beta-Emmissionsraten mit einer mittleren Beta-Energie von 0,05 MeV bzw. 0,8 MeV.

Tab. 3: Verarbeitungsschritte  $\text{UO}_2$

- Pressen zu zylinderförmigen Grünlingen, Dichte ca.  $5\text{g/cm}^3$ ,
- Ablegen der Grünlinge auf Sinterschalen, Fläche ca.  $200\text{ cm}^2$ ,
- Übereinanderstapeln von max. 8 Sinterschalen,
- Aufbauen von 2 Stapeln auf einer Trage- bzw. Stoßplatte zum sog. Sinterboot,
- Transportieren der Sinterboote zum Sinterofen auf Rollenbahnen,
- Sintern, d.h. Verdichten der Grünlinge zu Pellets mit einer Dichte von ca.  $10\text{ g/cm}^3$ ,
- Transportieren der Sinterboote nach dem Sintern auf Transportwagen bzw. Rollenbahnen zum Schleifen,
- Auflegen der Pellets auf die Zuführung der Schleifmaschine, Fläche ca.  $1.200\text{ cm}^2$ ,
- Schleifen der Pellets,
- Kontrollieren der Pellets auf Oberflächenbeschaffenheit an einer Säule, Länge ca.  $160\text{ cm}$ ,
- Beschicken der Transportpaletten, Fläche ca.  $900\text{ cm}^2$ ,
- Abschieben der beladenen Transportpaletten auf Rollbahnen,
- Entnehmen der Pellets zur Qualitätskontrolle,
- Verpacken in Kästen aus Edelstahl,
- Zwischenlagern bzw. Transport der Kästen zur Brennstabfertigung,
- Entnehmen der Transportpaletten aus den Kästen,
- Ablegen der Palette auf dem Säulenlegetisch,
- Säulenlegen, Länge der Säule max.  $3\text{ m}$ ,
- Einbringen der Säule in Magazine

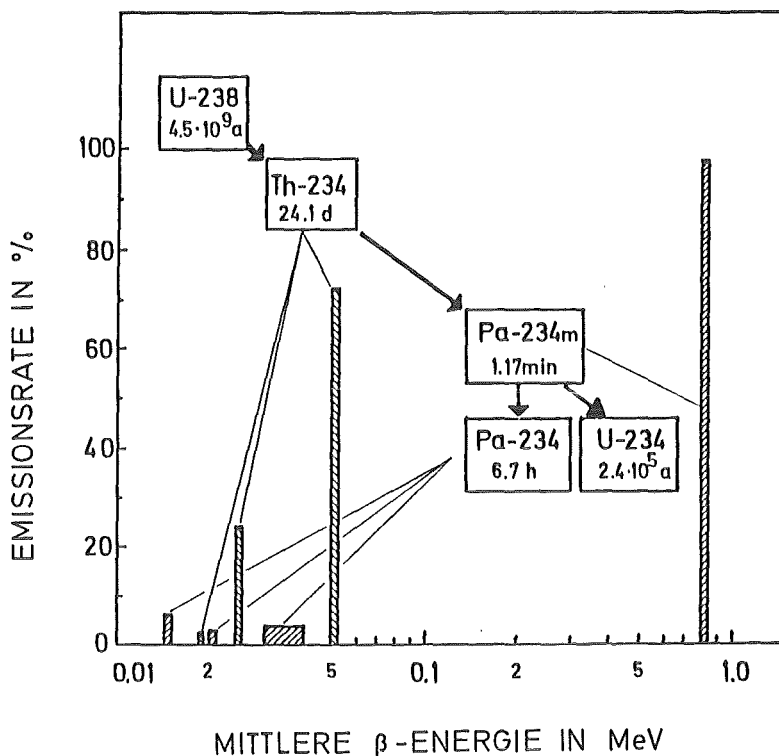


Abb. 1 Beta-Emissionsraten bei der U-238-Zerfallsreihe

#### 4. Untersuchungsprogramm

##### 4.1 Ortsdosismessungen

Zur Messung der Ortsdosisverteilung in der Nähe von  $UO_2$ -Pellets wurden Thermolumineszenz (TL)-Detektoren unterschiedlicher Dicke eingesetzt, nämlich

- $^7LiF$  in Teflon, Dicke 0,03 mm,
- $^7LiF$  in Teflon, Dicke 0,13 mm,
- $^7LiF$ -Presslinge (TLD700), Dicke 0,89 mm,
- Filmdosimeter einer amtlichen Meßstelle.

Die TL-Detektoren wurden mit  $Cs-137$ -Photonenstrahlung kalibriert. Wegen der unterschiedlichen Kalibriermeßgrößen für Photonen- und Betastrahlung (siehe auch Tab. A1 im Anhang) wurde zur Umrechnung von Standard-Ionendosis in Energiedosis im Gewebe ein Konversionsfaktor von 9,6 mGy/R verwendet. Das relative Photonen-Ansprechvermögen der TL-Detektoren der Dicke 0,03 mm, 0,13 mm und 0,89 mm ergab sich zu 0,03 zu 0,52 bzw. zu 1,0.

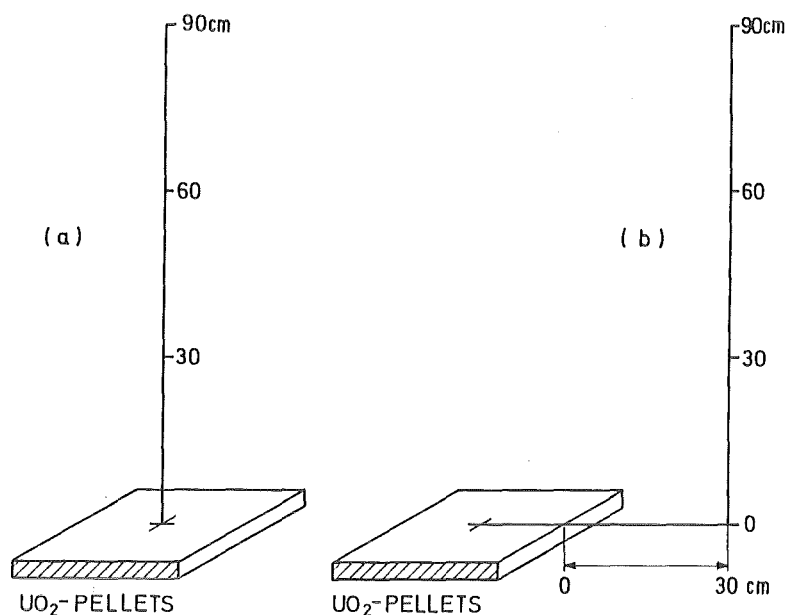


Abb. 2 Bestrahlungsgeometrien an UO<sub>2</sub>-Pellets, (a) senkrecht über der Palette, (b) in 30 cm Abstand am Arbeitsplatz

Zur Bestrahlung wurden die Detektoren in der Mitte eines Polyäthylen-Plattenphantoms der Größe 30 cm x 30 cm x 5 cm befestigt und mit unterschiedlich dicken Folien mit einer flächenbezogenen Masse von 7 bis 2300 mg/cm<sup>2</sup> abgedeckt. Für die Bestrahlungen wurden ca. 600 gesinterte UO<sub>2</sub>-Pellets der Größe 10 mm  $\varnothing$  und 13 mm Höhe auf einer Palette der Größe 30 x 30 cm<sup>2</sup> liegend angeordnet. Die Bestrahlung der Dosimeter erfolgte in verschiedenen Abständen von der Oberfläche der UO<sub>2</sub>-Pelletpalette.

Es wurden zwei Bestrahlungsgeometrien (siehe Abb. 2) gewählt, nämlich

- die Detektor-Phantom -Anordnung seitlich versetzt über den UO<sub>2</sub> -Pellets,
- die Detektor-Phantom -Anordnung seitlich versetzt zur Flächenquelle, um die Bestrahlungsgeometrie am Arbeitsplatz anzunähern.

Die gewählten Detektor-Quellenabstände von 5, 10, 30, 40 und 80 cm entsprechen denjenigen Entfernungen, in denen Personen während ihrer Arbeit an den Händen, am Körperrumpf bzw. am Kopf strahlenexponiert werden (Abb. 3).

Ziel der Meßreihen war die Messung der Äquivalentdosisleistung in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse bzw. der Gewebetiefe. Zur Messung der Richtungs-Äquivalentdosis  $H'(0,07)$  wurden insbesondere dünne LiF-Teflondosimeter der Dicke 0,03 mm eingesetzt. Wegen der hohen Dichte der Dosimeter

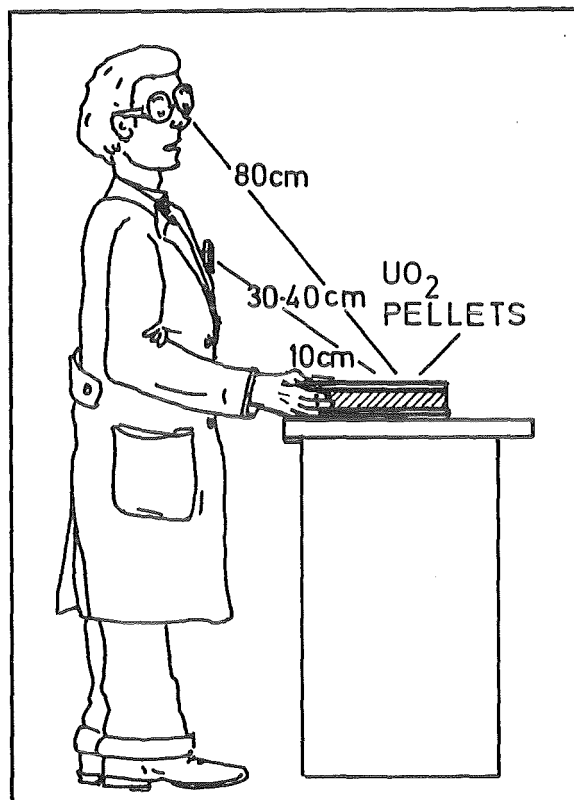


Abb.3 Bestrahlungsverhältnisse am Arbeitsplatz der UO<sub>2</sub>-Pellet-Fertigung

entspricht der Meßwert einer mittleren Äquivalentdosis in einer Gewebeschicht von etwa 0,07 mm. Bei der Beta-Energieverteilung im vorhandenen Strahlungsfeld wird sich dieser Wert kaum von dem wahren Wert der Äquivalentdosis  $H'(0,07)$  unterscheiden. Aufgrund der geringen Empfindlichkeit und der entsprechend hohen Nachweisgrenze können diese dünnen Detektoren nicht in der Routine-Personendosimetrie eingesetzt werden. Im Laufe der Meßreihen wurde nachgewiesen, daß die Hautdosis auch mit 0,89 mm dicken TLD700 Detektoren gemessen werden kann (siehe Abschnitt 5.1.1).

Zur Dosismessung wurden jeweils 3 Detektoren verwendet. Die Bestrahlungszeiträume lagen zwischen 2 und 45 Tagen. Die Ergebnisse der Ortsdosismessungen sind in Abschnitt 5.1 dargestellt.

## 4.2 Abschirmwirkung durch Schutzkleidung

Energiearme Betastrahlung kann in der Kleidung, in Handschuhen bzw. Schutzbrillen u.U. vollständig absorbiert werden. Zur Abschätzung von Teilkörperdosen ist es daher von besonderem Interesse, im jeweils interessierenden Beta-Photonenstrahlungsfeld sogenannte Transmissionsfaktoren für Schutzschichten (z.B. Kleidung und Abschirmung) zu ermitteln. Hierzu wurden Ortsdosismessungen in 30 cm Abstand von der UO<sub>2</sub>-Pellet-Palette mit TL-Detektoren der Dicke 0,03 mm vor und hinter Stoffproben von Overalls, von Overalls und Hosen, von Gummihandschuhen sowie Schutzbrillen und Plexiglasplatten von 1 cm Dicke durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 5 (Abschn. 5.2) wiedergegeben.

## 4.3 Teilkörperdosismessungen

Die Teilkörperdosis an den Händen wurde mit Fingerringdosimetern an den besonders interessierenden Arbeitsplätzen innerhalb der Pelletfertigung insbesondere an den Pressen, dem Ofen und den Schleifmaschinen gemessen. Eingesetzt wurden 0,4 mm dicke LiF-Detektoren mit unterschiedlicher Abdeckung entsprechend einer Gewebedicke von 0,07 mm und 1 mm Dicke. Die Tragedauer betrug 21,5 bis 170 h. Die Ergebnisse sind in Tab.6 (Abschnitt 5.3) dargestellt.

Im Hinblick auf die Verwendung von TL-Dosimetern unterschiedlicher Dicke war es erforderlich, insbesondere für 0,89 mm dicke Detektoren im jeweiligen Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeld den entsprechenden Korrekturfaktor für die Meßgröße  $H'(0,07)$  zu bestimmen. Die Ergebnisse von Kalibrierbestrahlungen sind in Tab. 4 (Abschnitt 5.1.1) wiedergegeben.

## 5. Darstellung und Auswertung der Meßergebnisse

### 5.1 Ortsdosismessungen

#### 5.1.1 Ortsdosisleistung in unterschiedlichen Gewebetiefen senkrecht zur Strahlenquelle

Abb. 4 zeigt die gemessene Äquivalentdosisverteilung in Abhängigkeit von einer gewebeäquivalenten flächenbezogenen Masse für TL-Detektoren unterschiedlicher Dicke in 10 cm Abstand senkrecht über der UO<sub>2</sub>-Pelletpalette. Oberhalb einer flächenbezogenen Masse von 200 mg/cm<sup>2</sup> fällt die Äquivalentdosisleistung mit zunehmender Abdeckung schnell ab und erreicht hinter einer flächen-



bezogenen Masse von  $1000 \text{ mg/cm}^2$  weniger als 2 % der Äquivalentdosisleistung hinter  $7 \text{ mg/cm}^2$ . Für die  $0,03$  und  $0,13 \text{ mm}$  Detektoren erhält man praktisch dieselben Meßergebnisse. Im vorliegenden energiereichen Betastrahlungsfeld kann daher angenommen werden, daß die  $0,03 \text{ mm}$  dicken TL-Detektoren die Äquivalentdosis  $H'(0,07)$  richtig anzeigen.

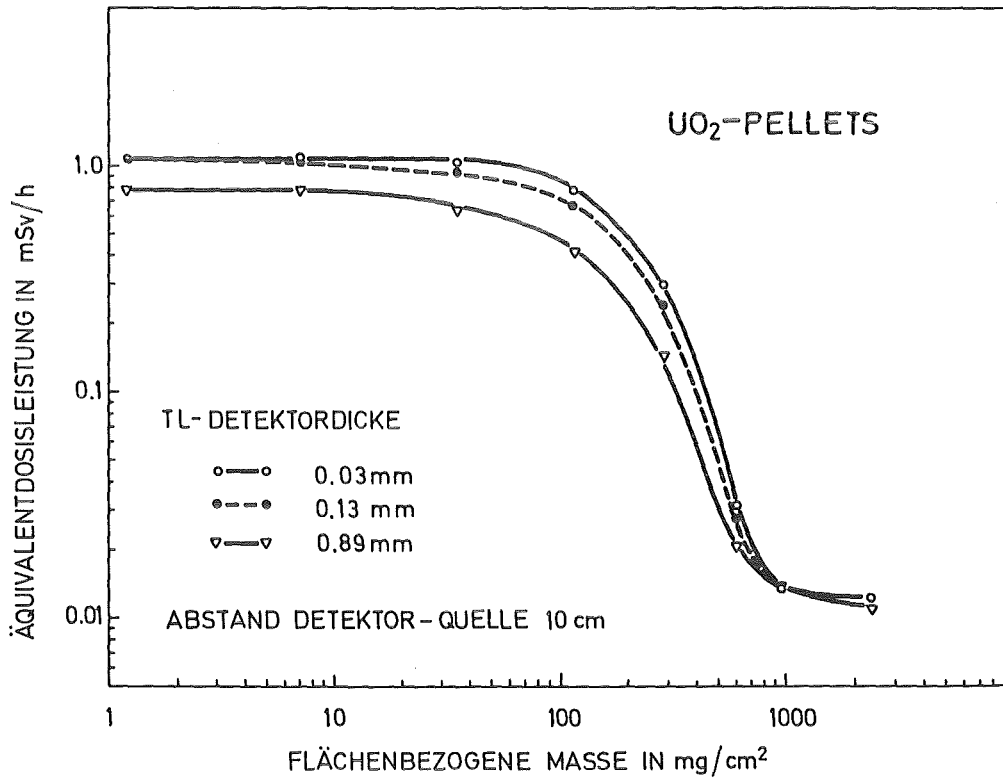


Abb. 4 Äquivalentdosis in 10 cm Abstand oberhalb der UO<sub>2</sub>-Pelletanordnung (siehe Abb. 2) in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse einer Detektorabdeckung

Zur Messung der Äquivalentdosen  $H'(3)$ ,  $H'(4,7)$  und  $H'(10)$  mit dickeren TL-Detektoren wird die sogenannte "effektive flächenbezogene Masse  $d_E$ " eingeführt, welche die Schwächung der Beta-Strahlung in der Detektordicke berücksichtigt.

Beim vorliegenden Modell wird die Hälfte der Detektordicke  $c$  als Teil der Detektorabdeckung angesehen. Die effektive flächenbezogene Masse  $d_E$  ergibt sich danach aus der Dicke der Detektorabdeckung  $d$  und der halben Detektordicke  $c/2$  zu

$$d_E = d + \frac{c}{2}$$

Die experimentellen Ergebnisse in Abb. 5 zeigen, daß im vorliegenden Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeld die Berücksichtigung von  $d_E$  bei den hier verwendeten Detektoren unterschiedlicher Dicke zu einer vergleichbaren Tiefendosisverteilung führt. Die mit 0,89 mm dicken TL-Detektoren in verschiedenen Abständen von der  $UO_2$ -Pelletanordnung gemessenen Äquivalentdosisleistungsverteilungen sind in Abb. 6 wiedergegeben.

Die Ergebnisse dieser Ortsdosismessungen werden in der vorliegenden Untersuchung zur Ermittlung der Äquivalentdosis in bestimmten Gewebetiefen herangezogen (siehe Abschnitt 5.1.3). Für die Bestimmung der Äquivalentdosen  $H'(3)$ ,  $H'(4,7)$  und  $H'(10)$  müßten die 0,89 mm dicken TLD ( $240 \text{ mg/cm}^2$ ) mit einer entsprechenden um  $120 \text{ mg/cm}^2$  reduzierten flächenbezogenen Masse von 180, 350 und  $880 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$  abgedeckt werden. Ein Korrektionsfaktor für  $\beta$ -Strahlung entfällt dann, so daß Beta- und Photonendosisanteile richtig angezeigt werden.

Wegen einer ausgeprägten Schwächung der Beta-Strahlung in größeren Detektordicken zeigen 0,89 mm dicke Detektoren (flächenbezogenen Masse  $240 \text{ mg/cm}^2$ ) eine geringere Anzeige. In Tab. 4 ist das Meßwertverhältnis der 0,03 mm dicken und 0,89 mm dicken TLDs' für verschiedene Detektor-Pellet-Abstände wiedergegeben. Demnach können durch Multiplikation mit dem Korrektionsfaktor  $1,47 \pm 5 \%$  auch 0,89 mm dicke TL-Detektoren zur Bestimmung der Äquivalentdosis  $H'(0,07)$  eingesetzt werden, da im hier vorliegenden Mischstrahlungsfeld der relative Photonen-Äquivalentdosisanteil weniger als 2 % beträgt und in 0,07 mm Gewebetiefe vorwiegend  $\beta$ -Strahlung auftritt.

Es muß beachtet werden, daß die Anwendung des Korrektionsfaktors für TL-Detektoren der Dicke 0,89 mm (in Tab. 4) nur für das Beta-Strahlungsfeld in unmittelbarer Nähe der  $UO_2$ -Pellets (Teilkörperdosimetrie) gilt. Innerhalb der Personenüberwachung (Personendosimetrie) ist mit zusätzlicher Exposition z.B. Photonenstrahlung aus benachbarten geschlossenen Anlageteilen zu rechnen. Hier ermittelt sich die Hautdosis durch Beta- und Photonenstrahlung aus der Anzeigendifferenz der Detektoren zur Bestimmung von  $H'(0,07)$  und  $H'(10)$  (Beta-Anteil), bewertet mit dem Korrektionsfaktor 1,47 (siehe Tab. 4) und erhöht um die Anzeige des Detektors für  $H'(10)$  (Photonen-Anteil).

Im folgenden wurden die Ergebnisse der dicken TL-Detektoren herangezogen, da das Ansprechvermögen der 0,03 mm dicken Detektoren nur etwa 3 % desjenigen der 0,89 mm dicken Detektoren beträgt. Bei den dünnen Detektoren ist mit entsprechend größeren Meßfehlern als bei dicken Detektoren zu rechnen.

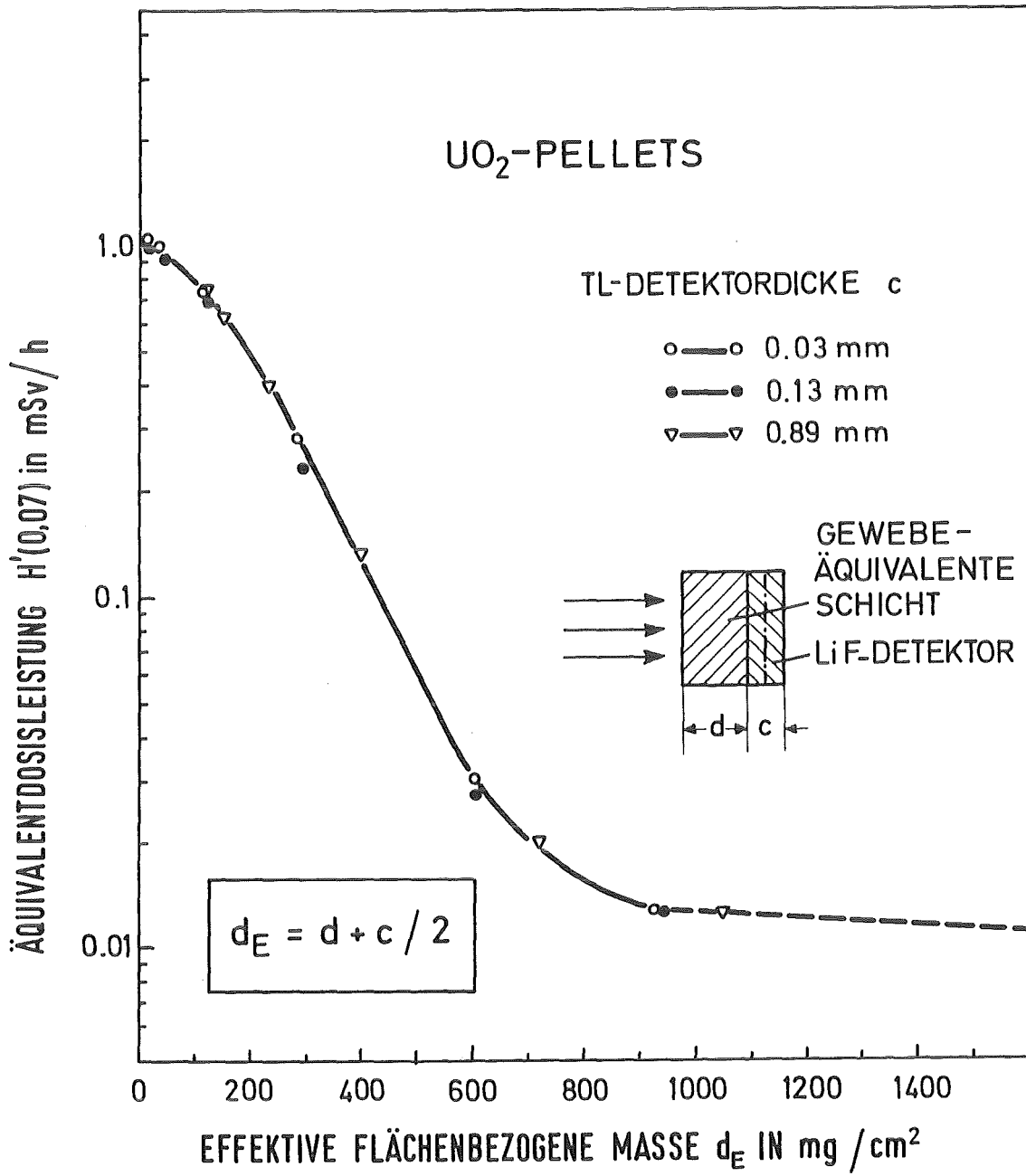


Abb. 5 Äquivalentdosisleistung  $H'(0,07)$  in 10 cm Abstand oberhalb der UO<sub>2</sub>-Pelletanordnung (s. Abb. 2) in Abhängigkeit von der effektiven flächenbezogenen Masse  $d_E$

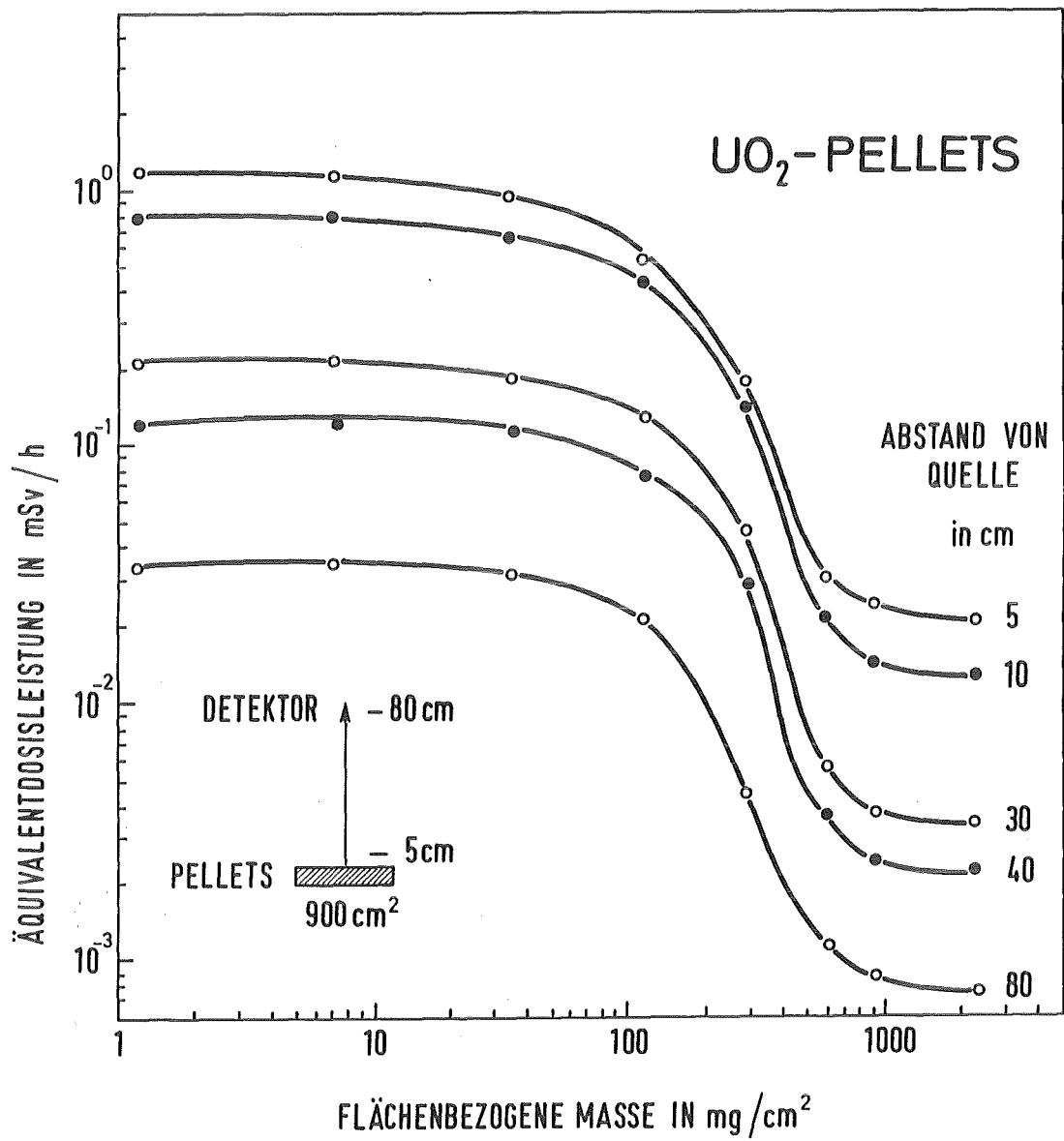


Abb. 6 Äquivalentdosisleistung gemessen mit 0,89 mm dicken TL-Detektoren oberhalb der UO<sub>2</sub>-Pelletanordnung in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse (Gewebetiefe) für verschiedene Detektor-Quellen-Abstände

Tab. 4 Bestimmung des Korrekturfaktors für LiF-Presslinge der Dicke 0,89 mm zur Anzeige der Äquivalentdosis  $H'(0,07)$  an  $UO_2$ -Pellets aus dem Meßwertverhältnis von Thermolumineszenzdosimetern der Dicke 0,03 mm und 0,89 mm in verschiedenen Detektor-Pellet-Abständen

Abstand Detektor-Pellet (cm)	Relative Meßwertanzeige $M^{1)}$ (mSv/h)		Korrekturfaktor $\frac{H'(0,07 \text{ mm})}{M(0,89 \text{ mm})}$
	LiF-Teflon (0,03 mm)	LiF-Pressling (0,89 mm)	
0	2,7	1,18	(2,29) <sup>2)</sup>
5	1,65	1,125	1,46
10	1,05	0,75	1,4
30	0,295	0,212	1,39
40	0,18	0,125	1,44
80	0,05	0,035	1,55
5-80	-	-	1,47 ± 5,5 %

- 1) Meßwertanzeige der TL-Detektoren, gemessen senkrecht über der Pelletanordnung. Für 0,03 mm dicke Detektoren hinter einer Abdeckung von 7mg/cm<sup>2</sup> entspricht die Anzeige der Äquivalentdosis  $H'(0,07)$ .
- 2) andere Meßgeometrie an einem Einzelpellet, deshalb zur Ermittlung des Korrekturfaktors nicht herangezogen.

### 5.1.2 Ortsdosisleistung bei verschiedenen Einfallsrichtungen

Zur Simulation einer häufig anzutreffenden Bestrahlungsgeometrie am Arbeitsplatz wurden die Dosimeter im Abstand 30 cm vor der Pelletpalette in Höhen zwischen 5 cm und 60 cm über dem Arbeitstisch bestrahlt (s. Abb. 2 b). Die in dieser Bestrahlungsgeometrie erhaltene Äquivalentdosisleistungsverteilung für  $H'(0,07)$  ist in Abb.7 wiedergegeben. Es zeigt sich, daß insbesondere in Höhe des Arbeitstisches seitlich der Pellet-Palette der Beta-Äquivalentdosisanteil weitgehend in der Pelletanordnung selbst absorbiert wird. In größeren Höhen über dem Arbeitstisch entsprechen die Äquivalentdosisleistungen weitgehend denjenigen einer Bestrahlungsanordnung senkrecht über der Pelletanordnung (Abb. 2 a). Abb. 7 zeigt auch neben  $H'(0,07)$  die entsprechende Abstandsabhängigkeit für  $H'(3)$ ,  $H'(4,7)$  und  $H'(10)$ . Diese Werte wurden aus den Meßergebnissen der Abb. 6 für senkrechten Strahleneinfall unter Berücksichtigung des durch Schrägeinfall der Strahlung bedingten tatsächlichen Detektor-Pelletabstandes und der entsprechenden effektiven flächenbezogenen Masse ermittelt. Abb. 7 zeigt, daß die so ermittelten Dosiswerte wesentlich niedriger sind als bei senkrechtem Strahleneinfall. In der Praxis kann man nicht

ausschließen, daß sich die Person über die Pelletanordnung beugt und im ungünstigen Fall insbesondere für die Augenlinse Senkrechteinstrahlung auftritt.

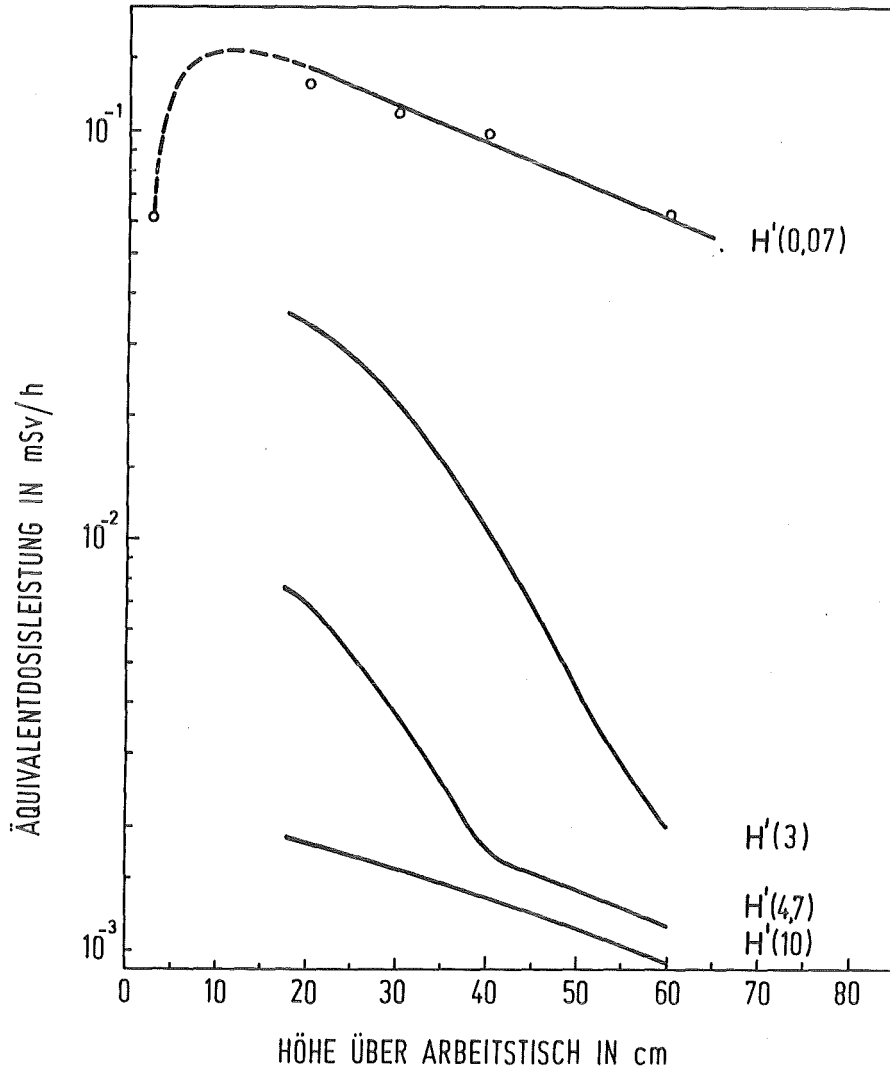


Abb. 7 Äquivalentdosisleistungen  $H'(0,07)$ , gemessen mit 0,03 mm dicken TLD700-Detektoren in einem seitlichen Abstand von 30 cm von einer  $UO_2$ -Pelletanordnung (s. Abb. 2 b) an einem Plattenphantom in Abhängigkeit von der Höhe über dem Arbeitstisch. Die Werte für  $H'(3)$ ,  $H'(4,7)$  und  $H'(10)$  berechnen sich aus den Meßergebnissen einer Senkrechtbestrahlung (siehe auch Abb. 2 a und Abb. 6) unter Berücksichtigung des Detektor-Pelletabstandes, der effektiven Detektordicke und der zusätzlichen Absorption durch Schrägeinstrahlung (siehe Abb. 5).

### 5.1.3 Äquivalentdosis in interessierenden Gewebetiefen

Für die Ermittlung der Äquivalentdosis der Haut  $H'(0,07)$ , der Augenlinse  $H'(3)$  sowie für eine Ganzkörperexposition  $H'(10)$  wird eine flächenbezogene Gewebemasse von  $7 \text{ mg/cm}^2$ ,  $300 \text{ mg/cm}^2$  bzw.  $1000 \text{ mg/cm}^2$  zugrundegelegt (siehe Abschnitt 2).

Zur Ermittlung der Reichweite der Beta-Strahlung wurde die in verschiedenen Abständen von der Pelletpalette gemessene Dosisleistung (siehe Abb.6) auf eine effektive flächenbezogene Masse  $d_E$  bezogen und nach entsprechender Normierung bei  $d_E = 0$  in Abb. 8 wiedergegeben. Die Meßergebnisse zeigen, daß für Detektorabstände zwischen 5 cm und 80 cm annähernd gleiche relative Tiefendosisverteilungen erhalten werden. Die Auswertung der in verschiedenen Abständen gewonnenen Dosisverteilungen ergab nach Subtraktion des entsprechenden Photonenanteils für die jeweilige Reichweite des  $\beta$ -Strahlungsanteiles (Abfall der Äquivalentdosis auf 1 %) einen Wert von  $d_{\max} = 755 \text{ mg/cm}^2 \pm 4,5 \%$ .

Nimmt man an, daß im vorliegenden Strahlungsfeld die Betastrahlungskomponente in erster Näherung eine homogene Energieverteilung aufweist, dann läßt sich aus dem  $d_{\max}$ -Wert ein „scheinbarer Wert“ für die Energie der Betastrahlung zu  $E_{\beta\max} = 1,64 \text{ MeV}$  angeben.

Für die Gonaden wurde unter Verwendung von Abb. A2 (siehe Anhang) und der für die Pelletanordnung gefundenen scheinbaren Beta-Energie von  $1,64 \text{ MeV}$  eine effektive flächenbezogene Masse von  $470 \text{ mg/cm}^2$  zugrundegelegt. Die effektive flächenbezogene Masse ist bei einem vorgegebenen Wert von  $E_{\beta\max}$  definitionsgemäß diejenige "Gewebetiefe", in der die Äquivalentdosis dem Mittelwert der Äquivalentdosis in den Gonaden entspricht. Für die Gonaden wird deshalb die Äquivalentdosis  $H'(4,7)$  in  $4,7 \text{ mm}$  Gewebetiefe herangezogen.

Die in Abschnitt 5.1.1 wiedergegebenen Ergebnisse der Ortsdosismessungen wurden zur Ermittlung der Äquivalentdosis in verschiedenen Gewebetiefen herangezogen. Abb. 9 zeigt für den ungünstigsten Fall eines senkrechten Strahleneinfalles (siehe Abb. 6) die Äquivalentdosis in den Gewebetiefen  $0,07 \text{ mm}$  (Haut),  $3 \text{ mm}$  (Augenlinse),  $4,7 \text{ mm}$  (Gonaden),  $10 \text{ mm}$  (Ganzkörper) in Abhängigkeit vom Abstand zu den  $\text{UO}_2$ -Pellets.

Abb. 10 gibt die entsprechenden Quotienten der Äquivalentdosen bezogen auf  $H'(0,07)$  wieder. Die Äquivalentdosis  $H'(3)$  zeigt einen vergleichbaren Abfall in größeren Detektor-Quellenabständen. Die Beta-Strahlung ergibt in  $3 \text{ mm}$  Gewe-

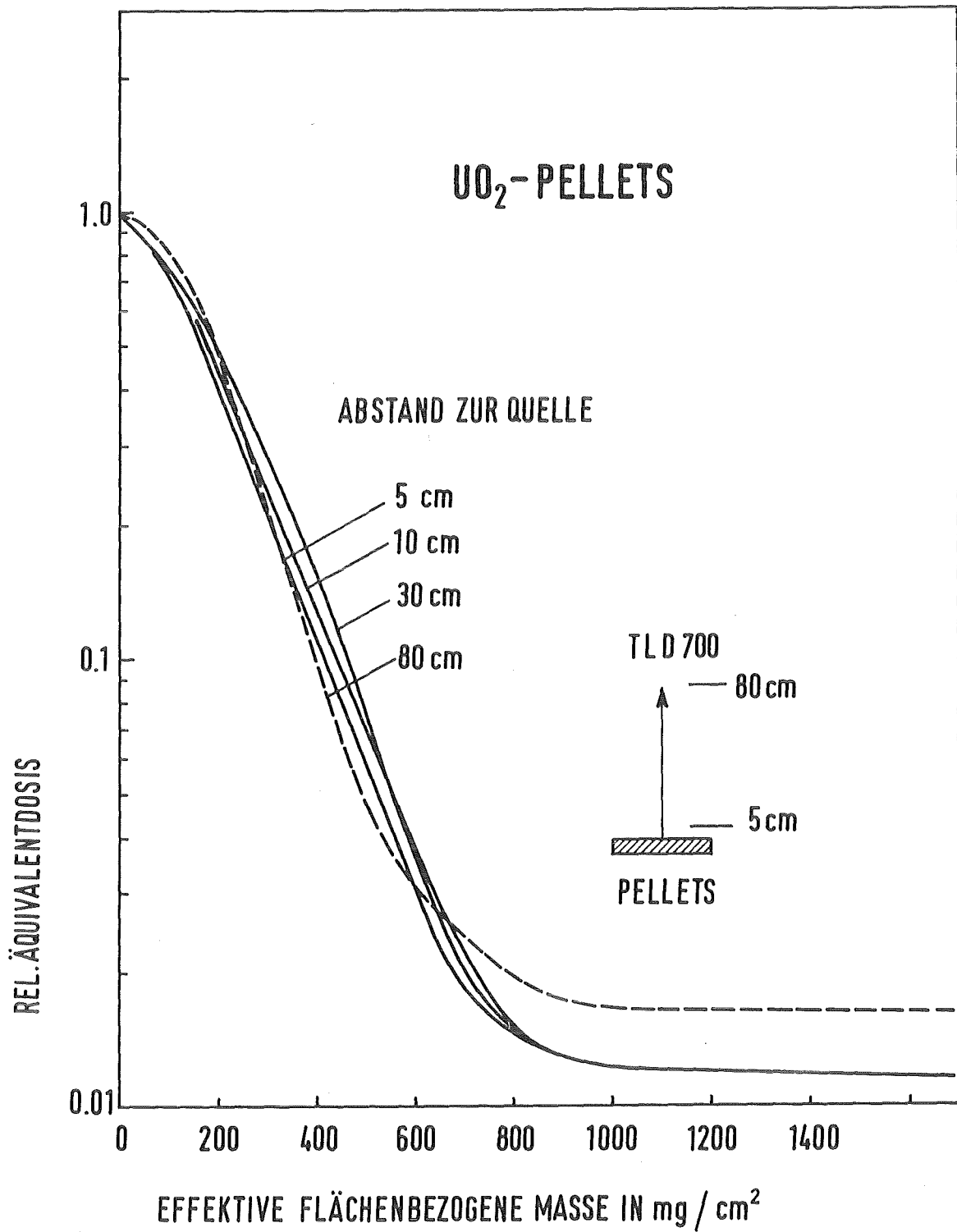


Abb. 8 Relative Äquivalentdosis oberhalb der UO<sub>2</sub>-Pelletanordnung in Abhängigkeit von der effektiven flächenbezogenen Masse (Gewebetiefe) für verschiedene Detektor-Quellenabstände



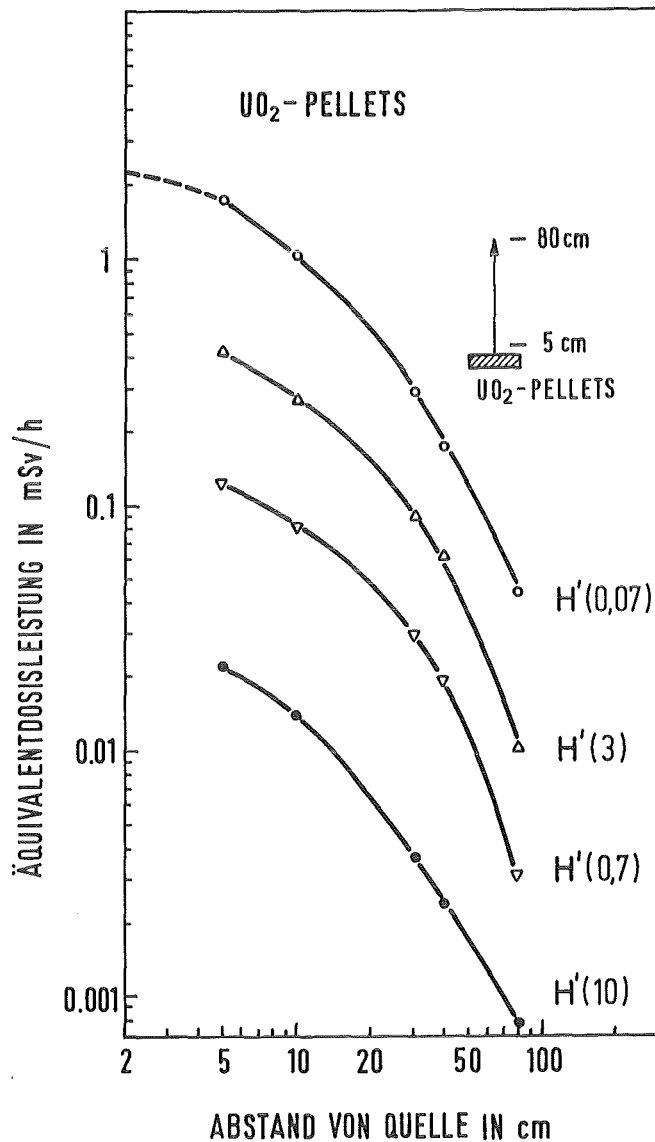


Abb. 9 Die Äquivalentdosisleistungen  $H'(0,07)$ ,  $H'(3)$ ,  $H'(4,7)$  und  $H'(10)$  in Abhängigkeit vom senkrechten Abstand oberhalb der UO<sub>2</sub>-Pelletanordnung. Für Abstände unterhalb 5 cm extrapoliert auf den Meßwert 2,7 mSv an der Oberfläche eines Pellets.

betiefe (Augenlinse) einen Äquivalentdosiswert, der etwa 20-35 % der Hautdosis beträgt. In 40 cm Abstand wurde für  $H'(3)$  ein Wert von 0,62 mSv/h gemessen (Abb. 8). In 4,7 mm Gewebetiefe (Gonaden) ergibt die Betastrahlung einen Äquivalentdosiswert, der etwa 7-10 % der Hautdosis beträgt.

Die im Hinblick auf die Bestimmung einer Ganzkörperdosis interessierende Äquivalentdosis  $H'(10)$  ergibt einen Äquivalentdosierteil insbesondere durch Photonen, der für die verschiedenen Detektor-Quellenabstände zwischen 1,2 % und 1,6 % der Äquivalentdosis  $H'(0,07)$  liegt.

Die vorliegenden Meßergebnisse für  $H'(0,07)$  sowie das Verhältnis  $H'(10)/H'(0,07)$  zeigen eine relativ gute Übereinstimmung zu kürzlich von Coleman et.al. (9) publizierten Ergebnisse für metallisches Uran. Diese Werte wurden mit einer Extrapolationskammer in 1 mm Entfernung von der Fensterelektrode erhalten. Für die Äquivalentdosisleistung an der Oberfläche von metallischem Uran werden dort Werte von  $H'(0,07) = 2,34$  mSv/h und  $H'(10) = 0,03$  mSv/h angegeben. Dies entspricht einem Verhältnis  $H'(10)/H'(0,07)$  von etwa 1,3 %.

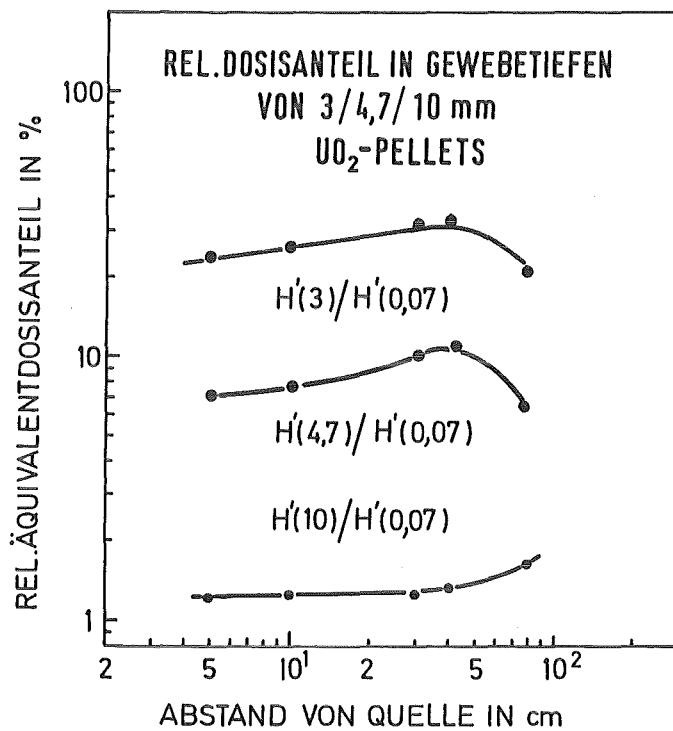


Abb. 10 Relative Äquivalentdosisbeiträge in 3 mm, 4,7 mm und 10 mm Gewebetiefe bezogen auf die Äquivalentdosis  $H(0,07)$  in 0,07 mm in Abhängigkeit vom Abstand oberhalb der UO<sub>2</sub>-Pelletanordnung

## 5.2 Transmissionsfaktoren für Schutzkleidung

Tab. 5 gibt eine Zusammenstellung von experimentell ermittelten Transmissionsfaktoren für die Beta-Photonen-Mischstrahlung an UO<sub>2</sub>-Pellets. Der Transmissionsfaktor gibt an, um welchen Betrag die Äquivalentdosis H'(0,07) am interessierenden Ort durch das Tragen von Kleidung, einer Schutzbrille bzw. durch Verwendung einer Plexiglasabdeckung reduziert wird.

Tab. 5 Transmissionsfaktor für Kleidung und Schutzbrille gemessen mit 0,03 mm dicken LiF-Teflondosimetern in 30 cm Abstand von der UO<sub>2</sub>-Pellet-Palette

Detektorabdeckung	Transmissionsfaktor für H'(0,07)
keine	1
Overall	0,89
Overall und Hose	0,65
Schutzbrille	0,047
1 cm Plexiglas	0,014
Gummihandschuhe	0,231)

1) gemessen in 5 cm Abstand

## 5.3 Teilkörperdosismessungen

Zur Ermittlung der tatsächlichen Strahlenexposition wurden Fingerringdosimeter über einen Überwachungszeitraum von etwa 14 Tagen an den besonders interessierenden Arbeitsplätzen an den Pressen, dem Ofen und den Schleifmaschinen ausgegeben. In Tab. 6 sind die Ergebnisse der mit Fingerringdosimeter ermittelten Teilkörperdosis dargestellt.

Im Fingerringdosimeter wurden hierbei zwei 0,4 mm dicke TL-Detektoren verwendet, wobei der erste Detektor eine Abdeckung von 0,07 mm und der zweite Detektor von 1 mm hatte (zwei Detektoren). Tab. 6 gibt einen Vergleich der am Arbeitsplatz über die gesamte Arbeitszeit gemittelten Teilkörperdosen mit dem Erwartungswert der Äquivalentdosis H'(0,07) bei Dauerbestrahlung in 5 cm Abstand senkrecht über der UO<sub>2</sub>-Pellet-Anordnung.

Tab. 6 Messung der Teilkörperdosis  $H'(0,07)$  und Ermittlung der Teilkörperdosisleistung gemittelt über die Tragedauer im Kontrollbereich mit Fingerringdosimetern innerhalb der Personenüberwachung an verschiedenen Arbeitsplätzen

Arbeitsplatz	Tragezeit (h)	Meßwert <sup>1)</sup> (mSv)		Verhältnis $\frac{0,07\text{mm}}{1\text{mm}}$	Teilkörperdosis <sup>2)</sup>	
		Abdeckung 0,07 mm	Abdeckung <sup>3)</sup> 1 mm		$H'(0,07)$ (mSv)	$H'(0,07)$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )
Kontrolle	170	1,18	0,77	1,53	1,29	7,6
Kontrolle	170	0,89	0,65	1,37	0,97	5,7
Kontrolle	150	0,44	0,40	1,10	0,48	3,2
Kontrolle	150	0,44	0,42	1,05	0,48	3,2
Kontrolle	140	0,97	0,66	1,47	1,06	7,6
Kontrolle	140	0,90	0,67	1,34	0,98	7,0
Presse	24	0,69	0,66	1,05	0,75	31,3
Presse	28	0,83	0,79	1,05	0,90	32,3
Presse	24	0,97	0,84	1,15	1,06	44,0
Presse	80	1,09	0,79	1,38	1,19	15,0
Presse	76	0,76	0,53	1,33	0,83	11,0
Presse 5	147	2,16	1,75	1,18	2,35	16,0
Ofen	37	0,65	0,66	0,98	0,71	19,2
Ofen	38	0,67	0,65	1,03	0,73	19,2
Ofen	32,5	0,67	0,66	1,02	0,73	22,5
Ofen	189	1,35	1,10	1,23	1,47	7,8
Ofen	80	0,72	0,48	1,50	0,79	10,0
Schleifm.	32	0,97	0,85	1,14	1,06	33,0
Schleifm.	32	0,79	0,72	1,10	0,86	26,9
Schleifm.	38	1,04	0,89	1,17	1,13	29,8
Schleifm.	38	0,95	0,82	1,16	1,04	27,3
Schleifm.	21,5	0,81	0,77	1,05	0,88	41,1
Schleifm.	21,5	0,79	0,79	1,00	0,86	40,1
Schleifm.	80	1,14	0,77	1,48	1,24	16,0
Schleifm.	72	1,05	0,71	1,48	1,15	16,0
Schleifm.	76	1,21	0,85	1,42	1,32	17,0
Schleifm. 5	170	3,26	2,54	1,28	3,55	21,0
Schleifm.5	170	2,89	2,28	1,27	3,15	19,0
Schleifm.6	159	10,9	7,69	1,42	11,9	(75,0) <sup>4)</sup>
Schleifm.6	159	3,90	2,69	1,45	4,25	(27,0) <sup>4)</sup>

1) angezeigt mit 0,4 mm dicken LiF-Detektoren

2) ermittelt aus dem Meßwert des Fingerringdosimeters unter Verwendung eines Korrektionsfaktors von 1,09. Der Photonenanteil kann im ungünstigsten Fall um diesen Faktor überbewertet werden

3) Abdeckung in mm Gewebe hervorgerufen durch einen zweiten TL-Detektor

4) innen stark verschmutzt, kann Ursache für Meßwerterhöhung sein

#### 5.4 Einfluß des $\beta$ -Strahlungsfeldes auf die Kalibrierung von $\beta$ -empfindlichen Detektoren

Im Hinblick auf die erforderliche Kalibrierung von Dosimetern zur Bestimmung des Beta-Ansprechvermögens zeigt Abb. 11 einen Vergleich von relativen Dosisverteilungen, die für die Beta-Kalibrierquellen Sr-90/Y-90 bzw. Tl-204 bei Messungen mit 0,03 dicken LiF-Teflondetektoren und für metallisches Uran unter Verwendung einer Extrapolationskammer (9) gefunden wurde. Danach wird für niedrig angereicherte UO<sub>2</sub>-Pellets mit einer maximalen  $\beta$ -Energie von 2,29 MeV eine ähnliche Dosisverteilung gefunden wie bei natürlichem Uranmetall. Im Vergleich zu Sr-90/Y-90 ergibt die Energieverteilung der UO<sub>2</sub>-Pellets einen deutlich niedrigeren  $E_{\beta\max}$ -Wert.

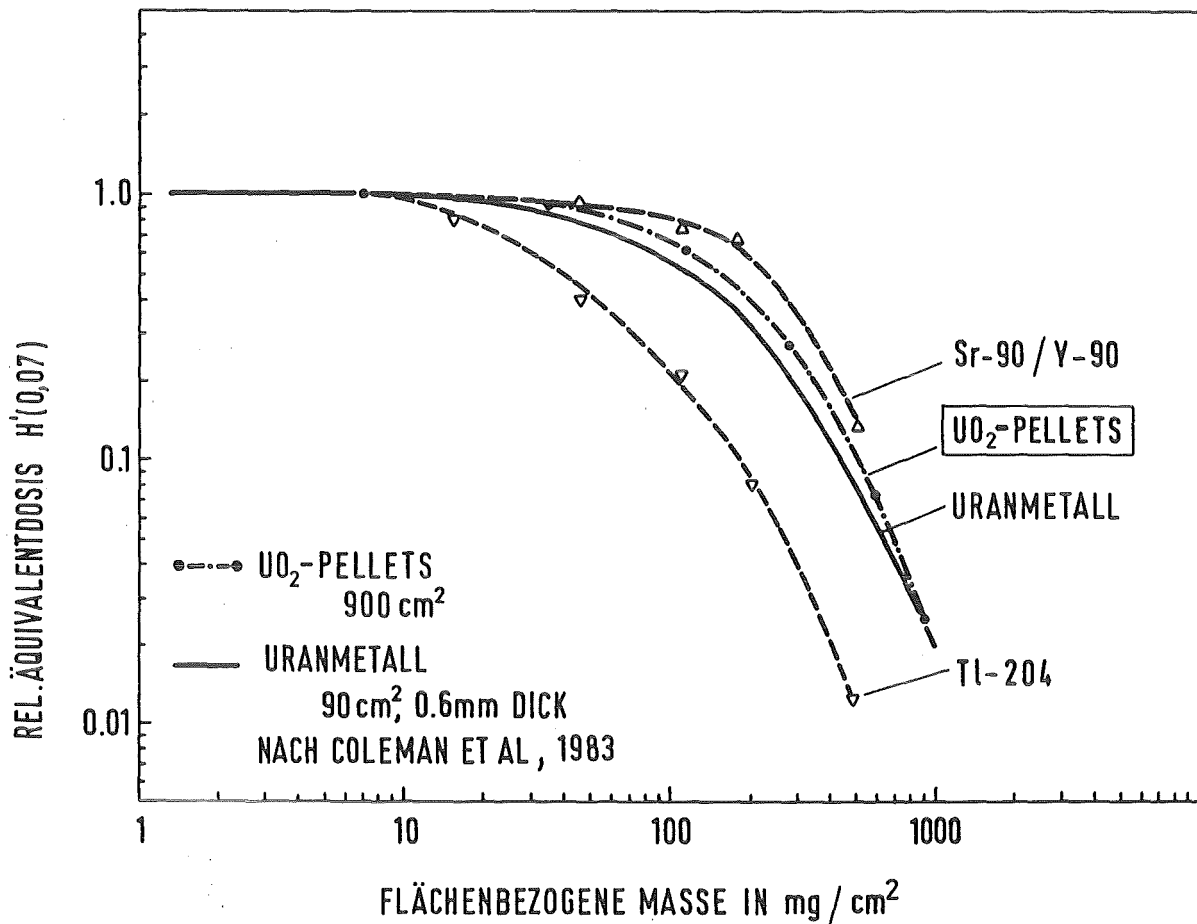


Abb. 11 Relative Äquivalentdosisleistung in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse für metallisches Uran, UO<sub>2</sub>-Pellets sowie die Beta-Kalibrierquellen Sr-90/Y-90 und Tl-204

Der Vergleich in Abb. 11 mit den Nukliden Sr-90/Y-90 und Tl-204 zeigt, daß die Äquivalentdosisverteilung von UO<sub>2</sub>-Pellets zwischen denjenigen von Sr-90/Y-90 und Tl-204 mit  $E_{\beta_{\max}}$ -Werten von 2,3 MeV und 0,7 MeV liegt. Zur Kalibrierung des  $\beta$ -Ansprechvermögens von energieabhängigen Dosimetern insbesondere von Filmdosimetern würde die Verwendung von Sr-90/Y-90 als Kalibrierquelle die Beta-Äquivalentdosismessung an UO<sub>2</sub>-Pellets unterschätzen, bei Verwendung von Tl-204 hingegen signifikant überschätzen.

Filmdosimeter werden bei Photonenstrahlung entsprechend DIN 6814 / Teil 3 frei in Luft auf die Photonen-Äquivalentdosis  $H_x$  kalibriert. Hinsichtlich Beta-Strahlung wird das Filmdosimeter üblicherweise an einem Phantom mit Sr-90/Y-90 ( $E_{\beta_{\max}} = 2,7$  MeV) bzw. mit Tl-204 ( $E_{\beta_{\max}} = 0,8$  MeV) auf die Meßgröße  $H'(0,07)$  kalibriert. Wegen der Energieabhängigkeit des  $\beta$ -Ansprechvermögens ist es jedoch erforderlich, das Filmdosimeter im Strahlungsfeld der UO<sub>2</sub>-Pellets zu kalibrieren.

## 6. Bewertung der Personendosis in der Routineüberwachung

### 6.1 Strahlenexposition am Arbeitsplatz

Zur Abschätzung der Strahlenexposition im Hinblick auf die interessierenden Äquivalentdosen  $H'(0,07)$ ,  $H'(3)$ ,  $H'(4,7)$  und  $H'(10)$  an den Arbeitsplätzen der UO<sub>2</sub>-Pellet-Produktion werden im Folgenden die in Abschnitt 5 wiedergegebenen Meßergebnisse in verschiedenen Gewebetiefen zugrundegelegt.

Zur konservativen Abschätzung der am Arbeitsplatz zu erwartenden Personendosen mußten repräsentative Stellen der Körperoberfläche sowie mittlere Arbeitsabstände angenommen werden, an denen Personendosimeter getragen werden bzw. interessierende Organdosen zu ermitteln sind. Dies waren

- für die Teilkörperexposition der Extremitäten, insbesondere der Hand, ein Arbeitsabstand von 10 cm,
- für die Teilkörperexposition der Augenlinse die Arbeitsabstände von 40 cm im ungünstigsten Fall und 80 cm im Normalfall,
- für die Teilkörperexposition der Gonaden ein Arbeitsabstand von 30 cm bei seitlicher Lage zu Pellet-Palette,
- für die Teilkörperexposition der Haut sowie für eine Ganzkörperexposition in einer Gewebetiefe von 10 mm, am repräsentativen Ort des Personendosimeters in Brusthöhe, ein Arbeitsabstand von 30 cm.

Für die Bestrahlungsverhältnisse am Arbeitsplatz können die in Abb. 2 wiedergegebenen Geometrien zugrundegelegt werden, bei der eine Person in 30 cm Abstand seitlich von der  $\text{UO}_2$ -Pelletpalette steht (Bestrahlungsgeometrie 2 b) und sich zeitweise über die Palette beugt (Bestrahlungsgeometrie 2 a, vergleiche auch Abb. 3). Die in diesen Bestrahlungsgeometrien gemessenen Äquivalentdosisleistungen  $H'(0,07)$  sind in Abb. 5 bzw. Abb. 8 wiedergegeben. Für eine konservative Abschätzung der Äquivalentdosis wurden die Ergebnisse von Abb. 9 für  $H'(4,7)$  herangezogen.

Tab. 7 vergleicht die entsprechenden Meßwerte der Äquivalentdosisleistung an den interessierenden Stellen der Körperoberfläche mit den Jahresdosisgrenzwerten für die jeweilige Strahlenexposition. Die Teilkörperexposition der Hände wird am Arbeitsplatz durch wirksame Strahlenschutzmaßnahmen, wie z.B. den Einsatz von Greifwerkzeugen, Tragen von Schutzhandschuhen und kurzzeitige Exposition während der Arbeitszeit, begrenzt.

Am Ort des Personendosimeters erwartet man für  $H'(10)$  etwa 2 % der Teilkörperdosis  $H'(0,07)$ . Im Vergleich zur Extremitätendosis wird der Beitrag einer Teilkörperexposition der Haut am Ort des Personendosimeters in Brusthöhe jedoch um mehr als eine Größenordnung geringer sein. Berücksichtigt man hier die Schwächung der Beta-Strahlung durch die Kleidung, dann liegt der Jahreserwartungswert für  $H'(0,07)$  am repräsentativen Ort in Brusthöhe weit unterhalb 10 % des Jahresgrenzwertes für  $H'(0,07)$ .

Die Äquivalentdosis der Augenlinse läßt insbesondere bei geringen Arbeitsabständen eine signifikante Strahlenexposition erwarten. Durch das Tragen von Schutzbrillen wird hier die Teilkörperdosis um den Faktor 50 herabgesetzt.

Die Äquivalentdosisleistung an den Gonaden wird durch die Aufstellung der Pellets in einer Höhe von 80 cm über Boden und die dadurch bewirkte Abdeckung der Gonaden durch den Arbeitstisch gegenüber einem senkrechten Strahleneinfall wesentlich reduziert. Auch für den konservativen Fall, daß die Tischplatte und die Gonaden in gleicher Höhe angenommen werden, erwartet man eine Selbstabsorption der Beta-Strahlung durch benachbarte Pellets. Für die hier vorgelegte Abschätzung wurden die in Abb. 7 wiedergegebenen Meßwerte herangezogen. Berücksichtigt man eine Schwächung der Beta-Strahlung durch die Kleidung und eine zusätzliche Abschirmung durch den Arbeitstisch, dann liegt die Teilkörperexposition der Gonaden in der gleichen Größenordnung wie die in Brusthöhe angezeigten Werte der Personendosis für eine Ganzkörperexposition in 10 mm Gewebetiefe.

Tab. 7 Beta-Photonen-Äquivalentdosisleistung für Teilkörper- und Ganzkörperexpositionen am Arbeitsplatz der UO<sub>2</sub>-Pellet-Verarbeitung und entsprechende Jahresgrenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie A

Körperteil	Abstand (cm)	Äquivalent-Dosisleistung (mSv/h)	Jahresdosis-Grenzwert <sup>1)</sup> H <sub>d,L</sub> (mSv)	Maximale Expositionszeit <sup>2)</sup> (h)
Haut	30	0,3	300	1000
Hand	10	1,1	500	
Augenlinse	40	0,5	150	3000
	80	0,01		15000
Gonaden	30	0,015	50	3300
Ganzkörper	30	0,004		12500

- 1) nach RöV 1987
- 2) Expositionsdauer zum Erreichen der Jahresdosis-Grenzwerte ohne Berücksichtigung zusätzlicher Strahlenschutzmaßnahmen bzw. eines erhöhten Photonenstrahlenpegels am Arbeitsplatz bei konstantem Detektor-Quellenabstand
- 3) Werte für den ungünstigsten Fall einer Senkrechteinstrahlung (siehe Abb.9)

Der Vergleich in Tab. 7 verdeutlicht, daß bei der UO<sub>2</sub>-Pellet-Verarbeitung die Strahlenexposition in größeren Gewebetiefen gegenüber einer Teilkörperexposition der Extremitäten und der Augenlinse zu vernachlässigen ist. Es muß ferner als günstig angesehen werden, daß die Strahleneinfallrichtung am Arbeitsplatz aus dem vorderen Halbraum erfolgt und das Personendosimeter zur Ermittlung der Ganzkörperexposition auch hinsichtlich der Gonadendosis dosislimitierend ist.

## 6.2 Bewertung der mittels Filmdosimeter gemessenen Personendosis

Zur Personenüberwachung werden Filmdosimeter eingesetzt, die eine Beta-Äquivalentdosis und eine Photon-Äquivalentdosis getrennt anzeigen. Eine getrennte Messung der Äquivalentdosen H'(0,07) und H'(10), wie es die ICRP-Empfehlung sowie ICRU 39 (1) nahelegen und wie es in Mischstrahlungsfeldern erforderlich ist, ist mit Filmdosimetern nur in Ausnahmefällen möglich. Zur getrennten Ermittlung der Teilkörperdosis der Haut und der Teilkörperexposition in größeren Gewebetiefen müssen daher Annahmen über das Strahlungsfeld zugrundeliegen.



Nach dem bisherigen Verfahren wurde die mit dem Filmdosimeter ermittelte Beta-Äquivalentdosis mit einem Transmissionsfaktor von 0,625 für Kleidung multipliziert und zur Photonen-Äquivalentdosis hinzuaddiert. Da sich die Jahresdosisgrenzwerte für die Teilkörperexposition der Extremitäten bzw. der Haut von dem der Ganzkörperexposition um einen Faktor 10 bzw. 6 unterscheiden, führt das bisherige Verfahren im Vergleich zur getrennten Bewertung zu einer signifikanten Überschätzung der tatsächlichen Strahlenexposition des Ganzkörpers (siehe Tab. 8).

Nach dem neuen Verfahren wird eine getrennte Bewertung der Äquivalentdosen  $H'(0,07)$  und  $H'(10)$  vorgenommen. Die DIN-Norm 6814 / Teil 3 (2) (siehe auch Tab. A2 im Anhang) schreibt bei Beta-Strahlung die Messung der Äquivalentdosis in einer Gewebetiefe von 0,07 mm vor. Die Photonen-Äquivalentdosis ergibt sich hingegen aus der Standardionendosis frei in Luft durch Multiplikation mit einem konstanten Konversionsfaktor. Bei der Photonen-Äquivalentdosis ist die Zuordnung zu einer Gewebetiefe damit nicht gegeben, so daß die Photonen-Äquivalentdosis im ungünstigen Fall auch als Beitrag zur  $H'(0,07)$  anzusehen ist.

Die Neudefinition der Meßgrößen für Personen- und Ortsdosimeter nach ICRU 39 (1) in zwei verschiedenen Gewebetiefen ermöglicht hingegen die unmittelbare Zuordnung von gemessenen Äquivalentdosen zu den Jahresgrenzwerten. Eine Addition von  $H'(0,07)$  und  $H'(10)$  ist damit ausgeschlossen (siehe auch Abschnitt 2).

Die realistische Abschätzung der Strahlenexposition an den  $UO_2$ -Pellet-Arbeitsplätzen im Abschnitt 6.1 zeigt, daß der Anteil der Ganzkörperexposition  $H'(10)$  um mehr als eine Größenordnung niedriger ist als der Beitrag der Äquivalentdosis  $H'(0,07)$ . Die alleinige Unterscheidung zwischen Beta-Äquivalentdosis und Photonen-Äquivalentdosis ist andererseits nicht ausreichend, weil diese Äquivalentdosisanteile unmittelbar keinen Bezug zu den Jahresgrenzwerten ermöglichen. Die Beta-Äquivalentdosis ist nach DIN 6814 / Teil 3 zwar als Hautdosis  $H'(0,07)$  zu messen, energiereiche Beta-Strahlung kann aber auch in anderen Gewebetiefen bzw. Organen, wie z.B. der Augenlinse und den Gonaden, zu einer Teilkörperdosis beitragen.

Ein Vergleich der Ortsdosismesseergebnisse in Tab. 9 verdeutlicht nochmals, daß insbesondere auch bei schrägem Einfall der Beta-Strahlung das Filmdosimeter die interessierenden Äquivalentdosen  $H'(0,07)$  und  $H'(10)$  im vorliegenden Mischstrahlungsfeld hinreichend genau anzeigt, obwohl das Filmdosimeter-Meßverfahren die unmittelbare Bestimmung dieser Meßgrößen nicht zuläßt. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, daß der Photonen-

Äquivalentdosisanteil gering ist und eine relativ energiereiche Photonen- und Betastrahlung vorliegt.

Tab. 8 Jahresdosis-Meßergebnisse der amtlichen Filmdosimeterüberwachung. Vergleich der nach dem bisherigen und neuen Verfahren auszuweisenden Personendosen.

	Jahresdosis ( mSv)			
	$H_Y^{2)}$	$H_{\beta}^{3)}$	$H_{alt}^{1)}$	$H_{alt}/H'(10)$
<u>Hauptabteilung Chemie</u>				
Person 1	3,40	7,4	8,03	2,36
Person 2	5,60	10,8	12,35	2,21
Person 3	6,20	9,6	12,20	1,97
Person 4	4,40	8,2	9,53	2,17
Person 5	5,60	10,8	12,35	2,21
Mittelwert von 135 Personen	0,868	1,82	2,01	2,32
<u>Hauptabteilung Keramik</u>				
Person 1	10,00	12,00	17,50	1,75
Person 2	4,40	20,60	17,28	3,93
Person 3	6,40	16,60	16,78	2,62
Person 4	5,20	26,40	21,70	4,17
Person 5	4,60	29,80	23,23	5,05
Mittelwert von 52 Personen	4,19	8,69	9,62	2,30
<u>Hauptabteilung Brennelemente</u>				
Person 1	3,00	7,60	7,75	2,58
Person 2	4,60	16,40	14,85	3,23
Person 3	2,80	6,40	6,80	2,43
Person 4	4,00	6,20	7,88	1,97
Person 5	4,20	5,00	7,33	1,75
Mittelwert von 156 Personen	1,21	0,892	1,77	1,46

- 1) Summe aus Photonen-Äquivalentdosis und der mit dem Faktor 0,625 multiplizierten  $\beta$ -Dosis bewertet als Ganzkörperdosis mit einem Jahresgrenzwert von 50 mSv:  $H_{alt} = 0,625 \cdot H_{\beta} + H_Y$
- 2) Ganzkörperdosis für durchdringende Beta-Photonenstrahlung:  $H'(10) = H_Y$
- 3) Hautdosis  $H(0,07)$  mit einer max. zul. Jahresdosis von 300 mSv:  $H'(0,07) = H_{\beta}$

Tab. 9 Meßergebnisse von gleichzeitig bestrahlten TL-Detektoren der Dicke 0,03 mm und Filmdosimetern für Senkrecht- bzw. Schräg-Bestrahlungen an UO<sub>2</sub>-Pellets;

Höhe <sup>1)</sup> (cm)	Bestrahlungs- zeit (h)	ÄQUIVALENTDOSIS (mSv)			
		TLD		FILMDOSIMETER	
		H(0,07)	H(10)	H <sub>β</sub>	H <sub>γ</sub>
SENKRECHT- BESTR.:					
5	48	84	1,1	46	1,4
10	120	143	1,7	99	2,4
30	309	84	1,1	61	1,4
SCHRÄG- BESTR.:					
3		21	0,6	16	1,0
20		58	0,8	31	1,0
30	386	49	0,6	29	1,0
40		45	0,7	24	1,0
60		29	0,5	19	0,8

1) Höhe über der Pelletanordnung, bei Schrägeinfall in einem seitlichen Abstand von 30 cm (siehe Abb. 2)

Um die Strahlenexposition am Arbeitsplatz richtig abzuschätzen, sollte das Filmdosimeter im Strahlungsfeld einer UO<sub>2</sub>-Quelle kalibriert und die von Filmdosimetern angezeigte Beta-Äquivalentdosis mit der Teilkörperdosis der Haut gleichgesetzt werden. Nur die angezeigte Photonen-Äquivalentdosis ist hingegen als Ganzkörperexposition zu bewerten. Wie die Ergebnisse der amtlichen Personenüberwachung mit Filmdosimetern in Tab. 8 zeigen, führt die Neubewertung der Personendosis im Vergleich zum bisherigen Verfahren zu Ganzkörperdosen (mittlere Jahresdosis pro Person), die bis zu einem Faktor 2,3 geringer sind. Im Einzelfall wurde die bisher ausgewiesene Ganzkörperexposition um einem Faktor 5 überschätzt.

## 7. Interpretation von Teilkörperdosen

In der folgenden zusammenfassenden Darstellung sollen die Meßergebnisse von Filmdosimetern und TL-Dosimetern im Hinblick auf eine Bewertung von Teilkörperdosis und Ganzkörperdosis abschließend diskutiert werden.

Geeignete Fingerringdosimeter können die Extremitätendosis direkt in der gewünschten Meßgröße  $H'(0,07)$  anzeigen. Bei TL-Detektoren von 0,89 mm Dicke ist zu beachten, daß für das Beta-Strahlungsfeld an  $UO_2$ -Pellets bezogen auf eine Kalibrierung mit Photonen ein entsprechender Korrektionsfaktor von 1,47 zu berücksichtigen ist (siehe Abschnitt 5.1.1). Der Meßwert des zur Teilkörperdosismessung herangezogenen Personendosimeters wird der am Dosimeterort vorhandenen Teilkörperexposition der Haut gleichgesetzt. Falls das Personendosimeter beispielsweise in Brusthöhe oberhalb der Schutzkleidung getragen wird, ist ein entsprechender Transmissionsfaktor für die Schwächung der Beta-Strahlung durch die Kleidung vorzusehen. Experimentell ermittelte Werte für den Transmissionsfaktor sind in Tab. 5 für TL-Detektoren angegeben. Bei Filmdosimetern ergab sich für die Beta-Äquivalentdosis ein Schwächungsfaktor von 0,625.

Da in dem vorliegenden Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeld die Beta-Strahlung keinen nachweisbaren Beitrag zur Äquivalentdosis in einer Gewebetiefe von 10 mm liefert, muß der mit dem Filmdosimeter gemessene Beta-Äquivalentdosisanteil ausschließlich als Beitrag zur Äquivalentdosis  $H'(0,07)$  angesehen werden. Filmdosimeter ermöglichen mit hinreichender Genauigkeit eine Anzeige sowohl von  $H'(0,07)$  als auch von  $H'(10)$ , falls unter Zugrundelegung einer geeigneten Phantomkalibrierung der Beta-Äquivalentdosisanteil mit  $H'(0,07)$  und der Photonen-Äquivalentdosisanteil mit  $H'(10)$  gleichgesetzt werden.

Die Einführung der effektiven Äquivalentdosis macht es darüberhinaus erforderlich, daß der entsprechende Beitrag der Teilkörperdosis der Haut bei der Bestimmung der effektiven Äquivalentdosis unberücksichtigt bleibt. Wie die Meßergebnisse der Personenüberwachung zeigen, führte die bisherige Bewertung der Filmdosimeterergebnisse zu einer Überschätzung der Ganzkörperdosis bis zu einem Faktor 5 (siehe Tab. 8).

Innerhalb der Personenüberwachung ist es nicht erforderlich, die Äquivalentdosis  $H'(3)$  der Augenlinse unmittelbar zu messen. Sie kann aus der Ortsdosis bzw. Personendosis unter Berücksichtigung der Arbeitsbedingungen und des Dosisreduktionsfaktors für die Schutzbrille ermittelt werden.  $H'(3)$  kann generell aus der am repräsentativen Ort mit dem Zweikomponenten-Personendosimeter gemessenen Teilkörperdosis der Haut abgeschätzt werden. Unter den hier

zugrundegelegten Arbeitsbedingungen überschätzt der Meßwert  $H'(0,07)$  in Brusthöhe insbesondere wegen des geringeren Abstandes zur Quelle und der geringeren äquivalenten Gewebetiefe von 0,07 mm den Erwartungswert für  $H'(3)$  am Auge um einen Faktor 15. Würde man mit einem Extremitätendosimeter die Teilkörperdosis  $H'(0,07)$  in unmittelbarer Nähe des Auges messen, dann wird  $H'(3)$  noch um den Faktor 4,5 überbewertet.

Ähnliches gilt für die Abschätzung der Gonadendosis, wobei hier die zusätzliche Schwächung der Beta-Strahlung in der Kleidung sowie eine Selbstabsorption der Beta-Strahlung in der Pelletanordnung zu berücksichtigen ist. Bei einer Messung in Brusthöhe würde  $H'(0,07)$  die Teilkörperdosis der Gonaden um den Faktor 10 überschätzen.

Die Arbeitsplatzanalyse zeigt, daß die mit einem Zweikomponentendosimeter in Brusthöhe gemessenen Äquivalentdosisbeiträge  $H'(0,07)$  und  $H'(10)$  eine ausreichend genaue Abschätzung der Äquivalentdosen der Augenlinse und der Gonaden zulassen. Solange der entsprechende Jahresgrenzwert für eine Teilkörperexposition der Haut in Brusthöhe nicht überschritten wird, ist eine Überschreitung des Jahresgrenzwertes der Augenlinse und der Gonaden nicht zu erwarten.

Bei Verdacht auf Überschreitung der entsprechenden Jahresgrenzwerte soll die Äquivalentdosis der Augenlinse und anderer Organe unter Zugrundelegung des in Abschnitt 2.3 beschriebenen Rechenmodells durch eine Abschätzung ermittelt werden (6). Hierzu dient die am repräsentativen Ort gemessene Teilkörperdosis der Haut unter Berücksichtigung von Transmissionsfaktoren für verschiedene Gewebetiefen sowie einer unterschiedlichen Entfernung der Organe bzw. Körperteile vom repräsentativen Ort der Personendosismessung.

## **8. Schlußfolgerungen zur Personenüberwachung**

Die in der vorliegenden Untersuchung an  $UO_2$ -Pellet-Arbeitsplätzen durchgeführten Messungen der Personendosis zeigen, daß hier insbesondere Teilkörperexpositionen durch Beta-Strahlung zu erwarten sind (siehe Tab. 8). Je nach Arbeitsbereichen wird eine unterschiedlich hohe Photonen-Äquivalentdosis als zusätzliche Untergrundstrahlung erwartet, die unter Zugrundelegung der Filmdosimeterergebnisse (siehe Tab. 8) bis zu 10 mSv pro Jahr betragen kann. Strahlenschutzmaßnahmen müssen daher eine Reduzierung der Teilkörperdosis durch Beta-Strahlung zum Ziel haben.

Die bisherige auf der sicheren Seite liegende Interpretation der Personendosis hat bereits zu umfangreichen Strahlenschutzmaßnahmen im Hinblick auf eine Reduzierung der Personendosis unmittelbar am Arbeitsplatz geführt. Speziell in den Bereichen, in denen aus fertigungstechnischen Gründen Grünlinge und Pellets häufig in offener Form, großflächig angeordnet, gehandhabt werden müssen, sind - soweit es der betriebsmäßige Ablauf zuläßt - weitgehende Reduzierungen der Beta-Strahlung durch Plexiglas-Abschirmungen erreicht worden.

Zur Minimierung der Teilkörperexposition der Hände werden Greifwerkzeuge zur Vergrößerung des Arbeitsabstandes eingesetzt. Weiterhin gehört die Schutzbrille zur Standard-Schutzausrüstung beim Umgang mit offenen Pellets. Mit diesen Maßnahmen wird eine ausreichende Reduzierung der Personendosis insbesondere der Teilkörperdosis der Hand erreicht.

Die Ergebnisse der Teilkörperdosismessungen an den Händen in Tab. 6 zeigen, daß die Aufenthaltszeit der Hände in Pelletnähe nur einen Bruchteil der Arbeitszeit (hier ca. 480 h) beträgt und trotz unterschiedlicher Tätigkeiten an den verschiedenen Arbeitsplätzen nur geringe Unterschiede der Teilkörperdosen gefunden werden. Bei einer Arbeitszeit von 2 000 Stunden pro Jahr würde dies eine Teilkörperdosis von weniger als 40 mSv ergeben. Der Erwartungswert der Jahresdosis beträgt demnach weniger als 1/10 des entsprechenden Jahresgrenzwertes, so daß ein Tragen von Blei-Gummihandschuhen nicht erforderlich wird. Im Hinblick auf die in Tab. 7 aus der Dosisleistung in 10 cm Abstand zu erwartende Teilkörperexposition ist eine stichprobenartige Überwachung der Teilkörperdosis mit Fingerringen jedoch erforderlich.

Das Teilkörperdosimeter, z.B. ein Fingerringdosimeter, soll bevorzugt an der meist exponierten Arbeitshand insbesondere an demjenigen Finger getragen werden, der den Pellets am nächsten kommt. Beim Tragen des Fingerringdosimeters muß darauf geachtet werden, daß der Detektor insbesondere bei kleinen Detektor-Quellenabständen in Richtung zur Strahlenquelle getragen wird.

Die Messung der Teilkörperdosis  $H'(0,07)$  ist jedoch auch im Bereich des Körperrumpfes erforderlich. Das in Brusthöhe exponierte Zweikomponenten-Personendosimeter zeigt hier sowohl die Ganzkörperdosis in einer Gewebetiefe von 10 mm als auch die Teilkörperexposition in einer Gewebetiefe von 0,07 mm an.

## 9. Literatur

- (1) ICRU, Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources, ICRU Washington, D.C., Report 39, 1985.
- (2) DIN 6814, Teil 3, Begriffen und Benennungen in der Radiologischen Technik, Dosisgrößen und Dosiseinheiten, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1985.
- (3) DIN 6814, Teil 5, Begriffe und Benennungen in der Radiologischen Technik, Strahlenschutz, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1983.
- (4) Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung-StrlSchV) vom 13. Oktober 1976 (BGBl. I, S. 2905, BGBl. I 1977, S. 184, 269).
- (5) ICRP Publication 26, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Oxford Pergamon Press, 1977.
- (6) Berechnungsgrundlage für die Ermittlung von Körperdosen bei äußerer Strahlenexposition durch Elektronen, insbesondere durch  $\beta$ -Strahlung, Bonn, Bundesanzeiger Nr. 126a, S. 21-28, Juli 1985.
- (7) Berechnungsgrundlagen für die Ermittlung von Körperdosen bei äußerer Strahlenexposition durch Photonenstrahlung, Bundesanzeiger Nr. 126a, S. 9-20, Juli 1985.
- (8) Facey, R.A., Effective depth of spermatogonia, I. measurement of scrotal thickness, II. Calculation for high energy beta-rays. Phys. Medic. Biology, 27 (11), (1982), p. 1349 - 1356 and p. 1357 - 1366.
- (9) Coleman, R.L., Hudson, C.G. and Photo, P.A., Depth-Dose Curves for  $^{90}\text{Sr}$  and Natural and Depleted Uranium in Mylar, health Physics, vol. 44, pp 395-402, 1983.
- (10) Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen (Röntgenverordnung - RöV) vom 8. Januar 1987, BGBl. I, S. 114-134, 1987.
- (11) Lederer, C.M. et.al., Table of Isotopes, John Wiley, New York, 1978.
- (12) Beiblatt zu DIN 6814, Teil 3, Entwurf März 1988

## Anhang 1: Meßgrößen

Die Präzisierung der Begriffsbestimmungen für die Personendosis und die Ortsdosis ist zur Zeit Gegenstand internationaler Beratungen. Bis das Ergebnis vorliegt, gelten entsprechend DIN 6814 / Teil 3 (2) die in Tab. A1 wiedergegebenen Definitionen.

Nach den neuesten Empfehlungen der International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU) (1) ist die Personendosis  $H_p(d)$  die Äquivalentdosis in Weichteilgewebe an einem spezifizierten Ort in einer Gewebetiefe  $d$  unterhalb der Körperoberfläche. Empfohlen werden Gewebetiefen von 10 mm für durchdringende Strahlung insbesondere bei Ganzkörperexposition und 0,07 mm für Strahlung geringer Eindringtiefe bei einer Teilkörperexposition der Haut bzw. der Extremitäten sowie 3 mm bei Exposition der Augenlinse. Die neu empfohlenen Meßgrößen  $H'(d)$  für den Strahlenschutz werden für Kalibrierzwecke auf ein vereinfachtes antropomorphes Phantom, die ICRU-Kugel von 30 cm Durchmesser, bezogen. Die Kalibrierung der Personendosimeter erfolgt an der Oberfläche eines Phantoms auf die entsprechenden Richtungs-Äquivalentdosen  $H'(10)$  (für die effektive Äquivalentdosis bei Ganzkörperexposition),  $H'(0,07)$  (für Teilkörperexposition der Haut) und  $H'(3)$  (für Augenlinse). Kalibriervorschriften, die auch die Art des Phantoms festlegen, sind in Vorbereitung.

Nach dem neuen DIN-Vorschlag (12) gelten als Meß- und Kalibriergrößen für die effektive Äquivalentdosis bzw. die Teilkörperdosis die Äquivalentdosis in einer Tiefe von 10 mm bzw. 0,07 mm des ICRU-Kugelphantoms (30 cm  $\varnothing$ , gewebeäquivalentes Material):

- Die Richtungs-Äquivalentdosis  $H'(10)$  am interessierenden Punkt im tatsächlichen Strahlungsfeld ist die Äquivalentdosis, die in dem entsprechenden aufgeweiteten Strahlungsfeld auf einem festgelegten Radius der ICRU-Kugel in der Tiefe 10 mm erzeugt würde.

Anmerkung: Für durchdringende Strahlung wird  $d = 10$  mm, für Strahlung geringer Eindringtiefe  $d = 0,07$  mm empfohlen. Ein aufgeweitetes Strahlungsfeld ist ein Strahlungsfeld, das an allen Punkten eines ausreichend großen Volumens die gleiche spektrale und raumwinkelbezogene Teilchenflußdichte besitzt wie das tatsächliche Strahlungsfeld am interessierenden Punkt. Die Meßgröße ist richtungsabhängig.



- Die Umgebungs-Äquivalentdosis  $H^*(10)$  am interessierenden Punkt im tatsächlichen Strahlungsfeld ist die Äquivalentdosis, die in dem entsprechend ausgerichteten und aufgeweiteten Strahlungsfeld in der Tiefe 10 mm in der ICRU-Kugel erzeugt würde.

Anmerkung: Ein aufgerichtetes und aufgeweitetes Strahlungsfeld ist ein Strahlungsfeld einheitlicher Richtung, das an allen Punkten eines ausreichend großen Volumens die gleiche spektrale Teilchenflußdichte besitzt wie das tatsächliche Strahlungsfeld am interessierenden Punkt. Die Meßgröße ist richtungsunabhängig.

Als Ortsdosis gilt die Umgebungs-Äquivalentdosis  $H^*(10)$  bzw. die Richtungs-Äquivalentdosis  $H'(0,07)$ , als Personendosis der Meßwert eines Personendosimeters, das auf der Oberfläche eines geeigneten Phantoms zur Messung der Richtungs-Äquivalentdosis  $H'(10)$  bzw.  $H'(0,07)$  kalibriert ist. Entsprechende Konversionsfaktoren sind in Tab. 2 und Abb.1 wiedergegeben. Durch die unterschiedliche Kalibrierung von Orts- und Personendosimeter wird erreicht, daß die Anzeige von Orts- und Personendosimetern definitionsgemäß übereinstimmen. Im Gegensatz zu den bisherigen Definitionen wird jetzt dieselbe Meßgröße zur Bestimmung der Teilkörperexposition von Photonen- und Elektronenstrahlung zugrundegelegt.

## Tab. A1 Meßgrößen im Strahlenschutz: Personendosis und Ortsdosis (2)

Meßgröße im Strahlenschutz ist die Äquivalentdosis H.

Die ÄQUIVALENTDOSIS H ist das Produkt aus der Energiedosis D im Gewebe und einem dimensionslosen Bewertungsfaktor q ( $H = q \cdot D$ ). Die SI-Einheit der Äquivalentdosis ist das "Sievert" (Einheitenzeichen Sv) ( $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$ ).

Nach DIN 6814 / Teil 3 gelten folgende Definitionen:

- Die Personendosis ist die Äquivalentdosis für Weichteilgewebe gemessen an einer für die Strahlenexposition repräsentativen Stelle der Körperoberfläche einer Person.
- Die Ortsdosis ist die Äquivalentdosis für Weichteilgewebe, gemessen an einem bestimmten Ort.

Bei Photonenstrahlung mit Maximalenergien bis 3 MeV ist die Photonen-Äquivalentdosis  $H_x$  gleich dem Produkt aus der Standard-Ionendosis und dem Faktor 0,01 Sv/R

Anmerkung:

- Der Zahlenwert der Photonen-Äquivalentdosis ist gleich dem angezeigten Zahlenwert der Standardionendosis,
- Die Photonen-Äquivalentdosis ergibt sich aus der Luftkerma  $K_a$  durch Multiplikation mit dem Faktor 1,15 Sv/Gy.

Bei Elektronenstrahlung gilt als Ortsdosis und Personendosis der Meßwert eines Ortsdosimeters bzw. eines Personendosimeters, das zur Messung der Energiedosis in Weichteilgewebe in einem halbinendlich ausgedehnten weichteilgewebeäquivalenten Körper der Dichte  $1 \text{ g/cm}^3$  in einer Tiefe von 0,07 mm kalibriert ist, multipliziert mit dem Faktor 1 Sv/Gy.

Anmerkung:

- Bei gemischten Photonen-Elektronen-Strahlenfeldern kann es zur Trennung der Komponenten nach Strahlenart und Energie erforderlich sein, in verschiedenen Tiefen ermittelte Dosiswerte anzugeben.
- Die Kalibrierung muß für den Spektralbereich der Anwendung gültig sein.

## Anhang 2: Körperdosisgrenzwerte

Personendosis und Ortsdosis (siehe Tab. A1) gelten als Überwachungsdaten für den praktischen Strahlenschutz. Sie sind nicht identisch mit der tatsächlichen Strahlenexposition von Personen, die als Körperdosis bezeichnet wird.

Körperdosis ist der Sammelbegriff für Ganzkörperdosis, Teilkörperdosis und effektive Äquivalentdosis. Die in Tab. A2 wiedergegebenen Definitionen sind DIN 6814 / Teil 5 (3) entnommen.

Im Hinblick auf die Grenzwerte der Körperdosen für beruflich strahlenexponierte Personen (Tab. A3) ist bei Vorliegen einer Ganzkörperexposition die effektive Äquivalentdosis zu ermitteln. Bei externer Strahlenexposition durch Beta-Strahlung ist es ausreichend, nur die Teilkörperdosen für die in Tab. 1 angegebenen Körperbereiche zu berücksichtigen.

Innerhalb der Personenüberwachung wird eine Abschätzung der Körperdosis insbesondere nach Erreichen der Grenzwerte erforderlich. Die Körperdosis läßt sich aus dem Meßwert des Personen- bzw. Ortsdosimeters unter Berücksichtigung zusätzlicher Kenngrößen abschätzen, nämlich der Strahlenart, der Strahlenenergie, der Strahleneinfallrichtung und der räumlichen Dosisverteilung (6,7). Innerhalb der Strahlenschutzüberwachung wird bei geringen Strahlenexpositionen unterhalb der Jahresdosisgrenzwerte die Personendosis als hinreichende Näherung für die Körperdosis angesehen.

## Tab. A2 Dosisbegriffe im Strahlenschutz: Körperdosen

Die tatsächliche Strahlenexposition einer Person bezeichnet man als Körperdosis.

Die Ganzkörperdosis  $H_G$  ist der Mittelwert der Äquivalentdosis über Kopf, Rumpf, Oberarme und Oberschenkel bei einer als homogen angesehenen Strahlenexposition des Körpers.

Die Teilkörperdosis  $H_T$  ist der Mittelwert der Äquivalentdosis gemittelt über das Volumen eines Körperteiles oder eines Organs, eines Teils des Organs, im Falle der Haut gemittelt über die Fläche.

Anmerkung:

- Im Falle der Haut gilt als Äquivalentdosis an einem Punkt der über 1 cm<sup>2</sup> Hautfläche gemittelte Wert.

Die effektive Äquivalentdosis (Kurzbezeichnung: effektive Dosis)

$$H_E = \sum_T w_T H_T$$

ist die Summe der mit den zugehörigen Wichtungsfaktoren  $w_T$  multiplizierten mittleren Äquivalentdosen  $H_T$  in relevanten Organen oder Geweben T. Die Wichtungsfaktoren  $w_T$  berücksichtigen die unterschiedlichen Strahlenrisiken der einzelnen Organe und Gewebe bezüglich stochastischer Strahlenwirkungen und sind durch Vereinbarung festgelegt (siehe ICRP 26, 1977).

Anmerkung:

- Durch die Definition der effektiven Äquivalentdosis ist geregelt, daß Teilkörperdosen für verschiedene Körperbereiche nur bei Anwendung der Wichtungsfaktoren  $w_T$  addiert werden dürfen.
- Teilkörperdosen für Augenlinse, Haut, Hände, Unterarme, Füße und Knöchel werden bei der Ermittlung der effektiven Dosis nicht berücksichtigt.
- Die Werte der Wichtungsfaktoren sind in Tab. A3 wiedergegeben

Tab. A3 Grenzwerte der Körperdosen für beruflich strahlenexponierte Personen (10)

Körperdosis	Werte der Körperdosis für beruflich strahlenexponierte Personen im Kalenderjahr der	
	Kategorie A	Kategorie B
1	2	3
Effektive Dosis	50 mSv	15 mSv
1. Teilkörperdosis: Keimdrüsen, Gebärmutter, rotes Knochenmark	50 mSv	15 mSv
2. Teilkörperdosis: Alle Organe und Gewebe, soweit nicht unter 1., 3., und 4. genannt	150 mSv	45 mSv
3. Teilkörperdosis: Schilddrüse, Knochen- oberfläche, Haut, soweit nicht unter 4. genannt	300 mSv	90 mSv
4. Teilkörperdosis: Hände, Unterarme, Füße, Unterschenkel, Knöchel, einschl. der dazugehörigen Haut	500 mSv	150 mSv

1) Anlage IV RöV

### Anhang 3: Körperdosisermittlung bei Beta-Strahlungsanteilen

Bei der Ermittlung von Körperdosen nach äußerer Exposition durch Beta-Strahlung (6) wird unterschieden zwischen

- der Gleichsetzung mit der Orts- oder Personendosis
- der Abschätzung aus Orts- oder Personendosen oder sonstigen Überwachungsdaten,
- der Berechnung der Energiedosisverteilung im Körper mit einem dem Einzelfall angepaßten Berechnungsmodell.

Wird die Personendosis aus der Ortsdosis ermittelt, dann kann unter Berücksichtigung der Aufenthaltsdauer die Ortsdosis an einem für die Strahlenexposition repräsentativen Ort der Körperoberfläche der Personendosis gleichgesetzt werden. Entsprechend der Berechnungsgrundlage (6) ist hierbei die gemessene Ortsdosis im allgemeinen der gemessenen Personendosis oder einer berechneten Ortsdosis wegen der geringeren Unsicherheit vorzuziehen. Wird die Personendosis durch Beta-Strahlung mit einem Personendosimeter gemessen, muß sichergestellt werden, daß die Anzeige des Personendosimeters repräsentativ für die Strahlenbelastung ist. Dies gilt insbesondere bei ungleichförmiger Bestrahlung der Person im Beta-Strahlungsfeld, wenn der Meßort des Personendosimeters u.U. nicht repräsentativ ist für die Teilkörperdosis der Haut, der Teilkörperdosis an den Extremitäten sowie der Äquivalentdosis der Augenlinse.

Zur Abschätzung der Körperdosis bei einer Strahlenexposition durch Beta-Strahlung wird ein Berechnungsmodell zugrundegelegt, welches standardisierte physikalische Bedingungen und Methoden zur Abschätzung der Teilkörperdosen sowie der Ermittlung der Äquivalentdosisverteilung im menschlichen Körper festgelegt (6). Als Modell des menschlichen Körpers wird eine halbunendlich ausgedehnte Gewebeschicht angenommen. Die Achse des Strahleneinfalles steht hierbei senkrecht auf der Oberfläche des Phantoms. Die Äquivalentdosis durch Beta-Strahlung wird entlang der Achse des Strahlungsfeldes je nach dem interessierenden Organ in verschiedenen Tiefen im Phantom ermittelt.

Nach dem Berechnungsmodell wird der Wert der Orts- bzw. Personendosis definitionsgemäß gleichgesetzt mit der hinter einer flächenbezogenen Gewebemasse von 7 mg/cm<sup>2</sup> ermittelten Äquivalentdosis.

Die Äquivalentdosis in der gewünschten Gewebetiefe ergibt sich aus der Orts- bzw. Personendosis mit Hilfe eines Transmissionsfaktors, der die Schwächung der Beta-Strahlung berücksichtigt. Richtwerte für Transmissionsfaktoren sind in Abb. A1 wiedergegeben.

Transmissionsfaktoren zur Ermittlung der Äquivalentdosis in diesen Gewebetiefen können auch dann bestimmt werden, wenn die Maximalenergie der Beta-Strahlung bekannt ist. Zwischen der maximalen Reichweite  $R_{max}$  der Betateilchen in Stoffen der Dichte  $\rho$  und der maximalen Energie  $E_{max}$  eines Betastrahlers gilt im Energiebereich 0,05 MeV bis 5 MeV die Beziehung

$$d_{max} = \rho \cdot R_{max} = -0,11 + \sqrt{0,0121 + (E_{\beta max} / 1,92)^2}$$

wobei die Energie  $E_{max}$  in MeV einzusetzen ist (6). Die flächenbezogene Masse  $\rho \cdot R_{max}$  ergibt sich dann in  $g/cm^2$ .

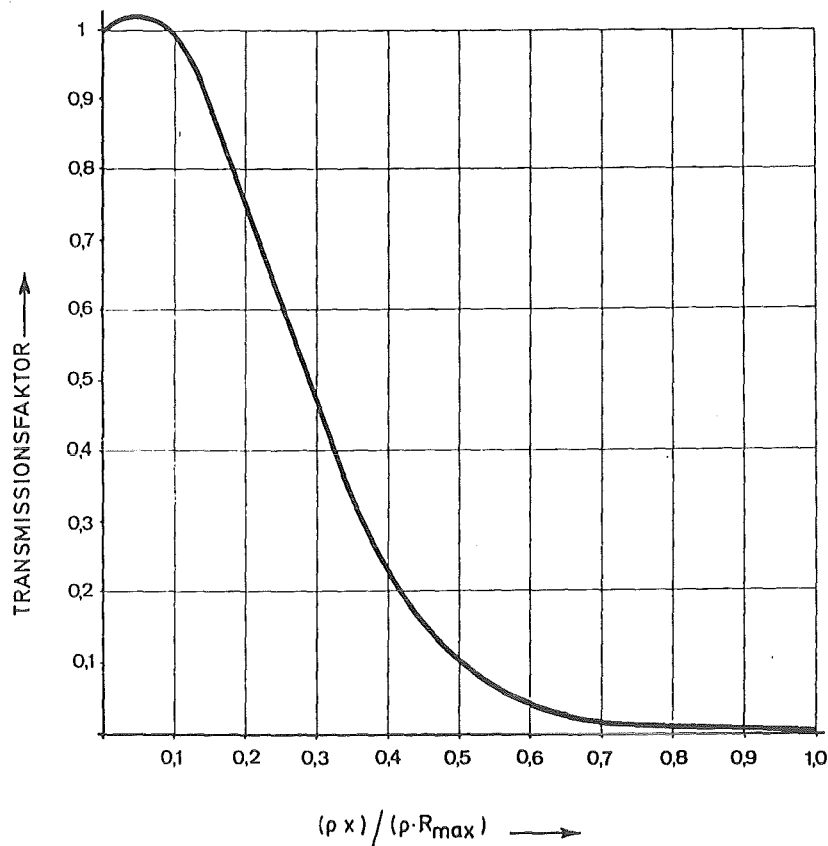


Abb. A1 Richtwerte für Transmissionsfaktoren zur Ermittlung der Ortsdosisleistung  $H_{\beta}$  hinter der Schichtdicke  $x$  eines Stoffes mit der Dichte  $\rho$  erzeugt durch einen Beta-Strahler der maximalen Energie  $E_{max}$  bzw. maximalen Reichweite  $R_{max}$

Unter Berücksichtigung von Transmissionsfaktoren für die interessierenden Schichtdicken ergeben sich die in Tab. 1 angeführten Teilkörperdosen:

- Die Teilkörperdosis der Haut sowie der Extremitäten wird dem Betrag nach gleichgesetzt mit der berechneten oder gemessenen Ortsdosis bzw. Personendosis.
- Die Äquivalentdosis der Augenlinse wird ermittelt aus der Ortsdosis bzw. Personendosis unter Berücksichtigung des Transmissionsfaktors für eine Gewebeschicht der flächenbezogenen Masse von  $300 \text{ mg/cm}^2$ .
- Bei ausgedehnten Organen, wie z.B. den Gonaden muß die Äquivalentdosis über das gesamte Organ gemittelt werden. Dieser Mittelwert wird gleichgesetzt dem Wert der Äquivalentdosis hinter einer bestimmten effektiven flächenbezogenen Gewebedicke. Für die Berechnung der Gonadendosis ist die flächenbezogene Gewebedicke als Funktion der maximalen Beta-Energie in Abb. A2 zugrunde zu legen (8).
- Für durchdringende Betastrahlung sowie im Beta-Photonen-Mischstrahlungsfeld ergibt sich die Ganzkörperdosis aus dem Meßwert der Ortsdosis hinter einer flächenbezogenen Masse von  $1000 \text{ mg/cm}^2$ .

Analog zur Bestimmung der Ortsdosis wird der Meßwert des zur Teilkörperdosimetrie herangezogenen Personendosimeters der am repräsentativen Ort vorhandenen Teilkörperdosis der Haut gleichgesetzt. Die Äquivalentdosis der Gonaden und anderer Organe ermittelt sich aus der am repräsentativen Ort gemessenen Teilkörperdosis der Haut unter Berücksichtigung der Transmissionsfaktoren in verschiedenen Gewebetiefen.

Bei der Messung der Personendosis mit einem Dosimeter auf der Schutzkleidung können zur Ermittlung der Teilkörperdosis der Haut entsprechende Transmissionsfaktoren angewandt werden, welche die flächenbezogene Masse der Schutzkleidung berücksichtigen. Die Energiedosisleistung an der Oberfläche eines Stoffes der Dichte  $\rho$ , erzeugt durch einen Beta-Strahler der maximalen Energie  $E_{\text{max}}$ , wird mit dem Transmissionsfaktor multipliziert, der bei senkrechtem Einfall der Beta-Strahlung und geringer Änderung der spektralen Beta-Teilchenflußdichte zwischen Beta-Strahler und der Oberfläche des Stoffes näherungsweise aus Abb. A1 ermittelt werden kann.



Abb. A2 Effektive Gewebetiefe der Gonaden als Funktion der maximalen Beta-Energie für verschiedene Radionuklide nach (8)

