

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

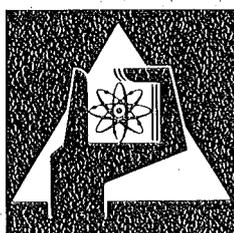
Dezember 1975

KFK 2186

Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit

**Vergleich verschiedener Kalibriermethoden  
zur  $\beta$ -Dosimetrie**

E. Schwarz



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

**KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2186

Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit

VERGLEICH VERSCHIEDENER KALIBRIERMETHODEN ZUR  $\beta$ -DOSIMETRIE

E. Schwarz

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe



## Intercomparison of Different Calibration Techniques for $\beta$ -Dosimetry

### Abstract

Different kind of techniques are compared which were used for the assessment of  $\beta$ -ray fields. Thereby a distinction is made between a dose rate measurement in the radiation field, where a comparison is given of the results found with a wall-free and a thick-walled window ionization chamber as well as of LiF thermoluminescent dosimeters, and the measurement of the surface dose, for the assessment of which an extrapolation chamber and LiF were used. Compared to the wall-free and the extrapolation chamber, LiF shows favourable results. With respect to field measurements the maximum deviation found was 7 % compared to the wall-free chamber, with respect to surface measurements  $\leq 4$  % compared with the extrapolation chamber for distances below 3 cm from the source. The thick-walled window ionisation chamber is inappropriate for field measurements, because the results differ from the wall-free chamber up to 17 %.

### Zusammenfassung

Es werden verschiedene Verfahren zur Bestimmung von  $\beta$ -Strahlenfelder verglichen. Dabei wird unterschieden zwischen der Dosisleistungsmessung im Strahlenfeld, bei der ein Vergleich zwischen einer wandlosen und einer dickwandigen Ionisationskammer sowie von LiF-Thermolumineszenzdosimetern erfolgt, und der Oberflächendosisbestimmung, wo eine Extrapolationskammer und LiF-Thermolumineszenzdosimeter verwendet werden. Die LiF-Dosimeter liefern im Vergleich zur wandlosen und zur Extrapolationskammer gute Ergebnisse. Bei der Ortsdosismessung betragen die Abweichungen der Werte gegenüber der wandlosen Kammer maximal 7 %, bei der Oberflächendosismessung ist der Fehler der Werte gegenüber der Extrapolationskammer für Abstände unterhalb 3 cm von der Quelle kleiner 4 %. Die dickwandige Kammer ist zur Dosisleistungsmessung im Strahlenfeld dagegen ungeeignet, da die Ergebnisse bis zu 17 % von der wandlosen Kammer abweichen.

	<u>Seite</u>
Zusammenfassung	
1. Problemstellung	1
2. Meßverfahren	3
2.1 Thermolumineszenzdosimeter	3
2.2 Ionisationskammermessung	4
2.2.1 Allgemeines	4
2.2.2 Wandlose Ionisationskammer	6
2.2.3 Extrapolationskammer	7
3. Meßanordnung	9
4. Ausmessung der Strahlenfelder	10
4.1 Ortsdosismessung	10
4.1.1 Bestimmung der Ortsdosis mit wandloser Ionisationskammer	10
4.1.2 Bestimmung der Ortsdosis mit dickwandiger Ionisationskammer und Thermolumineszenzdosimetern	15
4.2 Oberflächendosismessung	19
4.2.1 Theoretische Grundlagen zur Extrapolation	19
4.2.2 Extrapolation auf Elektrodenabstand Null	20
4.2.3 Extrapolation auf Elektrodendurchmesser $d=0,7$ cm	24
4.2.4 Bestimmung der Oberflächendosis mit Thermolumineszenzdosimetern	25
5. Fehlerabschätzung	28
6. Diskussion der Ergebnisse	33
6.1 Dosisleistung im Strahlenfeld	33
6.2 Oberflächendosismessung	35
7. Literatur	37

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Abb. 1: Relative Empfindlichkeit von Thermolumineszenzdosimetern in Abhängigkeit von der maximalen  $\beta$ -Energie mit der Dosimeterdicke als Parameter bezogen auf eine Energie von 3,54 MeV
- Abb. 2: Glowkurve
- Abb. 3: Wandlose Ionisationskammer
- Abb. 4: Extrapolationskammer
- Abb. 5: Kalibrierkurve der wandlosen und dickwandigen Ionisationskammer im  $^{137}\text{Cs}$ -Strahlenfeld
- Abb. 6: Meßanordnung für Freiluftmessung
- Abb. 7: Meßanordnung bei gebündeltem Strahlenkegel
- Abb. 8:  $^{106}\text{Ru}$ -Strahlenfeld mit wandloser Ionisationskammer ausgemessen: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierter Ionenstrom in Abhängigkeit vom Abstand Quelle-Kammermittelpunkt
- Abb. 9:  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ -Strahlenfeld mit wandloser Ionisationskammer ausgemessen: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierter Ionenstrom in Abhängigkeit vom Abstand Quelle-Kammermittelpunkt
- Abb. 10: Gebündelter Strahlenkegel mit wandloser Ionisationskammer ausgemessen: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierter Ionenstrom in Abhängigkeit vom Abstand Ersatzquelle-Kammermittelpunkt
- Abb. 11:  $^{106}\text{Ru}$ -Strahlenfeld mit dickwandiger Ionisationskammer ausgemessen: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierter Ionenstrom in Abhängigkeit vom Abstand Quelle-Kammermittelpunkt
- Abb. 12:  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ -Strahlenfeld mit dickwandiger Ionisationskammer ausgemessen: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierter Ionenstrom in Abhängigkeit vom Abstand Quelle-Kammermittelpunkt
- Abb. 13: Vergleich von wandloser und dickwandiger Ionisationskammer im  $^{106}\text{Ru}$ -Strahlenfeld: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierter Ionenstrom in Abhängigkeit vom Abstand Quelle-Kammermittelpunkt
- Abb. 14: Vergleich von wandloser und dickwandiger Ionisationskammer im  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ -Strahlenfeld: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierter Ionenstrom in Abhängigkeit vom Abstand Quelle-Kammermittelpunkt
- Abb. 15:  $^{106}\text{Ru}$ -Strahlenfeld mit Thermolumineszenzdosimetern ausgemessen: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierte Dosisleistung in Abhängigkeit vom Abstand von der Quelle
- Abb. 16:  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ -Strahlenfeld mit Thermolumineszenzdosimetern ausgemessen: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierte Dosisleistung in Abhängigkeit vom Abstand von der Quelle
- Abb. 17: Extrapolation des auf die Luftdichte des Kammervolumens bezogenen Ionenstroms auf Elektrodenabstand Null mit dem Elektrodendurchmesser  $d$  als Parameter
- Abb. 18: Extrapolation des auf die Luftdichte des Kammervolumens bezogenen Ionenstroms auf Elektrodendurchmesser  $d=0,7$  mit dem Abstand Quelle-Kammer als Parameter

- Abb. 19: Bestrahlungsanordnung der Thermolumineszenzdosimeter bei der Oberflächendosismessung
- Abb. 20: Vergleich der Oberflächendosismessung mit der Extrapolationskammer und der Thermolumineszenzdosimeter: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierte Dosisleistung in Abhängigkeit vom Abstand von der Quelle
- Abb. 21: Oberflächendosismessung einer  $^{106}\text{Ru}$ -Quelle mit Thermolumineszenzdosimeter: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierte Dosisleistung in Abhängigkeit vom Abstand von der Quelle
- Abb. 22: Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichungen der Kalibrierbestrahlungen vom Mittelwert der Einzeldosimeter
- Abb. 23: Mit dickwandiger Ionisationskammer gemessene Dosisleistung bezogen auf die Werte der wandlosen Ionisationskammer in Abhängigkeit vom Abstand Quelle-Kammermittelpunkt
- Abb. 24: Mit TLD gemessene Dosisleistung bezogen auf die Werte der wandlosen Ionisationskammer in Abhängigkeit vom Abstand der Quelle

## 1. Problemstellung

Mit der zunehmenden Anwendung der  $\beta$ -Strahler in der allgemeinen Forschung und speziell in der Medizin und Isotopentechnik gewinnt das Problem der genauen  $\beta$ -Dosisbestimmung immer größere Bedeutung. Die bisherigen Meßmethoden im Strahlenschutz konnten aber nicht zufriedenstellen. Weichstrahlkammern sind wegen ihrer Größe für die Oberflächendosismessung ungeeignet, während die Messung mit einer Extrapolationskammer zu aufwendig ist und deshalb nur zur Kalibrierung angewendet wird.

Die Eigenschaften von Dosimetern aus LiF in Teflon erwiesen sich dabei im Vergleich zu Weichstrahlkammern wegen ihrer annähernd gewebeäquivalenten Dosismessung und ihrer geringen Größe als vielversprechend. Sie können deshalb auch als Teilkörperdosimeter in der Personendosimetrie getragen werden und sind außerdem gegen mechanische und chemische Beanspruchung unempfindlich. Als Hauptproblem erwies sich, daß die  $\beta$ -Empfindlichkeit von der Dosimeterdicke und der  $\beta$ -Energie abhängt. Dies verdeutlichen auch die Meßergebnisse von Pendurkar u.a. [1] in Abb. 1. Unterhalb 3 MeV nimmt die Empfindlichkeit mit kleiner werdender  $\beta$ -Energie und zunehmender Dosimeterdicke stark ab. Bei dickeren Dosimetern werden, besonders bei kleinen  $\beta$ -Energien, in den Randschichten schon so viel  $\beta$ -Teilchen absorbiert, daß die Auswertung nur noch einen geringen Teil der tatsächlichen Dosis wiedergibt. Die bisher dünnsten Dosimeter waren 0,13 mm dick. Heinzelmann [2] bezeichnet die Ergebnisse seiner Messungen mit diesen als recht gut. Durch die Weiterentwicklung der Herstellungstechniken konnten jetzt Dosimeter mit einer Dicke von 0,02 mm gefertigt werden.

Im Strahlenschutz interessiert neben der Dosisleistungsmessung im Strahlenfeld auch die Oberflächendosismessung. Diese beiden Messungen wurden bei einer  $^{106}\text{Ru}$ -Quelle und einer  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ -Quelle mit Hilfe von 4 verschiedenen Meßverfahren durchgeführt. Zur Dosisleistungsmessung, bei der noch zwischen einem ausge-

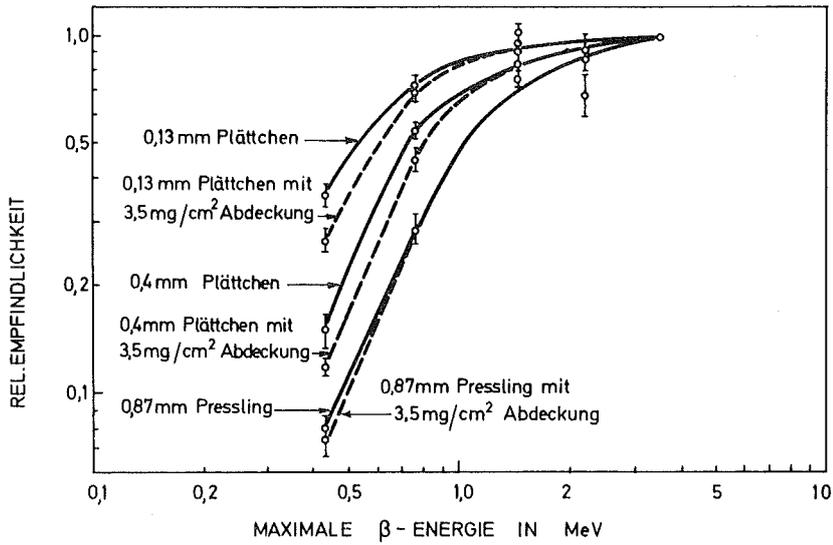


Abb. 1: Relative Empfindlichkeit von Thermolumineszenzdosimetern in Abhängigkeit von der maximalen  $\beta$ -Energie mit der Dosimeterdicke als Parameter bezogen auf eine Energie von 3,54 MeV

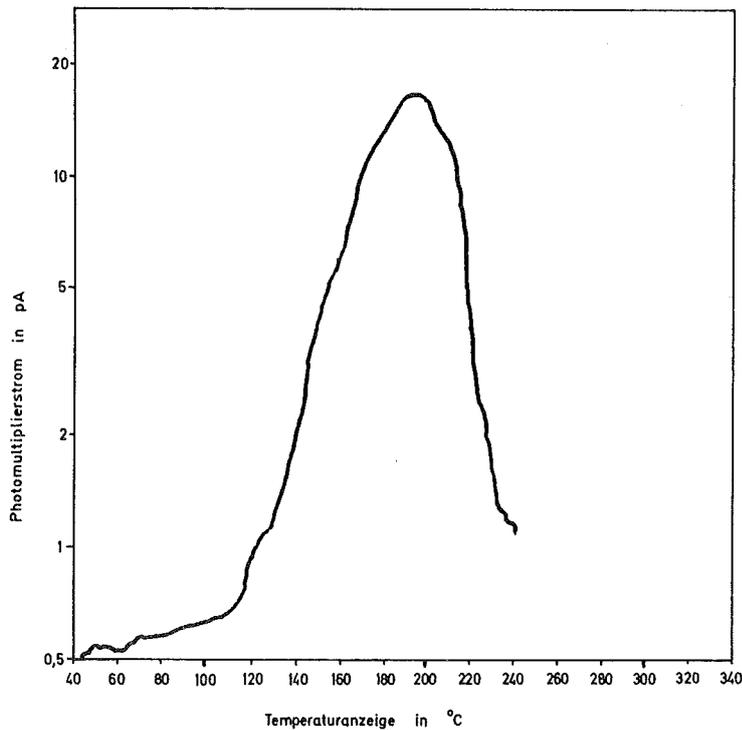


Abb. 2: Glowkurve

blendeten und einem ungestörten Strahlenfeld unterschieden wurde, wurden neben den neuartigen Thermolumineszenzdosimetern eine wandlose und eine dickwandige Ionisationskammer verwendet. Zur Oberflächendosismessung dienten eine Extrapolationskammer und die Dosimeter.

Aufgabe dieser Arbeit ist es, die Eigenschaften dieser 4 Meßverfahren im Hinblick auf eine Oberflächenmessung und eine Dosisleistungsmessung im Strahlenfeld zu untersuchen und zu vergleichen.

## 2. Meßverfahren

### 2.1 Thermolumineszenzdosimeter

Unter Thermolumineszenz (TL) versteht man die Lichtemission bei der Erhitzung eines Festkörpers, in der Dosimetrie Speicherphosphor oder Thermolumineszenzdosimeter (TLD) genannt, nach einer vorangegangenen Anregung. Die Anregung der Kristalle wird durch ionisierende Strahlung, Licht, mechanische Bearbeitung oder chemische Umsetzungen erzeugt, wobei in diesem Zusammenhang nur auf die Ionisierung eingegangen wird. Durch diese Anregung gelangen Elektronen in höhere Energieniveaus, die sie bei der Erhitzung wieder verlassen. Ein Teil der hierbei freiwerdenden Energie wird als Thermolumineszenzlicht emittiert. Dieses Thermolumineszenzlicht dient als Meßsignal für die Energiedosis, die der Speicherphosphor bei der Einwirkung ionisierender Strahlung erhalten hat.

Bei der Untersuchung der TLD wird der Verlauf des Lichtstromes  $L_{TL}$  in Abhängigkeit von der Temperatur, die während des Aufheizvorganges wieder eine Funktion der Zeit ist, in Form einer Glowkurve aufgezeichnet (Abb. 2). Der Meßwert für die Energiedosis  $D_{TL}$  ist dabei die Fläche unter der gesamten Kurve oder als mathematischer Ausdruck

$$D_{TL} = \int_{t_1}^{t_2} L_{TL}(t) \cdot dt$$

wobei  $t_1$  und  $t_2$  den Anfangs- und Endzeitpunkt des Aufheißvorganges bezeichnen.

Für eine weitergehendere Einführung in die Thermolumineszenzdosimetrie sei hier auf Frank/Stolz [3] verwiesen. Die untersuchten TLD sind aus annähernd gewebeäquivalentem LiF in Teflon hergestellt und wurden durch die Firma Teledyne Isotopes bezogen.

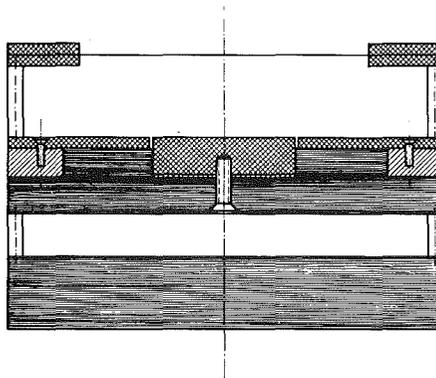
Nach der Bestrahlung wurden die TLD 10 min bei 100°C vor-temperiert, um Kurzzeitfading zu vermeiden, so daß man bei allen gleiche und konstante Anfangsbedingungen erhielt. Die Auswertung wurde mit einem Harshaw Auswertegerät Type 2000 A+B vorgenommen. Das Gerät liefert nur einen Relativwert, nämlich die Lichtmenge in Nanocoulomb. Aus diesem Grund wird jedes TLD mit einer Dosis von 10 R durch eine  $^{137}\text{Cs}$  Quelle kalibriert. Da die Dosisleistung von  $\beta$ -Strahlung in  $\frac{rd}{h}$  angegeben wird, werden die TLD-Werte mit dem Dosisumrechnungsfaktor  $g=0,87 \frac{rd}{R}$  für die Energiedosis in Luft multipliziert.

## 2.2 Ionisationskammermessung

### 2.2.1 Allgemeines

Bei einer Ionisationskammer wird die Ionenladung gemessen, die durch ionisierende Strahlung in einem bestimmten Luftvolumen erzeugt und durch ein elektrisches Feld gesammelt wird. Da der mittlere Energieaufwand für Elektronen zur Bildung eines Ionenpaares in Luft näherungsweise nicht von der Elektronenenergie abhängt (bis herab zu Energien von etwa 0,01 MeV), ist die gemessene Ionenladung der in Luft erzeugten Energiedosis proportional.

Als besonderes meßtechnisches Problem erweist sich dabei die Forderung, daß die Homogenität der Luft durch die Meßanordnung nicht gestört werden darf. Dieser Idealfall wurde auf 2 verschiedene Weisen angenähert.



0 10 20 30 40 mm

LEITENDES TEFLON  
ISOLIERENDES TEFLON  
METALL

Abb. 3: Wandlose Ionisationskammer

1. Bei der Distanzmessung stellt die Kammerwand eine Inhomogenität dar, die durch die Anwendung einer sog. "wandlosen Ionisationskammer" beseitigt werden kann. Bei dieser wird durch das Fehlen der Außenwand gewährleistet, daß sich das Strahlenfeld an einem bestimmten Meßort durch Aufstellung der Kammer nicht wesentlich ändert. Ist der Abstand zwischen Kammer und Strahlenquelle groß gegenüber dem Elektrodenabstand der Kammer, und somit der Dosisleistungsgradient im Kammervolumen vernachlässigbar klein, so spielt die Größe des Kammervolumens keine entscheidende Rolle.
2. Bei der Kontaktmessung an der Quellenoberfläche oder in kleinen Abständen von ihr ist die Dosisleistung zwischen den Elektroden nicht mehr annähernd homogen, so daß bei größeren Kammertiefen durch die Mittelwertbildung der Dosisleistung ein größerer Fehler entsteht. Dieser kann bei der Anwendung einer Extrapolationskammer verhindert werden, mit der man die Dosis aus der Ionenladung in einer Kammer für den Grenzfall des Kammervolumens Null errechnet.

#### 2.2.2 Wandlose Ionisationskammer

Die wandlose Ionisationskammer (WK) wurde nach eigenen Plänen selbst angefertigt. Sie ist in drei parallele Ebenen gegliedert (Abb. 3). Die Frontseite besteht aus zwei aufeinanderliegenden Kunststoffringen, die eine Breite von 2 cm und einen Innendurchmesser von 8 cm aufweisen und zwischen die eine aluminisierte Kunststoffolie mit 12  $\mu$  Dicke als Gegenelektrode gespannt ist. Die mittlere Ebene bilden die Sammelelektrode mit einem Durchmesser von 3,9 cm und der 8 cm breite Schutzring. Beide sind wie die Ringe der Vorderseite aus Teflon gearbeitet, das durch Beimengung von Graphit eine elektrische Leitfähigkeit erhielt.

Der Elektrodenabstand beträgt 23 mm. Die Rückseite, ein Kunststoffsockel, dient als Halterung. Die gesamte Außenwand wurde durch 4 Kunststoffstifte ersetzt, wodurch der feste Zusammenhalt der Kammer weiterhin gewährleistet bleibt.

### 2.2.3 Extrapolationskammer

Die Extrapolationskammer (Exk) wurde von der Firma Physikalisch-Technische Werkstätten Dr. Pchlau, Freiburg/Brsg., geliefert. Ein Schnitt dieser ist in Abb. 4 dargestellt. In einem Metallzylinder ist ein Kolben befestigt, auf den die Sammelelektrode aufgeschraubt wird. Es stehen 5 Elektroden mit 1; 1,5; 2; 3 und 4 cm Durchmesser zur Verfügung. Um die Sammelelektrode ist ebenfalls auf dem Kolben ein Schutzring von 7 cm Durchmesser angeordnet. Elektrode und Schutzring sind beide aus demselben leitenden, annähernd gewebeäquivalenten Kunststoff gefertigt. Als Gegenelektrode dient eine aluminiumbedampfte Kunststofffolie mit einer Dicke von  $12 \mu$ , die auf der einen Stirnfläche aufgesetzt ist. Der Innendurchmesser des Eintrittsfensters beträgt 5,8 cm. Auf der hinteren Stirnfläche ist eine Mikrometerschraube angebracht, mit deren Hilfe sich der Kolben und damit die Sammelelektrode mit Schutzring parallel zur Gegenelektrode verschieben läßt. Der Abstand zwischen den Elektroden kann so zwischen  $\pm 0$  und 25 mm auf 0,01 mm genau variiert werden.

Bei beiden Kammern sind die Sammel- und Gegenelektrode jeweils entgegengesetzt gepolt. Der Schutzring und die Mittelelektrode liegen auf gleichem Potential, wodurch ein homogenes Feld zwischen den Elektroden weitgehend gewährleistet wird. Zur Messung des Ionenstromes diente bei jeder Kammer ein Schwingkondensator-Elektrometer der Firma Keithley. Die Spannung für die Kammer wurde fest auf 100 V eingestellt. Bei Veränderung der Spannung um  $\pm 50$  V blieb der Strom konstant. Es wurde also sicher im Sättigungsbereich gearbeitet. Um den Einfluß der von den  $\beta$ -Teilchen transportierten Ladung zu beseitigen, wurde jeweils der Mittelwert des Stromes bei positiver und negativer Kammerspannung gebildet.

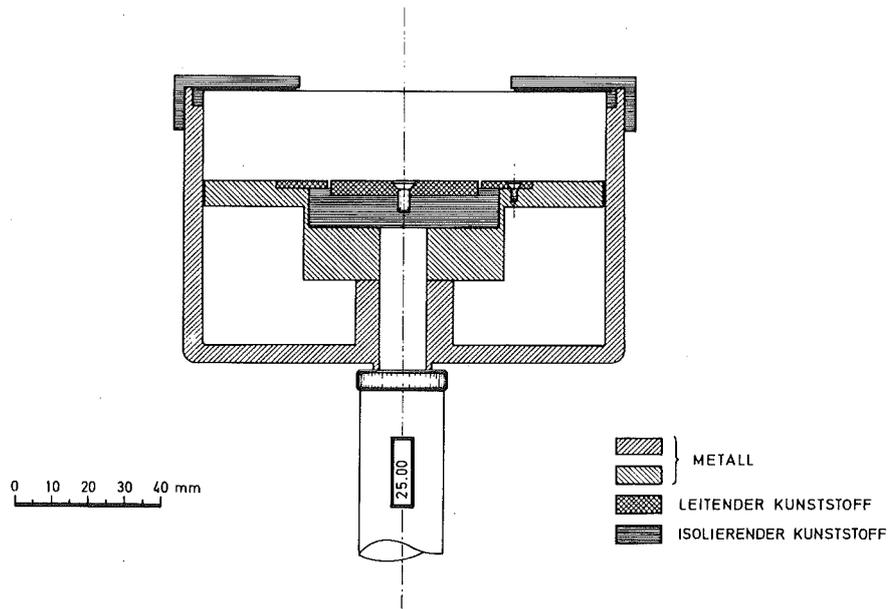
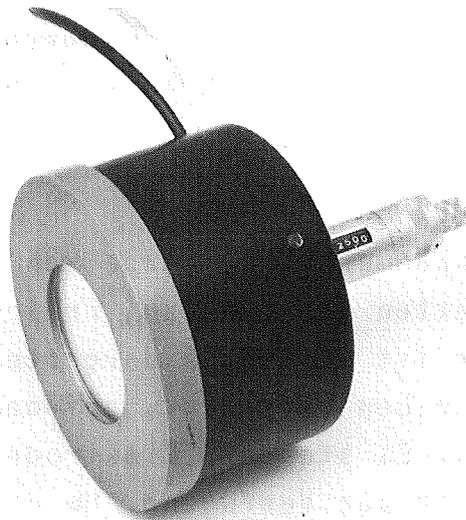


Abb. 4: Extrapolationskammer

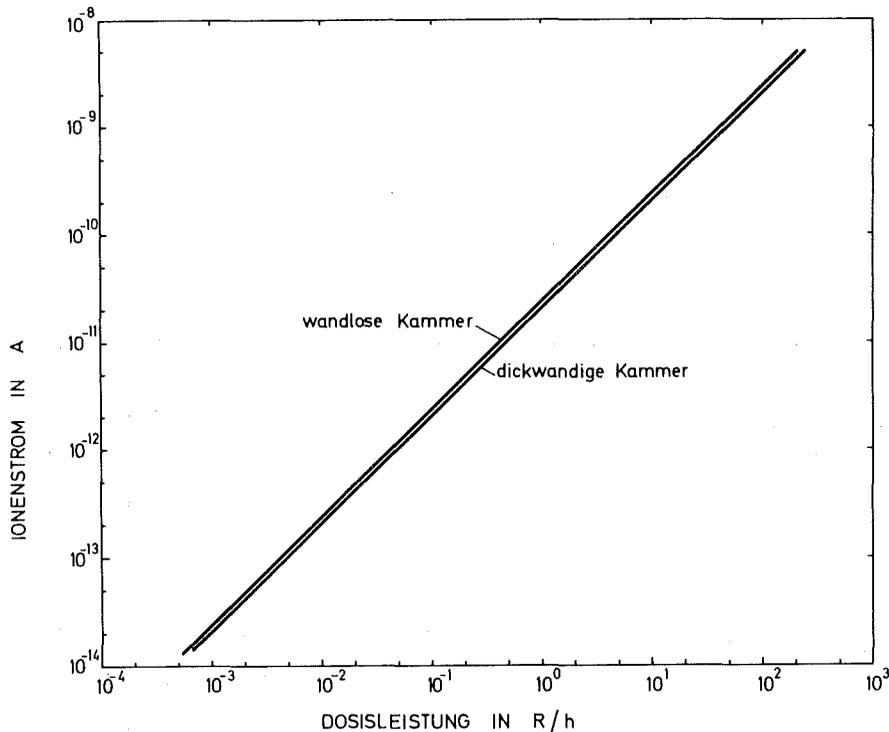


Abb. 5: Kalibrierkurve der wandlosen und dickwandigen Ionisationskammer im  $^{137}\text{Cs}$ -Strahlenfeld

Um einen Vergleich der angezeigten Dosisleistungen der drei Meßverfahren zu ermöglichen, wurde für beide Kammern die Kalibrierkurve im Strahlenfeld einer  $^{137}\text{Cs}$ -Quelle aufgenommen. Dieses wurde mit einer Sekundärkammer ausgemessen, welche bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt kalibriert worden war.

### 3. Meßanordnung

Die Untersuchung wurde mit einer  $^{106}\text{Ru}$ - und einer  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ -Quelle durchgeführt, die beide von der Firma Amersham Buchler bezogen wurden:

#### $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$

Aktivität:	5 mCi
maximale $\beta$ -Energie:	2,26 MeV + 0,55 MeV
Kreisförmige Flächenquelle:	4,8 cm Durchmesser
Abdeckung:	50 mg/cm <sup>2</sup>

$^{106}\text{Ru}$

Aktivität:	10 mCi
maximale $\beta$ -Energie:	3,6 MeV
Rechteckige Flächenquelle:	5 cm x 0,3 cm
Abdeckung:	50 mg/cm <sup>2</sup>

Diese Quellen wurden in folgender Bestrahlungsanordnung benutzt:

1. Freiluftmessung: Darunter ist die Messung in einem Strahlungsfeld zu verstehen, das sich von der Quellenoberfläche ungestört nach allen Seiten hin ausbreiten kann ( $2\pi$  Geometrie) (Abb. 6).
2. Ausgeblendetes Strahlenfeld: Hier wurde parallel zur Quelle und symmetrisch zur Quellenachse in einer Entfernung von 10,5 cm ein 3 cm dicker Kunststoffring angebracht, der einen Innen- bzw. Außendurchmesser von 5,5 cm und 16 cm besitzt. Damit wurde eine teilweise Ausblendung des Strahlenfeldes erreicht.
3. Gebündelter Strahlenkegel: Über die Quelle und den Ring wurde ein Kunststoffzylinder mit einer Wanddicke von 0,8 cm gestülpt, so daß die Strahlung nur noch durch die Öffnung des Ringes austreten konnte (Abb.7). Sieht man von Streuung an der vorderen Innenkante ab, so erhält man einen scharf gebündelten Strahlenkegel mit einem Öffnungswinkel, der bei der  $^{106}\text{Ru}$ -Quelle  $19,5^\circ$  und bei der  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $42^\circ$  beträgt.

4. Ausmessung der Strahlenfelder

4.1 Ortsdosismessung

4.1.1 Bestimmung der Ortsdosis mit wandloser Ionisationskammer

Unter Ortsdosismessung wird die Bestimmung der Dosisleistung in einer Entfernung zwischen 10 cm und 90 cm verstanden. Sie wurde für die 3 Strahlenfeldanordnungen Freiluftmessung, ausgeblendetes Strahlenfeld, gebündelter Strahlenkegel ermittelt. Die Ortsdosis-

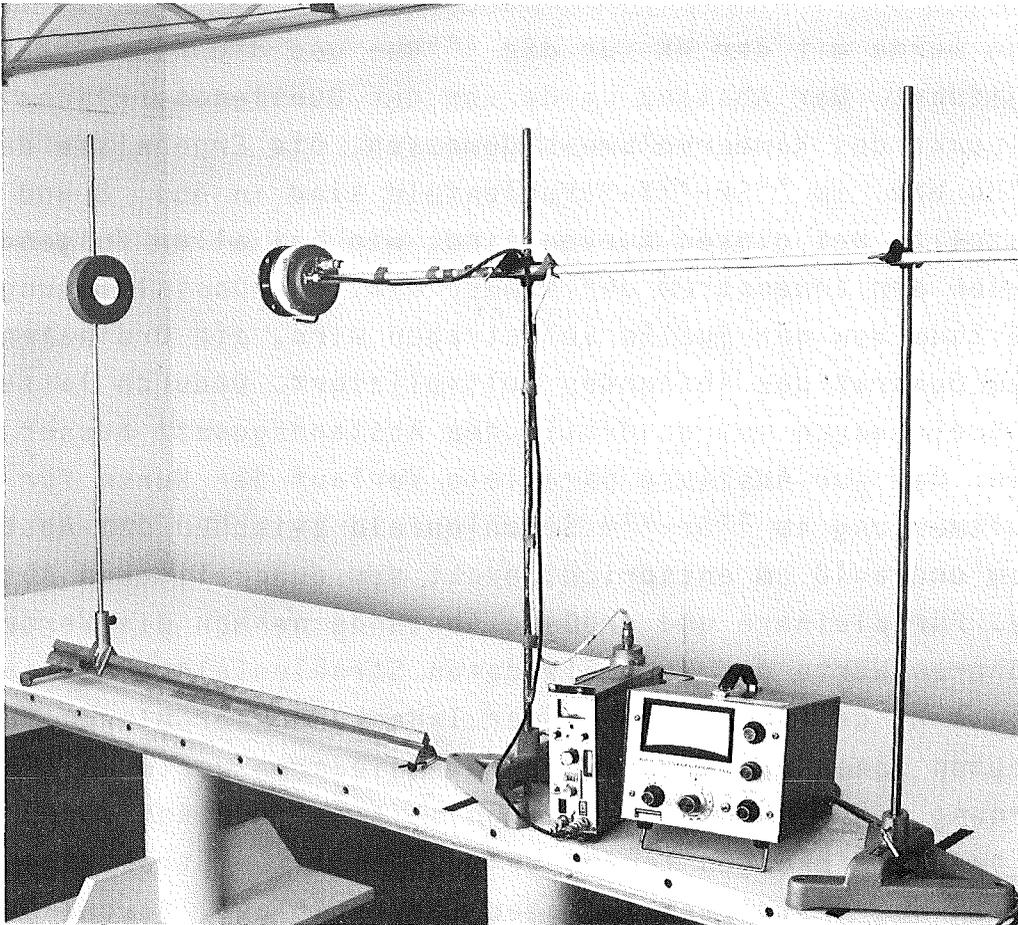


Abb. 6: Meßanordnung für Freiluftmessung

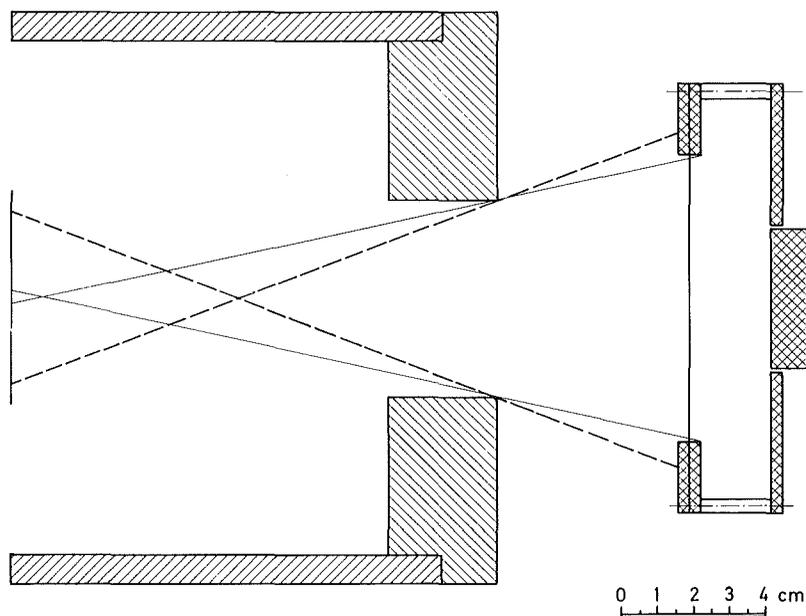


Abb. 7: Meßanordnung bei gebündeltem Strahlenkegel

messung wurde mit der WK für die  $^{106}\text{Ru}$ - und die  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ -Quelle durchgeführt. Der Abstand wurde von der Quellenoberfläche zum Mittelpunkt des Kammervolumens gemessen. Die Ergebnisse der WK im  $^{106}\text{Ru}$  bzw. im  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ -Strahlenfeld sind in Abb. 8 und Abb. 9 dargestellt. Bei diesen Kurven sind, wie bei allen folgenden, bei denen der Ionenstrom der Kammer bzw. die Dosisleistung über dem Abstand von der Quelle aufgetragen wird, die Ordinatenwerte mit dem Quadrat des Abstandes multipliziert. Dadurch lassen sich Abweichungen vom quadratischen Abstandsgesetz besser darstellen. Der zur Abszisse parallele Verlauf der Kurve für die Freiluftmessung im  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  Strahlenfeld zwischen dem Abstand  $a=15$  cm und  $a=40$  cm entspricht exakt dem quadratischen Abstandsgesetz. Für kleinere und größere Abstände nehmen die Werte ab. Die höheren Werte des ausgeblendeten Strahlenfeldes bis zum Abstand  $a=23$  cm können mit an der Innenkante der Blende rückgestreuten Ionen erklärt werden, die niederen Werte in größerer Entfernung mit der Ausblendung von seitlich eingestreuten Ionen. Diese beiden Wirkungen treten beim gebündelten Strahlenkegel durch den übergestülpten Zylinder verstärkt auf. Sowohl beim ausgeblendeten Strahlenfeld als auch beim gebündelten Strahlenkegel ist die Meßwertstreuung für die Abstände größer 50 cm stärker, was auf die schwankende Anzeige des Elektrometers bei diesen geringen Ionenströmen in der Nähe der Nachweisgrenze zurückzuführen ist.

Die Darstellung der  $^{106}\text{Ru}$ -Messungen zeigt einen ähnlichen Verlauf. Bemerkenswert ist nur das stärkere Absinken der  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  Kurven für größere Abstände. Dies kann mit der Absorption des energiearmen  $^{90}\text{Sr}$ -Strahlenanteils interpretiert werden.

Betrachtet man bei der Meßanordnung des gebündelten Strahlenkegels in Abb. 7 die an der Zylinderinnenwand rückgestreute und durch die schmale Blende austretende Strahlung, so könnte man sich die gesamte Anordnung von Strahlenquelle, Zylinder und Blende ersetzt denken durch eine Ersatzstrahlenquelle mit einem zur WK kleineren Abstand. Wählt man für die Ersatzquelle den Abstandspunkt  $a=6$  cm bei der  $^{106}\text{Ru}$ -Quelle und  $a=10,5$  cm bei der  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ -Quelle und trägt den mit dem Quadrat des Ab-

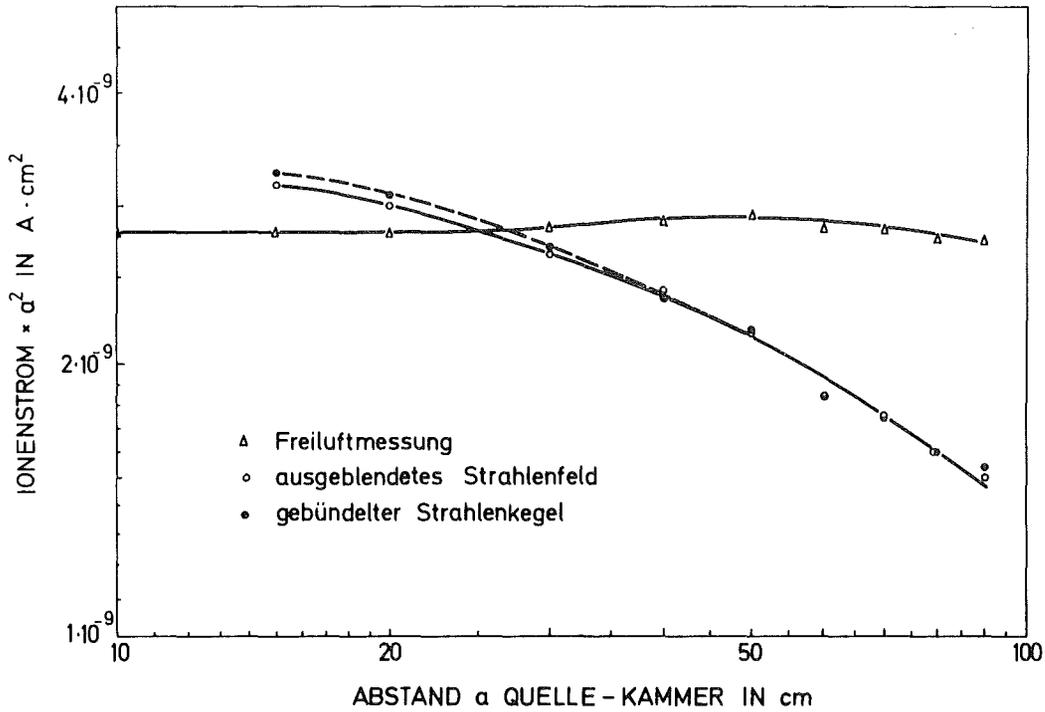


Abb. 8:  $^{106}\text{Ru}$ -Strahlenfeld mit wandloser Ionisationskammer ausgemessen: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierter Ionenstrom in Abhängigkeit vom Abstand Quelle-Kammermittelpunkt

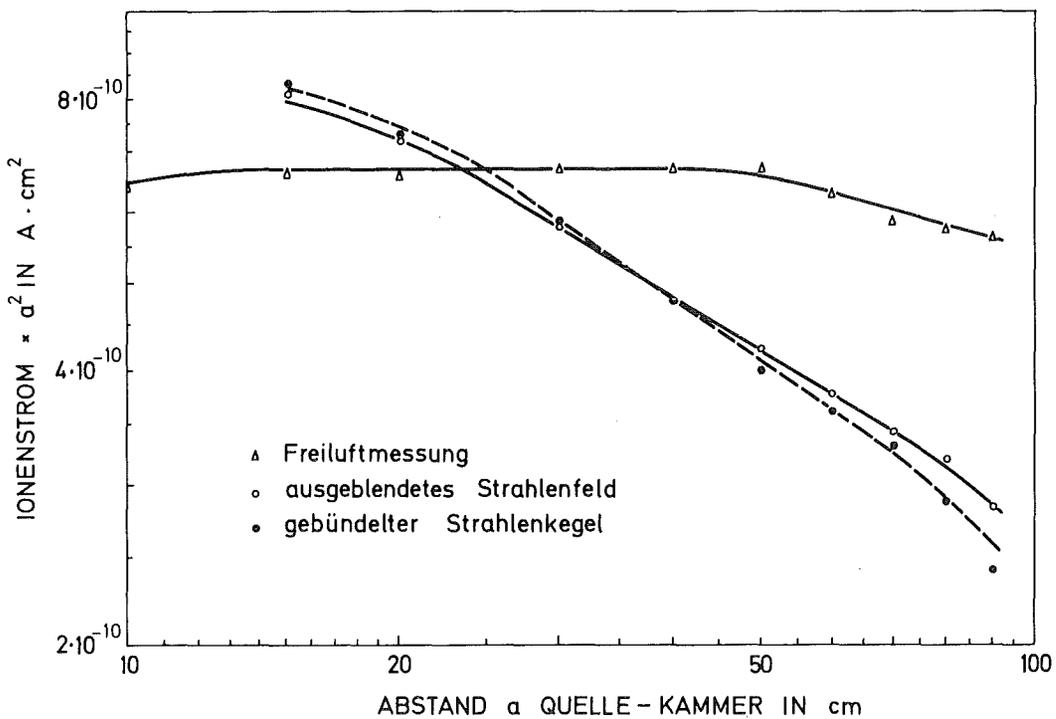


Abb. 9:  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ -Strahlenfeld mit wandloser Ionisationskammer ausgemessen: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierter Ionenstrom in Abhängigkeit vom Abstand Quelle-Kammermittelpunkt

standes multiplizierten Ionenstrom jetzt über dem neuen Abstand  $a_0$  auf, so ergibt sich der Verlauf in Abb. 10.

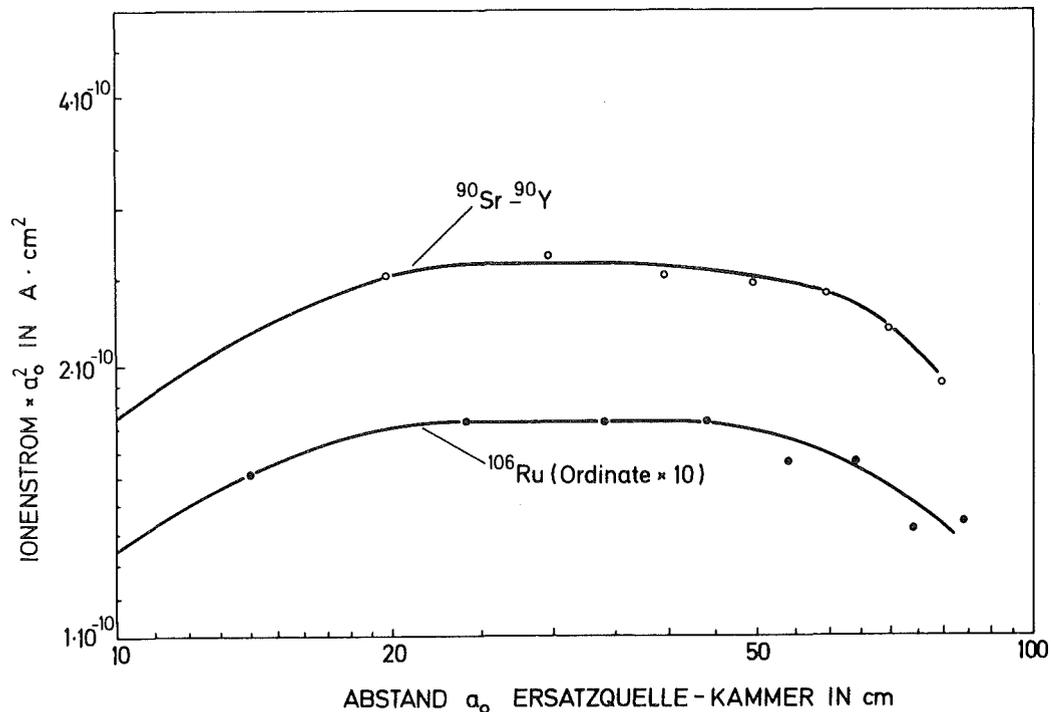


Abb. 10: Gebündelter Strahlenkegel mit wandloser Ionisationskammer ausgemessen: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierter Ionenstrom in Abhängigkeit vom Abstand Ersatzquelle-Kammermittelpunkt

Für den Abstand  $a_0$  zwischen Ersatzstrahlenquelle und Kammermittelpunkt gilt also bei der  $^{106}\text{Ru}$ -Quelle:  $a_0 = (a-6)\text{cm}$   
 $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$  " :  $a_0 = (a-10,5)\text{cm}$

Man erkennt eine ähnliche Form der Kurven wie bei der Freiluftmessung in Abb. 8 bzw. Abb. 9, d.h. eine Gültigkeit des quadratischen Abstandsgesetzes zwischen  $a_0 = 20\text{ cm}$  und  $a_0 = 40\text{ cm}$ . Das Absinken für kleinere und größere Abstände ist hier jedoch wesentlich stärker ausgeprägt.

Die Werte der WK dienten als Referenzwerte für den Vergleich mit den 2 anderen Meßmethoden.

#### 4.1.2 Bestimmung der Ortsdosis mit dickwandiger Ionisationskammer und Thermolumineszenzdosimetern

Um die Größe des Einflusses durch die Kammerwand zu bestimmen, wurde die Messung mit einer Ionisationskammer wiederholt, deren Kammerwand aus Metall eine Dicke von 5 mm aufweist. Dabei wurde mit der Extrapolationskammer gearbeitet, die zu diesem Zweck mit dem gleichen Sammelelektrodendurchmesser und Elektrodenabstand wie die wandlose Kammer versehen wurde. Sie wird hier in diesem Zusammenhang als dickwandige Kammer (DK) bezeichnet. Die Meßergebnisse der DK zeigen Abb. 11 und Abb. 12.

In Abb. 13 und Abb. 14 sind die Kurven der WK und der DK zum Vergleich zusammen aufgezeichnet. Dabei wurde auf die Darstellung der Ergebnisse des ausgeblendeten Strahlenfeldes zur besseren Übersichtlichkeit verzichtet. Sie verdeutlichen die höheren Ionenströme der WK bei der Freiluftmessung. Diese sind auf die Einstreuung der Ionen aus dem Raum zurückzuführen, die durch die Kammerwand der DK verhindert wird. Beim gebündelten Strahlenkegel führt das Fehlen der Wand für kleinere Abstände dagegen zu einer Verringerung des Ionenstromes, da die Anzahl der Ionen, die aus dem Kammervolumen austreten, die Anzahl der seitlich eingestreuten übersteigt.

Bei einem Vergleich der beiden Kammern wird im folgenden nicht von Ionenströmen, sondern von den angezeigten Dosisleistungen ausgegangen.

Mit Hilfe der TLD wurden die einzelnen Strahlenfelder ein drittes Mal ausgemessen.

Aus Zeitgründen und wegen großer Ähnlichkeit der Ergebnisse mit der Anordnung des gebündelten Strahlenkegels wurde auf die Bestimmung des ausgeblendeten Strahlenfeldes mittels TLD verzichtet. Zur Bestimmung der Strahlenfelder wurden die TLD in eine Kunststoffolie mit einem Flächengewicht von  $1,39 \text{ mg/cm}^2$  gesteckt, die an einem Nähfaden in den entsprechenden Entfernungen aufgehängt wurde. Die Ergebnisse der TLD-Messungen

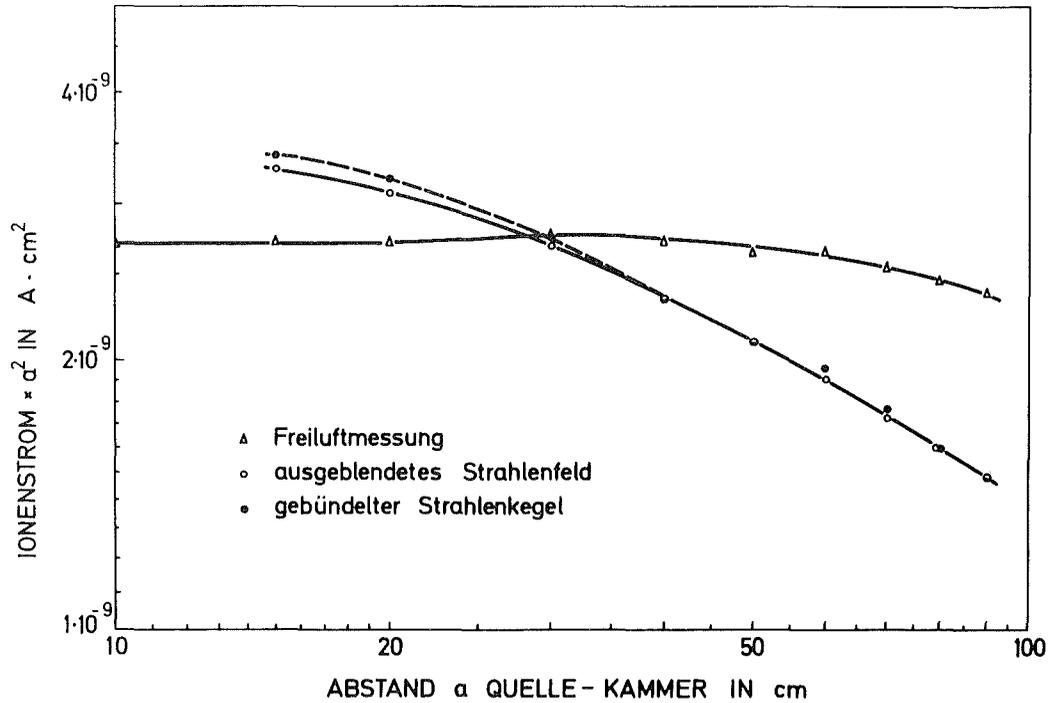


Abb. 11:  $^{106}\text{Ru}$ -Strahlenfeld mit dickwandiger Ionisationskammer ausgemessen: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierter Ionenstrom in Abhängigkeit vom Abstand Quelle-Kammermittelpunkt

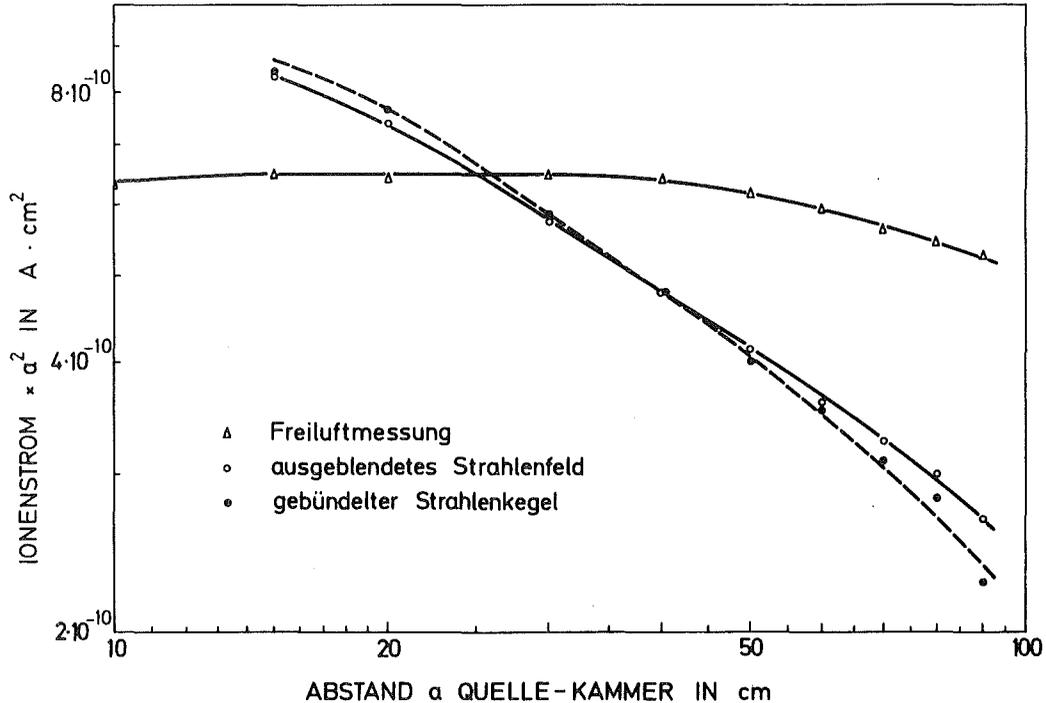


Abb. 12:  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ -Strahlenfeld mit dickwandiger Ionisationskammer ausgemessen: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierter Ionenstrom in Abhängigkeit vom Abstand Quelle-Kammermittelpunkt

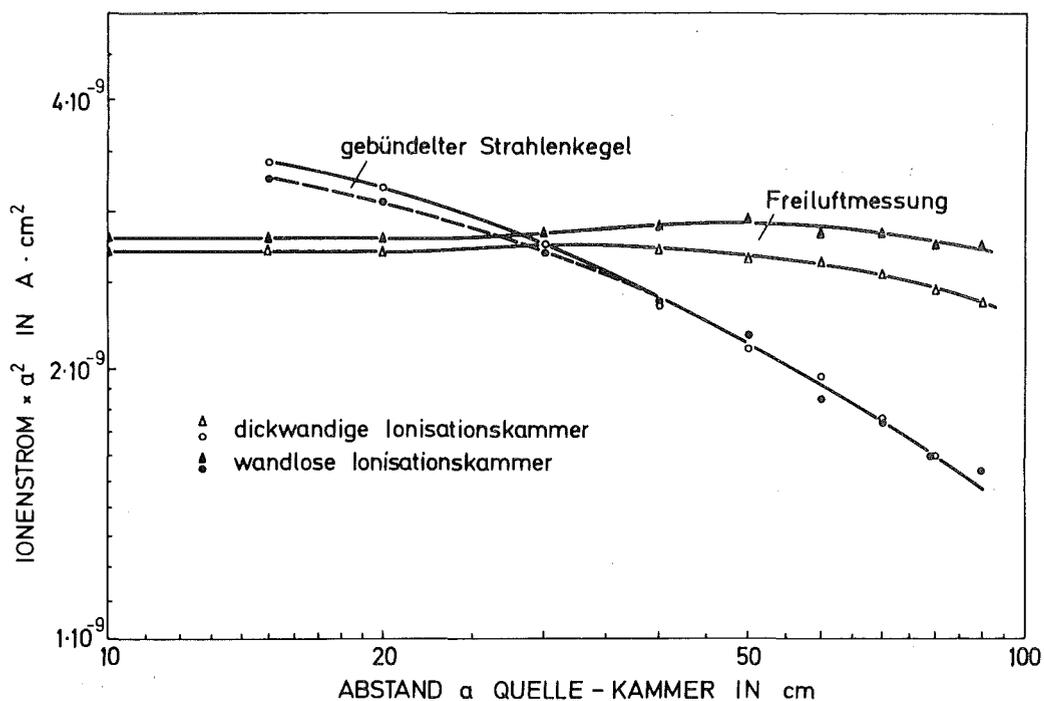


Abb. 13: Vergleich von wandloser und dickwandiger Ionisationskammer im  $^{106}\text{Ru}$ -Strahlenfeld: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierter Ionenstrom in Abhängigkeit vom Abstand Quelle-Kammermittelpunkt

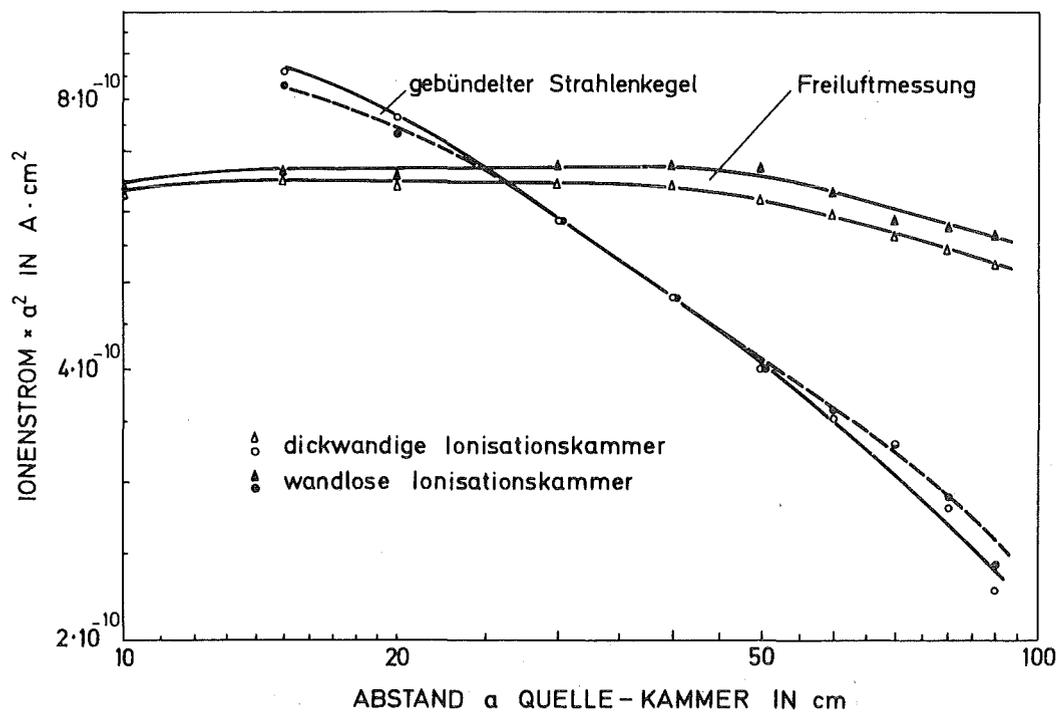


Abb. 14: Vergleich von wandloser und dickwandiger Ionisationskammer im  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ -Strahlenfeld: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierter Ionenstrom in Abhängigkeit vom Abstand Quelle-Kammermittelpunkt

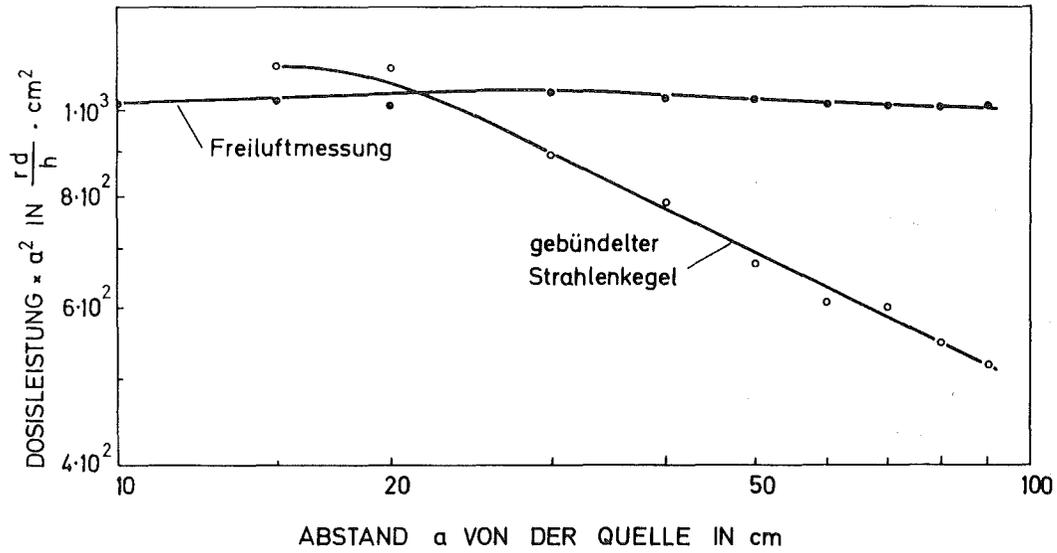


Abb. 15: <sup>106</sup>Ru-Strahlenfeld mit Thermolumineszenzdosimetern ausgemessen: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierte Dosisleistung in Abhängigkeit vom Abstand von der Quelle

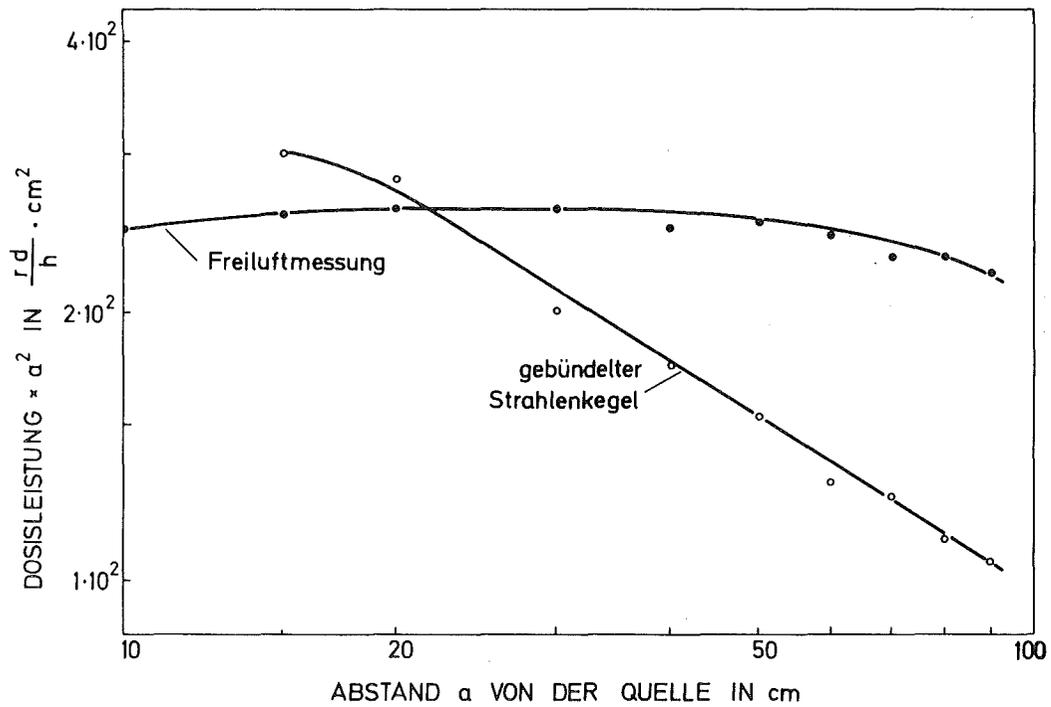


Abb. 16: <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y-Strahlenfeld mit Thermolumineszenzdosimetern ausgemessen: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierte Dosisleistung in Abhängigkeit vom Abstand von der Quelle

sind in Abb. 15 und Abb. 16 dargestellt. Ein Vergleich der Werte der wandlosen und dickwandigen Ionisationskammer, sowie der TLD wird in Abschnitt 6 durchgeführt.

## 4.2. Oberflächendosismessungen

### 4.2.1 Theoretische Grundlagen zur Extrapolation

Unter Oberflächendosismessung wird hier die Ermittlung der Dosis in einer Entfernung bis 10 cm von der Quellenoberfläche verstanden. Sie wurde mit Hilfe einer ExK für die  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ -Quelle durchgeführt und mit den Werten von TLD verglichen.

Die Extrapolationskammermethode wurde zuerst von Failla [4] veröffentlicht und wird dort, wie später auch in verschiedenen anderen Publikationen, von denen nur noch die Arbeiten von Bortner [5] und von Loevinger [6] erwähnt seien, näher erläutert. Auf die theoretischen Grundlagen wird deshalb nur kurz eingegangen.

Die Dosis in Luft errechnet sich nach der Gleichung:

$$D_{\text{Luft}} = \frac{W_{\text{Luft}}}{e} \cdot \frac{\Delta Q}{\rho \cdot \Delta V} \quad (1)$$

in der

$W_{\text{Luft}}$  den mittleren Energieaufwand für Elektronen zur Bildung eines Ionenpaares in Luft

$e$  die elektrische Elementarladung

$\Delta V$  das Luftvolumen, in dem die Ionen gesammelt werden

$\Delta Q$  die in  $\Delta V$  gebildete Ladung

$\rho$  die Luftdichte

bedeuten.

Wird für  $W_{\text{Luft}} = 34 \text{ eV}$  angenommen, so folgt für die Energiedosisleistung in Luft an einem bestimmten Punkt aus (1) nach [7]

$$\dot{D}_{\text{Luft}} \left[ \frac{\text{rad}}{\text{h}} \right] = 1,224 \cdot 10^{10} \frac{J_{\text{ion(o)}}}{\rho \cdot V} \left[ \frac{\text{A}}{\text{g}} \right] \quad (2)$$

$\frac{J_{ion}}{\rho V}$  (o) ist dabei der auf die Luftdichte des Kammervolumens bezogene Ionenstrom beim Elektrodenabstand Null. Diese Größe wird graphisch aus experimentell gefundenen Werten ermittelt.

#### 4.2.2 Extrapolation auf Elektrodenabstand Null

Um eine Beeinflussung des Ionenstromes durch die von den  $\beta$ -Teilchen transportierte Ladung zu vermeiden, wird jeweils der Mittelwert  $J_{ion} = \frac{J_+ - J_-}{2}$  des Stromes bei positiver und negativer Kammer-spannung bestimmt. Dieser Mittelwert wird für die Elektrodenabstände von 10,2 mm in 1 mm Schritten herab bis 1,2 mm gebildet und sodann auf die Luftmasse im jeweiligen Kammervolumen bezogen.

Der Quotient  $\frac{J_{ion}}{\rho \cdot V}$  wird gegen den Elektrodenabstand  $l$  aufgetragen und dann auf den Wert  $\frac{J_{ion}}{\rho \cdot V}$  (o) für  $l=0$  extrapoliert. Dieser Wert stellt den Ionenstrom für den Grenzfall Kammer-volumen Null dar, wodurch Einflüsse des Luftvolumens und der Kammerwand beseitigt sind.

Die bisher beschriebene Durchführung wird für die verschiedenen Sammelelektroden-durchmesser wiederholt, und man erhält  $\frac{J_{ion}}{\rho \cdot V}$  (o;d) für die Durchmesser  $d=1$  bis  $d=4$  (siehe Beschreibung ExK, 2.2.3). Die graphische Darstellung dieser Extrapolation zeigt Abb.17 für den Abstand Quelle-Außenelektrode 11 mm. Zur Erläuterung der Kurvenschar wird zunächst näher auf die theoretischen Grundlagen einer Ionisationskammer eingegangen.

Für den Ionenstrom einer Ionisationskammer gilt folgende Gleichung:

$$J_{ion} = K \cdot V \quad (3)$$

$$\text{mit } V = l \cdot F \quad (4)$$

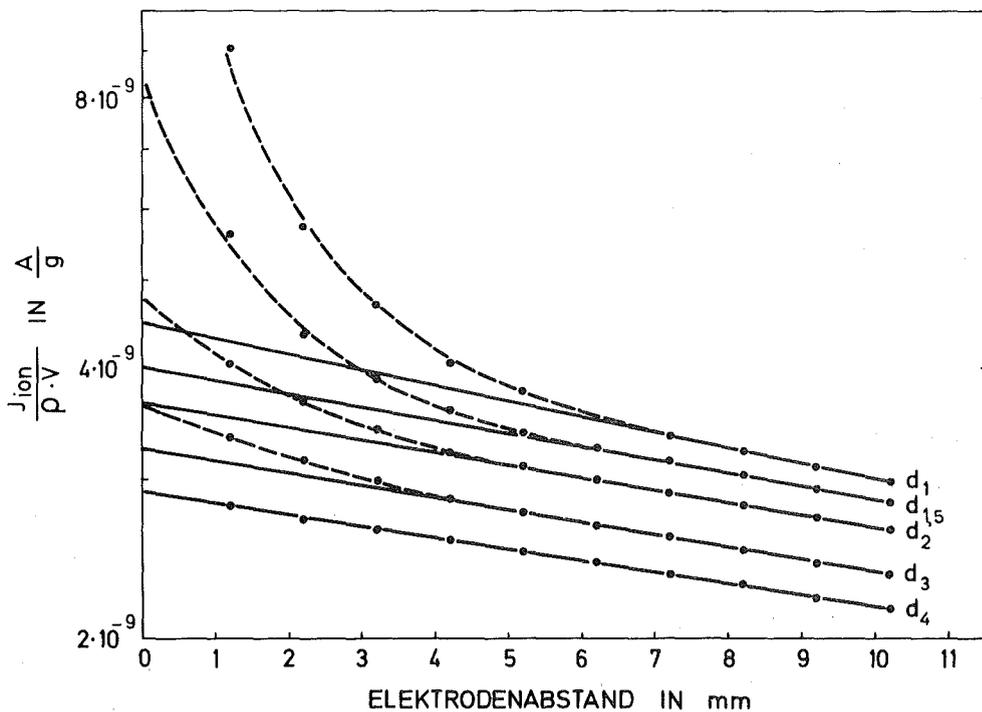


Abb. 17: Extrapolation des auf die Luftdichte des Kammer-  
volumens bezogenen Ionenstroms auf Elektrodenab-  
stand Null mit dem Elektrodendurchmesser  $d$  als  
Parameter

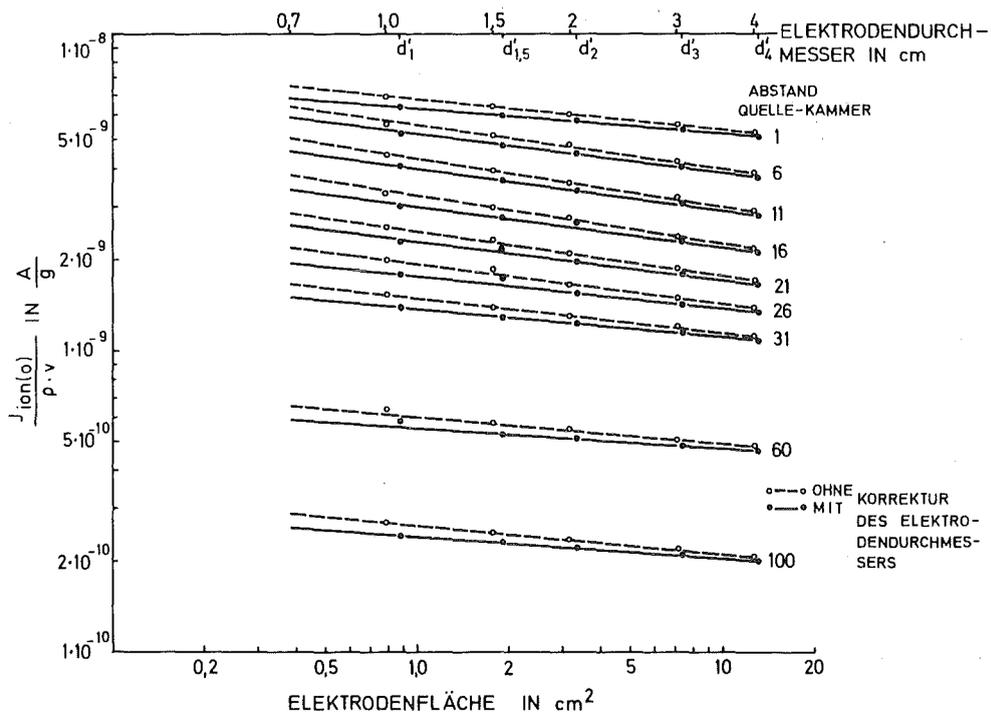


Abb. 18: Extrapolation des auf die Luftdichte des Kammer-  
volumens bezogenen Ionenstroms auf Elektroden-  
durchmesser  $d=0,7$  mit dem Abstand Quelle-Kammer  
als Parameter

wobei

- V das Ionisationsvolumen
- l den Elektrodenabstand
- F die Sammelelektrodenfläche
- K einen Faktor

bezeichnen.

K ist im Idealfall eine Konstante, d.h. bei exakt homogenem Feld zwischen den Elektroden über die gesamte Fläche, vollkommen ebenen und parallelen Elektroden, sowie bei konstanter Luftdichte. Dieser Fall wird mit großen Elektrodenabständen und Elektrodenflächen am besten angenähert.

Mit kleiner werdendem Elektrodenabstand wirken sich Unebenheiten und Randeffekte der Elektrodenflächen, minimale Höhenunterschiede von Sammelelektrode und Schutzring immer störender auf die Homogenität des elektrischen Feldes aus. Damit bleibt K nicht konstant, sondern wird eine Funktion des Abstandes l und man erhält für den auf die Luftdichte des Kammervolumens bezogenen Ionenstrom die Funktion G (l):

$$G(l) = \frac{J_{ion}}{\rho \cdot V} = K(l) \cdot \frac{V}{\rho \cdot V} \quad (5)$$

oder mit (4)

$$G(l) = \frac{1}{\rho} \cdot K(l) \cdot \frac{1}{l} \quad (6)$$

für  $l \neq 0$  wird

$$G(l) = \frac{1}{\rho} \cdot K(l) \quad (7)$$

und für  $l=0$

$$G(l=0) = \lim_{l \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{\rho} \cdot K(l) \cdot \frac{1}{l} \right] \quad (8)$$

Dieser Grenzwert errechnet sich nach der l'Hospitalschen Regel zu

$$G(0) = \frac{1}{\rho} \cdot \left[ K(l) + \frac{dK}{dl} \cdot l \right]_{l=0}$$

$$G(0) = \frac{1}{\rho} \cdot K(0) \quad (8a)$$

Für die Bestimmung von  $G(0)$  ist es also vorteilhaft die Funktion  $K(l)$  zu kennen.

Trägt man  $K(l)$  bzw.  $G(l)$  über  $l$  auf Millimeterpapier auf, so kann man aus der Kurvenform eine e-Funktion vermuten. Als Beweis dieser Annahme können 2 Methoden dienen:

1. Bei der Darstellung von  $G(l)$  über  $l$  auf Einfach-Logarithmenpapier muß sich eine Gerade ergeben.
2. In dem Ansatz  $G(l) = A \cdot e^{-a \cdot l}$  werden  $A$  und  $a$  mit Hilfe zweier Punkte aus der Kurve bestimmt. Die so erhaltene Gleichung  $G(l)$  wird durch Punktprobe der übrigen Werte bewiesen.

Die Annahme einer e-Funktion erwies sich nach Anwendung beider beschriebener Möglichkeiten als richtig, wobei sich allerdings Abweichungen bei den verschiedenen Elektrodendurchmessern ergaben (siehe Abb. 17).

Für  $d_4$  ergibt sich beim Auftragen auf Einfach-Logarithmenpapier ein exakt linearer Verlauf.

Für  $d_3$  weichen die Werte etwa ab  $l=4$  mm von der Geraden ab und zwar umso mehr, je kleiner  $l$  gewählt wird.

Für  $d_2$  bis  $d_1$  verstärkt sich dieser Vorgang, d.h. die Abweichung von der Geraden tritt schon bei immer größeren Elektrodenabständen auf und wird gegen  $l=0$  immer stärker.

Diese Erscheinung kann mit der Inhomogenität des elektrischen Feldes erklärt werden. Die Sammlung der Ionen durch das elektrische Feld wird durch die Inhomogenität an den Rändern verstärkt, wodurch auch  $J_{ion}$  bzw.  $G(l)$  vergrößert wird. Diese

Intensivierung der Sammelwirkung nimmt mit abnehmendem Elektrodendurchmesser und Abstand relativ immer mehr zu, so daß die Kurven immer mehr von einer Geraden abweichen.

#### 4.2.3 Extrapolation auf Elektrodendurchmesser $d=0,7$ cm

Um einen direkten Vergleich der Empfindlichkeit des TLD und der Extrapolationskammer zu gewinnen, wird jetzt  $\frac{J_{ion}}{\rho \cdot V}$  (o,d) über  $d$  aufgetragen und auf den Durchmesser des TLD  $d = 0,7$  cm extrapoliert.

Statt dem wirklichen Elektrodendurchmesser wird jetzt der effektive Durchmesser eingeführt, da infolge des 0,6 mm breiten Spaltes zwischen Sammelelektrode und Schutzring besonders bei kleinem Durchmesser  $\frac{J_{ion}}{\rho \cdot V}$  zu hoch angezeigt wird. Nachdem sich über eine Kapazitäts- und Abstandsbestimmung trotz sorgfältiger Messung keine brauchbaren Werte für die elektrisch wirksame Elektrodenfläche ergaben, wurde für den effektiven Elektrodendurchmesser der um die halbe Spaltbreite vergrößerte wirkliche Elektrodendurchmesser angenommen.

Der gesamte Extrapolationsvorgang, der bisher für den Quelle-Kammer-Abstand 11 mm beschrieben wurde, wurde für 9 verschiedene Abstände vollzogen, nämlich 1; 6; 11; 16; 21; 26; 31; 60; 100 mm. Die Kurvenschar dieser Durchführung zeigt Abb. 18.  $\frac{J_{ion}}{\rho \cdot V}$  (o;d) besitzt einen linearen Verlauf. Es sind sowohl die Geraden ohne als auch mit Korrektur des Elektrodendurchmessers dargestellt.

Eine Erhöhung von  $\frac{J_{ion}}{\rho \cdot V}$  (o;d) mit abnehmendem Elektrodendurchmesser entspricht dabei einer relativen Verringerung der Rückstreuung an der Elektrode, d.h. einer intensiveren Sammelwirkung. Aus den Werten  $\frac{J_{ion}}{\rho \cdot V}$  (0; 0,7) wurde schließlich mit Hilfe der Formel (2) die Oberflächendosis in Luft im jeweiligen Abstand von der Strahlenquelle errechnet.

#### 4.2.4 Bestimmung der Oberflächendosis mit TLD

Die Oberflächendosismessung wurde unter gleichen Bedingungen mit TLD wiederholt. Die Quelle wurde wie bei der Exk-Messung direkt auf den Tisch gesetzt. Die TLD wurden in den abgeschraubten, mit einer Kunststoffolie (Flächendichte:  $1,39 \text{ mg/cm}^2$ ) bespannten Fensterring der Exk gelegt, um die gleiche Rückstreuung zwischen Kammer und Tischoberfläche zu erhalten (Abb. 19).

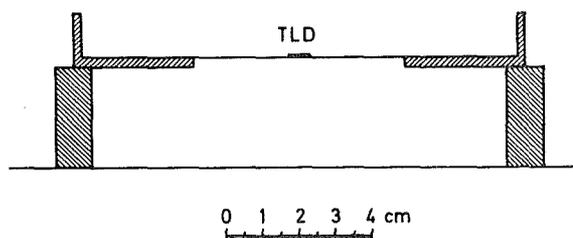


Abb. 19: Bestrahlungsanordnung der Thermolumineszenzdosimeter bei der Oberflächendosismessung

Der Abstand zur Quelle wurde, wie bei der Exk-Methode, durch kleine Kunststoffklötze eingestellt.

Abb. 20 zeigt den Vergleich der TLD- und der Extrapolationskammerwerte.

Da das quadratische Abstandsgesetz für eine Punktquelle gilt, werden die mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierten Werte bei einer Flächenquelle mit abnehmendem Abstand aus geometrischen Gründen immer kleiner. Sie wurden deshalb für die Abstände unterhalb 10 cm mit Hilfe des Faktors  $f_F$  auf eine Punktquelle umgerechnet. Der Faktor wurde von Dietze u.a. [8] abgeleitet und ergibt sich für verschiedene Abstände aus

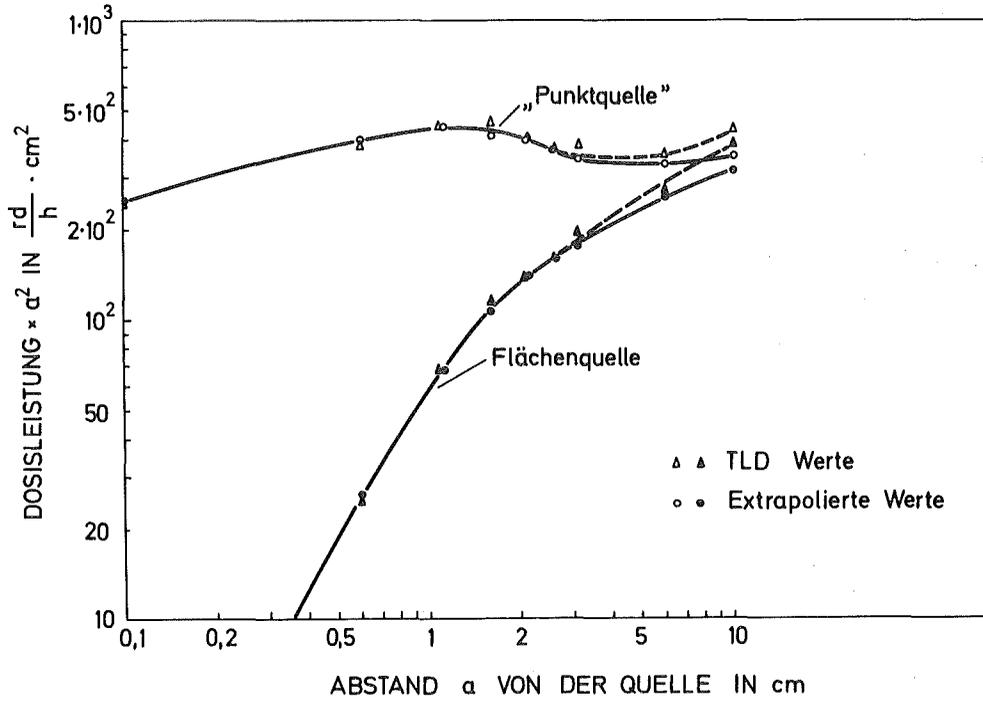


Abb. 20: Vergleich der Oberflächendosismessung mit der Extrapolationskammer und der Thermolumineszenzdosimeter: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierte Dosisleistung in Abhängigkeit vom Abstand von der Quelle

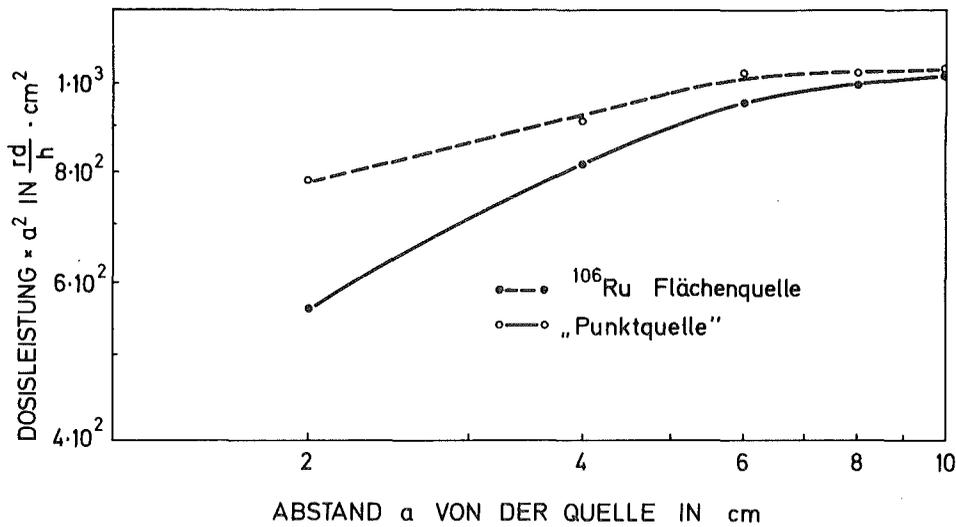


Abb. 21: Oberflächendosismessung einer  $^{106}Ru$ -Quelle mit Thermolumineszenzdosimeter: mit dem Quadrat des Abstandes multiplizierte Dosisleistung in Abhängigkeit vom Abstand von der Quelle

$$f_F = \frac{a^2}{R_1^2} \ln \left[ \frac{\left(\frac{R_1}{a}\right)^2 + 1 + \sqrt{\left(\frac{R_1}{a}\right)^4 + 1 + 2 \cdot \left(\frac{R_1}{a}\right)^2}}{2} \right]$$

wobei

$R_1$  den Radius der Flächenquelle

$a$  den Abstand von der Quellenoberfläche

bezeichnen.

Die mit  $f_F$  korrigierten Dosisleistungen sind ebenfalls in Abb. 20 aufgetragen. Man erkennt eine sehr gute Übereinstimmung der TLD- und Extrapolationsergebnisse bis zu einem Abstand von 3 cm. Bis zum Abstand 10 cm vergrößert sich der Unterschied beider Werte immer mehr und beträgt dort 19 %.

Für die  $^{106}\text{Ru}$ -Quelle konnte wegen ihrer Streifenform keine zufriedenstellende Extrapolation erwartet werden. Bei ihr wurde die Oberflächendosismessung deshalb nur mit TLD bis zu einem Abstand von 2 cm durchgeführt. Diese wurde allerdings in einer Freiluftmessung bestimmt.

Die  $^{106}\text{Ru}$ -Oberflächendosiswerte sind in Abb. 21 dargestellt. Auch sie wurden mit dem Faktor  $f_s$  von einer Streifenquelle auf eine Punktquelle umgerechnet.  $f_s$  ist der Arbeit von Piesch/Sayed [9] entnommen und kann bestimmt werden aus

$$f_s = \frac{2a}{s} \cdot \arctan \frac{s}{2a}$$

mit

$s$  Länge der Quelle

$a$  Abstand von der Quelle

## 5. Fehlerabschätzung

### 5.1 Bei allen Meßmethoden

a) Störung des ursprünglichen Strahlenfeldes am Meßort durch das Aufstellen des Meßgerätes. Diese kann beim TLD vernachlässigt werden, bei der Extrapolation wird sie annähernd beseitigt. Bei der DK wird hierdurch die Messung beeinträchtigt, was zu der Differenz der Werte gegenüber der WK führt, bei der keine Wandeffekte auftreten.

### b) Ungenaue Abstandbestimmung

Bei der Freiluftmessung kann mit einem absoluten Fehler von  $\pm 1$  mm bzw. einem prozentualen Fehler kleiner  $\pm 1$  % für Abstände größer 10 cm gerechnet werden. Bei der Dosisleistungsbestimmung im gebündelten Strahlenkegel vergrößert sich die Ungenauigkeit, da der Abstand auf der optischen Bank eingestellt wurde, und sich die Quellenanordnung infolge des schweren Zylinders leicht verschiebt. Der systematische Fehler kann hier bis zu 4 mm betragen, der maximale prozentuale Fehler ist kleiner 3 %. Bei der Oberflächendosismessung konnte der Abstand etwa auf  $\pm 0,1$  mm bestimmt werden, was einen maximalen relativen Fehler von  $\pm 2$  % bei 6 mm Abstand ergibt.

### c) Rückstreuung an den Wänden des Raumes

Die Freiluftmessung mit den Kammern wurde zunächst in einer Halle durchgeführt. Die Meßanordnung wurde auf 1,60 m hohen Stativen befestigt und war von der Decke und den Wänden 3 m entfernt. Es konnte dabei eine Beeinflussung der Messung durch Rückstreuung der Strahlen an den Wänden nahezu ausgeschlossen werden.

Die Messung wurde dann unter gleichen Bedingungen in einem Raum wiederholt, bei dem um die Meßanordnung nach allen Seiten hin mindestens 1 m Raum vorhanden war.

Ein Unterschied der Meßergebnisse konnte dabei nicht festgestellt werden. Sämtliche Messungen, die dieser Arbeit zu Grunde liegen, wurden in diesem Raum durchgeführt.

## 5.2 Bei der TLD-Messung

Bei den Messungen wurden 17 TLD benützt. Diese wurden insgesamt acht mal mit den beiden Quellen bestrahlt und ausgewertet. Nach jeder Auswertung wurden sie zusätzlich im Strahlenfeld einer  $^{137}\text{Cs}$ -Quelle mit 10 R kalibriert. Die Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichungen dieser Kalibrierbestrahlungen vom Mittelwert der Einzeldosimeter sind in Abb. 22 dargestellt. Diese sind auf Ablese- und Einstellfehler am TLD-Auswertegerät und auf eine Änderung der Dosimeterempfindlichkeit bei Wiederverwendung zurückzuführen. Der  $2\sigma$ -Wert beträgt etwa  $\pm 7\%$ . Die Dosimeterempfindlichkeit wurde bei den verschiedenen Messungen jeweils mit der nachfolgenden  $^{137}\text{Cs}$ -Kalibrierung bestimmt.

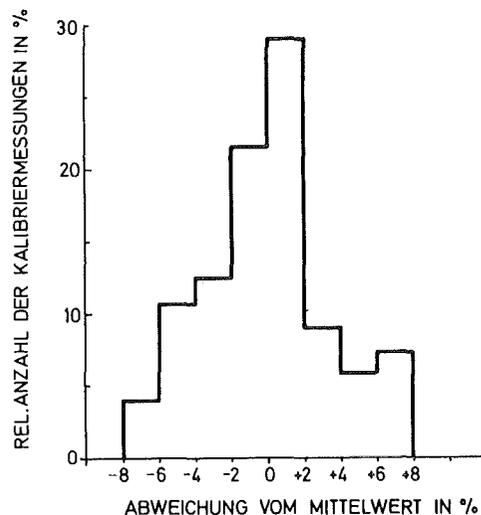


Abb. 22: Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichungen der Kalibrierbestrahlungen vom Mittelwert der Einzeldosimeter

## 5.3 Bei der Ionisationskammermessung

### a) Änderung der Luftdichte

Die Luftdichte beeinflusst die Ionisierung der Luft durch die Strahlung und damit die Größe der gemessenen Dosis.

Die Luftdichte ergibt sich aus:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p}{760} \cdot \frac{273}{T}$$

wobei

$T$  [°K] die bei der Messung herrschende Temperatur

$p$  [mmHg] den Luftdruck

$\rho_0 = 1,293 \text{ mg/cm}^3$  die Luftdichte bei 0°C und 760 mm Hg bedeuten.

Der relative Fehler der Luftdichte errechnet sich dann als

$$\left| \frac{\delta \rho}{\rho} \right| = \left| \frac{\delta p}{p} \right| + \left| \frac{\delta T}{T} \right|$$

Im Zeitraum der Messungen schwankte die Temperatur um  $\pm 1^\circ\text{C}$ , der Luftdruck um  $\pm 10$  Torr. Mit diesen Werten ergibt sich eine Änderung des Luftdrucks um  $\pm 2\%$ , was einem Fehler der Dosisleistung von  $\pm 2\%$  entspricht.

b) Änderung des Feuchtigkeitsgehaltes der Luft

Der Feuchtigkeitsgehalt der Luft beeinflusst sowohl die Luftdichte als auch den Energieabsorptionskoeffizienten. Der Gesamtfehler liegt jedoch bei den niederen  $\beta$ -Energien unterhalb  $5^\circ/\circ$  und wird deshalb vernachlässigt.

#### 5.4 Bei der Strommessung

a) Störung durch elektrostatische und elektromagnetische Felder. Eine vollständige Abschirmung der Meßanordnung ist nicht möglich

b) Kapazitätsänderung der Meßschaltung durch geringe Erschütterungen der Meßanordnung.

Zur Vermeidung von Vibrationen wurden die Meßleitungen auf dem Tisch mit Klebeband befestigt und der Meßkopf auf eine Schaumstoffunterlage gesetzt. Trotzdem können minimale Erschütterungen nicht ausgeschlossen werden.

- c) Änderung der Anzeige infolge der hohen Zeitkonstanten. Der hohe Eingangswiderstand von  $10^{10}\Omega$  führt zu einer großen Zeitkonstanten, die ein relativ langsames Ansteigen der Anzeige bewirkt.
- d) Ablesefehler
- e) Nullpunkteinstellfehler

Bei mehrmaligem Wiederholen einer Strommessung ergeben sich Abweichungen von maximal  $\pm 5\%$  vom Mittelwert, die auf die obengenannten 5 Fehler zurückzuführen sind. Vor allem bei sehr kleinen Strommessungen in der Nähe der Nachweisgrenze schwankt die Anzeige infolge der Punkte (a) und (b) ziemlich stark, was zu einer relativ hohen Ungenauigkeit führt.

#### 5.5 Bei der Extrapolation

- a) Ungenaue Elektrodenabstandsbestimmung  
Der Elektrodenabstand wurde mit Hilfe einer Mikrometerschraube eingestellt. Der Nullpunkt wurde bei Berührung beider Elektroden mit einer Genauigkeit von etwa  $\pm 0,1$  mm festgelegt, was beim kleinsten eingestellten Abstand von 1,2 mm einen Fehler von  $\pm 8\%$  ergibt. Dieser Fehler wird aber durch die Extrapolation, bei der in erster Linie mit den Werten größerer Abstände gerechnet wird, auf etwa  $\pm 2\%$  verringert.
- b) Ungenaue Elektrodendurchmesserbestimmung  
Der effektive Elektrodendurchmesser ist größer als der wirkliche, da teilweise auch Ionen durch die Elektrode gesammelt werden, die sich in dem Spalt zwischen dem Elektroden- und dem Schutzringvolumen befinden. Da der

effektive Elektrodendurchmesser nicht genau bestimmt werden konnte, wurde er mit dem um die halbe Spaltbreite vergrößerten wahren Elektrodendurchmesser angenähert. Schließt man bei dieser Überlegung eine Unsicherheit von  $\pm 0,05$  mm ein, so ergibt dies einen Fehler von  $\pm 1$  % beim kleinsten Elektrodendurchmesser.

Für das Meßvolumen  $V$  gilt:

$$V = l \cdot \pi r^2$$

Der relative Fehler bei der Volumenbestimmung beträgt dann:

$$\left| \frac{\delta V}{V} \right| = \left| \frac{\delta l}{l} \right| + 2 \cdot \left| \frac{\delta r}{r} \right|$$

und man erhält

$$\left| \frac{\delta V}{V} \right| \leq 4 \%$$

c) Rückstreuung zwischen Tisch und Kammer

Zwischen Tisch und Kammer tritt eine Rückstreuung auf, die eine Erhöhung gegenüber der Freiluftmessung um  $+ 20$  % ergibt. Bei praktischen Messungen liegen aber die  $\beta$ -Quellen auch nicht trägerfrei vor, so daß dieser Fehler bei einer Oberflächendosisleistungsmessung nicht ins Gewicht fällt.

## 5.6 Gesamtfehler

Man erhält damit für die einzelnen Meßverfahren folgende Gesamtfehler für die Dosisleistungsbestimmung:

Thermolumineszenzdosimeter	8 %
dickwandige und wandlose Ionisationskammer	7 %
Extrapolationskammer	11 %

Zu diesen Werten addiert sich noch der Dosisleistungsfehler durch eine ungenaue Abstandsbestimmung. Dieser ändert sich mit dem Abstand und kann nicht allgemein angegeben werden.

## 6. Diskussion der Ergebnisse

### 6.1 Dosisleistungsmessung im Strahlenfeld

Bei der Dosisleistungsmessung im  $\beta$ -Strahlenfeld sind dünnwandige bzw. wandlose Weichstrahlkammern am gebräuchlichsten und liefern die bisher besten Werte. Deshalb erfolgt eine Untersuchung der Meßergebnisse der 3 Verfahren, wobei auf die Ergebnisse der WK bezogen wird. In Abb. 23 sind die mit der DK gemessenen Dosisleistungen auf die Werte der WK bezogen. Der Unterschied beim gebündelten Strahlenkegel beträgt bei der  $^{106}\text{Ru}$ -Quelle bis zu 15 %, bei der  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ -Quelle bis zu 17 % bzw. bei der Freiluftmessung 9 % und 13 %. Diese Differenzen sind auf die Störung des Strahlenfeldes durch die Kammerwand zurückzuführen. Ionen, die bei der WK das Kammervolumen durchdringen, werden bei der DK durch die Wand in der Kammer zurückgestreut, wodurch eine zu hohe Dosis angezeigt wird. Für größere Abstände nimmt das Verhältnis leicht ab, da sich hier ein anderer Effekt überlagert. Aus dem Raum rückgestreute Ionen gelangen bei der WK ins Meßvolumen, was durch die Wand verhindert wird. Daß die unterschiedlichen Meßwerte größten Teils auf die Kammerwand zurückzuführen sind und nicht auf andere konstruktive Unterschiede der Kammern, konnte durch Anbringen einer provisorischen 0,8 cm dicken Wand aus Kunststoff gezeigt werden. Die Ergebnisse der beiden Kammern näherten sich dabei bis auf 2 %. Die ungleichen Nachweisverhältnisse der beiden Quellen sind offensichtlich auf die unterschiedliche Energieverteilung und eventuell auf die verschiedene Geometrie der Quellen zurückzuführen. Der Grund für die größere Streuung der Werte beim gebündelten Strahlenkegel ist bei der ungenaueren Abstandbestimmung zu suchen (siehe Abschnitt 5.2).

Das Dosisverhältnis TLD/WK ist in Abb. 24 aufgetragen. Im  $^{106}\text{Ru}$ -Strahlenfeld erhalten wir bei der Freiluftmessung -1 %, beim gebündelten Strahlenkegel -7 % Abweichung. Im  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ -Strahlenfeld liegen diese Werte bei maximal 7 % bzw. 3 %.

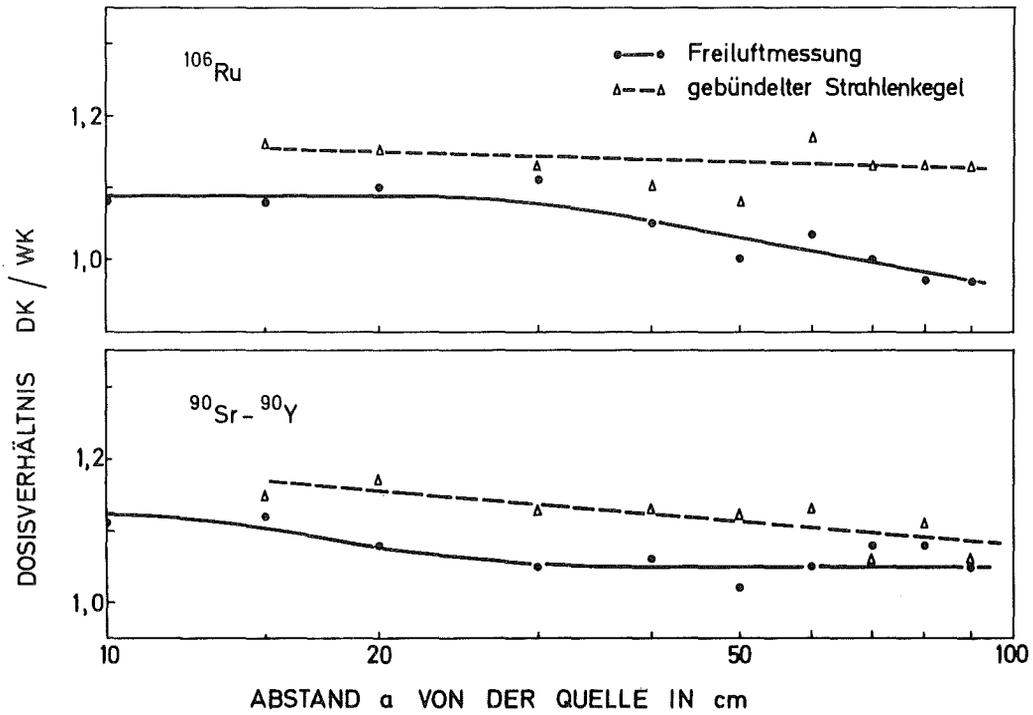


Abb. 23: Mit dickwandiger Ionisationskammer gemessene Dosisleistung bezogen auf die Werte der wandlosen Ionisationskammer in Abhängigkeit vom Abstand Quelle-Kammermittelpunkt

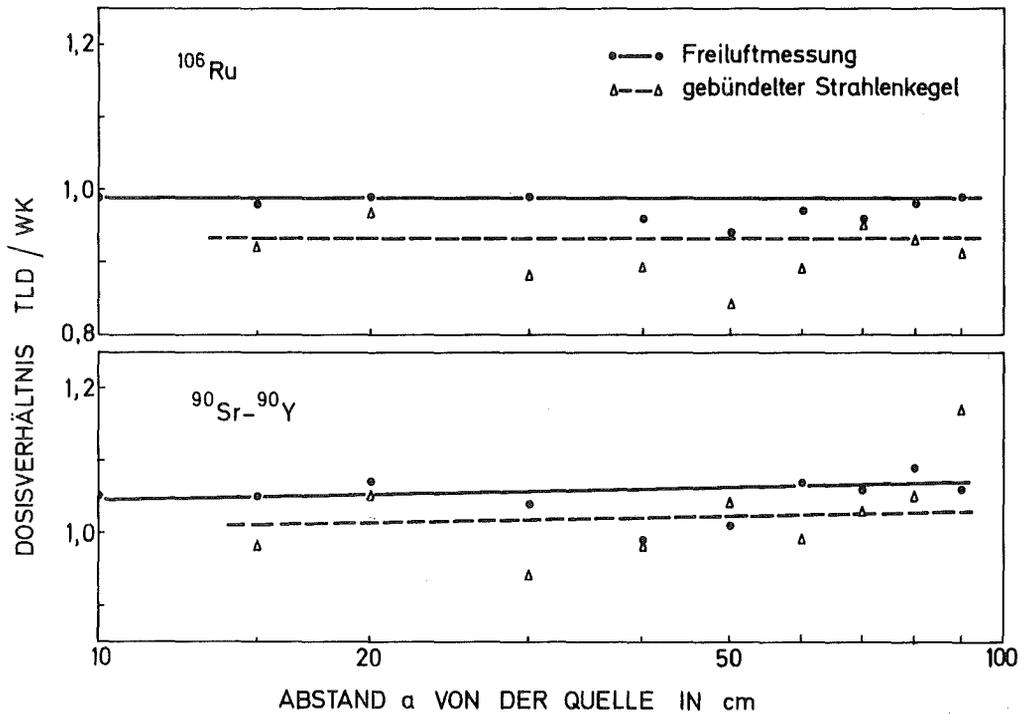


Abb. 24: Mit TLD gemessene Dosisleistung bezogen auf die Werte der wandlosen Ionisationskammer in Abhängigkeit vom Abstand von der Quelle.

Das Verhältnis TLD/WK ist für die  $^{106}\text{Ru}$ -Quelle kleiner, da infolge ihrer höheren Energie an der WK eine größere Rückstreuung auftritt als bei der  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ -Quelle. Dieser Einfluß ist bei einer TLD-Sonde die das Strahlenfeld weniger verändert, nicht vorhanden.

Zur Dosisleistungsmessung im  $\beta$ -Strahlenfeld können diese TLD also sehr gut angewendet werden, während eine DK weniger geeignet ist. Eine Extrapolationskammer würde gute Ergebnisse liefern, kann aber wegen der aufwendigen Meßmethode zur Dosisleistungsmessung im  $\beta$ -Strahlenfeld nicht benutzt werden.

## 6.2 Oberflächendosismessung

Wie Abb. 20 zeigt, haben wir bei der Oberflächendosismessung eine gute Übereinstimmung der TLD- und der Extrapolationswerte bis herauf zu einem Abstand von 3 cm mit einem maximalen Fehler von 4 %. Die Differenz der Meßergebnisse vergrößert sich dann mit steigendem Abstand immer mehr und beträgt bei 10 cm 19 %. Bedingt durch die Veränderung der Bestrahlungsgometrie in den kleinen Entfernungen und durch die verschiedene Geometrie der Detektoren sind diese Abweichungen nicht befriedigend zu erklären.

Zur Oberflächendosismessung von  $\beta$ -Quellen sind diese TLD bis zu einem Abstand von etwa 3 cm sehr gut geeignet, bis zu einem Abstand von 10 cm zeigen sie im Vergleich zur Exk Abweichungen.

Bei den auf eine Punktquelle korrigierten Werten fällt auf, daß für beide Quellen bei kleinen Abständen etwa unterhalb 6 cm trotz Umrechnung auf eine Punktquelle kein quadratisches Abstandsgesetz vorhanden ist. Die Ermittlung der Dosis im Strahlungsfeld und eine Extrapolation der Dosis mit Hilfe des quadratischen Abstandsgesetzes auf eine Oberflächendosis bringt deshalb für kleine Entfernung falsche Ergebnisse. Die Bestimmung der Oberflächendosis sollte deshalb im gewünschten Abstand direkt erfolgen.

In diesen kleinen Entfernungen macht sich außerdem bei der Dosimetermessung eine geringe Abstandsänderung parallel oder senkrecht zur Quelle sehr stark bemerkbar, während eine Ionisationskammer die Dosisleistung über eine größere Fläche mittelt. Eine Oberflächendosismessung mit TLD bietet den Vorteil, daß mehrere Dosimeter bestrahlt und daraus die örtliche Dosisverteilung werden kann.

## 7. Literatur

- [1] H.K. Pendurkar u.a.:  
Energy response of certain thermoluminescent dosimeters  
and their application to the dose measurements  
Risö Report No 249, Teil III, 1089
  
- [2] M. Heinzelmann:  
Versuche zur  $\beta$ -Dosimetrie mit Dosimetern aus LiF in  
Teflon, in:  
JÜL-603-ST, August 1969, S. 187
  
- [3] M. Frank, W. Stolz:  
Festkörperdosimetrie ionisierender Strahlung  
Verlag Chemie GmbH, Weinheim/Bergstr.
  
- [4] Failla:  
The measurement of tissue dose in terms of the same  
unit for all ionizing radiations.  
Radiology 29, 202 (1937)
  
- [5] T.E. Bortner:  
Extrapolation chamber: construction and use Nucleonics,  
40 Sept. 1951
  
- [6] R. Loevinger:  
Extrapolation chamber for the measurement of beta sources  
Rev. Sci. Inst. 24, 907 (1953)
  
- [7] D. Herrmann:  
Vergleich von Eichverfahren für  $\beta$ -Dosimeter  
Nukleonik, 8. Bd, Heft 6, 320, 1966
  
- [8] G. Dietze, u.a.:  
Untersuchung an der  $^{238}\text{Pu}$ -Quelle einer Thermo-nuklidbatterie  
für Herzschrittmacher  
Bericht ND-6 der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt  
(Februar 1974)

- [9] E. Piesch, A.M. Sayed:  
Depth dose distribution measurements and attenuation  
for a  $^{252}\text{Cf}$  source  
Proc. Int. Symp. Neutron dosimetry, Neuherberg, 1974