

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

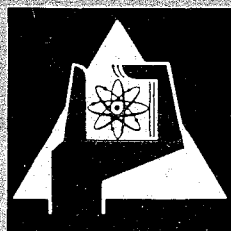
Mai 1967

KFK 645

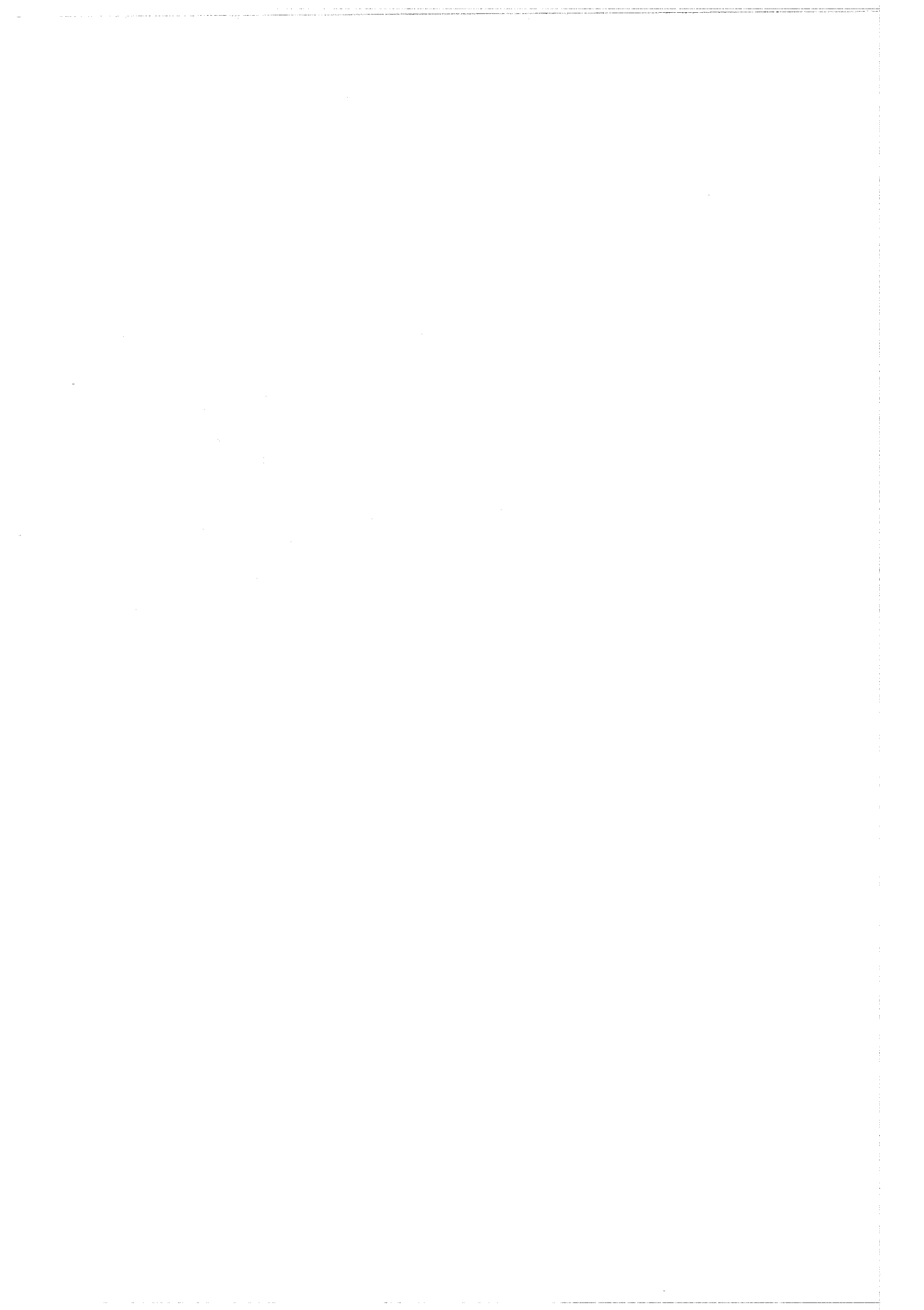
Abteilung Strahlenschutz und Dekontamination

Verbesserte Kompensationsfilter zur energie- und richtungsunabhängigen
Dosisleistungsanzeige mit Zählrohren

E. Piesch



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE



Verbesserte Kompensationsfilter zur energie- und richtungsunabhängigen Dosisleistungsanzeige mit Zählrohren

Improved compensation filters for dose-rate indication with G. M. counters independent of energy and direction

Von E. Piesch Kernforschungszentrum Karlsruhe, Strahlenmeßdienst

1. Einleitung

Geiger-Müller-Zählrohre werden wegen ihrer Empfindlichkeit gegenüber β - γ -Strahlung, wegen der mit wenig elektronischem Aufwand erreichbaren Impulsverarbeitung, wegen ihrer geringen Störanfälligkeit im Dauerbetrieb und wegen der Vorteile einer digitalen Meßwertübertragung vor allem in der Umgebungsüberwachung an Stelle von Ionisationskammern zur kontinuierlichen Überwachung niedriger Strahlenpegel bevorzugt verwendet [1–3]. Die digitale Meßwertregistrierung einer β - γ -Brutto-Zählrate läßt schon geringe Änderungen des natürlichen Strahlenpegels infolge Temperatur-, Inversions- oder Tageszeiteinflüssen (kosmische Strahlung, Radium und Thorium mit Folgeprodukten aus der Luft und aus dem Boden) erkennen, ebenso auch grobe Änderungen der Fallout-Komponente der Luftaktivität (Spaltprodukte in Luft und auf dem Boden) oder zeit-, wetter- und betriebsbedingte Änderungen eines Aktivitätsaus-

stoßes in der Umgebung von kerntechnischen oder kernverfahrenstechnischen Anlagen (J 131, A 41).

Ortsfeste Überwachungsanlagen an Reaktoren, Teilchenbeschleunigern und Isotopenlaboratorien verwenden ebenfalls zum Nachweis eines höheren Strahlungspegels aus Kostengründen des öfteren einfache G.-M.-Zählrohre. Auf dem Markt werden außerdem zahlreiche Arten von tragbaren und batteriebetriebenen Dosisleistungsmessgeräten angeboten.

G.-M.-Zählrohre zeigen jedoch eine Dosisleistung nur in einem beschränkten Energiebereich fehlerfrei an. Die Zählrohranzeige ist vor allem im Energiebereich unterhalb 200 keV energieabhängig. Die vielseitige Verwendung des G.-M.-Zählrohres im Strahlenschutz macht es notwendig, die Energieabhängigkeit der Zählrate, welche in erster Linie auf den Strahlungsnachweis im Auslösebereich zurückzu-

führen ist, durch eine günstige konstruktive Gestaltung des Zählrohres schon von seiten des Herstellers oder durch eine bauliche Veränderung des Zählrohres von seiten des Benutzers auf ein Minimum herabzusetzen.

Die Reduzierung der Energieabhängigkeit sowie die daraus resultierenden Vorteile für eine Dosisleistungsmessung werden im folgenden, vor allem am Beispiel des G.-M.-Zählrohres BZ 120 [B 1], im Hinblick auf eine Anwendung in der Umgebungsüberwachung beschrieben. Das G.-M.-Zählrohr FHZ 78 [B 2] verdeutlicht andererseits, daß auch der herkömmlichen Methode einer zusätzlichen an das Zählrohr anzubringenden Filterkombination Grenzen gesetzt sind. Schließlich wird am Beispiel eines Proportionalzählrohres gezeigt, daß eine durch das Wandmaterial des Zählrohres bedingte Energieabhängigkeit mit einer Filterkombination verringert werden kann.

2. Experimentelle Ermittlung des Kompensationsfilters

Die relativ große Dosisleistungsempfindlichkeit eines Zählrohres im Energiebereich unterhalb 100 keV kann mit Metallfiltern herabgesetzt werden, wie dies für ein G.-M.-Zählrohr nach Abdecken mit verschiedenen Metallfiltern unterschiedlicher Dicke in Fig. 1 und 2 wiedergegeben ist. Mit einem Filter von 0,5 mm Blei oder 1 mm Zinn erzielt man demnach für Quantenenergien oberhalb 80 keV eine annähernd energieunabhängige Dosisleistungsanzeige.

Mit inhomogenen oder perforierten Metallfiltern kann man (je nach Bauart des G.-M.-Zählrohres) energieärmere Strahlung bis zu Quantenenergien von 25 keV annähernd energieunabhängig nachweisen. Solche Filter, insbesondere aus Blei, wurden bisher jedoch nur vereinzelt bei Miniaturzählrohren verwendet bzw. mit Löchern versehen [4-6]. Ein perforiertes Zinnfilter in Kugelform führte bei Phosphatglasdosimetern zu optimalen Nachweisverhältnissen [7].

Zur Ermittlung des Kompensationsfilters wurde folgendes Verfahren angewandt:

Etwa 80 bis 90% der Zählrohroberfläche wird mit einem Metallfilter abgedeckt, welches die auftretende Quantenstrahlung, insbesondere im

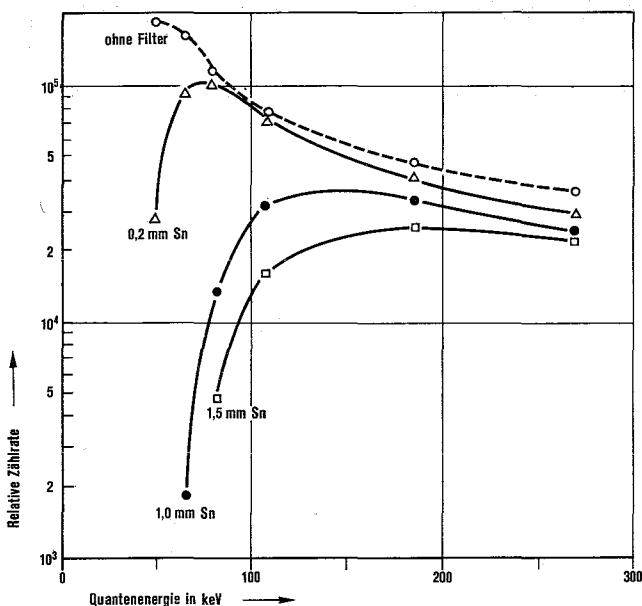


Fig. 1: Relative Zählrate des G.-M.-Zählrohres BZ 120, bezogen auf eine Dosisleistung von 1 mR/h, in Abhängigkeit von der Quantenenergie nach Abdecken des Zählrohres mit Zinnfiltern unterschiedlicher Dicke

Fig. 1: Relative count rate of a G. M. counter type BZ 120 related to an exposure rate of 1 mR/h as a function of quantum energy after covering the counter tube with tin filters of different thicknesses

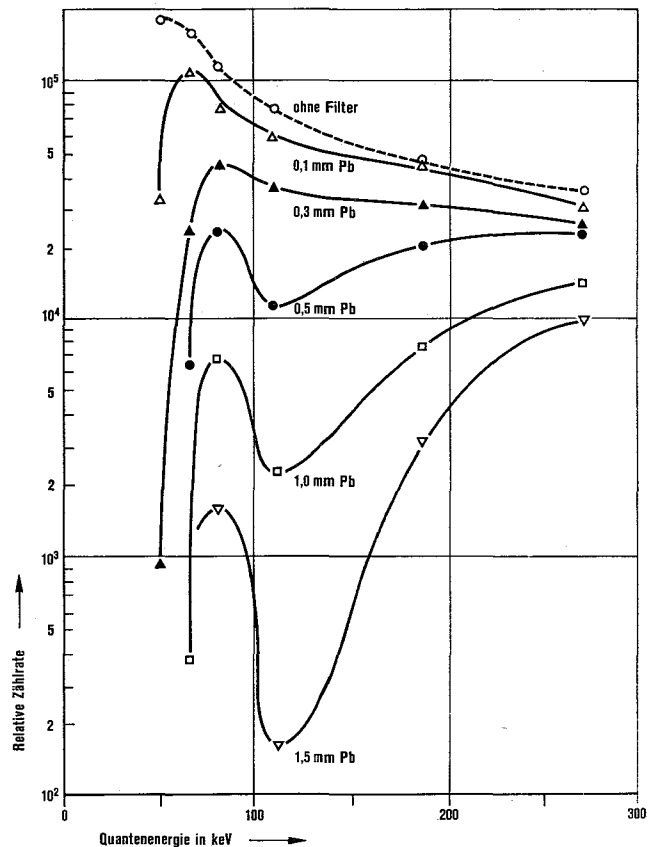


Fig. 2: Relative Zählrate des G.-M.-Zählrohres BZ 120, bezogen auf eine Dosisleistung von 1 mR/h, in Abhängigkeit von der Quantenenergie nach Abdecken des Zählrohres mit Bleifiltern unterschiedlicher Dicke

Fig. 2: Relative count rate of a G. M. counter type BZ 120 related to an exposure rate of 1 mR/h as a function of quantum energy after covering the counter tube with lead filters of different thicknesses

Energiebereich unter 100 keV, sehr effektiv schwächt (z. B. 1 bis 2 mm Zinn). 10 bis 20% der ungedeckten Zählrohroberfläche dient zum Nachweis energieärmerer Quantenstrahlung unter 100 keV.

Zunächst wird die Energieabhängigkeit der Dosisleistungsanzeige des ungeschirmten und des mit der vorgegebenen Filterdicke vollkommen abgedeckten Zählrohres für eine Strahleneinfallrichtung senkrecht zur Zählrohrachse experimentell bestimmt. Der Anteil der Flächenbelegung bzw. eine Änderung der Filterdicke kann in erster Näherung abgeschätzt und mittels einer erneuten Energiekalibrierung auf eine energieunabhängige Anzeige optimiert werden.

Durch Variation von Filterdicke und Flächenbelegung läßt sich die Zählrate eines Zählrohres in Abhängigkeit von der Quantenenergie in gezielter Weise an eine vorgegebene Energiedosisleistung anpassen.

Tab. 1: Verwendete Strahlenarten
Filterkombination I (BZ 120 mit 0,5 mm Pb)

Nuklid oder Röhrenspannung	Zusatzfilterung mm	angenommene effektive Quantenenergie keV
Co 60		1200
Cs 137		660
300 kV	2 Al + 5 Cu + 10,5 Pb	270
200 kV	2 Al + 5 Cu + 4 Sn + 2 Pb	185
130 kV	2 Al + 7,5 Cu + 2 Sn	108
100 kV	2 Al + 2 Cu + 1,5 Pb	80
78 kV	2 Al + 3,5 Cu	65
56 kV	2 Al + 1,2 Cu	50
45 kV	2 Al + 1,35 Cu	40
35 kV	2 Al + 0,5 Cu	30
25 kV	2 Al + 0,15 Cu	20
15 kV	0,2 Al + 0,1 Cu	10

Zur Energiekalibrierung wurde hartgefilterte Röntgenstrahlung im Energiebereich 10 bis 270 keV sowie γ -Strahlung von Cs 137 und Co 60 verwendet (Tab. 1). Die Zählrate bzw. die Ratemeteranzeige des zu untersuchenden Zählrohrs wurde auf die Dosisleistungsanzeige eines als Sekundärstandard kalibrierten Proportionalzählrohrs Tol D [B1] bezogen. Beide Zählrohre wurden in etwa 2,5 m Abstand von der Strahlenquelle an benachbarten Orten im ausgeblendeten Strahlenkegel aufgestellt. Bei den hier verwendeten zylindrischen Zählrohren wurden für eine Flächenbelegung von 80 bis 90% mehrere Metallfilterringe benutzt, die im gleichmäßigen Abstand voneinander auf einem Plexiglasrohr von ca. 2 mm Dicke befestigt und mit diesem über das Zählrohr geschoben werden konnten. Für Miniaturzählrohre kann ein dünner Draht mit Isolation spiralförmig aufgewickelt werden, um ein perforiertes Filter zu erzeugen.

3. Kompensationsfilter für das Zählrohr BZ 120

3.1 Energieabhängigkeit

Die Zählrate des BZ 120, bezogen auf die Dosisleistung von 1 mR/h, ist in Fig. 3 in Abhängigkeit von der Quantenenergie für zwei verschiedene Strahleneinfallrichtungen wiedergegeben. Eine Röntgenstrahlung von 40 keV wird demnach mit einer 5mal größeren Zählrate angezeigt als eine Cs-137- γ -Strahlung (660 keV) derselben Dosisleistung.

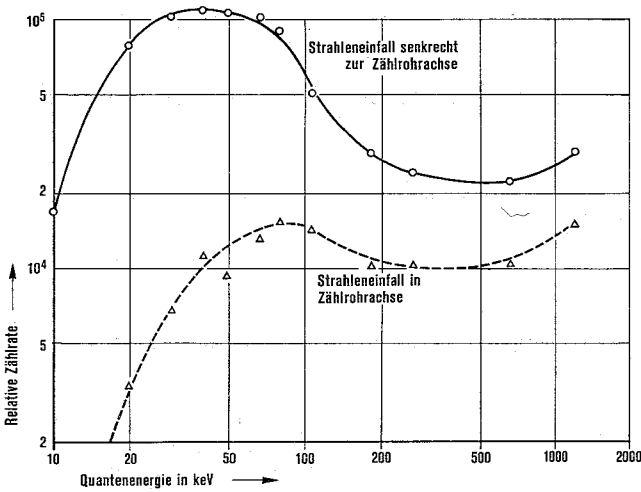


Fig. 3: Relative Zählrate des G.-M.-Zählrohrs BZ 120, bezogen auf eine Dosisleistung von 1 mR/h, in Abhängigkeit von der Quantenenergie für verschiedene Strahleneinfallrichtungen

Fig. 3: Relative count rate of a G. M. counter type BZ 120 related to an exposure rate of 1 mR/h as a function of quantum energy for different directions of radiation incidence

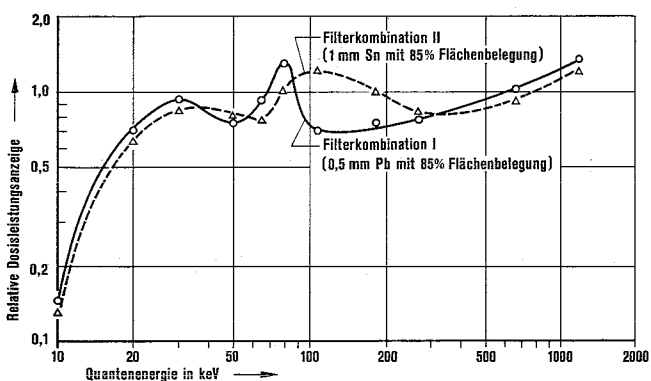


Fig. 4: Relative Dosisleistungsanzeige des G.-M.-Zählrohrs BZ 120 in Verbindung mit einem perforierten Metallfilter in Abhängigkeit von der Quantenenergie

Fig. 4: Relative exposure-rate reading of a G. M. counter type BZ 120 in connection with a perforated metal filter as a function of quantum energy

Eine Herabsetzung der Energieabhängigkeit erzielt man bei einer 85prozentigen Flächenbelegung mit 0,5 mm Blei bzw. 1 mm Zinn oder 2 mm Zinn. Die Dosisleistungsanzeige dieser Zählrohr-Filter-Kombination ist in Fig. 4 und 5 wiedergegeben.

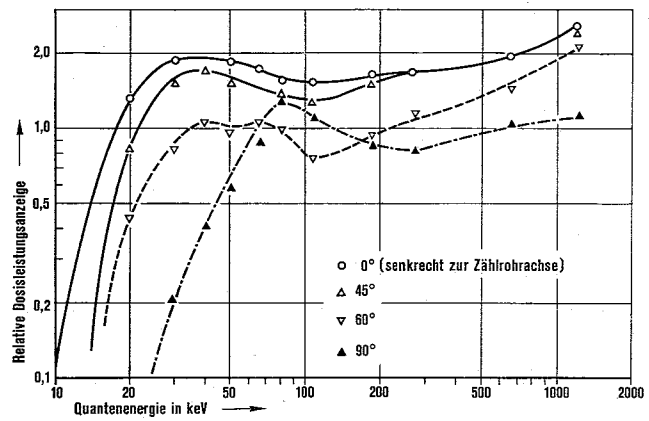


Fig. 5: Relative Dosisleistungsanzeige des G.-M.-Zählrohrs BZ 120 mit Filterkombination III (2 mm Sn mit 85% Flächenbelegung) in Abhängigkeit von der Quantenenergie für verschiedene Strahleneinfallrichtungen

Fig. 5: Relative exposure-rate reading of a G. M. counter type BZ 120 with filter combination III (2 mm Sn with 85% covering) as a function of quantum energy for different directions of radiation incidence

Der maximale Fehler der noch verbleibenden Energieabhängigkeit im Energiebereich 25 keV bis 0,6 MeV für eine frontale Strahleneinfallrichtung hat folgende Werte:

- $\pm 30\%$ für Filterkombination I (BZ 120 mit 0,5 mm Pb),
- $\pm 24\%$ für Filterkombination II (BZ 120 mit 1 mm Sn),
- $\pm 12\%$ für Filterkombination III (BZ 120 mit 2 mm Sn).

In Tab. 2 ist die Energieabhängigkeit für den Energiebereich 30 keV bis 1,2 MeV bei unterschiedlichem Strahlungseinfall zusammengestellt. Durch Abdecken des Zählrohrs ist die Zählrohrkombination gegenüber β -Strahlung unempfindlich.

Tab. 2: Relative Energie- und Richtungsabhängigkeit der Dosisleistungsanzeige des G.-M.-Zählrohrs BZ 120 mit verschiedenen Kompensationsfiltern

Filterkombination	Strahleneinfall	Relative Energieabhängigkeit (30 keV ... 1,2 MeV)
—	senkrecht zur Zählrohrachse	$\pm 68\%$
I		$\pm 30\%$
II		$\pm 21\%$
III		$\pm 28\%$
—	aus Winkelbereich $\pm 60^\circ$	Faktor 16
III	aus Gesamttraum gleichmäßig	$\pm 55\%$
III	aus Gesamttraum gleichmäßig	$\pm 30\%$

3.2 Richtungsabhängigkeit

Die Energieabhängigkeit der Dosisleistungsanzeige wurde mit Filterkombination III für verschiedene Strahleneinfallrichtungen bestimmt (Fig. 5).

Der maximal mögliche Fehler, der sich aus der Energieabhängigkeit und Richtungsabhängigkeit der Dosisleistungsanzeige ergibt, im Energiebereich 30 keV bis 1,2 MeV beträgt $\pm 55\%$ für Strahleneinfallrichtungen aus einem Winkelbereich von $\pm 60^\circ$.

Beim Einsatz des Zählrohrs in der Umgebungsüberwachung kann angenommen werden, daß die Strahlung aus dem Gesamttraum einfällt. Damit verringert sich der durch Energie- und Richtungsabhängigkeit der Zählrohranzeige bedingte Fehlereinfluß.

Für eine aus dem Gesamttraum einfallende Strahlung beträgt die mittlere Energieabhängigkeit im Energiebereich 25 keV bis 0,6 MeV $\pm 20\%$, im Energiebereich 25 keV bis 1,2 MeV $\pm 30\%$ (Fig. 6); sie entspricht im vorliegenden Fall annähernd der Dosisleistungsanzeige bei einer Strahleneinfallrichtung unter 45° zur Zählrohrachse.

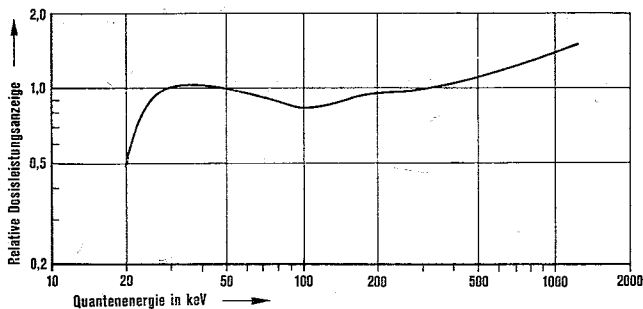


Fig. 6: Relative exposure-rate reading of a G. M. counter type BZ 120 with filter combination III (2 mm Sn mit 85% Flächenbelegung) in Abhängigkeit von der Quantenenergie für eine aus dem Raum gleichmäßig einfallende Quantenstrahlung

Fig. 6: Relative exposure-rate reading of a G. M. counter type BZ 120 with filter combination III (2 mm Sn with 85% covering) as a function of the quantum energy for 4π irradiation

Zur Bestimmung der mittleren Dosisleistungsanzeige für eine definierte Quantenenergie wurde der Betrag der Dosisleistungsanzeige für jede Strahleneinfallrichtung als Vektor aufgefaßt. Die Vektoren einer aus dem Gesamttraum gleichmäßig einfallenden Strahlung werden in Polarkoordinatendarstellung einen Rotationskörper mit der Zählrohrachse als Rotationsachse erzeugen. Um das Volumen des Rotationskörpers zu bestimmen, wurde zunächst die Zählrate des Zählrohrs für eine definierte Quantenenergie in Abhängigkeit von dem Strahleneinfallswinkel in einer Ebene in Zählrohrachse dargestellt. Die Vektoren erzeugen in dieser Ebene eine Fläche, die bei Rotation um die Zählrohrachse das Volumen des Rotationskörpers ergibt.

Zur Lösung der rotationssymmetrischen Aufgabe wurde an Stelle einer graphischen Integration ein entsprechender Rotationskörper angefertigt. Der Rotationskörper wird dann auf eine Kugel gleichen Volumens bezogen. Der Radius dieser Kugel entspricht der mittleren Dosisleistungsanzeige für die vorgegebene Quantenenergie. Diese Methode soll an anderer Stelle ausführlich erläutert werden.

3.3 Dosisleistungsbereich

Eine Filterkombination ändert den Betrag des Nulleffektes (Verringerung von etwa 300 auf 260 Imp/min) sowie die obere Grenze des Dosisleistungsbereiches des Zählrohrs. Um die Begrenzung des Dosisleistungsbereiches infolge Totzeit des Zählrohrs zu bestimmen, wurde die Zählrate des G.-M.-Zählrohrs in Abhängigkeit von der Dosisleistung bei einer Strahlungsenergie von 50 keV aufgenommen (Fig. 7). Die Filterkombination führt demnach bei der gewählten Schwelle des angeschlossenen Verstärkers zu einem Dosisleistungsbereich von 1 μ R/h bis 2 mR/h ohne Totzeitkorrektur bzw. bis 20 mR/h mit Totzeitkorrektur.

Die obere Grenze der Dosisleistungsanzeige kann durch Wahl der Hochspannung (Arbeitspunkt des Zählrohrs) und der Eingangsempfindlichkeit der verwendeten Elektronik bei größeren Dosisleistungen liegen.

4. Kompensationsfilter für das Zählrohr FHZ 78

Die relative Dosisleistungsanzeige des G.-M.-Zählrohrs FHZ 78 ist in Fig. 8 in Abhängigkeit von der Quantenenergie für zwei verschiedene Strahleneinfallrichtungen wiedergegeben.

Im Vergleich zum dünnwandigen Zählrohr BZ 120 liegt das Maximum der Zählrorempfindlichkeit bei ca. 100 keV. Quantenstrahlung von 300 keV wird beispielsweise um den Faktor 3 empfindlicher angezeigt als Quantenstrahlung von 1,2 MeV.

Ein Filter von 0,6 mm Blei mit 85prozentiger Flächenbelegung weist noch eine ausgeprägte Energieabhängigkeit bei 200 bis 300 keV auf (Fig. 9a). Erst mit 6 bis 8 mm Blei erhält man die gewünschte Reduktion der Energieabhängigkeit. Die noch verbleibende Energieabhängigkeit beträgt im Energiebereich oberhalb 50 keV bis 1,2 MeV etwa $\pm 30\%$ (Fig. 9b).

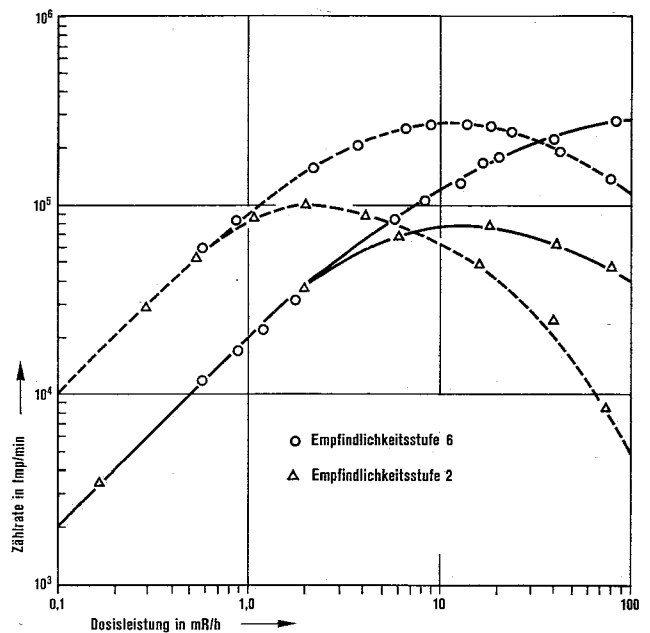


Fig. 7: Zählrate des G.-M.-Zählrohrs BZ 120 mit der Filterkombination III in Verbindung mit dem Meßplatz FH 90 in Abhängigkeit von der Dosisleistung einer 50-keV-Röntgenstrahlung für zwei verschiedene Eingangsempfindlichkeiten des angeschlossenen Verstärkers

Fig. 7: Count rate of a G. M. counter type BZ 120 with filter combination III in connection with a counting equipment FH 90 as a function of the exposure rate of 50 keV X-rays for two different input sensitivities of the amplifier

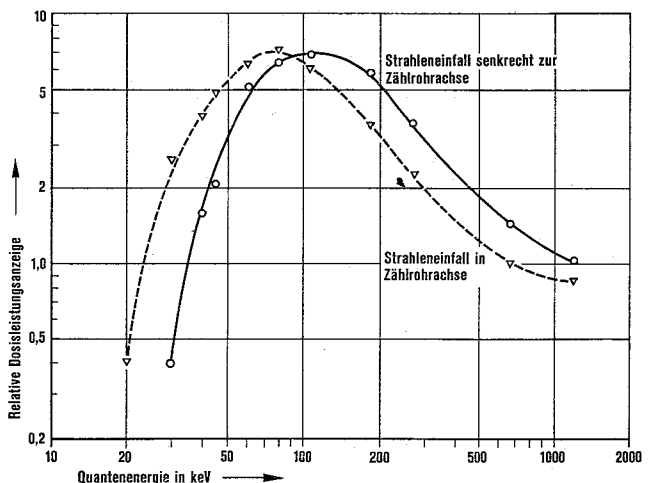


Fig. 8: Relative Dosisleistungsanzeige des G.-M.-Zählrohrs FHZ 78 in Abhängigkeit von der Quantenenergie für verschiedene Strahleneinfallrichtungen

Fig. 8: Relative exposure-rate reading of a G. M. counter type FHZ 78 as a function of quantum energy for different directions of radiation incidence

Wegen der Bauweise des G.-M.-Zählrohrs (Glaskolben) wird eine Kompensation der Energieabhängigkeit nur für Quantenenergien oberhalb 50 keV erzielt. Das ermittelte Kompensationsfilter kann wegen seines Gewichtes nur für stationäre Überwachungsgeräte eingesetzt werden. Eine durch die Bleidicke von 8 mm bedingte Richtungsabhängigkeit der Zählrohranzeige kann durch eine schräge Ausfräsung an den Kanten der Filterringe in gewissen Grenzen ausgeglichen werden. Die Stirnfläche des Zählrohrs muß hier mit einer perforierten Bleikappe abgedeckt werden (z. B. 0,5 mm Blei mit Zentralloch von 4,5 mm Durchmesser).

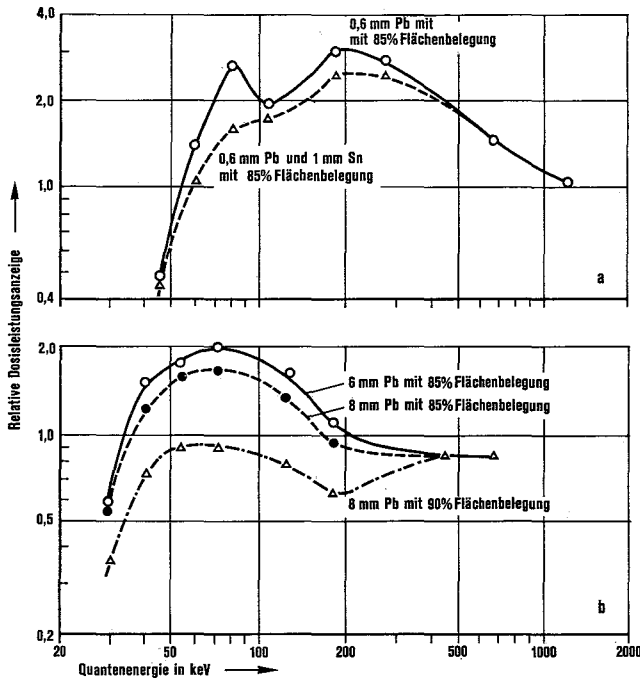


Fig. 9: Relative Dosisleistungsanzeige des G.-M.-Zählrohrs FHZ 78 in Abhängigkeit von der Quantenenergie für verschiedene Filterkombinationen
 Fig. 9: Relative exposure-rate reading of a G. M. counter type FHZ 78 as a function of quantum energy for different filter combinations

5. Kompensationsfilter für ein Proportionalzählrohr

Die Anzeige eines Proportionalzählrohrs mit Kunststoffwand (Tol D) [B 1] ist bei Strombetrieb (Ionisationskammer mit Gasverstärkung) in Verbindung mit einem Handgerät für energiarme Röntgenstrahlung oberhalb 10 keV annähernd energieunabhängig. Der Dosisleistungsbereich erfaßt 10 μ R/h bis 100 mR/h, nach erneuter Eichung 100 mR/h bis 100 R/h.

Das Labormuster eines Proportionalzählrohrs mit Aluminiumwand (Tol E) [B 1] zeigt jedoch eine in Fig. 10 wieder gegebene Energieabhängigkeit der Zählrohranzeige.

Mit einer perforierten Zählrohrhülle aus Zinn (Filterhülle A: 0,8 mm Zinn mit 80% Flächenbelegung) läßt sich die Energieabhängigkeit so weit reduzieren, daß die Dosisleistungsanzeige für Quantenenergien 25 keV bis 1,2 MeV und für eine Strahleneinfallsrichtung senkrecht zur Zählrohrachse nur noch innerhalb $\pm 12\%$ energieabhängig ist (Fig. 10).

Die Energieabhängigkeit der Zählrohranzeige kann durch Kompensationsfilter in gezielter Weise so verändert werden,

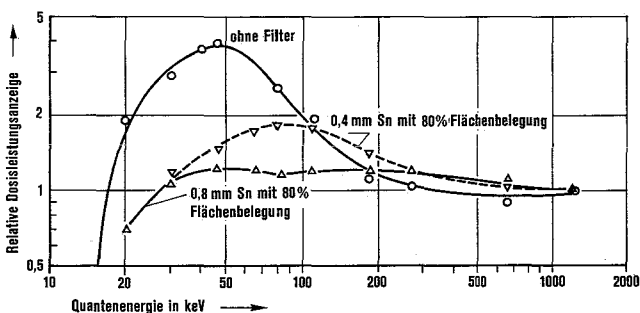


Fig. 10: Relative Dosisleistungsanzeige des Proportionalzählrohrs Tol E, bezogen auf eine Dosisleistungsanzeige von 1 mR/h, in Abhängigkeit von der Quantenenergie für verschiedene Filterkombinationen

Fig. 10: Relative exposure-rate reading of a proportional counter type Tol E related to an exposure rate of 1 mR/h as a function of quantum energy for different filter combinations

daß das Zählrohr an Stelle einer Bestrahlungsdosisleistung eine vorgegebene Energiedosisleistung anzeigt (Energiedosisleistung an der Körperoberfläche oder in den kritischen Organen, wie Gonaden, Knochenmark usw.). Die Messung einer Organdosisleistung ist für Strahlenschutzmessungen um so mehr von Interesse, als die Messung einer Energiedosisleistung in Luft oder in einem weichen Gewebe keineswegs die Dosisleistung an der Körperoberfläche oder im interessierenden kritischen Organ wiedergibt, deren Kenntnis auf Grund der Empfehlungen der International Commission on Radiological Protection (ICRP) wünschenswert wäre. Es ist versucht worden, durch Auswechseln von Zählrohrhüllen die wahlweise direkte Messung einer Freiluft-Bestrahlungsdosisleistung oder einer gewünschten Energiedosisleistung im Organ zu verwirklichen [8].

Es wurde eine Filterkombination B (0,4 mm Zinn mit 80% Flächenbelegung) experimentell ermittelt, welche die annähernd energieunabhängige Messung einer Oberflächen-dosisleistung oder einer Gonadendosisleistung (Hoden) ermöglicht. Die Zählrohranzeige ist oberhalb 30 keV bis 1,2 MeV innerhalb $\pm 16\%$ proportional zur Oberflächen-dosisleistung, oberhalb 25 keV bis 1,2 MeV innerhalb $\pm 7\%$ proportional zur Gonadendosisleistung. Fig. 10 zeigt die Energieabhängigkeit der Zählrohranzeige für Filterkombination B, bezogen auf eine Dosisleistung von 1 mR/h. Dasselbe Proportionalzählrohr kann somit in Verbindung mit auswechselbaren Filterhüllen wahlweise eine vorgegebene Energiedosisleistung messen. Es ist am Beispiel einer Phosphatglaskapselung gezeigt worden, daß experimentell eine solche Filterkombination ermittelt werden kann, welche unter Berücksichtigung eines Korrekturfaktors gleichzeitig verschiedene Organdosisleistungen, z. B. eine Energiedosisleistung in den Gonaden und eine Energiedosisleistung im Knochenmark, zu messen gestattet [8].

6. Schluß

Es ist möglich, neben Ionisationskammern auch G.-M.-Zählrohre zu Dosisleistungsmessungen für die Umgebungsüberwachung, die Arbeitsplatzüberwachung in Isotopenlaboratorien und kerntechnischen Anlagen oder zu einfachen Strahlenschutzmessungen mit batteriebetriebenen Handgeräten einzusetzen. Voraussetzung dafür ist jedoch die Ermittlung des erforderlichen Kompensationsfilters, dessen konstruktive Kennzeichen (Filterzusammensetzung, Filterdicke, Flächenbelegung) für ein Zählrohr einer bestimmten Bauart auf Grund einer Bauartprüfung bestimmt und für eine Serienfertigung vom Hersteller garantiert werden müßte. Die hier beschriebene experimentelle Ermittlung von Kompensationsfiltern und deren Bauartprüfung soll eine Verbesserung, Weiterentwicklung und Anwendung von Zählrohren für die Dosisleistungsmessung im Strahlenschutz erleichtern.

(Eingegangen am 19. 1. 1967)

Literatur

- [1] Kiefer, H., und R. Maushart: Atomwirtschaft 4, 247 (1959)
- [2] Heist, E., H. Kiefer und R. Maushart: Direct Information 1/63 (1963)
- [3] Vogt, K. J.: Bericht Jül 21 ST (1961)
- [4] Jones, A. R.: Health Physics 8, 1 (1962)
- [5] Wagner, E. B., und G. S. Hurst: Health Physics 5, 20 (1961)
- [6] Kiefer, H., und R. Maushart: Strahlenschutzmeßtechnik Karlsruhe: G. Braun 1964
- [7] Piesch, E.: Direct Information 17/64 (1964)
- [8] Maushart, R., und E. Piesch: Vortrag auf dem 1. Internationalen Kongreß der International Radiation Protection Association, Rom, 5.—10. 9. 1966

Bezugsquellen

- [B 1] Laboratorium Prof. Berthold, Wildbad (Schwarzwald)
- [B 2] Frieseke & Hoepfner, Erlangen-Bruck