

KFK-411

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

März 1966

KFK 411

Schule für Kerntechnik

Das Großflächenproportionalzählrohr

H. Kiefer



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

März 1966

KFK 411

Schule für Kerntechnik

DAS GROSSFLÄCHENPROPORTIONALZÄHLROHR ⁺⁾

von

Hans Kiefer

Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. Karlsruhe

⁺⁾ Diese Arbeit wurde der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe im Dezember 1964 als Habilitationsschrift vorgelegt.

	Seite
1. EINLEITUNG	2
1.1 Bedeutung der Strahlenmeßtechnik innerhalb des Strahlenschutzes	2
1.2 Probleme der Strahlenschutzmeßtechnik	5
2. DIE ENTWICKLUNG DES GROSSFLÄCHENPROPORTIONALZÄHLROHRS ALS STRAHLENSCHUTZ-DETEKTOR	10
2.1 Großflächenproportionalzählrohre zur Aktivitätsbestimmung geringer spezifischer Radioaktivität	11
2.11 Technische Ausführung	11
2.12 Weiterentwicklung	20
2.121 Höhere Meßgenauigkeit	20
2.122 Verkürzung des Arbeitsvorgangs	25
2.13 Ergebnisse	27
2.131 Typische Eigenschaften des Detektors	27
2.132 Seine Vorteile bei der Aktivitätsbestimmung	32
2.2 Großflächenproportionalzählrohre zur Energiebestimmung der gemessenen Strahlung	42
2.21 α -Spektrograph	47
2.22 Spektrographie von Röntgenstrahlern	51
2.23 β -Energiebestimmung über Rückstreuanteil	56
2.3 Großflächenproportionalzählrohre zur Dosisbestimmung	60
3. DIE VERWENDUNG VON GROSSFLÄCHENPROPORTIONALZÄHLROHREN IN DER ÜBERWACHUNGSTECHNIK	66
3.1 Strahlenschutzmonitoren	66
3.11 Für die Wasserüberwachung	66
3.12 Für die Luftüberwachung	74
3.13 Für die Personen- und Arbeitsplatzüberwachung	81
3.2 Großflächenproportionalzählrohre in Sonderanlagen	85
3.21 Kontinuierliche Messung des α/β -Verhältnisses der Radioaktivität des Luftstaubs	85
3.22 Messung von α -Röntgenkoinzidenzen zur spezifischen Pu-239-Überwachung	89
3.23 Kontinuierliche Tritium-Überwachung in Luft und Wasser	93
4. ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION	99
4.1 Ergebnis	99
4.2 Ausblick	100
5. LITERATUR	103

1. EINLEITUNG

1.1 Bedeutung der Strahlenmeßtechnik innerhalb des Strahlenschutzes

Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Kernphysik und Kernchemie, die daraus entstandene Kerntechnik mit ihren verschiedenen Zielsetzungen sind ohne Strahlenschutz nicht möglich. An diesen Strahlenschutz werden zwei Grundforderungen gestellt, die sich nicht leicht vereinbaren lassen. Er soll einerseits in allen denkbaren Fällen Sicherheit gewährleisten und soll andererseits so wirtschaftlich wie möglich sein. Diese Forderungen werden besonders an die Strahlenmeßtechnik gestellt, die u. a. mit der Entwicklung eines neuartigen Detektortyps eine größere Zahl anstehender Strahlenschutzmeßprobleme befriedigend lösen konnte. Hierzu ist aber eine Rückschau notwendig.

Der Strahlenschutz war viele Jahre eine Domäne der Medizin, da einerseits anfänglich die ionisierende Strahlung fast ausschließlich auf medizinischem Gebiet Anwendung fand und andererseits der Schutz vor körperschädigenden Einflüssen der Zivilisation eine typische Aufgabe des öffentlichen Gesundheitswesens ist. So gelang es der Medizin in den letzten Jahren, Gegenmittel nach Inkorporation radioaktiver Substanzen zu finden, mit denen es möglich ist, die Dekorporierung einer Reihe von radioaktiven Isotopen zu beschleunigen und so die Gesamtstrahlenbelastung wesentlich zu verringern (Lit. 1). Ein akutes Strahlensyndrom kann aber bisher nur symptomatisch behandelt werden. Weiter verdankt der Strahlenschutz dem Mediziner, Strahlenbiologen und Humangenetiker die Richtwerte für die für den Menschen noch als unbedenklich anzusehende Dosis, für die im Körper als unbedenklich anzusehende Aktivität sowie für Luft- und Wasserkonzentrationen eines jeden Radionuklids für Dauer- und Kurzzeitbelastung (Lit. 2, 3). Hierfür werden physikalisch-chemische Eigenschaften des Radionuklids wie Art und Energie der Strahlung, Zerfallsschema und Halbwertszeit, Aggregatzustand, Löslichkeit, rein oder vom inaktiven Element begleitet, u. a. mehr berücksichtigt, sowie biologisch-medizinische Daten wie die Art der Inkorporation, der Resorptionsfaktor, die

Verteilung im Körper, die Kenntnis der kritischen Organe, die Verweildauer, die Qualitätsfaktoren für den im kritischen Organ zu erwartenden Effekt (der noch sehr umstritten ist) (Lit. 4), die Eigenschaften des Standardmenschen (Lit. 2) sowie die individuelle Streuung.

Alle diese Richtwerte bleiben fiktiv, solange es keine Möglichkeit gibt, sie tatsächlich zu messen und zu überwachen. Hier ist der Medizin eine Grenze gesteckt, weil sie mit biologischen Verfahren am Menschen eine Dosis erst nachweisen kann, wenn der Betreffende auf einmal einige bis einige zehn rem erhalten hat. Der praktische Strahlenschutz, der bis zu 6 Zehnerpotenzen empfindlicher arbeiten muß, ist daher heute vom Physiker übernommen worden, der mit Hilfe der Strahlenschutzmeßtechnik präventiv jeden Strahlenschaden abzuwehren sucht.

Die Strahlenschutzmeßtechnik hat sich bis nach dem zweiten Weltkrieg fast ausschließlich mit der Dosisbestimmung der Strahlung befaßt, weshalb die Dosimetrie - wenigstens soweit es sich nicht um die Messung von Neutronen oder hochenergetischen Teilchen handelt - schon seit Jahren einen relativ hohen Stand erreicht hat. Anders sah es mit der Messung der Radioaktivität in Luft und Wasser und schließlich mit Inkorporationsmessungen aus, wo zwar wissenschaftliche Untersuchungen der natürlichen Radioaktivität (vor allem des Radium, Radon und Uran) in Gesteinen, Wasser (vor allem Heilquellen) und der Luft vorliegen (Lit. 5), aber die Meßmethoden für allgemeine Strahlenschutz Zwecke wenig geeignet sind. Eine spezielle Meßmethode reichte auch für Inkorporationsfälle aus, von denen - von der 1913 in die Therapie eingeführten intravenösen Injektion von Radiumchlorid abgesehen (Lit. 6) - im wesentlichen nur die Inkorporation radioaktiver Leuchtfarbe bei Zifferblattbeträgerinnen bekannt geworden war (Lit. 7, 8).

Erst die weltweite Verbreitung des Fallout aus Kernbombentests verbunden mit der Warnung renommierter Wissenschaftler vor den

Folgen solcher Versuche (Lit. 9) führte in praktisch allen Industriestaaten zur Einrichtung von Überwachungsstellen, die den Fallout im Regen und in der Luft als Aerosol messen sollten. Diese Aufgabe förderte die Entwicklung der Strahlenmeßtechnik sehr stark.

Die Meßmethoden wurden anfangs aus USA übernommen (Lit. 10), wo sie im wesentlichen aber militärischen und meteorologischen Untersuchungen dienten. Ihr Ziel war ein Relativwert, der aus einer β -Gesamtaktivitätsmessung ermittelt werden kann. Diese Messung ist deshalb verhältnismäßig einfach, weil der Fallout ein Gemisch aus vielen Einzelisotopen ist. Das bedeutet, daß zwar:

- bei der Probenvorbereitung das eine oder andere Isotop nur zu einem geringen Prozentsatz oder gar nicht erhalten bleibt. Man gibt sich aber mit dem Rest zufrieden. Als Beispiel kann das Jod erwähnt werden, das beim üblichen Eindampfen der Regenwasserproben verloren geht;
- bei der Messung bestimmte Radionuklide kaum erfaßt werden, weil sie eine zu niedere β -Energie haben und deshalb wegen der Absorption im Detektorfenster und wegen der Selbstabsorption in der Probe nur mit einem ungleich geringeren Wirkungsgrad zur Zählung gelangen als Radionuklide mit höherer β -Energie. Aber auch diesen Fehler kann man für Relativmessungen in Kauf nehmen.

Diese Meßmethoden sind aber als Strahlenschutzmessungen des Fallout nicht geeignet (Lit. 11). Man kann damit zwar, wenn man die Methoden der β -Gesamtaktivitätsmessung vereinheitlicht, was an vielen Stellen unter anderen auch in der Bundesrepublik Deutschland geschah (Lit. 12), interessante Vergleiche zum Fallout in anderen Ländern ziehen, die Strahlenbelastung muß aber durch Einzelanalysen der gefährlichsten Radioisotope des Fallout wie Sr^{90} und Sr^{89} , J^{131} , Cs^{137} in Luft, Wasser und biologischem Material bestimmt werden. Die wichtigsten Methoden wurden 1959 von einem Gremium internationaler Fachleute bei einem Panel der IAEA in

Wien zusammengestellt und allen Ländern als Empfehlung übergeben (Lit. 11). Trotzdem sind bis heute - auch in der Bundesrepublik Deutschland - zahlenmäßig die größte Zahl der Messungen zur Fallout-Überwachung β -Gesamtaktivitätsbestimmungen geblieben (Lit. 13).

1.2 Probleme der Strahlenschutzmeßtechnik

In den Richtlinien der ICRP (Lit. 14) finden sich einige hundert Konzentrationswerte für die verschiedenen Radionuklide in Wasser und Luft, die der Benutzer radioaktiver Substanzen einhalten soll und damit auch zu messen hat. Sie wurden 1959 - mit kleinen Änderungen - Grundlage der Euratom-Grundnormen (Lit. 15, 16) für Strahlenschutz. Diese Normen mußten auch in der Bundesrepublik Deutschland übernommen werden und sind das sachliche Gerüst der 1960 in Kraft getretenen 1. Deutschen Strahlenschutzverordnung (Lit. 17, 18). Durch sie wurde der Strahlenschutzmeßtechnik eine Vielzahl neuer Meßaufgaben gestellt, die am besten an einem Beispiel, der Wassermessung gezeigt werden können.

Die Abwasserfrage gehört in kerntechnischen Anlagen zu den Grundproblemen, die auch in den Anlage- und Betriebskosten stark zu Buch schlagen. Die 1. Strahlenschutzverordnung gibt für die wichtigsten Radionuklide in Wasser jeweils eine zulässige Konzentration, für radioaktive Stoffe oder Gemische solcher Stoffe, die nicht genannt sind, einen Wert von $1 \times 10^{-7} \mu\text{C}/\text{cm}^3$, der dem gefährlichsten aller Radionuklide gleichkommt. Die Wasserbehörde verlangt meist, daß im Abwasser die dort angeführten Konzentrationswerte eingehalten werden, - obwohl sie andere Werte festsetzen kann -, und verlangt damit auch die Messung dieser Werte. Apriori kann bei großen Anlagen nicht erwartet werden, daß immer bekannt ist, welche Radionuklide im Wasser vorhanden sind. Infolgedessen muß eine Meßmethode gefunden werden, die alle möglichen Isotope unterhalb der beispielsweise zugelassenen Grenze von $1 \times 10^{-7} \mu\text{C}/\text{cm}^3$ erfaßt. Eine ideale Meßmethode müßte also jede Strahlenart gleich welcher Energie mit demselben

Wirkungsgrad erfassen. Dabei darf es keine Rolle spielen, in welcher Form das radioaktive Isotop im Wasser vorliegt, beispielsweise ob ional, ob gasförmig gelöst oder gar - wie Tritium - als Bestandteil des Wassermoleküls.

Das einzige deutsche Einheitsverfahren für die Radioaktivitätsmessung im Wasser überhaupt (Lit. 19) ist von der Fallout-Überwachung übernommen:

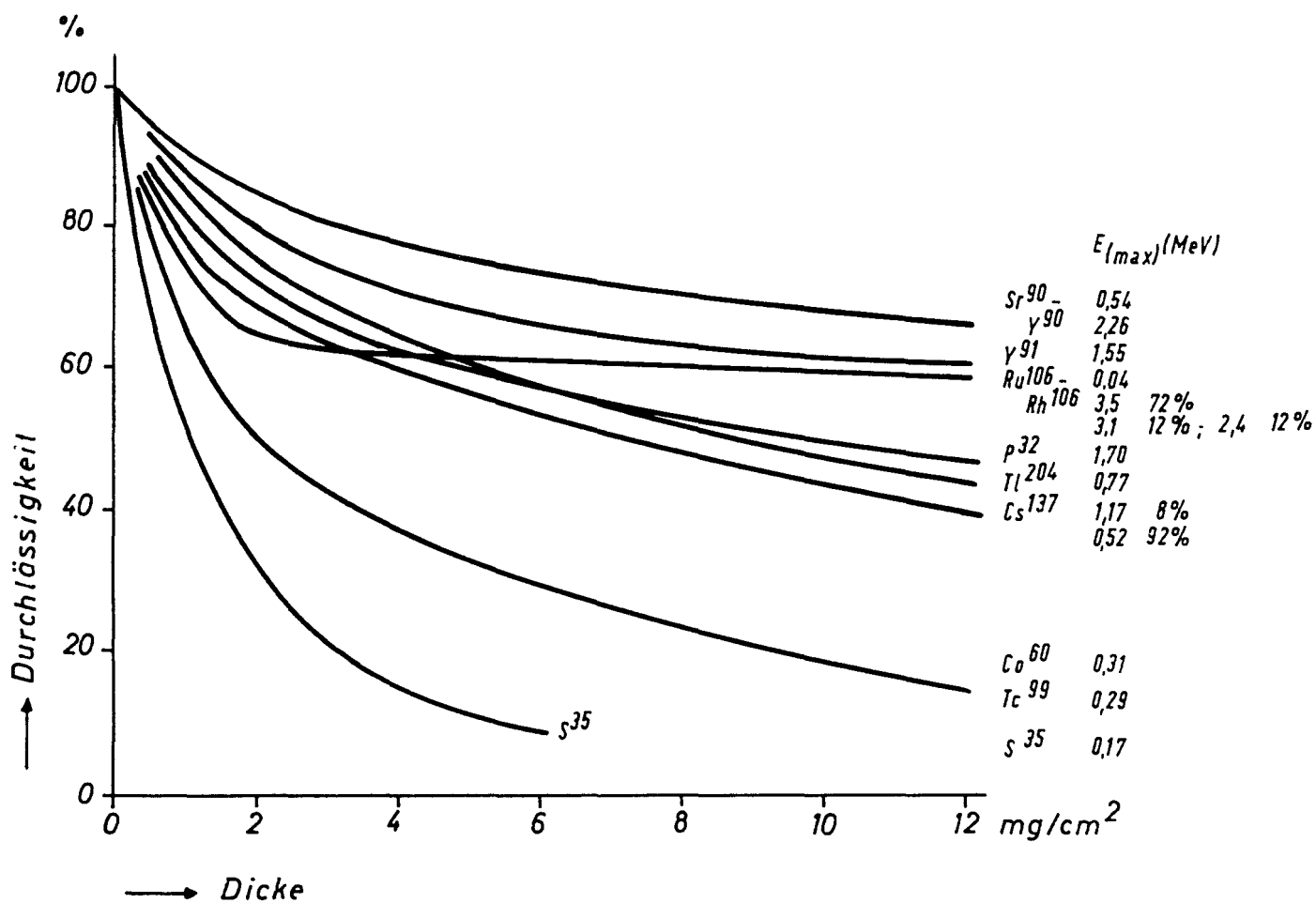
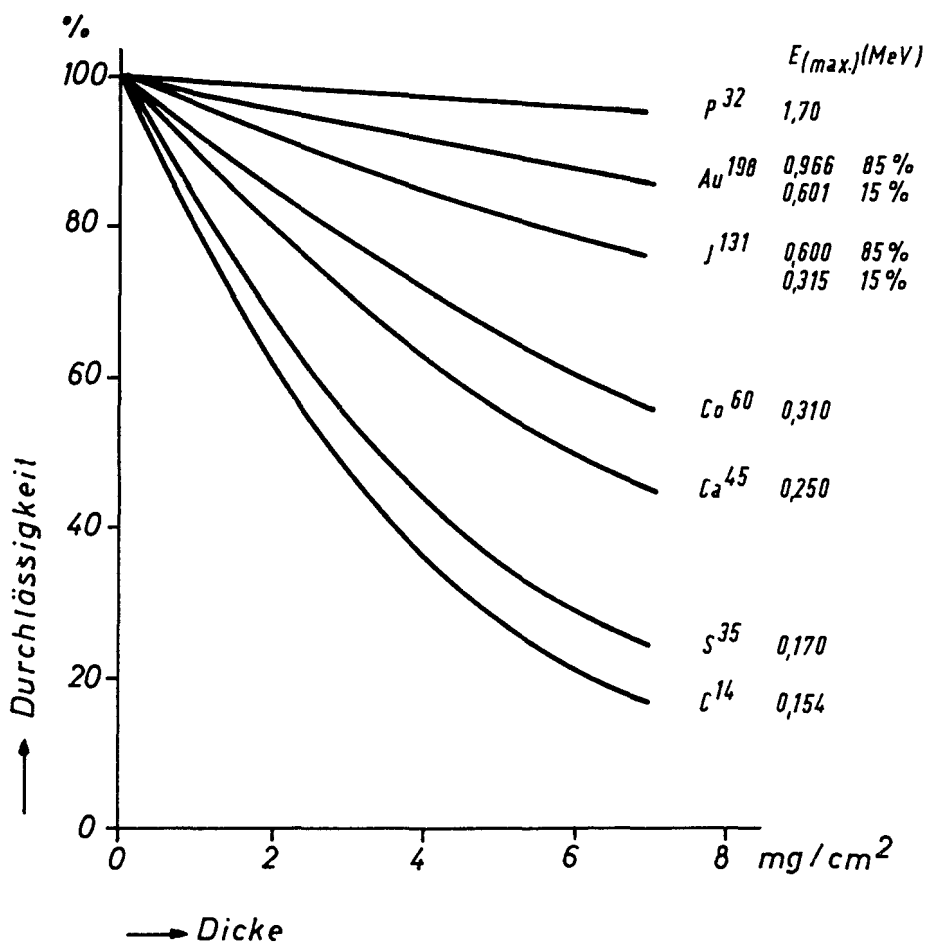
- Es mißt nur β -Strahler, obwohl α -Strahler (z. B. Radium oder Uran) ebenfalls im Abwasser vorkommen können. Damit ist bereits die erste Forderung an ein Meßverfahren nicht erfüllt, daß alle Strahlenarten erfaßt werden müssen.
- Bei dem beschriebenen Verfahren werden in der Regel Endfensterzählrohre benützt. Eine energieunabhängige Messung kann aber nur durchgeführt werden, wenn der Detektor der Absorption wegen kein Fenster besitzt, wenn also im Innenzähler gemessen wird. Welche Fehler durch die Absorption im Endfenster eines Zählrohres bei verschiedenen β -Strahlern entstehen, besonders wenn man bei flächig verteilten Proben oder großen Fenstern den Schrägdurchgang berücksichtigt, zeigt Abb. 1-1.
- Weiter kann eine energieunabhängige Messung nur durchgeführt werden, wenn die Selbstabsorption möglichst gering ist, so sollte die Flächenbelegung 1 - 5 mg/cm² nicht überschreiten. Beim Einheitsverfahren sind bis zu 45 mg/cm² zugelassen, aber die 45 mg/cm² nicht vorgeschrieben, so daß weder Relativmessungen möglich sind, selbst wenn die verschiedenen Meßstellen das gleiche Isotopengemisch, z. B. Fallout untersuchen, aber das Flächengewicht der Proben nicht bekannt ist, noch "Absolut"-Messungen wegen der starken Energieabhängigkeit.
- Um die notwendige Empfindlichkeit zu erzielen, wird das Wasser eingedampft. Bei diesem Eindampfen können schon durch die Temperatur eine ganze Reihe von im Wasser möglicherweise vorhandenen Radionukliden verloren gehen, ebenso bei der Über-

Abb 1-1

Durchlässigkeit von Folien für verschiedene β -Strahler

oben: bei senkrechtem Durchgang (nach Gleason G. J., Nucleonics 8 (1951) H. 5, S. 12)

unten: bei diffusem Durchgang (2 π -Geometrie) (eigene Messungen)



führung von der Eindampfschale zur Meßschale, so daß überhaupt nicht alle möglichen Radionuklide zur Messung gelangen.

Diese Hinweise zeigen, daß die Grundforderungen, die an ein allgemeines Strahlenschutz-Meßverfahren gestellt werden müssen, beim Einheitsverfahren, dessen Aufgabe die Überwachung des Fallout war, in keiner Weise erfüllt werden.

Alle Anforderungen können beim Stand der Technik nicht gleichzeitig erfüllt werden. Von den Forderungen

- energieunabhängig,
- ohne Anreicherung,
- $1 \times 10^{-7} \mu\text{c}/\text{cm}^3$ Nachweisempfindlichkeit,

sind stets nur zwei zu erfüllen, die dann entweder zur Messung nach Anreicherung oder zu Direktüberwachungsverfahren führen, wobei man im einen Fall die Selektivität der Anreicherung in Kauf nimmt, im anderen Fall auf die Energieunabhängigkeit verzichtet. Will man direkt und energieunabhängig messen, ist die Nachweisempfindlichkeit um mindestens den Faktor 1000 geringer.

Aus diesen Überlegungen stellte sich die Aufgabe:

Es muß ein neuartiger Strahlendetektor für niedere spezifische Aktivitäten entwickelt werden, der im Idealfall folgende Eigenschaften haben soll:

- Möglichkeit zur getrennten Messung der α - und β -Strahlung. (Eine getrennte Bestimmung der α - und β -Aktivität reicht zur Messung der weitaus größten Zahl der Radionuklide aus, zumal die seltenen K- oder L-Strahler bei der β -Messung, wenn auch mit geringerem Wirkungsgrad, miterfaßt werden.)
- Große Meßfläche mit guter Geometrie, möglichst 2π -Geometrie. (Zur Erzielung der notwendigen Empfindlichkeit braucht man größere Probenmengen, die nur mit größeren Detektoren als den bisher entwickelten ausgemessen werden können.)
- Möglichkeit zur weitgehend energieunabhängigen Messung. (Eine weitgehend energieunabhängige Messung läßt sich nur dann er-

zielen, wenn durch geringes Flächengewicht der Probe die Selbstabsorption auf ein Minimum reduziert wird. Auch diese Forderung kann bei geringer spezifischer Aktivität nur mit einem großflächigen Detektor erfüllt werden. Um die Absorption im Fenster des Detektors zu vermeiden, muß der Detektor als Innenzähler verwendbar sein.)

Da derartige Detektoren große Probemengen auszumessen gestatten, sind weitere Anreicherungsverfahren (z. B. Mitfällungs- und Adsorptionsverfahren (Lit. 20) oder Ionenaustauscherverfahren (Lit. 21, 22)) möglich, die für bestimmte Radionuklide weniger selektiv sind als das Eindampfverfahren.

2. DIE ENTWICKLUNG DES GROSSFLÄCHENPROPORTIONAL-ZÄHLROHRS ALS STRAHLENSCHUTZDETEKTOR

Beim Bau des neuen Detektortyps, der großflächig und als Innenzähler verwendbar sein sollte, und eine getrennte Meßmöglichkeit für α - und β -Strahler aufweisen mußte, wurde ausgegangen von den bekannten Detektoren

- Ionisationskammern,
- Auslösezählrohre,
- Proportionalzählrohre,
- Szintillationszähler,
- Halbleiterdetektoren.

Bereits bei der ersten Forderung, der großen Meßfläche, zeigt es sich, daß Halbleiter vorerst noch ausscheiden, da sie bisher nur in Größen von einigen Quadratzentimetern gefertigt werden können.

Die Forderung einer Meßmöglichkeit der α - und β -Strahlung ist mit Ionisationskammern nicht zu erfüllen, da das spezifische Ionisierungsvermögen der β -Strahlen zu gering ist, um mit einer Ionisationskammer im Impulsbetrieb messen zu können.

Wenn α - und β -Strahlen mit einem Detektor getrennt erfaßt werden sollen, kann auch kein Auslösezählrohr Verwendung finden. Der Grund hierfür ist der, daß Auslösezählrohre stets gleich hohe Impulse liefern, unabhängig davon, wie hoch die Primärionisation durch das in den Zählraum eingetretene Teilchen ist. Der Detektor kann deshalb α - und β -Teilchen nicht unterscheiden.

Szintillationszähler lassen sich in der erforderlichen Größe herstellen. Es gibt heute auch Doppelszintillatoren ("Dualphosphore") (Lit. 23), die eine getrennte Messung der α - und β -Strahlung mit einem Detektor gestatten. Hierzu werden für die β -Strahlung empfindliche Plastiksintillatoren verwendet, die zur Erfassung der α -Strahlung mit einer Schicht silberaktivierten Zinksulfids bedeckt sind.

Da diese Szintillatoren lichtempfindlich sind, muß der Detektor mit einer lichtdichten Folie abgedeckt werden, was eine "fensterlose" Messung unmöglich macht. "Fensterlos" kann nur in einer mit Lichtschleuse versehenen lichtdichten Kammer gemessen werden. Aber auch dann ist die Erfassung sehr energiearmer β -Strahlung nicht möglich, weil sie in der für β -Strahlung insensitiven ZnS(Ag)-Schicht absorbiert wird und so nicht zur Messung gelangt.

Alle Forderungen lassen sich dagegen erfüllen, wenn es gelingt, ein großflächiges 2π -Proportionalzählrohr zu bauen, das als Innenzähler im Gasdurchfluß betrieben wird.

2.1 Großflächenproportionalzählrohre zur Aktivitätsbestimmung geringer spezifischer Radioaktivität

2.11 Technische Ausführung

Das erste Großflächenproportionalzählrohr - im Gasdurchfluß als Innenzähler betrieben - wurde 1958 von Kiefer und Maushart (Lit. 24,25) in der Praxis erprobt. Es ging dabei nicht nur um die Erfüllung der oben angeführten Forderungen, es ging dabei auch darum, ein arbeitstechnisch rationelleres Verfahren zur Wasserüberwachung zu finden. (Wenn, wie beispielsweise im Kernforschungszentrum Karlsruhe jedes radioaktive Abwasser in den Instituten im 10 m^3 Abwassertank gesammelt und gemessen werden muß, um zu entscheiden, ob dieses Wasser in die konventionelle Kläranlage oder zur Dekontamination kommt, ist es notwendig, solche Messungen so schnell wie irgend möglich durchzuführen. Lange Meßzeit bedeutet ungleich mehr Auffangbehälter, mehr Auffangbehälter bedeuten aber wesentlich höhere Investitionskosten.) Das erschien aber nur möglich, wenn es gelingt, das Wasser in kurzer Zeit unmittelbar in der Meßschale einzudampfen, um die Arbeitszeit für die Überführung der Probe einzusparen.

Ein direktes Eindampfen in einer Meßschale ohne Spezialapparaturen (z. B. Lit. 26-28) läßt sich nur durchführen, wenn die Meßschale entsprechende Ausmaße hat. Ein Maß von 20 cm \varnothing für die Meßschale schien auch aus wirtschaftlichen Gründen vernünftig, weil es 20 cm \varnothing -Schalen als Halbfertigprodukte in der Industrie aus Weißblech gibt (Deckel von Konservendosen) und bei der großen Zahl der anfallenden Wasserproben die gebrauchten Meßschalen weggeworfen werden sollten. Von diesem 20 cm \varnothing -Maß ausgehend, wurde der erste Zähler gebaut.

Abb. 2-1 und Abb. 2-2 zeigen den Grund- und Aufriß dieses Zählers. Er war als Innenzähler gebaut und hatte 7 Zähldrähte als Schlaufen ("Mehrschlaufenzähler"). Dabei waren um eine zentrale Zählerschleife 6 weitere symmetrisch angeordnet. Durch diese Art der Geometrie hatte der Zählraum ein ziemlich großes Volumen, so daß mit einer langen Spülzeit zu rechnen war. Um die Spülzeit zu verkürzen, wurde das Zählgas direkt auf jede einzelne Schlaufe geblasen.

Mit diesem Detektor waren bei der Wassermessung bereits wesentlich bessere Ergebnisse als mit den bisherigen Verfahren zu erzielen. Der Wirkungsgrad des Detektors lag - Probe "masselos" über die ganze Zählfläche verteilt - bei 30 % für die β -Strahlung. Er war allerdings sehr stark von der Lage des Präparats abhängig. Ein punktförmiges Präparat wurde an verschiedenen Stellen der Zählchale mit verschiedenem Wirkungsgrad gemessen (Abb. 2-3). Bei gleichmäßiger Verteilung der Probe - wie sie normalerweise bei Wasserproben angenommen wird - sollte das keine Rolle spielen. Der Nulleffekt lag für eine Meßfläche von 314 cm^2 hinter 3 cm dickem Rotguß bei 180 β -Imp/min und 0,8 α -Imp/min.

Da zu diesem Zeitpunkt im Kernforschungszentrum Karlsruhe im wesentlichen Nullpegelmessungen durchgeführt wurden, also mit diesem Gerät neben der natürlichen Aktivität der Fallout bestimmt wurde, bestand nach einiger Zeit die Gefahr, daß das ungleichmäßige Ansprechvermögen des Detektors an verschiedenen Stellen

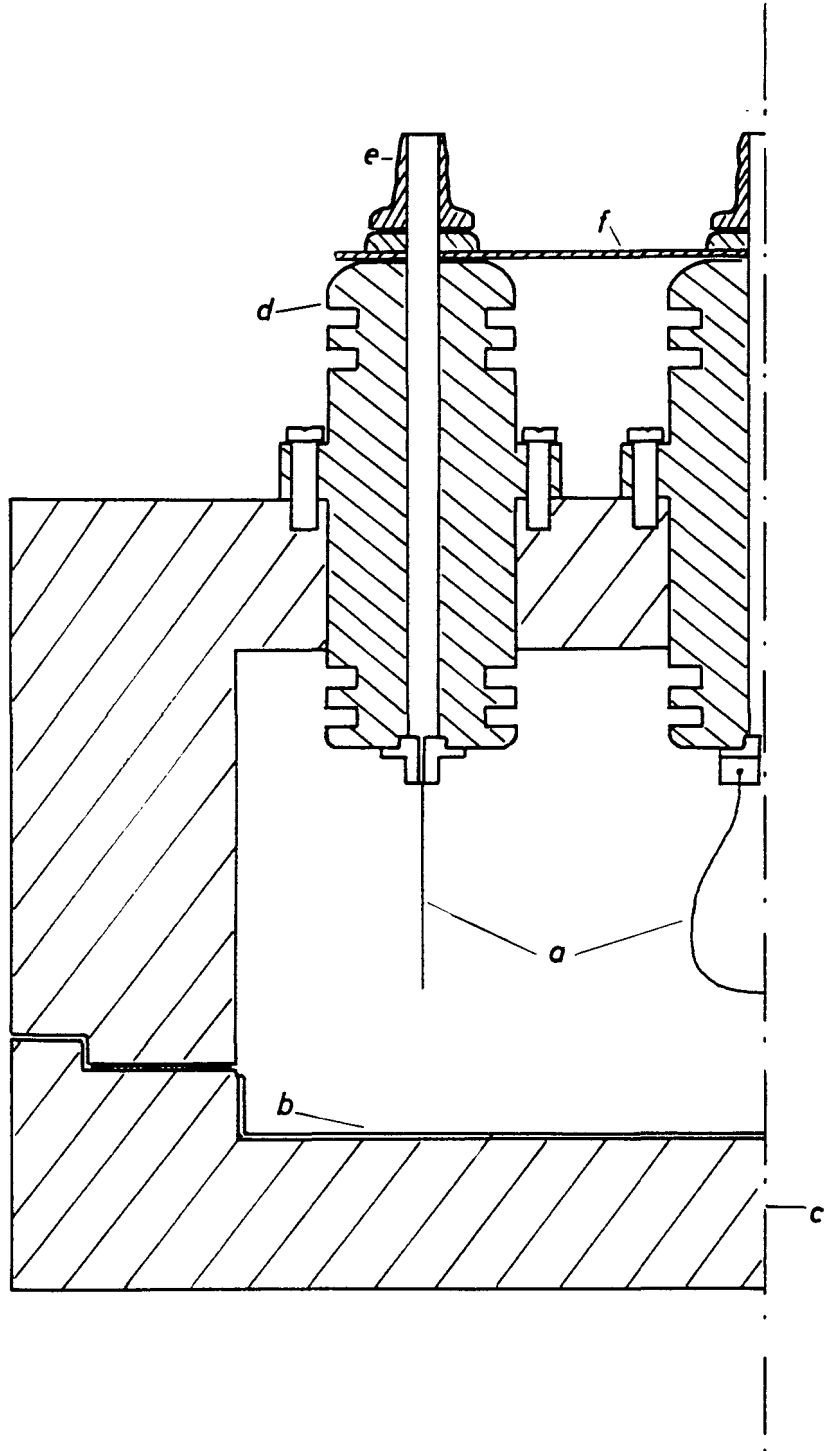


Abb. 2-1 Aufriß des Durchflußzählrohrs

- a = Zähldraht
- b = Probenschale
- c = abnehmbarer Bodenteil
- d = Trolitulisolator
- e = Methaneinflußstutzen
- f = Hochspannungszuführung

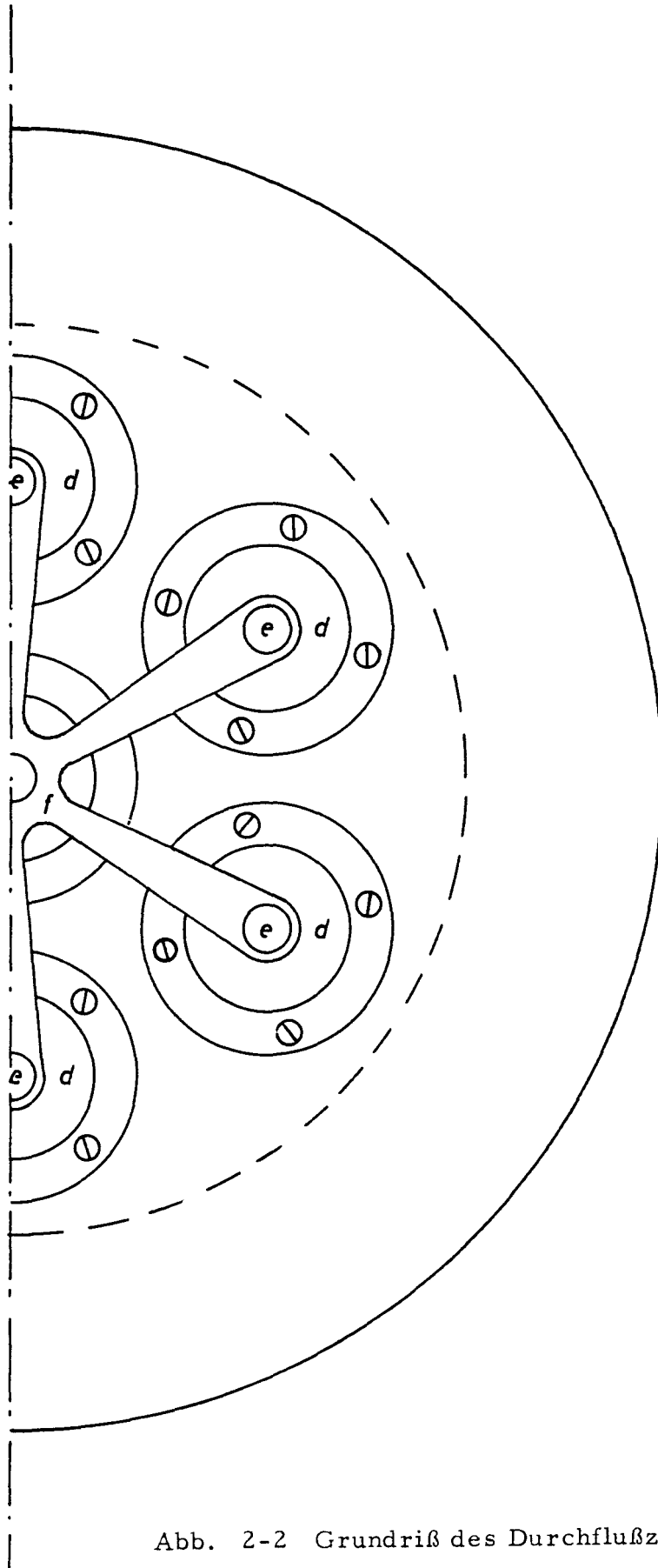


Abb. 2-2 Grundriß des Durchflußzählrohrs

d = Trolitulisolator
e = Methaneinflußstutzen
f = Hochspannungszuführung

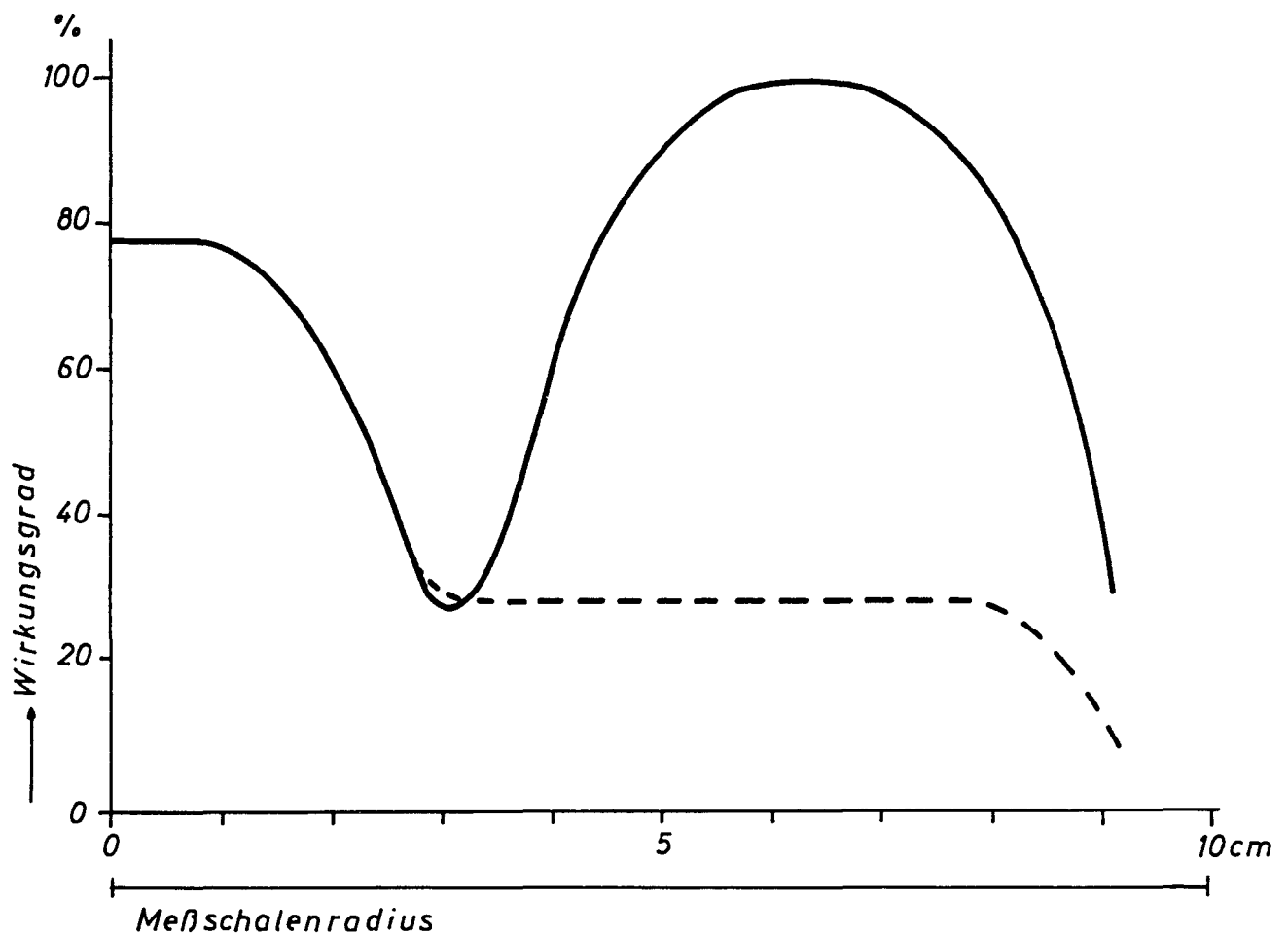


Abb. 2-3 Abhängigkeit des Wirkungsgrads von der Lage eines punktförmigen Präparats in der Zählchale. Die Präparatlage ist zur Messung auf einem Radius unterhalb einer äußeren Zählchale (—) und zwischen zwei äußeren Zählchalen (----) variiert worden. Als "100 % Wirkungsgrad" ist der bei 2π -Geometrie theoretische mögliche Wert einschließlich des Rückstreuanteils angesetzt (nach Kiefer H., Maushart R., Nukleonik 1, H. 3 (1958) S. 103).

der Meßfläche zu Fehlern führt. Es waren nämlich nach bestimmten Kernbombentests sogenannte "heiße" Teilchen gefunden worden (Lit. 29, 30), man mußte also damit rechnen, daß die Aktivität in der Probe nicht in jedem Fall gleichmäßig verteilt war, sondern daß an irgendeiner Stelle punktförmig eine ungleich höhere Aktivität war als an anderen Stellen. In einem solchen Fall hätte mit diesem Detektor auch kein richtiges Ergebnis erzielt werden können, wenn man mehrere Messungen derselben Probe vorgenommen hätte, wobei die Zählchale jeweils um einen bekannten Winkel hätte gedreht werden müssen. Das Ansprechvermögen des Zählers schwankt ja nicht nur entlang der Kreisbahn, sondern auch entlang des Durchmessers. Deshalb wurde zu einer neuen Konstruktion übergegangen, mit dem Ziel, einen Detektor zu bauen, der über die ganze Zählfläche praktisch die gleiche Ansprechwahrscheinlichkeit - von Randeffekten abgesehen - hat.

1959 wurde daher ein Zähler gebaut, der über der ganzen Meßfläche parallel gespannte Zähldrähte benutzte ("Gitterzähler"), die etwa 1 cm Abstand voneinander hatten (Lit. 20, 31). Damit wurde über der ganzen Meßschale ein gleichmäßiger Wirkungsgrad erreicht, der erst 1,5 cm vom Rand der Meßschale entfernt, auf 70 % des Werts in der Mitte der Meßschale abfiel. (Abb. 2-4). Die Gesamtansprechwahrscheinlichkeit wurde verdoppelt (60 % für die β -Strahlung von K^{40} , 41 % für die α -Strahlung des natürlichen Uran). Der Nulleffekt stieg zwar hinter 3 cm Blei auf 200 β -Imp/min an, was einer Erhöhung von 10 % entspricht, war aber relativ geringer geworden, da der Gesamtwirkungsgrad doppelt so hoch war wie vorher. Diese relative Erniedrigung des Nulleffekts war dadurch erreicht worden, daß der Zählraum durch die Gitterkonstruktion nur noch das halbe Volumen hatte wie beim Mehrschlaufenzähler trotz gleicher Meßfläche.

Eine sehr wichtige Verbesserung war die Einführung des auf Nullpotential liegenden Kathodengitters. Bei Innenzählern hat man allgemein die Eigenschaft, daß der Zähler auch von den elektrischen

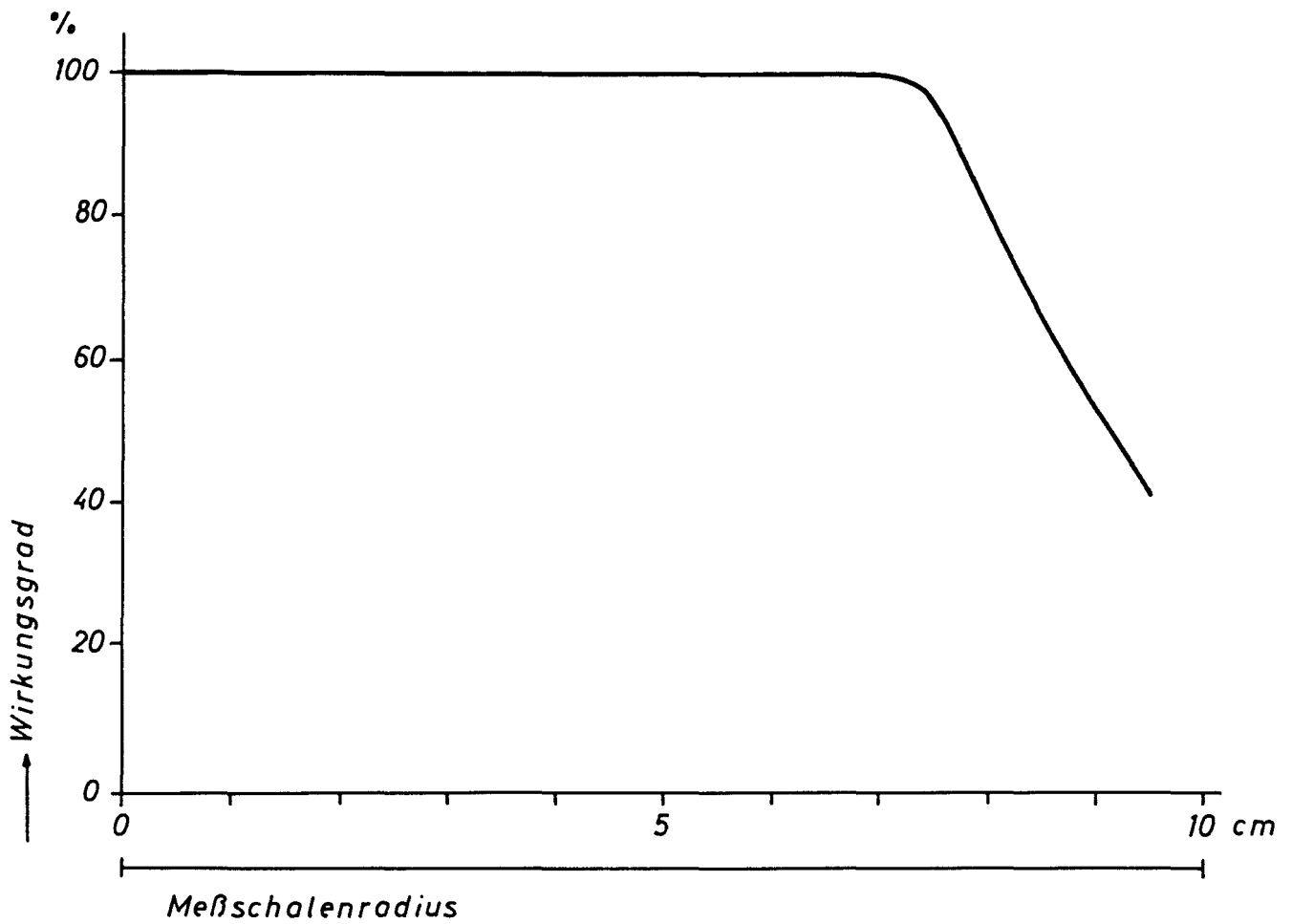


Abb. 2-4 Abhängigkeit des Wirkungsgrads von der Lage eines punktförmigen Präparats in der Zählchale. Als "100 % Wirkungsgrad" ist der bei 2π -Geometrie theoretisch mögliche Wert einschließlich des Rückstreuanteils angesetzt. Die Messung wurde in einem Methangroßflächendurchflußzähler SML 310 der Firma Münchener Apparatebau durchgeführt.

Eigenschaften des Präparats abhängt. Das hängt damit zusammen, daß die Zählchale beim üblichen Innenzähler als Kathode benutzt wird. Wenn nun das Präparat selbst nicht leitet, dann kommt es zu Aufladungen, die Fehlimpulse vortäuschen können. Außerdem ist es möglich, daß Staub aus der Probe elektrostatisch an die Zählchale hingezogen wird und so die Zählung beeinflusst. Durch die Einführung des Kathodengitters, das oberhalb des Präparats angebracht ist, befindet sich das Meßpräparat im feldfreien Raum. So wird die Messung völlig unabhängig von den elektrischen Eigenschaften des Präparats und es gibt keine Verschmutzung des Zählerinnern mehr durch Partikel, die von den geladenen Zähl-
drähten angezogen werden. Der Grundaufbau, abwechselnd Zähl-
gitter und Kathodengitter, ist bis heute die Grundkonstruktion aller
Großflächenproportionalzählrohre geblieben (Abb. 2-5).

Diese Anordnung, parallele Zählgitter und Kathodengitter zur Detektorkonstruktion zu verwenden, war bisher in der Literatur nicht beschrieben worden, obwohl es eine Reihe von Publikationen gibt, die sich mit Mehrzähl Drahtanordnungen beschäftigen. So beschreibt Friedman 1949 (Lit. 32) zur größeren Raumwinkelausnutzung ein Geiger-Müller-Zählrohr, das praktisch aus drei aufgeschnittenen halben Zählrohren zusammengesetzt ist, die von einem Zählrohrfenster abgeschlossen sind. Addison C. Sheckler (Lit. 33) baute 1951 einen mit Luft betriebenen und mit einer metallisierten Folie abgeschlossenen α -Proportionalzähler, der mehrere parallel gespannte Zähl-
drähte enthält. Der Nachteil dieser Detektoren ist - abgesehen von der Problematik der Luft als Zählgas, die Ello (1963) (Lit. 34) für zu instabil für diesen Detektortyp hält -, daß die metallisierte Folie als Kathode "atmet" und sich damit der Wirkungsgrad ändert. Bei der α -Messung macht sich das wegen der geringen Reichweite der α -Strahlen in Luft besonders stark bemerkbar. Derselbe Zählertyp wird auch von Sharpe und Taylor 1950 (Lit. 35) beschrieben. Beiden Arbeiten dürfte ein entsprechendes Patent von Thompson (1945) zugrunde liegen (Lit. 36).

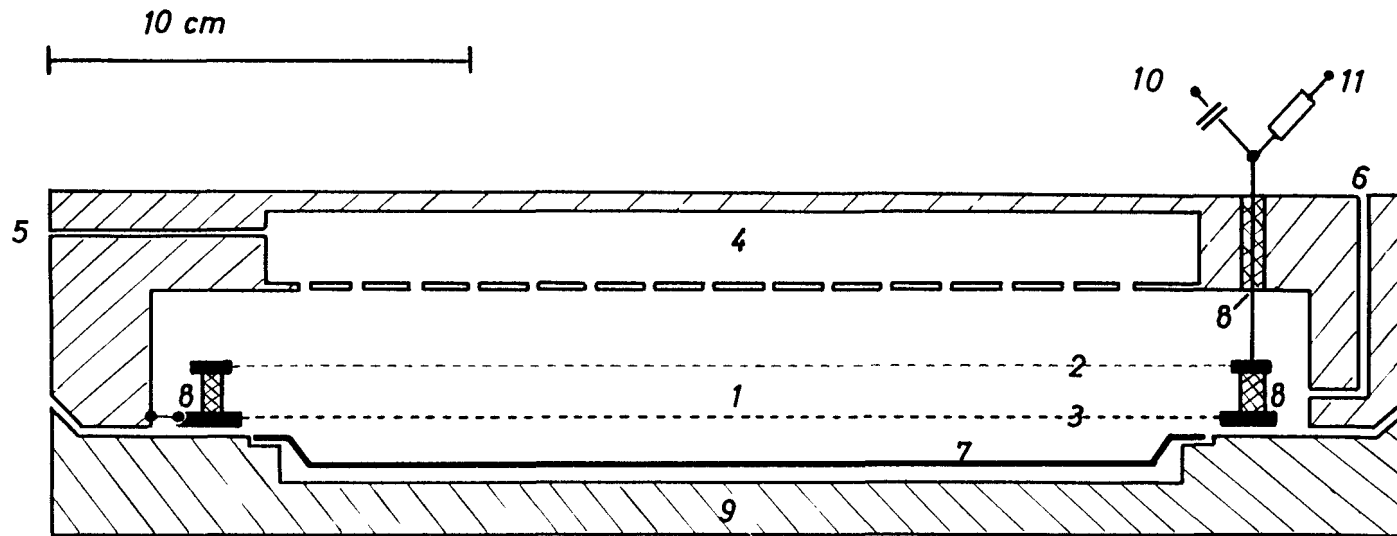


Abb. 2-5 Schnitt durch ein Großflächenproportionalzählrohr

- | | |
|---------------------|---------------------------|
| 1 Zählraum | 7 Probenschale |
| 2 Zählgitter | 8 Teflonisolatoren |
| 3 Nullgitter | 9 Schieber zur Aufnahme |
| 4 Gasverteilung mit | der Probenschale |
| Prallplatte | 10 Impulsausgang |
| 5 Gaszuführung | 11 Hochspannungszuführung |
| 6 Gasabführung | |

Theodorsson (1959)(Lit. 37) baute zur Messung von α - und β -Proben einen Proportionalzähler, der ebenfalls parallel gespannte Drähte verwendet, die aber abwechselnd als Zähl draht und Kathode geschaltet sind. Diese Anordnung hat den Nachteil, den der Mehrschlaufenzähler hatte, die Ansprechempfindlichkeit ändert sich wiederholt über die ganze Meßfläche. Noch weiter gehen verschiedene Konstruktionen wie die von Prokof'ev und Sosnovskij (1959) (Lit. 38), die in ihrer Mehrzähl drahtanordnung für Koinzidenzmessungen jeden Zähl draht mit einem regelmäßigen Sechseck aus 6 bzw. 12 Kathodendrähten umgaben.

2.12 Weiterentwicklung

Die Weiterentwicklung des Großflächenproportionalzählrohrs zur Messung von Proben geringer spezifischer Aktivität setzt sich im wesentlichen zwei Ziele:

- Erhöhung der Meßgenauigkeit,
- Verkürzung des Arbeitsvorgangs für jede Messung.

2.121 Höhere Meßgenauigkeit

Da bei dieser Art von Detektor die optimale Geometrie (2π) - bis auf Randeffekte - bereits erreicht ist, läßt sich eine höhere Meßgenauigkeit nur noch dann erzielen, wenn es gelingt, den Nulleffekt zu verringern. Durch Abschirmung mit ca. 5 cm Blei oder 10 cm Stahl läßt sich die Umgebungsstrahlung weitgehend herabsetzen. Eine weitere Herabsetzung des Nulleffekts erzielt man dadurch, daß ausgewähltes Material zur Herstellung der Zähler verwendet wird. Um schließlich den durch kosmische Strahlung hervorgerufenen Nulleffekt zu reduzieren, wurde über den normalen Zähler ein zweiter Zähler eingebaut, der in Antikoinzidenz zum ersten Zähler geschaltet ist (Lit. 31). Mit diesem Schutz zähler gelingt es, den Nulleffekt pro cm^2 Meßfläche um ca. $1/2$ Imp/min zu verringern und damit einen Nulleffekt zu erzielen, der für die β -Strahlung unter $0,1$ Imp/ cm^2 Zählfläche ist. Damit ist ein spe-

zifischer Nulleffekt erreicht, der dem von speziellen Low-level-Anlagen gleichkommt.

In manchen Fällen, vor allem wenn durch eine radiochemische Trennung nur eine Fraktion einer Probe untersucht werden soll, reicht die Zählprobe nicht aus, um die üblichen Zählchalen gleichmäßig zu bedecken, es wäre also nicht notwendig, so große Zählchalen zu benutzen. In diesem Fall hat der Zähler einen absolut größeren Nulleffekt als etwa eine kleine Low-level-Anlage. Deshalb wurde ein Zähler gebaut, bei dem es möglich ist, das Zählgitter auszuwechseln und jeweils der Probengröße anzupassen (Lit. 39). So erreicht man auf der einen Seite immer die optimale Geometrie von 2π und trotzdem eine Zählfläche, die so klein wie irgend möglich ist und damit auch den geringstmöglichen Nulleffekt hat. Eine derartige Low-level-Anlage ist in Abb. 2-6 dargestellt.

Es besteht eine Möglichkeit zur Verringerung des "Nulleffekts", da häufig einige nicht von Strahlung herrührende Störimpulse mitgezählt werden. Solche Störimpulse lassen sich nicht diskriminieren, weil die Nutzimpulse in Proportionalzählrohren gegenüber Geiger-Müller-Zählrohren sehr klein sind (sie liegen in der Regel zwischen 0,5 - 10 mV). Wenn das Zählrohr mit höheren Spannungen betrieben werden muß, nimmt die Zahl der Störimpulse erfahrungsgemäß zu. Deshalb muß angestrebt werden, die Betriebsspannung am Zählrohr herabzusetzen.

Ein Weg ist der, daß man die Verstärkung der Impulse erhöht. Damit gelangen noch kleinere Impulse als bisher zur Zählung. Die Grenze dieses Verfahrens ist das Eigenrauschen des Verstärkers. Außerdem muß man damit rechnen, daß mit höherer Verstärkung weitere Störimpulse, die vorher unter die Zählschwelle gefallen sind, zur Zählung gelangen. Aus diesem Grund wurde beispielsweise von Sheckler (1951) (Lit. 33) in den Proportionalzähler um

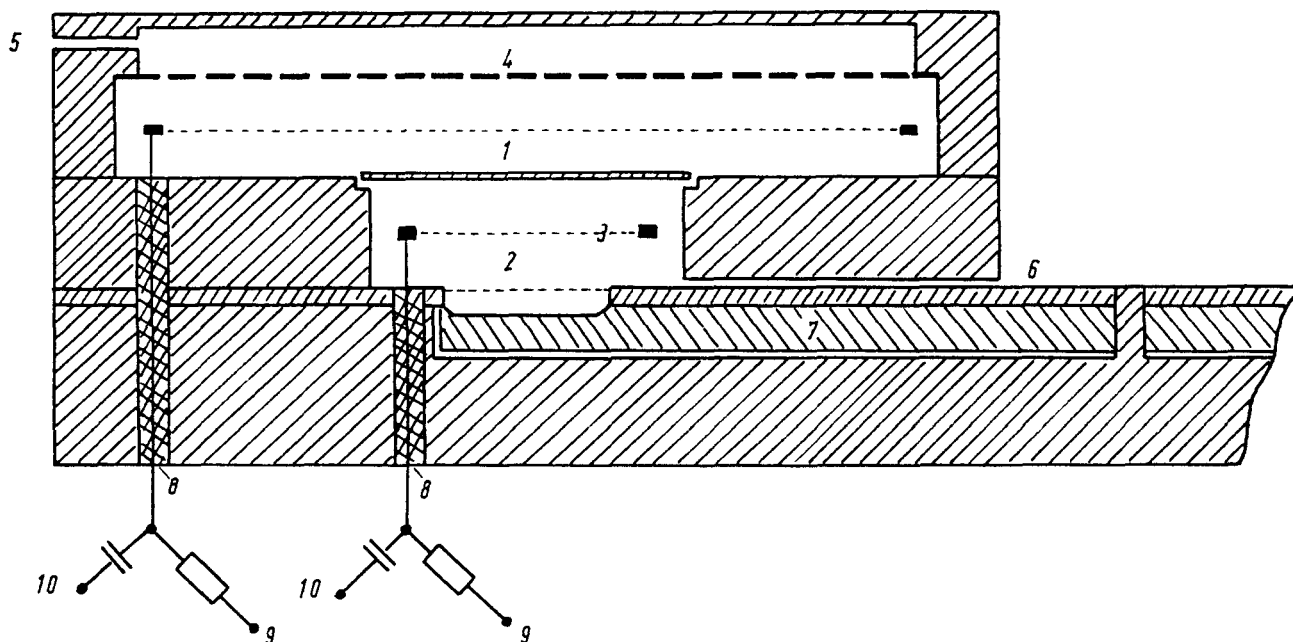


Abb. 2-6 Schema einer 2π -Low-level-Anlage mit Auswechselgittern

- | | | | |
|---|----------------------------|----|---------------------------------|
| 1 | Schutzzählrohr | 6 | Gasausfluß |
| 2 | Meßzählrohr | 7 | Drehteller mit Präparatehaltern |
| 3 | auswechselbares Zählgitter | 8 | Teflonisolatoren |
| 4 | Gasverteilung | 9 | Hochspannungszuführung |
| 5 | Gaszufluß | 10 | Impulsausgang |

das Zählsystem ein geerdeter Schutzring eingebaut, wie er auch heute wieder in manchen Großflächenproportionalzählrohren zu finden ist.

Der zweite Weg ist der, dafür zu sorgen, daß bereits der Detektor höhere Impulsamplituden liefert. Die Impulshöhe ist umgekehrt proportional:

der Kapazität des Systems Zählgitter-Kathode

und ist proportional:

der Ionisierungsstrecke des Teilchens im Zählvolumen,
dem Gasdruck,
der spezifischen Ionisation,
dem Gasverstärkungsfaktor,
sowie der Elementarladung.

Die Impulsamplitude kann also folgendermaßen erhöht bzw. bei gleicher Impulshöhe die Betriebsspannung gesenkt werden:

- Die Kapazität des Zählsystems wird möglichst gering gehalten, was eine rein mechanische Konstruktionsanforderung darstellt.
- Die Ionisierungsstrecke des Teilchens im Zählvolumen könnte erhöht werden. Das ist grundsätzlich nur möglich, wenn sich die Teilchen im Zählvolumen nicht sowieso schon totlaufen, wie das bei vielen Detektoren für α -Strahlung der Fall ist. Für β -Strahlung hat man zwar die Möglichkeit, das Zählvolumen zu erhöhen, man erhöht damit aber gleichzeitig den Nulleffekt. Aus diesen Gründen ist dieser Weg unzweckmäßig.
- Der Gasdruck kann bei Innenzählern und bei Zählern, die zur Verringerung der Wandabsorption mit Folien von nur $0,9 \text{ mg/cm}^2$ abgeschlossen sind, nicht erhöht werden.

- Die spezifische Ionisation läßt sich durch Verwendung anderer Zählgase beträchtlich erhöhen. So benötigt beispielsweise derselbe Detektor mit Methan betrieben eine Zählspannung zur Messung von β -Strahlen von 4 500 V, mit einem Gemisch von 90 % Argon und 10 % Methan nur 3 200 V. Das hängt in erster Linie damit zusammen, daß das Argon-Methangemisch als wesentlich dichteres Gas mehr Energie absorbiert, aber auch damit, daß die pro Ionenpaar verbrauchte Energie beim Methan 30,2 eV, beim Argon nur 27 eV (Lit. 40) beträgt. Der Grund, warum trotzdem nach Möglichkeit technisches Methan dem Argon-Methangemisch vorgezogen wird, liegt ausschließlich im Preis, da das Gemisch etwa 4mal teurer ist.

In diesem Zusammenhang muß noch ein Effekt erwähnt werden, der zwar die spezifische Ionisation nicht beeinflusst, aber deshalb störend wirkt, weil durch ihn ein Teil der Elektronen vorzeitig abgefangen wird und damit die Impulshöhe erniedrigt wird. Das sind Verunreinigungen im Zählgas, die die Eigenschaft haben, elektronegative Ionen zu bilden, wozu vor allem O_2 und Wasserdampf gehören. Andersson et al. (1961) (Lit. 41) gibt beispielsweise für ein mit Methan im Durchfluß betriebenes Großflächenproportionalzählrohr in einem Hand- und Fußmonitor an, daß bereits durch die Abschlußfolie in das Zählgas eindiffundierter Sauerstoff von insgesamt 0,6 % die Impulshöhen im Mittel um 15 % erniedrigt. Selbstverständlich gilt dieser Wert speziell für diese Detektorbauart und ist allgemein vom Gasdruck und von der Elektronenlaufzeit abhängig.

- Der Gasverstärkungsfaktor wird durch Erhöhung der Feldstärke im Zähler vergrößert. Bei vorgegebener Spannung lassen sich durch eine zweckmäßige Zählerbauart wesentlich höhere Feldstärken erzielen. Dünnere Zähldrähte und kleiner Abstand zur Kathode erhöhen die Feldstärke. Schmidt (1963) (Lit. 42), benutzt beispielsweise 10 halbzylinderförmige Kathoden mit ein-

gezogenen Zähldrähten von 36 μm Durchmesser, um mit Betriebsspannungen für die β -Messung unter 3 000 V, für die α -Messung unter 2 000 V auszukommen.

Kimmel (1962) (Lit. 43) setzt das Zählgitter nicht mehr symmetrisch zwischen die beiden Kathodengitter, sondern asymmetrisch nahe an eines der Kathodengitter. Dadurch wird ebenfalls die Feldstärke beträchtlich erhöht und entsprechend die Betriebsspannung auf Werte $< 3\,000\text{ V}$ für die β -Messung und $< 2\,000\text{ V}$ für die α -Messung herabgesetzt, um die Verwendung einfacher 3 kV Hochspannungsgeräte zu ermöglichen.

2.122 Verkürzung des Arbeitsvorgangs

Durchflußzähler haben gegenüber abgeschlossenen Zählrohren den Nachteil, daß sie erst dann meßbereit sind, wenn das Zählgas die Luft weitgehend aus dem Zählraum verdrängt hat. Das spielt keine Rolle, wenn Durchflußzähler abgeschlossen sind, da es sich hier bei der Inbetriebnahme um einen einmaligen Vorgang handelt, es spielt aber eine Rolle, wenn der Zähler als Innenzähler betrieben wird. Dann muß nämlich nach Einsetzen einer jeden Probe einige Zeit mit dem Zählgas gespült werden, bis der Detektor meßbereit ist. Bei kleineren Durchflußzählern dauert die Spülzeit etwa 10 min. Durch technische Maßnahmen ist es gelungen, auch beim Großflächenproportionalzählrohr die Spülzeit auf ca. 10 min herunterzudrücken, indem beispielsweise an verschiedenen Stellen das Gas einströmt (s. Abb. 2-1) oder sogar über eine Prallplatte (s. Abb. 2-5) gleichmäßig im Zählraum verteilt wird.

Für ein rationelles Arbeiten ist es aber erwünscht, die Spülzeit praktisch auf Null herabzusetzen. Der erste Weg, den man ging, war der, die Innenzähler nicht mehr als echte Innenzähler zu betreiben, sondern mit einer auswechselbaren Folie zu versehen.

Diese Folie hatte ein Flächengewicht von $0,9 \text{ mg/cm}^2$ und wurde immer dann eingesetzt, wenn man sicher war, daß man es nicht mit extrem energiearmen Strahlern (z. B. C^{14} oder S^{35}) zu tun hatte.

So konnte zwar die Spülzeit praktisch vermieden werden, aber bei der Messung stellte es sich heraus, daß der Zähler dadurch eine geringere Ansprechwahrscheinlichkeit bekam. Das galt vor allem für β -Strahlung niedriger Energie sowie für α -Strahlung. Die Gründe hierfür waren folgende:

- Bei einem 2π -Zähler durchdringt die Strahlung bevorzugt in Schrägdurchgang die Fensterfolie und hat deshalb in Wirklichkeit einen größeren Weg in der Folie zu durchlaufen als bei Zählern, bei denen die Strahlung infolge deren schlechter Geometrie gerichtet ist. Das ist von besonderer Bedeutung, weil der Anteil an energiearmer Strahlung bei jeder β -Messung deshalb ziemlich hoch ist, weil bei dieser Art von Zähler die rückgestreuten β -Teilchen, die nun nur noch eine geringe Restenergie haben, einen wesentlichen Anteil am Meßeffect ausmachen.
- Der zweite Grund ist der, daß beim nur durch ein Kathodengitter abgeschlossenen Zählraum dieser nicht eben mit dem Gitter abschließt, sondern durch die Gitterdrähte durchgreift. Dadurch werden von den Teilchen erzeugte Ionen, die normalerweise nicht mehr in den Zählraum gelangt wären, durch dieses Feld in den Zählraum hereingezogen und erhöhen den Wirkungsgrad, was bei mit Folien abgeschlossenen Zählern entfällt.

Erfahrungsgemäß setzt deshalb selbst ein Fenster von nur ca. 1 mg/cm^2 Flächengewicht den Wirkungsgrad für α -Strahlung sowie für energiearme β -Strahlung etwa um den Faktor 4 herab, bei harter β -Strahlung immerhin noch um 30 - 40 %. Das bedeutet, daß bei geringen Aktivitäten zwar an Spülzeit gespart wird, dafür aber die Meßzeit ungleich länger wird, um gleiche Genauigkeit zu

erzielen. Eine Folie ist deshalb nur dann zu empfehlen, wenn es sich nicht um energiearme β -Strahlung handelt, und wenn die Aktivität nicht zu gering ist.

Eine zweite Möglichkeit, den Spülvorgang zu vermeiden, wäre der, daß nicht mehr mit Methan, sondern mit Luft als Zählgas gearbeitet wird. Versuche mit Luft sind schon häufig durchgeführt worden, und es hat sich immer gezeigt, daß Luft, weil der Sauerstoff negative Ionen bildet, sehr schlecht als Zählgas für β -Messungen geeignet ist. Für die α -Messung genügt die Luft als Zählgas, wie das in Abb. 2-7 aufgenommene α -Plateau zeigt.

Davon ausgehend wird ein Zähler vorgeschlagen, der die Arbeitszeit wesentlich verkürzen kann (Lit. 44). Es werden zwei getrennte Zähler übereinander gebaut, von denen der untere Zähler nur zur Messung von α -Strahlen dient und mit Luft betrieben wird, also fensterlos sein kann. Der obere Zähler enthält ein Fenster, arbeitet mit höherer Spannung und dient zur β -Messung. Der durch das dünne Fenster reduzierte Wirkungsgrad für β -Strahlung kann dabei in Kauf genommen werden. So ist es möglich, in einem Meßvorgang gleichzeitig α - und β -Strahlung getrennt zu messen und das lästige Spülen zu vermeiden. Auf diese Weise läßt sich die Betriebszeit eines Zählers pro Probe beispielsweise von 30 Minuten auf 10 Minuten herabsetzen und damit den gesamten Arbeitsvorgang wesentlich verkürzen.

2.13 Ergebnisse

2.131 Typische Eigenschaften des Detektors

Von einem der heute üblichen Standardzähler mit Antikoinzidenz, die mit 5 cm Blei oder 10 cm Stahl abgeschirmt sind, können folgende technische Daten erwartet werden:

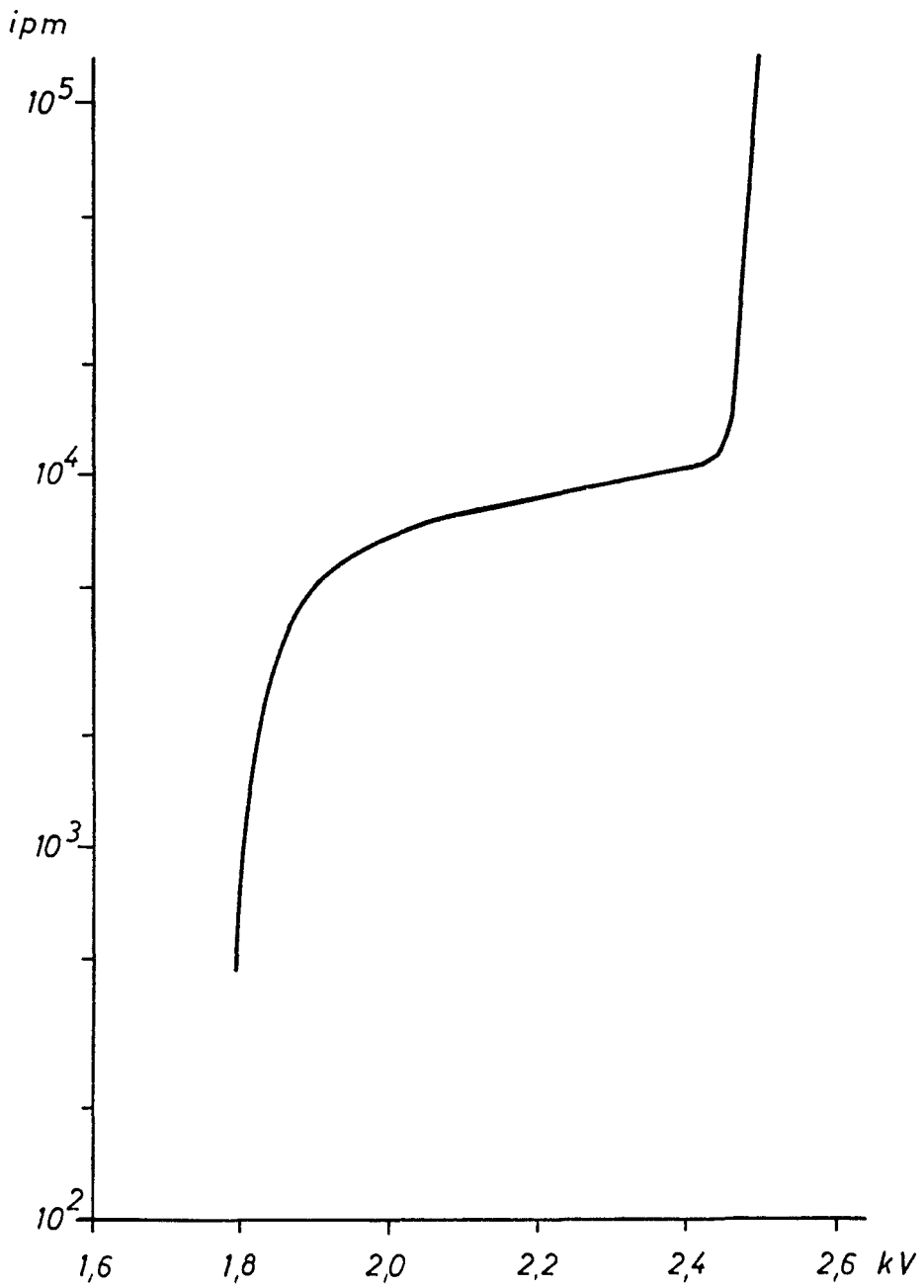


Abb. 2-7 α -Plateau eines mit Luft im Durchfluß betriebenen Großflächenproportionalzählrohrs

Meßfläche:	314 cm ² (20 cm \emptyset -Probeschalen zum Wegwerfen)
Geometrie:	2 π
wahlweiser Betrieb des Zählers mit und ohne Fenster durch auswechselbare Folie von:	1 mg/cm ² Flächengewicht
Zählgas:	technisches Methan
Spülzeit:	ca. 10 Minuten
Betriebsspannung im α -Plateau:	1500 - 2000 V
Betriebsspannung im β -Plateau:	rd. 3000 V
Impulshöhe:	1 - 10 mV
α -Nulleffekt:	1 Imp/min
β -Nulleffekt:	30 bzw. 50 Imp/min, je nachdem, ob 20 cm Stahl- oder 5 cm Blei-Abschirmung verwendet wurde (hängt auch vom Aufstellungsort ab)
α -Wirkungsgrad für eine in der Meßschale flächig verteilte Probe:	42 %
β -Wirkungsgrad bei flächig verteilter Probe in der Meßschale (gilt für Meßschalen aus Weißblech):	60 %
Plateaulänge des α -Plateaus:	500 V
Plateaulänge des β -Plateaus:	500 V
Plateausteigung des α -Plateaus:	0,5 % / 100 V
Plateausteigung des β -Plateaus:	0,5 % / 100 V
Plateausteigung des Nulleffekts im β -Bereich:	5 % / 100 V

} aufgenommen
mit einer
Punktquelle

In Abb. 2-8 sind Plateaukurven gezeigt, die an einem derartigen Zähler aufgenommen wurden, und zwar mit sowohl punktförmig als auch flächig aufgebrachtten α - und β -Proben. Außerdem ist die Plateaukurve für den Nulleffekt aufgenommen (Abb. 2-9).

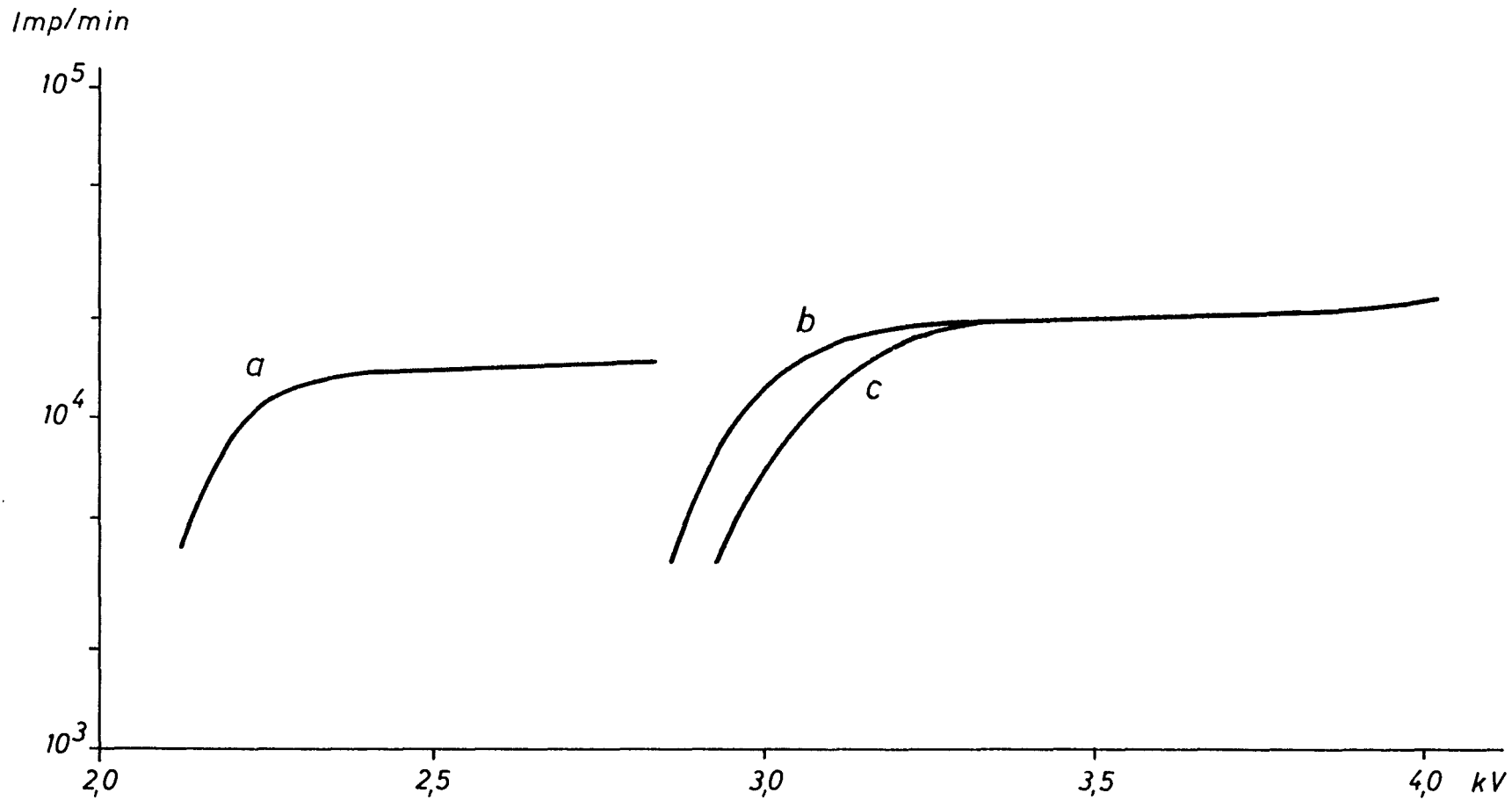


Abb. 2-8 Plateaukurven eines Großflächenproportionalzählrohrs, aufgenommen mit
 a) Po^{210} , flächig in der Meßschale verteilt (α -Strahler)
 b) Pm^{147} , punktförmig (β -Strahler)
 c) Tl^{204} , flächig in der Meßschale verteilt (β -Strahler)
 (nach Kiefer H., Maushart R., Nucleonics 19, No. 12 (1961) S. 51)

Abb. 2-9 Plateaukurve des Nulleffekts eines Großflächenproportionalzählrohrs

- a) in 10 cm Stahlabschirmung
- b) in 10 cm Stahlabschirmung und mit einem in Antikoinzidenz geschalteten Schutz-zähler versehen.

(Die Messung wurde durchgeführt mit einem Großflächenproportionalzählrohr der Firma Friesseke und Hoepfner)

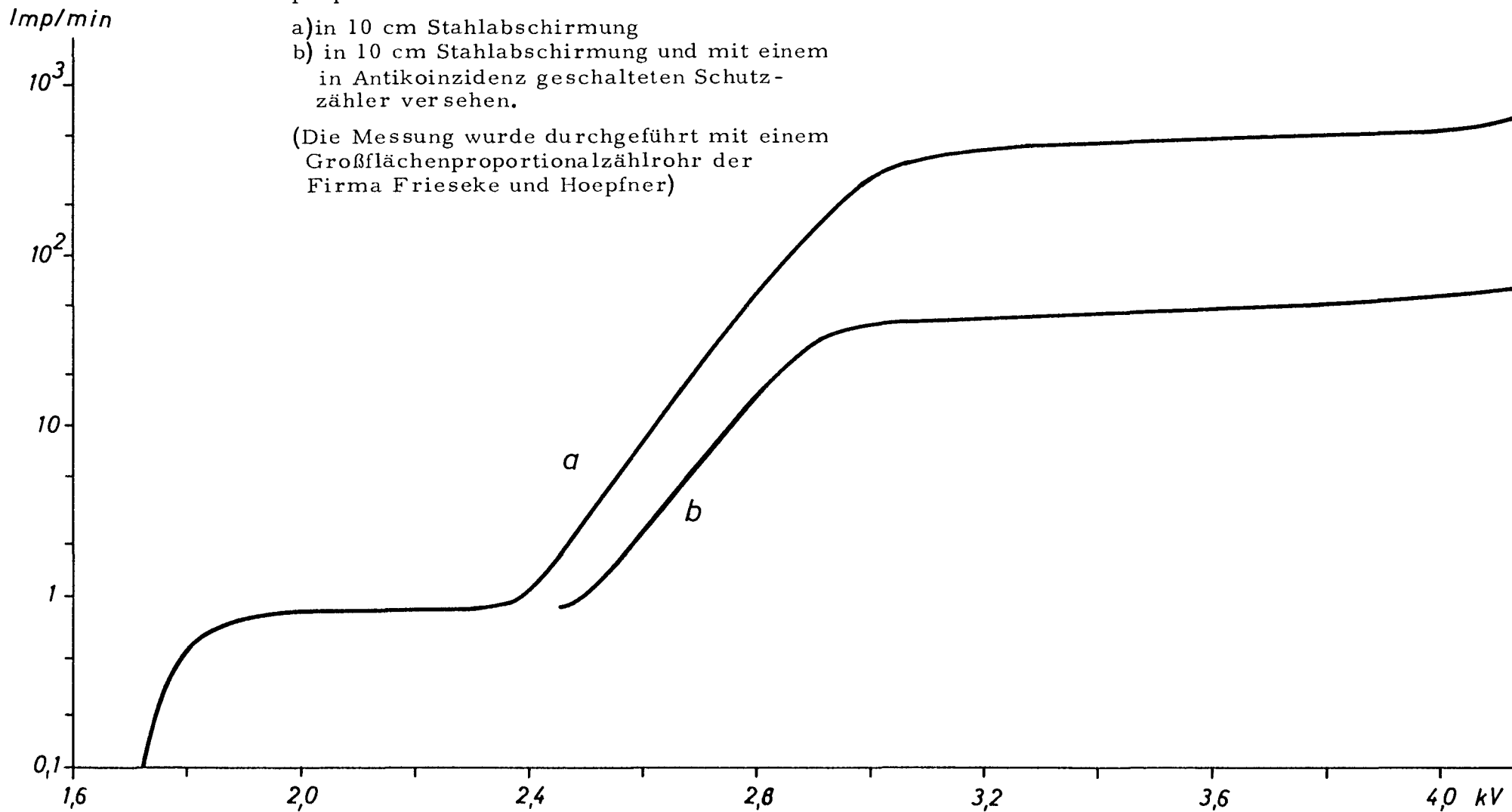


Abb. 2-10 zeigt den experimentell bestimmten β -Wirkungsgrad des Detektors für verschiedene Isotope in Abhängigkeit von der Flächenbelegung in der Schale. Daß der Wirkungsgrad bei 0 mg/cm^2 bei den verschiedenen Strahlern verschieden ist, ist auf den Einfluß der Rückstreuung an der Unterlage, also an der Zählchale, zurückzuführen.

Aus all diesen Angaben läßt sich ableiten, daß die Nachweisgrenze des Detektors sowohl für α - als auch für β -Strahlung bei einer spezifischen Radioaktivität von 1 pc/g liegt.

2.132 Seine Vorteile bei der Aktivitätsbestimmung

Dieser Detektor erfüllt die oben aufgezählten Forderungen, die die Strahlenschutzmeßtechnik an eine Anlage zur Radioaktivitätsbestimmung geringer spezifischer Aktivitäten, etwa der Wasser, stellen muß:

- α - und β -Strahlung können getrennt gemessen werden, womit fast alle Radionuklide erfaßt sind. Ausnahmen sind reine Röntgenstrahler und Tritium. Aber auch diese Strahler werden gezählt, wenn auch mit einem geringeren Wirkungsgrad, der nach unseren Messungen rund eine Zehnerpotenz niedriger liegt, als der Wirkungsgrad der β -Strahlung.
- Die Meßfläche von 314 cm^2 ist groß genug, um auch die im Rückstand von beispielsweise 5 l Wasser angereicherte Radioaktivität mit hohem Wirkungsgrad ausmessen zu können, was für Strahlenschutzmessungen praktisch immer ausreicht.
- Die Geometrie des Zählers ist praktisch 2π . Eine bessere Geometrie ist selten sinnvoll, da 4π -Zähler eine langwierige Probenvorbereitung erfordern, die, wie weiter unten gezeigt, nur in Sonderfällen von Vorteil ist.

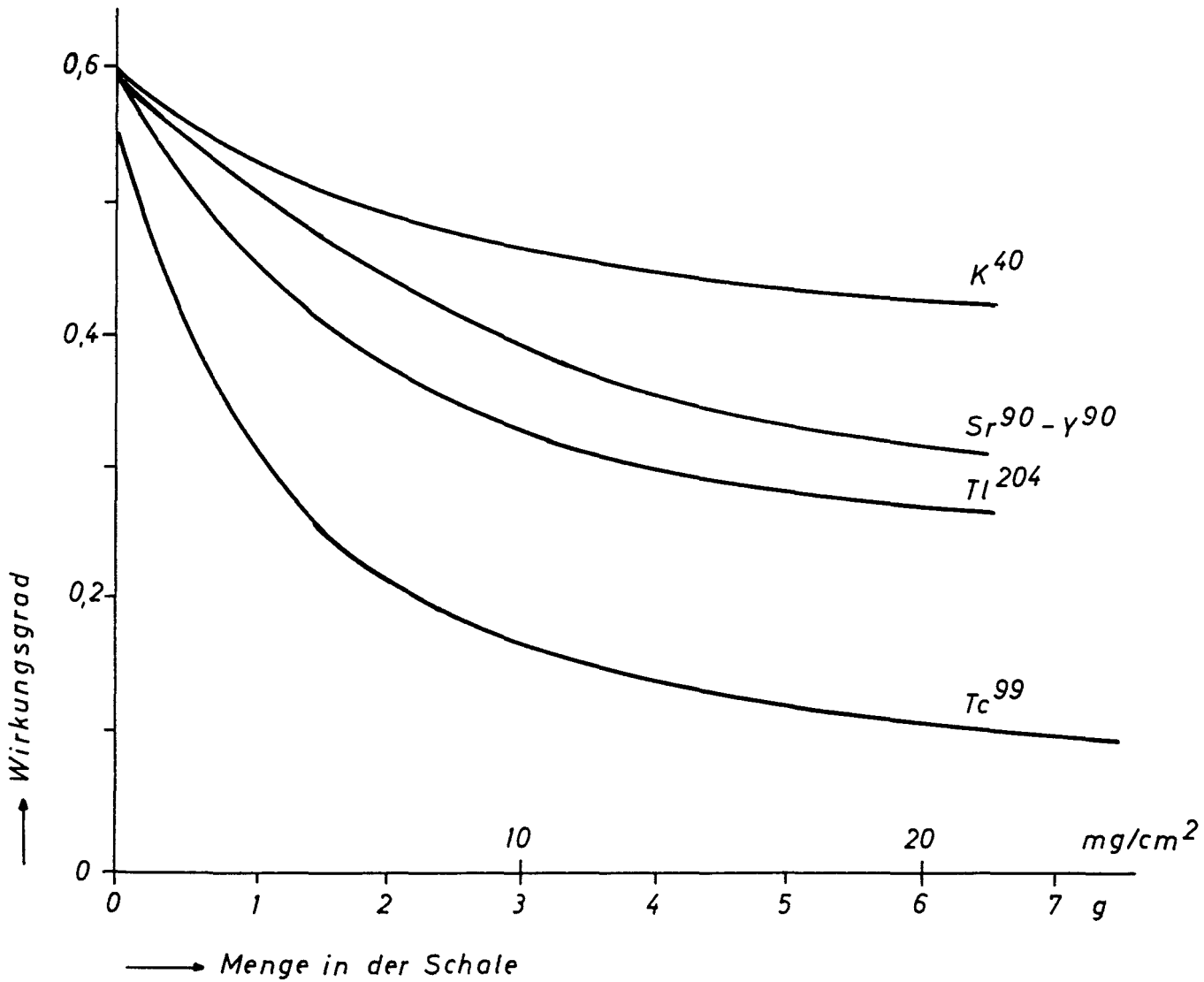


Abb. 2-10 Absoluter β -Wirkungsgrad eines Großflächenproportionalzählrohrs für verschiedene Radionuklide in Abhängigkeit von der Flächenbelegung der Probenschale (aus Dannecker A., Kiefer H. und Maushart R., Nukleonik 1 (1959) S. 319)

- Es ist eine weitgehend energieunabhängige Messung möglich, da im Innenzähler keine Fensterabsorption stattfindet. Die Energieabhängigkeit der Messung infolge Rückstreuung kann bei der für Strahlenschutzmessungen erforderlichen Genauigkeit vernachlässigt werden. Sie läßt sich, falls notwendig, dadurch vermeiden, daß die Meßschalen und evtl. die Auflage der Meßschalen aus wenig rückstreuendem Material, z. B. Kunststoff gefertigt werden. Dabei muß aber beachtet werden, daß das völlige Fehlen der Rückstreuung auch den Zählerwirkungsgrad entsprechend heruntersetzt, und zwar im höchsten Fall bei Weißblechmeßschalen um ca. 30 %.

Wie stark sich die Selbstabsorption auswirkt, hängt von der Probe ab, sie ist aber auf alle Fälle wesentlich geringer als bei üblichen Meßmethoden, da infolge der großen Zählchale die Probe auf eine Fläche von 314 cm^2 verteilt ist und so ein Flächengewicht von nur wenigen mg/cm^2 bei üblichen Wasserproben mit sich bringt. Ein mehrjähriger Erfahrungswert für die Abwässer des Kernforschungszentrums Karlsruhe ist der, daß bei 500 cm^3 eingedampften Wassers, was für die von den Aufsichtsbehörden geforderte Meßgenauigkeit genügt, pro cm^2 Meßfläche der Rückstand wenig unter 1 mg liegt. Wie hoch die Korrekturfaktoren für die unterschiedliche Selbstabsorption verschiedener Strahler sein können, wurde im Zusammenhang mit Untersuchungen über die Möglichkeit der Radioaktivitätsbestimmung in Meerwasser (Lit. 45) experimentell ermittelt und ist in Tabelle 2-1 dargestellt.

Bei der Probenvorbereitung bringt der Detektor ebenfalls Vorteile. Sie bestehen darin, daß

- die Fehler bei der Probenvorbereitung entscheidend vermindert werden und damit eine höhere Meßgenauigkeit erzielt wird,
- durch die Möglichkeit, andere Anreicherungsverfahren zu verwenden, die Überwachungsmöglichkeit auf weitere Radionuklide ausgedehnt wird,

Tab. 2-1

Korrekturfaktoren für die unterschiedliche Selbstabsorption verschiedener Strahler bei Verwendung von K^{40} als Eichsubstanz

Strahler	Flächenbelegung (mg/cm ²)				
	5	10	20	50	100
K^{40}	1	1	1	1	1
Uranspaltprodukte (Alter 8 Wochen)	1,06	1,11	1,17	1,24	1,32
Uranspaltprodukte (Alter etwa 2 Jahre)	1,15	1,29	1,36	1,49	1,56
Tl^{204} (0,76 MeV)	1,24	1,43	1,61	1,96	2,27
Tc^{99} (0,29 MeV)	2,04	2,86	3,85	5,88	8,34
C^{14} (0,158 MeV)	3,13	5,26	9,10	18,5	32,3

Die hier genannten Korrekturfaktoren gelten für gleichmäßig verteilte Proben in Meßschalen von 314 cm² Fläche und für fensterlose Messung in 2 π -Geometrie (nach Kiefer, H. und Maushart, R., Deutsche Hydrographische Zeitschrift 14, Heft 1, 1961).

- das Meßverfahren rationeller als bisher durchzuführen ist.

Wird zur Anreicherung das Eindampfverfahren gewählt, so besteht die Schwierigkeit darin, den Eindampfrückstand verlustfrei aus dem Eindampfgefäß in die Zählchale zu überführen. Erfahrungsgemäß bleiben an den Wandungen des Eindampfgefäßes erhebliche Mengen Aktivität fast masselos hängen. Wandadsorptionsverluste lassen sich zwar dadurch vermeiden, daß man von den zu messenden Radionukliden Trägersubstanzen zugibt. Dazu muß bekannt sein, welche Radionuklide erfaßt werden sollen. Außerdem hat dieses Verfahren den Nachteil, daß der Rückstand ungleich größer wird als vorher und damit auch der Fehler hervorgerufen durch die Selbstabsorption in der Probe erhöht wird.

Eigene, eingehende Untersuchungen (Lit. 20) mit einem Gemisch aus 36 % $\text{Sr}^{90}/\text{Y}^{90}$, 18 % Co^{60} , 18 % Cs^{137} und 28 % Ir^{192} unter verschiedenen Bedingungen ergaben, daß u. a. selbst in V4A-Eindampfgefäßen nur etwa 50 % in die Zählchale überführt werden konnten.

Neue Untersuchungen von Haberer (Lit. 46), der mit verschiedenen Säuren versuchte, Spaltprodukte möglichst gut zu überführen, zeigten, daß optimal beim Zusatz von Zitronensäure mit 30 % Wandadsorption zu rechnen ist, daß es also fast unmöglich ist, die erreichbaren 95 % - 100 % in die Zählchale zu überführen. Beim Großflächenproportionalzählrohr dagegen wird in die Zählchale das Wasser eingefüllt und wird mit Hilfe eines Oberflächenverdampfers unmittelbar eingetrocknet. So ist keinerlei Überführung des Rückstandes mehr notwendig und man erreicht im allgemeinen einen Wirkungsgrad, der um 95 % liegt, selbstverständlich nur, wenn es sich bei den im Wasser vorhandenen Radionukliden nicht um gasförmig gelöste oder leicht flüchtige gehandelt hat. Der Fehlbetrag ist auf wirkliche Eindampfverluste etwa durch Verspritzen zurückzuführen.

Eine zweite Möglichkeit der Anreicherung besteht darin, daß man mit Hilfe von radiochemischen Mitfällungs- und Adsorptionsverfahren versucht, die Radioaktivität aus der Wasserprobe herauszuholen. Da in diesem Fall erhebliche Mengen von Zusätzen dem Wasser beigegeben werden, ist auch mit einer entsprechend hohen Menge an Rückstand zu rechnen. Solche Verfahren können deshalb überhaupt nur dann eingesetzt werden, wenn es möglich ist, diesen hohen Rückstand mit Hilfe eines entsprechend großen Detektors auszumessen. So hat sich zur Überwachung von Flußwasser für genaue Messungen ein Verfahren (Lit. 20) eingeführt, bei dem nach der Filterung des Rückstandes auf dem Filter von 18,5 cm Durchmesser pro cm^2 nach Trocknung 10 mg übrigbleiben. Man ist damit an der Grenze von dem, was man für die notwendige Meßgenauigkeit bei der Überwachung gerade noch verantworten kann.

Der meßtechnische Vorteil des Verfahrens besteht darin, daß

- bei dieser Anreicherung im Gegensatz zum üblichen Eindampfverfahren auch das für den Strahlenschutz so wichtige Jod, vor allem J^{131} , miterfaßt wird,
- bei dieser Anreicherung das natürliche Kalium im Gegensatz zum Eindampfverfahren nicht miterfaßt wird. Dadurch erspart man sich die getrennte Bestimmung des Kalium, dessen Aktivität üblicherweise von der zu messenden Gesamtaktivität abgezogen werden muß.

Die bisher beschriebenen Vorteile dienen der genaueren bzw. erweiterten Meßmöglichkeit. Nun muß aber noch der Arbeitsaufwand für die Probenvorbereitung sowie der Zeitaufwand, der von der Anlieferung des Rohwassers bis zum Vorliegen des Meßergebnisses notwendig ist, betrachtet werden.

Für die Abwasserüberwachung wird in der Regel eine Meßgenauigkeit von $1 \times 10^{-7} \mu\text{c}/\text{cm}^3$, sowohl für α - als auch für die β -Aktivität verlangt. Hierzu genügt es, innerhalb von 30 min mit einem Oberflächenverdampfer im Abzug 500 cm^3 in der Zählchale direkt einzudampfen.

Wenn beim fensterlosen Zähler mit einer Spülzeit von 10 min und einer Messung der α -Aktivität und β -Aktivität von weiteren jeweils 10 min gerechnet wird, so liegt nach einer Stunde das Meßergebnis vor.

Für genauere Messungen, etwa zur Überwachung von Oberflächen-gewässern, wird mit Vorteil das Anreicherungsverfahren durch Mitfällung und Adsorption verwendet (siehe oben). Hierbei läßt sich eine Probenvorbereitung von 5 l Wasser innerhalb 40 min durchführen. Theoretisch genügt wieder eine Meßzeit von ca. 30 min einschließlich Spülzeit. Es muß aber beachtet werden, daß in einer großen Zahl von Fällen - praktisch immer bei Grundwasser, meist bei Flußwasser, selten bei Regenwasser - die natürliche Radioaktivität, vor allem die kurzlebigen Radon-, manchmal auch Thoron-Folgeprodukte dabei stören. Deshalb wird man in der Mehrzahl der Fälle zwischen Probenvorbereitung und Messung eine Zeit von ca. 4 Stunden verstreichen lassen, bis die natürlichen Radon-Folgeprodukte abgeklungen sind. Ein Vergleich über die gesamte Arbeitsdauer für die beiden Verfahren ist in Abb. 2-11 dargestellt (Lit. 20).

Die hier am Beispiel des Wassers gezeigten Vorteile des Großflächenproportionalzählrohrs gelten selbstverständlich auch für andere Radioaktivitätsmessungen, vor allem Radioaktivitätsmessungen geringer spezifischer Aktivität. So wird für eine genaue Luftüberwachung als Meßprobe der auf dem Filter niedergeschlagene Rückstand von 1000 m^3 Luft empfohlen. Es müssen also durch Absolutfilter 1000 m^3 hindurchgesaugt werden, da Filter mit einem niederen Wirkungsgrad nicht von jedem Radionuklid einen entsprechend kleineren Anteil zurückhalten, sondern selektiv bestimmte Radionuklide ganz durchlassen. Das hängt in erster Linie damit zusammen, daß die Radionuklide nicht gleichmäßig auf alle Staubteilchengrößen verteilt sind. Der Wirkungsgrad eines Filters ist aber nicht nur von der Anströmgeschwindigkeit des Mediums sondern auch stark von der Größe der zu filtrierenden Teilchen abhängig. Absolutfilter haben einen hohen Widerstand und

verstopfen entsprechend schnell, so daß große Filter notwendig sind. Außerdem ist es eine Zeitfrage, da die Luftmenge pro Zeiteinheit, die ein übliches Gebläse saugen kann, von der Filtergröße abhängt. Abb. 2-12 zeigt, wie bei verschiedenen Filtergrößen dasselbe Gebläse verschiedene Mengen Luft durch ein Filter hindurchsaugen kann.

Biologisches Material kann in der Regel direkt ausgemessen werden, so daß man nicht mehr unbedingt auf langwierige Aufbereitungsmethoden angewiesen ist. Als Beispiel mag ein umfangreiches Forschungsvorhaben von Euratom gelten, in dem über einige Jahre hinweg in internationaler Zusammenarbeit die Radioaktivität des Schlammes und der Sedimente des Rheins mit seinen Nebenflüssen überwacht wird, um die Auswirkungen der künstlichen Radioaktivität etwa aus Abwässern zu studieren. Bei diesen Messungen gilt es, eine spezifische Aktivität des Schlammes zu bestimmen, die so gering ist, daß man nur mit dieser Art von Zählern eine Direktmessung durchführen kann. Die erste Serie von Messungen, die 500 Schlammproben aus dem gesamten Gebiet umfaßte, zeigt, daß die Empfindlichkeit des Großflächenproportionalzählrohrs von 1 pc/g zwar in jedem Fall für eine Messung ausreicht, daß sie aber in sehr vielen Fällen auch *conditio sine qua non* war.

Eine besondere Art biologischer Messungen im Strahlenschutz sind Ausscheidungsmessungen, speziell Urin- und Fäkalmessungen. Sie dienen vor allem der Überwachung von möglichen Inkorporationen von α - oder reinen β -Strahlern. Fäkalien lassen sich zur Erzielung der notwendigen Meßgenauigkeit ohne die umständliche und unangenehme Aufbereitung direkt ausmessen. Urin enthält nach Eintrocknen eine sehr große Menge von Rückstand (30 g/l), so daß ebenfalls nur mit großflächigen Detektoren eine direkte Messung möglich ist. Man kann damit beispielsweise noch nach Wochen die im Körper zulässige Menge von Radium im Urin direkt nachweisen, ohne auf eine radiochemische Aufbereitung der Urinproben angewiesen zu sein.

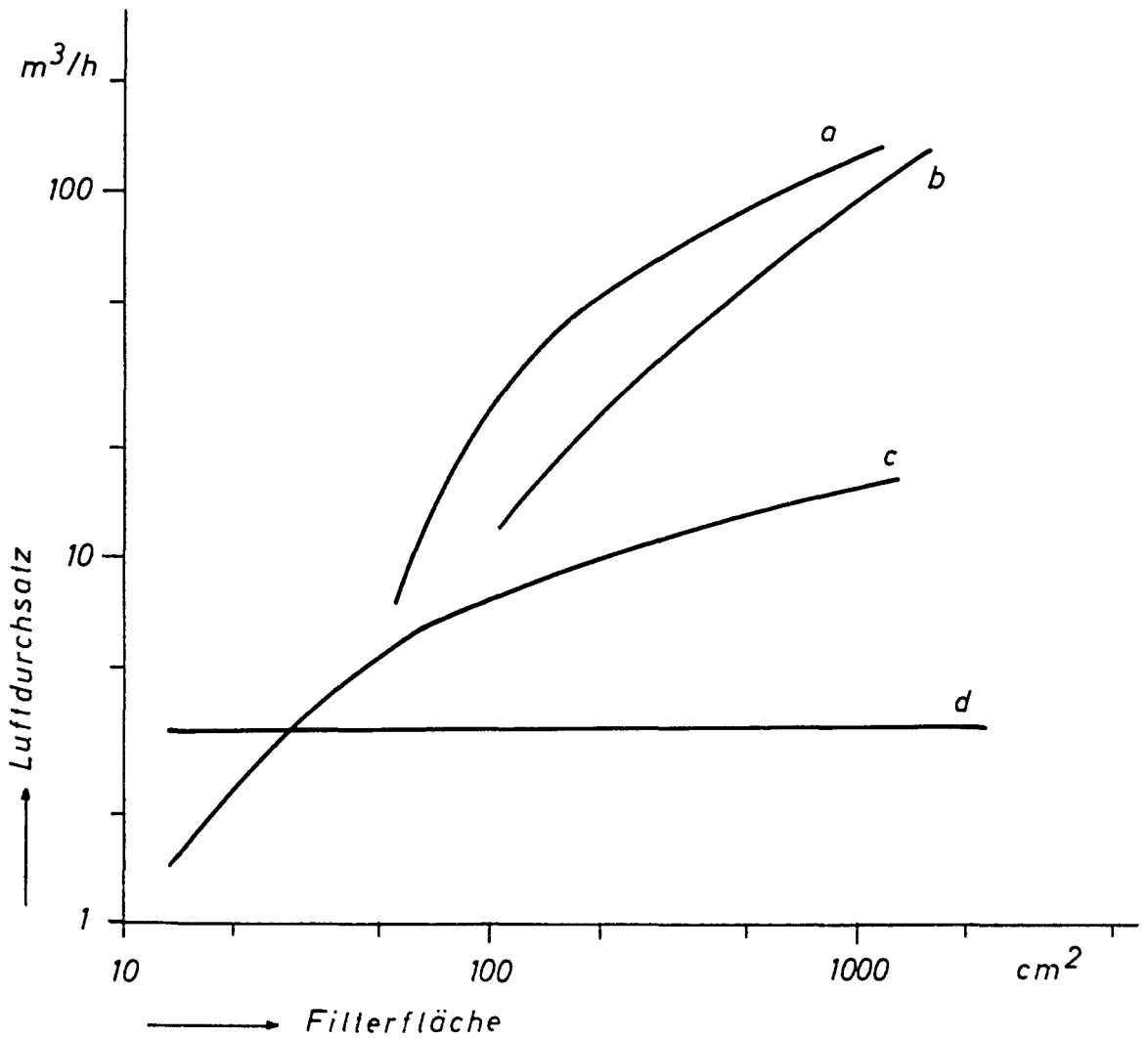


Abb. 2-12 Luftdurchsatz in Abhängigkeit von der Größe des verwendeten Filters bei verschiedenen Probenahmegeräten. Die Kurven a und b sind mit Luftturbinen, c mit einem Staubsauger und d mit einer Vorvakuum-pumpe aufgenommen.

Bei manchen biologischen Proben steht nur eine begrenzte Probenmenge von sehr geringer spezifischer Aktivität zur Verfügung. In diesem Fall muß zur Erzielung einer optimalen Empfindlichkeit ein der Probengröße angepaßtes Zählrohr benutzt werden (Lit. 39). Tabelle 2-2 zeigt mit experimentell ermittelten Werten, welche Zählgittergröße für verschiedene Probengrößen notwendig ist, um die optimale 2π -Geometrie zu erzielen, sowie den jeweils gemessenen Nulleffekt.

Daß unabhängig vom absoluten Nulleffekt die kürzeste Zählzeit erst dann erreicht werden kann, wenn der volle 2π -Wirkungsgrad erreicht ist, geht aus Abb. 2-13 hervor. Dabei ist vorausgesetzt, was auch üblicherweise der Fall ist, daß der Nulleffekt linear mit der Zählfläche wächst.

Bei der Prüfung von Material auf Eigenaktivität, das beispielsweise zum Bau von Low-level-Meßanlagen oder als Abschirmung eines Human Body Counter Verwendung finden soll, sind besonders empfindliche Meßgeräte notwendig. Hier liegt z.B. der Sonderfall vor, wo man sich nicht mehr mit der 2π -Meßgeometrie begnügt, sondern auf 4π übergeht. Eine 4π -Anlage, die in Antikoinzidenz betrieben und mit 5 cm Blei abgeschirmt die Möglichkeit gibt, 10^{-14} c/cm² Oberflächenaktivität nachzuweisen, zeigt im Schnitt Abb. 2-14.

2.2 Großflächenproportionalzählrohre zur Energiebestimmung der gemessenen Strahlung

Für Strahlenschutzmessungen ist es in vielen Fällen nicht ausreichend, nur die α - und β -Gesamtaktivität getrennt zu bestimmen. Man muß beim Überschreiten bestimmter vorgegebener Werte der Aktivität eine Analyse nach den einzelnen Radionukliden durchführen können. Denn erst die qualitative und quantitative Kenntnis der Aktivitätszusammensetzung nach Einzelradionukliden läßt eine Abschätzung der Gefährlichkeit der Probe zu. In manchen Fällen genügt allerdings auch der negative Beweis,

Tab. 2-2

Wirkungsgrad verschieden großer
Zählgitter gegenüber verschieden
großen Präparaten

Zähl- fläche	Wirkungsgrad % (Tl ²⁰⁴ auf Aluminium) Präparatfläche				Nulleffekt (Imp/min)	
	punkt- förmig	7 cm ²	28 cm ²	300 cm ²	absolut	pro cm ²
300 cm ²	58	-	-	57	36	0,12
69 cm ²	58	58	58	-	6,7	0,1
28 cm ²	58	50	25	-	2,5	0,09
7 cm ²	35	25	5	-	0,7	0,1

(aus: Fessler H., Kiefer, H. und Maushart R.,
Kerntechnik 2, Heft 10 (1960) S.324)

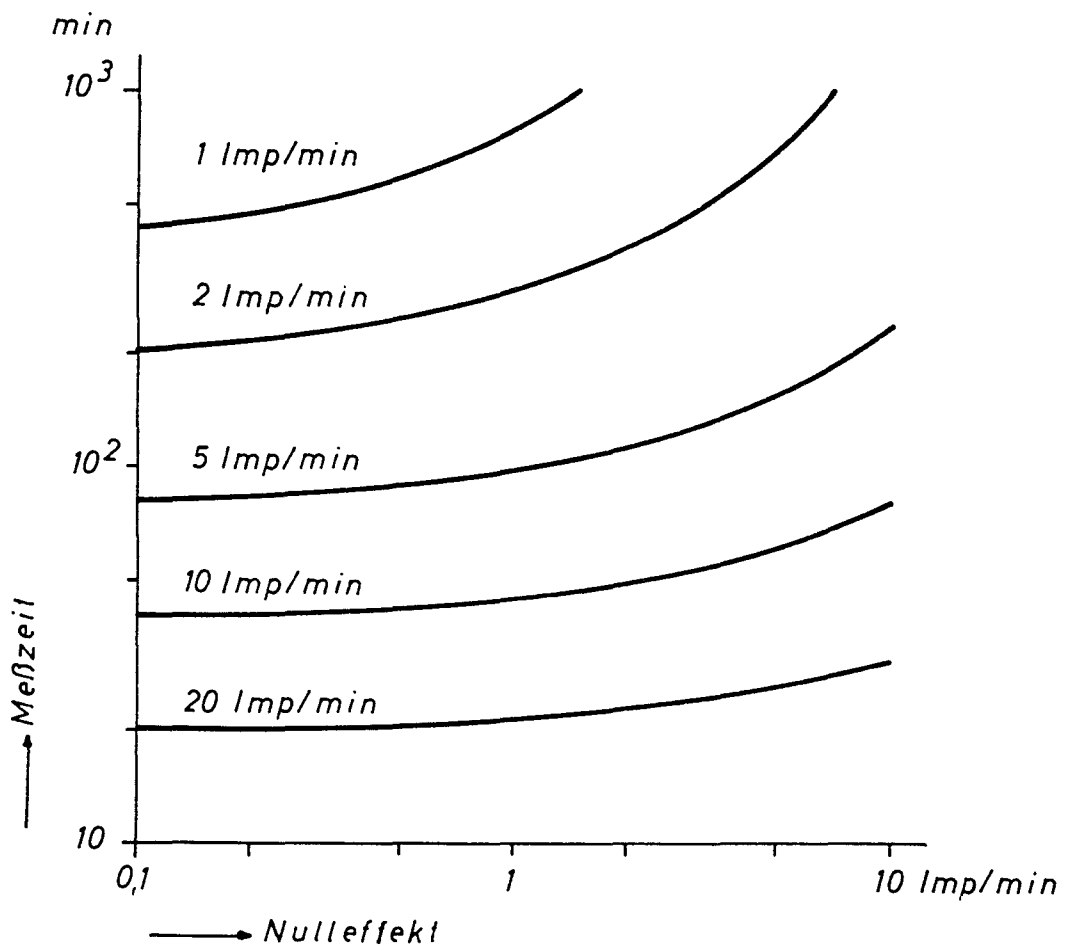


Abb. 2-13 Die notwendige Meßzeit, um bei einem als bekannt und konstant betrachteten Nulleffekt einen statistischen Fehler (doppelte Standardabweichung) von 10 % zu erzielen. Als Parameter sind die vom Präparat allein stammenden Impulsraten angetragen. (aus Fessler H., Kiefer H. und Maushart R., Kerntechnik 2, Heft 10 (1960) S. 324)

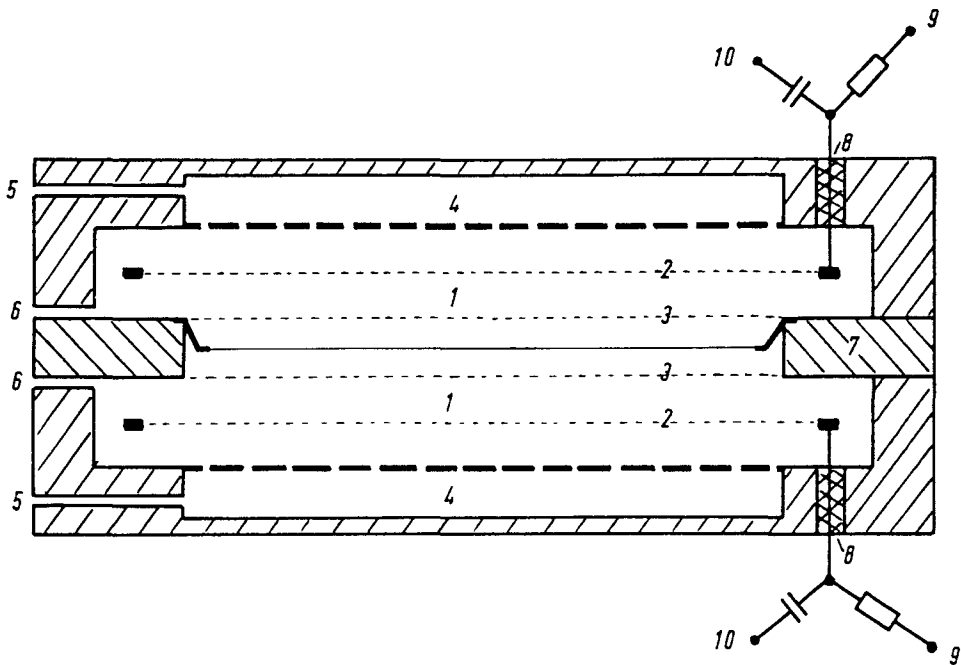


Abb. 2-14 Schnitt durch eine 4π -Anlage, die mit Großflächenproportionalzählrohren aufgebaut ist.

- | | |
|-----------------|-----------------------------------|
| 1 Zählraum | 6 Gasabfluß |
| 2 Zählgitter | 7 Schieber mit Präparatehalterung |
| 3 Nullgitter | 8 Isolatoren |
| 4 Gasverteilung | 9 Hochspannungszuführung |
| 5 Gaszufluß | 10 Impulsausgang |

indem die Analyse zeigt, daß ein oder mehrere besonders gefährliche Radionuklide in der Probe nicht vorhanden sind.

Grundsätzlich lassen sich zwar derartige Analysen mit radiochemischen Methoden immer durchführen. Diese radiochemischen Analysen sind aber meist langwierig. Sie sind deshalb für den Strahlenschutz wenig geeignet, da der Strahlenschutz möglichst schnell Ergebnisse benötigt, um noch rechtzeitig Gegenmaßnahmen einleiten zu können.

Deshalb werden physikalische Analysenmethoden vorgezogen und zwar nach Möglichkeit solche, bei denen es nicht notwendig ist, die ursprüngliche Probe, also beispielsweise die eingedampfte Wasserprobe in der 20 cm ϕ -Zählschale oder das Luftfilter nochmals umzuarbeiten. Das erste Analysenverfahren wird immer die γ -Spektroskopie sein, die technisch heute sehr weit fortgeschritten ist. Aber eine γ -Analyse allein genügt nicht, da es eben viele α - und β -Strahler gibt, die nicht gleichzeitig γ -Strahlen aussenden oder nur in einem Energiebereich, wo andere, in größerer Menge vorhandene γ -Strahler stören. Deshalb ist es wünschenswert, Energiebestimmungsanlagen zu entwickeln, die die Proben, die beim Strahlenschutz anfallen, nach ihrer α -Energie unterscheiden können, Anlagen die Röntgen-Strahler (z. B. K-Strahler) analysieren können, und solche, die eine grobe Energiebestimmung von β -Strahlern ermöglichen.

Es wurde untersucht, ob diese drei Probleme mit Hilfe von Großflächenproportionalzählrohren zu lösen sind. Proportionalzählrohre haben - wie ihr Name sagt - grundsätzlich die Eigenschaft, daß ihre Impulshöhe proportional zur im Zählraum abgegebenen Primärenergie der ionisierenden Strahlung ist. Eine Spektrographie setzt allerdings voraus, daß das zu messende Teilchen seine Gesamtenergie im Zählvolumen abgibt. Das ist sowohl für α -Strahlen als auch für Röntgenstrahlen niederer Energie zu erreichen. Dabei ist es zweckmäßig, ein dichteres Gas zu benutzen, damit das Volumen der Meßkammer nicht zu groß wird. Die Reich-

weite der β -Strahlen ist zu groß, als daß man sie in üblichen Zählern voll erfassen könnte. Es wurde deshalb versucht, mit Hilfe der Messung des Rückstreuanteils, an Blei eine β -Energiebestimmung durchzuführen. Nähere Einzelheiten gehen aus den folgenden Abschnitten hervor.

2.21 α -Spektrograph

Wenn man ein Großflächenproportionalzählrohr, wie es zur Messung von Proben geringer spezifischer Aktivität verwendet wird, dazu benützt, um ein α -Spektrogramm, etwa von einem Luftfilter aufzunehmen, dann wird man feststellen, daß es durch Extrapolation bereits mit dieser einfachen Anordnung möglich ist, eine obere Grenzenergie zu bestimmen (Lit. 47). Man muß dabei allerdings beachten, daß man in diesem Fall den Zähler nicht mit Methan, sondern mit 90 % Argon- und 10 % Methangemisch betreiben muß, damit sich die α -Teilchen schneller totlaufen können. Selbstverständlich machen sich bei der einfachen Anordnung die Randeffekte sehr stark bemerkbar. Das soll an einem mit einem solchen Großflächenzähler mit Argon-Methan als Zählgas aufgenommenen Spektrum gezeigt werden (Abb. 2-15).

Beim Bau eines Großflächenproportionalzählrohrs, das speziell als α -Spektrograph dienen soll, muß man sich überlegen, wie man eine gleichmäßige Feldstärke entlang der Zähldrähte und damit eine gleichmäßige Gasverstärkung über die ganze Zählfläche erzielen kann. Außerdem ist es notwendig, daß sich die Teilchen, auch die am Rand eintretenden, völlig im Gasraum totlaufen.

Der Zähler muß deshalb folgende Eigenschaften haben:

- Alle primären Ionen müssen zwischen der Probe und dem Zählendrahtgitter gebildet werden, da auf verschiedenen Seiten des Zählendrahtgitters keine gleichmäßigen Feldverhältnisse herrschen.

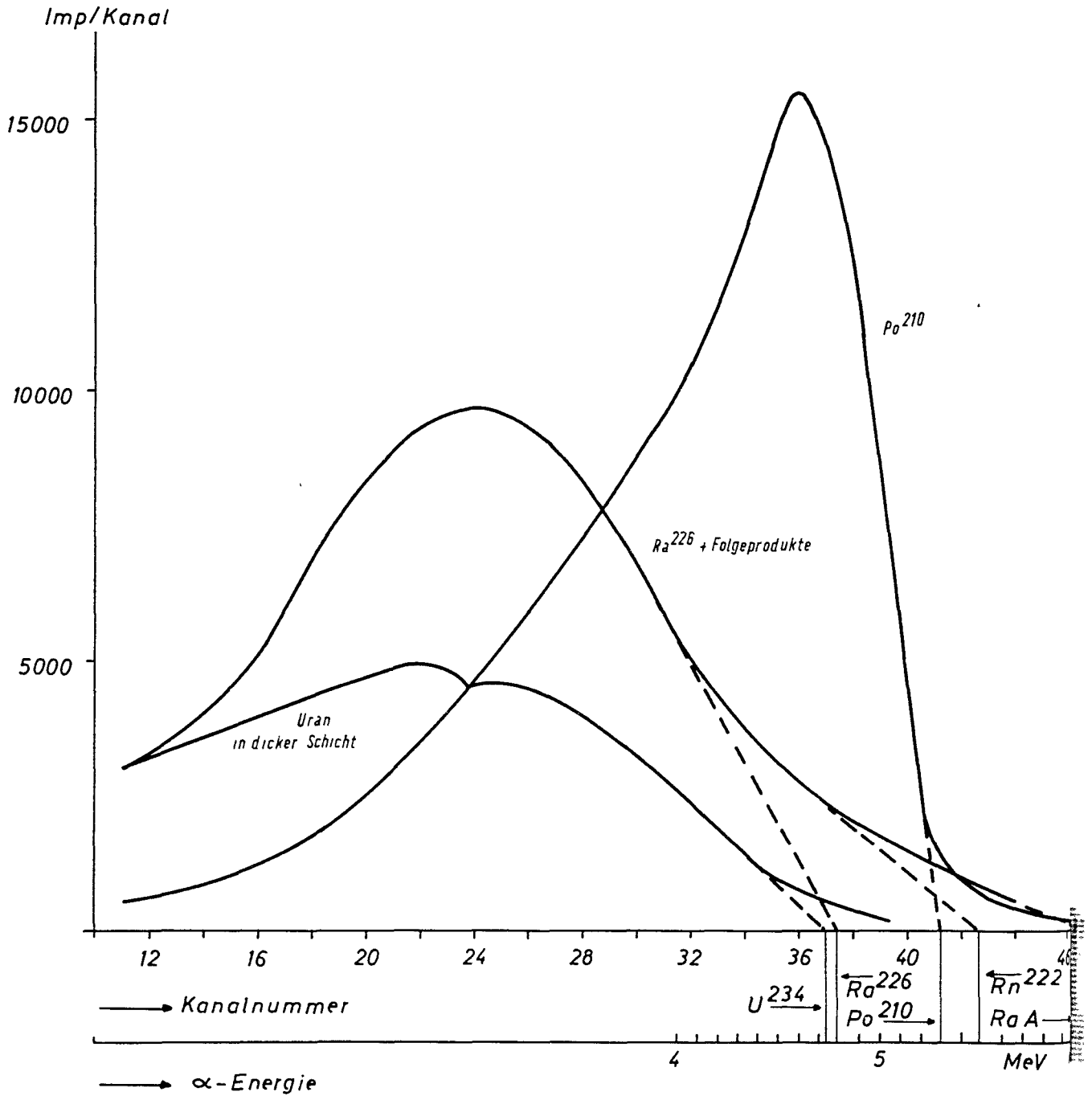


Abb. 2-15 Mit einem fensterlosen Großflächenproportionalzählrohr aufgenommene Impulshohenverteilung verschiedener α -Strahler.
(aus Kiefer H., Maushart R., Überwachung der Radioaktivität in Abwasser und Abluft, Teubner-Verlag, Stuttgart, 1961)

- Um die Randeffekte weitgehend auszuschalten bzw. kleinzuhalten, ist es notwendig, alle entstehenden Elektronen in den Zählraum zu ziehen. Hierzu wird das Kathodengitter, das üblicherweise auf Null liegt, auf ein positives Potential gebracht (Zuggitter).

In Abb. 2-16 ist ein derartiger α -Spektrograph gezeigt. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, mit relativ kleinen Gasverstärkungen zu arbeiten, um die Ungleichmäßigkeiten in den Toleranzen des Zählrahdurchmessers und des Schutzgitter-Zählgitter-Abstandes nicht zu verstärken. Da dieser Zähler ein sehr großes Zählvolumen hat, ist es notwendig, nicht mit einer üblichen Spülung zu arbeiten, man muß den Zählraum auspumpen und läßt dann erst das Gas einströmen. Es ist selbstverständlich, daß bei einem α -Spektrographen das Auflösungsvermögen extrem davon abhängt, wie die Probe beschaffen ist. Für eine Plutonium-Probe von Pu^{239} , das flächig auf eine Zählchale gleichmäßig aufgebracht ist, läßt sich mit dieser Anordnung ein Auflösungsvermögen von 140 keV erreichen.

Ein Vergleich dieses auf der Basis des Großflächenproportionalzählrohrs gebauten α -Spektrographen mit anderen hierfür eingesetzten Detektoren zeigt folgendes:

Halbleiter sind zwar sehr gut zur α -Spektroskopie geeignet, weil sie ein ausgezeichnetes Auflösungsvermögen haben, aber sie sind bisher nicht annähernd in der Größe herzustellen, wie es für Proben aus Strahlenschutzmessungen notwendig ist.

Die α -Spektroskopie mit dünnen CsJ-Kristallen ist an sich praktisch und rationell, erreicht aber nicht das Auflösungsvermögen des α -Spektrographen nach dem Proportionalzählrohrprinzip.

Impulsionskammern haben den Vorteil, daß mit ihnen noch wesentlich größere Flächen für die Probe gebaut werden können, ihr Nachteil gegenüber dem Proportionalzählrohr besteht darin,

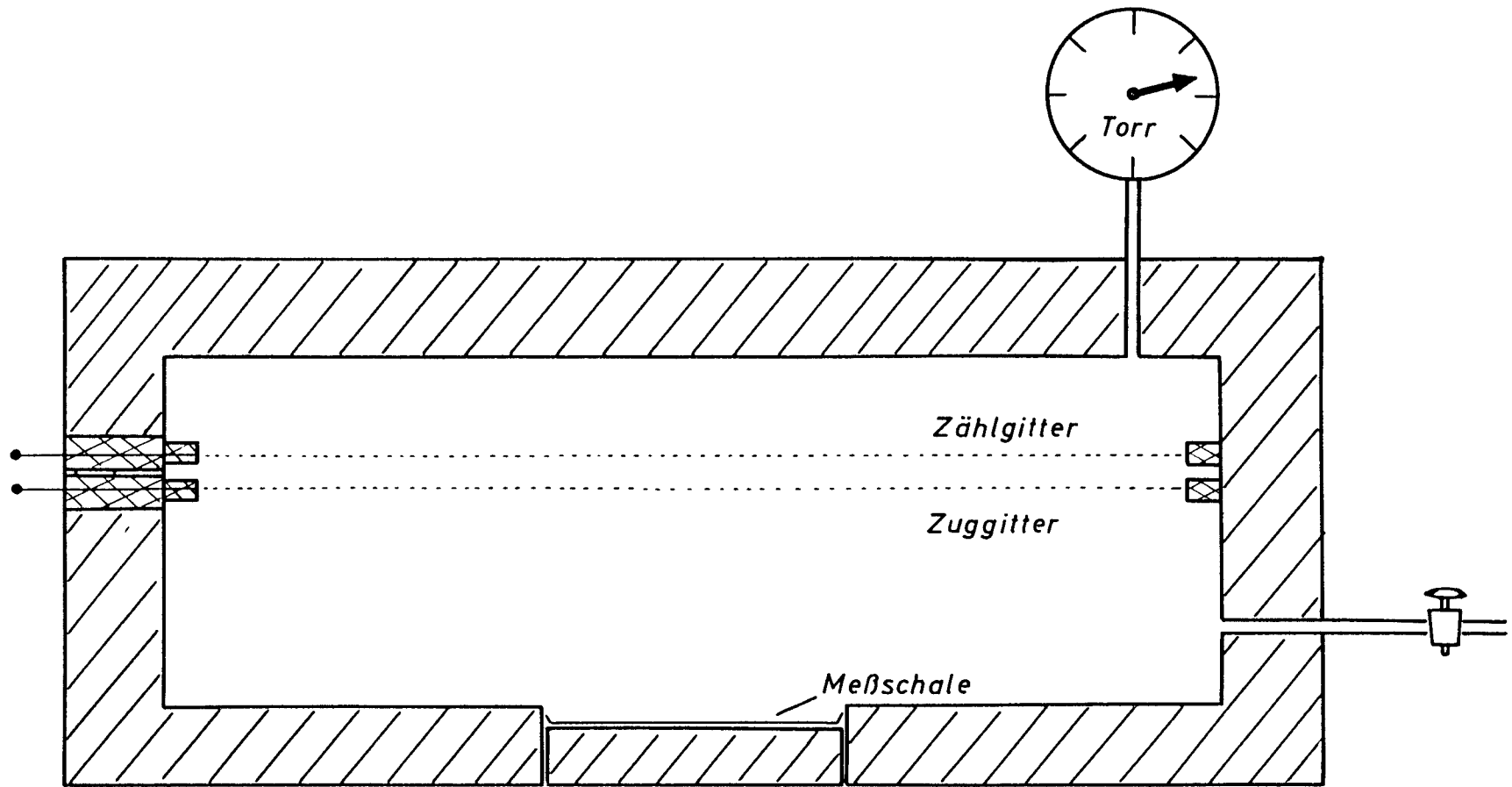


Abb. 2-16 Schema eines als Großflächenproportionalzählrohr
 gebauten α -Spektrographen

daß bei ihnen das Signal-Rausch-Verhältnis ungünstiger liegt.

2.22 Spektrographie von Röntgenstrahlern

Die Röntgenspektroskopie wird bei Strahlenschutzmessungen im wesentlichen zur Identifizierung von K- und L-Strahlern benützt. Vor allem der spezifische Nachweis von Pu^{239} , das häufig mit anderen α -Strahlern gemeinsam vorkommt, ist über die L-Strahlung des in 11 % der Fälle angeregten Tochterkerns U^{235} durchzuführen. Plutonium wird in immer stärkerem Maße angewandt und ist inkorporiert ein außerordentlich gefährlicher Strahler. Deshalb gehören Plutonium-Messungen heute zu den wichtigsten Strahlenschutzmeßaufgaben.

Proportionalzählrohre werden schon lange zur Röntgenspektroskopie verwendet (Lit. 48, 49, 50, 51). Im allgemeinen wurden als Zählgas schwere Gase, etwa Krypton oder Xenon, eingefüllt. Wenn man die berechnete Absorption niederenergetischer Quantenstrahlung in Gasen (Lit. 52) in der Abb. 2-17 betrachtet, so zeigt sich, daß Krypton und Xenon auch die geeignetsten Gase für diese niederenergetische Quantenstrahlung sind. In USA wurden deshalb Proportionalzählrohre gebaut, die mit Xenon gefüllt sind, um die L-Strahlung von Plutonium nachzuweisen (Lit. 53). Da Xenon ein sehr teures Gas ist, war es nicht möglich, die Zähler im Durchfluß zu betreiben. Die Zähler mußten also gasdicht gemacht werden, was wieder eine ziemliche Wandstärke erforderte. In dieser Wand wird aber bereits ein sehr großer Teil der L-Strahlung absorbiert, so daß der Zähler eine geringe Nachweisesempfindlichkeit hat.

Eigene experimentelle Untersuchungen für Argon zeigten nun, daß die wahre Absorption für Argon je nach Energie bis zum Faktor 2 höher liegt als die berechnete (Lit. 54). Aus diesem Ergebnis wurde klar, daß man auch mit Hilfe von Argon-Methan-Gemischen ein Proportionalzählrohr bauen kann, das im Durchfluß betrieben wird, um die beim Pu^{239} entstehende L-Strahlung zu messen. Ein

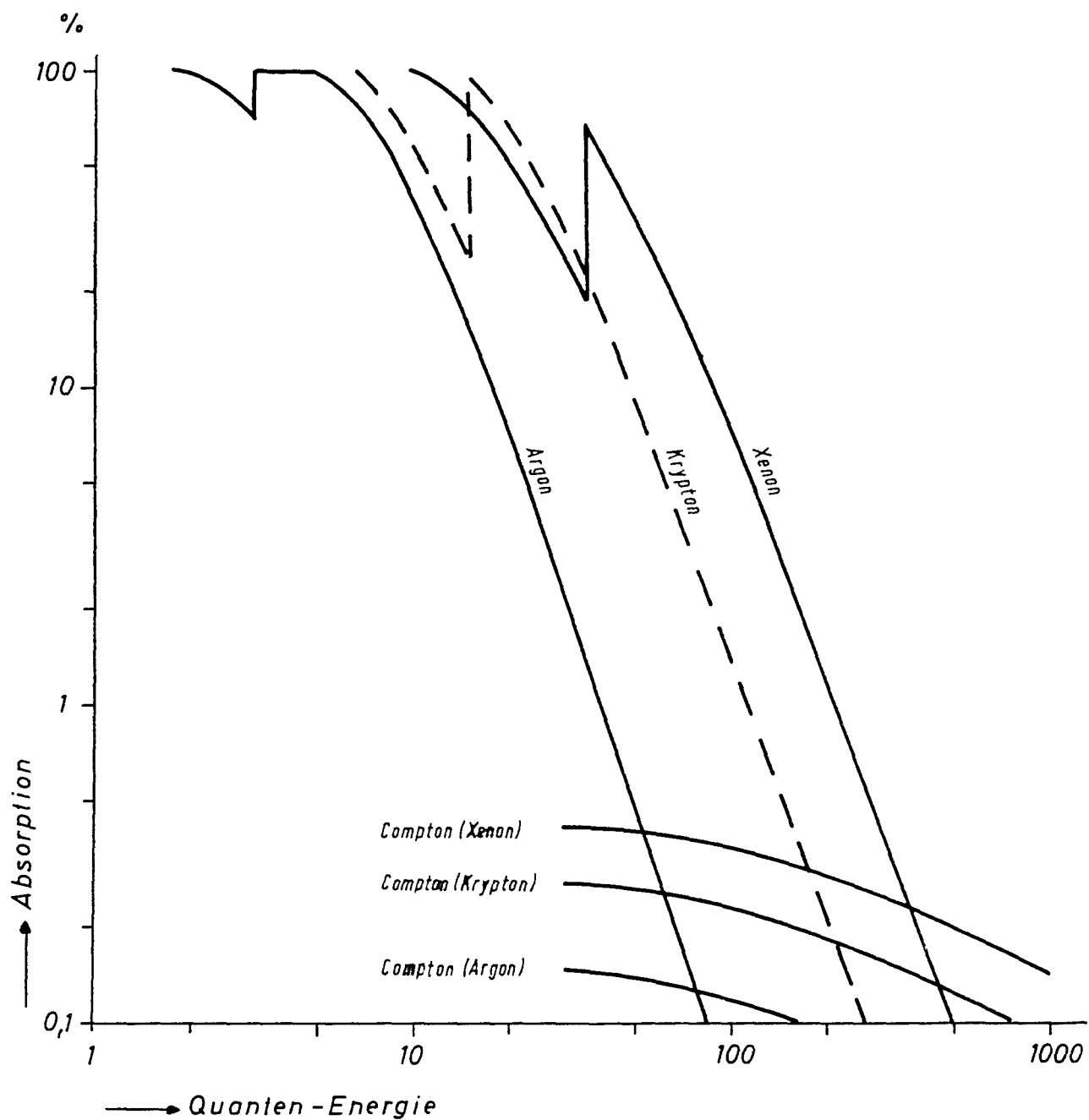


Abb. 2-17 Berechnete Photo- und Compton-Absorption in Abhängigkeit von der Quantenenergie bei verschiedenen Zählgasen (nach West D., Progress in Nuclear Physics, 3, 18 (1953).)

Durchflußzähler ist aber ohne Schwierigkeit mit sehr dünnen Wänden zu fertigen, um so die Absorption in der Wand weitgehend herunterzudrücken.

Die bei der L-Strahlung entstehenden Photoelektronen haben Energien von ca. 13,6 keV, 16,9 keV und 20,2 keV und deshalb eine sehr geringe Reichweite im Zählgas. Man kommt deshalb mit relativ dünnen Zählern aus, um trotzdem noch eine hohe Absorption zu erreichen. Die Schwierigkeit ist nur die, bei diesen großen Zählern den Nulleffekt so weit herunterzudrücken, daß man die notwendige Nachweisempfindlichkeit erreicht. Es wurde deshalb für dieses Zählrohr erstmalig das Prinzip der sogenannten Vollraumantikoinzidenz angewandt (Lit. 54, 55). Im Schema der Abb. 2-18 ist ein derartiger Spektrograph für Röntgenstrahlen bis 30 keV gezeigt, der aus einem Dreistufenproportionalzählrohr besteht. Der mittlere Zählraum dient zur Messung, während die beiden äußeren Zählräume in Antikoinzidenz geschaltet sind. Zwischen den inneren und äußeren Zählräumen befinden sich nur Gitter, sodaß praktisch keine Absorption stattfinden kann. Der Zähler eliminiert auf diese Weise den Nulleffekt so extrem, daß man bei einer Zählfläche von 314 cm^2 den ungewöhnlich niederen Nulleffekt von 3 Imp/min hat, wenn man im Energieband zwischen 10,5 und 22,5 keV mißt, ohne daß eine zusätzliche Abschirmung notwendig wäre.

Das Auflösungsvermögen dieses Spektrographen übertrifft das von Spektrographen, die mit Szintillationszählern ausgerüstet sind, im niederen Energiebereich um den Faktor 2 - 3. Als Beispiel soll ein damit aufgenommenes Spektrum von Pu^{239} gezeigt werden, bei dem die Ausblendung verschieden gewählt wurde (Lit. 54) (Abb. 2-19).

Da der Großflächenproportionalzähler technisch leicht in die verschiedensten Formen zu bringen ist, konnte damit eine Spezial-

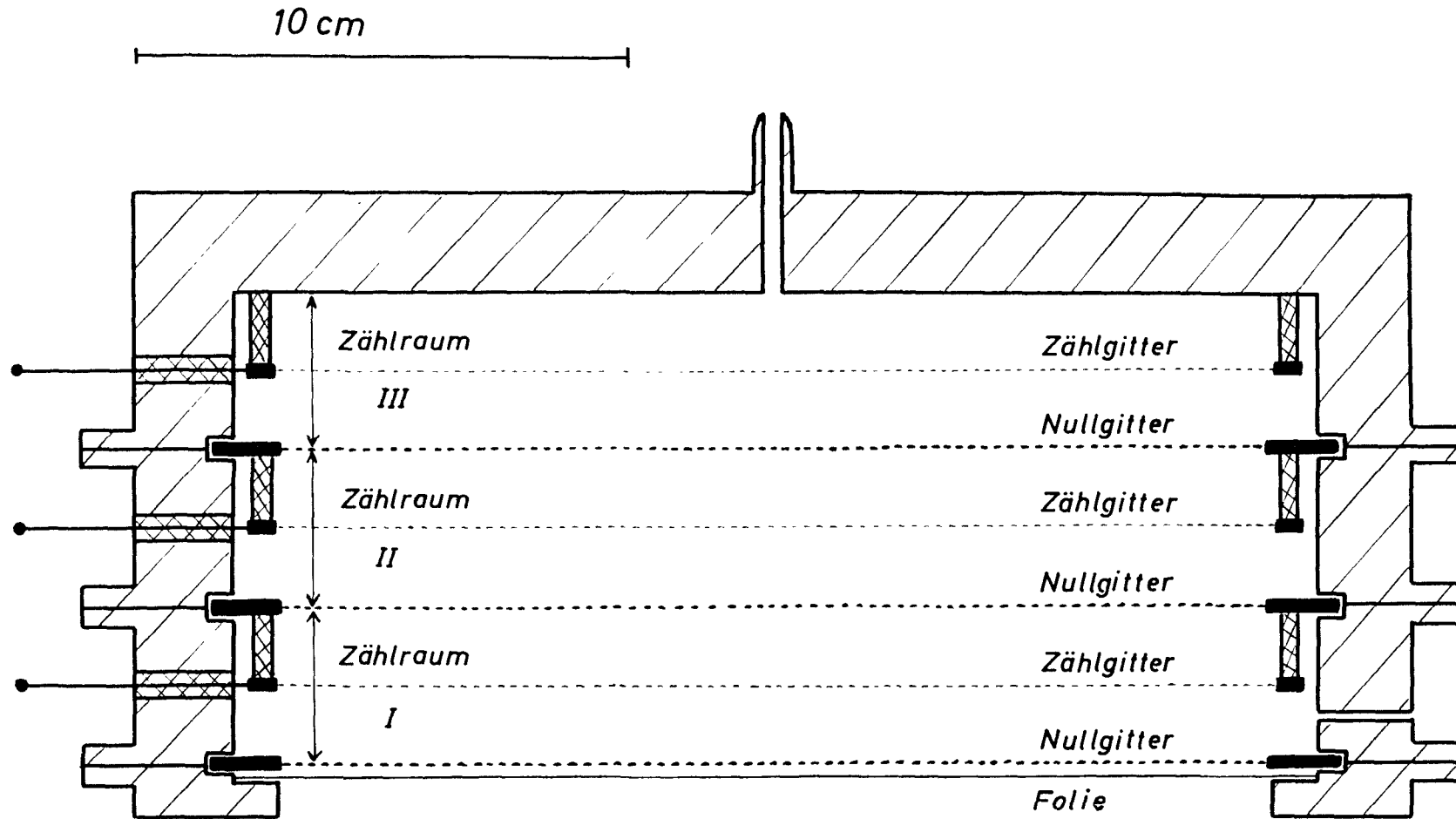


Abb. 2-18 Schema eines als Großflächenproportionalzählrohr gebauten Röntgenstrahlspektrographen für Energien kleiner 30 keV mit Vollraumantikoinzidenz.

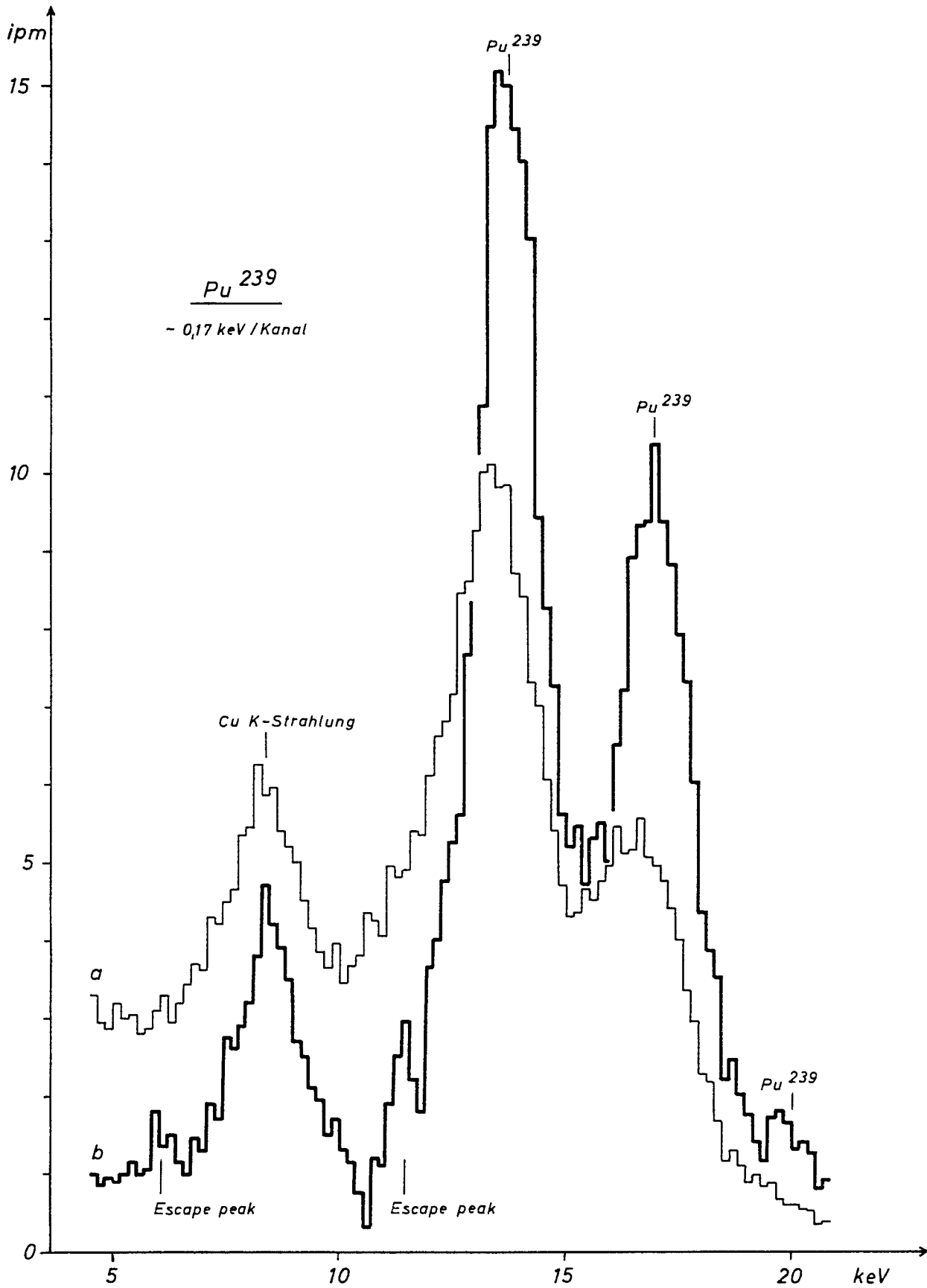


Abb. 2-19 Mit dem Röntgenstrahlspektrographen aufgenommenes Pu^{239} Spektrum. Die stark ausgezeichnete Kurve wurde mit einem ausgeblendeten, die dünn gezeichnete Kurve mit einem nicht ausgeblendeten Strahler gewonnen. Man sieht bei letzterer den Einfluß der Randgebiete des Zählers auf das Auflösungsvermögen (nach Fessler H., Kiefer H. und Maushart R., Atompraxis 7, Heft 11 (1961) 401)

anlage zur Messung einer möglichen Inkorporation im Menschen von Pu^{239} gebaut werden (Lit. 56). Es handelt sich um einen röhrenförmigen Detektor, der wieder in Vollraumantikoinzidenz arbeitet. In ihn kann der Arm eingeführt werden, und damit das in dem Unterarmknochen abgelagerte Pu^{239} spektrographiert werden. Eine punktförmige Pu^{239} -Quelle von 0,5 nc ergibt gerade den doppelten Nulleffekt, der Diskriminierungsfaktor gegenüber Ra^{226} beträgt 200, gegenüber Cs^{137} 120 (Lit. 57). Das bedeutet allerdings, daß es damit noch nicht ganz möglich ist, die maximal zulässige Konzentration im Skelett des Menschen nachzuweisen. Geeignet ist diese Anlage aber nach größeren Plutonium-Zwischenfällen, um Fäkalien und Urin direkt zu spektrographieren. Man kommt so um das komplizierte, außerordentlich langwierige und aufwendige Verfahren der radiochemischen Abtrennung von Plutonium in Urin und Fäkalien herum.

Erfahrungsgemäß kommen die häufigsten Inkorporationen von Plutonium über die Inhalation vor. Es bildet sich in der Lunge praktisch ein Depot, was langsam abgebaut wird. In diesem Depot findet sich normalerweise ungleich mehr Pu^{239} als im ganzen übrigen Körper. Deshalb wurde zur Überwachung von Personen eine große derartige Anlage gebaut, die dem Menschen auf die Brust und auf den Rücken aufgesetzt wird, um so das in der Lunge vorhandene Pu^{239} zu spektrographieren. Damit ist für die Mehrzahl der Fälle eine echte *in vivo* Messung des Pu^{239} im Menschen mit der geforderten Genauigkeit möglich (Lit. 58).

2.23 β -Energiebestimmung über Rückstreuanteil

Bei der großen Zahl der verwendeten β -Strahler ist im Strahlenschutz eine β -Energiebestimmung dringend notwendig. Das gilt um so mehr, weil eine Reihe sehr häufig benutzter β -Strahler reine β -Strahler sind. Dazu gehören z. B. P^{32} , Sr^{89} , Sr^{90} , Y^{90} , aber auch sehr energiearme Strahler wie C^{14} und S^{35} .

Die Energiebestimmung von β -Strahlern ist deshalb grundsätzlich schwierig, weil β -Strahler ein kontinuierliches Energiespektrum aussenden und nicht wie α - oder γ -Strahler ein diskretes. Als Ergebnis der Messung kann man deshalb die mittlere Energie, die maximale Energie oder die Energieverteilung erwarten.

Ein häufig angewandtes Verfahren ist das, daß man mit Hilfe von verschieden dicken Absorbern jeweils mißt, was durch den betreffenden Absorber noch nicht absorbiert wurde.

Dieses Verfahren ist ziemlich umständlich, weil man eine ganze Reihe von Messungen braucht. Es hat weiter den Nachteil, daß mit zunehmendem Absorber immer weniger Impulse zur Zählung gelangen, und damit auch die Einzelmessung immer länger dauert.

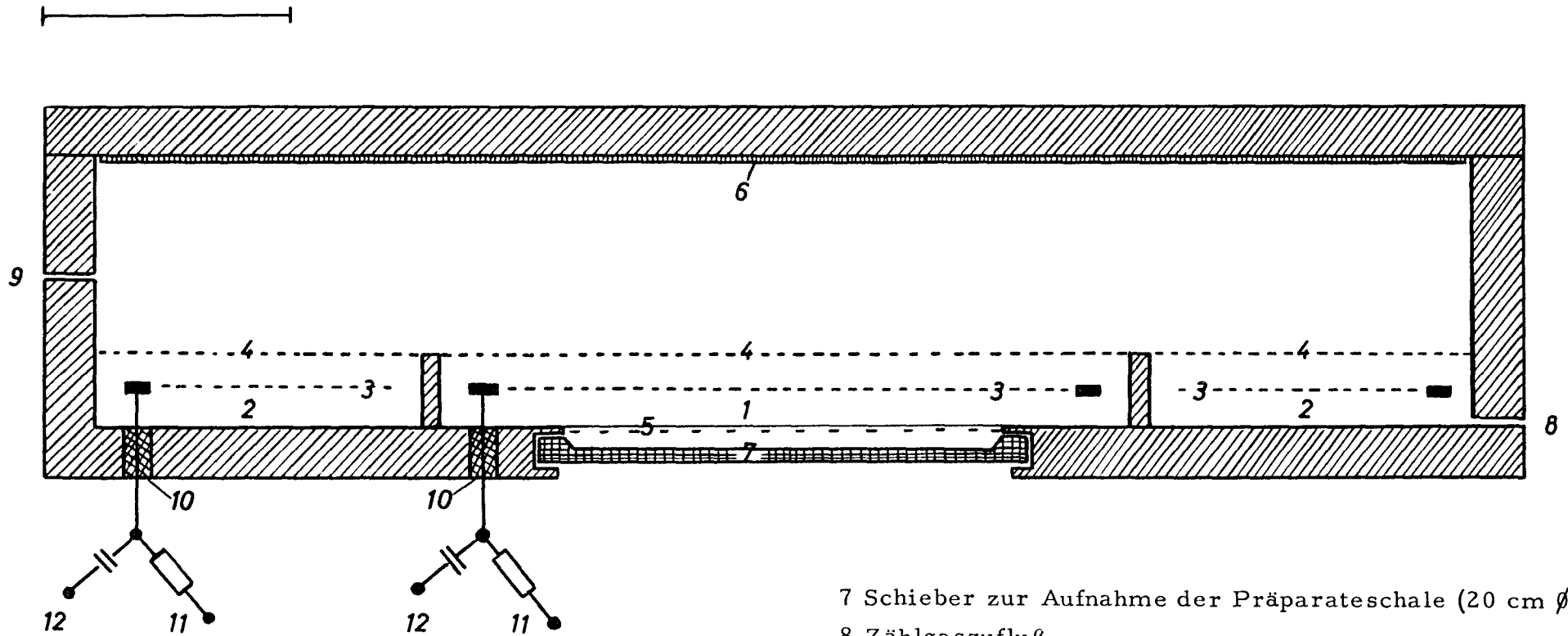
Das Ziel war deshalb, ein Verfahren zu finden, mit dem mit einer einzigen Messung eine mittlere Energie des β -Strahlers bestimmt werden kann. Zu diesem Zweck wurde nach dem Prinzip der Großflächenproportionalzählrohre ein Detektor konstruiert, der gleichzeitig die primär ausgesandten β -Teilchen sowie die rückgestreuten β -Teilchen zählt (Lit. 59, 60). Das Verhältnis des Rückstreuantteils zum primär ausgesandten Anteil ist ein Maß für die mittlere Energie der β -Strahlung der Probe.

Das Schema dieser Anlage zeigt Abb. 2-20. Der Mittelzähler nimmt wieder Meßschalen von 20 cm ϕ auf. Er ist mit einer Folie abgedeckt. Das mittlere Zählgitter zählt die primär ausgesandten β -Teilchen. Die Teilchendurchsetzenden Zählraum des mittleren Zählers und treffen auf eine Rückstreufolie, die aus Blei gefertigt ist, auf. Ein Teil dieser β -Teilchen wird dann in einem um den Mittelzähler ringförmig aufgebauten zweiten Zähler gestreut. In Abb. 2-21 ist gezeigt, wie die Zähldrähte beider Zähler angeordnet sind. Zur Verringerung des Nulleffekts ist der Außenzähler zum Innenzähler in Koinzidenz geschaltet. So werden praktisch nur solche Teilchen im Außenzähler gezählt, die auch im Innenzähler gezählt wurden.

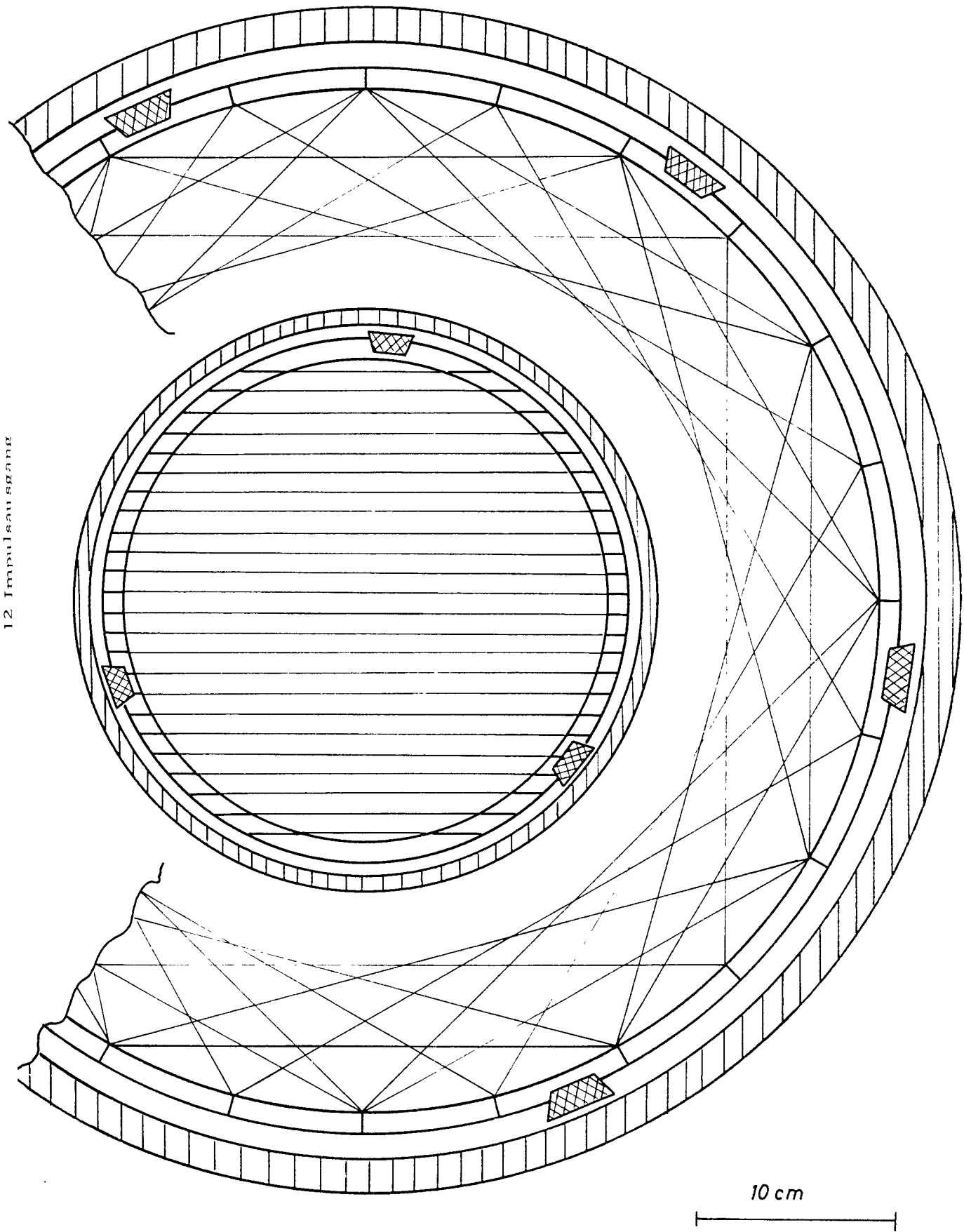
Abb. 2-20 Schema eines Rückstreu-Zählers

- 1 Mittelzähler (für Primärstrahlung)
- 2 Ringförmiger Außenzähler (für rückgestreute Strahlung)
- 3 Zählgitter
- 4 Kathodengitter
- 5 Fensterfolie (aluminisierter Kunststoff, $3,5 \text{ mg/cm}^2$)
- 6 Bleifolie (0,3 mm stark)

10 cm



- 7 Schieber zur Aufnahme der Präparateschale (20 cm ϕ)
- 8 Zählgaszufluß
- 9 Zählgasabfluß
- 10 Teflonisolatoren
- 11 Hochspannungseingang
- 12 Impulsausgang



12. Impulsausgang

Abb. 2-21 Anordnung der Zähldrähte eines Rückstreuzählers

Als Ergebnis sei in Abb. 2-22 die Energieeichkurve des Rückstreu-zählers gezeigt. Für die Praxis ist dabei interessant, daß der Rückstreuteil weitgehend unabhängig vom Flächengewicht der Präparate ist, wie für verschiedene Energien gezeigt wurde (Abb. 2-23).

Ein Gemisch von β -Strahlern kann zwar auf diese Weise nicht nach Einzel-Energieverteilungen analysiert werden, aber wenn zwei Komponenten eines Gemischs bekannt sind und man will herausfinden, in welchem Verhältnis die beiden Komponenten zueinander stehen, dann leistet die Anlage wieder wertvolle Dienste. Als typisches Beispiel für diesen Fall sei gezeigt, wie man mit Hilfe dieses Doppeldetektors ein Sr^{90} - Sr^{89} -Gemisch trennen kann, ohne abzuwarten, wie es üblicherweise geschieht, bis sich nach der radiochemischen Abtrennung des Strontium das Y^{90} als Tochterprodukt des Sr^{90} nachgebildet hat, wozu bei der Halbwertszeit des Y^{90} von 64,8 Stunden oft mehrere Tage notwendig sind. Abb. 2-24 zeigt den Rückstreuteil in Prozent bei verschiedenen Mischungsverhältnissen zwischen Sr^{89} und Sr^{90} .

2.3 Großflächenproportionalzählrohr zur Dosisbestimmung

Das Großflächenproportionalzählrohr, vor allem wenn es auf beiden Seiten mit dünnen Folien abgeschlossen ist, ist zur Dosismessung, auch zur β -Dosimetrie, sehr gut geeignet. Es kann im Strombetrieb betrieben werden und ist praktisch luftäquivalent wegen der extrem dünnen Wände (Abb. 2-25) (Lit. 61). Da es groß und flach ist, zeigt es nur in einem kleinen Winkel eine allerdings dort starke Richtungsabhängigkeit. Diese Richtungsabhängigkeit kann verbessert werden, wenn die Seitenwände aus luftäquivalentem Material gefertigt werden. Eine zweite Möglichkeit ist die, daß man röhrenförmige Detektoren baut, die dann ebenfalls nicht mehr richtungsabhängig sind, zumindest in einer Ebene.

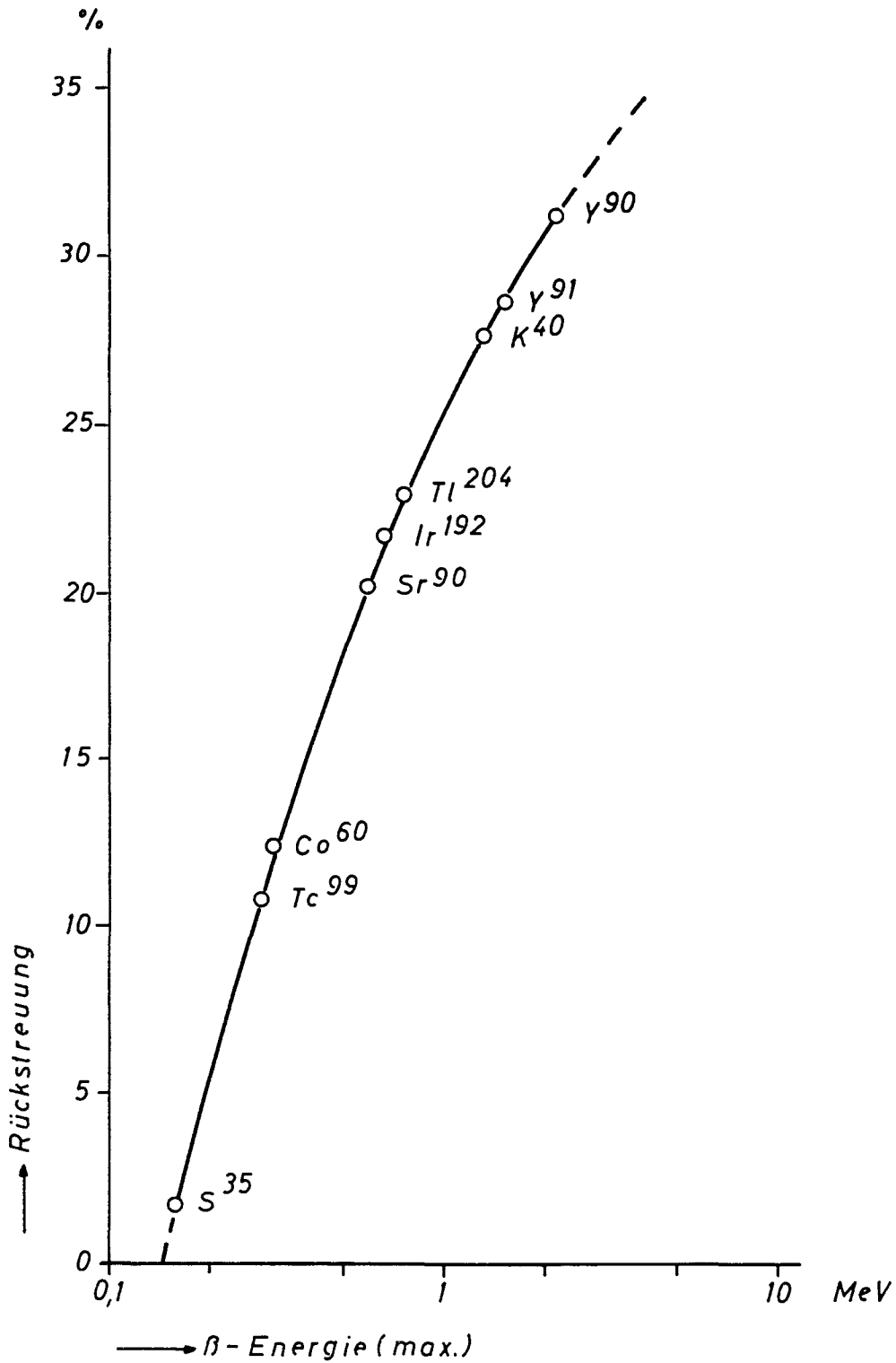


Abb. 2-22 Energieeichkurve des Rückstreu-Zählers
(nach Fessler H., Kiefer H. und Maushart R.,
Korntechnik 3, Heft 4 (1961) S. 151).

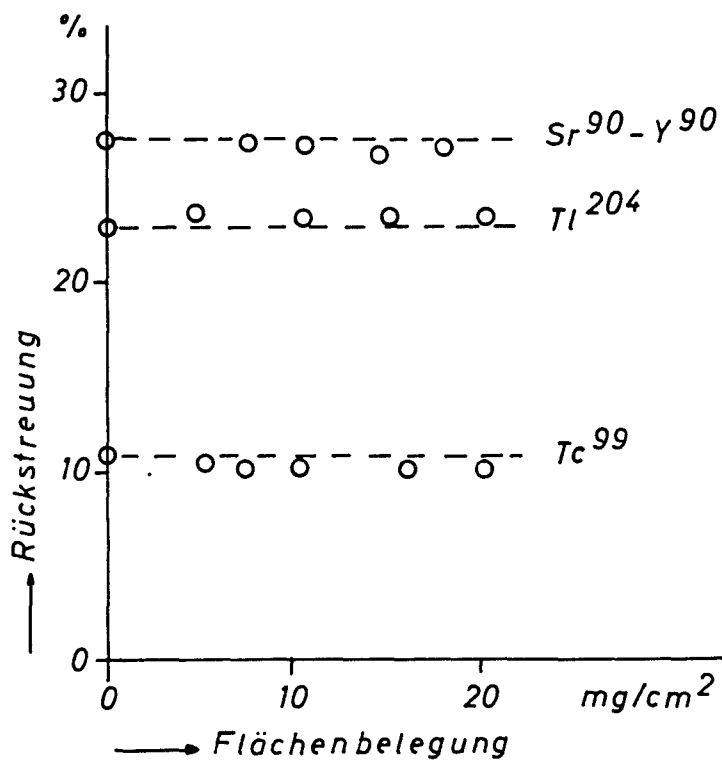


Abb. 2-23 Rückstreuanteil in Abhängigkeit vom Flächengewicht der Probe bei verschiedenen β -Strahlern

(nach Fessler, H., Kiefer H. und Maushart R., Kerntechnik 3, Heft 4 (1961) S. 151).

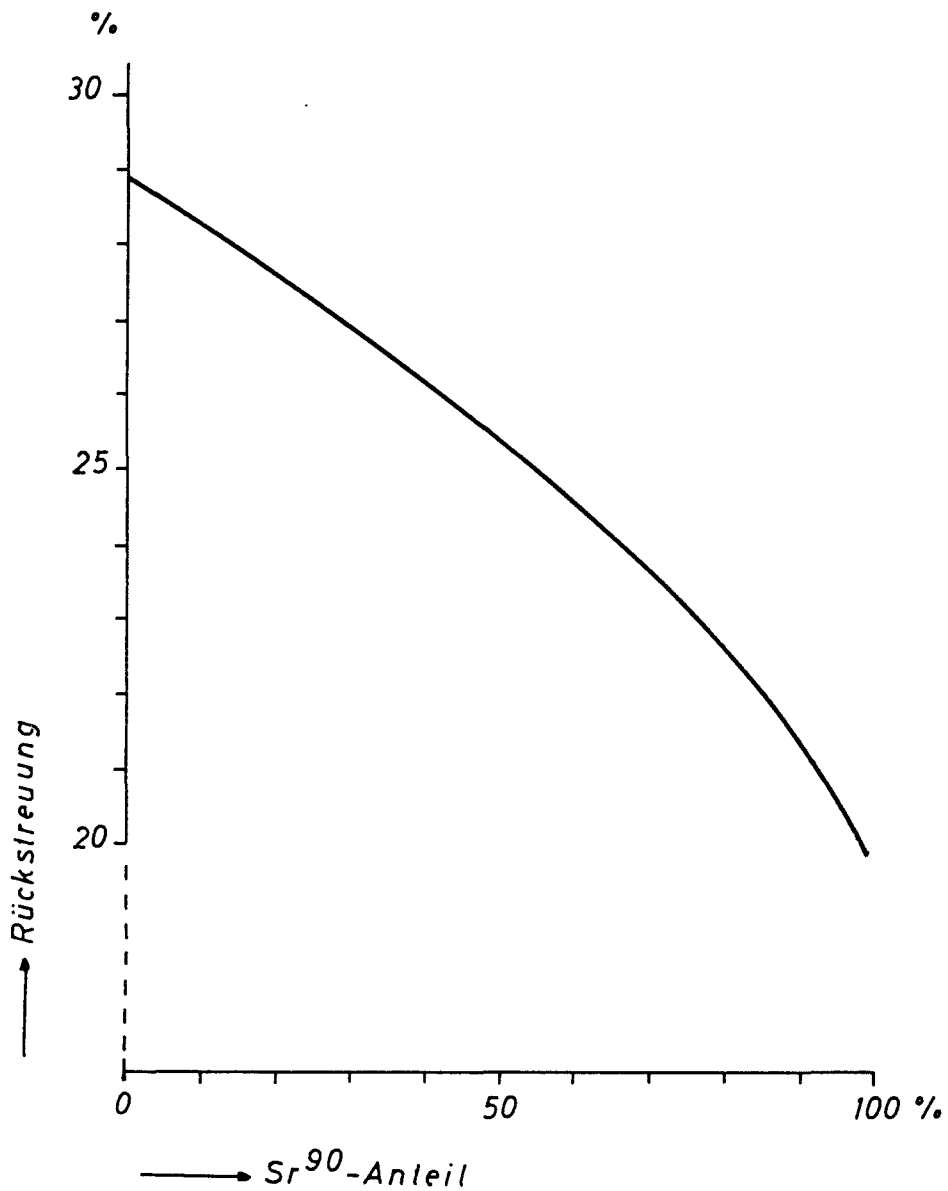


Abb. 2-24 Rückstreuanteil für ein Sr⁸⁹-Sr⁹⁰-Gemisch in Abhängigkeit vom Sr⁹⁰-Anteil
(nach Fessler H., Kiefer H. und Maushart R.,
Kerntechnik 3, Heft 4 (1961) S. 151)

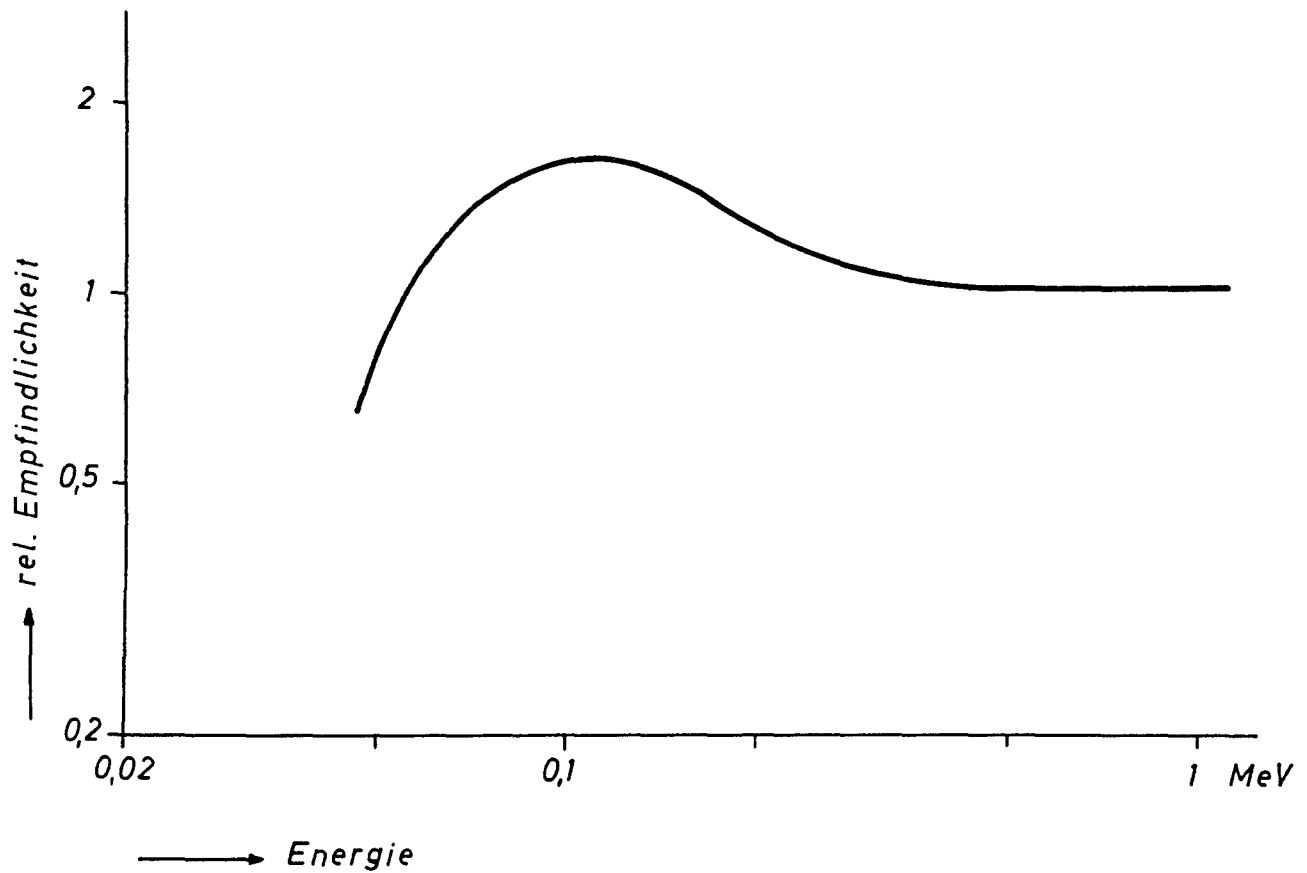


Abb. 2-25 Energieabhängigkeit eines im Strombetrieb als Dosisleistungsmesser betriebenen Großflächenproportionalzählrohrs, das beidseitig mit Folien abgeschlossen war
(nach Falk F. W., Direct Information 10/63)

Besonders aussichtsreich für Überwachungsmessungen scheint dabei eine Lösung, bei der mit einem einzigen Detektor die Dosisleistung in sehr weiten Meßbereichen erfaßt wird (Lit. 62). Dabei läßt man den Detektor bei sehr niederen Dosisleistungen im Impulsbetrieb arbeiten und hat somit eine sehr empfindliche Anzeige von Dosisveränderungen, wenn man auch keine "Absolut"-Anzeige der Dosisleistung hat. Steigt die Dosisleistung, so wird das Proportionalzählrohr auf Strombetrieb umgeschaltet. Es wird mit einem Sprungrelais verbunden und liefert wieder impulsförmige Informationen. Überschreitet diese Impulsrate eine gewisse Schwelle, dann wird beim Zählrohr die Spannung soweit vermindert, daß es nur noch mit der Gasverstärkung 1 arbeitet. Auch hier werden die jetzt erhaltenen Meßwerte wieder über ein Sprungrelais als Impulse geliefert. Auf diese Weise ist es möglich, in einem sehr weiten Meßbereich die Dosisleistung zu überwachen und da die Anlage im Impulsbetrieb arbeitet, fernzuübertragen.

3. DIE VERWENDUNG VON GROSSFLÄCHENPROPORTIONAL- ZÄHLROHREN IN DER ÜBERWACHUNGSTECHNIK

3.1 Strahlenschutzmonitoren

Als Monitoren bezeichnet man Geräte, die praktisch verzögerungsfrei eine Direktanzeige der Auswirkung der Radioaktivität auf den Detektor gestatten und - wie ihr Name sagt - mit einem Warnsignal ausgerüstet sind. Die Anzeige dieser Geräte gibt in den seltensten Fällen Absolutwerte, etwa der Radioaktivität oder Radioaktivitätskonzentration, wohl aber Relativwerte. Die Relativanzeige solcher Monitoren ist für sehr viele Strahlenschutzaufgaben Absolutwerten gegenüber vorzuziehen, da diese Relativwerte direkt angezeigt und verwertet werden können, die Absolutwerte aber meist erst nach längerer Zeit erarbeitet sind.

Vielfach konnten jedoch Monitoren auch dort, wo sie nützlich wären, nicht eingesetzt werden, weil die zur Verfügung stehenden Detektoren zu unempfindlich waren. Deshalb wurden jetzt Monitoren mit Großflächendetektoren ausgerüstet und damit neuartige Meßmöglichkeiten erzielt. Als geeigneter Detektor für die verschiedensten Anwendungen hat sich ein rechteckiges Großflächenproportionalzählrohr, das mit einer $0,9 \text{ mg/cm}^2$ Fensterfolie abgedeckt ist, eingeführt. Wie verschiedenartig selbst bei gleichem Detektor die Probleme bei solchen Monitoren sein können, sollen die folgenden Abschnitte zeigen.

3.11 Für die Wasserüberwachung

Die Bestimmung der Radioaktivitätskonzentration im Wasser nach Anreicherung hat zwei grundlegende Nachteile:

- Sie ist zur Wasserüberwachung bei einer kontinuierlichen Abgabe von Wasser ungeeignet, weil sie nur mit einer erheblichen Verzögerung den Meßwert anzeigen kann, so daß bis zu diesem

Zeitpunkt bereits u. U. gefährliche Mengen radioaktiven Abwassers abgeflossen sein können.

- Bei der Überwachung unbekannter Radionuklide bleibt es immer fraglich, ob mit dem angewendeten Anreicherungsverfahren auch alle im Wasser vorhandenen Radionuklide miterfaßt wurden, weil sämtliche Anreicherungsverfahren selektiv arbeiten.

Aus diesen Gründen wurde schon länger versucht, eine Direktüberwachung des Wassers durchzuführen, um mit solchen Anlagen beispielsweise eine automatische Abschaltung von Pumpen bei einer Grenzwertüberschreitung steuern zu können.

Es wurden Szintillationszähler direkt in den Wasserstrom eingesetzt und damit die γ -Strahlung gemessen (Lit. 63). Dieses Verfahren hat den Vorteil hoher Empfindlichkeit, weil die γ -Strahlung aus einem weiten Einzugsbereich kommt. Sie hat den weiteren Vorteil, daß, wenn nur ein bestimmtes Radionuklid zu überwachen ist, der Szintillationszähler mit Hilfe eines Einkanal Diskriminators auf die Photoabsorptionslinie der γ -Strahlung dieses Radionuklids eingestellt werden kann, so daß störende Strahlung von anderen Radioisotopen weitgehend diskriminiert wird. Ungeeignet sind solche Szintillationszähler aber immer dann, wenn die Art der Radioaktivität unbekannt ist, da sehr viele - und zwar wichtige - Strahler keine γ -Quanten aussenden. Ein weiterer Nachteil ist der, daß durch das große Einzugsgebiet der γ -Strahlung auch solche störend mitgemessen wird, die beispielsweise aus dem Boden, dem Flußschlamm usw. herrührt. Welche Bedeutung dem zuzumessen ist, sieht man daran, daß die spezifische γ -Aktivität eines Flußschlammes rund tausendmal höher liegt als die des Wassers.

Die zweite angewandte Möglichkeit war die, Zählrohre unmittelbar ins Wasser einzutauchen und damit zu messen. Um die notwendige β -Empfindlichkeit zu erzielen, wurden möglichst große Zählrohre genommen, z. B. Zählrohre mit beinahe 400 cm^2 Ober-

fläche, oder sogar Zählrohrbündel (Lit. 64, 65). Da das Zählrohr aber einem gewissen Wasserdruck standhalten muß, und zwar nicht nur dem statischen, sondern vor allem in Leitungen auch dynamischen Druckschwankungen, die beispielsweise beim Schließen von Ventilen auftreten, war eine Mindestwandstärke je nach Material von 30 - 60 mg/cm² notwendig. Sie absorbierte einen großen Teil energiearmer β -Strahler so weit, daß sie überhaupt nicht zur Messung gelangen. Infolgedessen waren diese Zählrohre nur geeignet, um β -Strahlung hoher Energie zu erfassen.

Darüber hinaus haben beide Methoden einen grundsätzlichen Fehler. Die Oberflächen der Detektoren kontaminieren relativ schnell, so daß man einen ständigen Anstieg von Radioaktivität registriert, ohne daß in Wirklichkeit im Wasser eine erhöhte Konzentration vorlag. Eigene Versuche zeigten, daß ein in fließendes Leitungswasser eingetauchtes Aluminiumzählrohr bereits nach 10-20 sec den fünffachen Zähleffekt durch auf der Zählrohrwand angelagerte natürliche Radioaktivität anzeigte, als es der Aktivitätskonzentration des Wassers entsprach.

Als zweckmäßigste Lösung erschien es, ein Großflächenproportionalzählrohr unmittelbar über der Wasseroberfläche anzubringen (Lit. 66, 67, 68, 69). Es wurde ein Zählrohr von 600 cm² Oberfläche verwendet, das mit einer Folie von 0,9 mg/cm² abgedeckt war. Der Abstand zur Wasseroberfläche war 1 cm. Mit dieser Anordnung erzielt man - von den allgemeinen Vorteilen der Direktüberwachung abgesehen - folgende Vorteile:

- Da es sich um ein Proportionalzählrohr handelt, können damit sowohl α - als auch β -Strahlen - wenn notwendig getrennt - erfaßt werden. Praktisch alle radioaktiven Isotope senden aber entweder α - oder β -Strahlung aus.
- Dank der großen Meßfläche und der günstigen Geometrie, die praktisch 2π ist, erreicht man die für Strahlenschutzmessungen

notwendige Empfindlichkeit.

- Da das Zählrohr nicht mit dem Wasser in Berührung steht, kann das Zählrohr nicht kontaminieren.

Die experimentell damit ermittelten Empfindlichkeitskurven zeigt Abb. 3-1 für α -Strahlung und Abb. 3-2 für β -Strahlung.

Theoretische Überlegungen zur Berechnung dieser Empfindlichkeitskurven wurden von Plesch (1962) (Lit. 70, 71) und von Haberer (1962) (Lit. 72) sowie von Gebauer und Müller (1962) (Lit. 73) publiziert. Ihre Überlegungen zeigen eine befriedigende Übereinstimmung mit den experimentell gewonnenen Daten.

Wie man sieht, zeigt die β -Empfindlichkeitskurve eine sehr starke Energieabhängigkeit, das bedeutet also, daß bei gleicher Impulsanzeige je nach Energie des gemessenen Strahlers eine völlig andere Aktivitätskonzentration im Wasser vorliegt. Der Grund hierfür ist selbstverständlich. Man mißt bei einer solchen Direktmessung aus der sättigungsdicken Schicht, die bei den einzelnen β -Strahlern sehr verschieden sein kann.

Es tritt nun die Frage auf, ob man eine so stark energieabhängige Anzeige als Monitor zur Direktmessung verwenden kann. Von der Messung nach Anreicherung ist man gewohnt, daß eine Aktivitätsgrenze gesetzt ist, unterhalb der das Wasser nicht nach Einzelradionukliden analysiert werden muß, sondern eine Gesamtaktivitätsbestimmung genügt, weil bekannt ist, daß unterhalb dieser Grenze keine nicht mehr "zulässige Konzentration" irgend eines Radionuklids liegt. Dabei ist in Kapitel 2 eingehend auf die Fragwürdigkeit einer Gesamtaktivitätsbestimmung unbekannter Radionuklide hingewiesen worden. Ist dieser Grenzwert überschritten, so muß analysiert werden, um festzustellen, ob es sich nicht um ein relativ ungefährliches Radionuklid handelt, des-

Abb. 3-1 Empfindlichkeitskurve eines Großflächenproportionalzählrohrs von 1000 cm^2 Meßfläche und einem Fenster von 1 mg/cm^2 Flächengewicht, das zur Direktüberwachung der α -Aktivität im Wasser verwendet wird. (Abstand Wasser-Zählrohrenfenster 1 cm). Die MZK wichtiger α -Strahler im Wasser ist mit eingezeichnet. (Nach Kiefer H. u. Maushart R., Neue Technik 2, Nr. 3 u. 4 (1960).

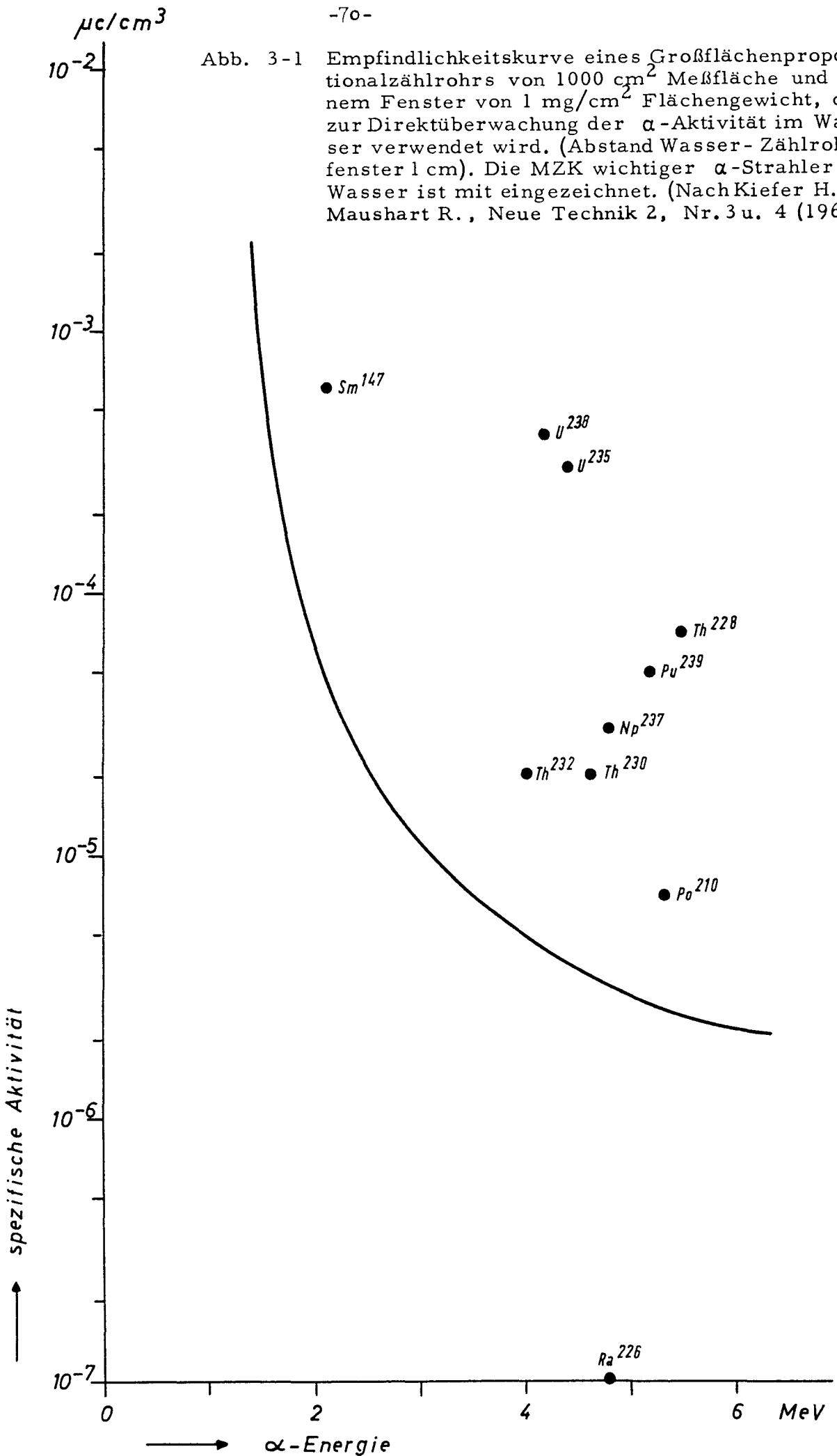
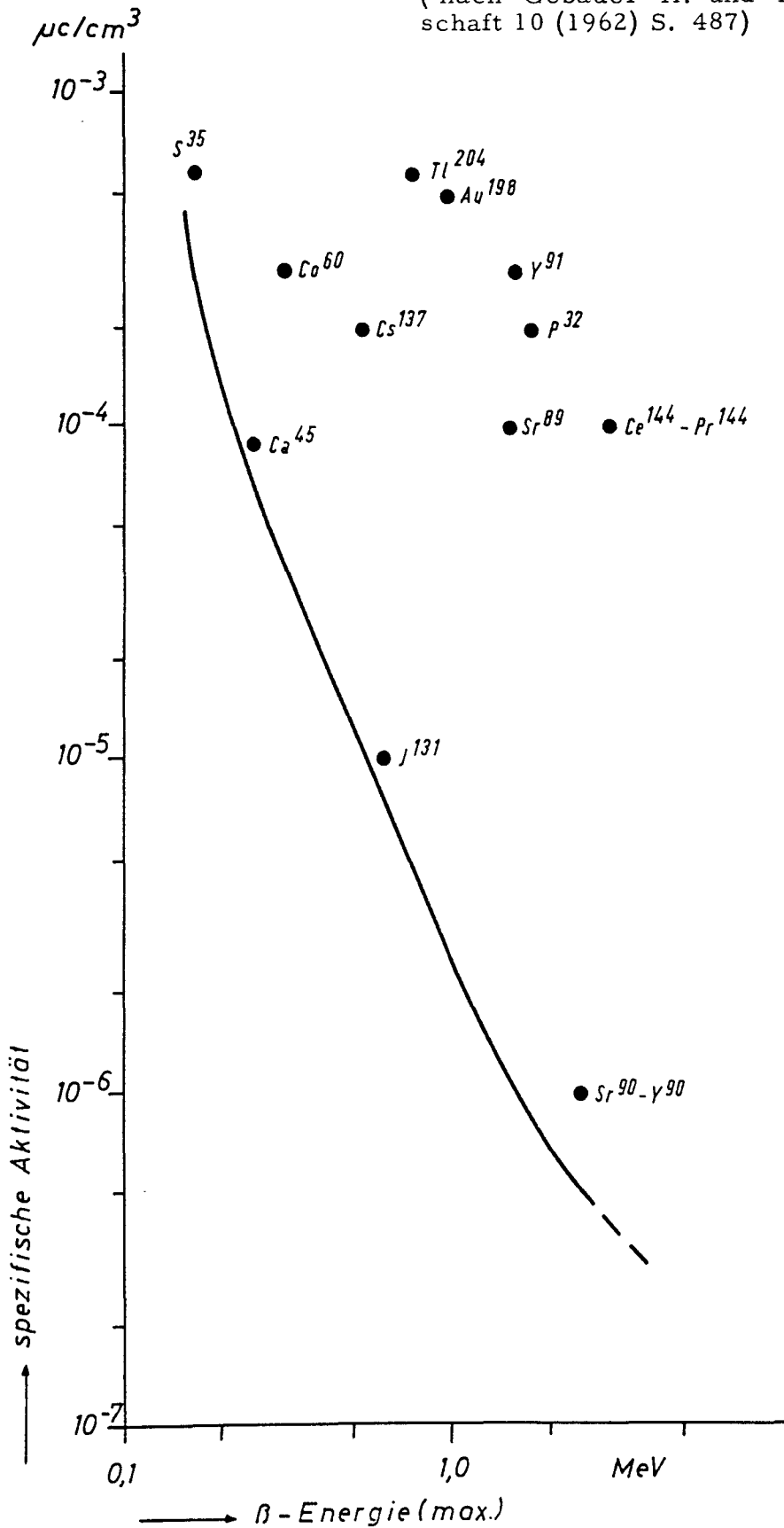


Abb. 3-2 Nachweisgrenze der direkten β -Überwachung mit einem Großflächenproportionalzählrohr von 600 cm^2 Meßfläche; die MZK in Wasser der wichtigsten β -Strahler ist mit eingezeichnet. (nach Gebauer H. und Müller S., Atomwirtschaft 10 (1962) S. 487)



sen maximal zulässige Konzentration oder besser Strahlenschutzrichtwert noch nicht erreicht ist. Wenn man die nächste Abbildung 3-3 betrachtet, so ist dort die zulässige Aktivitätskonzentration für unbekannte radioaktive Isotope von $1 \times 10^{-7} \mu\text{c}/\text{cm}^3$, also unsere bisherige Schwelle, eingetragen. Gleichzeitig findet man die zulässigen Konzentrationen einer größeren Zahl der wichtigsten Radionuklide. Für ein Monitorgerät zur Direktüberwachung wäre es nun ideal, wenn dieses Gerät nicht bei einer bestimmten radioaktiven Konzentration einen Warnton gäbe, sondern bei einer Kurve, die all die hier eingetragenen zulässigen Konzentrationen umhüllt. Denn sonst müssen wir im Zwischenbereich zwischen dieser Umhüllenden und unserer Schwelle stets analysieren, was immer einen erheblichen Aufwand bringt. Diese Umhüllende ist nun meßtechnisch nicht darzustellen, aber wir können eine Annäherungskurve an diese Umhüllende finden, das ist die energieabhängige Kurve, die unser direktanzeigendes Meßgerät liefert. Man sieht also, daß die energieabhängige Anzeige unseres Großflächenproportionalzählrohrs, das unmittelbar über der Wasseroberfläche angebracht ist, im Grunde genommen für Monitoren wesentlich besser geeignet ist, als eine Anlage, die bei einer eingestellten Aktivitätskonzentration unabhängig von der Energie des Strahlers eine Warnung geben würde.

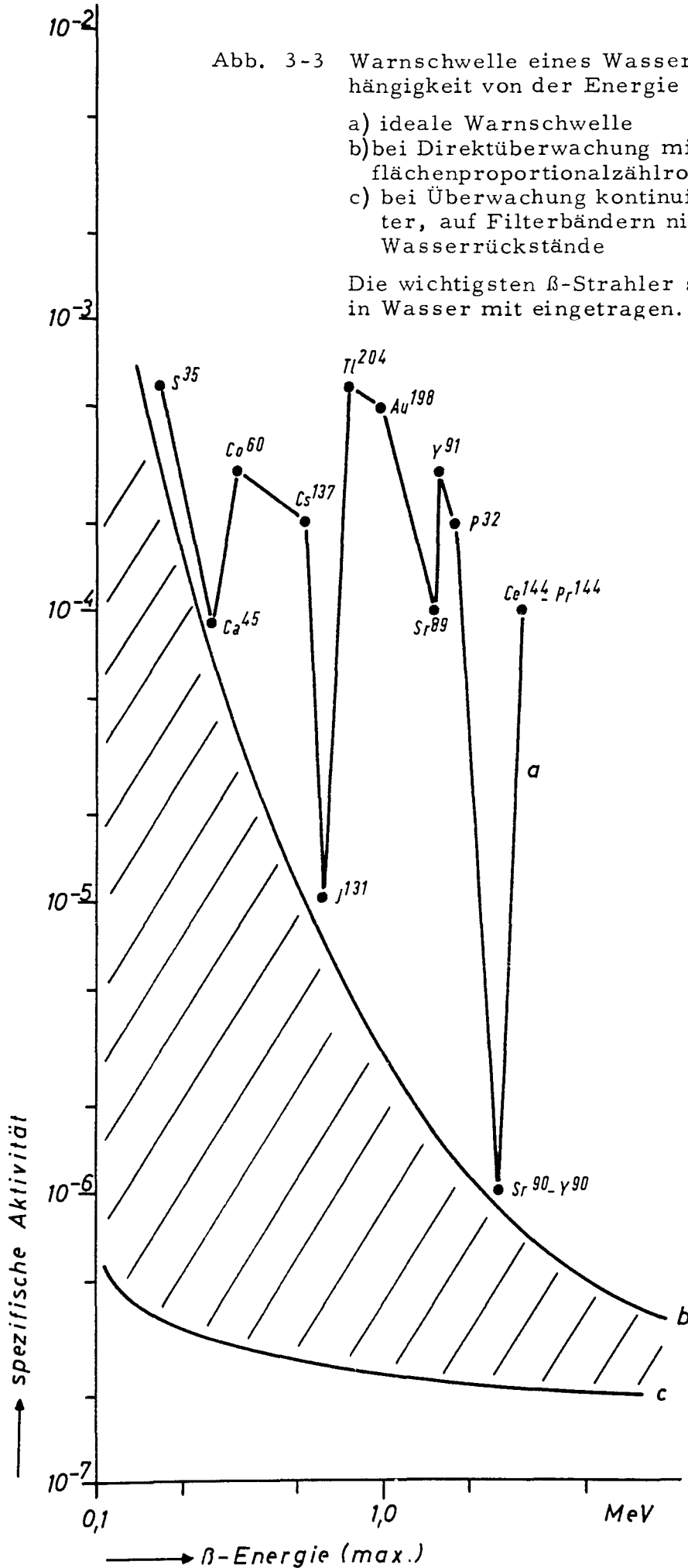
An dieser Stelle soll noch eingefügt werden, daß das Meßgerät bei bekanntem Radionuklid in Aktivitätskonzentration kalibriert werden kann und dann für diese und nur diese β -Energieverteilung einen echten Aktivitätskonzentrationswert gibt.

Ein Nachteil dieser Anordnung ist der, daß bei Schwankungen des Nulleffekts die Anlage eine Erhöhung anzeigen kann, die nicht auf eine erhöhte Wasserkonzentration zurückzuführen ist. Wird die Anlage empfindlich eingestellt, so kann es sehr oft vorkommen, daß Schwankungen des Nulleffekts zum Alarm führen. Wird die Alarmschwelle so gestellt, daß sie von den normalen Schwankungen des Nulleffekts nicht erreicht wird, ist die Anlage wesentlich

Abb. 3-3 Warnschwelle eines Wassermonitors in Abhängigkeit von der Energie

- a) ideale Warnschwelle
- b) bei Direktüberwachung mit einem Großflächenproportionalzählrohr
- c) bei Überwachung kontinuierlich eingedampfter, auf Filterbändern niedergeschlagener Wasserrückstände

Die wichtigsten β -Strahler sind mit ihrer MZK in Wasser mit eingetragen.



unempfindlicher, wahrscheinlich sogar zu unempfindlich für die übliche Abwasserüberwachung. Aus diesen Gründen wurde über oder neben dem Detektor ein zweiter gleichartiger Detektor angebracht, der gegen das Wasser abgeschirmt ist. Wenn beide Detektoren in Differenz geschaltet sind, so ist es möglich, damit die Schwankungen des Nulleffekts auszugleichen.

Zur α -Überwachung benützt man zweckmäßigerweise einen größeren Detektor, z. B. einen Detektor von 1000 - 2000 cm² Oberfläche. Da der α -Nulleffekt durch äußere Einflüsse praktisch nicht verändert wird, braucht hier keine Differenzanordnung eingesetzt zu werden. Wie auch Abb. 3-1 zeigt, haben im Gegensatz zu den verschiedenen β -Strahlern die α -Strahler durchweg Energien, die höchstens um den Faktor 3 schwanken. Infolgedessen hat man bei der Überwachung der α -Strahlung nicht annähernd die große Energieabhängigkeit wie bei der Überwachung der β -Strahlung. Hier entspricht also einer Impulsanzeige innerhalb von $\pm 100 - 200 \%$ eine Aktivitätskonzentration, wenn die Meßanlage beispielsweise mit natürlichem Uran kalibriert wurde. Die Abb. 3-1 zeigt, daß alle wichtigen α -Strahler - bis auf Ra²²⁶ - direkt mit einem Großflächenzählrohr, das in 0,5 cm Abstand über der Wasseroberfläche angebracht ist, überwacht werden können.

3. 12 Für die Luftüberwachung

Wie bei Monitoren für die Wasserüberwachung gezeigt wurde, lassen sich damit praktisch alle zulässigen Strahlenschutzrichtwerte im Wasser direkt überwachen. Dies ist bei der Luft mit Hilfe von Zählrohren oder auch anderen Detektoren nicht mehr möglich. Denn alle Radioisotope, die als Aerosole in der Luft vorkommen, werden im Körper in mehr oder weniger starkem Maße angereichert und haben deshalb sehr niedere zulässige Konzentrationen. Ohne Anreicherungsverfahren lassen sich solche Konzentrationen

nicht mehr messen.

Andererseits kennt man mindestens 70 - 80 Radionuklide, die in Gas- oder Dampfform vorkommen und damit nicht ohne besondere Maßnahmen wie Ausfrieren, Auswaschen u. ä. angereichert werden können. Besonders zur Überwachung dieser Radionuklide ist man auf eine Direktmessung angewiesen. In diesen Fällen, insbesondere wenn es sich um Gase handelt, die im Körper nicht oder nur zu einem sehr kleinen Bruchteil angereichert werden können, sind jedoch verhältnismäßig hohe Luftkonzentrationen zugelassen, so daß hierfür Monitore gebaut werden können, die die notwendige Empfindlichkeit haben.

Dabei muß man sich überlegen, daß die sättigungsdicke Schicht für β -Teilchen - für manche β -Strahler bis 10 m in Luft - in geschlossenen Räumen, in Abluftschornsteinen oder Kaminen kaum je erreicht wird. Infolgedessen kann man bei der Direktmessung der Luft nicht einmal die sättigungsdicke Schicht wie etwa im Wasser ausnutzen.

Außerdem muß man, wenn man in Radioisotopen-Laboratorien solche Anlagen aufstellt, damit rechnen, daß eine Erhöhung der Anzeige, die zum Erreichen der Warnschwelle führen kann, nicht allein darauf zurückzuführen ist, daß sich die Luftkonzentration erhöht, sondern meist darauf, daß sich ein Strahler im Raum befindet, der den gesamten Nullpegel erhöht. Ein allgemein höherer Nullpegel setzt die Meßempfindlichkeit aus statistischen Gründen herab, er kann aber meßtechnisch etwa durch höhere Zeitkonstanten am Ratemeter noch aufgefangen werden. In praxi ändert sich aber in derartigen Laboratorien der Nullpegel durch die Arbeit so häufig, daß man mit Differenzanlagen (siehe Abschnitt 3. 1) Abhilfe zu schaffen sucht. Dieser Ausweg ist jedoch erfahrungsgemäß nur beschränkt anwendbar, weil Differenzanordnungen richtungsabhängig sind und deshalb bei gerichteten Strahlern aus "punktförmigen" Quellen wechselnden Standorts mit Fehlanzeigen reagieren

müssen. Deshalb wird zweckmäßigerweise die Luftüberwachung gasförmiger Substanzen nicht im Laboratorium selbst durchgeführt, sondern im Abluftkanal. Da solche Abluftkanäle in der Regel nur β -Reichweiten von maximal 1 Meter zulassen, ist die Empfindlichkeit der Detektoren für alle höherenergetischen β -Strahler gleich. Sie nimmt nur ab bei β -Strahlern, deren Reichweite kleiner ist als die mögliche freie Weglänge im Kamin.

Als Detektoren für eine derartige Abluftüberwachung werden zweckmäßigerweise die üblichen mit einer Fensterfolie von $0,9 \text{ mg/cm}^2$ abgedeckten Großflächenproportional-Rechteck-Zähler verwendet, die nur jetzt auf beiden Seiten mit einem dünnen Fenster versehen sind. So erreicht man die doppelte Empfindlichkeit bei gleichem Nulleffekt.

Von Högrefe (1962) (Lit. 74) wurde die Empfindlichkeit von Großflächenproportionalzählrohren, die von der zu messenden Luft umströmt wurden, untersucht. Er machte dabei folgende Voraussetzungen:

- Der Zähler habe eine Meßfläche von 600 cm^2 ,
- er sei mit einer Folie von $1,2 \text{ mg/cm}^2$ abgedeckt,
- der Einzugsradius der Strahlung betrage 50 cm,
- der Nulleffekt sei für α -Strahlung $0,05 \text{ Imp/min} \cdot \text{cm}^2$,
- der Nulleffekt sei für β -Strahlung $2 \text{ Imp/min} \cdot \text{cm}^2$.

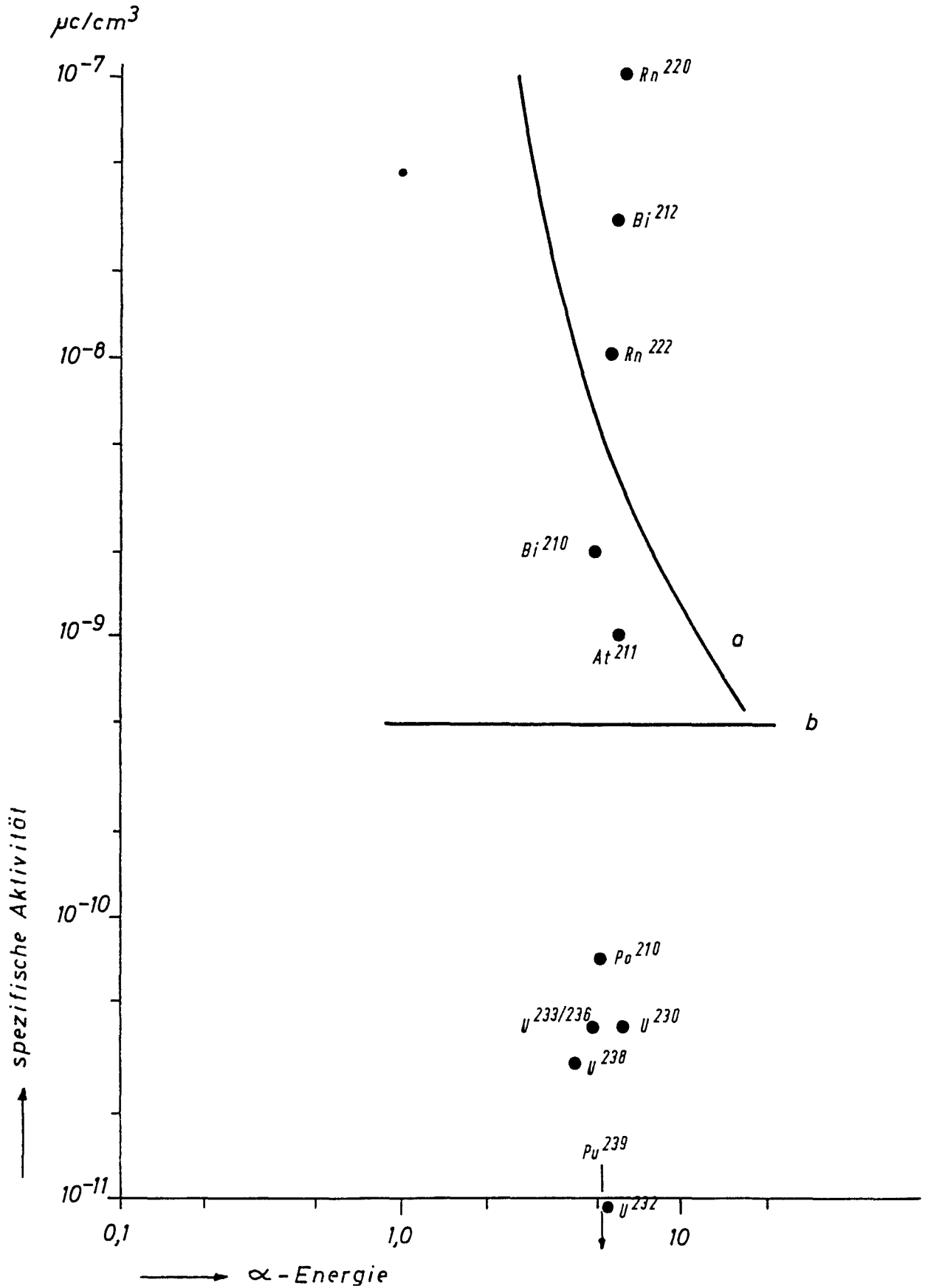
Die hier angesetzten Daten sind leicht zu erreichen, üblicherweise wird man einen doppelwandigen Detektor mit mindestens 1200 cm^2 Meßfläche nehmen und so einen pro cm^2 Meßfläche über die Hälfte niedrigeren β -Nulleffekt haben. Auch der α -Nulleffekt läßt sich bei zweckmäßiger Wahl des für den Bau des Detektors verwendeten Materials um mindestens den Faktor 10 herabsetzen. Schließlich läßt sich die Fensterfolie dünner halten, was bei der α -Empfindlichkeit von Bedeutung ist.

Abb. 3-4 zeigt die mit dieser Berechnung gewonnene Empfindlichkeit für α -Strahler. Diese Kurve zeigt, daß für eine allgemeine direkte α -Überwachung der Luft das Großflächenproportionalzählrohr nicht geeignet ist, höchstens für eine spezielle Überwachung des Radon, wie sie beispielsweise in Bergwerken häufig durchgeführt werden muß.

Da Großflächenproportionalzählrohre aber auch mit Luft als Zählgas im α -Meßbereich betrieben werden können, kann die von Aerosolengereinigte - um eine Kontamination des Zählerinnenraums zu vermeiden - Meßluft durch den Detektor geschickt werden. Damit ist eine praktisch energieunabhängige α -Messung einer Empfindlichkeit von mindestens $5 \times 10^{-10} \mu\text{C}/\text{cm}^3$ Luft zu erreichen. Diese Kurve ist ebenfalls in Abb. 3-4 eingetragen.

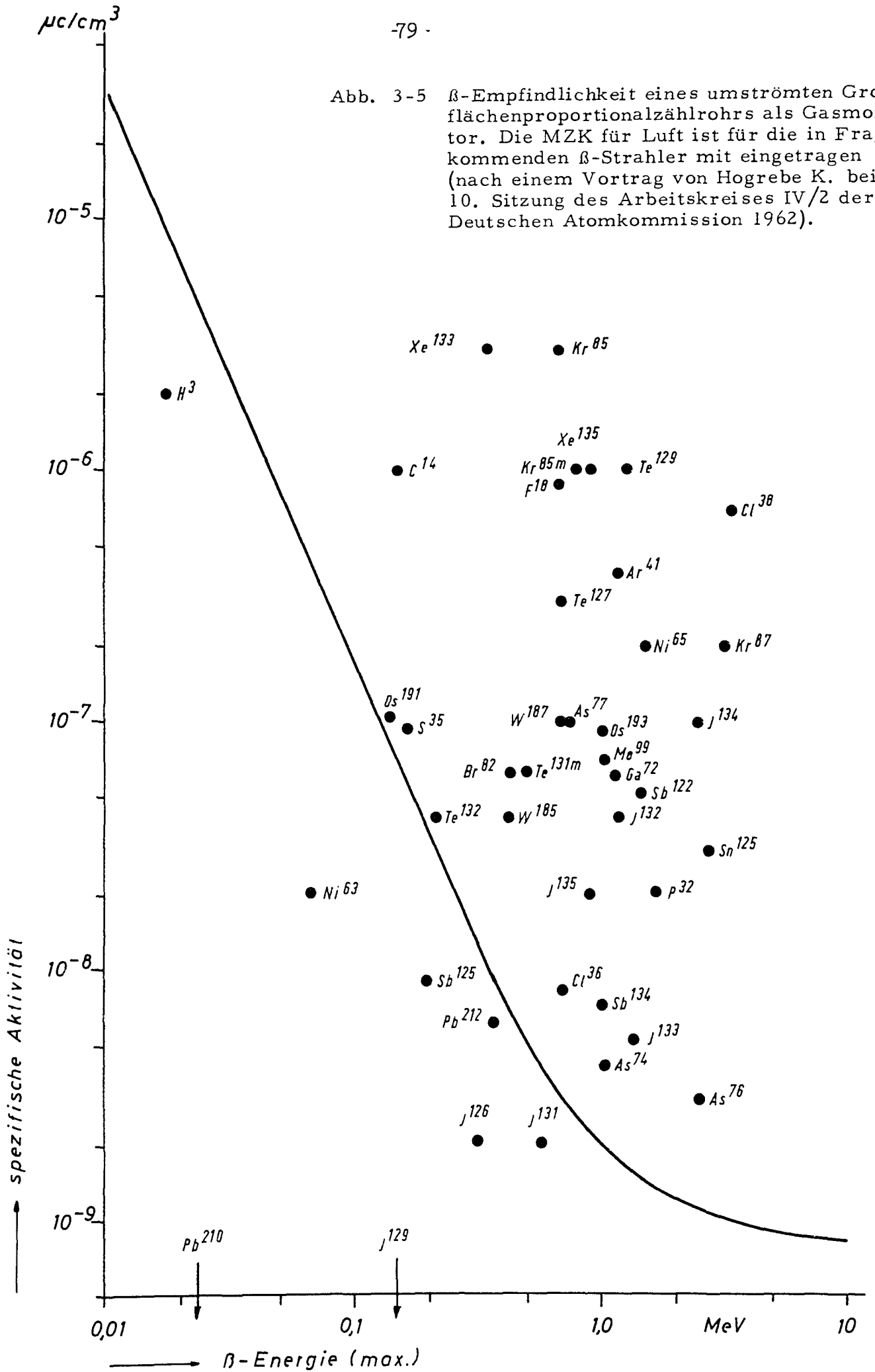
Abb. 3-5 zeigt die Empfindlichkeitskurve für die Überwachung von β -Strahlern bei umströmtem Detektor. Auch hier besteht die Möglichkeit, die auszumessende Luft zwar nicht allein als Zählgas zu benutzen, wohl aber dem Methan etwa im Verhältnis 1:3 zuzusetzen. Da aber der β -Nulleffekt wesentlich höher ist als der α -Nulleffekt, ist auf diese Weise nur bei sehr niederen β -Energien, beidene das Einzugsgebiet der β -Strahlung klein ist, eine Verbesserung zu erzielen. Eine weiterentwickelte Anlage nach dem Durchströmprinzip wird zur Tritiumüberwachung in Abschnitt 3.23 beschrieben.

Der Vollständigkeit halber soll auch noch die auf diese Weise gewonnene Empfindlichkeitskurve für Röntgen-Strahler gezeigt werden (Abb. 3-6). Die Nachweiswahrscheinlichkeit nimmt mit steigender Energie stark ab, weil die Wahrscheinlichkeit einer Absorption im Zählraum immer geringer wird. In dieser einfachen Form ist ein Großflächenproportionalzählrohr zur Direktüberwachung gasförmiger Röntgen-Strahler in Luft zwar ungeeignet. Trotzdem lassen sich für derartige Strahler in einem bestimmten Energiebereich mit Großflächenproportionalzählrohren Meßanla-



3-4 α -Empfindlichkeit eines Großflächenproportionalzählrohrs als Gasmonitor. Kurve a: das Zählrohr wird umströmt, Kurve b: das Zählrohr wird durchströmt. Die MZK für Luft ist für wichtige Radionuklide mit eingetragen. (nach Vorträgen von Hogrebe K. bei der 10. und von Kiefer H. bei der 11. Sitzung des Arbeitskreises IV/2 der Deutschen Atomkommission)

Abb. 3-5 β -Empfindlichkeit eines umströmten Großflächenproportionalzählrohrs als Gasmonitor. Die MZK für Luft ist für die in Frage kommenden β -Strahler mit eingetragen (nach einem Vortrag von Hogrebe K. bei der 10. Sitzung des Arbeitskreises IV/2 der Deutschen Atomkommission 1962).



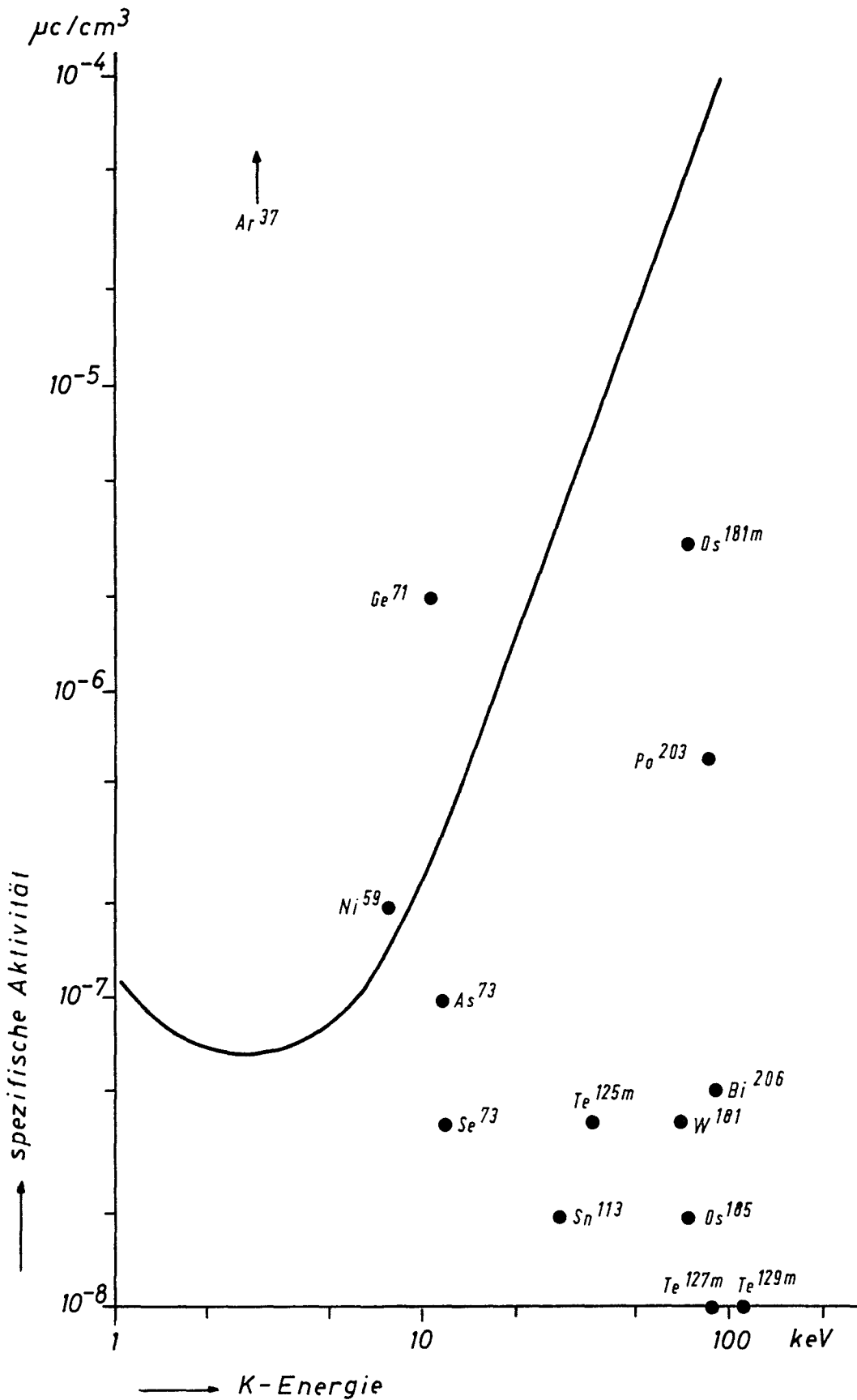


Abb. 3-6 Röntgenstrahlerempfindlichkeit eines umströmten Großflächenproportionalzählrohrs als Gasmonitor. Die MZK für Luft ist für die in Frage kommenden Röntgenstrahler mit eingezeichnet. (nach einem Vortrag von Hogrebe K. bei der 10. Sitzung des Arbeitskreises IV/2 der Deutschen Atomkommission 1962).

gen bauen, die um zwei Zehnerpotenzen empfindlicher sind als in Abb. 3-6 dargestellt.

Weitere Berechnungen für die Empfindlichkeit von im Gasstrom befindlichen Großflächenproportionalzählrohren stammen von Plesch (1962) (Lit. 70). Er rechnet als Beispiel aus, daß es mit einem doppelseitig mit einer Folie von $0,9 \text{ mg/cm}^2$ abgedeckten Großflächenproportionalzählrohr von 5600 cm^2 möglich sein muß, die zulässige Konzentration von J^{131} zu überwachen, wenn man sich damit zufriedengibt, daß die Zählrate 80 Imp/min über dem Nulleffekt liegt und der Einzugsradius der Strahlung 18 cm beträgt. Diese Daten sind technisch zu verwirklichen.

Zur Erhöhung der Empfindlichkeit solcher Zählanlagen lassen sich beim Durchströmverfahren die Zähler noch mit Antikoinzidenz und mit einer Abschirmung versehen. Auch Differenzverfahren werden angewandt, um beispielsweise die Schwankungen des Nulleffekts durch die natürliche Radioaktivität in der Luft zu kompensieren. Der Differenzzähler sitzt dann an einer Stelle, wo die gleiche natürliche Radioaktivität in der Luft herrscht wie im zu überwachenden Raum, aber keine künstliche Radioaktivität zu erwarten ist.

3.13 Für die Personen- und Arbeitsplatzüberwachung

Personen, die mit offenen radioaktiven Stoffen umgehen, werden am häufigsten an Händen und Schuhen kontaminiert. Dafür gibt es spezielle **H a n d - u n d F u ß m o n i t o r e n**. Solche Hand- und Fußmonitore sind in der Regel β - γ - oder α -empfindlich. Zweckmäßiger wäre es allerdings, wenn sie β - und α -empfindlich wären.

Die üblichen Hand- und Fußmonitore sind pultförmig gebaut und haben Öffnungen zum Einführen der Hände. Man steht gleichzeitig über einem oder mehreren Detektoren zur Überwachung der Schuhe. Die Detektoren sind üblicherweise fest eingebaut.

In der Praxis hat es sich nun gezeigt, daß es wünschenswert wäre, α - β -Monitoren zur Hand- und Fußüberwachung zu haben, sowie Detektoren, die größer und beweglicher sind. Hierfür hat sich wieder der Großflächenproportionalzähler als zweckmäßig erwiesen. Er wird beweglich aufgestellt und zur Verringerung des Nulleffekts mit einem Antikoinzidenz-Zähler versehen. Die Anzeige erfolgt mit einem Ratemeter und wird außerdem über einen Lautsprecher hörbar gemacht. Da der Detektor so groß ist, daß man beide Hände gleichzeitig auflegen kann, ist eine Messung sehr schnell zu bewerkstelligen. Der Zähler schreibt laufend auf einem Schreiber mit, so daß man nachträglich stets kontrollieren kann, ob auch Überwachungen durchgeführt wurden. Gleichzeitig dienen solche Zähler der Raumüberwachung.

Als Grenze für eine Körperkontamination gelten 666 α -Zerfälle oder das 100-fache an β - γ -Zerfällen pro Minute. Da der α -Wirkungsgrad bei 20 %, der β -Wirkungsgrad bei 40 % liegt, der α -Nulleffekt höchstens einige α -Imp/min, der β -Nulleffekt ca. 500 Imp/min ist, kann dieser Grenzwert, der jeweils etwa das 50-fache des Nulleffekts beträgt, schon nach wenigen Sekunden erkannt werden.

Wenn man nicht wie üblich hintereinander die β -Strahlung und dann die α -Strahlung kontrollieren möchte, soweit das im Einzelfall überhaupt notwendig ist, kann man auch eine elektronische Diskriminierung der α - und β -Strahlung durchführen, oder mit einem Doppelzähler - einer für α - und einer für β -Strahlung - arbeiten, um eine gleichzeitige Anzeige der α - und β -Strahlung zu erhalten (Lit. 31, 34, 41, 75).

Wenn eine Kontamination des Detektors befürchtet wird, kann er zusätzlich mit einer dünnen Folie abgedeckt werden, die allerdings so dünn sein muß, daß sie mit der zweiten Fensterfolie immer noch α -Strahlen durchläßt. Das ist im allgemeinen bei Folien unter 1 mg/cm^2 gewährleistet.

Die Kontrolle von Böden und Wänden in Laboratorien, in denen Kontaminationen zu befürchten sind, werden in der Regel mit Hilfe von Wischtests durchgeführt. Diese Kontrolle bleibt aber stets dann Stückwerk, wenn es sich um große Räume handelt, etwa um Experimentierhallen oder Hallen, in denen Reaktoren oder Beschleuniger aufgebaut sind. Hier wird zweckmäßigerweise ein Gerät eingesetzt, das aus einem tragbaren oder einem unmittelbar über dem Boden fahrenden Detektor besteht und am Anzeigegerät mit einem einstellbaren Warnsignal ausgestattet ist. Man nennt solche Geräte Oberflächenmonitoren.

Die erforderliche Empfindlichkeit geht aus den Anweisungen hervor, wann eine Oberfläche in jedem Fall als kontaminiert zu gelten hat, beispielsweise bei einer α -Aktivität von $1 \times 10^{-11} \text{ c/cm}^2$ oder einer β -Aktivität von $3 \times 10^{-9} \text{ c/cm}^2$. Meist ist man aber bestrebt, soweit als möglich unter diesen Werten zu bleiben und zwar nicht aus Strahlenschutzgründen, sondern um empfindliche Messungen und Versuche nicht zu stören oder zu gefährden. Da der Empfindlichkeit und der schnellen Kontrolle wegen großflächige Detektoren erwünscht sind, hat sich das Großflächenproportionalzählrohr auch in diesem Fall als zweckmäßig erwiesen.

So sind inzwischen leicht tragbare batteriebetriebene Handgeräte mit Großflächenproportionalzählrohren als Detektoren entwickelt worden, die zum Teil von einer kleinen Zählgasflasche gespeist werden, um vor allem auch bei β -Messungen mit hohem und konstantem Wirkungsgrad arbeiten zu können, zum Teil luftbetrieben werden, was ihre ständige Einsatzbereitschaft etwa in Alarmtrupps erleichtert. Mit diesen Geräten wird es möglich sein, die täglichen Messungen der vermuteten Oberflächenkontaminationen ganz wesentlich zu verbessern und zu beschleunigen.

In Laboratorien, in denen mit offenen Radioaktivitäten umgegangen wird, muß auch dafür gesorgt werden, daß keine kontaminierte Arbeitskleidung zur übrigen radioaktivitätsfreien Wäsche gelangt

und so u. U. große Mengen Waschwasser radioaktiv verunreinigt werden. Ein Waschwasser ist nämlich infolge der darin vorhandenen Detergentien, Komplexbildner usw. außerordentlich schwierig und dementsprechend teuer zu dekontaminieren.

Hierfür wurde ein *W ä s c h e m o n i t o r* konstruiert, der eine Aktivität von $5 \cdot 10^{-8}$ c zu messen gestattet, auch dann, wenn es sich um weiche Strahler wie S^{35} oder C^{14} handelt, und der genauso α -Strahlung in dieser Konzentration messen kann (Lit. 76), womit gewährleistet ist, daß das Waschwasser nie eine höhere Aktivitätskonzentration erhalten kann, als für unbekannte Radionuklide noch zugelassen ist.

Um diese hohe Empfindlichkeit bei kürzester Meßzeit zu erreichen, wurde folgender Aufbau gewählt:

Als Detektoren stehen sich jeweils zwei Großflächenproportionalzählrohre mit je 700 cm^2 Meßfläche, abgedeckt mit einer $0,9 \text{ mg/cm}^2$ schweren Folie in wenigen Zentimeter Abstand - die unteren in Tischebene - gegenüber. Die Oberflächen der Zählrohre sind mit einem leichten Schutzgitter versehen, um eine Beschädigung der Fensterfolie durch Knöpfe usw. zu vermeiden. Um eine Kontamination der Detektoren zu vermeiden, läuft über dem Detektor noch eine dünne Folie von unter 1 mg/cm^2 , die jeweils nach Verschmutzung weitergedreht werden kann.

Die Anzeige erfolgt für die β -Strahlung über ein Ratemeter mit kurzer Zeitkonstante (4 sec), für die α -Messung ist Einzelimpulszählung notwendig. Die Impulse werden gleichzeitig über einen Lautsprecher hörbar gemacht, der in mehreren Stufen unteretzt werden kann. Die Überprüfung eines Wäschestücks dauert weniger als 30 sec. Die gewünschte Empfindlichkeit von 50 nc wird in jedem Fall auch dann erreicht, wenn die Radioaktivität vollkommen gleichmäßig auf dem Arbeitsmantel verteilt ist.

Bei der Empfindlichkeit der Anlage hat es sich nicht als notwendig erwiesen, die Zähler noch besonders mit Blei oder mit Antikoinzidenzzählern abzuschirmen, um den Nulleffekt zusätzlich herabzusetzen. Das gilt vor allem deshalb, weil derartige Monitoren in der Wäscherei aufgebaut sind, wo nicht mit zusätzlicher Umgebungsstrahlung oder gar stark schwankendem Nulleffekt aus künstlichen Quellen zu rechnen ist.

3.2 Großflächenproportionalzählrohre in Sonderanlagen

In modernen kerntechnischen Anlagen können sehr spezielle Strahlenschutzmeßprobleme auftreten. Oft muß unter irgendwelchen vorgegebenen Bedingungen eine Überwachungsanlage entwickelt und konstruiert werden, die auf die Messung eines ganz bestimmten Radionuklids ausgerichtet ist. Dabei ist meist das Hauptproblem, ob es gelingt, Störstrahlung aus der Umgebung oder von anderen Radionukliden, z. B. der natürlichen Radioaktivität der Luft, zu eliminieren. Besonders schwierig wird die Aufgabe immer dann, wenn das zu überwachende Radionuklid keine γ -Strahlung aussendet, sodaß die technisch einfache Lösung einer γ -Diskriminierung mit Hilfe von NaJ-Szintillationszählern ausscheidet. In einigen wichtigen Fällen konnten mit Hilfe von nach dem Prinzip der Großflächenproportionalzählrohre gebauten Detektoren befriedigende Lösungen gefunden werden.

3.21 Kontinuierliche Messung des α/β -Verhältnisses der Radioaktivität des Luftstaubs

Radioaktivitätskonzentrationen in Luft, die unter einigen Nano-curie pro Kubikzentimeter liegen, lassen sich nicht mehr mit Detektoren direkt überwachen. Man ist in solchen Fällen darauf angewiesen, die Radioaktivität der Luft - soweit sie nicht gasförmig ist - mit Hilfe von Filtern oder elektrostatisch aufzusammeln und dann einer Messung zuzuführen. Dieses Verfahren hat zwar ähnlich wie beim Wasser den Nachteil, daß man beim Anreicherungs-

verfahren nicht weiß, ob man alle in der Luft tatsächlich vorhandenen Radionuklide erfaßt hat. Außerdem wird die Messung auf alle Fälle verzögert. Man hat demgegenüber den Vorteil, daß man wesentlich höhere Empfindlichkeiten erzielen kann und daß man mit Sicherheit weiß, daß die gemessene Aktivität auch tatsächlich aus der Luft stammt und nicht eine Erhöhung der Umgebungsstrahlung ist.

Wenn die zu überwachende Radioaktivität in ihrer Konzentration in der Höhe der natürlichen Radioaktivität der Luft oder darunter liegt, ist man gezwungen, auf irgendeine Weise die natürliche Radioaktivität zu diskriminieren. Ein relativ einfaches und viel angewandtes Verfahren besteht darin, daß man zwischen Sammel- und Meßzeitpunkt eine Frist von beispielsweise 4 Stunden einschaltet, in der die natürliche Radioaktivität der Radon- und Thoron-Folgeprodukte auf ca. 5 % des Ausgangswerts abgeklungen ist. Mit diesem Verfahren lassen sich in der Regel bereits Konzentrationen "langlebiger" Radionuklide von einigen pc/m^3 Luft nachweisen. Es kann aber immer nur dann angewandt werden, wenn man nicht für den direkten Strahlenschutz schnell einen Meßwert braucht, sondern die Messungen beispielsweise zur Bestandsaufnahme der Strahlenbelastung einer Bevölkerungsgruppe über längere Zeit dienen. Für Überwachungsmessungen, die möglicherweise sogar mit automatischen Gegenmaßnahmen gekoppelt sind, ist ein schnelles Ergebnis notwendig, das in vielen Fällen nur mit sehr großem technischem Aufwand zu erzielen ist. Man braucht nur daran zu denken, daß beispielsweise die natürliche α -Aktivität bis zum 1000-fachen und mehr der Strahlenschutzrichtwerte für unbekannte α -Gemische betragen kann. Ein weiteres Problem liegt darin, daß die natürliche Radioaktivität nicht - wie etwa die kosmische Strahlung - einen relativ konstanten Wert darstellt, sondern während der Meßzeit außerordentlich stark (etwa 1 Zehnerpotenz) schwanken kann.

Von den vielen angewandten Verfahren (Lit. 75) ist eines die Verhältnismessung. Man geht davon aus, daß das Verhältnis von der

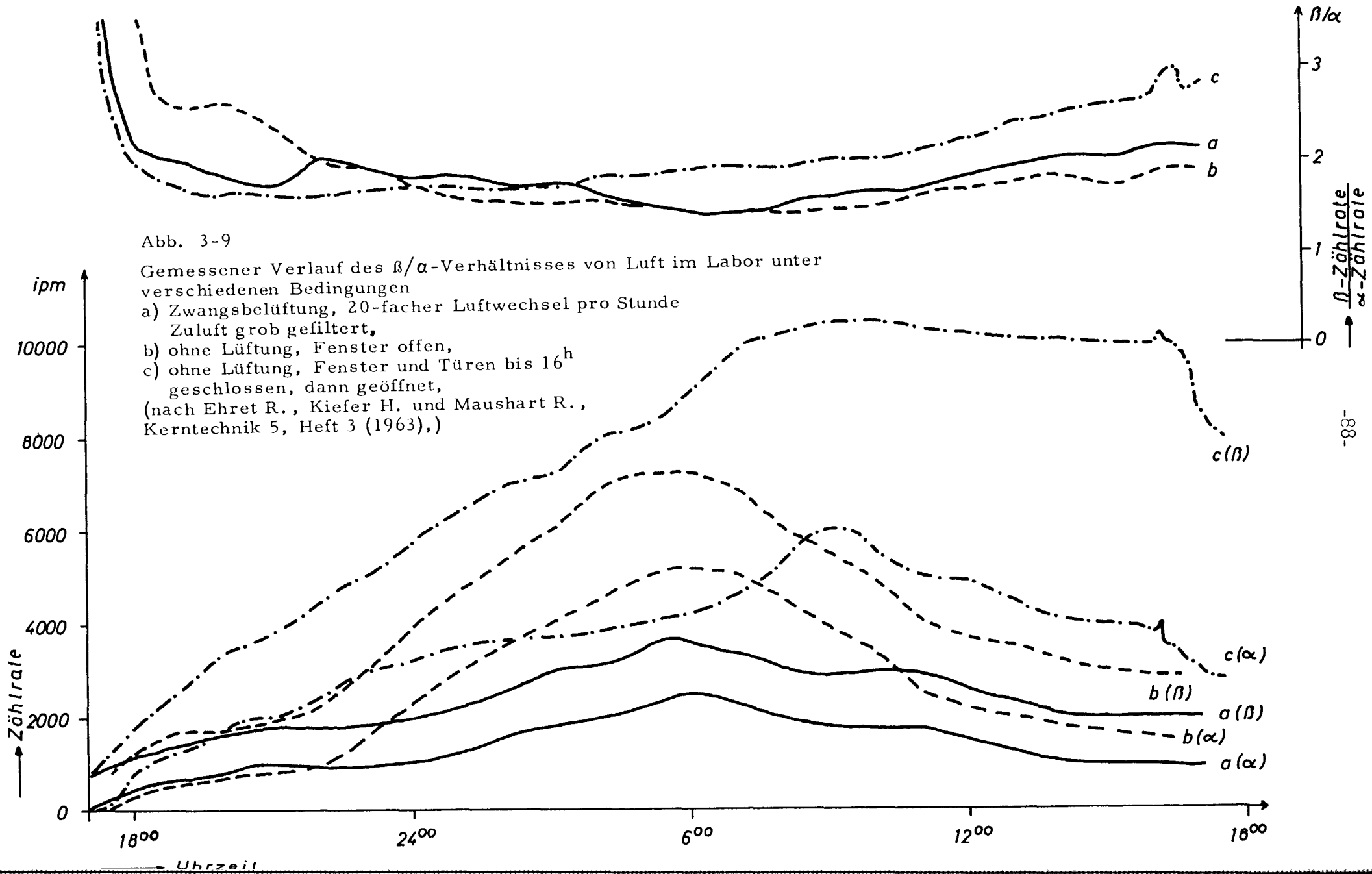
α - zur β -Komponente der natürlichen Zerfallsreihen bei Gleichgewicht der einzelnen Glieder konstant ist. Man mißt dazu beispielsweise die auf einem Filter angesammelte Aktivität mit Hilfe eines Proportionalzählrohrs, diskriminiert elektronisch die Impulshöhe und bildet dann das Verhältnis der α - zur β -Strahlung, oder man mißt mit zwei getrennten Detektoren und bildet ebenfalls wieder dieses Verhältnis. Abweichungen von diesem Verhältniswert können nun entweder zusätzliche α - oder zusätzliche β -Aktivität anzeigen. Dabei setzt man voraus, daß nicht gleichzeitig α - und β -Aktivität künstlichen Ursprungs in die Luft gelangt. Das Verfahren hat, wie die Praxis gezeigt hat, einige Nachteile. So besteht oft kein Gleichgewichtszustand zwischen den einzelnen Gliedern der Zerfallskette der natürlichen Aktivität in der Luft. Außerdem bringt eine Änderung im Verhältnis des Radon-Gehalts zum Thoron-Gehalt der Luft auch eine Schwankung des α/β -Verhältnisses, was oft nicht berücksichtigt wird. Schließlich muß beachtet werden, daß die Empfindlichkeit der Anzeige, die oft dazu verwendet wird, einen Alarm auszulösen, von der Höhe der natürlichen Radioaktivität abhängt, die selbst wieder schwanken kann und wird. Das bedeutet in praxi, daß die Anlage je nach der Höhe der natürlichen Radioaktivität im Laufe des Tages eine höhere oder niederere Empfindlichkeit besitzt. Der Alarm sagt deshalb nichts aus über die Höhe der zusätzlichen Aktivität, wenn nicht gleichzeitig die Höhe der natürlichen Aktivität bekannt ist.

Um diese Probleme in der Praxis zu untersuchen, wurde eine Meßanlage gebaut, die aus zwei übereinanderliegenden Großflächenproportionalzählrohren bestand, die durch eine Folie von $3,4 \text{ mg/cm}^2$ abgetrennt waren. Diese Detektoren wurden im Abstand von 1 cm über einem Luftfilter von 20 cm ϕ angebracht, durch das laufend mit einer Turbine Luft gesaugt wurde. Die Verhältnismessung in belüfteten und unbelüfteten Laboratorien gab die in Abb. 3-9 dargestellten Ergebnisse.

Abb. 3-9

Gemessener Verlauf des β/α -Verhältnisses von Luft im Labor unter verschiedenen Bedingungen

- a) Zwangsbelüftung, 20-facher Luftwechsel pro Stunde
Zuluft grob gefiltert,
 - b) ohne Lüftung, Fenster offen,
 - c) ohne Lüftung, Fenster und Türen bis 16^h
geschlossen, dann geöffnet,
- (nach Ehret R., Kiefer H. und Maushart R.,
Kerntechnik 5, Heft 3 (1963),)



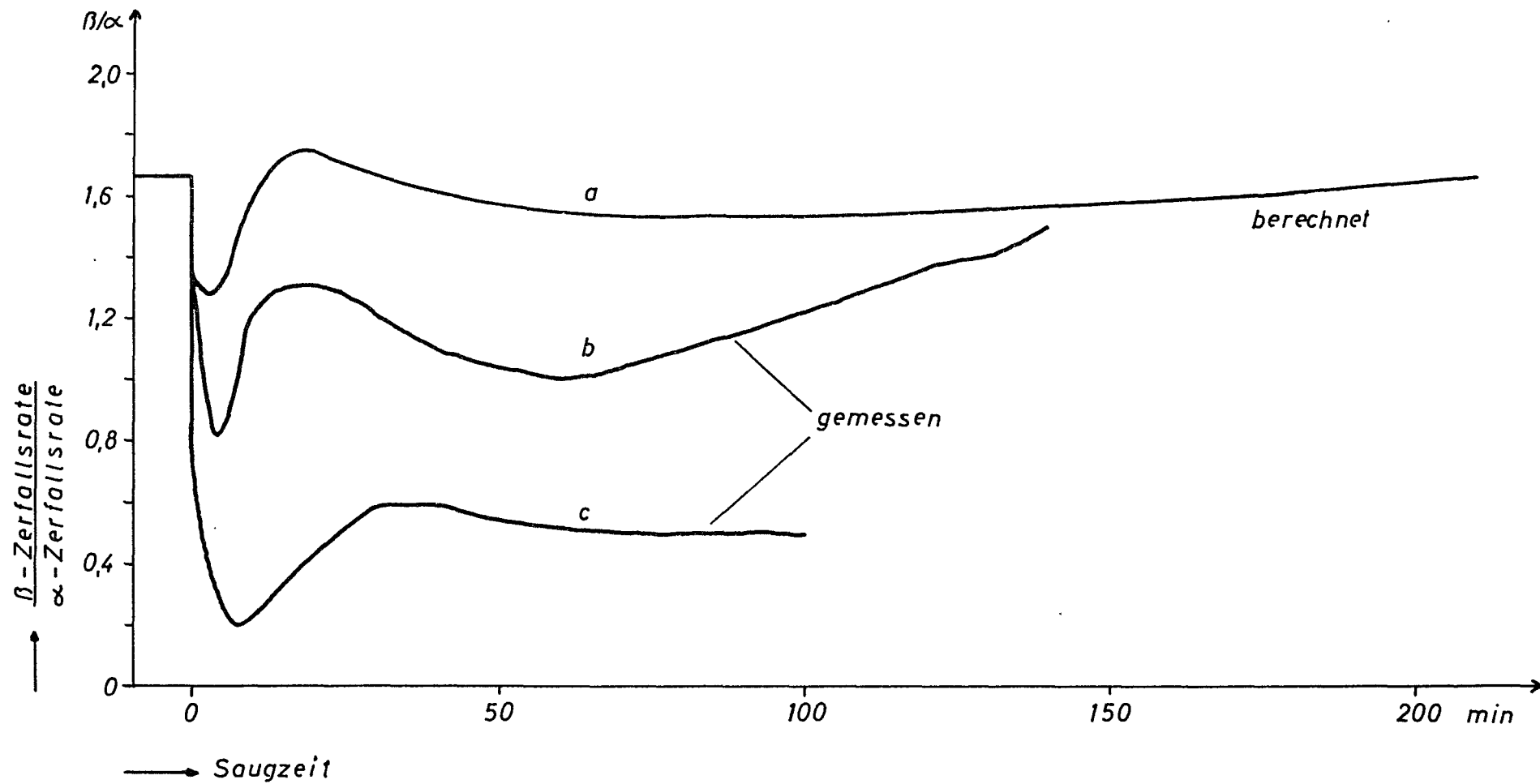
Eine weitere Versuchsreihe diente dazu, den Einfluß eines raschen Anstiegs der Radon-Konzentration in der Luft zu untersuchen, wobei einmal zwischen Radon und Folgeprodukten Gleichgewicht herrschte, einmal nicht. Das Ergebnis dieser Untersuchungen zeigt die Abb. 3-10.

Insgesamt zeigen die Untersuchungen, daß man zwar eine Messung der α - und β -Einzelimpulsrate plus der Messung des α/β -Verhältnisses mit Vorteil in gewissen Fällen zur Empfindlichkeitssteigerung ausnützen kann. Umgekehrt aber läßt sich eine zuverlässige Aussage über den Anstieg der künstlichen Radioaktivität nicht aus dem α/β -Verhältnis allein machen, sondern nur, wenn gleichzeitig und zusätzlich noch die α - und β -Einzelraten gemessen werden.

3.22 Messung von α -Röntgenkoinzidenzen zur spezifischen Pu^{239} -Überwachung

Das Prinzip der Messung des α/β -Verhältnisses der Radioaktivität ist zwar auch zur Überwachung des Pu^{239} zu verwenden, aber dieses Verfahren soll ja nur die natürliche Radioaktivität diskriminieren, damit die restlichen Radionuklide leichter gemessen werden können. Besser wäre es in jedem Fall, eine spezifische Pu^{239} -Meßmethode zu finden. Da Pu^{239} nicht nur α -Strahlung aussendet, sondern sein Tochterkern in 4 % der Fälle eine L-Röntgenstrahlung aussendet, ist es möglich, eine Meßanlage aufzubauen, die α -L-Strahlungs-Koinzidenzen mißt (Lit. 75, 77). Eine dazu geeignete α -Röntgen-Koinzidenz-Meßanordnung ist in der Abb. 3-11 schematisch dargestellt. Sie besteht aus einem zweistufigen Großflächenproportionalzählrohr, von dem das untere mit $0,9 \text{ mg/cm}^2$ Folie gegen ein Filter abgedeckt ist, um die α -Strahlung zu messen. Die obere Stufe ist durch eine $3,4 \text{ mg/cm}^2$ Folie abgedeckt und dient zur Messung der L-Röntgen-Strahlung. Zur Erhöhung des Ansprechvermögens wird die Anordnung nicht mit Methan, sondern mit 90 % Argon und 10 % Methan als Zählgas im Durchfluß betrieben.

Abb. 3-10 β/α -Verhältnis bei kurzzeitiger Erhöhung des Radon-Gehalts der Luft. Die Kurven b und c unterscheiden sich dadurch, daß bei b der Radonzusatz im Gleichgewicht mit seinen Folgeprodukten stand, bei c das Radon vorher absolutefiltert wurde. (nach Ehret R., Kiefer H. und Maushart R., Kerntechnik 5, Heft 3 (1963).)



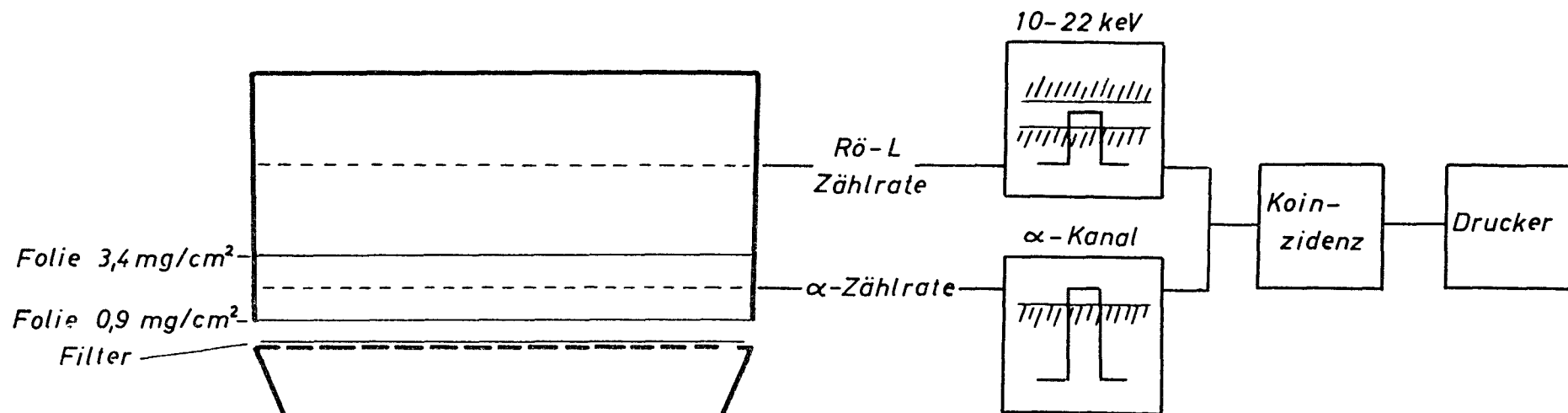
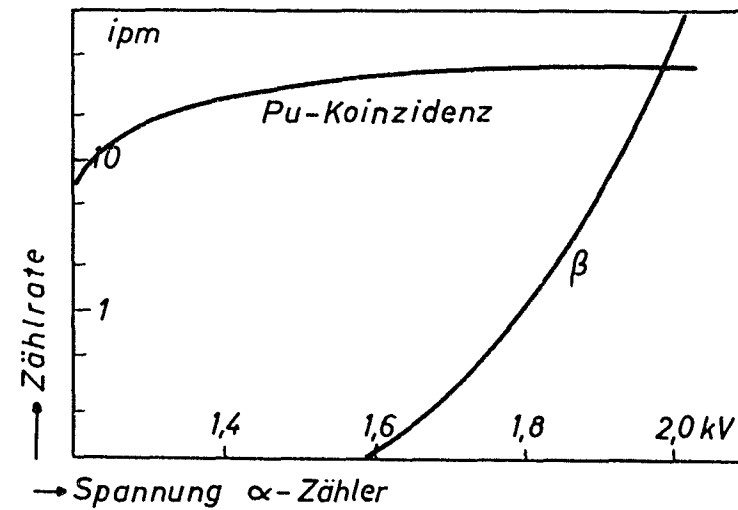


Abb. 3-11
 Schema einer α-Röntgen-Koin-
 zidenzmeßanlage zur Über-
 wachung von Pu²³⁹ in Luft sowie
 das Plateau des Detektors
 (nach Ehret R., Kiefer H. und
 Maushart R., Kerntechnik 5,
 Heft 3 (1963).)



In 15 % der Fälle, in denen die L-Strahlung im oberen Zähler registriert wurde, wurde eine Koinzidenz zu einem Alphateilchen festgestellt. Da der Koinzidenznulleffekt außerordentlich klein ist, - er beträgt nämlich nur 0,1 Imp/min über die gesamte Fläche von 314 cm^2 ohne jede Abschirmung - ist damit ein relativ guter Wirkungsgrad zu erzielen. Man bekommt nämlich für eine Probe von 1 nc Pu^{239} eine Koinzidenzrate von 2 Imp/min, also den 20-fachen Nulleffekt. Die Diskriminierung einer solchen Anlage ist so gut, daß eine Beimischung von 100 nc Natururan zur Plutoniumprobe den Nulleffekt in keiner Weise erhöht, genauso wenig wie ein äußeres γ -Feld, das 10 mrad/h Dosisleistung liefert.

Falls noch eine höhere Genauigkeit gewünscht wird, ist es möglich, den Zähler dreistufig zu bauen, die dritte Stufe wird dann in Antikoinzidenz zu der Zählstufe geschaltet, die zur Messung der L-Röntgenstrahlung dient.

Eine derartige Dreistufenanlage wird zur automatischen Überwachung größerer Plutonium-Laboratorien zur Zeit im Kernforschungszentrum Karlsruhe eingebaut. Die mehrfach gefilterte Abluft mehrerer Laboratorien und einer großen Reihe von Digestorien wird zusammen durch ein Absolutfilter gegeben, hinter dem die α -Röntgen-Koinzidenzanlage steht. Da die Luft direkt gefiltert, und zwar mehrfach gefiltert abgegeben wird, wird normalerweise auch keine α -Strahlung der natürlichen Radioaktivität gemessen. Wenn aber irgendwo ein Durchbruch erfolgt, schlägt sich die natürliche Radioaktivität, Pu^{239} oder ein Gemisch von beidem auf dem Meßfilter nieder. Durch Messung der α -Gesamtaktivität sowie der α -Röntgen-Koinzidenz kann man unterscheiden, ob es sich um natürliche Radioaktivität, um Pu^{239} oder um ein Gemisch von beidem handelt, was hier über die Abluft abgegeben wird, um sofort Gegenmaßnahmen einleiten zu können.

3.23 Kontinuierliche Tritium-Überwachung in Luft und Wasser

Die Tritium-Überwachung in Luft ist ein dringendes Strahlenschutzproblem. Tritium tritt nicht nur bei Reaktoren und Beschleunigern auf, sondern wird auch in zunehmendem Maße in der Forschung und Industrie verwendet. So werden heute große Mengen zur Herstellung von radioaktiven Leuchtfarben verarbeitet.

An ein Gerät zur kontinuierlichen Luftüberwachung von Tritium muß eine Reihe von Forderungen gestellt werden:

- die Messung muß spezifisch für Tritium sein, unabhängig davon, in welcher chemischen Verbindung das Tritium vorkommt,
- die Meßanlage darf nur auf Tritium ansprechen und nicht auf andere in der Luft befindliche radioaktive Stoffe,
- wünschenswert wäre eine Empfindlichkeit, die ein dreißigstel der in der 1. Strahlenschutzverordnung verlangten zulässigen Luftkonzentration ist, also $6 \times 10^{-8} \mu\text{c}/\text{cm}^3$,
- eine Verfälschung der Messung durch eine innere Kontamination des Zählers muß vermieden werden.

Bisher wurden in der Hauptsache zur kontinuierlichen Überwachung jeweils zwei in Differenz geschaltete Ionisationskammern im Durchfluß verwendet. Beim einen System war die Messung deshalb nicht tritiumspezifisch, weil auch andere gasförmige Aktivitäten in gleicher Weise mitgemessen wurden. Beim anderen System wurde in der einen Kammer Normalluft, in der anderen getrocknete Luft verwendet, so daß dieses Meßverfahren Tritium nur in Wasserdampfform gemessen hat. Beide Anlagen haben den Nachteil, daß sie gegen eine innere Kontamination nicht geschützt sind.

Die Verwendung eines dreistufigen Großflächenproportionalzählrohrs bringt hier eine wesentliche Verbesserung (Lit. 78, 79). Die zu überwachende Luft wird mit 25 % dem Methan direkt zugesetzt. Es hat sich gezeigt, daß eine Messung auch dann noch möglich ist, wenn diese Luft mit Wasserdampf gesättigt ist. Voraussetzung hierfür ist nur, daß die Isolation gut ausgeführt wird, z. B. daß Teflon-Isolatoren verwendet werden. Das Schema einer solchen Anlage zeigt Abb. 3-12. Der obere und untere Zähler ist jeweils in Antikoinzidenz zum Mittelzähler geschaltet. Im Meßzähler werden nur Teilchen gemessen, die eine Reichweite haben, die so klein ist, daß nicht gleichzeitig der obere und der untere Zähler mitbetroffen sind, also wieder das Prinzip der Vollraumantikoinzidenz (Lit. 56) angewandt wird. Der Wirkungsgrad betrug für die 3 l-Meßkammer 20 % bei einem Nulleffekt von 20 Imp/min (Abb. 3-13). Der Wirkungsgrad läßt sich zwar bei Erhöhung der Spannung am Zählgitter erhöhen, jedoch nimmt der Nulleffekt ebenfalls zu, so daß man unter den oben angeführten Betriebsbedingungen die höchste Empfindlichkeit erzielt. Im Dauerbetrieb läßt sich eine tritiumspezifische Messung mit einer Empfindlichkeit von $2 \cdot 10^{-8} \mu\text{c}/\text{cm}^3$ Luft erzielen.

Da der Zählraum gegen die Schutzräume nur durch ein Gitter abgeschirmt ist, ist der Meßraum praktisch wandfrei. Das macht eine störende innere Kontamination unwirksam. Es besteht darüber hinaus noch die Möglichkeit, diese Wandgitter oder sogar das Zählgitter zu heizen, so daß sich auf den Gittern und damit auf den "Wänden" nirgends eine Kontamination niederschlagen kann. Bei unseren bisherigen Versuchen zeigte sich allerdings, daß das nicht notwendig war.

In Sonderfällen wird auch eine kontinuierliche Wasserüberwachung speziell auf Tritium notwendig (Lit. 78). So gibt es z. B. große Reprocessing-Anlagen, die je nach aufzuarbeitenden Brennelementen beispielsweise 1000 c Tritium in wässriger Form im Abwasser enthalten. Da Abwasser praktisch nicht von Tritium

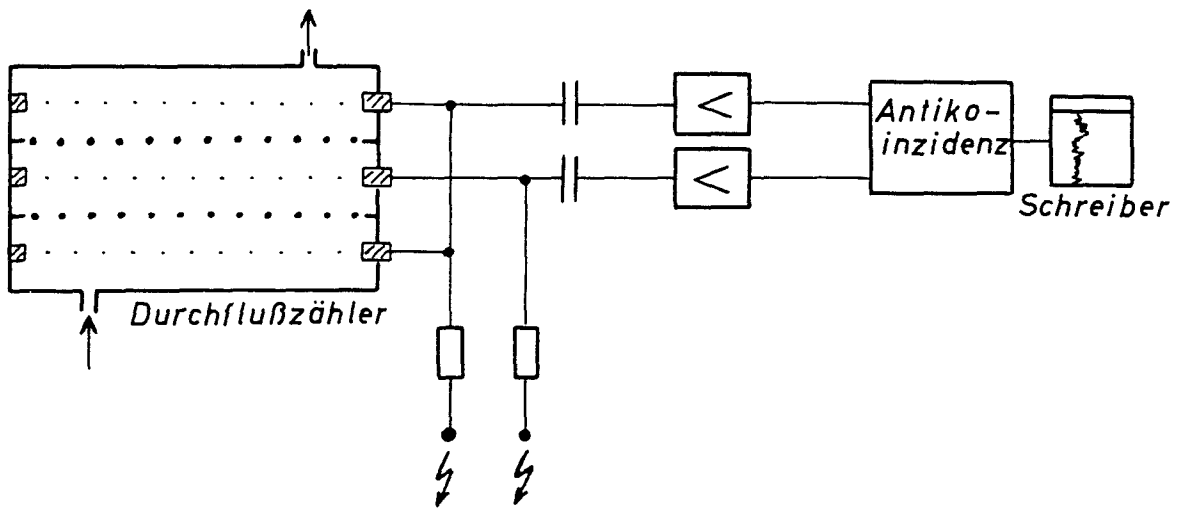


Abb. 3-12 Schema eines Tritiummonitors zur Luftüberwachung

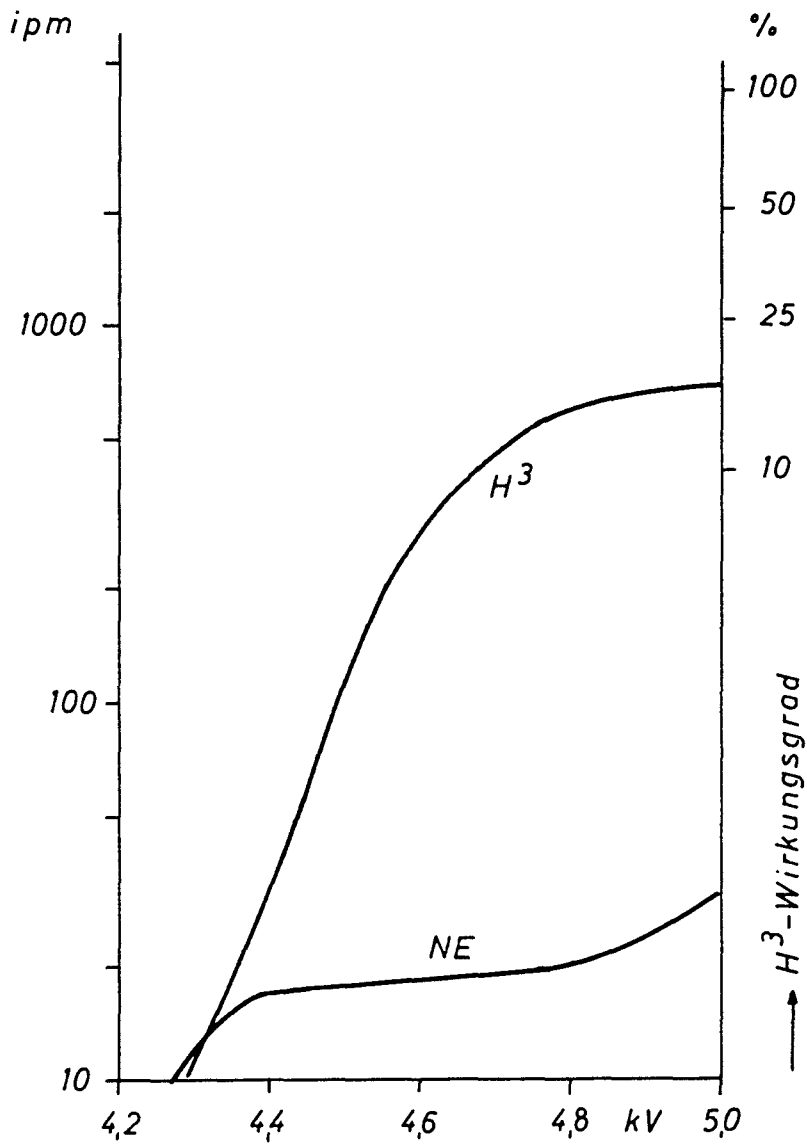


Abb. 3-13 Wirkungsgrad sowie Plateau des Null- und Meßeffects des Tritium-Detektors

befreit werden kann, muß es entweder gelagert oder verdünnt über den Vorfluter abgegeben werden. Bei der bei einer Reprocessing-Anlage anfallenden großen Wassermenge und relativ hohen Curie-Zahl von Tritium wird es notwendig sein, das Wasser irgendeinem Vorfluter mit großer Wasserführung beizumischen. Es ist selbstverständlich, daß die Tritium-Konzentration in solchen Flüssen dann ständig kontinuierlich gemessen werden muß.

Zur Tritium-Messung in Wasser bestand bisher praktisch nur die Möglichkeit, daß man das Wasser diskontinuierlich in einem Flüssigszintillationsdetektor überwachte. Diese Messung ist umständlich, aufwendig und praktisch nur diskontinuierlich durchzuführen. Es ist also unmöglich, mit solchen Anlagen etwa irgendwelche Pumpen oder Ventile zu schalten, was bei einer Wasserüberwachung notwendig sein kann.

Eine Direktmessung des Tritium, etwa durch Zählrohre, die oberhalb der Wasseroberfläche angeordnet sind, ist ebenfalls unmöglich. Die β -Strahlung hat eine so geringe Reichweite (im Mittel 0,5 mm in Luft), daß sie auf keinen Fall den Abstand Wasser-Detektor oder eine Folie von $0,9 \text{ mg/cm}^2$ zu durchdringen vermag. Auch die Bremsstrahlung von Tritium in Wasser ist zu gering, um die zulässige Wasserkonzentration von Tritium direkt auszumessen. Eigene Versuche ergaben, daß man erst die 100fache zulässige Konzentration direkt mit einer Wasserüberwachungsanlage über die Bremsstrahlung erfassen kann.

Aus diesen Gründen besteht der Bedarf, eine kontinuierliche Wasserüberwachungsanlage zu entwickeln, die es gestattet, unterhalb der maximal zulässigen Konzentration in Wasser das Tritium kontinuierlich zu messen. Diese Möglichkeit besteht, indem man praktisch dasselbe dreistufige Großflächenproportionalzählrohr verwendet, das auch zur Tritium-Überwachung von Luft eingesetzt wurde. Hier ist es nun nicht mehr notwendig, dem Zählgas Luft zuzusetzen, man läßt das Zählgas unmittelbar über die aus-

zumessende Wasseroberfläche streichen. Das Zählgas reißt Wasser von der Wasseroberfläche mit, führt es dem Zählraum zu, wo es spezifisch auf Tritium ausgemessen wird. Ein dreißigstel der in der Strahlenschutzverordnung vorgeschriebenen maximal zulässigen Konzentration von Tritium läßt sich damit ohne Schwierigkeiten nachweisen.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

4.1 Ergebnis

Mit der Entwicklung des Großflächenproportionalzählrohrs ist es gelungen, einen speziell auf die Bedürfnisse der Strahlenschutzmeßtechnik ausgerichteten Detektor herzustellen. Er genügt den an ihn gestellten Anforderungen, nämlich:

- Möglichkeit einer getrennten Messung von α - und β -Strahlen,
- optimale Meßgeometrie,
- eine der Probe angepaßte Meßfläche,
- nach Wahl fensterlos oder mit ganz dünnem Fenster,
- Möglichkeit einer Energiebestimmung,
- keine Alterung des Detektors, da er im Gasdurchfluß betrieben wird,
- Anpassungsfähigkeit des Detektors an die verschiedensten Meßprobleme, da durch seine technische Konzeption, daß der eigentliche Zähler nur aus auf verschiedenen Potentialen liegenden Parallelgittern besteht, die verschiedensten geometrischen Detektorformen möglich sind.

Man nimmt dabei einige technische Nachteile des gewählten Meßprinzips in Kauf, die sich allerdings in keiner Weise in den Meßergebnissen auswirken sondern ausschließlich in einem annehmbar erhöhten technischen Aufwand:

- als Gasdurchflußzähler benötigt der Detektor für die Messung von β -Strahlen ein besonderes Zählgas, nur zur Messung der α -Strahlung läßt sich allgemein auch Luft verwenden,
- als Innenzähler, der mit Atmosphären-Druck arbeitet, ist eine relativ hohe Betriebsspannung notwendig,
- als Proportionalzählrohr liefert der Detektor kleine Impulse, man benötigt deshalb eine wesentlich höhere Verstärkung als etwa bei Geiger-Müller-Zählrohren.

Was im Einzelfall erreicht wurde, ist an Hand der mannigfachen Meßprobleme ausführlich behandelt worden.

Der immer breitere Einsatz des Großflächenproportionalzählrohrs im Strahlenschutz ist auf drei Ursachen zurückzuführen:

- Neue an die Strahlenschutzmeßtechnik gestellte Meßprobleme sowie noch unbefriedigend gelöste Meßaufgaben konnten mit diesem Detektortyp gelöst werden.
- Sicherheitsüberlegungen fordern von Monitoranlagen eine möglichst schnelle Anzeige, um rechtzeitig Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Auch hier bringt dieser Detektortyp wesentliche Verbesserungen.
- Wirtschaftliche Überlegungen führen zum Einsatz dieser Detektoren, weil damit der Arbeits- und Zeitaufwand pro Einzelmessung erheblich gesenkt werden kann.

4.2 Ausblick

Die technische und wissenschaftliche Entwicklung der Großflächenproportionalzählrohre ist noch im Fluß. Deshalb soll an dieser Stelle auf Möglichkeiten hingewiesen werden, die in der Praxis Anwendung finden könnten.

Bisher wurden Großflächenproportionalzählrohre zur Messung von α - und β -Strahlern eingesetzt. Ihr Vorteil war der aller Proportionalzählrohre, daß sie gegenüber γ -Strahlung sehr wenig empfindlich sind, γ -Strahlung also weitgehend diskriminieren. Es ist die Frage, ob eine γ -Messung mit Großflächenproportionalzählrohren sinnvoll ist. Zwar ist für γ -Strahlung der geeignete Detektor ein Szintillationszähler, weil die Szintillatoren ein sehr hohes Ansprechvermögen für γ -Strahlung haben. Die üblichen NaJ(Tl)-Kristalle haben jedoch den Nachteil, daß sie, wenn sie größer werden, außerordentlich teuer sind. Die hierfür notwendigen Photomul-

tiplier sind ebenfalls aufwendig, unförmig und schließen deshalb die Verwendung eines großen γ -Szintillationszählers für viele Meßaufgaben aus. Deshalb ist zu überlegen, ob man mit Großflächenzählern nicht auch γ -Messungen durchführen kann. Es dürfte zwei Möglichkeiten geben.

Man betreibt das Großflächenzählrohr mit Geiger-Müller-Zählgas im Auslösebereich, um die Ansprechwahrscheinlichkeit zu erhöhen. Es kann dabei im Durchfluß, aber auch als abgeschlossenes Zählrohr betrieben werden. Um die Ansprechwahrscheinlichkeit weiter zu erhöhen ist es möglich, die Wände mit Schwermetall zu belegen (Lit. 80). Mit einem derartigen Detektor dürfte man ein Ansprechvermögen gegenüber γ -Strahlung bis ca. 5 % erzielen. Es kann erhöht werden, indem man einige solcher Detektoren aufeinander setzt und parallel schaltet.

Die zweite Möglichkeit besteht darin, als Detektoren weiterhin Szintillatoren, vor allem Plastiksintillatoren zu verwenden. Das Großflächenzählrohr soll mit diesem Szintillator verbunden werden und sozusagen an die Stelle des Sekundärelektronenvervielfachers treten. Man setzt zu diesem Zweck den Szintillator unmittelbar auf einen Großflächenzähler, und bringt nun entweder auf dem Szintillator oder auf der gegenüberliegenden Seite im Großflächenzähler eine photoelektrisch empfindliche Schicht an. So lösen die im Szintillator entstehenden Lichtquanten aus der photoelektrischen Schicht Elektronen aus, die im Großflächenzähler gasverstärkt und gezählt werden. Zum reinen Zählen kann dabei der Großflächenzähler im Auslösebereich, zum Spektrographieren und Zählen im Proportionalbereich betrieben werden. Auf diese Weise können wesentlich größere Szintillatoren als bisher unter gleichmäßiger Ausnutzung ihrer ganzen Fläche zum Einsatz kommen, also insgesamt empfindlichere Szintillationsmeßköpfe hergestellt werden. Ein weiterer Vorteil wäre der, daß man eine flache und kompakte Bauweise hat sowie die Möglichkeit, Meßköpfe in den verschiedensten geometrischen Formen, z. B. Rohren herzustellen, die damit den Meßaufgaben optimal angepaßt werden

können. Es muß allerdings darauf hingewiesen werden, daß dieses Verfahren heute noch technisch große Schwierigkeiten macht.

Zum Nachweis von schnellen Neutronen gibt es bestimmte Kernumwandlungen, die einen relativ kleinen Wirkungsquerschnitt haben. Diese Kernumwandlungen hätten zwar manche Vorteile, z. B. daß dabei α -Strahlen entstehen, ihr Nachteil ist aber eben der kleine Wirkungsquerschnitt, so daß sie üblicherweise nicht eingesetzt werden.

Mit Hilfe des Großflächenproportionalzählrohrs ist es nun möglich, sehr große Flächen auszumessen, und damit auch beispielsweise zum Nachweis hochenergetischer Neutronen einen Kerneffekt des C^{12} auszunutzen. Die Reaktion $C^{12}(n, n')3\alpha$ hat bei 15 MeV einen Wirkungsquerschnitt von 0,3 barn, ihre Schwelle liegt bei etwa 10 MeV. Ein mit CO_2 im Durchfluß betriebenes Großflächenproportionalzählrohr mit einer Meßfläche von 314 cm^2 und einem Volumen von 1650 cm^3 zählt bei einer Flußdichte von $10\text{ Neutronen/cm}^2 \cdot \text{sec}$ (15 MeV monoenergetische Neutronen) 8 Imp/min, womit sich ohne Schwierigkeit der zulässige Fluß für Dauerbelastung ausmessen läßt. Der große Vorteil, den das Ausnutzen gerade dieser Reaktion bringt, ist der, daß durch das gleichzeitige Entstehen von 3 α -Teilchen im Zählraum außerordentlich hohe Impulse entstehen, die man auch gegenüber Rückstoßprotonen diskriminieren kann.

Eine Erhöhung der Nachweisempfindlichkeit kann dadurch erzielt werden, daß man die Meßfläche vergrößert und das Großflächenproportionalzählrohr als Druckkammer ausbildet. So läßt sich eine Empfindlichkeitssteigerung um etwa den Faktor 100 erreichen.

Daß nicht nur in der Strahlenschutzmeßtechnik sondern in der Strahlenmeßtechnik allgemein weitere Möglichkeiten für den Einsatz von Großflächenproportionalzählrohren bestehen, soll an zwei Beispielen gezeigt werden. Man bestimmt heute kontinuierlich an bestimmten Fördergütern den Kaliumgehalt über die β -

Strahlung des K^{40} . An anderer Stelle werden die Oberflächen von Reaktorbrennelementen bestimmten Typs in der Fertigungskontrolle auf Uran untersucht. Weitere Einsatzmöglichkeiten wird ohne Zweifel die Zukunft bringen.

5. LITERATUR

Lit. 1

Catsch A. ,

Untersuchungen über die Beeinflussung des Verhaltens einiger radioaktiver Spaltprodukte im tierischen Organismus durch Chelatbildner,

Habilitationsschrift, Heidelberg, 1958

Lit. 2

ICRP-Publication 2

Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation, Pergamon Press, London, 1959

Lit. 3

Rajewsky B. ,

Strahlendosis und Strahlenwirkung,

Stuttgart, 1956, S. 67

Lit. 4

Hagen U. und Langendorff H. ,

Zur Frage der Verwendung des biologischen Dosiswerts "rem" im Strahlenschutz. Relative biologische Wirksamkeit verschiedener Strahler beim Säugetier.

Atomkernenergie 5 (1960) S. 173

Lit. 5

Meyer St. und Schweidler E. ,

Radioaktivität,

Teubner-Verlag, 1927

Lit. 6

Volland,

Das Verhalten radioaktiver Staubpartikel im menschlichen Organismus,

Sicher ist Sicher 15, Heft 7 (1963) S. 151

Lit. 7

Martland H. S. ,
Am. J. Canc. 15 (1931) S. 2435

Lit. 8

Martland H. S. und Humphries R. E. ,
Arch. Path. 7 (1929) S. 406

Lit. 9

Muller H. J. ,
Strahlenwirkung und Mutation beim Menschen,
Naturwissenschaftliche Rundschau 9, Heft 4 (1956) S. 127

Lit. 10

Radioaktive Substanzen und Wasser,
R. Oldenbourg-Verlag, München (1956)

Lit. 11

Radioactive Substances in the Biosphere,
Proceedings of an IAEA-Panel, Wien, 1961

Lit. 12

Schriftenreihe des Bundesministers für Atomkernenergie und
Wasserwirtschaft,
I. Strahlenschutz, Heft 6, Sonderausschuß "Radioaktivität",
Frankfurt a.M., 1958

Lit. 13

Vierteljahresberichte des Bundesministeriums für wissenschaft-
liche Forschung,
"Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung"
seit 1959

Lit. 14

Recommendations of the International Commission on Radio-
logical Protection,
1955 und 1959

Lit. 15

Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften,
2. Jahrgang, Nr. 11 (20.2.1959)

Lit. 16

Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften,
5. Jahrgang, Nr. 57 (9.7.1962)

Lit. 17

1. Deutsche Strahlenschutzverordnung
Bundesgesetzblatt Nr. 31 vom 30.6.1960

Lit. 18

Fischerhof H. ,
Deutsches Atomgesetz und Strahlenschutzrecht, Kommentar,
A. Lutzeyer-Verlag, Baden-Baden, 1962

Lit. 19

Bestimmung der Radioaktivität,
in: Deutsches Einheitsverfahren zur Wasser, Abwasser- und
Schlammuntersuchung; physikalische, chemische und bakteriolo-
gische Verfahren,
Herausgegeben von der Fachgruppe Wasserchemie in der Gesell-
schaft Deutscher Chemiker, 1960

Lit. 20

Dannecker A. , Kiefer H. und Maushart R. ,
Messung kleiner α - und β -Aktivitäten im Wasser,
Nukleonik 1, Heft 8 (1959) S. 319

Lit. 21

Hinzpeter A. ,
Ionenaustauscher-Verfahren zur Messung kleiner β -Aktivitäten
im Regen,
Naturwissenschaften 44 (1957) S. 611

Lit. 22

Hinzpeter A. ,

Ionenaustausch-Verfahren zur Messung der β -Aktivität von Wassern und zur Sr^{90} -Messung von Wassern und Aschen,
Schriftenreihe des Bundesministers für wissenschaftliche Forschung, Strahlenschutz, Heft 23, Verlag Gersbach und Sohn

Lit. 23

Brown J.R. ,

Simultaneous Hand and Clothing Checking for α - and β -Contamination, A/Conf 15/P/294

Lit. 24

Kiefer H. und Maushart R. ,

Ein neuer Großflächen-Durchflußzähler als Mittel zur verbesserten Bestimmung der Bruttoreadioaktivität in Wasser nach dem Eindampfverfahren,

Nukleonik 1, Heft 3 (1958) S. 103

Lit. 25

Kiefer H. und Maushart R. ,

Durchflußzähler zur Bestimmung der Radioaktivität von Wasser, DBP 1 057 246, angemeldet: 31. 5. 1958, erteilt: 10. 3. 1960

Lit. 26

Haberer K. und Spindler P. ,

Einfache Regelvorrichtung zum automatischen Eindampfen grösserer Flüssigkeitsproben zur Radioaktivitätsmessung,

Atompraxis 7, Heft 6 (1961)

Lit. 27

Hasenjäger H. ,

Dispositiv d'évaporation pour la mesure rationnelle de la radioactivité de l'eau, CEA 1425 (1958)

Lit. 28

Zander K. ,

Elektronische Eindampregelung mit automatischem Probenwechsler, Kerntechnik 4, Heft 10 (1962) S. 444

Lit. 29

Rajewsky B. u. a. ,

Untersuchung radioaktiver Partikel aus dem Jahre 1961 ("Heiße Teilchen"), Atompraxis 8, Heft 7 (1962) S. 237

Lit. 30

Kolloquium über radioaktive Partikel des "Sonderausschusses Radioaktivität",

Schriftenreihe des Bundesministers für Atomkernenergie und Wasserwirtschaft, Strahlenschutz, Heft 12

Lit. 31

Kiefer H. und Maushart R. ,

Durchflußzähler zum Bestimmen der Radioaktivität von in einer Großflächenzählschale eingedampftem Wasser,

DBP 1 094 379, angemeldet: 8. 5. 1959, erteilt: 21. 3. 1961

Lit. 32

Friedman H. ,

Geiger Counter Tubes,

Proc. IRE 37 (1949)

Lit. 33

Sheckler, Addison C. ,

Design Characteristics of Air Proportional Counters,

Nucleonics 8, No. 1 (1961) S. 44

Lit. 34

Ello J. E. ,

Early Detection of Contamination by the Use of Gas Proportional Monitors,

Health Physics 9 (1963) S. 653

Lit. 35

Sharpe J. und Taylor D. ,
Nuclear Particle and Radiation Detectors,
Symposium of Papers on Radiation Monitoring Apparatus,
Session II, Paper No. 1078 (1950)

Lit. 36

Thompson R. W. ,
Flachbahn-Proportionalzähler,
US-Patent 2 485 516, angemeldet: 10.7.1945

Lit. 37

Páll Theodorsson,
Gerät zum Registrieren von Betastrahlung niedriger Intensität,
DBP 1 114 953, angemeldet: 19.5.1959

Lit. 38

Prokof'ev Ju. A. und Sosnovskij A.N. ,
Drahtnetz-Zähler mit Gasfüllung,
Pribory i tehnika eksperimenta Nr. 5 (1959) S.125

Lit. 39

Fessler H. , Kiefer H. und Maushart R. ,
Einfache Antikoinzidenzanordnung mit zwei Proportional-
Durchflußzählern zur Bestimmung kleiner β -Aktivitäten,
Kerntechnik 2, Heft 10 (1960) S. 324

Lit. 40

Valentine J. M. ,
Energy per Ion Pair for Electrons in Gases and Gas Mixtures,
Proc. Roy. Soc. A 211, 75 (1952)

Lit. 41

Andersson I. Ö. , Braun J. und Söderlund B. ,
Hand Monitor for Simultaneous Measurement of Alpha and Beta
Contamination,
Nuclear Instrumentation 2 (1961) S.568

Lit. 42

Schmidt, H.,
Ein Methan-Durchfluß-Großflächenzähler zur Kontaminations-
messung radioaktiver Abwässer,
Kernenergie 6, Heft 6 (1963) S. 286

Lit. 43

Kimmel H.,
Großflächige Proportionalzähler,
Patentanmeldung Nr. K 48 233 VIII c/21 g vom 15.11.1962

Lit. 44

Kiefer H. und Maushart R.,
Einrichtung zum gleichzeitigen getrennten Messen der α - und β -
Aktivität von Kernstrahlern,
Patentanmeldung Nr. K 49 243 VIII c/21 g vom 20.3.1963

Lit. 45

Kiefer H. und Maushart R.,
Möglichkeiten zur Überwachung der Radioaktivität des Meer-
wassers,
Deutsche Hydrographische Zeitschrift 14, Heft 1 (1961) S. 11

Lit. 46

Haberer K.,
Aktivitätsverluste beim Eindampfen wässriger Fallout-Proben,
Atomkernenergie 8 (1963) S. 102

Lit. 47

Kiefer H. und Maushart R.,
Überwachung der Radioaktivität in Abwasser und Abluft,
Teubner-Verlag Stuttgart, 1961, S. 55/56

Lit. 48

Kirkwood D.H.W., Pontecorvo B. und Hanna G.C.,
Phys. Rev. 74 (1948) S. 497

Lit. 49

Curran S. C., Angus J. und Cockroft A. L.,
Nature 162 (1948) S.302

Lit. 50

Kahn J. H.,
ORNL 1089 (1951)

Lit. 51

Amrehn H. und Kulenkampff H.,
Z. f. Physik 140 (1955) S. 452

Lit. 52

West D.,
Energy Measurements with Proportional Counters,
Progr. in Nucl. Phys. 3 (1953) S. 18

Lit. 53

Roesch W. C. und Palmer H. E.,
Detection of Plutonium in Vivo by Whole Body Counting,
Health Physics 8 (1962) S. 773

Lit. 54

Fessler H., Kiefer H. und Maushart R.,
Zur Messung von Quantenstrahlung im Energiebereich von
3 - 30 keV mit großflächigen Proportionalzählrohren,
Atompraxis 7, Heft 11 (1961) S. 401

Lit. 55

Fessler H., Kiefer H. und Maushart R.,
Zählrohr zur Messung weicher Röntgen-, γ - oder β -Strahlung
mit vollständiger Unterdrückung aller Nulleffekts- und Störstrah-
lungskomponenten durch Vollraumantikoinzidenz,
Patentanmeldung K 44 740 VIII c/21 g vom 19.9.1964

Lit. 56

Kiefer H. und Maushart R.,
Determination of Plutonium 239 Body Burden Using Gamma Spectrometry with Proportional Counters,
Proc. of IAEA Conference on Whole Body Counting, Wien 1962

Lit. 57

Kiefer H. und Maushart R.,
Large-Area Flow Counters Speed Radiation Measurements,
Nucleonics 19, No. 12 (1961) S. 51

Lit. 58

Ehret R., Kiefer H., Maushart R. und Möhrle G.,
Performance of an Arrangement of Several Large-Area Proportional Counters for the Assessment of Pu-239 Lung Burdens,
Proc. of IAEA Symposium on the Assessment of Radioactive Body Burdens in Man, Heidelberg 1964

Lit. 59

Fessler H., Kiefer H. und Maushart R.,
Messung der rückgestreuten Strahlung als Mittel zur Identifizierung von β -Strahlern,
Kerntechnik 3, Heft 4 (1961) S. 151

Lit. 60

Fessler H., Kiefer H. und Maushart R.,
Vorrichtung zur schnellen Identifizierung unbekannter β -Strahler,
DBP 1 121 235, angemeldet: 22.1.1960, erteilt: 2.5.1962

Lit. 61

Falk F.W.,
Untersuchung der Eignung kommerzieller Proportionalzählrohre im Strombetrieb zur Dosisleistungsmessung,
Diplomarbeit am Lehrstuhl für Elektrobiologie und Biophysikalische Meßtechnik, Technische Hochschule Karlsruhe, 1963

Lit. 62

Kiefer H. und Maushart R. ,
Einrichtung zum Messen von Strahlendosisleistungen beliebiger
Größe,
Patentanmeldung Nr. K 48 626 VIII c/21 g vom 4. 1. 1963

Lit. 63

Neuert H. und Henschen H. ,
Über die Messung sehr schwacher Intensitäten radioaktiver Sub-
stanzen in Flüssigkeiten mit einem dauerregistrierenden Szin-
tillationszählergerät,
Industrie-Elektronik 5 (1957) S. 3

Lit. 64

Plesch R. ,
Eine empfindliche Zählordnung zur kontinuierlichen Messung
im Wasser,
Siemens Zeitschrift 32, Heft 5 (1958) S. 385

Lit. 65

Boisseau M. , Cohen P. und Wormser G. ,
Installation de contrôle continu de la radioactivité β d'eaux
résiduelles,
Energie nucléaire 2, No. 3 (1960) S. 160

Lit. 66

Kiefer H. und Maushart R. ,
Kontinuierliche Direktüberwachung kleiner β -Aktivitäten im Was-
ser,
Atompraxis 5 Heft 10/11 (1959) S. 431

Lit. 67

Kiefer H. und Maushart R. ,
Der heutige Stand der Radioaktivitätsüberwachung im Wasser,
Neue Technik 2, Nr. 3 und 4 (1960)

Lit. 68

Kiefer H. ,
Kontinuierliche Überwachung der Radioaktivität in Wasser,
Vierteljahresbericht des Bundesministers für wissenschaftliche
Forschung "Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung" Nr.III/62

Lit. 69

Kiefer H. und Maushart R. ,
Großflächenzähler zum kontinuierlichen Bestimmen der Beta-
Strahlenaktivität von Wasser,
DBP 1 109 275, angemeldet: 3.10.1959, erteilt: 17.10.1961

Lit. 70

Plesch R. ,
Die Empfindlichkeit der Messung homogen verteilter Aktivitäten
unter Sättigungsbedingungen,
Atompraxis 8 (1962) S. 135

Lit. 71

Plesch R. ,
Der Einfluß fehlender Sättigungsbedingungen auf die Messung ho-
mogen verteilter Aktivitäten,
Atompraxis 8, Heft 8 (1962) S. 297

Lit. 72

Haberer K. ,
Kritische Betrachtungen zur kontinuierlichen Direktmessung der
Radioaktivität in Wasser und Abwasser,
Kerntechnik 4, Heft 3 (1962) S. 110

Lit. 73

Gebauer H. und Müller S.,
Kontinuierliche Direktmessung radioaktiver Substanzen in Wasser,
Atomwirtschaft, Heft 10 (1962) S. 487

Lit. 74

Hogrebe K.,
Die maximal zulässige Konzentration von gas- und dampfförmigen Radionukliden in Luft und ihr meßtechnischer Nachweis,
Referat vor der Deutschen Atomkommission, Arbeitskreis IV/2
am 6.7.1962

Lit. 75

Ehret R., Kiefer H. und Maushart R.,
Zum Problem der unverzögerten Laborluftüberwachung bei schwankendem Radon- und Thorongehalt,
Kerntechnik 5, Heft 3 (1963) S. 97

Lit. 76

Kiefer H., Maushart R. und Stäblein G.,
Empfindliche Meßanlage zur Kontrolle radioaktiv verunreinigter Wäsche,
Kerntechnik 3, Heft 7 (1961) S. 316

Lit. 77

Kiefer H. und Maushart R.,
Verfahren zum Bestimmen von Pu²³⁹-Anteilen und ähnlichen Röntgenstrahlern,
Patentanmeldung Nr. K 48 052 VIII c/21 g vom 25.10.1962

Lit. 78

Kiefer H. und Maushart R.,
Einrichtung zur kontinuierlichen Direktüberwachung von Wasser auf seinen Tritiumgehalt,
Patentanmeldung vom 17.7.1963

Lit. 79

Ehret R. , Kiefer H. und Maushart R. ,
Fortschritte bei der kontinuierlichen Tritiumüberwachung in
Luft,
Direct Information 3/63

Lit. 80

Plesch R. ,
Detektor zur empfindlichen Messung von β - und γ -Strahlung,
Gebrauchsmuster Nr. 1 867 993

filter air sampling
Health Phys. 7 (1962) S. 185

Zümaich W.

Abscheid. radakt. Aerosole
mit Faserfiltern

Atompraxis 3 (1957) S. 377

* Vogt K. J.

Grundlage u. Methoden der
Umgebungsüberwachung

Jül 21 ST (1961)

KFK 375

Krüger. Buch KFK 411
Großflächenproportionalzählrohr

All Koffert O. C.

) Teilchen-detektoren

Februar 1971