

Absolute Zählrohrmessungen an  $\gamma$ -Strahlen<sup>1</sup>

Von H. MAIER-LEIBNITZ

Aus dem Institut für Physik am Kaiser-Wilhelm-Institut für medizin. Forschung, Heidelberg

(Z. Naturforsch. 1, 243–252 [1946]; eingegangen am 14. Dezember 1945)

Ziel der Arbeit war, die  $\gamma$ -Empfindlichkeit von Zählrohren aus verschiedenen Materialien im Energiegebiet von 0,05 bis 3 eMV zu bestimmen. Dies ist möglich durch Anwendung der Koinzidenzmethode auf die Strahlungen von radioaktiven Körpern mit einfachem Umwandlungsschema. Es werden die Ergebnisse früherer Messungen an solchen Körpern ausgewertet (Abschn. 2) und neue Messungen an radioaktivem Cassiopeium und Ytterbium mitgeteilt (Abschn. 3). Die Messungen anderer Autoren ergänzen und bestätigen die Ergebnisse (Abschn. 5). Aus den Messungen ergeben sich zunächst Resultate, die von der Geometrie der Anordnung abhängen. Daher wurden Hilfsmessungen über die Abhängigkeit der Ansprechwahrscheinlichkeit vom Ort der Strahlenquelle ausgeführt (Abschn. 4). Unter Zuhilfenahme einer einfachen Berechnung werden die gesammelten Daten zu Empfindlichkeitskurven für Zählrohre aus Aluminium, Messing, Zinn und Blei zusammengefaßt (Abschn. 6). Oberhalb 1 eMV sind alle Zählrohre etwa gleich empfindlich. Darunter treten große Unterschiede auf. Die Empfindlichkeit von Aluminiumzählrohren ändert sich stark mit der  $\gamma$ -Energie, die von Bleizählrohren am wenigsten. Ein Zählrohr aus 0,2 mm Blei ist im Bereich von 0,15 bis 1,5 eMV für alle Strahlen praktisch gleich empfindlich; bei einem 2-mm-Messingzählrohr ist die Empfindlichkeit von 0,1 bis 3 eMV nahe proportional der  $\gamma$ -Energie (Abschn. 7).

Bei dem Versuch, quantitative Aussagen über die von Atomkernen ausgehenden Strahlungen zu machen, bildet die Absolutmessung von  $\gamma$ -Strahlen ein besonderes Problem, weil die Empfindlichkeit der Nachweisinstrumente für  $\gamma$ -Strahlen schwer zu bestimmen ist. Für die Messung der  $\gamma$ -Empfindlichkeit von Zählrohren hat sich die Koinzidenzmethode in der zuerst von W. Bothe und H. J. von Baeyer<sup>2</sup> angewandten Form als ein mächtiges Hilfsmittel erwiesen, weil sie ohne die Kenntnis der absoluten Präparatstärke auskommt.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die mit dieser Methode vom Verfasser gewonnenen Ergebnisse zusammenfassend auszuwerten. Zusammen mit einigen Messungen anderer Autoren, insbesondere von G. v. Drost<sup>3</sup> und von F. Norling<sup>4</sup>, ergibt sich daraus eine befriedigende Kenntnis der Zählrohrempfindlichkeiten etwa im Bereich von 50 ekV bis 3 eMV.

## 1. Zur Meßmethodik

Die Empfindlichkeit  $q$  eines Zählrohres ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein durch sein Volumen

gehender  $\gamma$ -Strahl zu einem Zählstoß führt, und die Nachweiswahrscheinlichkeit  $P$  von Zählanordnungen ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein  $\gamma$ -Strahl, der von einer Quelle in festem Abstand vom Zählrohr in beliebiger Richtung ausgeht, zu einem Zähl ausschlag führt. Gemessen wird  $P$ . Aus  $P$  wird  $q$  durch Berücksichtigung des effektiven Raumwinkels berechnet. Die von mir angegebenen Nachweiswahrscheinlichkeiten beziehen sich auf folgende Standardanordnung:

Die Zählrohre hatten einen Innendurchmesser von 28 mm, eine wirksame, mit einem schmalen  $\beta$ -Strahlenbündel gemessene Länge von 46 mm; die Präparate standen in einem Abstand von 18,5 mm von der inneren Zählrohrwand. Der Gasdruck in den Zählrohren war groß genug, um ein praktisch quantitatives Ansprechen der Zählrohre für  $\beta$ -Strahlen zu gewährleisten, was außerdem besonders geprüft wurde<sup>5</sup>.

Das Material der Zählrohrwand hat bei großen  $\gamma$ -Energien wenig Einfluß auf die Empfindlichkeit. Bei weichen  $\gamma$ -Strahlen sind jedoch größte Unter-

<sup>2</sup> Nachr. Ges. Wiss. Göttingen Math.-Physik. Kl. (N. F.) 1, 195 [1935].

<sup>3</sup> Z. Physik 100, 529 [1936]; 101, 474 [1937].

<sup>4</sup> Ark. Mat., Astron., Fysik 27 A, Nr. 27 [1941].

<sup>5</sup> H. Maier-Leibnitz, Z. Physik 122, 233 [1944].

<sup>1</sup> Die vorliegende Arbeit war Ende 1944 zur Veröffentlichung in der Z. Physik angenommen worden, ist dort jedoch infolge der Zeitumstände bisher nicht erschienen.



schiede zu erwarten. Daher wurden verschiedene Zählrohrarten verwendet, deren Daten sich zu meist aus einer speziellen Verwendung ergaben<sup>6</sup>:

1. „Standardzählrohr“, Wand 0,12 mm Aluminium, meist umgeben mit 0,5 mm Blei. Bei kleineren Energien wurde das Zählrohr ohne Blei verwendet, manchmal auch mit Aluminium statt Blei umgeben; es ist dann als Aluminiumzählrohr zu bezeichnen.

2. „Bleizählrohr“, Wand 0,12 mm Aluminium, innen mit 0,1 mm Blei ausgekleidet.

3. „Zinnzählrohr“, außen 0,12 mm Aluminium, innen 0,013 mm Zinn. Dieses Zählrohr war für Messungen bei besonders kleinen  $\gamma$ -Energien gedacht.

4. „Messingzählrohr“, Wand 0,5 mm Messing.

Die drei ersten Zählrohre hatte alle Standarddimensionen, das Messingzählrohr war kleiner und wurde nur zu einer Relativmessung verwendet.

Die Meßmethode, die zur Bestimmung von Nachweiswahrscheinlichkeiten führt, ist bereits früher besprochen worden<sup>2</sup>. Ein wenig ausgedehntes Präparat eines radioaktiven Körpers steht zwischen einem  $\beta$ - und einem  $\gamma$ -Zählrohr. Es werden außer den Einzelausschlägen Koinzidenzen zwischen den  $\beta$ - und  $\gamma$ -Ausschlägen der Zählrohre gemessen. Wenn im einfachsten Fall jeder  $\beta$ -Strahl mit einem  $\gamma$ -Quant gleichzeitig ausgesandt wird, so ist der Quotient Koinzidenzhäufigkeit durch Häufigkeit der  $\beta$ -Ausschläge gleich der gesuchten Ansprechwahrscheinlichkeit des  $\gamma$ -Zählrohres. Das Präparat muß dabei so klein sein, daß für alle seine Teile die Nachweiswahrscheinlichkeit im  $\gamma$ -Zählrohr dieselbe ist. Die Art und Anordnung des  $\beta$ -Zählrohres ist im Prinzip gleichgültig.

## 2. Bisherige Messungen

a) Na<sup>22</sup>. Positronenstrahlung gekoppelt<sup>5</sup> mit homogener  $\gamma$ -Strahlung<sup>7</sup> von 1,3 eMV. Die Nachweiswahrscheinlichkeit für die  $\gamma$ -Strahlung von 1,3 eMV ergab sich mit dem Standardzählrohr zu

$$P_{St} = 0,98 \cdot 10^{-3},$$

mit dem Bleizählrohr, das außen noch mit 0,5 mm Blei umgeben war, zu

$$P_{Pb} = 0,84 \cdot 10^{-3}.$$

<sup>6</sup> Durch die Herkunft der Resultate dieser Arbeit aus Untersuchungen mit anderen Zielen sind gewisse Mängel entstanden, deren nachträgliche Beseitigung einen unverhältnismäßig großen Arbeitsaufwand erfordert hätte.

<sup>7</sup> F. Oppenheimer u. E. P. Tomlinson, Physic. Rev. **56**, 858 [1937].

Ferner ergab sich durch Messungen an der Vernichtungsstrahlung mit geringerer Genauigkeit für 0,5 eMV

$$P_{Al} = 0,49 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{Pb} = 1,0_3 \cdot 10^{-3}.$$

b) Mg<sup>27</sup>. Elektronenstrahlung gekoppelt<sup>8</sup> mit homogener  $\gamma$ -Strahlung von 0,88 eMV<sup>9</sup>.

Mit dem Standardzählrohr ergab sich

$$P_{St} = 0,72 \cdot 10^{-3}.$$

c) Al<sup>28</sup>. Nach neuer Messung von Gentner und Maier-Leibnitz (l. c.) ist die  $\gamma$ -Strahlung sicher inhomogen und besteht aus einer starken Komponente von etwa 1,7 eMV und einer schwächeren von etwa 2,4 eMV. Entsprechend ist ein starkes Teilspektrum der  $\beta$ -Strahlen (etwa 94%) mit der  $\gamma$ -Strahlung von 1,7 eMV, der Rest mit 2,4 eMV gekoppelt. Der Grundzustand wird durch  $\beta$ -Strahlung nicht direkt erreicht. Die gemessene Koinzidenzhäufigkeit pro  $\beta$ -Strahl ( $1,27 \cdot 10^{-3}$  im Standardzählrohr) ist daher im wesentlichen der  $\gamma$ -Energie von 1,7 eMV zuzuschreiben, besser einer mittleren  $\gamma$ -Energie von 1,7<sub>7</sub> eMV. Wir haben also als Ergebnis:

$$P_{St} = 1,2_7 \cdot 10^{-3}$$

für die  $\gamma$ -Energie 1,7<sub>7</sub> eMV.

d) Mn<sup>54</sup>. Dieser Körper sendet nur K- und  $\gamma$ -Strahlen aus; die Energie der  $\gamma$ -Strahlen ist gleich 0,85 eMV<sup>10</sup>. Die Koinzidenzmessung<sup>11</sup> ergab für die Koinzidenzhäufigkeit pro K-Quant  $0,72 \cdot 10^{-3}$  mit dem Bleizählrohr. Diese Zahl ist gleich der  $\gamma$ -Nachweiswahrscheinlichkeit, wenn alle K-Strahlen mit  $\gamma$ -Strahlung gekoppelt sind. Wenn außerdem der Grundzustand des Endkerns direkt durch K-Einfang erreicht wird, ist die Nachweiswahrscheinlichkeit größer. Das Ergebnis heißt also für 0,85 eMV

$$P_{Pb} = 0,72 \cdot 10^{-3} \text{ oder größer.}$$

Durch eine Vergleichsmessung ergab sich mit dem Standardzählrohr (mit 0,5 mm Pb)

$$P_{St} = 0,60 \cdot 10^{-3} \text{ oder größer,}$$

ohne Bleimantel mit zusätzlichem Aluminiumabsorber vor dem Zählrohr:

$$P_{Al} = 0,55 \cdot 10^{-3} \text{ oder größer.}$$

e) Co (70<sup>d</sup>). Positronenstrahlung gekoppelt<sup>11</sup> mit  $\gamma$ -Strahlung von 0,6 eMV<sup>12</sup>. Es ergab sich

$$P_{St} = 0,53 \cdot 10^{-3},$$

ferner durch Vergleichsmessung

$$P_{Pb} = 0,70 \cdot 10^{-3}.$$

<sup>8</sup> W. Gentner u. R. Maier-Leibnitz, Z. Physik eingereicht.

<sup>9</sup> J. R. Richardson, Physic. Rev. **53**, 124 [1938].

<sup>10</sup> J. J. Livingood u. G. T. Seaborg, Physic. Rev. **54**, 391 [1938].

<sup>11</sup> H. Maier-Leibnitz u. W. Gentner (unveröffentlicht).

<sup>12</sup> J. J. Livingood u. G. T. Seaborg, Rev. mod. Physics **12**, 30 [1940].

f) Co (270<sup>d</sup>).  $K$ - und  $\gamma$ -Strahlen. Die Energie der  $\gamma$ -Strahlung ist durch Untersuchung der  $\beta$ -Strahlen aus innerer Umwandlung genau bekannt; es gibt 2 Linien von 0,119 und von 0,132 eMV. Die Koinzidenzmessung<sup>14</sup> ergab, daß die  $\gamma$ -Quanten nicht nacheinander, sondern einzeln ausgesandt werden. Die  $K$ - $\gamma$ -Koinzidenzhäufigkeit pro  $K$ -Ausschlag bezieht sich also auf die mittlere  $\gamma$ -Energie von 0,12<sub>5</sub> eMV, wenn nicht auch der Grundzustand direkt, ohne  $\gamma$ -Strahlung, erreicht wird. Für die Ansprechwahrscheinlichkeit für 0,125 eMV ergibt sich so für das Bleizählrohr

$$P_{Pb} = 0,76 \cdot 10^{-3} \text{ oder größer,}$$

für das Standardzählrohr

$$P_{St} = 0,60 \cdot 10^{-5} \text{ oder größer,}$$

also ein viel kleinerer Wert, was zum Teil von der Umhüllung des Zählrohrs mit 0,5 mm Blei herrührt. Ohne die Bleihülle ergab sich

$$P_{Al} = 0,29 \cdot 10^{-4} \text{ oder größer,}$$

das ist immer noch erheblich weniger als beim Bleizählrohr.

Mit dem Messingzählrohr wurde eine Relativmessung der  $\gamma$ -Strahlung von Co (70<sup>d</sup>) und Co (270<sup>d</sup>) gemacht. Nimmt man für die Ansprechwahrscheinlichkeit bei 0,6 eMV den aus der später diskutierten Kurve Abb. 6 folgenden Wert, so ergibt sich für 0,125 eMV

$$P_{Mess} = 0,10_6 \cdot 10^{-3}.$$

### 3. Messungen an Cassiopeium und Ytterbium

Auf Anregung von Professor Bothe wurden an den Strahlungen der von ihm eingehend untersuchten<sup>13</sup> seltenen Erden Cp und Yb Koinzidenzmessungen angestellt<sup>14</sup>. Die Ergebnisse dieser Messungen für die Umwandlungsschemata der beteiligten Kerne sind bereits in der Arbeit von Bothe diskutiert worden. Hier sollen daher nur die Versuche selbst und die Ergebnisse über Zählrohrempfindlichkeiten besprochen werden. Die Koinzidenzmessungen wurden sämtlich in der Standardanordnung vorgenommen, nur die Zählrohre wurden nach Bedarf ausgetauscht.

a) Cp (163<sup>h</sup>). Der Körper sendet nach Bothe<sup>13</sup> dreierlei Strahlungen aus: Elektronen mit einer Maximalenergie von 520 ekV,  $\gamma$ -Strahlen von 200 ekV und schließlich  $K$ -Strahlen (Energie 50 ekV). Zunächst wurde untersucht, ob die  $\beta$ -Strahlen mit der  $\gamma$ -Strahlung zusammenhängen. Als  $\beta$ -Zählrohr diente ein Messingzählrohr mit

<sup>13</sup> W. Bothe, ds. Z. 1, 173 [1946]. Über Cps. a. A. Flammersfeld u. J. Mattauch, Naturwiss. 31, 66 [1943].

<sup>14</sup> Hr. Prof. Bothe hat mir seine Präparate zur Verfügung gestellt und mir durch freundliche Überlassung von Meßergebnissen viel geholfen, wofür ich ihm herzlich danken möchte.

einem 16×60 mm großen Fenster von 6 mg/cm<sup>2</sup> Cellophan, als  $\gamma$ -Zählrohr das „Bleizählrohr“ (innen 0,1 mm Blei, außen Aluminium). Die Einzelausschläge und Koinzidenzen wurden mit und ohne 1 mm Al vor dem  $\beta$ -Zählrohr gemessen. Für die  $\beta$ - $\gamma$ -Koinzidenzen ergab sich  $(0,03 \pm 0,02) \cdot 10^{-3}$  Koinzidenzen je  $\beta$ -Ausschlag, das ist nur etwa  $\frac{1}{25}$  der Erwartung, wenn alle  $\beta$ -Strahlen mit  $\gamma$ -Strahlen gekoppelt sind. Die  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen hängen also nicht zusammen. Auch die  $K$ -Strahlung, die ja im  $\gamma$ -Zählrohr ebenfalls mit erheblicher Empfindlichkeit nachgewiesen wird, ist nach diesem Ergebnis nicht merklich mit  $\beta$ -Strahlen gekoppelt. Es liegt dualer Zerfall vor.

Daraufhin wurde nach Koinzidenzen zwischen  $K$ - und  $\gamma$ -Strahlen gesucht. Zum Nachweis der  $K$ -Strahlen diente das Zinnzählrohr (innen 9,6 mg/cm<sup>2</sup> Zinn, außen 0,1 mm Al, vor dem Präparat 1 mm Al); die  $\gamma$ -Strahlung wurde wieder im Bleizählrohr nachgewiesen. Eine Schwierigkeit entsteht hier durch die hohe Empfindlichkeit des Zinnzählrohrs für weiche Strahlen:  $\gamma$ -Strahlen, die im Bleizählrohr durch Photoeffekt in der  $K$ -Schale absorbiert und gezählt wurden, können durch die Blei- $K$ -Strahlung im Zinnzählrohr koinzidierende Ausschläge hervorrufen. Dasselbe ist denkbar durch doppelten Compton-Effekt. Deshalb wurde zwischen Präparat und  $\gamma$ -Zählrohr ein Wolframabsorber von 0,4 mm Dicke gelegt, durch den die weichen Strahlen, insbesondere die  $K$ -Strahlung von Blei, stark geschwächt wurden, während die 200-ekV-Strahlung noch zu 53% durchging. Die Koinzidenzen wurden mit und ohne 0,3 mm Blei vor dem Zinnzählrohr gemessen. Es ergab sich als Differenz ein positiver Effekt. Die Häufigkeit der Koinzidenzen pro Ausschlag im Bleizählrohr, das ist die Koinzidenzhäufigkeit pro  $\gamma$ -Ausschlag, betrug  $(0,95 \pm 0,24) \cdot 10^{-3}$ . Dabei wurden bei der Messung mit Absorber noch 12% der  $K$ -Strahlen mitgemessen, wodurch die Koinzidenzhäufigkeit um den Faktor  $1 - 0,12 = 0,88$  zu klein erscheint; die obige Zahl ist also auf  $1,08 \cdot 10^{-3}$  zu erhöhen.

Das Experiment erweist also, daß die  $\gamma$ -Strahlung mit  $K$ -Strahlen gekoppelt ist. Es muß dann wohl angenommen werden, daß alle  $\gamma$ -Strahlen zu einem  $K$ -Übergang gehören; denn wenn nur ein Teil gekoppelt wäre, wäre die Herkunft des Restes nicht zu verstehen. Die Koinzidenzhäufigkeit pro  $K$ -Ausschlag bedeutet also die Nachweiswahrscheinlichkeit für den  $K$ -Übergang im Zinnzählrohr. Für die  $K$ -Strahlung selbst ist diese jedoch etwas größer, weil infolge des Auger-Effekts die Fluoreszenzausbeute beim  $K$ -Übergang nicht 1, sondern etwa 0,85 ist. Die Nachweiswahrscheinlichkeit für Strahlung von 50 ekV im Zinnzählrohr ist damit

$$P_{Sn} = \frac{1,08 \cdot 10^{-3}}{0,85} = 1,27 \cdot 10^{-3}.$$

b) Ytterbium (99<sup>h</sup>). Der Strahler zeigt  $\beta$ -,  $\gamma$ - und  $K$ -Strahlung. Hier wurde nur untersucht, ob die  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen gekoppelt sind. Zum  $\beta$ -Nachweis diente dasselbe Fensterzählrohr wie bei Cassiopeium, zum  $\gamma$ -Nachweis das Bleizählrohr. Koinzidenzen und Einzelausschläge wurden gemessen mit 0,0; 6,8; 19, 2 und 52 mg/cm<sup>2</sup> Al vor dem  $\beta$ -Zählrohr, wobei die Ausschläge mit dem letzten Absorber als Nulleffekt von den anderen abgezogen wurden. Das Ergebnis zeigt Abb. 1. Es zeigt



sich, daß nur die weichsten  $\beta$ -Strahlen erheblich mit  $\gamma$ -Strahlen gekoppelt sind. Damit in voller Übereinstimmung ist, daß sich nach Bothe<sup>13</sup> das  $\beta$ -Spektrum in zwei Komponenten von 130 und 500 ekV zerlegen läßt, während die Energie der  $\gamma$ -Strahlung 350 ekV beträgt. Auch die Häufigkeit der Koinzidenzen ist in Übereinstimmung mit dem so gewonnenen Termschema. Zur Bestimmung der Ansprechwahrscheinlichkeit des  $\gamma$ -Zählrohrs ist die Messung allerdings nicht geeignet, weil die Zerlegung eines  $\beta$ -Spektrums fast immer mit erheblichen Fehlern verbunden ist.

c) *Ytterbium* (33<sup>a</sup>). Das langlebige Ytterbium sendet nur K- und  $\gamma$ -Strahlen aus und muß also durch K-Einfang zerfallen. Hier wurde dieselbe Koinzidenzmessung ausgeführt wie bei Cassiopeium. Als Koinzidenzhäufig-

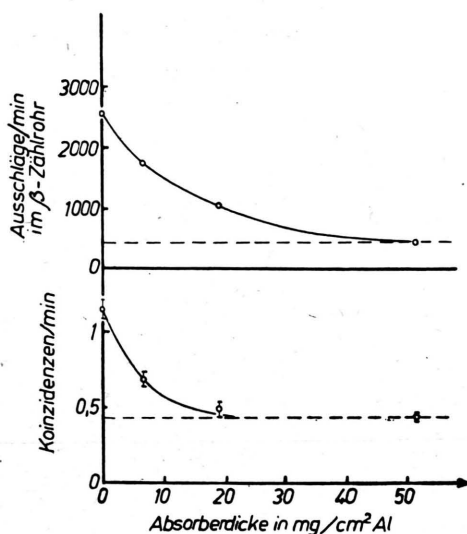


Abb. 1.  $\beta$ ,  $\gamma$ -Koinzidenzmessung an Yb (99<sup>h</sup>). Oben Ausschläge im  $\beta$ -Zählrohr, Mitte Koinzidenzen, unten Koinzidenzen je  $\beta$ -Ausschlag nach Abzug der Werte bei 52 mg/cm<sup>2</sup> Al.

keit pro  $\gamma$ -Ausschlag ergab sich der Wert  $(1,30 \pm 0,18) \cdot 10^{-3}$ , der wiederum wegen der Fluoreszenzausbeute auf  $1,30 \cdot 10^{-3} / 0,85 = 1,5_3 \cdot 10^{-3}$  zu erhöhen ist, um die Ansprechwahrscheinlichkeit für Strahlen von 50 ekV im Zinnzählrohr zu bedeuten. Die Koinzidenzen pro K-Ausschlag ergaben sich zu  $0,30_5 \cdot 10^{-3}$ . Diese Zahl ist wesentlich kleiner, als die Ansprechwahrscheinlichkeit für  $\gamma$ -Strahlen im Bleizählrohr sein kann, die auf etwa  $10,0 \cdot 10^{-3}$  geschätzt werden muß (s. später Abb. 7). Man kann daraus schließen, daß nur etwa  $3/10$  der K-Strahlung mit  $\gamma$ -Strahlung gekoppelt sind, während der Rest zu einem direkten Übergang in den Grundzustand gehört.

d) *Nachweiswahrscheinlichkeiten für 50 und 200 ekV für verschiedene Zählrohre*. Als Mittel aus den Messungen bei Cp und Yb ergibt sich für das Zinnzählrohr und 50 ekV

$$P_{Sn} = 1,4_0 \cdot 10^{-3}.$$

Das ist der für Fluoreszenzausbeute und Absorption im Präparat korrigierte Wert.

Zur Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit für andere Zählrohre wurden die Absorptionskurven der  $\gamma$ - und K-Strahlung von Cp (6,8<sup>d</sup>) in Blei aufgenommen, zerlegt und für den Abfall korrigiert. Dabei ergab sich für die Ausschlagszahl ohne Absorber im Bleizählrohr: 50 ekV 148/min, 200 ekV 300/min, für das Zinnzählrohr: 50 ekV 283/min, 200 ekV 170/min. Für Aluminium wurde aus Intensitätsgründen keine analoge Messung gemacht; hier konnten jedoch Messungen von Prof. Bothe verwendet werden. Danach ist im Aluminiumzählrohr die Zahl der Ausschläge von 200 ekV gleich 0,78 der von 50 ekV. Ferner ergab eine direkte Messung, daß für die K-Strahlung von Europium (9,4<sup>h</sup>) (ca. 40 ekV) die Empfindlichkeit eines Aluminiumzählrohrs 0,064 von der des Zinnzählrohrs beträgt. Für 50 ekV ergibt sich daraus mit Hilfe der Rechnungen von Abschn. 6 der Wert 0,048, und die Ausschlagszahlen im Standard-Aluminiumzählrohr (ohne Blei) werden: 50 ekV 14,0/min, 200 ekV 10,8/min. Für die Nachweiswahrscheinlichkeit ergibt sich bei 50 ekV:

$$P_{Pb} = 0,9_6 \cdot 10^{-3},$$

$$P_{Al} = 0,8_8 \cdot 10^{-4}.$$

Für 200 ekV läßt sich eine untere Grenze angeben dadurch, daß jedenfalls nicht mehr  $\gamma$ -Strahlen als K-Umwandlungen auftreten können, wobei die Zahl der K-Umwandlungen gleich 0,85 der K-Strahlen ist und außerdem berücksichtigt werden muß, daß nur 0,76 der K-Strahlen aus dem Präparat austreten. Damit wird für 200 ekV

$$P_{Pb} \geq 0,9_6 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,85 \cdot 0,76 \cdot 300}{148} = 1,2_5 \cdot 10^{-3},$$

$$P_{Sn} \geq 1,4_0 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,85 \cdot 0,76 \cdot 170}{283} = 0,54 \cdot 10^{-3},$$

$$P_{Al} \geq 0,8_8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,85 \cdot 0,76 \cdot 10,8}{14,0} = 0,44 \cdot 10^{-4}.$$

#### 4. Abhängigkeit der Ansprechwahrscheinlichkeit vom Ort des $\gamma$ -Strahlers

Die Ausschlagshäufigkeit eines Zählrohrs ist nicht notwendig dem Raumwinkel proportional, den das Zählrohr den  $\gamma$ -Strahlen darbietet. Strahlen, die schief durch die Zählrohrwand durchgehen, werden mit größerer Wahrscheinlichkeit nachgewiesen als senkrecht durchgehende. Solange sich also die Winkelverteilung bei der Abstandsveränderung wesentlich mitverändert, kann man keine strenge Proportionalität mit dem Raumwinkel erwarten. Die Größe der Abweichung hängt in komplizierter Weise von der Winkelverteilung der Elektronen bei der Auslösung durch die  $\gamma$ -Strahlen und ihrer Veränderung bei der Diffusion durch die Zählrohrwand ab. Norling<sup>3</sup>, der die quantitative Behandlung des Problems am grund-



lichsten durchgeführt hat, unterscheidet 2 Grenzfälle: a) alle Elektronen fliegen in der Richtung der  $\gamma$ -Strahlen weiter; in diesem Fall ist die Ansprechwahrscheinlichkeit genau proportional dem Raumwinkel; b) für die Elektronen ist jede Richtung gleich wahrscheinlich; dann ist die Ausschlagszahl nur bei großen Abständen dem Raumwinkel proportional, bei kleinen wächst sie stärker an. In diesen beiden Fällen läßt sich die relative Ausschlagshäufigkeit als Funktion des Abstands der Strahlenquelle berechnen, wenn man den empfindlichen Bereich des Zählrohrs als einen Cylinder idealisiert. Norling hat auch versucht, das experimentell mit einem kleinen Ra-Em-Präparat bestimmte Abstandsgesetz damit zu vergleichen, doch sind seine Versuche durch die Absorption weicher  $\gamma$ -Strahlen in der Zählrohrwand entstellt. Außerdem ist das wirkliche Zählrohr nicht streng durch einen Cylinder darstellbar. Das Abstandsgesetz ist, besonders bei kurzen Zählrohren, kein geeignetes Mittel, um die Gültigkeit der einen oder der anderen Annahme über die Richtungsverteilung der Elektronen zu prüfen.

Andererseits ist es mit Hilfe des Abstandsgesetzes möglich, die Umrechnung von den gemessenen Ansprechwahrscheinlichkeiten auf Empfindlichkeiten, die unabhängig vom Raumwinkel sind, durchzuführen. Für große Abstände der Strahlenquelle ist nämlich die Ausschlagszahl in jedem Fall proportional dem Raumwinkel  $\omega$ , und man kann setzen

$$p = \omega q / 4 \pi.$$

( $p$  = Ansprechwahrscheinlichkeit,  $q$  = Empfindlichkeit). Dies ist eine Definitionsgleichung für die Empfindlichkeit  $q$ . Das Präparat muß dabei senkrecht zur Zählrohrachse stehen. Für kleine Abstände setzt man zweckmäßig

$$p = \omega_{\text{eff}} q / 4 \pi.$$

$\omega_{\text{eff}}$  ergibt sich aus dem Abstandsgesetz, indem man  $q$  konstant setzt und  $\omega$  so normiert, daß für große Abstände der aus der Geometrie berechnete Raumwinkel herauskommt. Abb. 2 zeigt eine solche Messung mit dem Standard-Aluminiumzählrohr, wobei als Strahlenquelle ein kleines Na<sup>22</sup>-Präparat diente, das  $\gamma$ -Strahlen von 1,3 eMV und Vernichtungsstrahlung von 0,5 eMV aussendet. Der effektive Raumwinkel für die Standardanordnung (Abstand 18,5 mm) ist danach  $4 \pi \cdot 0,088$ , und die  $\gamma$ -Empfindlichkeiten ergeben sich aus den gemessenen Ansprechwahrscheinlichkeiten durch Division

mit 0,088. Das ist übrigens annähernd dasselbe, was man mit Hilfe des geometrischen Raumwinkels erhält. Es scheint, daß sich die Fehler der einfachen Berechnung mit dem Raumwinkel entgegenwirken, so daß sie für praktische Zwecke ausreicht.

Es besteht an sich die Möglichkeit, daß sich für eine andere  $\gamma$ -Energie ein anderer Umrechnungsfaktor ergeben hätte; doch wird man hier höchstens kleine Unterschiede erwarten, die erst bei

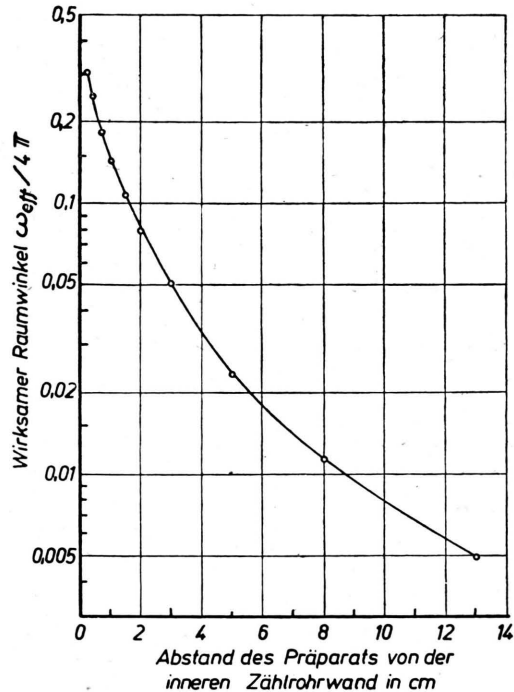


Abb. 2. Ausschlagszahl im Aluminiumzählrohr in Abhängigkeit vom Abstand der  $\gamma$ -Strahlenquelle. Die Ordinaten sind so normiert, daß bei großen Abständen die Kurve den aus den Zählrohrdimensionen berechneten Raumwinkel wiedergibt.

wesentlich feineren Messungen als den hier mitgeteilten ins Gewicht fallen können.

Ein geeigneter Versuch, um zu prüfen, welcher der beiden von Norling behandelten Grenzfälle a) und b) näher erfüllt ist, besteht darin, daß man ein Zählrohr aus größerem Abstand unter verschiedenem Winkel zu seiner Achse bestrahlt. Die Ausschlagszahl ist dann nach Annahme b) konstant bis auf etwaige Absorptionseffekte, nach Annahme a) dagegen ist sie proportional dem Raumwinkel, der sich bei der Drehung stark ändert. Ein solcher Versuch wurde mit Ra-Em-Strahlung gemacht, die stark gefiltert war, um die Absorption im Zählrohr klein zu halten. Das Präparat, etwa

50 m C Ra Em, stand in einem großen Bleipanzern, der nach vorn durch 5 cm Blei verschlossen war. In etwa 2 m Abstand war möglichst frei das Zählrohr (Aluminiumzählrohr mit 0,5 mm Blei umgeben) drehbar aufgestellt. Abb. 3 zeigt das Ergebnis der Messung. Der erwartete Verlauf nach den beiden Annahmen ist mit eingetragen. Man sieht, daß die gemessene Kurve sehr nahe der Annahme gleichmäßig verteilter Elektronen entspricht. Die Abweichung bei Einstrahlung längs der Zählrohrachse läßt sich zwanglos durch Absorption der  $\gamma$ -Strahlen in der Zählrohrwand deuten.

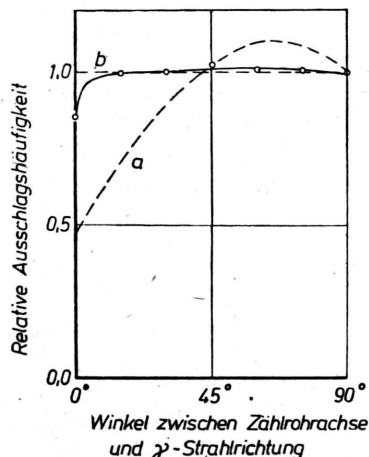


Abb. 3. Ausschlagszahl im Aluminiumzählrohr als Funktion der Richtung der aus großem Abstand kommenden harten  $\gamma$ -Strahlen. Miteingezeichnet ist der erwartete Verlauf, wenn die Sekundärelektronen a) die Richtung der  $\gamma$ -Strahlen haben, oder b) regellos zur  $\gamma$ -Richtung verteilt austreten.

### 5. Messungen anderer Autoren

Im folgenden sollen die Messungen anderer Autoren zusammengestellt werden, die mit unseren Resultaten vergleichbar sind oder diese ergänzen.

a) G. v. Droste<sup>15</sup> hat an einem Messingzählrohr aus der Absorptionskurve der  $\gamma$ -Strahlung eines Th B + C-Präparats bekannter Stärke die Empfindlichkeit für die Energie 2,64 eMV und 0,24 eMV bestimmt. Er findet die Werte  $1,61 \cdot 10^{-2}$  und  $1,55 \cdot 10^{-3}$ .

b) Norling<sup>4</sup> hat mit Aluminium-, Messing- und Bleizählrohren gemessen und hat auf quantitativen Arbeiten besonders geachtet. Er hat ebenfalls die Th C''-Strahlung von 2,64 eMV mit einem Präparat bekannter Stärke gemessen. Ferner hat er mit Koinzidenzmessungen die Empfindlichkeit bei 0,9 eMV (Strahler Mn<sup>56</sup>) und bei 0,44 eMV (Au<sup>198</sup>) gemessen. Seine Resultate sind:

	2,64 eMV	0,9 eMV	0,44 eMV
Aluminium . .	$2,18 \cdot 10^{-2}$	—	—
Messing . . .	$1,7_6 \cdot 10^{-2}$	$0,40 \cdot 10^{-2}$	—
Blei . . . . .	$2,0_2 \cdot 10^{-2}$	$0,58 \cdot 10^{-2}$	$1,40 \cdot 10^{-2}$

c) Feather und Dunworth haben sich in einer Anzahl von Arbeiten mit Koinzidenzmessungen beschäftigt, deren Ergebnisse über Zählrohrenempfindlichkeiten in einem Bericht von J. V. Dunworth<sup>16</sup> zusammengefaßt sind. Danach ist die Empfindlichkeitskurve für ein Messingzählrohr im Bereich von 0,2—3,0 eMV in Übereinstimmung mit einer Kurve, die v. Droste mit Hilfe seiner Messungen berechnet hat. Die Kurve ist durch zahlreiche Punkte belegt, wobei allerdings Einzelheiten über die Experimente meist fehlen. Dunworth gibt nicht Empfindlichkeiten, sondern nur Ansprechwahrscheinlichkeiten an. Rechnet man mit Hilfe des Raumwinkels auf Empfindlichkeit um, so ergibt sich z. B. für 2,64 eMV  $1,83 \cdot 10^{-2}$ , ein Wert, der gut zu dem von Norling paßt und etwas höher liegt als der von v. Droste.

d) Bei den übrigen Messungen, insbesondere denen von L. M. Langer, A. C. G. Mitchell u. P. W. Daniel<sup>17</sup> ist das Termschema der untersuchten Umwandlungen zu kompliziert, als daß man daraus sichere Empfindlichkeitswerte ableiten könnte. G. J. Sizoo u. H. Willemsen<sup>18</sup> haben aus der Absorptionskurve der  $\gamma$ -Strahlen von RaB + C eine Empfindlichkeitskurve für Messingzählrohre abgeleitet, die im mittleren Bereich kleinere Werte zeigt als die von v. Droste, während sie bei großen und kleinen Energien übereinstimmt. Wegen der vielen Faktoren, die in ihre komplizierte Auswertung eingehen, möchten wir der von Dunworth bestätigten Kurve von v. Droste den Vorzug geben.

### 6. Empfindlichkeitskurven für verschiedene Zählrohre

In Tab. 1 sind alle Daten über die  $\gamma$ -Empfindlichkeiten zusammengefaßt, wobei die Umrechnung der gemessenen Ansprechwahrscheinlichkeiten durch Division mit 0,088 geschah. Um bessere Aussagen über den Verlauf der Empfindlichkeitskurven machen zu können, wurden einfache Berechnungen angestellt. Wenn keine Richtungsbeziehungen zwischen  $\gamma$ - und sekundären  $\beta$ -Strahlen wirksam sind, erwartet man<sup>19</sup>, daß die Empfindlichkeit bis auf einen Faktor in der Nähe von 1 gleich dem Produkt des Absorptionskoeffizienten für die  $\gamma$ -Strahlen und der mittleren Reichweite der  $\beta$ -Strahlen ist. Da die Bedingung der Richtungsunabhängigkeit nach Abschn. 4 gut erfüllt ist, wird man erwarten, daß eine solche Berechnung den Verlauf der Empfindlichkeit richtig wiedergibt. Abb. 4 gibt die so nach der Formel von v. Droste erhaltenen Kurven für Zählrohre aus Al, Cu, Sn und Pb wieder. Die Kurven gelten für „ideale“ Zählrohrwände, die so dünn sind, daß zwar Sätti-

<sup>15</sup> Z. Physik **100**, 529 [1936]; **101**, 474 [1936].

<sup>16</sup> Journ. sci. Instruments **11**, 167 [1940].

<sup>17</sup> Physic. Rev. **56**, 380, 422, 962 [1939].

<sup>18</sup> Physica **5**, 105 [1938].

<sup>19</sup> H. J. v. Baeyer<sup>2</sup>; G. v. Droste<sup>15</sup>.

gung für die Elektronen vorliegt, die Absorption der  $\gamma$ -Strahlen jedoch keine Rolle spielt. Für die Reichweite der Elektronen wurde die gut bekannte praktische Reichweite in Aluminium gewählt und für die anderen Elemente Massenproportionalität der Absorption angenommen. Bei allen Zählrohren ist die Wirkung des Compton-Effekts und des Photoeffekts, nötigenfalls für K- und L-Schale getrennt, berücksichtigt. Bei Blei muß in der Nähe der K-Kante auch noch die Wir-

men ist. Bei Energien über 1 eMV ist also die Empfindlichkeit eines Bleizählrohrs wenig verschieden von der eines Aluminiumzählrohrs. Erst unter 1 eMV ist das Bleizählrohr erheblich empfindlicher, die Meßwerte liegen hier etwas höher als die für ein reines Aluminiumzählrohr. In der Abb. ist unter Zuhilfenahme der theoretischen Kurve der Verlauf eingetragen, den man danach für ein reines Aluminiumzählrohr erwartet. Die

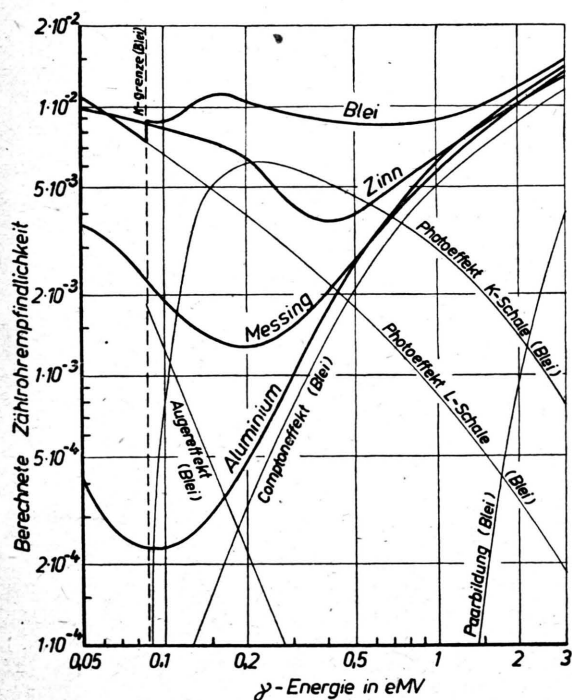


Abb. 4. Nach der Formel von v. Droste berechnete  $\gamma$ -Empfindlichkeiten für ideale Zählrohre.

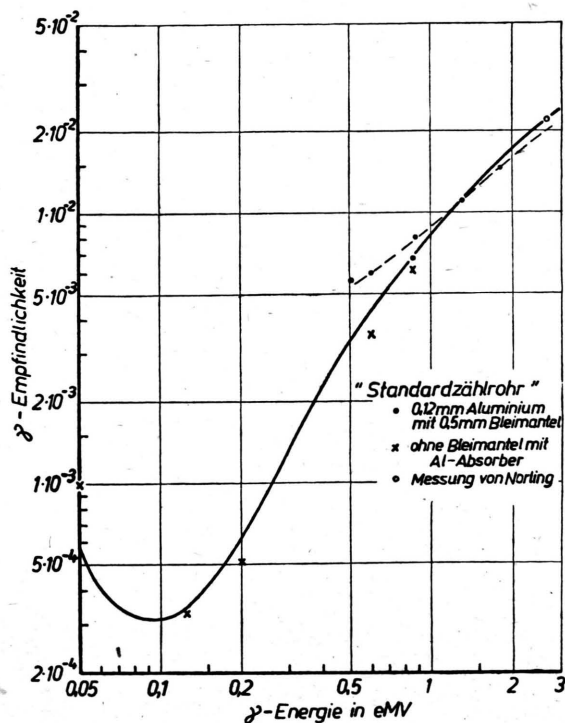


Abb. 5.  $\gamma$ -Empfindlichkeitskurven für Aluminiumzählrohre.

kung der Auger-Elektronen berücksichtigt werden, die den kleinen Sprung an der Kante erzeugen, außerdem über 1 eMV auch die Paarbildung.

Bei dem nun folgenden Vergleich der berechneten Kurven mit den Erfahrungswerten ist zu berücksichtigen, daß die Zählrohre nicht für alle Energien ideal genannt werden können. Außerdem können sich Mängel der Berechnung zeigen, wohl vor allem durch mangelnde Massenproportionalität der  $\beta$ -Absorption bei den schweren Elementen.

a) *Aluminium.* Die gemessenen Punkte sind in Abb. 5 eingetragen. Bis 200 ekV gelten sie für ein reines Al-Zählrohr, bei den höheren Energien ist das Zählrohr mit Blei umgeben, außer bei dem Wert für 2,64 eMV, der von Norling übernom-

theoretische Kurve ist dabei durchweg mit dem Faktor 1,36 multipliziert und nur über 1,3 eMV etwas erhöht, um die Empfindlichkeit für 2,6 eMV richtig wiederzugeben; eine solche Erhöhung läßt sich gut verstehen wegen der großen mittleren Energie der Compton-Elektronen, die in v. Drostes Formel nicht ganz richtig wiedergegeben wird. Die Punkte bei 200 und 125 ekV sowie bei 0,85 eMV liegen gut auf der Kurve; wir schließen daraus, daß bei den betreffenden K-Einfangprozessen die Zahl der  $\gamma$ -Strahlen gleich der der K-Einfangungen ist. Dagegen ist der Meßwert für 50 ekV deutlich höher als der berechnete. Diese Diskrepanz tritt auch beim Blei- und beim Zinnzählrohr auf und muß als ungeklärt betrachtet werden. Es ist



vielleicht möglich, daß beim Zerfall von Yb ein Teil der  $K$ -Strahlung durch innere Umwandlung einer energiearmen  $\gamma$ -Komponente entsteht. Dadurch würde die Koinzidenzhäufigkeit je  $\gamma$ -Ausschlag erhöht. Die Meßgenauigkeit bei Cp (etwa 20% statistischer Fehler) ist nicht so groß, daß man hier etwas Ähnliches fordern müßte.

b) *Messingzählrohr*. Die in Abb. 6 eingezeichnete Kurve ist die von v. Droste, erhöht um den

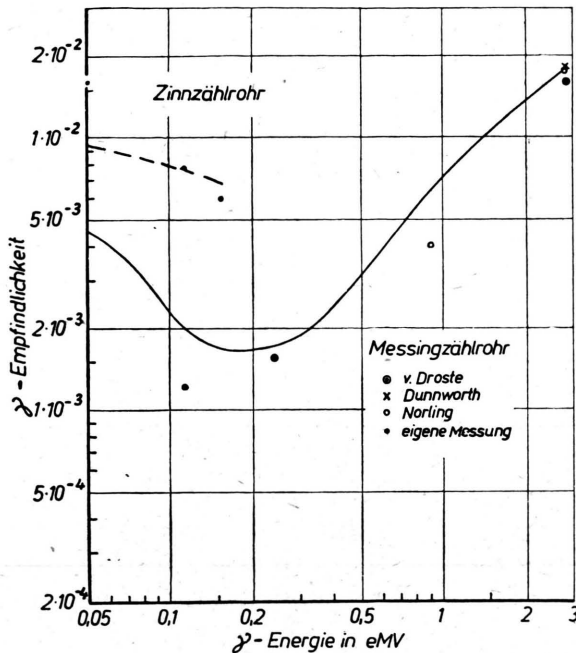


Abb. 6. Unten  $\gamma$ -Empfindlichkeitskurve für ein Messingzählrohr, oben für ein Zinnzählrohr.

Faktor 1,1<sub>3</sub> wegen der Messungen von Norling und Dunworth. Die Meßpunkte von Dunworth, die alle nahe auf der Kurve liegen, sind nicht eingetragen außer dem bei 2,64 eMV. Der einzige von mir gemessene Punkt bei 125 ekV paßt zu der Kurve, wenn man bedenkt, daß er wegen Absorption in der 0,5 mm starken Wand um den Faktor 1,2<sub>2</sub> erhöht werden muß, um für ein ideales Zählrohr zu gelten. Die Messung von Norling an Mangan (0,9 eMV) fällt etwas nach unten heraus.

c) *Zinnzählrohr*. Die Zinnschicht wurde sehr dünn gewählt, weil das Zählrohr bei kleineren Energien verwendet werden sollte, wo seine Empfindlichkeit besonders hoch ist. Daher sind nur die Punkte bei 50 und 125 ekV, allenfalls noch 200 ekV, als für das ideale Zählrohr gültig anzusehen. Die Meßpunkte (Abb. 6) bei 125 und 200 ekV passen

zu einer um den Faktor 0,99 verschobenen Kurve, während für 50 ekV der Faktor 1,6<sub>2</sub> betragen müßte. Wir haben also hier dieselbe Diskrepanz wie bei Aluminium. Der kleinere Faktor ist plausibel wegen der gegenüber Messing und Aluminium stärkeren Kernstreuung der  $\beta$ -Strahlen, die die praktische Reichweite verkleinert.

d) *Bleizählrohr*. Bei Blei liegen kompliziertere Verhältnisse vor als bei den anderen Zählrohren. In Abb. 7 sind zunächst die Meßpunkte eingetragen, von denen wieder Norlings Punkt bei 0,9 eMV etwas herausfällt. Der Vergleich mit dem idealen Zählrohr muß für verschiedene Bereiche getrennt erfolgen. Unterhalb der  $K$ -Grenze bei 87,8 ekV entstehen Abweichungen vom idealen Zählrohr nur durch Absorption in der Zählrohr-

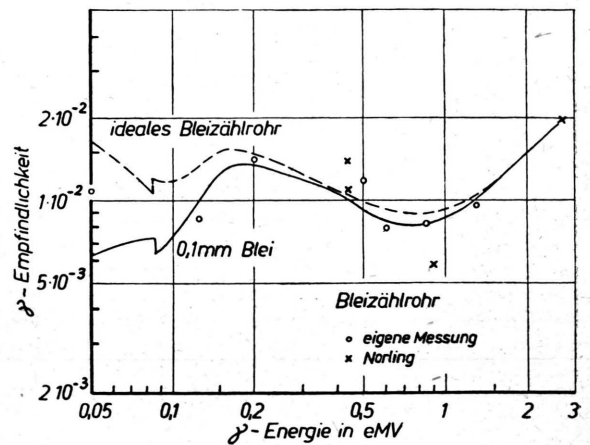


Abb. 7.  $\gamma$ -Empfindlichkeitskurven für Bleizählrohre.

wand. Die 50-ekV-Strahlung wird auf 40% geschwächt. Die Fluoreszenzstrahlung aus der L-Schale wird nicht wirksam, weil sie sehr stark absorbiert wird, und der Compton-Effekt ist überhaupt zu klein. Oberhalb der  $K$ -Grenze bis etwa 500 ekV ist die Bleischicht von 0,1 mm noch dick genug zur Sättigung für  $\beta$ -Strahlen. Außer der Absorption ist noch sekundäre  $K$ -Strahlung zu berücksichtigen, die mit hoher Empfindlichkeit nachgewiesen wird. Sie wirkt wie eine Verringerung der Absorption und wurde daher versuchsweise dadurch berücksichtigt, daß nur der halbe Absorptionskoeffizient eingesetzt wurde.

Oberhalb 0,5 eMV können kleine Korrekturen dadurch auftreten, daß die Bleischicht keine Sättigungsdicke für Photoelektronen mehr hat. Über 1 eMV sollte das keine Rolle mehr spielen wegen

des geringen Unterschieds der Empfindlichkeit von Blei- und Al-Zählrohren. Außerdem ist die Wirkung der gestreuten  $\gamma$ -Strahlen zu berücksichtigen. Bei 2 eMV zum Beispiel haben die meisten gestreuten  $\gamma$ -Quanten wenig mehr als 0,2 eMV Energie, werden also mit großer Empfindlichkeit nachgewiesen. Die Wirkung dieses Effektes ist schwer zu übersehen, aber wohl nicht allzu groß. Durch Angleichen der berechneten Kurve an die gemessenen Punkte mit ihren Korrekturen erhält man wieder eine Kurve für das ideale Bleizählrohr, die in Abb. 7 zugleich mit dem plausiblen Verlauf der Kurve für das wirkliche Zählrohr (innen 0,1 mm Blei) eingetragen ist. Die neue Kurve unterscheidet sich von der berechneten (Abb. 4) bei 1,3 eMV um Faktoren zwischen 1,1 und 1,4. Bei 50 ekV dagegen müßte der Faktor 2,5 betragen. Die Schwierigkeit, die beim Aluminiumzählrohr auftrat, wird damit bestätigt.

### 7. Folgerungen

Als Ergebnis der vorliegenden Untersuchungen kann man die Empfindlichkeit von Zählrohren aus Aluminium, Messing, Zinn und Blei im Bereich von 50 ekV bis 3 eMV als bekannt betrachten, mit einer Genauigkeit von mindestens 20%. (Eine Ausnahme bildet nur das Gebiet um 50 ekV, wo zwischen der Messung und der Erwartung eine noch ungeklärte Diskrepanz von 40% besteht.) Mit Hilfe dieser Kenntnis ergeben sich neue Möglichkeiten

für quantitative  $\gamma$ -Strahlungsmessungen mit Zählrohren, auf die im folgenden kurz hingewiesen werden soll.

a) Für die Messung der Intensität einer  $\gamma$ -Strahlung bekannter einheitlicher Energie hat man die Strahlenquelle senkrecht zur Zählrohrachse aufzustellen und berechnet die Nachweiswahrscheinlichkeit der Anordnung aus der Empfindlichkeit und dem effektiven Raumwinkel des Zählrohrs, der bei großen Abständen der Strahlenquelle streng, bei kleinen annähernd gleich dem geometrischen Raumwinkel ist.

b) Oberhalb etwa 1 eMV sind alle Zählrohre fast gleich empfindlich. Darunter jedoch zeigen sich sehr erhebliche Unterschiede (das Bleizählrohr ist bei 150 ekV 30-mal empfindlicher als das Aluminiumzählrohr!), die es ermöglichen, für verschiedene Zwecke jeweils das geeignetste Zählrohr zu wählen. Im Bereich von 0,1 bis 1 eMV ist ein Zählrohr, dessen innere Wand aus dünnem Blei (0,05 bis 0,2 mm) besteht, am empfindlichsten; darunter wählt man besser etwa eine dünne Zinnschicht (etwa 0,01 mm). Will man energiereiche  $\gamma$ -Strahlen ohne Störung durch weiche Strahlen untersuchen, so ist Aluminium sehr geeignet, dessen Empfindlichkeit im Bereich von 0,1 bis 1 eMV wesentlich stärker als proportional mit der  $\gamma$ -Energie ansteigt. Sucht man nach  $\gamma$ -Strahlung, ohne über die Energie etwas zu wissen, so wählt man am

$\gamma$ -Energie		Empfindlichkeit für				Autoren	
		Standardzählrohr (0,12 mm Al) m. 0,5 mm Pb	ohne Pb	Messing- zählrohr	Zinn- zählrohr		Blei- zählrohr
ThC <sup>11</sup>	2,64 eMV	— — —	— 2,18 · 10 <sup>-2</sup> —	1,6 <sub>1</sub> · 10 <sup>-2</sup> 1,76 · 10 <sup>-2</sup> 1,83 · 10 <sup>-2</sup>	— — —	— 2,02 · 10 <sup>-2</sup> —	v. Droste Norling Dunworth
Al <sup>28</sup>	1,7 <sub>7</sub> eMV	1,46 · 10 <sup>-2</sup>	—	—	—	—	Gentner u. Maier-Leibnitz
Na <sup>22</sup>	1,3 eMV	1,11 · 10 <sup>-2</sup>	—	—	—	0,96 · 10 <sup>-2</sup>	Maier-Leibnitz
Na <sup>22</sup>	0,5 eMV	0,56 · 10 <sup>-2</sup>	—	—	—	1,1 <sub>1</sub> · 10 <sup>-2</sup>	Maier-Leibnitz
Mn <sup>56</sup>	0,9 eMV	—	—	0,40 · 10 <sup>-2</sup>	—	0,58 · 10 <sup>-2</sup>	Norling
Mg <sup>27</sup>	0,8 <sub>8</sub> eMV	0,82 · 10 <sup>-2</sup>	—	—	—	—	Gentner u. Maier-Leibnitz
Mn <sup>54</sup>	0,8 <sub>5</sub> eMV	0,68 · 10 <sup>-2</sup>	0,62 · 10 <sup>-2</sup>	—	—	0,82 · 10 <sup>-2</sup>	Maier-Leibnitz u. Gentner
Co (70 <sup>d</sup> )	0,6 eMV	0,60 · 10 <sup>-2</sup>	—	—	—	0,80 · 10 <sup>-2</sup>	Maier-Leibnitz u. Gentner
ThB	0,24 eMV	—	—	1,55 · 10 <sup>-3</sup>	—	—	v. Droste
Cp (163 <sup>h</sup> )	0,2 eMV	—	0,51 · 10 <sup>-3</sup>	—	0,81 · 10 <sup>-2</sup>	1,42 · 10 <sup>-2</sup>	Maier-Leibnitz
Co (270 <sup>d</sup> )	0,125 eMV	0,68 · 10 <sup>-4</sup>	0,33 · 10 <sup>-3</sup>	1,20 · 10 <sup>-3</sup>	0,78 · 10 <sup>-2</sup>	0,86 · 10 <sup>-2</sup>	Maier-Leibnitz u. Gentner
Cp (163 <sup>h</sup> ) Yb (33 <sup>d</sup> )	0,05 eMV	—	1,0 · 10 <sup>-3</sup>	—	1,5 <sub>0</sub> · 10 <sup>-2</sup>	1,0 <sub>0</sub> · 10 <sup>-2</sup>	Maier-Leibnitz

Tab. 1.

besten ein Bleizählrohr von 0,1 mm Wandstärke, außen mit Aluminium umgeben, dessen Empfindlichkeit nur in engen Grenzen schwankt. Bei sehr schwachen  $\gamma$ -Strahlungen von weniger als 1 eMV Energie kann man mit Hilfe einer einfachen Relativmessung mit einem Blei- und einem Aluminiumzählrohr die ungefähre Energie der  $\gamma$ -Strahlung bestimmen.

c) Die Kenntnis der absoluten Nachweiswahrscheinlichkeit macht viele Anwendungen möglich. Z. B. läßt sich bei Positronenstrahlern einfach entscheiden, ob außer der Vernichtungsstrahlung noch  $\gamma$ -Strahlung ausgesandt wird. Bei  $\beta$ -Umwandlung mit  $\gamma$ -Strahlung läßt sich entscheiden, ob die  $\gamma$ -Strahlung die erwartete Häufigkeit hat, oder ob es notwendig ist, mehrfache Übergänge oder andere Prozesse anzunehmen. Bei Koinzidenzmessungen zwischen  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen besteht jetzt die Möglichkeit, aus der Koinzidenzhäufigkeit pro  $\beta$ -Ausschlag die mittlere  $\gamma$ -Energie pro  $\beta$ -Strahl zu ermitteln. Man braucht dazu ein  $\gamma$ -Zählrohr, dessen Empfindlichkeit sich stark mit der Energie ändert, also am besten ein Aluminiumzählrohr.

d) Besonders zu erwähnen sind zwei Möglichkeiten, die sich aus den Empfindlichkeitskurven er-

geben. Das Bleizählrohr variiert im Bereich von 150 bis 1500 ekV nur wenig in der Empfindlichkeit. Man kann übersehen, daß die Unterschiede nur noch 10–15% vom Mittelwert abweichen werden, wenn man die Bleischicht von 0,1 mm auf 0,2 mm erhöht. In diesem Bereich hat man dann ein Zählrohr konstanter Empfindlichkeit. Ein Zählrohrschlag entspricht dem Durchgang von 100  $\gamma$ -Quanten durch das Zählvolumen, unabhängig von der  $\gamma$ -Energie.

Andererseits ist die Empfindlichkeit des Messingzählrohrs im Bereich 0,2 bis 3 eMV bis auf  $\pm 10\%$  proportional der  $\gamma$ -Energie. Man kann erwarten, daß dieser Bereich noch bis etwa 0,1 eMV ausgedehnt wird, wenn man statt 0,5 mm Messing 2 mm Messing verwendet. Ein solches Zählrohr mißt die durchgegangene  $\gamma$ -Energie. Ein Zählrohrschlag entspricht 175 eMV durch das Zählrohrvolumen gestrahlter Energie. Damit läßt sich z. B. bei  $\beta$ -Strahlern bei bekannter  $\beta$ -Strahlstärke die  $\gamma$ -Energie pro Zerfall unmittelbar angeben. Durch Kombination der Messung mit Blei- und Messingzählrohr ergibt sich die mittlere Energie einer  $\gamma$ -Strahlung, die sonst mit Zählrohren nicht gemessen werden kann.

## Die Phänomenologie zweier Verfahren zur Isotopentrennung

Von ALFRED KLEMM

Aus dem Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie, Tailfingen

(Z. Naturforschg. 1, 252–257 [1946]; eingegangen am 22. März 1946)

1. Wenn ein Isotopengemisch von  $x = 0$  aus, wo die Konzentrationen konstant gehalten werden, in den positiven Halbraum hineindiffundiert, dann kann man jenseits  $x$  ein Gemisch gewinnen, dessen Trennfaktor  $Q$  näherungsweise durch  $\ln Q = f \ln q$  gegeben ist, wo  $q = D_j/D_k$  und  $f = \ln(v^0/v)$ . Dabei sind  $v^0$  und  $v$  die Mengen pro Flächeneinheit, die 0 und  $x$  überschritten haben. 2. An der „wandernden Grenzfläche“ stromführender Salze entsteht eine Isotopenanreicherung, wenn die Wanderungsgeschwindigkeiten  $w_j$  und  $w_k$  der Isotope verschieden sind. Der Trennfaktor ist näherungsweise durch  $\ln Q = f \ln q$  gegeben, wo  $q = w_j/w_k$  und  $f = 2w^0t/\sqrt{\pi Dt}$ .  $w^0$  ist die mittlere Relativgeschwindigkeit von Kat- und Anionen. Die Anreicherung erstreckt sich bis zum Abstand  $\sqrt{\pi Dt}$  von der Grenzfläche.

Bei den meisten Verfahren zur Isotopentrennung erhält man wegen der Ähnlichkeit des Trennfaktors  $Q$  mit einer Potenz des Elementareffektes  $q$  und wegen der Kleinheit von  $q - 1$  eine gute Näherungsformel für  $Q$ , wenn man in der Entwicklung von  $\ln Q$  nach Potenzen von  $q - 1$  nur

das erste Glied berücksichtigt, wenn man also schreibt

$$\ln Q = \pm f \alpha. \quad (1)$$

Bei dieser Näherung ist es belanglos, ob  $\alpha$  gleich  $(q - 1)$  oder  $\ln q$  oder z. B.  $2(\sqrt{q} - 1)$  gesetzt wird. Der Elementareffekt  $q$  kann die Konstante