wobei P der Druck in Torr auf der Ionenquellenseite ist (der Druck am Ausgang des Kanals wird dagegen vernachlässigt). In unserem Fall ($l = 4$ mm, $d = 3$ mm, $T = 300^\circ\text{K}$, $M = 2$, $P = 5 \cdot 10^{-3}$ Torr) ergeben sich

$m = 3$ [mg/h] oder $1 \cdot 10^{21}$ Moleküle/h, dagegen transportiert der Ionenstrom von $700 \mu\text{A}$ $3600 \cdot 4,37 \cdot 10^{17}$ Teilchen/h (gerechnet wird mit einwertigen Ionen). Somit ist der Molekülwirkungsgrad etwa 1,8%.

Man sieht, daß die Ionenquelle die für Pendelquellen charakteristischen Werte von Elektronen- und Molekülwirkungsgrad aufweist, darüber hinaus aber den Vorteil hat, daß die Ionen als scharf fokussiertes Bündel die Quelle verlassen.

4. *Schluß.* Abschließend ist noch etwas über die Energiehomogenität der Ionen zu sagen. Vom Erzeugungsmechanismus her haftet den Ionen eine Energieunschärfe von etwa 300 V an, die sich durch Verminderung der Elektronenstoßspannung noch herabsetzen läßt. Die tatsächlich vorhandene Inhomogenität konnte noch nicht gemessen werden, ebenso nicht der Atomionenanteil, der für die Durchführung von Kernprozessen möglichst hoch sein soll. Diese Messungen werden an einer technisch verbesserten Konstruktion nachgeholt werden.

Herrn Prof. Walcher danke ich für anregende Diskussionen und die Bereitstellung von Institutsmitteln zur Durchführung dieser Arbeit.

Über die Einsatzspannung von Zählrohren*

Von KARL HEINZ LAUTERJUNG

Aus dem Physikalischen Institut der Universität Köln

(Z. Naturforschg. 7 a, 344–351 [1952]; eingegangen am 31. Dezember 1951)

Für den Auslösbereich des Geiger-Müller-Zählrohres wird eine Formel abgeleitet, die den funktionellen Zusammenhang zwischen Einsatzspannung V_E , Mantelradius r_a , Drahradius r_i , Gesamtfülldruck p und (bei selbstlöschenden Zählrohren) prozentualen Dampfgehalt % enthält:

$$\frac{V_E \ln(r_a/r_i)}{p r_i (a + d \%)} = \frac{b}{V_E / \ln(r_a/r_i)}.$$

a , b , d sind für das Gas bzw. Gas-Dampf-Gemisch charakteristische Konstanten. Sie werden für einige gebräuchliche Gase und Dämpfe aus experimentellen Werten berechnet und zur Aufstellung von Nomogrammen benutzt. An einem Beispiel wird der Vorzug der hier abgeleiteten Formel gegenüber zwei anderen bisher in der Literatur gebräuchlichen gezeigt.

Bei der Verwendung von Zählrohren ist es manchmal wünschenswert, den funktionellen Zusammenhang zwischen Mantelradius, Drahradius, Fülldruck und Einsatzspannung zu kennen. Im folgenden ist dieser Zusammenhang für fremdgelöschte und für selbstlöschende Zählrohre untersucht worden. Die theoretische Betrachtung schließt an die Überlegungen von Wilkinson¹ an.

1. Fremdgelöschte Zählrohre

Wenn die Ionisierungszahl α die Zahl der neu gebildeten Elektronen je cm Weglänge in Feldrich-

tung angibt, die von einem Elektron durch Stoß erzeugt werden, dann ist der von n Elektronen auf der Strecke dr in Feldrichtung hervorgerufene Zuwachs dn gegeben durch

$$dn = n \alpha dr. \quad (1)$$

Gl. (1) ist das Bildungsgesetz der Elektronenlawine. In dem hier verwendeten Druckbereich wird nun mit Wilkinson¹ ein linearer Zusammenhang zwischen α und E angenommen:

$$\alpha = KE. \quad (2)$$

* Vorgetragen auf der Tagung des Verbandes der Deutschen Physikalischen Gesellschaften in Karlsruhe am 23. September 1951.

¹ D. H. Wilkinson, Physic. Rev. 74, 1417 [1948].

Dabei ist

$$E = \frac{V}{r \ln(r_a/r_i)}$$

die Feldstärke im Zylinderkondensator des Zählrohres. Die Gesamtzahl der Elektronen einer Lawine auf der Strecke r bis r_i wird dann

$$n = n_0 \cdot \exp\left(K \frac{V}{\ln(r_a/r_i)} \int_{r_i}^r \frac{1}{r} dr\right). \quad (3)$$

Ist $r_{\min}$ die Entfernung, bei der erstmalig die Lawinenbildung einsetzt, und V_E die Einsatzspannung für den Auslösebereich, so enthält diese erste Lawine

$$n_1 = \exp\left(K \frac{V_E}{\ln(r_a/r_i)} \int_{r_i}^{r_{\min}} \frac{1}{r} dr\right) = \left(\frac{r_{\min}}{r_i}\right)^K \frac{V_E}{\ln(r_a/r_i)} \quad (4)$$

Elektronen. Nun gilt im Zählrohr

$$\frac{V_E}{V_\pi} = \frac{r_{\min}}{r_i}, \quad (5)$$

wo V_π die Einsatzspannung für den Proportionalbereich ist. Damit und mit der Abkürzung

$$b = \frac{\log n_1}{K} \quad (6)$$

erhält man aus Gl. (4)

$$\log \frac{V_E}{V_\pi} = b \frac{1}{V_E/\ln(r_a/r_i)}. \quad (7)$$

Aus der im Zählrohr geltenden Beziehung

$$\frac{V_\pi}{r_i \ln(r_a/r_i)} = \frac{V_I}{\lambda_e^p} \quad (8)$$

und wegen

$$\lambda_e^p = \sqrt[3]{32} \cdot \frac{760}{p} \cdot \lambda_g^{760} \quad (9)$$

(V_I = Ionisierungsspannung des Füllgases, λ_e^p = freie Elektronenweglänge im Gas beim Fülldruck p [Torr], λ_g^{760} = freie Weglänge beim Druck 760 Torr) folgt mit der Abkürzung

$$a = \frac{V_I}{\sqrt[3]{32} \cdot \lambda_g^{760} \cdot 760} : \quad (10)$$

$$V_\pi = a p r_i \ln(r_a/r_i). \quad (11)$$

Mit Gl. (11) wird schließlich Gl. (7):

$$\log \frac{V_E/\ln(r_a/r_i)}{a p r_i} = b \frac{1}{V_E/\ln(r_a/r_i)}. \quad (12)$$

Abb. 1. Gl. (14) auf verschiedene Füllgase angewendet.

	r_a cm	r_i cm	Literatur
•	0,5	0,0125	Haines ²
+	0,5	0,00625	Haines ²
○	0,5	0,00375	Haines ²
□	0,5	0,005	Werner ³
▽	2,5	0,01	Trost ⁴

Gl. (12) liefert den gewünschten funktionellen Zusammenhang zwischen Mantelradius, Drahtradius, Fülldruck und Einsatzspannung.

Die experimentelle Bestätigung der Gl. (12) geschah durch die den Arbeiten verschiedener Autoren^{2, 3, 4} entnommenen Werte für r_a , r_i , p und V_E . Wird als neue Variable die „normierte“ Einsatzspannung

$$V_n = V_E / \ln(r_a/r_i) \quad (13)$$

eingeführt und werden experimentell bestimmte Werte $\log \frac{V_n}{p r_i}$ gegen $1/V_n$ aufgetragen, dann sollten die Meßpunkte auf Geraden von der Form

$$\log \frac{V_n}{p r_i} = b \frac{1}{V_n} + \log a \quad (14)$$

liegen. Wie Abb. 1 zeigt, ist das der Fall. In Tab. 1 sind die aus diesen Geraden bestimmten Werte der Konstanten a (Schnittpunkt der Geraden mit der Ordinatenachse) und b (Steigung der Geraden) zusammengestellt.

2. Selbstlöschende Zählrohre

Die selbstlöschenden Zählrohre sind durch die Beimischung eines geeigneten Füllampfes zum

Füllgas charakterisiert. Art und Partialdruck des Füllampfes beeinflussen die Einsatzspannung.

Bei Füllung mit einem Gas und einem Dampf ersetzen wir in den obigen Formeln für ein Gas $a p$ versuchsweise durch

$$a p_G + c p_D = p(a + d \cdot \%), \quad (15)$$

wo

$$p = p_G + p_D, \quad d = \frac{c - a}{100} \text{ und } \% = \frac{100 \cdot p_D}{p}.$$

Statt Gl. (12) und (14) erhält man dann

$$\log \frac{V_E / \ln(r_a/r_i)}{p(a + d \cdot \%) r_i} = b \frac{1}{V_E / \ln(r_a/r_i)} \quad (16)$$

und

$$\log \frac{V_n}{p r_i} = b \frac{1}{V_n} + \log(a + d \cdot \%). \quad (17)$$

Zur experimentellen Bestätigung der Gl. (16) und zur Bestimmung der in ihr enthaltenen Konstanten a, b, d wurde für ein Argon-Methylal-Gemisch die Einsatzspannung V_E in Abhängigkeit vom Gesamtfülldruck p für die prozentualen Dampfanteile $\% = 2,5, 12, 48$ bei den Drahtradien $r_i = 0,05; 0,075; 0,1; 0,15$ mm und den Mantelradien $r_a = 6; 11; 18$ mm gemessen*. Als Kathodenmaterial wurde Messingrohr von 1 mm Wandstärke benutzt. Sämt-

² C. L. Haines, Rev. Sci. Instruments **7**, 411 [1936].

³ S. Werner, Z. Physik **92**, 705 [1934].

⁴ A. Trost, Z. Physik **105**, 399 [1937].

* Die Messungen wurden von den Herren cand.

phys. M. Krüger und K. Steiger in dankenswerter Weise durchgeführt.

⁵ K. H. Lauterjung, Z. Naturforschg. **6a**, 333 [1951].

Abb. 2. Abhängigkeit der Einsatzspannung V_E eines Argon-Methylal-Zählrohrs vom Gesamtfülldruck p für den Drahtradius $r_i = 0,15$ mm. Parameter: prozentualer Dampfgehalt $\%$ und Mantelradius r_a .

Gas	p Torr	r_a cm	r_i 10^{-3} cm	a Volt · Torr $^{-1}$ · cm $^{-1}$	b Volt 2 · Torr $^{-1}$ · cm $^{-1}$	Literatur
H ₂	5,5—124	0,5	3,75—12,5	90	118,5	(2), (3)
He	13,1— 58,2	0,5	3,75—12,5	170	128	(2)
N ₂	8,5— 55	0,5	5,0	55	199	(3)
O ₂	12,5— 52	0,5	5,0	130	217	(3)
A	15,8—528	0,5	3,75—12,5	60	107	(2), (4)
		2,5				

Tab. 1. Fremdgelöschte Zählrohre.

liche Zählrohre, deren effektive Länge 27 cm betrug, wurden gemeinsam gefüllt und standen während der Messungen untereinander in Verbindung. Das verwendete Argon enthielt laut Werksanalyse 98% Argon und 2% Stickstoff (O₂-Gehalt geringer als 0,1%). Das Methylal wurde zum Entzug von etwa vorhandenem Wasser mit geglühtem Kupfersulfat versetzt. V_E wurde mit einem geeichten Plateaugraphen⁵ bestimmt.

In Abb. 2 ist die Abhängigkeit der Einsatzspannung V_E vom Gesamtfülldruck p (mit dem prozentualen Dampfgehalt % und dem Mantelradius r_a als Parameter) für den Drahradius $r_i = 0,15$ mm aufgetragen. Insgesamt lagen 36 solcher Kurven vor. Die drei Kurvenscharen der Abb. 2 lassen sich in einer einzigen zusammenfassen (Abb. 3), wenn

statt V_E die normierte Einsatzspannung V_n der Gl. (13) benutzt wird.

In Abb. 4 ist für sämtliche Meßpunkte gemäß Gl. (17) $\log \frac{V_n}{p r_i}$ gegen $1/V_n$ aufgetragen. Das liefert für die drei Prozentgehalte Geraden gleicher Steigung. Demnach ist in dem hier untersuchten Bereich des prozentualen Dampfgehalts b eine charakteristische Konstante für das Argon-Methylal-Gemisch. Ihr Wert wird zu

$$b = 152 \text{ Volt}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$$

bestimmt. Der Numerus des Ordinatenwertes für $1/V_n = 0$ ist gemäß Gl. (17) $a + d\%$. Trägt man ihn für die drei Prozentgehalte gegen % auf (Abb. 5), so erhält man eine Gerade, aus der die Kon-

Abb. 3. Abhängigkeit der normierten Einsatzspannung V_n eines Argon-Methylal-Zählrohrs vom Gesamtfülldruck p für den Drahradius $r_i = 0,15$ mm. Parameter: prozentualer Dampfgehalt %.

Abb. 4. $\log \frac{V_n}{p r_i} = f\left(\frac{1}{V_n}\right)$

für ein Argon-Methylal-Zählrohr.

Abb. 5. Gerade zur Bestimmung der Konstanten a und d der Gl. (17) für ein Argon-Methylal-Zählrohr.

stanten a (Schnittpunkt mit der Ordinatenachse) und d (Steigung der Geraden) bestimmt werden zu

$$a = 11 \text{ Volt} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$$

$$d = 3,0 \text{ Volt} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}.$$

Die ursprünglich vorliegenden 36 Kurven für die Einsatzspannung als Funktion des Fülldrucks lassen sich nun durch die Gl. (16) in einer einzigen zusammenfassen, wenn mit den oben bestimmten Konstanten a und d V_n gegen $p r_i (a + d\%)$ aufgetragen wird. Wie Abb. 6 zeigt, liegen sämtliche Meßpunkte innerhalb der Meßgenauigkeit auf einer Kurve. Damit dürfte der eingangs gemachte Ansatz für die Füllung mit einem Gas und einem Dampf berechtigt sein.

Außer an Argon-Methylal-Zählrohren wurden die Messungen noch an Zählrohren mit Argon-Äthylalkohol- und Argon-Aceton-Füllungen durchgeführt. In Tab. 2 sind die aus den experimentellen Daten gewonnenen Werte der Konstanten a , b , c , d zusammen mit den Gültigkeitsbereichen der Variablen r_a , r_i , p , $\%$ aufgeführt.

Vergleich der Formeln für die Einsatzspannung

Die oben abgeleitete Formel für die Einsatzspannung werde hinsichtlich ihres Anwendungsbereichs mit den beiden bisher in der Literatur gebräuchlichen verglichen. Von Werner⁶ wurde eine Formel angegeben:

Abb. 6. Die normierte Einsatzspannung V_n eines Argon-Methylal-Zählrohrs, aufgetragen gegen das Produkt $p r_i \cdot (a + d\%)$, r_i in mm.

⁶ S. Werner, Z. Physik **90**, 384 [1934].

Gas	Dampf	p Torr	%	r_a 10^{-1} cm	r_i 10^{-3} cm	a Volt $\cdot \text{Torr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$	b Volt ² $\cdot \text{Torr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$	c Volt $\cdot \text{Torr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$	d Volt $\cdot \text{Torr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$
A	Methylal	7,5	2,5	6	5	11	152	311	3,00
		—	—	—	—				
		270	48	18	15				
A	Äthylalkohol	8	3	6	5	16,5	164	232,5	2,16
		—	—	—	—				
		310	48	18	15				
A	Aceton	10	5	6	5	25	147	413	3,88
		—	—	—	—				
		157	48	18	15				

Tab. 2. Selbstgelöschte Zählrohre.

$$V_E = \frac{U \cdot \ln r_a / r_i}{\ln \left(1 + \frac{k n}{p r_i} \right)}, \quad (18)$$

mit k der freien Elektronenweglänge beim Druck 1 Torr, U dem Spannungsabfall (vom Draht aus gerechnet) im Abstand von n freien Elektronenweglängen. Die Wernersche Formel gilt für fremdgelöschte Zählrohre. Für niedrige Drücke und niedrigen prozentualen Dampfgehalt gilt sie auch bei selbstlöschenden Zählrohren.

Von Trost⁴ wurde eine andere Formel angegeben:

$$V_E = (p r_i + k n) \varepsilon_{\min} \ln (r_a / r_i). \quad (19)$$

mit k der freien Elektronenweglänge beim Druck 1 Torr, $\varepsilon_{\min}$ der Minimalfeldstärke im Abstand von n freien Elektronenweglängen vom Draht beim Druck 1 Torr. Die Trostsche Formel liefert einen linearen Zusammenhang zwischen Einsatzspannung und Fülldruck. Bei dem bekannten Kurvenverlauf

Abb. 7. Vergleich der Formeln für die Einsatzspannung.

- Meßpunkte nach Trost⁴,
- Kurve nach Gl. (18) Werner,
- - - - Kurve nach Gl. (19) Trost,
- Kurve nach Gl. (16).

gilt sie demnach im Bereich höherer Drücke und größerer prozentualer Dampfgehalte.

Im folgenden werden die beiden Formeln (18) und (19) mit der oben abgeleiteten (16) verglichen, indem Meßwerte von Trost⁴ zugrunde gelegt werden. Sie sind an einem Zählrohr von $r_a = 25$ mm, $r_i = 0,1$ mm mit einer Füllung von 5% Äthylalkohol und 95% Argon im Bereich von 10 Torr bis 600 Torr bzw. $V_E = 500$ Volt bis 2833 Volt gewonnen. In Abb. 7 sind die Trostschen Meßwerte eingetragen. Die Werte der Konstanten in Gl. (18) wurden mit Hilfe der Meßpunkte für $p = 20$ bzw. 100 Torr bestimmt zu

$$U = 350 \text{ Volt}$$

$$kn = 48 \text{ mm} \cdot \text{Torr.}$$

Mit diesen Werten ist in Abb. 7 (gepunktete Kurve) die Wernersche Formel eingetragen. Die Konstanten der Gl. (19) wurden aus der Trostschen Arbeit (4) berechnet zu

$$\epsilon_{\min} = 62,6 \text{ Volt} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$$

$$kn = 22,3 \text{ mm Torr.}$$

Mit diesen Werten ist in Abb. 7 (gestrichelte Kurve) die Trostsche Formel eingetragen. Die Konstanten der Gl. (16) wurden aus den Trostschen Meßwerten bestimmt zu

$$r_i (a + d\%) = 0,513 \text{ Volt} \cdot \text{Torr}^{-1}$$

$$b = 114,5 \text{ Volt}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}.$$

Mit diesen Werten ist in Abb. 7 (ausgezogene Kurve) die Formel Gl. (16) eingetragen.

Abb. 8. Nomogramm für die Einsatzspannung fremdgelöschter Zählrohre mit Füllungen von H_2 , He, N_2 , O_2 , A.

Abb. 9. Nomogramm für die Einsatzspannung selbstlöschender Zählrohre mit Argon-Methylal-Füllung.

Während die Wernersche Formel (18) nur im Bereich niedriger Drucke ($p < 100$ Torr) und die Trostsche Formel (19) nur im Bereich hoher Drucke ($p \geq 100$ Torr) gilt, gibt die Formel (16) die Einsatzspannung als Funktion des Druckes im gesamten untersuchten Bereich richtig an. Ein weiterer Vorzug der Gl. (16) liegt darin, daß ihre Konstanten a , b , d für den gesamten untersuchten Bereich des prozentualen Dampfanteils Gültigkeit haben; während sich die Größen U und kn der Gl. (18) und $\varepsilon_{\min}$, kn der Gl. (19) mit dem prozentualen Dampfanteil ändern.

Nomogramme zur Einsatzspannung

Im Hinblick auf die praktische Anwendung der oben abgeleiteten Formeln für die Einsatzspannung Gl. (12) bzw. Gl. (16) ist der funktionelle Zusammenhang zwischen Einsatzspannung, Mantelradius, Drahradius, Gesamtfülldruck, prozentualen Dampfgehalt (bei selbstlöschenden Zählrohren) in Form von Nomogrammen dargestellt.

1. *Fremdgelöschte Zählrohre.* Das Nomogramm für fremdgelöschte Zählrohre mit Füllungen von H_2 , He, N_2 , O_2 , A (Abb. 8) besteht aus drei Teilnomogrammen. Soll z. B. bei vorliegendem r_a , r_i , p die Einsatzspannung V_E bestimmt werden, dann wird aus dem linken Teilnomogramm $\ln(r_a/r_i)$, aus dem mittleren V_n abgelesen und mit diesen beiden Werten in das rechte Teilnomogramm gegangen.

2. *Selbstlöschende Zählrohre.* Entsprechend ist das Nomogramm für selbstlöschende Zählrohre aufgebaut; nur daß hier noch die %-Achse für den Dampf hinzukommt. In Abb. 9 ist das Nomogramm für Argon-Methylal-Zählrohre gezeichnet.

Wie ersichtlich sind das linke und das rechte Teilnomogramm unabhängig von Füllgas bzw. Füllampf. Im mittleren Teilnomogramm sind nur die %- und die V_n -Achse charakteristisch für das Gas-Dampf-Gemisch. Infolgedessen lassen sich die entsprechenden Nomogramme für die anderen Gemische leicht aufstellen, indem mit den Konstanten der Tab. 2 die %- und die V_n -Achse im mittleren Teilnomogramm neu berechnet werden.

Zur Frage der Röntgendosimetrie mit Festkörpern

Von I. BROSER, H. OESER und R. WARMINSKY

Aus dem Kaiser-Wilhelm-Institut für physikalische Chemie und Elektrochemie, Berlin-Dahlem, und dem Strahleninstitut der Freien Universität, Berlin

(Z. Naturforschg. **7a**, 351–360 [1952]; eingegangen am 31. Dezember 1951)

Eine Reihe von Festkörpern wird bezüglich ihrer Eignung zur Dosimetrie von Röntgenstrahlen untersucht. Lumineszenz und Leitfähigkeit sind im allg. — im Gegensatz zur Schwärzung der Photoplatte — der absorbierten Strahlungsenergie proportional und können bei gleicher Strahlenzusammensetzung als Maß für die Strahlenintensität gelten. Die Wellenlängenabhängigkeit der Absorption (und damit von Lumineszenz und Leitfähigkeit) jedoch hängt stark von der effektiven Ordnungszahl ab. Besonders die anorganischen Stoffe unterscheiden sich in der Wellenlängenabhängigkeit erheblich von dem Verhalten einer Luftionisationskammer. Unter den organischen Leuchtstoffen lassen sich Substanzen auswählen, deren effektive Ordnungszahl der Luft sehr nahe kommt und deren Lumineszenz daher einen ähnlichen Verlauf wie der Strom einer Luftkammer aufweist.

Während also anorganische Substanzen ihrer hohen Lichtausbeute oder hohen Photoempfindlichkeit wegen gut zum qualitativen Nachweis von Röntgenstrahlen brauchbar erscheinen, sind organische Leuchtstoffe mit einer luftäquivalenten Ordnungszahl (in Verbindung mit empfindlichen Sekundärelektronen-Vervielfachern) durchaus für genaue Dosisbestimmungen geeignet und in vieler Beziehung einer Luftkammer überlegen. Durch Wahl von Leuchtstoffen bestimmter effektiver Ordnungszahl kann ferner die ionisierende Wirkung der Röntgenstrahlung in jeder beliebigen Substanz (beispielsweise Knochen, Fett) bestimmt werden.

Gewisse Festkörper, deren Absorptionsvermögen so hoch ist, daß sie die gesamte Strahlung absorbieren, eignen sich gut zur Messung der Gesamtintensität von Röntgenstrahlen.