Funkschau 1986 Heft 21

Das Messen radioaktiver Strahlung

Mit freundlicher Genehmigung der Funkschau-Readktion **www.funkschau.de**

Grundlagen:

Das Messen radioaktiver Strahlung

Physikalische Erläuterungen zur Bauanleitung auf Seite 63

Das große Interesse an der Sonderbeilage „Geiger-Müller-Zähler“ aus Heft 12 hat uns veranlaßt, in diesem Heft nochmals eine Bauanleitung für ein Radioaktivitäts-Meßgerät zu veröffentlichen, das jedoch keines der derzeit so raren Zählrohre benötigt. Um die damit meßbaren Werte in ihrer Bedeutung besser abschätzen zu können, zeigen wir die elektrischen und physikalischen Zusammenhänge auf.

Es werden auf den Seiten 63 bis 69 zwei Varianten eines Radioaktivitäts-Meßgerätes für den Nachbau beschrieben. Sie sind sowohl äußerlich als auch in der Bedienung gleich und enthalten auch die gleiche Baugruppe zur Auswertung und Anzeige des Meßwertes. Verschieden sind jedoch die Baugruppen mit der Meßelektronik und der Spannungsversorgung, denn die eine Variante ist mit einem Geiger-Müller-Zählrohr als Radioaktivitäts-Detektor bestückt und die andere verwendet Pindioden.

Die Entscheidung für das eine oder andere Meßprinzip kann anhand der technischen Daten in *Tabelle 1* getroffen werden. Weil der Halbleiter-Strahlungsdetektor aber nicht nur vom Preis her interessant ist, werden hier in der theoretischen Abhandlung die für diese Geräteauslegung wichtigen physikalischen Eigenschaften sowie die typische signalverarbeitende Elektronik beider Detektorfamilien einander gegenübergestellt.

Um überhaupt aussagekräftige Messungen durchführen und auswerten zu können, sind Kenntnisse über die verschiedenen Arten radioaktiver Strahlung, deren Wirkungen, Abschirmmöglichkeiten und über die gängigen Maßeinheiten beim Strahlenschutz unumgänglich.

Definitionen radioaktiver Strahlungsmessung

Die *Aktivität* einer Quelle (ein Stück Uranerz oder ein kontaminiertes Salatblatt) ist die Zahl der zerfallenden Atomkerne pro Sekunde, die Einheit ist 1 Bq (*Becquerel*), die Dimension 1/s. Die alte Einheit war 1 Ci (Curie) = $3{,}7 \cdot 10^{10}\ s^{-1}$. Umrechnung: 1 µCi = 37 kBq). Die ermittelte Aktivität enthält keine Aussage über Art und Energie der ausgesandten Strahlung. Die Hälfte aller radioaktiven Atomkerne ist nach Ablauf der Halbwertszeit zerfallen.

Ein in der Nähe stehendes Strahlungsmeßgerät registriert nur den in seinen Raumwinkel fallenden Strahlungsanteil, abhängig von der Art der Strahlung und den Detektoreigenschaften. Entweder zeigt es die in der Meßzeit gezählten *Impulszahlen N* an oder es gibt die *Zählraten Ṅ*, also Mittelwerte pro Sekunde, wieder.

Wichtig ist die von einem Körper absorbierte Energie (die Schaden anrichten kann), also die *Strahlendosis*. Das geeichte Meßgerät zeigt dann die *Energiedosis* an, mit der Einheit 1 J/kg oder 1 Gy (*Gray*). Die alte Einheit war 1 rad = 0,01 Gy.

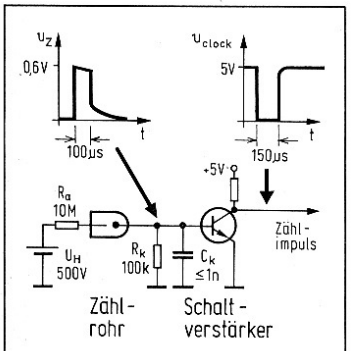
Medizinisch-biologisch wichtig ist aber die Wirksamkeit der einzelnen Strahlenarten. Wenn sie mit einem

Tabelle 1: Technische Daten von Geiger- und Diodenzählern

gemeinsam:	Meßbereiche: 1...19 999 Impulse 0,10...199,99 Milliröntgen pro Stunde Anzeige: LCD, 4½stellig, 8 mm Ziffernhöhe akustisches Signal: klassisches Geigerzähler-Ticken Anschlußbuchse (Stereo-Klinke 3,5 mm ∅) für Akkuladung, externen Zähler und Stummschalten des Tickers Betriebsspannung: Funktionsbereich = 0,9...2 V eingebaut: NiCd-Knopfzelle, 225 mAh zusätzlich empfohlen: 5 Solarzellen 1 × 2 cm² für 20...40 mA Ladestrom bei Sonne Maße: 100 × 50 × 25 mm³, spritzwasserdichtes Gehäuse Gewicht: 135 g		
verschieden:		Geigerzähler	Diodenzähler
Spannungswandler (bei U_s = 1,0...1,7 V)		500 V ± 3 % und 5 V ± 5 %	5 V ± 2 % und 23 V ± 5 %
Betriebsdauer pro Akkuladung		12 Stunden	18 Stunden
Nachweisempfindlichkeit für γ (^{60}Co)		20 Impulse/s je mR/h	4 Impulse/s je mR/h
meßbare Strahlung		β, γ mit ZP 1400 α, β, γ mit ZP 1401	γ und energiereiche β mit 6 × BPW 34
Materialkosten		180 bis 280 DM, je nach Zählrohrpreis	140 DM

Bewertungsfaktor q versehen werden, erhält man die heute in der Strahlenmedizin gebräuchliche *Äquivalentdosis*, mit der Einheit 1 Sv (*Sievert*) = 1 Gy × q. Dabei ist q = 1 bei β- und γ-Strahlung, bei Teilchenstrahlung (α) liegt q je nach Art und Energie zwischen 2 und 10. Die alte, noch häufig genannte Einheit war 1 rem (roentgen equivalent man) = 1 rad × q.

Die Energiedosis ist meist nicht direkt meßbar. Die üblichen Detektoren (Sonden) in den Strahlenmeßgeräten messen deshalb die Ionisationswirkung der einfallenden Strahlung, also die *Ionendosis* mit der Einheit 1 C/kg

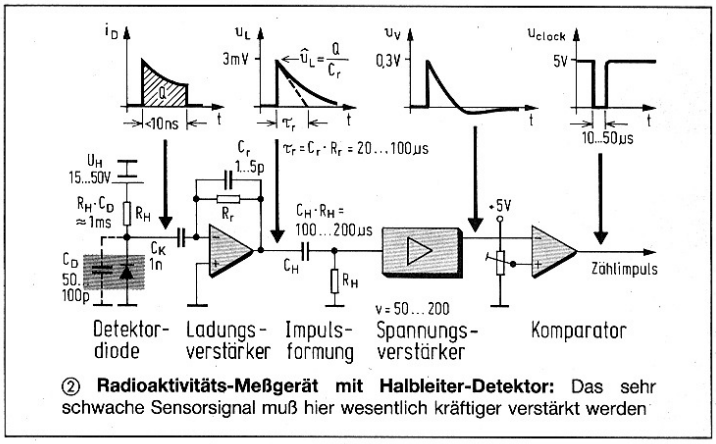


① **Geiger-Müller-Zähler:** Das Zählrohr löst relativ starke und lang dauernde Spannungsimpulse aus, die sich gut weiterverarbeiten lassen

(Coulomb pro kg). Die alte Einheit war 1 R (Röntgen) = 2,58 · 10^{-4} C/kg = 0,84 rad, oft ≈ 1 rad gesetzt. Zur bequemeren Rechnung ist definiert worden: 1 Sv = 100 R (bzw. 1 Gy = 100 R bei q = 1). Neuere Meßgeräte sind in Sv geeicht.

In vielen Fällen mißt man statt der tatsächlich absorbierten Energie (dann ist vielleicht schon ein Schaden eingetreten) die Energie pro s, also die Dosisrate oder die *Dosisleistung*. Diese Dosisleistungsmeßgeräte sind dann geeicht in *Sv/h* (oder häufig noch in mrem/h). Bezieht man sich auf die Ionendosis, läßt sich auch die *Ionendosisleistung* in C/(kg s) oder mR/h angeben (Milliröntgen pro Stunde, nicht mit mrem verwechseln).

Alle wichtigen Maßeinheiten für radioaktive Strahlung sowie ihre Umrechung sind der *Tabelle 2* zu entnehmen.

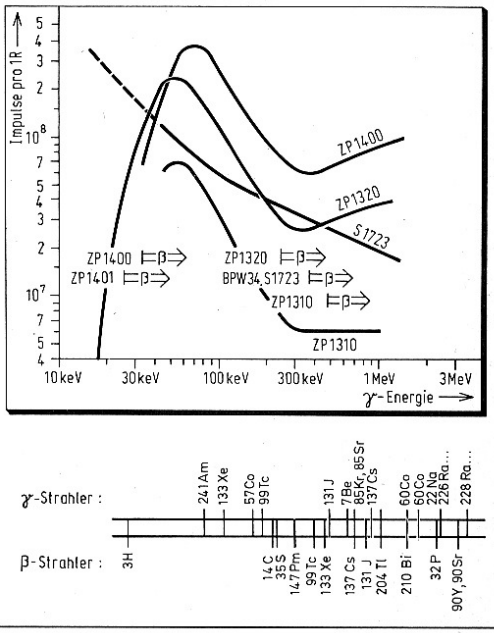


② **Radioaktivitäts-Meßgerät mit Halbleiter-Detektor:** Das sehr schwache Sensorsignal muß hier wesentlich kräftiger verstärkt werden

Zwei Meßverfahren

Das Herz jedes Gerätes ist der eigentliche Detektor, der pro registriertem Teilchen oder Quant eine Ladung abgibt. Radioaktive Strahlung ionisiert das Material (Gas, Szintillationskristall, Halbleiter), sei es, daß ihre Teilchen (durch dünne Fenster) eindringen, sei es, daß ihre γ-Quanten im Innern des Zählrohres Elektronen auslösen.

Steigt die Ladungsmenge mit der absorbierten Energie, spricht man von

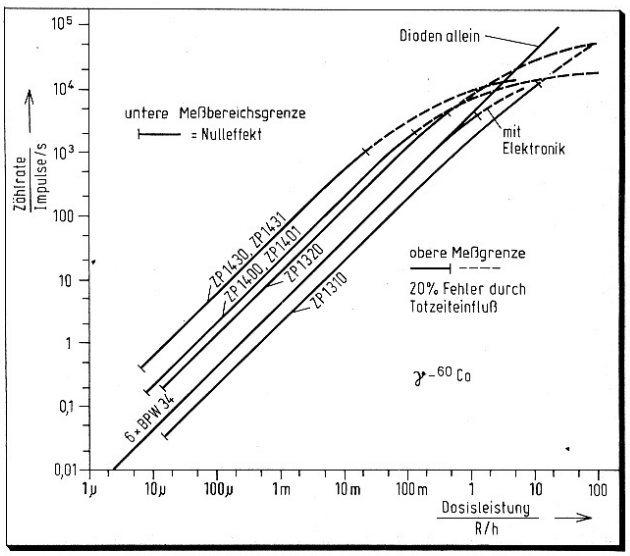


③ **Kennlinie verschiedener Sensoren:** Diese Kurven ergeben sich in Abhängigkeit von der γ-Quanten-Energie. Eingetragen sind weiterhin die 1%-Nachweisschwelle für β-Teilchen sowie häufig vorkommende γ- und β-Strahler

Proportionaldetektoren. Hierzu gehören alle *Halbleiter* und viele Szintillationsdetektoren; es gibt auch Proportionalzählrohre. Dagegen ist das bekannte *Geiger-Müller-Zählrohr* ein sogenannter *Auslösezähler*, vergleichbar mit einem Monoflop, das, einmal erregt, ein definiertes Signal abgibt.

Die Meßgeräte arbeiten dann nach einem der folgenden beiden Meßverfahren:

- Die einfacheren Geräte zählen alles, was den Detektor ansprechen läßt, ohne Rücksicht auf Energie und Art der Strahlung: Man hört das Ticken, zählt Impulse (meist pro s) oder integriert sie elektronisch zu einem Zeigerausschlag (Mittelwertmessung, Rate-Meter). Der Detektor ist meist ein GM-Zählrohr. Die Eichung wird in Imp/s oder in Sv/h (mrem/h) vorgenommen (sogenannte Dosisleistungsmesser). Manche Geräte können während einer bestimmten Meßzeit aufaddieren (Dosismesser, dazu gehört auch das Taschendosimeter, ein aufgeladenes Fadenelektrometer).
  Der Begriff Zähler wird nur für komplette Meßgeräte verwendet, im Gegensatz zum „GM-Zählrohr".
- Die zweite Gruppe unterscheidet noch die Energien der einfallenden Strahlung: Mit ihnen läßt sich das Energiespektrum aufnehmen. Diese Gammaspektrometer sortieren die Energien der verschiedenen Strahler, es sind jedoch aufwendige Geräte, sie werden wegen ihrer selektiven Meßmöglichkeit Vielkanal-Analysatoren genannt, dazu nötig.



④ **Meßbereiche für verschiedene Sensoren:** Die preisgünstigen Zählrohre ZP 1400 und ZP 1401 können sich im Vergleich mit dem teuren Zählrohr ZP 1430 sehen lassen

Gammastrahlung ist – ebenso wie Röntgenstrahlung – elektromagnetische Wellenstrahlung. Je nach Gerät wird im angegebenen Energiebereich eine Zählrate oder die Dosisleistung am Ort des Detektors angezeigt. Ist

Tabelle 2: Die wichtigsten Einheiten für Radioaktivitäts-Messungen und ihre Umrechnung

Einheit	Abkürzung	Dimension	Aussage	Umrechnung	Gebrauch
Becquerel	Bq	$1/s = s^{-1}$	Anzahl der zerfallenden Kerne pro s Aktivität	$1\ Bq = 1\ s^{-1} = 2{,}7\ pCi$	neu
Curie	Ci	$1/s = s^{-1}$	Anzahl der zerfallenden Kerne pro s Aktivität	$1\ Ci = 3{,}7 \times 10^{10}\ s^{-1} = 3{,}7 \times 10^{10}\ Bq$	alt
Gray	Gy	J/kg	Energiedosis Strahlendosis	1 Gy = 100 rad = 1 Sv/q = 100 rem/q = 84 R	neu
Sievert	Sv	J/kg	Äquivalentdosis	1 Sv = 1 Gy × q = 100 rad × q = 100 rem	neu
radiation absorbed dose	rad	J/kg	Energiedosis Strahlendosis	1 rad = 0,01 Gy = 0,01 Sv/q = 1 rem/q = 1,2 R	alt
roentgen equivalent man	rem	J/kg	Äquivalentdosis	1 rem = 1 rad × q = 0,01 Gy × q = 0,01 Sv = 1,2 R × q	alt
Röntgen	R	C/kg	Ionendosis	$1\ R = 2{,}58 \times 10^{-4}\ C/kg = 0{,}84$ rad = 0,012 Gy = 0,012 Sv/q = 0,84 rem/q	alt
—	q	—	Bewertungsfaktor (β- und γ-Strahlung: q = 1; α-Strahlung: q = 2...10)	—	neu

Tabelle 3: Detektor-Kennwerte

	Zählrohr	Si-Pindiode
Ansprechschwelle für γ-Quanten	20 keV	0,2 keV
innere Lawinenverstärkung	10^6	1
freigesetzte Ladung pro Teilchen	$5 \cdot 10^{-9}$ As	$5 \cdot 10^{-14}$ As/MeV
entnehmbarer Spannungsimpuls	3 V an 100 kΩ	100 µV an 100 pF

Tabelle 4: Als Strahlungsdetektor geeignete Fotodioden

	6 × BPW34	2 × BPY12	S 1723
Preis	30 DM	90 DM	160 DM
Strahlungsempfindliche Fläche A	45 mm²	40 mm²	100 mm²
Sperrschichtweite d	70 µm	75 µm	100 µm
Kapazität C_D	65 pF	55 pF	80 pF
gemessene Impulshäufigkeit pro Minute mit Radium-Leuchtfarbe	570	1040	1500
geeignet für die Strahlenarten	(β), γ	α, β, γ	(β), γ
Weitere gemeinsame Daten: U_H = 20 V, C_r = 0, v_u = 100, Rauschpegel ≈ 120 mV_{ss}, Impulsamplitude ≈ 300 mV Auswahlkriterien sind: Großes Zählvolumen A × d für große Zählrate, kleine Kapazität $C_D = \varepsilon \times A/d$ für große Impulsamplitude und geringen Rauschpegel, also muß d so groß wie möglich sein: Pin-Struktur			

Tabelle 5: Daten zur Dosisleistungsmessung

Detektor	Empfindlichkeit Imp./s je mR/h	Zählzeit für 1 mR/h → 100 Imp.	maximale Totzeit
ZP 1400, ZP 1401	20	5 s	90 µs
ZP 1320	13	7,5 s	45 µs
6 × BPW 34	4	25 s	↓
S 1723	10	10 s	50 µs*)
ZP 1310	2	50 s	15 µs
ZP 1430, ZP 1431	55	1,8 s	190 µs

*) elektronisch bedingt, abhängig von C_r, R_r, C_H und R_H (Bild 2)

die Empfindlichkeit (das Ansprechvermögen) bekannt, kann aus dem Abstand zur Quelle deren Aktivität (in Bq) berechnet werden. Über die Zusammensetzung und Schädlichkeit der Strahlung wird keine Aussage gemacht, dazu bedarf es eines Gammaspektrometers.

Betastrahlung besteht aus Elektronen, die bei entsprechender Energie die Fensterfolie geeigneter Detektoren durchdringen können.

Ähnliches gilt auch für *Alphastrahlung* (α-Teilchen). Die gebräuchlichen Meßgeräte erlauben hierbei keine Aussagen über Energieverteilung und Schädlichkeit der Strahlung.

Der *Untergrund*, der stets vorhanden ist, besteht aus kosmischer Strahlung und natürlicher Radioaktivität auf der Erdoberfläche. Jede Mauer enthält Spuren von Radium und anderen aktiven Stoffen. Die gesamte Dosis pro Jahr liegt zwischen 1 und 2 mSv (100...200 mrem), in manchen Gebäuden (z. B. alte Kirchen) und im Gebirge auch höher.

Fazit: Mit einfachen Meßgeräten kann man empfindlich die Radioaktivität einer Substanz messen (und z. B. mit der Untergrundstrahlung vergleichen). Über die Art des Strahlers und der Strahlung läßt sich aber kaum etwas aussagen. Die Gefährlichkeit ist so nur quantitativ abschätzbar. Erst die Kenntnis der Energiespektren sagt genaueres über die Gefährlichkeit einer radioaktiven Strahlung aus, wobei noch unterschieden werden muß, ob es sich um Strahlung von außen oder ob es sich um inkorporierte Strahlung (z. B. durch Speisen aufgenommene Substanz) handelt.

Das Zählrohr bekommt Konkurrenz

Bild 1 zeigt vereinfacht dargestellt die Schaltung zum Betrieb eines Geiger-Müller-Zählrohres. Durch geschickte Konstruktion und hohe elektrische Feldstärke entsteht in der Gasfüllung aus der anfänglich geringen Ionenladung, die ein von radioaktivem Material emittiertes Teilchen beim Durchfliegen des Zählrohrs erzeugt, eine millionenfach verstärkte Ladungslawine. Sie führt zu einem kurzzeitigen Stromstoß von 30...40 µA im Außenkreis. Dadurch wird der nachgeschaltete Transistor ca. 150 µs lang leitend. Der Kondensator C_K unterdrückt Störeinflüsse aus dem 500-V-Spannungswandler.

Die Halbleiter-Detektoren (*Bild 2*) werden mit so geringen Spannungen betrieben, daß keine innere Lawinen-Verstärkung entsteht. Obwohl sie eigentlich γ-Strahlung geringerer Energie nachweisen können als Zählrohre (*Tabelle 3*), ist doch ein relativ großer elektronischer Aufwand erforderlich, um die winzige, in der Sperrschicht freigesetzte Ladung Q meßbar zu machen. Kritisch ist vor allem die erste Stufe, der Ladungsverstärker. Bei schnellen Vorgängen (im ns-Bereich) wird sein Verhalten von den Elementen C_r und C_D bestimmt.

Wenn ein emittiertes Teilchen die Sperrschicht der Detektordiode in 2...5 ns durchfliegt, erzeugt es dort freie Elektronen und Löcher mit einer Gesamtladung von ± Q. Sie strömt als i_D aus der Sperrschicht ab und erscheint als Spannungssprung $u_D = Q/C_D$ an der Diodenkapazität C_D. Der Verstärker kompensiert diese Spannung zwischen seinen Eingängen dadurch, daß er einen Strom über C_r und C_k schickt, der eine entgegengesetzt gleiche Ladung nach C_D transportiert. Dabei entsteht über C_r die Spannung $\hat{u}_L = Q/C_r$, welche um den Faktor $C_D/C_r \approx 20$ größer ist als die Sensorspannung u_D. Dies ist der Nutzeffekt des Ladungs-/Spannungs-Konverters.

Der Ladungsverstärker muß rauscharm sein

Damit das Ganze funktioniert, muß der Verstärker den Spannungssprung u_D im µV-Bereich genügend schnell aus seinem eigenen Rauschpegel herauslesen können. Hier lag bisher der Hinderungsgrund für eine Verbreitung der Halbleiter-Strahlungsdetektoren außerhalb des Bereichs von Wissenschaft und Raumfahrt, wo man komplexe, teure Baugruppen als Ladungsverstärker einsetzt.

Mit rauscharmen, relativ schnellen Operationsverstärker-Bausteinen in

BiFet- oder Polysilizium-Gate-CMOS-Technologie ist es nun gelungen, β- und γ-Strahlen in einem Energiebereich, den auch die Zählrohre erfassen (*Bild 3*), zuverlässig zu messen. Die Leistungsaufnahme von 3 bis 6 mW liegt um mindestens eine Größenordnung niedriger als bei den bisher bekannten Schaltungen.

Der Ladungsverstärker dehnt den ursprünglichen Stromstoß i_D im Detektor um das 10 000fache, weil die Ladung von C_r nur relativ langsam über R_r abfließen kann. So gewinnt man Impulse u_L von rund 50 µs Dauer, die sich gut in den nachfolgenden Stufen weiterverarbeiten lassen.

Die wichtigsten physikalischen Kenngrößen von Zählrohren und Halbleiter-Detektoren werden in *Tabelle 3* verglichen. Im Anschluß daran bringt *Tabelle 4* Vorschläge und Auswahlkriterien für Fotodioden als Strahlungsdetektoren. In Bild 3 sind die verfügbaren Herstellerdaten über die Abhängigkeit der Zählrate von der Energie des γ-Quanten zusammengestellt. Die Kennlinie der Fotodiode S 1723 ist im Bereich kleiner Quantenenergien gestrichelt gezeichnet, weil das Verstärkerrauschen in der Praxis die untere Nachweisgrenze bestimmt.

Wie man sieht, hängt die gemessene Impulsrate bei gegebener Dosisleistung stark von der Quantenenergie und damit von der Art des radioaktiven Stoffes ab. Die Anzeige ist deshalb nur richtig für eine Strahlungsart. Strahlenmonitore werden meistens mit Cobalt 60 (1,17 MeV und 1,33 MeV) calibriert, neuerdings mit Cäsium 137 (0,66 MeV). Man kann durch eine Filterhülse aus Zinn und Plexiglas die überhöhte Empfindlichkeit der Zählrohre im Bereich von ca. 40...200 keV ungefähr auf den Wert bei 1 MeV einebnen.

Für β-Teilchen wird meist nur eine untere Empfindlichkeitsschwelle angegeben, die 1 % der Durchlässigkeit des Zählrohrfensters oder -mantels bzw. bei Fotodioden der Vergußmasse + Blendfolie entspricht. Diese Nachweisschwelle ist in *Bild 3* als Pfeilsymbol für die besprochenen Detektoren eingetragen.

Zum Nachweis von α-Strahlen benötigt man ein Zählrohr mit sehr dünnwandigem Glimmerfenster ($d \times \varrho = 1{,}5...2$ mg/cm²), z. B. ZP 1401. Als Detektor-Dioden kommen hier „nackte" Chips wie BPY 12 oder S 1790 in Betracht. Ein Spektrum vorkommender γ- und β-Strahler ist unterhalb der Energieachse in *Bild 3* eingetragen. Natürlich vorkommende α-Strahlen sind Uran und Radium mit ihren Zerfallsprodukten. In Feuermeldern findet man noch das in Kernreaktoren künstlich erzeugte Americium.

Wissenswertes über Strahlenschutz

Trifft γ-Strahlung auf Materie, so fällt die Dosisleistung exponentiell mit der Wandstärke des Materials. 5 cm Blei reduziert die Dosisleistung auf 10 %, 10 cm Blei auf 1 %. Blei hat gegenüber Beton die 10fache Abschirmwirkung. „Harte" β-Strahlung wird bereits von 1,6 mm dickem Eisenblech auf 1 Promille Restdosisleistung abgeschwächt, und zum völligen Abschirmen von α-Strahlen genügt ein Blatt Papier. α- und weiche β-Strahlen können nicht in den menschlichen Körper eindringen. Dennoch droht Gefahr, wenn die strahlenden Substanzen eingeatmet oder geschluckt werden. Für so eine innere Strahlenbelastung gilt derzeit als Grenzwert 1000 Bq/kg. Dies ist zugleich die Nachweisgrenze für Geigerzähler mit dem Zählrohr ZP 1400. Der zulässige Grenzwert für äußere Strahlenbelastung (Oberflächenkontamination) beträgt derzeit 37 Bq/cm². Auf einen γ-Strahler Cäsium 137 mit dieser Aktivität reagiert das Zählrohr ZP 1400 mit 20 Impulsen/min wenn die Strahlung auf Deckel oder Boden des Geigerzählers auftrifft.

An den Grenzen des Meßbereichs

Die Frage nach dem erfaßbaren Bereich der Strahlungsintensität und deren vom Meßgerät absorbierten Anteil, der Dosisleistung, beantwortet *Bild 4*. Man erkennt, daß die Nachweisempfindlichkeit der weit verbreiteten Fensterzählrohre kleiner Bauart, des ZP 1400 und des ZP 1401, mit 20 Impulsen/s je mR/h schon recht gut ist, selbst wenn man sie mit großen, sehr teuren Zählrohren (z. B. ZP 1430) vergleicht. Ein preiswertes Diodenarray aus 6 × BPW 34 liegt um den Faktor 4...5 darunter. Die Kennlinie der Großflächendiode S 1723 liegt fast auf gleicher Höhe wie die des Mantelzählrohrs ZP 1320.

Bei allen Zählrohren begrenzt der „Nulleffekt" den Meßbereich nach unten auf ungefähr 10 µR/h. Hierhin legt man zweckmäßigerweise die Auflösung der Digitalanzeige. Will man direkt in mR/h ablesen, so sind bei einer Strahlungsintensität von 1 mR/h 100 Impulse zu sammeln, ehe der Zählerinhalt zwischengespeichert und als 1,00 angezeigt wird. Das bedeutet 5 s Sammelzeit bei einem Zählrohr ZP 1400. Für die übrigen Detektoren kann man die Zeiten aus *Tabelle 5* entnehmen.

Die obere Grenze des Meßbereichs ergibt sich aus dem zugelassenen Fehler durch Totzeiteinfluß: Während ein Zählimpuls abläuft, kann kein weiteres Teilchen registriert werden. Das führt zu einem relativen Meßfehler ≈ Zählrate × Totzeit. Läßt man z. B. 20 % Zählverluste zu, so liest man für die interessanten Detektoren obere Grenzwerte zwischen ca. 100 mR/h und 1 R/h ab. Ohne Meßbereichs-Umschaltung muß die Anzeige dann vier oder fünf Stellen umfassen.

Prof. Wolfgang Gruhle/Jo Becker/Bch

ZUSAMMENGEFASST

„Zu unserer Bauanleitung eines wahlweise mit Zählrohr oder Halbleiter-Sensor betreibbaren Radioaktivitäts-Meßgerätes auf den Seiten 63 bis 69 werden hier die physikalischen, meßtechnischen und schaltungstechnischen Grundlagen erörtert, um die erfaßte Strahlung besser bewerten zu können."