

ENTWICKLUNG NEUER SONDEN FÜR DIE MESSUNG VON PHOTONEN-DOSISLEISTUNGEN BIS ZU 100 SV/H

DEVELOPEMENT OF NOVEL PROBES FOR THE MEASURING OF PHOTON DOSE RATES UP TO 100 SV/H

U. Hoffmann¹⁾, A. Meister¹⁾, T. Gantz¹⁾, C.-M. Herbach¹⁾, R. Steiner²⁾

¹⁾VacuTec Meßtechnik GmbH, Deutschland

²⁾Kerntechnische Entsorgung Karlsruhe GmbH, Deutschland

Zusammenfassung

Für die Messung der Photonenstrahlung an hochradioaktiven Proben wurde eine aus zwei halogengelöschten Geiger-Müller-Zählrohren bestehende Sonde entwickelt. Sie ermöglicht die zuverlässige Bestimmung der Umgebungs-Äquivalentdosisleistung über neun Dekaden bis hin zu hohen Dosisleistungen von 100 Sv/h. Im Unterschied zur traditionellen Betriebsweise wird die Messung der Dosisleistung zurückgeführt auf die Bestimmung der mittleren Zeit vom Anlegen der Betriebsspannung bis zum Eintreffen des ersten Signals. Grundlage dafür ist ein gesteuertes Zu- und Abschalten der Arbeitsspannung. Die neue Methode zeichnet sich u.a. durch die gute Linearität der Detektor-Response bis hin zu höchsten Dosisleistungen aus.

Summary

A dose rate probe consisting of two Halogen-quenched Geiger-Müller tubes has been designed for gamma radiation measurements at high-level radioactive samples. The detector provides dependable ambient dose-rate monitoring, covering nine dose-rate decades up to high values of 100 Sv/h. The dose-rate determination obtains serious benefit from a novel operation mode: The traditional counting is replaced by measuring the averaged time interval between the activation of the counter tube and the first detector strike. This approach is accomplished by a repetitive steering of the voltage up and down the operation point. The method is distinguished by an excellent linear detector response up to the highest dose-rates.

Schlüsselwörter Dosisleistungs-Sonde, Geiger-Müller Zählrohr, Äquivalentdosisleistung

Keywords dose-rate probe, Geiger-Müller tube, ambient dose-rate equivalent

1. Geiger-Müller Zählrohre in traditioneller Betriebsweise

Geiger-Müller-Zählrohre haben sich bereits seit langer Zeit als einfache, robuste und zuverlässige Detektoren zur Monitorierung von Gamma-Strahlungsfeldern etabliert. Sie finden heute Anwendung vor allem bei Messaufgaben, in denen die zu bestimmende Dosisleistung innerhalb eines sehr großen Bereichs veränderlich ist.

Die Bestimmung der Ortsdosisleistung im Strahlungsfeld wird von der Messung einer Ereignisrate \dot{r}_M abgeleitet. Die dabei übliche Methode ist die Zählung der Detektorimpulse N in einer vorgegebenen Zeit ΔT_M

$$\dot{r}_M = \frac{N}{\Delta T_M} \quad (1)$$

Bei der Registrierung eines Impulses ist die Totzeit τ zu berücksichtigen, in deren Verlauf der Detektor für den Nachweis nachfolgender Impulse gesperrt ist. Sie reduziert die reale aktive Messzeit ΔT des Detektors bei der Zählung von N Impulsen auf $\Delta T = \Delta T_M - N \times \tau$. In Gl. 2 wird der Zusammenhang zwischen der wirklichen Ereignisrate \dot{r} und der durch Zählung bestimmten Rate \dot{r}_M hergestellt. Der Bereich möglicher Messwerte \dot{r}_M ist eingeschränkt: hohe Ereignisraten \dot{r} bewirken eine asymptotische Annäherung von \dot{r}_M an $1/\tau$

$$\dot{r} = \frac{\dot{r}_M}{1 - (\dot{r}_M \times \tau)} \quad \left(\dot{r}_M < \frac{1}{\tau}\right) \quad (2)$$

Typische Totzeiten von Geiger-Müller-Zählrohren liegen im Bereich von $\tau = 10 - 200 \mu\text{s}$. Diese Zeiten sind erforderlich, um nach dem Auslösen der Elektronenlawine eine vollständige Entladung des Arbeitsgases zu gewährleisten. Nach Gl. 2 können Zählraten von 5000 Imp./s bereits Korrekturen $>10\%$ zur Folge haben. Problematisch sind die Korrekturen auch dadurch, dass die Totzeit nicht (wie in Gl. 2) konstant, sondern bei hohen Zählraten sehr stark veränderlich ist. Die Linearisierung der Zählrohr-Response verlangt somit aufwändige und vom Detektortyp abhängige Kalibrierungen. Schließlich kann es nach der Sättigung bei Überlast auch zum Abfall der Zählrate bis zur vollständigen Signal-Unterdrückung kommen.

2. Geiger-Müller Zählrohre mit gesteuerter Betriebsspannung

2.1 Zähler-Mode

Die Linearität der Zählrohr-Response kann verbessert werden, wenn dem System eine konstante Totzeit aufgeprägt wird. Hierfür muss von der traditionellen Betriebsweise abgewichen werden: Anstelle der permanent anliegenden konstanten Arbeitsspannung wird das Zählrohr nunmehr durch eine sich zyklisch ändernde Spannung in den aktiven und passiven Zustand geschaltet. Dafür wird die Hochspannung des Detektors nach jedem generierten Impuls unter den Arbeitspunkt geführt, und das Zählrohr bleibt bis zum Ende der „Wartezeit“ $\Delta T_W > \tau$ unempfindlich. Bis zum erneuten Überschreiten des Arbeitspunktes hat sich das Zählrohr regeneriert. Vollständiger Impulsverlust wird dadurch ausgeschlossen. Die Korrektur der Zählrate nach Gl. 2 erfolgt jetzt mit der konstanten Zeit ΔT_W anstelle von $\tau(\dot{r})$, die obere Grenze auswertbarer Zählraten wird jedoch weiter herabgesetzt.

2.2 Messung der Zeit bis zum ersten Impuls

Eine neue Situation ergibt sich, wenn die direkte Messung der Zählrate ersetzt wird durch die Messung der mittleren Zeit zwischen der Aktivierung des Zählrohrs und der Generierung des ersten Impulses. Die Vorteile dieser Methode wurden bereits in den 1950er Jahren diskutiert (siehe dazu z.B. [1] und [2]), allerdings fehlten lange die technischen Voraussetzungen zur Umsetzung. Eine Möglichkeit der Realisierung der Methode in kommerziellen Messgeräten wurde erstmals in [3] vorgestellt.

Die mathematischen Grundlagen der Methode sollen kurz zusammengefasst werden: Der Erzeugung ionisierender Strahlung und deren Nachweis liegen statistisch unabhängige, zufällige Prozesse zugrunde, die der Poisson-Statistik gehorchen. Aus der Poisson-Statistik leitet sich die Verteilungsdichte $dp/dt(t)$ der Zeiten t gemäß Gl. 3 ab, beginnend von der Startzeit $t_0 = 0$ bis zum Eintreffen des ersten Ereignisses zum Zeitpunkt t (siehe dazu z.B. [4]).

$$dp/dt(t) = \dot{r} \times \exp(-\dot{r} \cdot t) \quad (3)$$

Die im Zeitintervall von $t_1 \geq 0$ bis $t_2 \leq \infty$ gemittelte Zeit \bar{t} berechnet sich nach Gl. 4

$$\bar{t}(t_1, t_2) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} t \times p(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} p(t) dt} = \frac{(t_1 + 1/\dot{r}) \times \exp(-\dot{r} \cdot t_1) - (t_2 + 1/\dot{r}) \times \exp(-\dot{r} \cdot t_2)}{\exp(-\dot{r} \cdot t_1) - \exp(-\dot{r} \cdot t_2)} \quad (4)$$

Für den Spezialfall $t_1 = 0$ und $t_2 \rightarrow \infty$ ergibt sich

$$\bar{t}(0, \infty) = 1/\dot{r} \quad (5)$$

Die Messung der mittleren Ereignisrate \dot{r} kann somit direkt auf die Messung der mittleren Zeit \bar{t} bis zum Eintreffen des ersten Ereignisses zurückgeführt werden. Einzige Bedingung dafür ist, dass sich der Detektor zum Zeitpunkt $t = 0$ im aktiven Zustand befindet und nicht von vorhergehenden Ereignissen beeinflusst wird. Ansonsten gibt es für die Auswahl der Startzeit keinerlei Beschränkungen.

2.3 Diskussion der Integrationsgrenzen

Bei der realen Messung der mittleren Zeit \bar{t} wird es zu Abweichungen vom Idealfall kommen: Die Integrationsgrenze $t_1 > 0$ beeinflusst das Ergebnis bei hohen Zählraten und verursacht systematisch zu große Werte für \bar{t} . Umgekehrt führen Mittelungen mit $t_2 < \infty$ dazu, dass die Zeit \bar{t} bei geringen Zählraten systematisch zu klein bestimmt wird. In der Näherung $t_2 \rightarrow \infty$ erhält man mit Gl. 4 und 5

$$\dot{r}_M = \frac{1}{\bar{t}(t_1, \infty)} = \frac{\dot{r}}{1 + (\dot{r} \times t_1)} \quad (6)$$

$$\dot{r} = \frac{\dot{r}_M}{1 - (\dot{r}_M \times t_1)} \quad \left(\dot{r}_M < \frac{1}{t_1}\right) \quad (7)$$

Damit tritt die Zeit t_1 in Gl. 7 an die Stelle der Totzeit τ in Gl. 2. Die Realisierung von $t_1 < 1 \mu\text{s}$ macht es offensichtlich möglich, die obere Grenze des messbaren Dosisleistungsbereiches im Vergleich zur herkömmlichen Impulzzählung um mindestens 1-2 Dekaden zu erhöhen.

Bei den Sonden vom Typ VacuTec 70 091 beträgt die maximale Messzeit $t_2 = 200$ s. Das führt bei Ereignisraten $\dot{r} \leq 2$ Imp./min zur Überbewertung der Dosisleistung um $\geq 1\%$ (siehe Gl. 4). Bei Zählrohren für Messungen im Niederdosisleistungsbereich, z.B. mit der Response von $\varepsilon = 7,17$ (Imp./s)/($\mu\text{Sv/h}$), betrifft das aber nur sehr geringe Dosisleistungen ≤ 5 nSv/h.

2.4 Aspekte bei der Realisierung der Messmethode

Bei der Umsetzung der Messmethode ist es wichtig, die Steuerung der Hochspannung über den Arbeitspunkt des Zählrohrs möglichst präzise mit dem Start der Zeitmessung abzugleichen. Eine genau bekannte und konstante Zeitverschiebung T_s zwischen dem Start der Messung und der Aktivierung des Detektors kann jedoch einfach korrigiert werden: Nach Abzug der Zeitverschiebung T_s von den gemessenen Zeiten mit $\tilde{t}_i = t_i - T_s$ berechnet sich die gesuchte Ereignisrate mit der neuen Zeitskala nach Gl. 8.

$$\dot{r} = \frac{1}{\bar{t}(0, \infty) - T_s} \quad (8)$$

Die Zeitverschiebung T_s wird sowohl von den Eigenschaften der verwendeten elektronischen Bauelemente als auch vom Ansprechverhalten des Detektors bestimmt. Letzteres ist abhängig vom speziellen Typ des Zählrohrs. Zur Realisierung einer universellen Lösung ist es daher erforderlich, T_s in Auswertung der Messungen t_i zu bestimmen und kontinuierlich zu überwachen. Dabei wird überprüft, dass die Verteilung der Messungen t_i den exponentiellen Abfall nach Gl. 3 beschreibt. Gegebenenfalls werden Ereignisse t_i in unmittelbarer Nähe von T_s als ungültig gekennzeichnet und nicht bei der Berechnung des Mittelwertes \bar{t} berücksichtigt. Das entspricht der Einführung einer Verzögerungszeit t_l mit den unter 2.3 diskutierten Konsequenzen. Der Anteil der als ungültig eingestuften Messungen t_i steigt mit der Erhöhung der Ereignisrate \dot{r} an. Dieser Anteil wird während der Messung kontinuierlich überwacht. Ein vorgegebener Maximalwert definiert die obere Bereichsgrenze des Detektors, bei Überschreitung wird ein Überlauf signalisiert.

Typische Wartezeiten von $\Delta T_w > 1$ ms garantieren die vollständige Erholung des Arbeitsgases bis zur nächsten Aktivierung des Zählrohrs. *Weder die Totzeit τ noch die Wartezeit ΔT_w haben Einfluss auf die Zeitmessungen t_i und die daraus bestimmte Ereignisrate \dot{r} .* Allerdings wird die effektive Messzeit nach jedem Zyklus durch die Wartezeit ΔT_w reduziert. Bei geringen Ereignisraten $\dot{r} \ll 1/\Delta T_w$ wird die statistische Sicherheit der Messung nicht beeinträchtigt. Bei höheren Ereignisraten $\dot{r} > 1/\Delta T_w$ nähert sich die Frequenz der Datennahme jedoch schnell ihrem Maximalwert an (z.B. 500 s^{-1} bei $\Delta T_w = 2 \text{ ms}$). Eine statistische Sicherheit von 1% ($1 \times \sigma$) kann somit auch bei hohen Ereignisraten \dot{r} erst nach einer akkumulierten Messzeit von mindestens 20 s erzielt werden. Für lange Messungen in intensiven Strahlungsfeldern ergibt sich daraus jedoch auch ein wichtiger Vorzug: die Frequenz der Gasentladungen wird um den Faktor 10–100 reduziert, wodurch die Lebensdauer des Zählrohrs wesentlich verlängert werden kann.

Aufgrund der inhärenten Skalierung bietet die Zeitmessung auch bei geringen Ereignisraten Vorteile gegenüber der direkten Zählung: Schon eine einzige Einzelmessung lässt sich sofort in einen Schätzwert für die Rate \dot{r} umrechnen. Bei der Ratenmessung nach Gl. 1 und sehr kleinen Ereigniszahlen muss dagegen ΔT in geeigneter Weise an die aktuelle Rate angepasst werden, was zusätzlichen Rechenaufwand und Speicherplatzbedarf erfordert.

3. Dosisleistungsmessungen bei der KTE mit der Sonde VacuTec 70 091

Die Sonde VacuTec 70 091 besteht aus zwei Zählrohren mit energiekompensierenden Korrektiven. Ihre Detektorresponse von 7,17 bzw. 0,0143 (Imp./s)/($\mu\text{Sv/h}$) deckt (mit gegenseitiger Überlagerung) Bereiche niederer und höherer Dosisleistung ab. Die beiden Zählrohre ermöglichen die Bestimmung der Umgebungs-Äquivalentdosis nach den Vorgaben der Norm IEC 60846-1 [5]: im unteren Dosisleistungsbereich ($0,3 \mu\text{Sv/h} - 100 \text{ mSv/h}$) für Photonenenergien von 35 – 200 keV, im oberen ($100 \mu\text{Sv/h} - 100 \text{ Sv/h}$) für Energien von 70 – 4500 keV. Beide Detektoren werden mit der konstanten Wartezeit von $\Delta T_w = 2 \text{ ms}$ betrieben, die Zeitmessung erfolgt mit einer Taktfrequenz von 40 MHz, die Steuerung der Detektorspannung in den Arbeitsbereich erfordert ca. 50 ns. Die Ergebnisse der Zeitmessungen werden für die beiden Zählrohre als Funktion der Dosisleistung in Abb. 1 dargestellt.

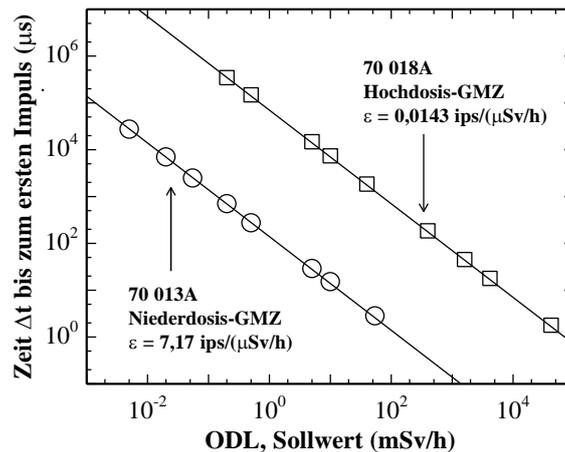


Abb. 1: Ergebnisse der Zeitmessung mit den beiden Zählrohren der Sonde VacuTec 70 091, dargestellt als Funktion des Sollwertes der Äquivalent-Ortsdosisleistung (ODL)

Die Ergebnisse der unabhängig voneinander arbeitenden Zählrohre werden in einer zentralen Steuereinheit zusammengeführt. Aus den einzelnen Messwerten wird (unter Berücksichtigung der aktuellen Zählgenauigkeit) das Gesamtergebnis mit Angabe des statistischen Fehlers berechnet. Bei Bedarf können auch die einzelnen Messkanäle ausgelesen werden. In Abb. 2 werden die bei einem Test gemessenen Äquivalent-Ortsdosisleistungen (ODL) als Funktion des Sollwertes (links) und die dabei festgestellten relativen Abweichungen (rechts) gezeigt.

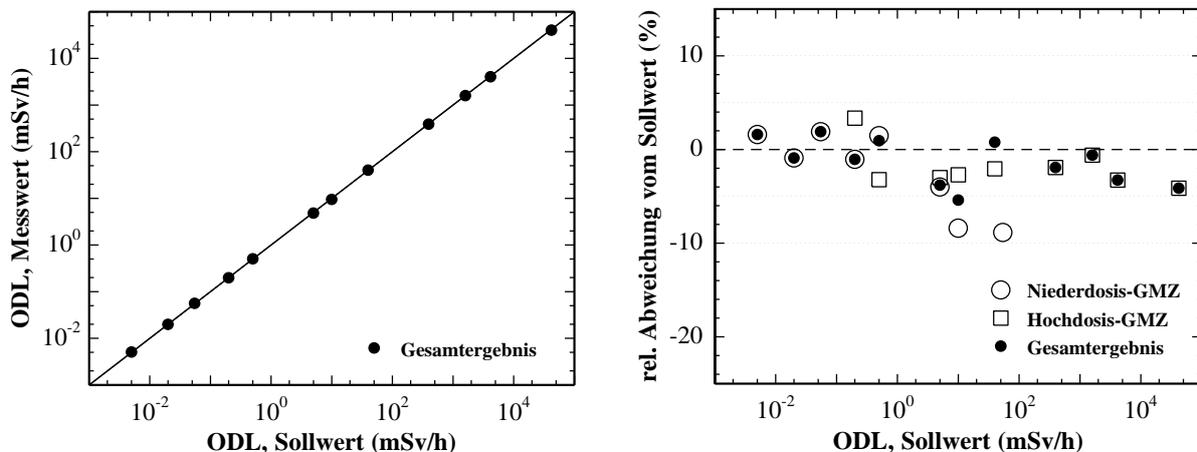


Abb. 2: Links: gewichtetes Gesamtergebnis der Messung der Dosisleistung mit der Sonde VacuTec 70 091 als Funktion des Sollwertes; rechts: Abweichungen der Messungen vom Sollwert für die Ergebnisse mit den einzelnen Zählrohren und für das Gesamtergebnis.

Die Sonden verfügen standardmäßig über ein integriertes Alarmsystem. Zwei Algorithmen stehen für die Erkennung der Alarmzustände zur Verfügung:

- Warnschwelle: Beim Überschreiten einer vordefinierten Schwelle
- Peak-Finder: Bei einer signifikanten Erhöhung der Dosisleistung

Die Lage der Warnschwelle und die Empfindlichkeit des Peak-Finders können über die Sonden-Software konfiguriert werden. Die Sonde verfügt über eine integrierte Uhr und eine Datenlogger-Funktion im nichtflüchtigen Speicher. Weitere Details können den Datenblättern und Produktinformationen (siehe [6]) entnommen werden.

Die Elektronik der Sonde verteilt sich auf zwei voneinander getrennte Komponenten. Wenige elektronische Bauteile sind unmittelbar am Zählrohr angebracht. Gut vor Umwelteinflüssen geschützt, befinden sie sich mit dem Zählrohr in einem dünnwandigen Aluminium-Gehäuse der Schutzart IP 65. Über 10 m lange Kabel werden die beiden Zählrohre an die gemeinsame Steuer- und Analyseeinheit angeschlossen, die entfernt von der strahlenden Probe abgeschirmt positioniert ist (siehe dazu Abb. 3).



Abb. 3: Links: Aufbau der Sonde VacuTec 70 091, bestehend aus zwei Geiger-Müller-Zählrohren in dünnen Zylindern aus Aluminium, über lange Kabel an die gemeinsame Steuereinheit angeschlossen; rechts: Sonden des Typs VacuTec 70 091 an einem Messplatz zur Bestimmung der Dosisleistungen an Containern mit radioaktiven Abfällen, betrieben von der KTE (Kerntechnische Entsorgung Karlsruhe GmbH, ehemals WAK GmbH).

4. Literaturverzeichnis

- [1] T.J. Lewis, Geiger-counter operation without dead-time, Appl. Sci. Res. B5, p. 305, 1955
- [2] Fünfer, E.; Neuert, H.: Zählrohre und Szintillationszähler. Karlsruhe: G. Braun, 1959
- [3] E.J. Dilanni, H.J. Cooley, M. Fujita, C.V. Noback, Patent US 4605859, 1986
- [4] Knoll, G.F.: Radiation Detection and Measurement, New York: John Wiley & Sons, 2010
- [5] IEC 60846-1:2009: Radiation protection instrumentation - Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation - Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors
- [6] <http://www.vacutec-gmbh.de>