

6. Prinzipien von Szintillations-Detektoren:

- (a) Szintillationsmechanismus
- (b) Organische, anorganische Szintillatoren: Lichtausbeute, Wellenlängenschieber
- (c) Nachweiseffizienz für Strahlung: schwere Ionen, Elektronen, Gammastrahlung, Neutronen
- (d) Photomultiplier, Avalanche-Photodioden: Konstruktionsprinzipien, Einsatzgebiete, Limitierungen

7. Ionisationmessung:

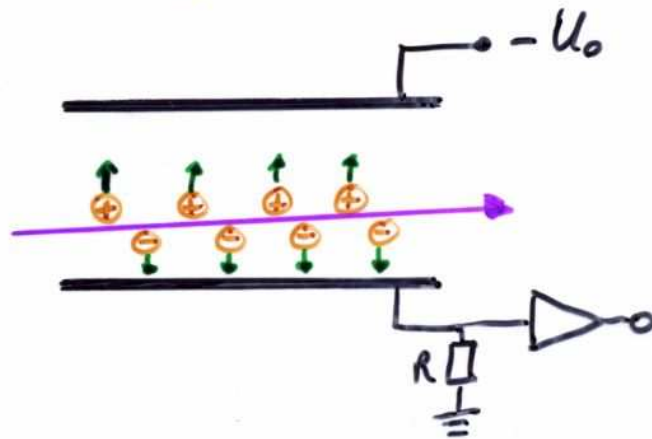
- (a) Gasdetektoren: Ionisationskammern, Proportionalzähler, Auslösezähler
- (b) Flüssigkeitszähler
- (c) Halbleiterzähler
- (d) Alterung von Detektoren: Strahlungsschäden, chemische Reaktionen durch Bestrahlung

Ionisationsmessung

... bedeutet: Messung der primär und sekundär erzeugten Ionisation, die ein Teilchen aus ionisierender Strahlung im Detektormedium erzeugt hat. Dazu genügt es, ein (geringes) elektrisches Feld anzulegen, um die Elektronen & Ionen an der Rekombination zu hindern. Typische Aufbauten sind:

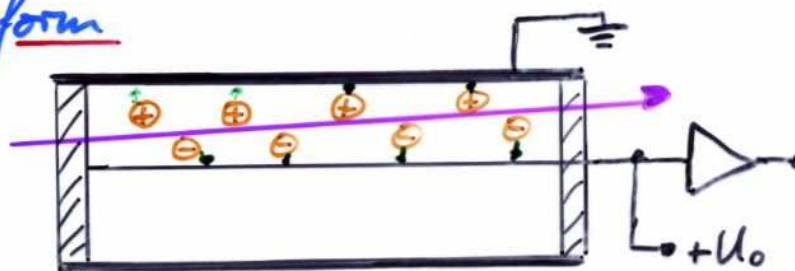
- Ionisationskammern in flacher Bauform

(zwei "Kondensatorplatten", z.B. in Flüssigkeits- und Halbleiterzählern)



- ... in zylindrischer Bauform

(vom Typ eines Geiger-Müller-Zählrohrs, z.B. Gaszähler)



Da die Zylinder symmetrische Bauform in vielerlei Hinsicht auch bei größeren Detektoren wieder auftaucht, soll diese im Folgenden etwas eingehender diskutiert werden.

Arbeitsbereiche von zylindrischen Gasdetektoren

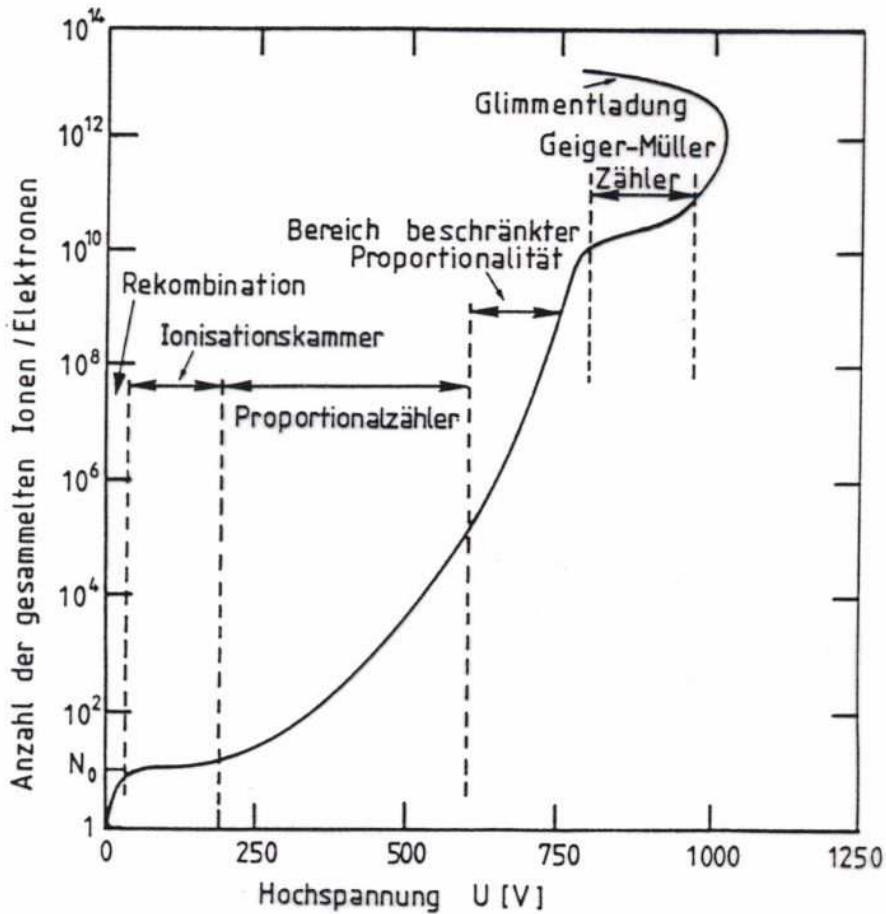
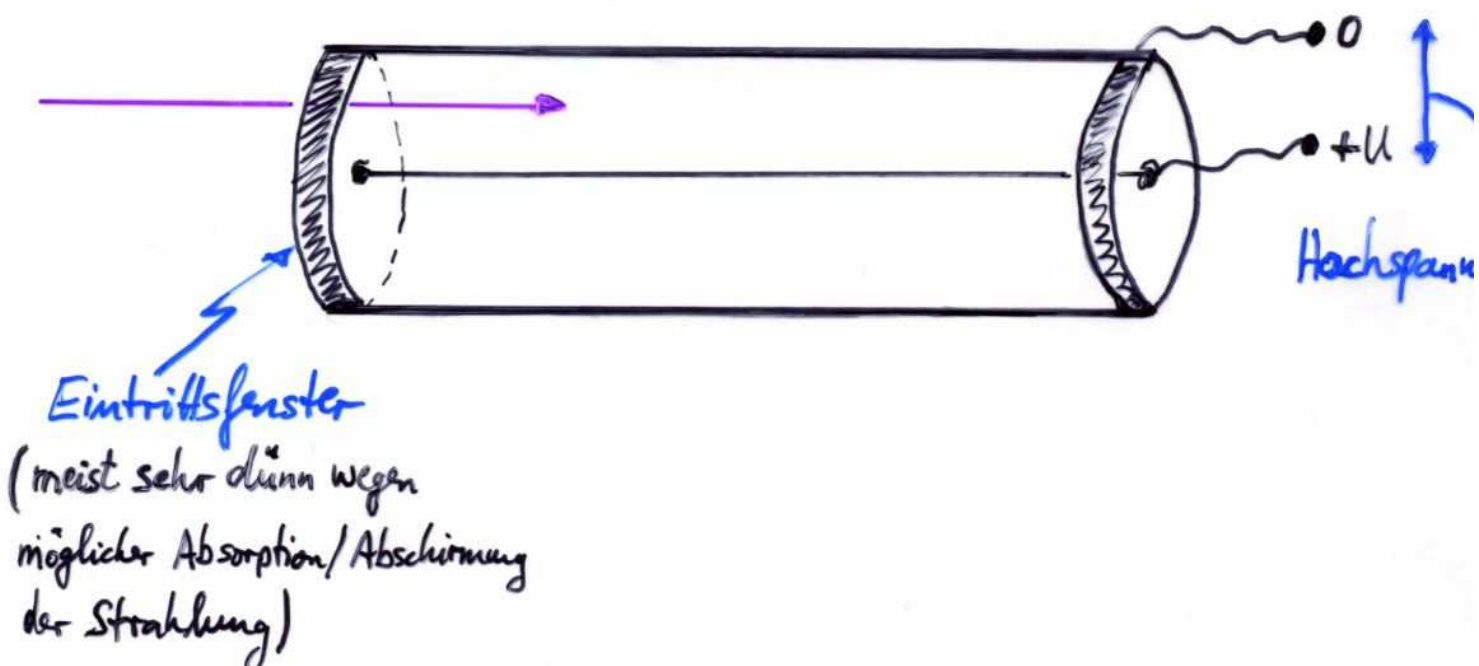


Abb. 4.21 Kennzeichnung der Arbeitsbereiche von zylindrischen Gasdetektoren (nach [104]).



Zylindrische Gasdetektoren

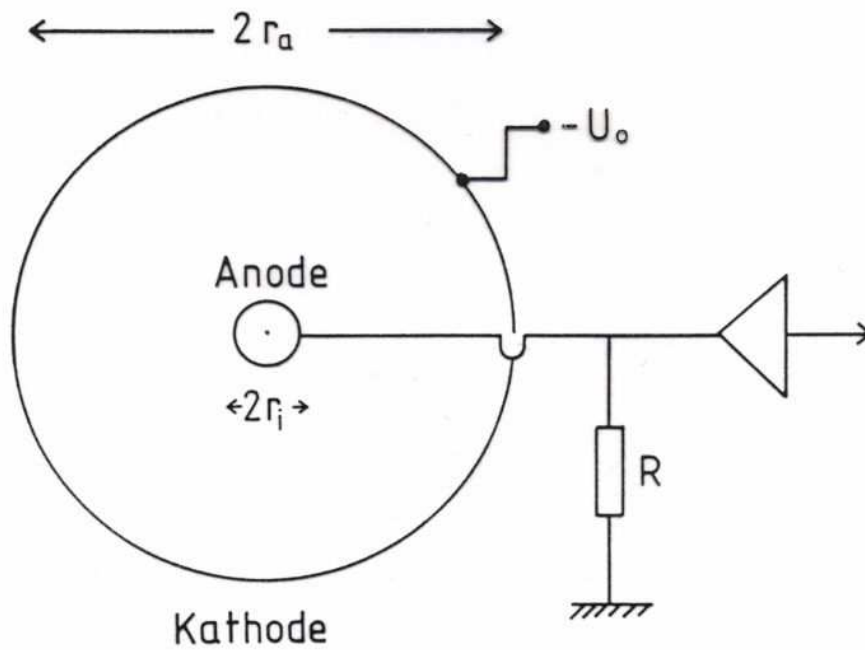


Fig.2.3: Zylindrische Ionisationskammer (schematisch)

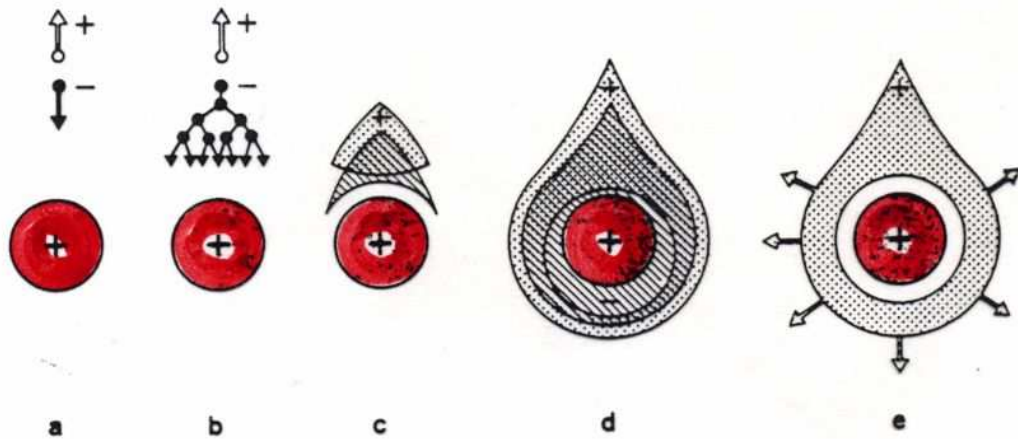


Fig.3.2: Zeitliche Entwicklung der Lawine in der Nähe des Anodendrahtes eines Proportionalzählers. a) Ein primäres Elektron bewegt sich zur Anode; b) das Elektron gewinnt im elektrischen Feld Energie und ionisiert Atome, die Lawinenbildung setzt ein; c) Elektronen- und Ionenwolke driften auseinander; d) und e) die Elektronenwolke drifftet zum Draht, die Ionenwolke entfernt sich radial vom Draht [CH 72].

Zylindrische Gasdetektoren

Das messbare Signal, welches aufgrund der Ionisation des Zählorgases zwischen den Elektroden des Detektors entsteht, stammt aus der Bewegung von Elektronen & Ionen zu Anode & Kathode, also aus der Influenz. Für die Bewegung einer Ladung q im elektrostatischen Potential $\phi(r)$ kann dies allgemein berechnet werden. Die mit der Ladungsbewegung um dr verbundene Spannungsänderung ist

$$\otimes \quad dU = \frac{q}{C \cdot U_0} \frac{d\phi(r)}{dr} \cdot dr$$

Dabei ist U_0 die angelegte Spannung und C die Kapazität der Elektrodenanordnung im Detektor (enthält also die spezifische Detektorgeometrie, z.B. Zylinderform).

In \otimes ist $\frac{d\phi}{dr} = -E(r)$ das elektr. Feld (allgemeiner:

$\vec{E}(\vec{r}) = -\text{grad } \phi(\vec{r})$; für $E(r) = -\frac{d\phi}{dr}$ ist Rotations- bzw. ^{mittlere} Zylindersymmetrie angenommen). Ist weiterhin die Drift-

geschwindigkeit $\bar{v}_D \approx \mu \cdot E(r)$, so kann die Driftzeit

mit $\Delta t = \int \frac{dr}{\bar{v}_D} \approx \int \frac{dr}{\mu \cdot E(r)}$ berechnet werden.

Zylindrische Gasdetektoren

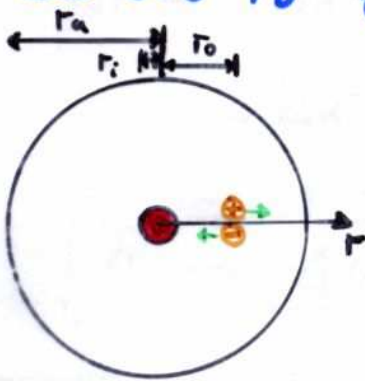
Für die Anordnung aus Fig. 2.3 ist das elektrische Potential:

$$\phi(r) = -\frac{C U_0}{2\pi \epsilon \epsilon_0} \ln\left(\frac{r}{r_i}\right)$$

und die Kapazität der Detektorgeometrie (pro Länge L)

$$C = \frac{2\pi \epsilon \epsilon_0}{\ln(r_a/r_i)}$$

sodass sich für eine Ionisation mit Ladung $q = Ne$ am Ort r_0 folgende Spannungsänderungen ergeben:



• Elektronen:

$$\Delta U^- = -\frac{Ne}{C} \frac{\ln(r_0/r_i)}{\ln(r_a/r_i)}$$

• Ionen:

$$\Delta U^+ = -\frac{Ne}{C} \frac{\ln(r_a/r_0)}{\ln(r_a/r_i)}$$

Und die Driftzeiten für Elektronen & Ionen sind*:

$$\bullet \quad \Delta t^- \approx \frac{\ln(r_a/r_i)}{2\mu^- \cdot U_0} (r_0^2 - r_i^2)$$

$$\bullet \quad \Delta t^+ \approx \frac{\ln(r_a/r_i)}{2\mu^+ \cdot U_0} (r_a^2 - r_0^2) \quad \begin{array}{l} \text{i.A.} \\ \gg \Delta t^- \\ \text{da } \mu^+ \ll \mu^- \end{array}$$

* Gilt nur, solange $\vec{v}_0 \sim E(r)$ ist, also für nicht zu starke E-Felder

Zylindrische Gasdetektoren

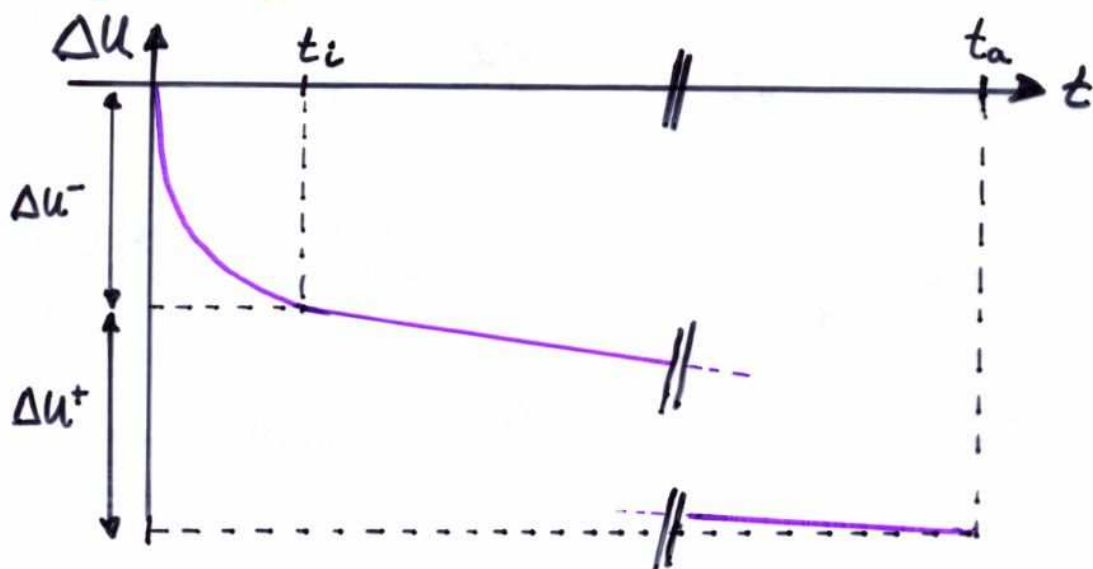
Ist $r_a \gg r_i$ und liegt eine homogene Verteilung der Ionisation vor im Detektor, so wird die Elektronen-komponente die Spannungsänderung $\Delta U = \Delta U^- + \Delta U^+$ dominieren (NB: für Ionisationskammern, z.B. $r_a/r_i = 10^3$ und $r_0 = r_a/2 \rightarrow \Delta U^-/\Delta U^+ = \ln 500/\ln 2 \approx 10$).

Die zeitabhängige Signal-(Puls-)form ist näherungsweise:

$$\bullet \Delta U^-(t) = U^-(t) - U_0 = -\frac{Ne}{C \ln r_a/r_i} \cdot \frac{1}{2} \ln \left(1 + t \cdot \frac{2\mu^- U_0}{\ln(r_a/r_i) \cdot r_i^2} \right)$$

$$\bullet \Delta U^+(t) = U^+(t) - U_0 = -\frac{Ne}{C \ln r_a/r_i} \cdot \frac{1}{2} \ln \left(1 + t \cdot \frac{2\mu^+ U_0}{\ln(r_a/r_i) \cdot r_i^2} \right)$$

NB: $\mu^+ \ll \mu^-$ und $r_a \gg r_i$ bedeuten:

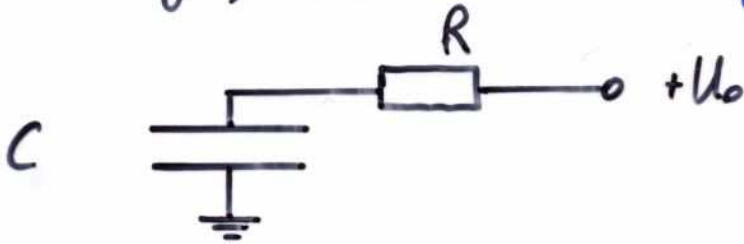


Elektronenkomponente ist schnell

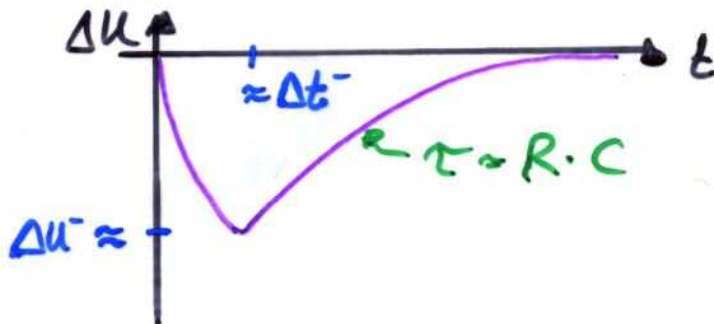
Ionenkomponente ist sehr langsam

Zylindrische Gasdetektoren

Im realen Betrieb wird die Hochspannung über einen (i.A. hochohmigen) Widerstand nachgeführt:



Daher wird der Spannungsabfall $\Delta U(t)$ exponentiell mit einer Zeitkonstante $\tau = R \cdot C$ verschwinden:



Dies gilt, falls $\Delta t^- < R \cdot C < \Delta t^+$ ist.

Wird der Widerstand R sehr groß gewählt, sodass

$$R \cdot C > \Delta t^+,$$

dann können einzelne Ionisationen nicht mehr voneinander getrennt werden. In diesem Fall wird bei konstanter Rate R der einfallenden Teilchen

ein Gleichstrom $I \approx -Ne / R \cdot C$ gemessen.

Zylindrische Gasdetektoren

Für die Messung der Intensität von Röntgenstrahlung wird meist ein Luftgefüllter Detektor benutzt, da die Ionendosis für Luft definiert ist.

Zur Dosismessung werden auch Detektoren mit gewebe-
äquivalenter Wandung

benutzt, z.B. Polystyrol
mit C- oder Al-Beimischungen

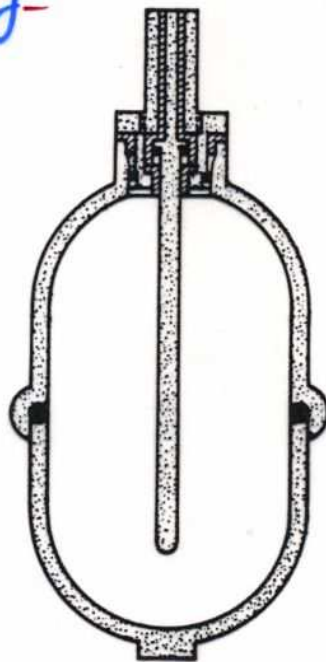


Fig.2.4: Ionisationskammer zur Messung der Ionendosis; Material: leitender gewebeäquivalenter Kunststoff (nach [RO 56]). Der Durchmesser des zylindrischen Zählers ist ca. 10cm.

(Stab-) Dosimeter messen die Entladung eines aufgeladenen Kondensators durch eine Ionisationskammer. Die Größe der Entladung ist ein Maß für die vom Träger empfangene Dosis

Zylindrische Gasdetektoren

Bei höherer Betriebsspannung U_0 steigt die elektr. Feldstärke in der Nähe des Drahtes auf Werte an, bei denen Gasverstärkung einsetzt. Abb. 3.2 (s. Folie mit Querschnittsskizze des zylindr. Detektors) zeigt, wie sich eine Gasverstärkungszone um den Draht ausbildet, und zeigt die Rolle der pos. Ionen auf. Dies hat Konsequenzen für die Amplitude des Spannungspulses ΔU^- und ΔU^+ :



* im Proportionalbereich

Da die Verstärkung* bis zu 10^8 beträgt, kann die Influenz der ursprünglich durch Ionisation erzeugten Ladung vernachlässigt werden. Der Spannungspuls durch die Elektronen & Ionen der Gasverstärkungszone ist dann:

$$\bullet \Delta U^- = -\frac{Ne}{CU_0} \int_{r_i+r'}^{r_i} \frac{d\phi}{dr} dr = -\frac{Ne}{C \ln \frac{r_a}{r_i}} \ln \frac{r_i+r'}{r_i}$$

$$\bullet \Delta U^+ = \frac{Ne}{CU_0} \int_{r_i+r'}^{r_a} \frac{d\phi}{dr} dr = -\frac{Ne}{C \ln \frac{r_a}{r_i}} \ln \frac{r_a}{r_i+r'}$$

also $\Delta U^- + \Delta U^+ = -\frac{Ne}{C}$ und $\frac{\Delta U^-}{\Delta U^+} = \frac{\ln \frac{r_i+r'}{r_i}}{\ln \frac{r_a}{r_i+r'}} \ll 1$

(z.B.: $r_i = 10 \mu\text{m}$, $r_a = 10 \text{mm}$, $r' = 1 \mu\text{m}$ $\Rightarrow \Delta U^- / \Delta U^+ \ll 1\%$)

Zylindrische Gasdetektoren

Die Form des Pulses ergibt sich analog wie beim Fall ohne Gasverstärkung, wobei wegen $\frac{\Delta U^-}{\Delta U^+} \ll 1$ die Elektronenkomponente vernachlässigt werden kann. Also ist:

$$U^+(t) - U_0 \approx -\frac{Ne}{C \cdot \ln \frac{r_a}{r_i}} \cdot \frac{1}{2} \ln \left(1 + t \cdot \frac{2\mu^+ U_0}{\ln \left(\frac{r_a}{r_i} \right) \cdot r_i^2} \right)$$

$$= -\frac{Ne}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \ln \left(1 + \frac{t}{T_0} \right)$$

mit $C = 2\pi\epsilon\epsilon_0 / \ln \frac{r_a}{r_i}$ und $T_0 := \frac{1}{2} \pi \epsilon\epsilon_0 / \mu^+ C U_0$.

Wird die Hochspannung wiederum über einen Widerstand R nachgeführt, so ergibt sich als Pulsform mit $\tau := C \cdot R$:

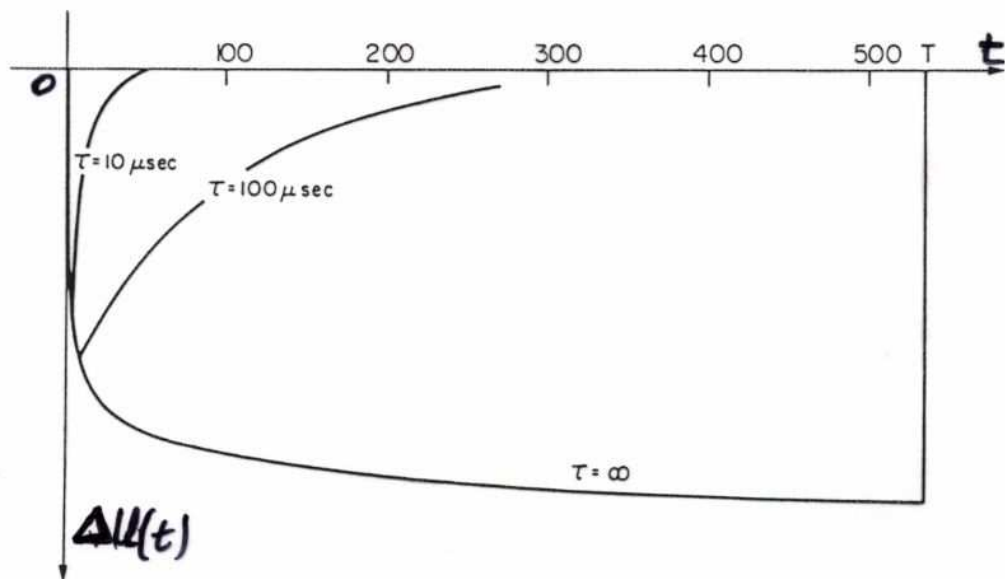


Fig. 52 Time development of the pulse in a proportional counter; T is the total drift time of positive ions from anode to cathode. The pulse shape obtained with several differentiation time constants is also shown.

Zylindrische Gasdetektoren

Eine Erhöhung der Arbeitsspannung U_0 über den Proportionalitätsbereich hinaus führt in den Auslösebereich (Geiger-Müller-Bereich). Eine einzelne Ionisation führt dann zu einer andauernden Entladung zwischen Anode und Kathode, weil die UV-Photonen aus der Abregung und Rekombination kontinuierlich für weitere Ionisationen führen.

Um diesen Entladeprozess zu unterbrechen, müssen dem Gas des Detektors Moleküle zugefügt werden, die diese UV-Photonen effektiv absorbieren (z.B. durch Anregung von Schwingungsmoden, die im langwelligen Bereich abstrahlen/abregen).

Solche Moleküle werden **Löschgase** oder **Quencher** genannt. Beispiele für Löschgase sind:

- Kohlenwasserstoffe wie Methan, Isopropan, Butan
- CO_2
- BF_3
- ...

Die richtige Wahl hängt vom Einsatzbereich des Detektors ab.

Zylindrische Gasdetektoren

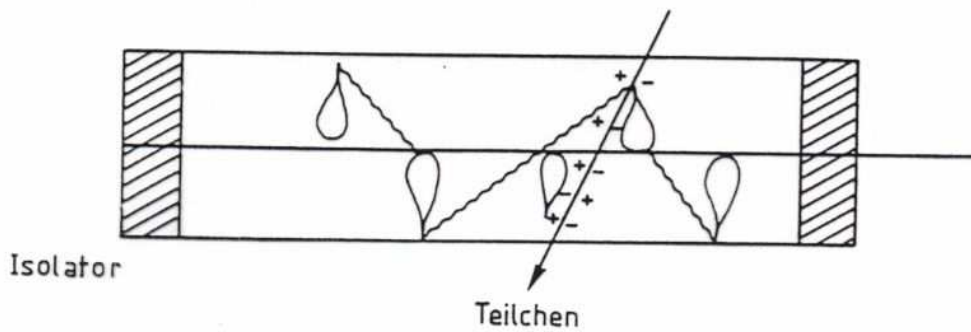


Abb. 4.14 Zur Illustration der transversalen Lawinenausbreitung in einem Geiger-Müller-Zählrohr.

d.h. entlang des Anodendrahtes

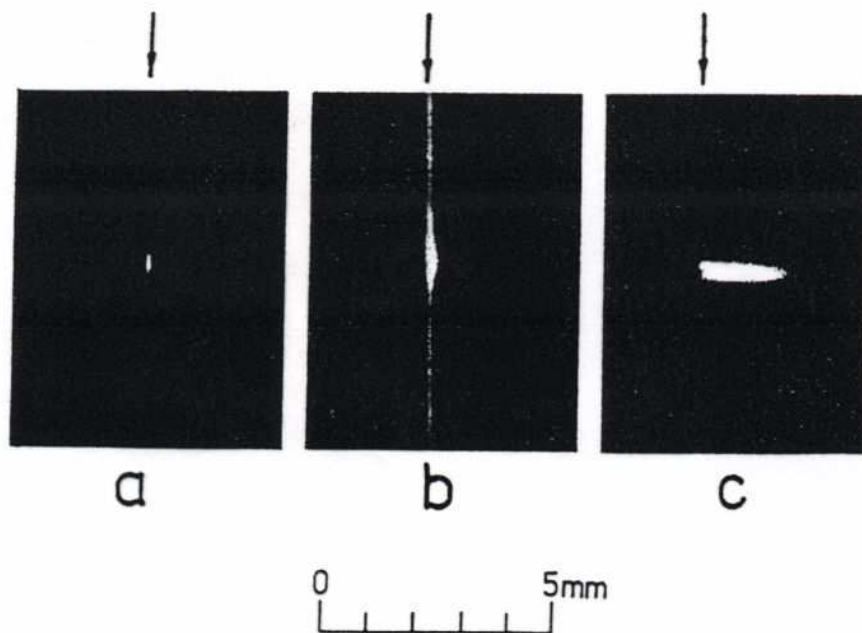


Abb. 4.17 Gasentladungen in einem a) Proportionalzählrohr, b) Geiger-Müller-Zählrohr und c) in einem selbstlöschenden Streamer-Rohr. Die Pfeile deuten den Verlauf des Anodendrahtes an [112].

Streamerbereich

Sehr hohe Löschgasanteile unterbinden die transversale Ausbreitung des Entladevorgang, der also lokalisiert im Bereich der ersten / ursprünglichen Ionisation verbleibt. Das Löschgas entzieht dem Gesamtprozess fast alle UV-Photonen und stoppt damit auch den Gasverstärkungsprozess am Ende, wenn alle Elektronen die Anode erreicht haben. Solche larocci-Rohre haben hohe Ladungsmengen, die den Nachweis einzelner Teilchen ermöglichen.

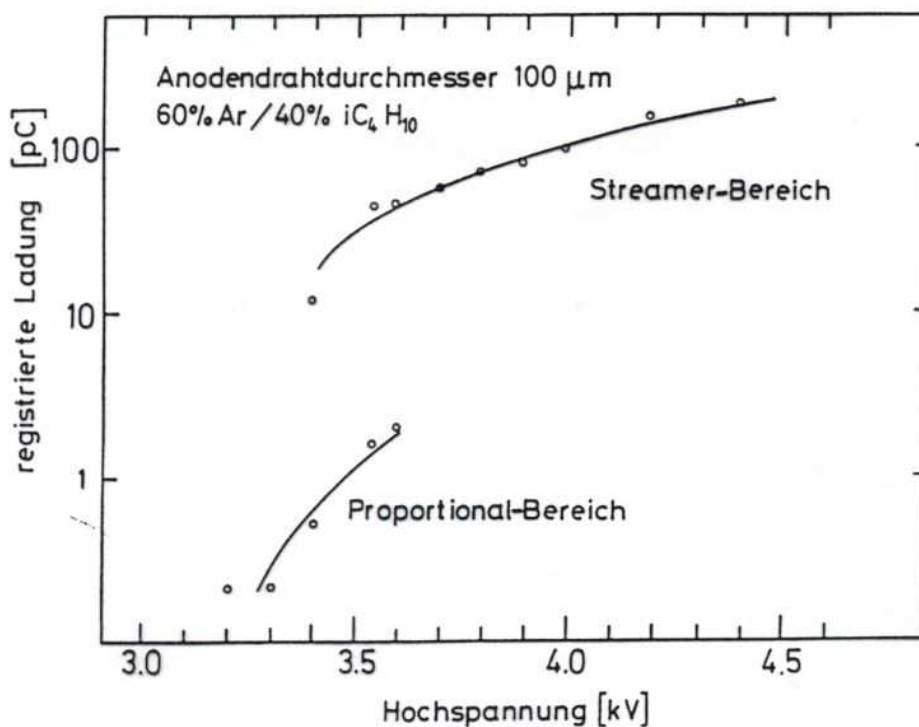


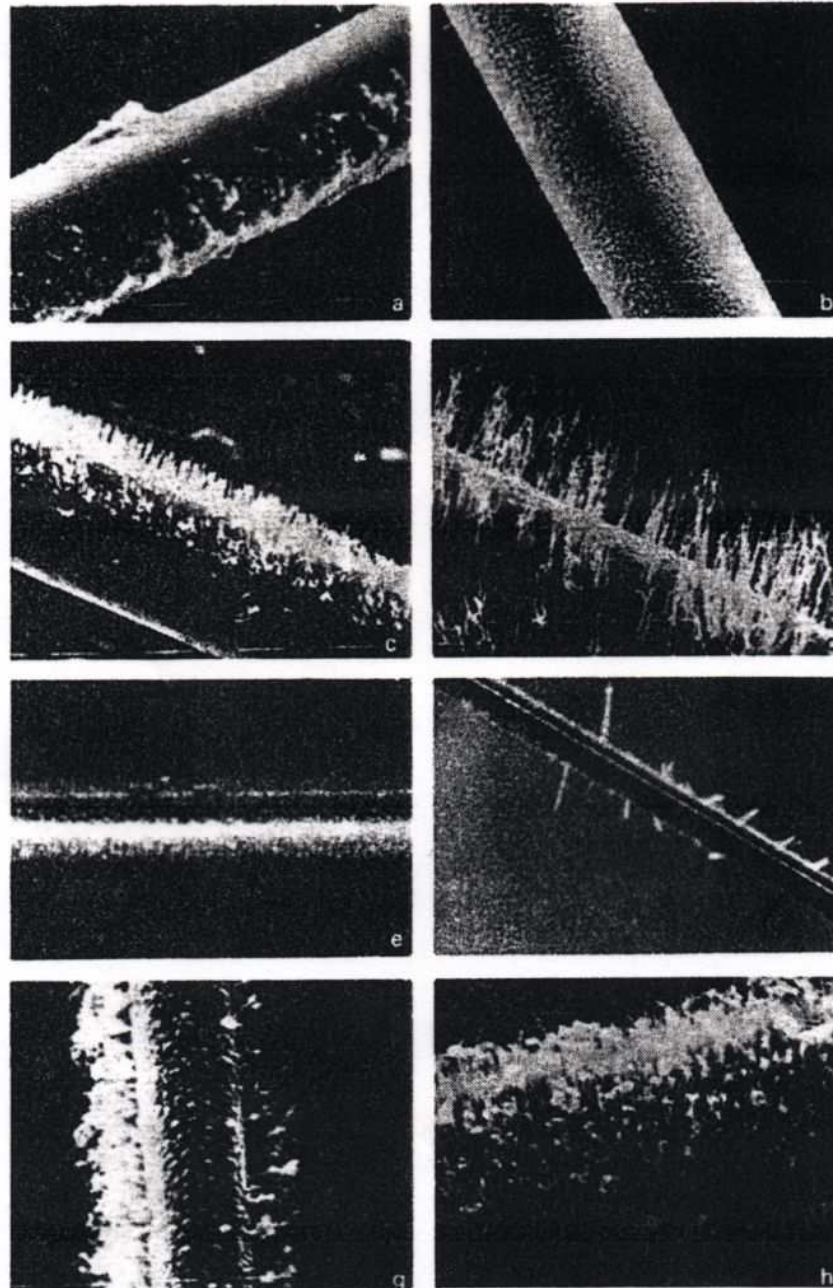
Abb. 4.16 Registrierte Lawinenladung als Funktion der Hochspannung. Deutlich erkennbar ist der diskontinuierliche Übergang vom Proportional- zum Streamer-Mode bei Koexistenz dieser beiden Entladungsmechanismen in einem schmalen Überlappbereich um 3.5 kV [113].

Alterung von Detektoren

Organische Löschgase führen zu Betriebsproblemen von Detektoren, nachdem diese hohe Teilchenflüsse absorbiert haben. Durch die Rekombination ^{durch ionisierende Strahlung,} dissoziierter Löschgas-moleküle können sich feste oder flüssige Polymere bilden, die sich auf Anode / Kathode ablagern. Diese Ablagerungen verändern das Verhalten des zylindr. Gasdetektors:

- **Anode**: Feldabschirmung / -verzerrung durch Polymere
→ geringere Gasverstärkung
- **Kathode**: Polymerschicht hindert / behindert pos. Ionen aus Ionisation daran, an Kathode zu neutralisieren
→ Aufbau pos. Raumladung mit nachfolgenden Entladungen (Funken) + Beschädigungen

Solche Effekte werden mit dem Begriff **Alterung von Detektoren** bezeichnet, wobei i.A. die vom Detektor (oder Draht) absorbierte Ladung / Länge ein Zeitmaß für den Grad der Alterung darstellt und benutzt wird.



a, b:
gleichmäßige
Ablagerungen

c-h:
haarige
Ablagerungen

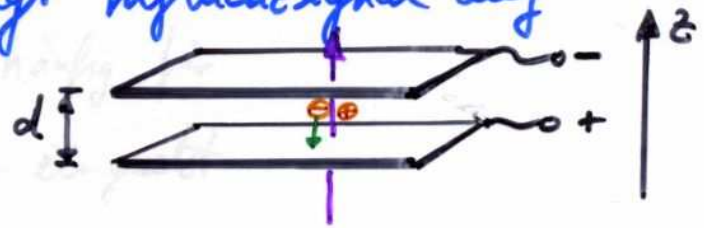
Abb. 4.62 Beispiele von Ablagerungen auf Anodendrähten [80].

von Polymeren

- Alterung:
- dicke Anodendrähte weniger als dünne
 - goldbeschichtete weniger als unbeschichtete
 - Wasserdampf / Azeton können Ablagerungen teilweise auflösen

Flüssigkeitsdetektoren

- Ionenbeweglichkeit vernachlässigbar klein
- Elektronenkomponente erzeugt Influenzsignal auf Kondensatorplatten:



Die Ladungsdichte ist

$$\rho(z,t) = \begin{cases} -Ne/d & \text{für } 0 < z < d - \bar{v}_0 \cdot t \\ 0 & \text{für } z > d - \bar{v}_0 \cdot t \end{cases}$$

und damit die Ladung zwischen den Platten abfließende Elektronen

$$q(t) = \rho(z,t) \cdot (d - \bar{v}_0 \cdot t) \quad \text{für } t < t_d := \frac{d}{\bar{v}_0}$$

Diese Ladung bewegt sich im elektr. Feld des Kondensators und gewinnt Energie ($E_{\text{elektr.}} = \frac{Q^2}{2C} = q \cdot E_z$)

$$\frac{2Q_0 dQ}{2C} = q(t) E_z \cdot dz = q(t) \cdot E_z \cdot \bar{v}_0 dt$$

$$= E_z \bar{v}_0 \cdot \left(-\frac{Ne}{d} \cdot (d - \bar{v}_0 t) \right) dt \quad \text{für } t < t_d$$

Integration über $t = 0 \dots t_d \dots \infty$ liefert für $\int dQ$:

$$Q(t) - Q_0 = \int_{Q_0}^{Q(t)} dQ = \begin{cases} -Ne \left[\frac{t}{t_d} - \frac{1}{2} \left(\frac{t}{t_d} \right)^2 \right] & \text{für } 0 < t < t_d \\ -Ne/2 & \text{für } t > t_d \end{cases}$$

und damit einen Strompuls $i(t) = \dot{Q}(t)$:

$$i(t) = -Ne \cdot \frac{1}{t_d} \cdot \left[1 - \frac{t}{t_d} \right] \quad \text{für } t < t_d$$