

Wirkung von Strahlung auf biologische Substanzen

1 γ -Strahlung

Absorption durch

- Photo-Effekt
- Compton-Effekt
- Paarbildung

Folge

- Erzeugung energetischer Elektronen am Ort der Absorption
- weitere Ionisierung der Umgebung & Dissoziation der Molekülstruktur
- Eindringtiefe **groß**!! stark E-abhängig

2 β -Strahlung

Absorption durch

- Kollision mit Hüllenelektronen (Bethe-Block)
- Bremsstrahlung

Folge

- Ionisation & Dissoziation der Umgebung
- Eindringtiefe **kleiner** als bei γ -Strahlung

3

α -Strahlung

Absorption durch

- Kollision mit Hüllenelektronen (Bethe-Bloch)

Folge

- starke Ionisation der Umgebung & Dissoziation

- Eindringtiefe **gering** $\propto \frac{dE}{dx}$ **groß**

4

Schwerionenstrahlen ($A > 4$)

Absorption

wie bei α -Strahlung
aber

- Eindringtiefe **extrem gering**

$(\frac{dE}{dx} \sim \frac{z^2}{v^2}) \rightarrow$ Schädigung maximal

5

Neutronen

Absorption durch

schnell

- elastische Stöße mit Protonen
- durch sukzessive Stöße schnelle Thermalisierung

langsam

- anschließender Einfang da $\sigma(n, \gamma)$ groß für E_n klein

Folge:

- Erzeugung energetischer Protonen oder anderer Rückstoßteilchen
Zerstörung des Moleküls
- nachfolgende starke Ionisation & Dissoziation der Umgebungsmoleküle
- n-Einfang und Erzeugung von γ -Strahlung ($\langle N_\gamma \rangle \sim 3-5$)
 $\Sigma E_\gamma = B_n \sim 7-8 \text{ MeV}$
- Eindringtiefe **groß**

Strahlungsdosen

- **Ionendosis**: Röntgen (R)
Strahlungsmenge, die in **1 ml** Luft **1 esE** ($= 3 \cdot 10^{-9} \text{ C}$) Ionen erzeugt
oder
 $1 \text{ R} = 2.6 \cdot 10^{-4} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$ (Luft) Gray

- **Energiedosis**:
 $1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J/kg} = 100 \frac{\text{erg}}{\text{g}} = 10^{-2} \text{ Gy}$
die durch die Strahlung pro Substanzmenge abgegebene Energie

● Röntgen äquivalent man

$$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv} \quad (\text{Sievert})$$

(1 mrem = 10 μ Sv)

Äquivalentdosis zu **1 rad** Röntgenstr.
(γ -Strahlung) von 200 keV

für alle anderen Strahlen muß ein zusätzlicher Bewertungsfaktor **q** eingeführt werden

biologische Bewertungsfaktoren

● β -Strahlung	:	q \approx 1.5
● α -Strahlung	:	q \approx 20
● thermische n	:	q \approx 2
● schnelle n	:	q \approx 10

zur Orientierung

bei Ganzkörperexposition

natürliche Strahlenbelastung : $\sim 100 \text{ mrem/y} = 1 \text{ mSv/y}$

Strahlenkrankheit : $> 20 \text{ rem} = 0.2 \text{ Sv}$

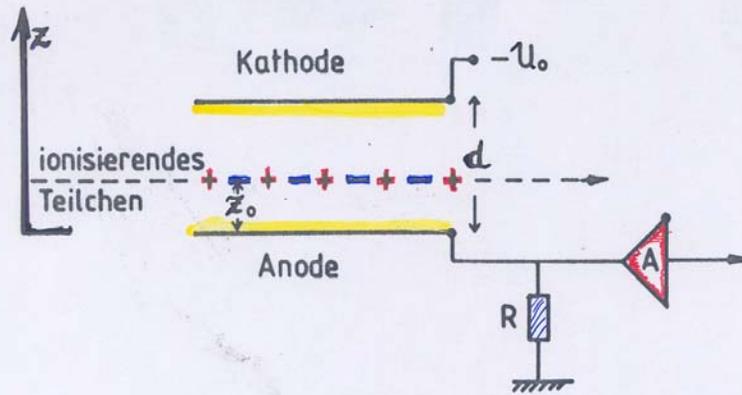
lethale Dosis : $\sim 500 \text{ rem} = 5 \text{ Sv}$

Detektoren - Grundprinzipien

Beispiele:

- ● Ionisationskammer
 - ● Proportionalzählrohr
 - ● Geiger-Müller zähler
 - Vieldraht-Proportionalkammer
 - Flüssigkeits-Ionisationsdetektor
 - Emulsionen
 - ● Halbleiterzähler
(Si-, Ge-Dioden, μ -Strips, CCD's)
 - ● Szintillationszähler
(fest, flüssig, Kapillaren)
 - Čerenkov-zähler
 - Transition-Radiation-Detektoren (TRD)
- } Gas-zähler

A Ionisationskammer



primärer Prozeß: Ionisation des "Zählgas" (z.B. Argon)
Trennung der positiven & negativen Ladung über E-Feld.

Verschiebung der Ladung erzeugt elektr. Impuls

$$|\vec{E}| = E_z = U_0/d$$

Energie: $\frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} C U_0^2 - Nq \int_{z_0}^z E_z dz$

$$U^2 - U_0^2 \approx 2U_0 \Delta U$$

$$W = - \int_A^B q \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$C \cdot U_0 \Delta U = - \frac{Nq}{d} U_0 (z - z_0)$$

$$\Delta U = \frac{1}{C \cdot d} Nq (z - z_0)$$

Zeitliche Abhängigkeit des Spannungssignals

$$(z - z_0) = \Delta z = v_{\text{Drift}} \cdot \Delta t$$

$$\Delta u^+ = - \frac{Ne}{Cd} v_{\text{Drift}}^+ \Delta t^+ \leftarrow \text{Ionen}^+$$

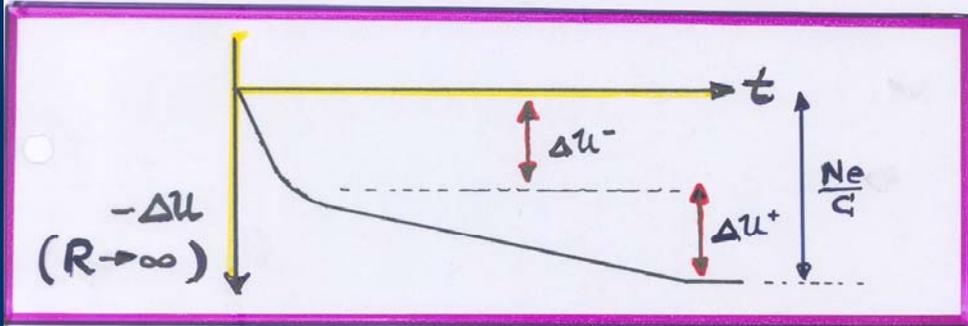
$$\Delta u^- = - \frac{N(-e)}{Cd} (-v_{\text{Drift}}^-) \Delta t^- \leftarrow e^-$$

gleiche Vorzeichen! $\Rightarrow - \frac{Ne}{Cd} v_{\text{Drift}}^- \Delta t^-$

$$e^- \rightarrow \Delta t^- \sim 1 \mu\text{sec}$$

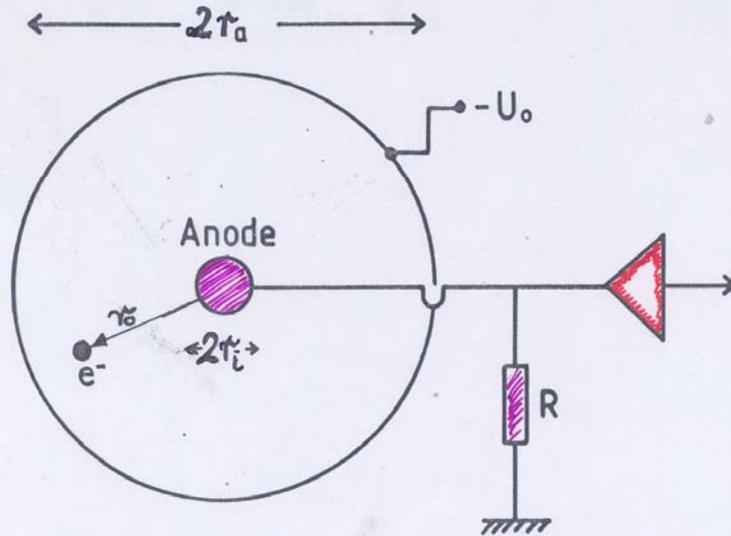
($E \sim 500 \text{ V/cm}$, $d \sim 5 \text{ cm}$)

$$I^+ \rightarrow \Delta t^+ \sim 10^3 \Delta t^-$$



Hinzugabe eines RC-Gliedes mit $\tau \lesssim \Delta t^-$ ergibt "schnellen" Puls annähernd unabhängig vom Ort.

B Proportionalzähler



→ zylindrisches Feld !! → hohe Feldstärke in Drahtnähe

$$E(r) = U_0 \frac{1}{r \ln(r_a/r_i)}$$

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

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

für $r_a/r_i \approx 10^3$, $r_0 \sim r_a/2$

$$\Delta u^+ / \Delta u^- = \frac{\ln 2}{\ln 10^3} \cdot \frac{\ln 10^3}{\ln 500} \approx 0.1$$

Gasverstärkung

Idee: die Feldstärke \vec{E} nimmt zur Mitte mit $\frac{1}{r}$ zu !!
d.h.

- bei extrem kleinen Drahtdurchmessern können sehr !! hohe Feldstärken erreicht werden, so daß die Elektronen ihrerseits zu ionisieren in der Lage sind

typische Werte:

$$r_i \approx 20 \mu\text{m} \quad \rightarrow \quad E \rightarrow 10^4 - 10^5 \text{ V/cm} \quad (\text{in Drahtnähe})$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{kin}} &= e \int_{r_i}^{r_2} E(r) dr \\ &= e U_0 \frac{\ln(r_2/r_1)}{\ln(r_a/r_i)} \end{aligned}$$

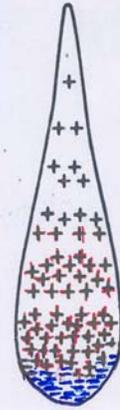
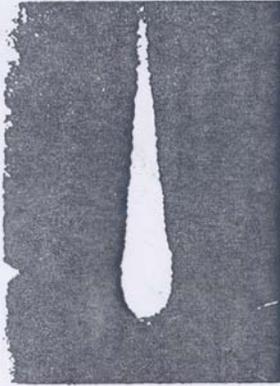
für $\Delta T_{\text{kin}} > E_{\text{ionisation}} \rightarrow$ Sekundärionisation

$$\Delta U = -A \frac{Ne}{C}$$

Gasverstärkungsfaktor
($\sim 10^4 - 10^6$)

Ausbildung einer "Townsend-Lawine"

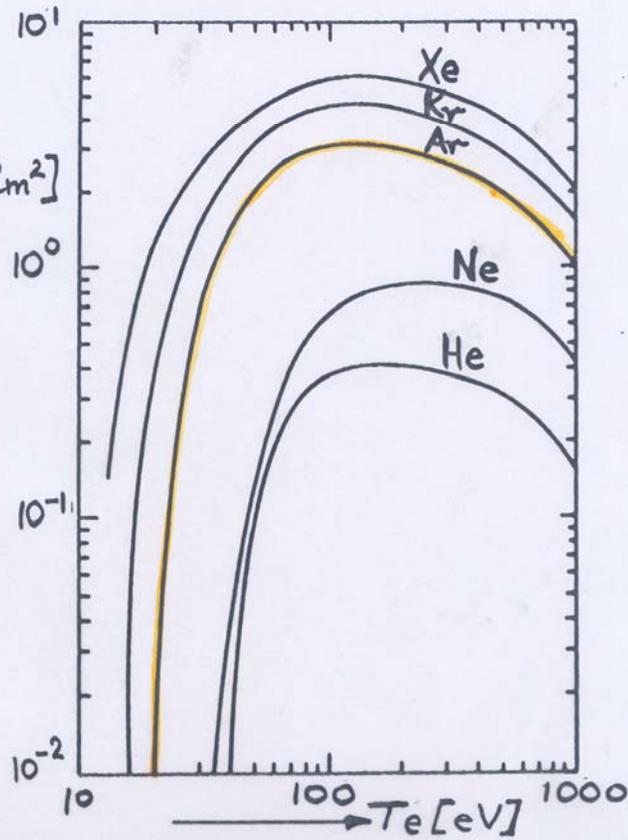
Nebelkammer



Ausbildung der Townsend-Lawine in Drahtnähe

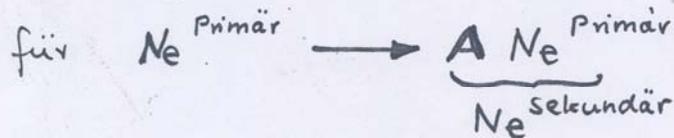
Plasma

! 10^2 Mb
WQ für Elektronen-Stoß-Ionisation



Effekte bei Erhöhung der Spannung U_0 (bzw der Feldstärke)

- Zahl der UV-Photonen im Zählrohr nimmt zu



aus A Elektronen werden $\gamma \cdot A$ Photonen erzeugt.

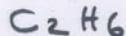
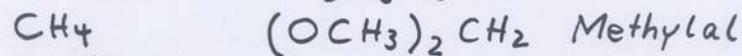
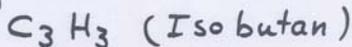
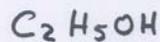
für $\gamma \cdot A \sim 1$



- Photo-Elektronen werden nun überall erzeugt, d.h. Zählrohr befindet sich im „Auslösebereich“ („Geiger-Müller“-Bereich)
- Impuls unabhängig von der Primärionisation (d.h. keine Teilchendiskriminierung)
- Abbruch der Lawine
Feldverminderung am Draht wegen Ladungswolke
oder
Spannungsabfall an der Anode $\Delta U = IR$
($I = \text{Ionenstrom}$)

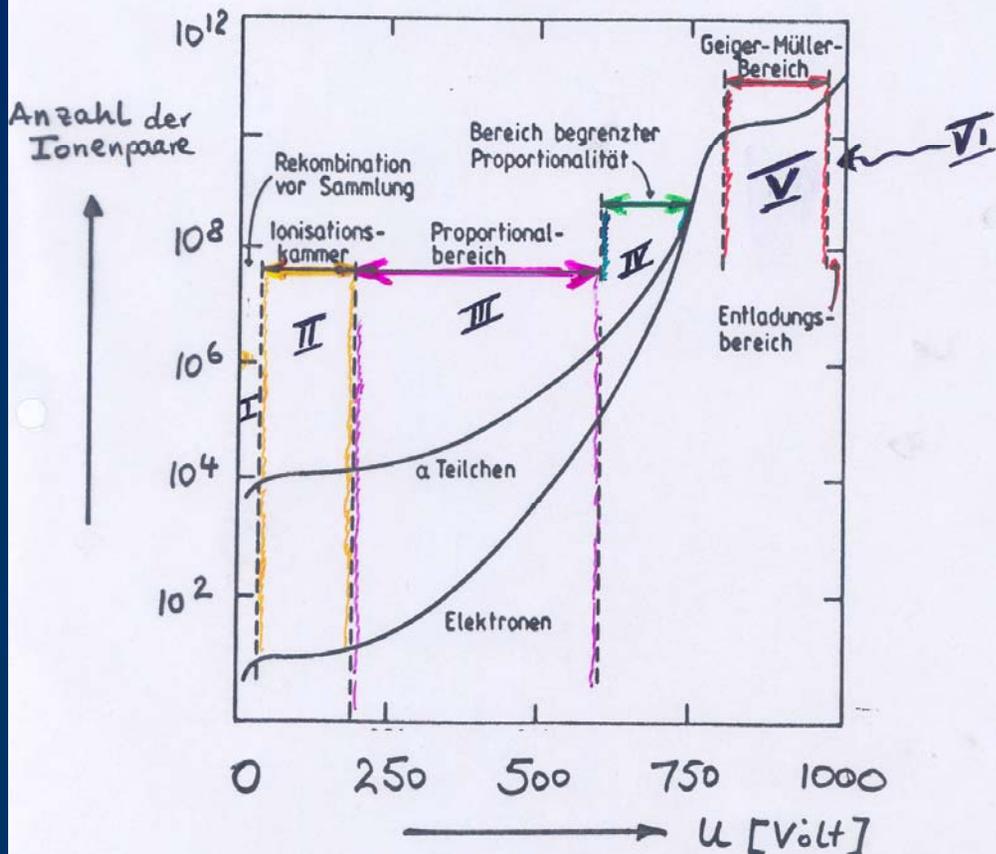
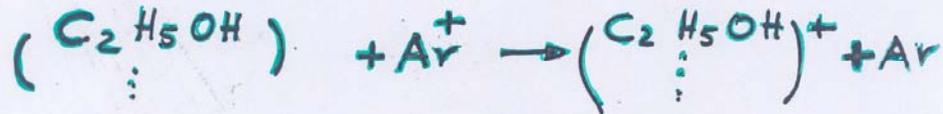
Selbstlöschende Zählrohre

! Zusatz von Löschgasen



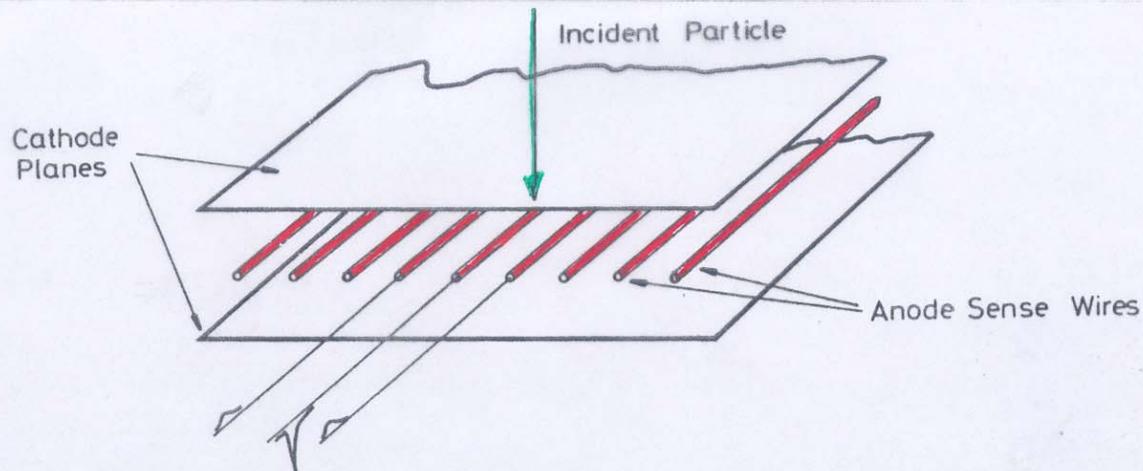
Löschgase

- absorbieren UV Photonen
- verhindern Sekundär-Elektronen-Emission der positiven Ionen an der Anode aufgrund



Wie bekomme ich einen Nobelpreis?

Nehme viele Drähte (Zählrohre)



Feldverteilung

Anoden Drähte

Kathodenfolie

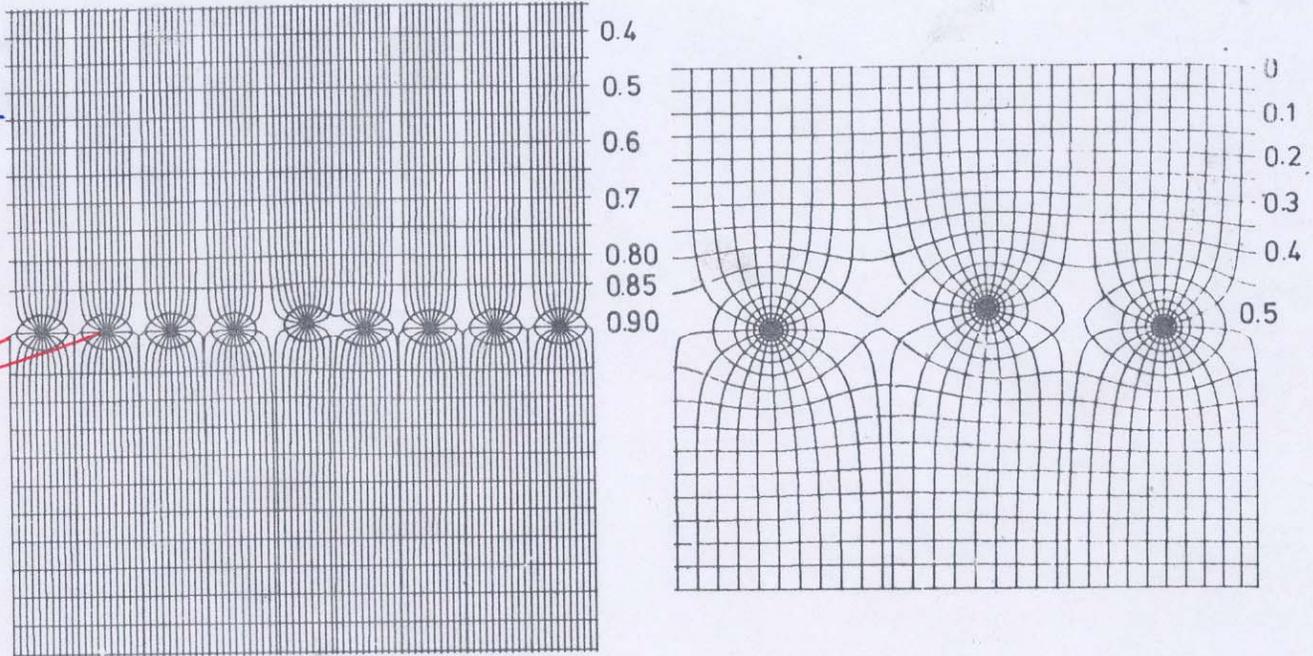


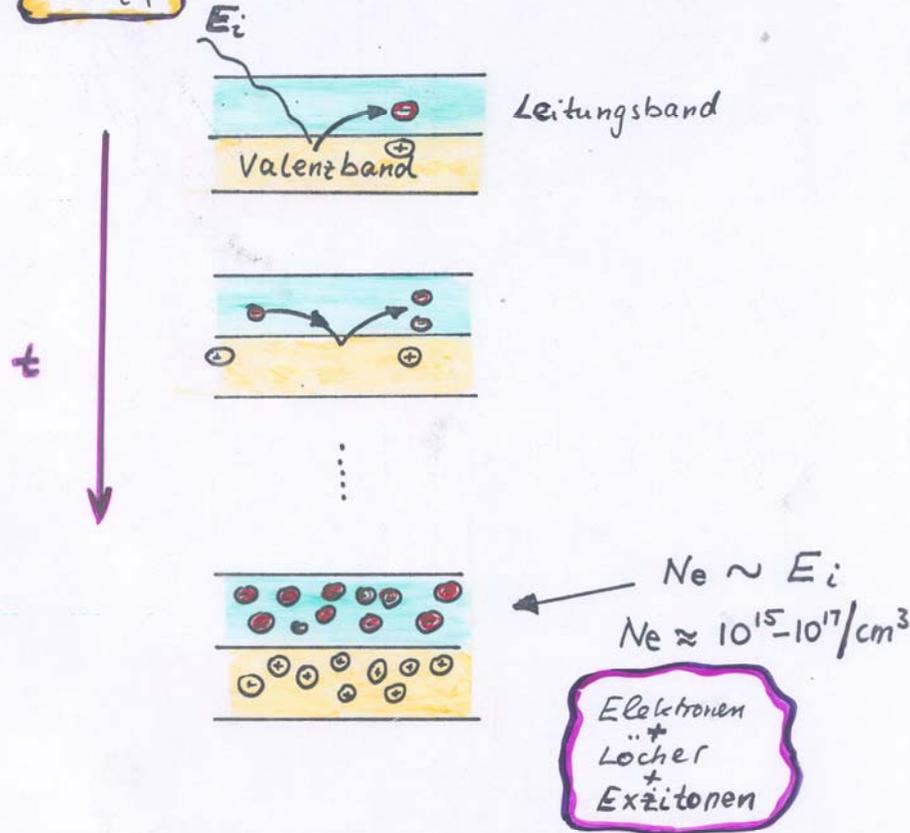
Fig. 6.8. Electric field lines and potentials in a multiwire proportional chamber. The effect of a slight wire displacement on the field lines is also shown (from Charpak et al. [6.16])



Halbleiterzähler

Ionisationskammer im Festkörper

Prinzip



Tonisierungsenergie für Elektron-Loch Paar

- Si : 3.6 eV
- Ge : 2.8 eV
- Gase : 40 eV

← Vorsicht Rauschen !!

Spint. : bis 1000 eV / hv
(typisch 200 eV / hv)

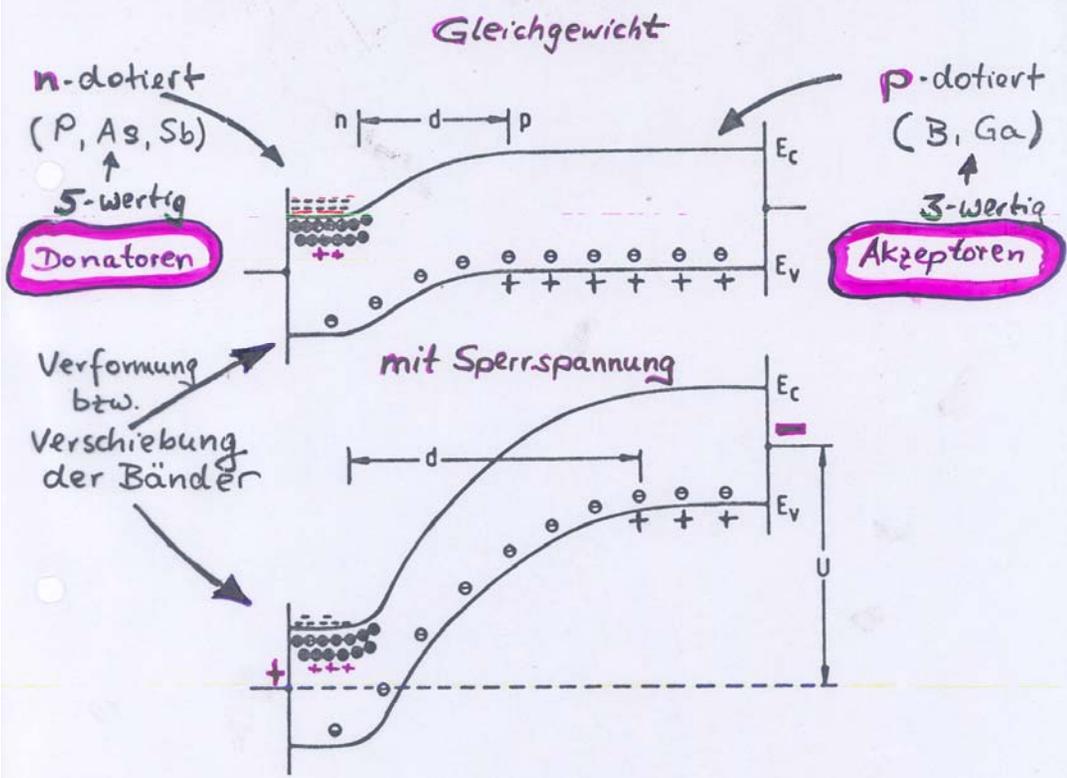
$$\frac{\Delta E}{E} \sim \frac{\sqrt{N}}{N}$$

Aufgabe:

effektive (schnelle) Ladungssammlung
(Minimierung der Rekombination!)

Lösung:

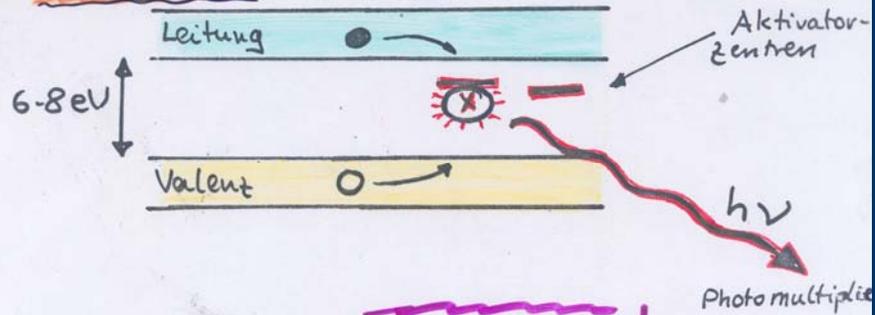
n-, p- Dotierung
Ausbildung einer Sperrschicht mit
hohem Spannungsgradienten



$E \approx 10^6 \text{ V/m}$
 $> t_c \sim 2 \text{ nsec}$

D Szintillationszähler

1. anorganische



typische Materialien (Einkristalle)!

- hygroskop. { NaF (TL)
CsF (TL)
- Bi₄Ge₃O₁₂
(BGO)

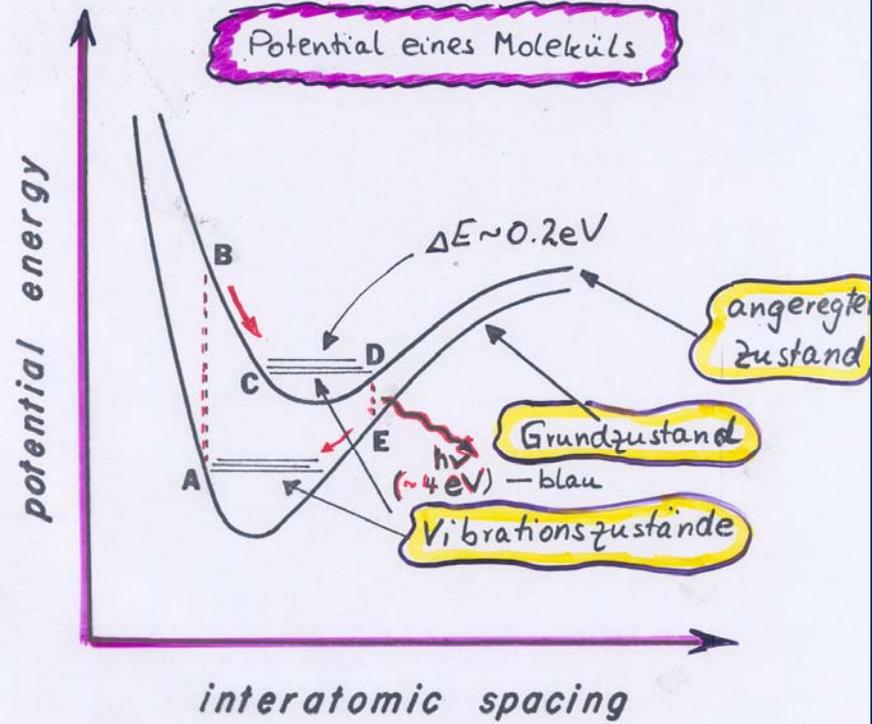
hohe Effizienz für γ 's da Z_{eff} groß

Eigenschaften anorganischer Szintillatoren

Szintillator	NaJ(Tl)	LiJ(Eu)	CsJ(Tl)	Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	Ba F ₂
Dichte (g/cm ³)	3.67	4.06	4.51	7.13	4.9
Schmelzpunkt (°C)	650	450	620		
Abklingzeit (µs)	0.23	1.3	1.0	0.35	0.62 6x10 ⁻⁴
λ_{max} (Emission) (nm)	410	470	550	480	310 225
Ausbeute (Photonen/MeV)	4x10 ⁴	1.4x10 ⁴	1.1x10 ⁴	2.8x10 ³	6.5x10 ³ 2x10 ³
Strahlungslänge X ₀ (cm)	2.59		1.86	1.12	2.1
Brechungsindex n	1.85			2.15	1.56
(dE/dx) _{min} (MeV/cm)	4.8		5.1	8.07	6

2.) organische (Plastik, org. Flüssigkeiten)

hier Lichtemission aufgrund molekularer Übergänge (! $\tau \lesssim 1 \text{ nsec}$)



- Prozeß: A \rightarrow B Absorption der primären Energie
- B \rightarrow C Phonon übergänge
- D \rightarrow E Strahlung - Licht
- E \rightarrow A Phonon übergänge

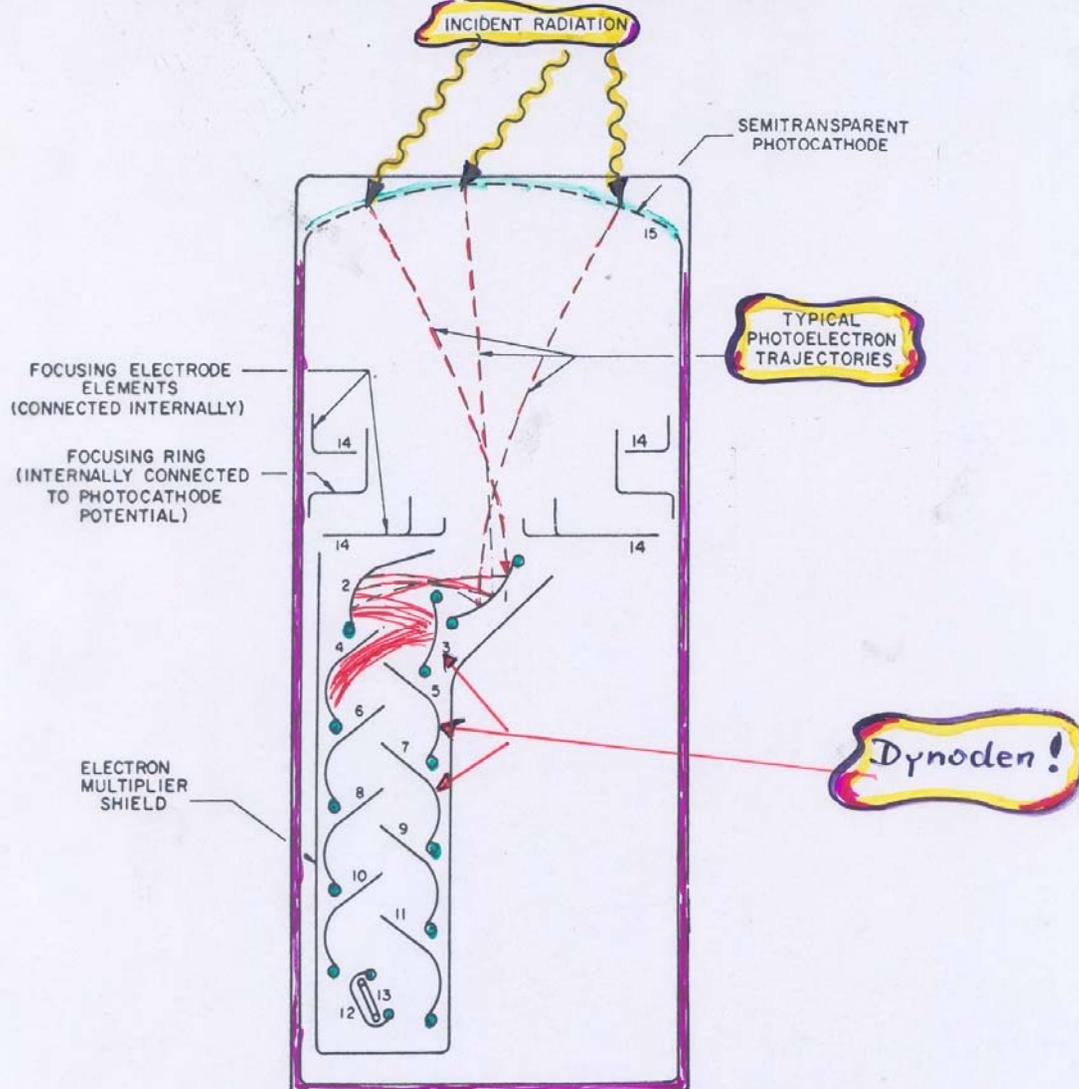
Wellenlängenschieber (1%)

Verringerung der Selbstabsorption!

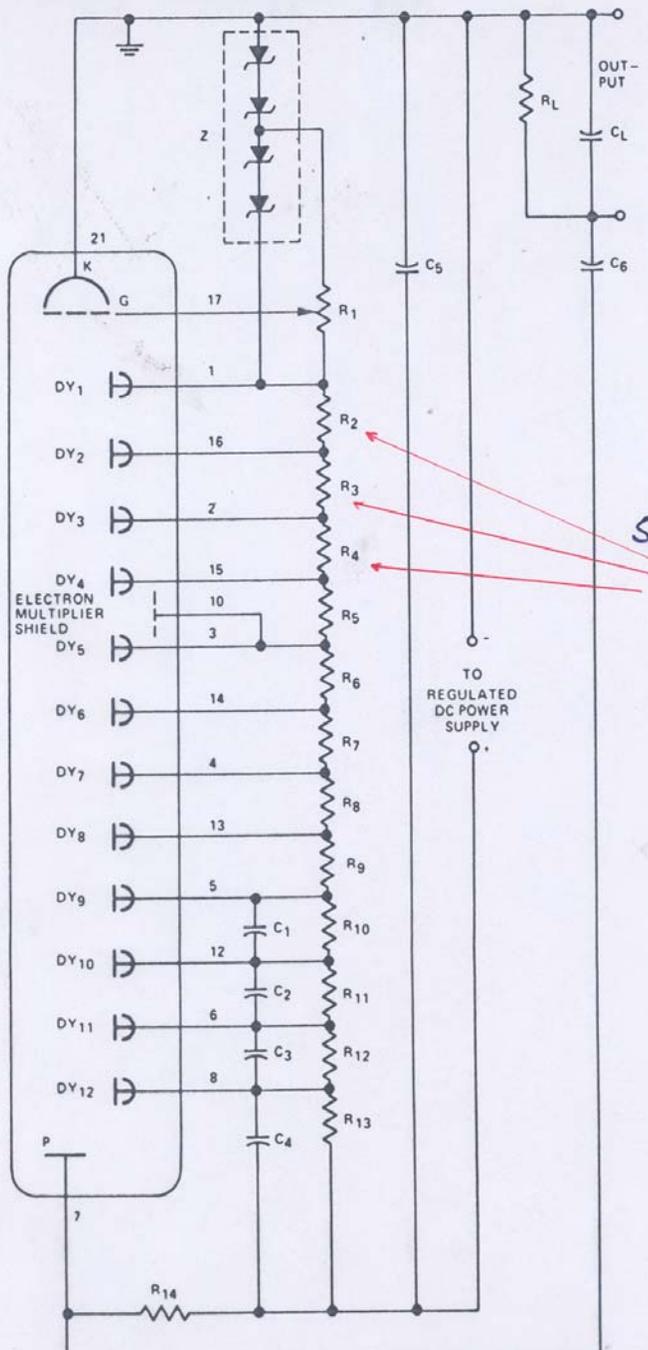
Licht "verstärkung"

Photomultiplier (PMT)

Schematic diagram of the RCA 8575 photomultiplier tube.
(Courtesy of RCA, New Products Division, Lancaster, PA.)



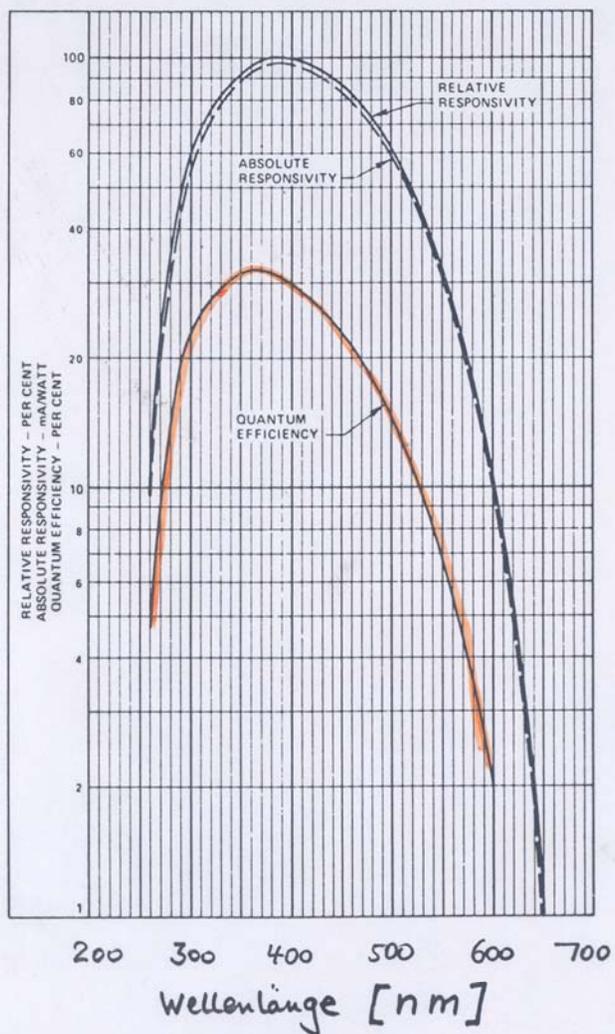
Typical photomultiplier tube base circuit. (Courtesy of RCA, New Products Division, Lancaster, PA.)



Blockschaltbild

Spannungsteiler

Quantenausbeute eines PM



- Design Werte für einen Plastikszintillator:
- ➔ Energieverlust : 2 MeV/cm
 - ➔ Szint.-Effizienz : $1 \text{ h}\nu / 100 \text{ eV}$
 - ➔ Sammel-Ausbeute : $< 10\%$
 - ➔ Quantenausbeute : $\sim 25\%$

500 $\frac{\text{ph.e.}}{\text{cm}}$
 $\Delta E \sim \sqrt{N} !!$

Spezielle Anwendung von Szintillatoren

Phoswich-Detektoren, kombinierte $\Delta E/E$ Detektoren

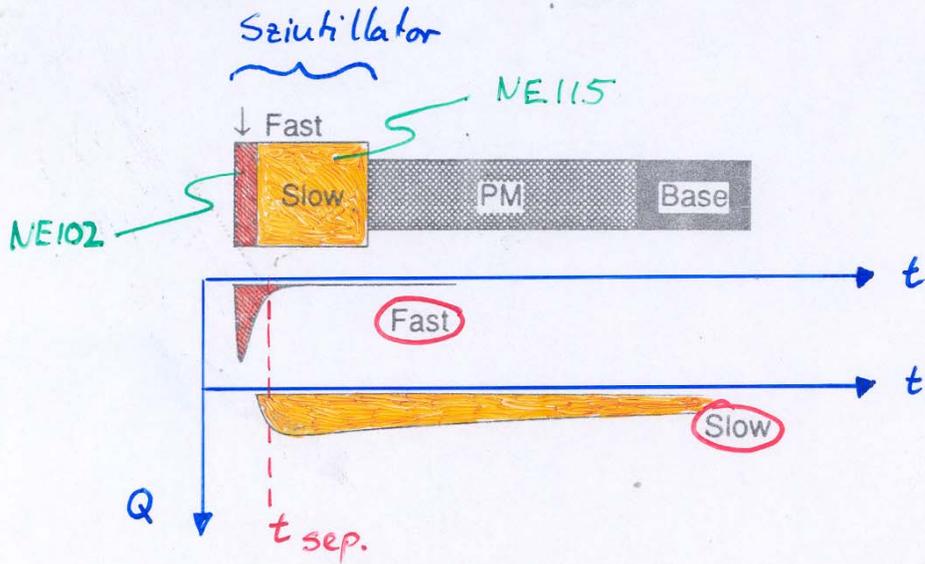
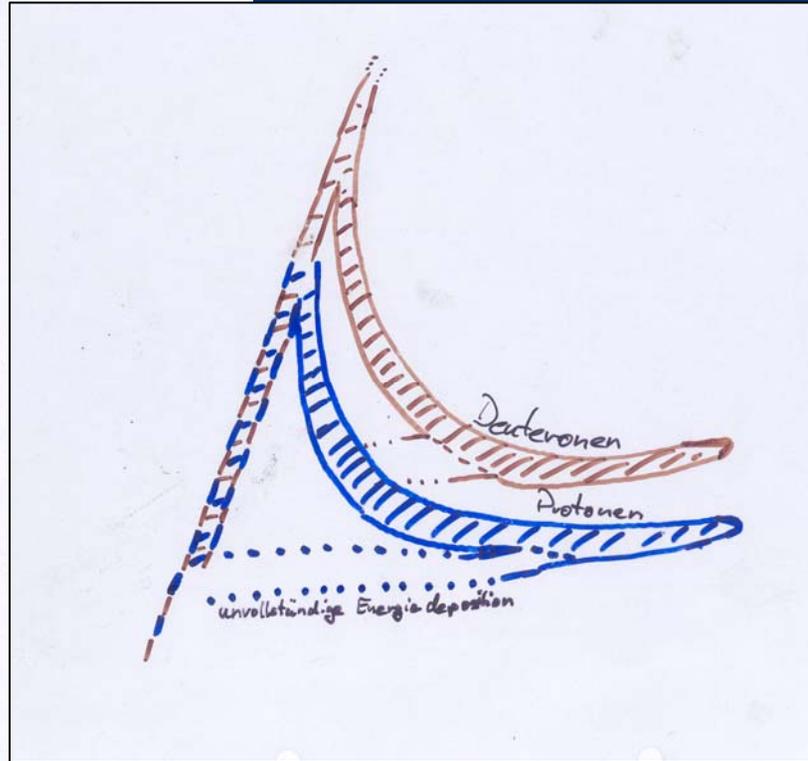


Figure 4.2: Principle of operation of the phoswich detectors.



Integration der Ladung Q für

$t \leq t_{sep.} \rightarrow \Delta E - \text{Signal}$
Teilchendiskriminierung

$t > t_{sep.} \rightarrow E - \text{Signal}$
Prozess, Kinematik

elastische Streuung von \vec{p} an Deuteronen

