

## 5. Detektoren

### Elementare Beobachtungsgrößen für Teilchen

- Anzahl von Teilchen → Fluss, Aktivität, ...
- Zeitpunkt des Teilchendurchgangs → Lebensdauer, Geschwindigk.
- Ort " " → Bahkurve/Trajektorie
- Physikalisch bedeutsame Größen von Teilchen
- Impuls  $\vec{p}$  z.B. aus Krümmungsradius  $R$  der Trajektorie  
im Magnetfeld  $\vec{B}$
- $| \vec{p} | = q \cdot ( \vec{B} ) \cdot R$
- in praktischer Einheit:  $p [GeV/c] = 0,3 \cdot B [T] \cdot R [m]$
- Energie E z.B. durch Totalabsorption in Materie
- Identität z.B. aus  $E, \vec{p}: m^2 = E^2 - \vec{p}^2; \langle \frac{dE}{dx} \rangle, \vec{p}; \theta_c, \vec{p}$  → Kalorimeter

\* Registrierbare Signale von Teilchen

► Ionisation → Messung der Ionisationsrate

► Anregung → Sichtbarkeit Licht

Fluoreszenz (schnell, da niedriger Multipol)

Phosphoreszenz (langsam, da höheren Multipol)

► Cerenkov-Strahlung → Licht, v.a. im blauen Spektralbereich

► - - .

Nachweis von Licht häufig durch Lichtumwandlung in Ladungssignal, d.h. Photoeffekt ( $\rightarrow$  Photokathoden)

## 5.1 Gargefüllte Detektoren

- Vorüberlegung zur Größe der Ionisationsladung

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = 2 \frac{M_e V_{cm}^2}{g}, \quad S_{Luft} = 7,2 \text{ g/cm}^3 \Rightarrow \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle_{Luft} = 34 \text{ keV/cm}$$

mittlere Energie für  $e^-$ -Ion-Entzerrung in Gasen:  $E_{Ion} \approx 30 \text{ eV}$

$$\Rightarrow \text{Ladungsmenge/cm: } \frac{dN_{Ion}}{dx} = \frac{34 \text{ keV/cm}}{30 \text{ eV}} = 80 \frac{e^- \text{-Ion}}{\text{cm}}$$

entspricht

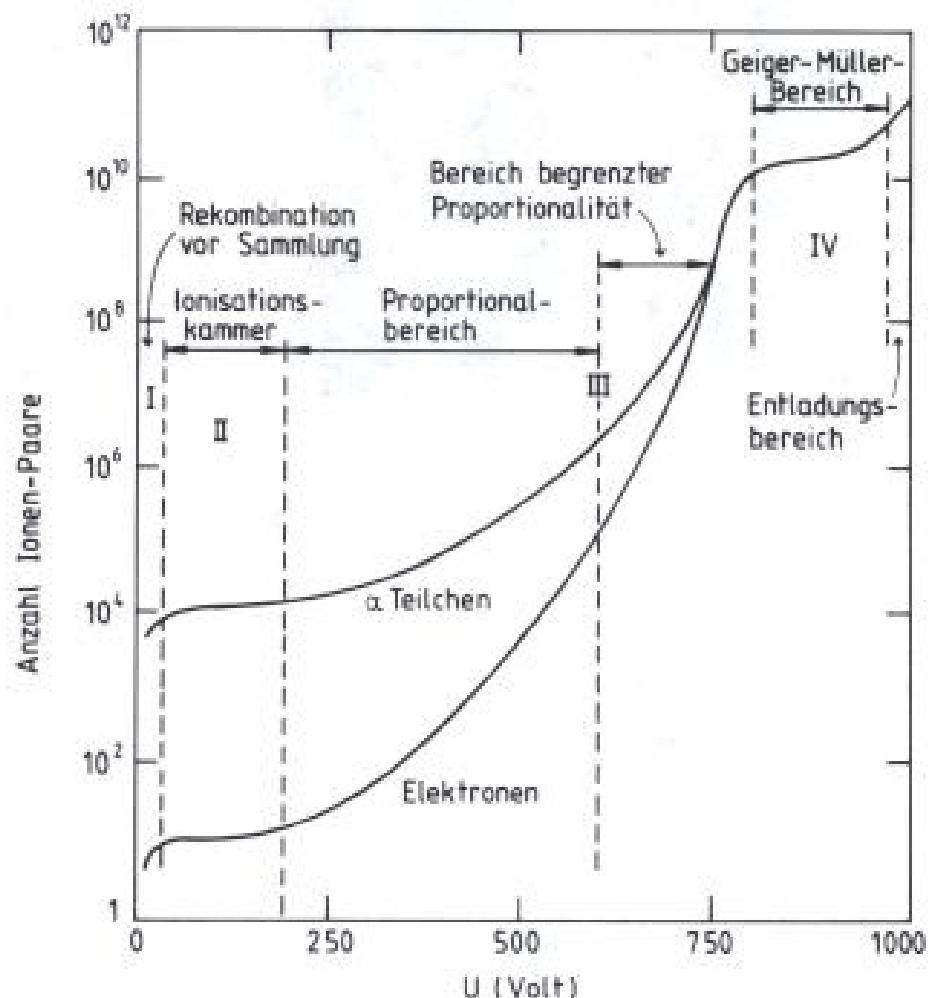
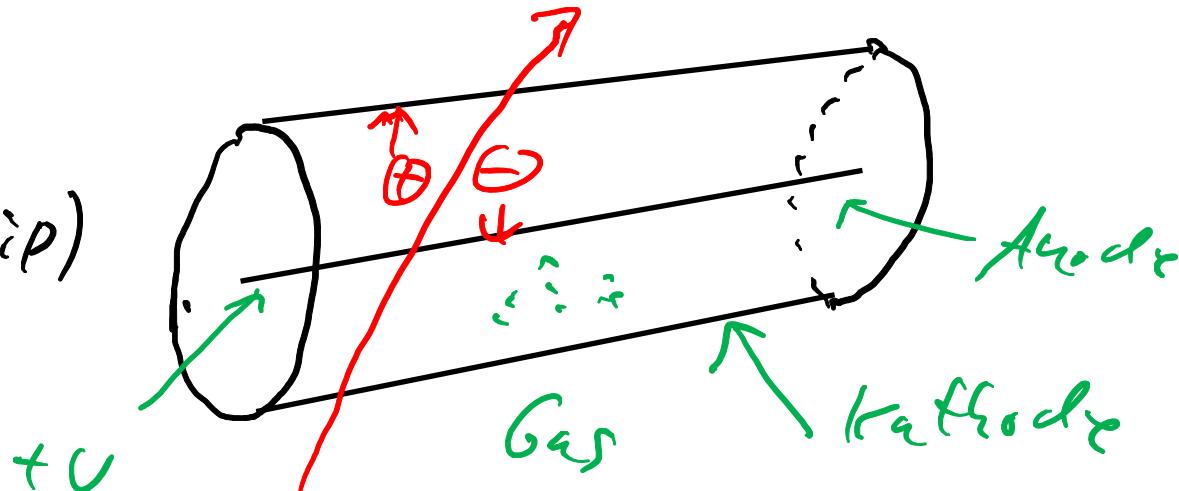
$$\boxed{\frac{dQ_{ion}}{dx} = 0,013 \frac{fC}{cm}}$$

für Gase unter  
Normaldruck  
und Temperatur

$\Rightarrow$  i.a. erhebliche Signalverstärkung notwendig

## • Detektorprinzip

(Geiger-Müller-Prinzip)



## • Ionisationskammer

Ladungsanreicherung ohne Verstärkung

## • Proportionalbereich

→ Messsignal proportional zur ursprünglichen Ladung

→  $dE/dx$  - Messung

Signalverstärkung durch hohes E-  
Feld am Anoden draht

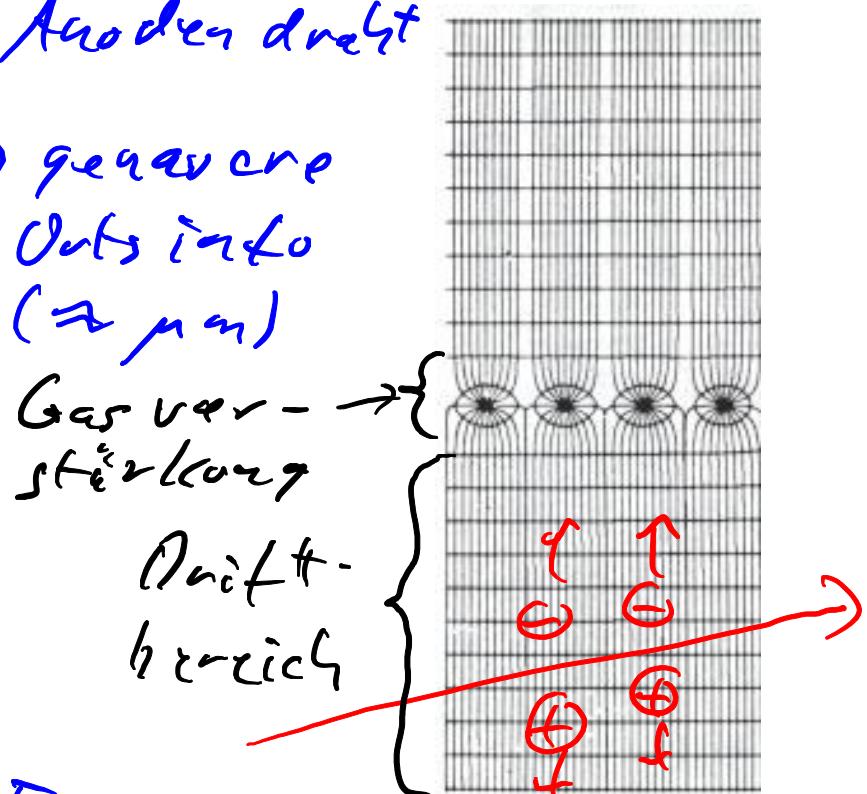
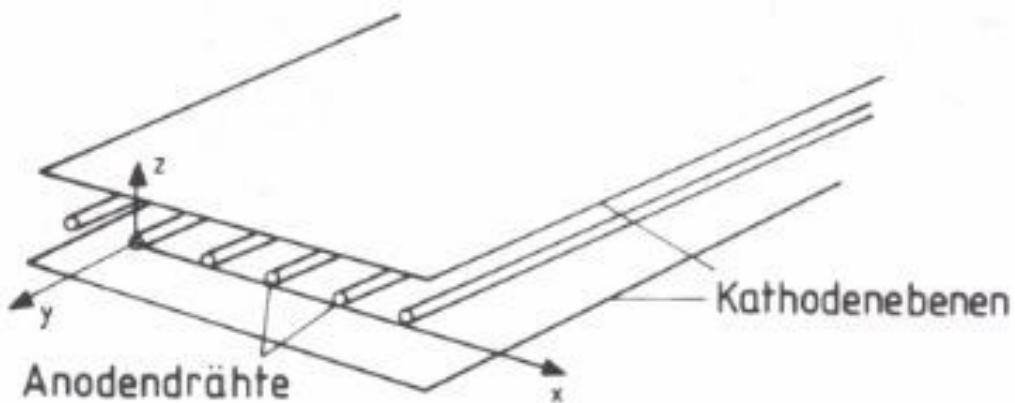
## • Gasverstärkung

## • Auslösebereich

Signal unabh. von urspr. Ladung

## 5.1-1 Ortsmessung und Impulsmessung mit Gaszähler

- Konzept:
  - Viele benachbarte Anoden drähte -> groÙe Ortsinfo ( $\approx \text{cm}$ )
  - Messung der Zeitdauer  $\Delta t$  der Ladungsbewegung (Drift) von Teilchen durchgang zum Anodenröhrt
$$\rightarrow \text{weg } \Delta z = v_{\text{drift}} \cdot \Delta t \rightarrow \text{genauere Ortsinfo} (\approx \mu\text{m})$$



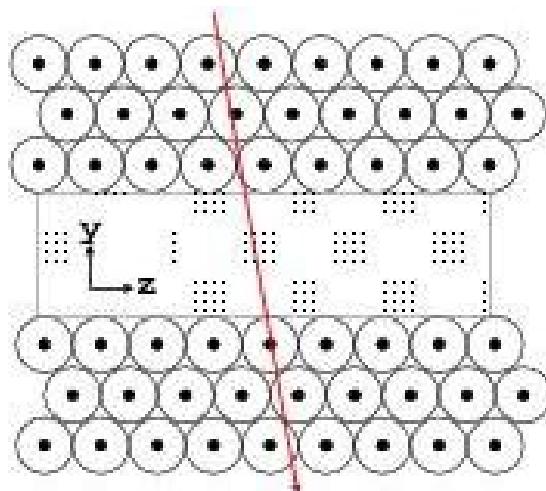
- Realisierungen in vielfältigen Formen:
  - Planare/zylindrische Detektoren, Drift/Jetkammern, Time Projection Chamber (TPC), ...

- Spurdetektor: Mehrere Ortsmessungen entlang einer Teilchenbahn  
→ Rekonstruktion der Teilchenbahn
- Impulsmessung: Krümmung  $R$  der Spur im Magnetfeld  
→  $p = q \cdot B \cdot R$

Impuls auf Lösung:

$P_T$ : Komponente  $\perp$  B-Feld

Glückstern-Formel:



Beispiel

ATLAS-  
Muondetektor

$$\frac{\Delta R}{P_T} = \frac{\Delta \text{Ort}}{0.3 \cdot B \cdot L^2} \sqrt{\frac{720}{N+4}} \cdot P_T$$

Spurlage

Anzahl  
äquidist-  
enter  
Messpunkte

## 7 5.2 Halbleiter-Detektoren

Vorüberlegung zur Größe der Ionisationsladung

$$\rho_{Si} = 2,3 \text{ g/cm}^3$$

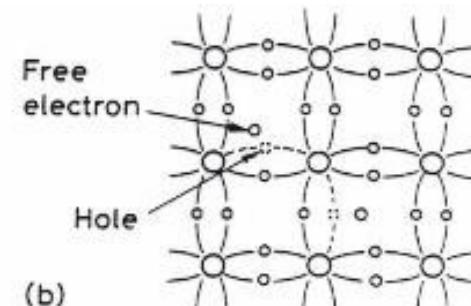
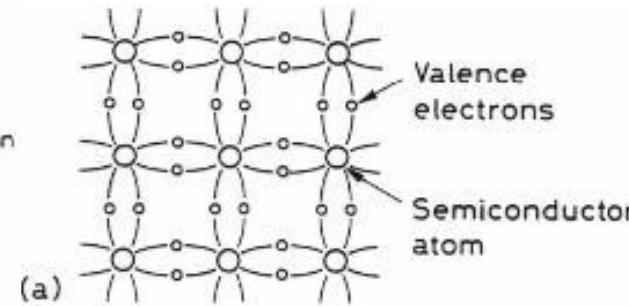
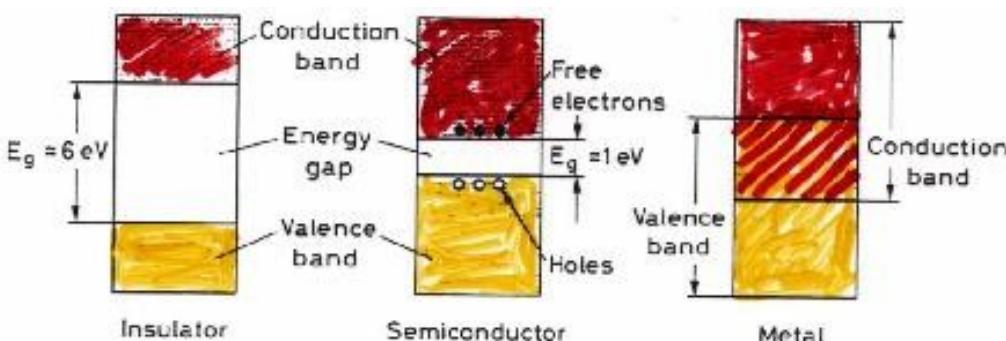
Mittlere Energie für  $e^-$ -Löch-Paar in Si:  $E_{Si} = 3,6 \text{ eV}$

$$\Rightarrow \frac{dQ_{ion}}{dx} = 170 \frac{\text{eC}}{\text{cm}} \quad \text{direkt messbares Signal}$$

Isolator Halbleiter



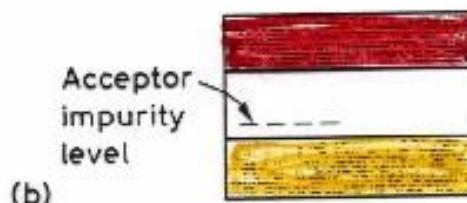
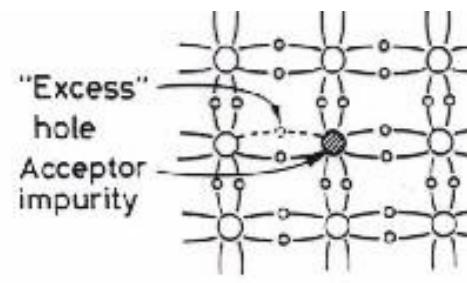
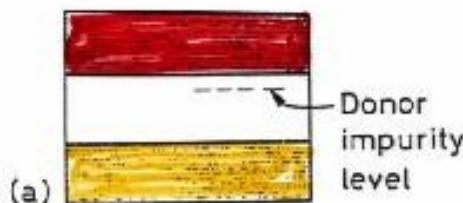
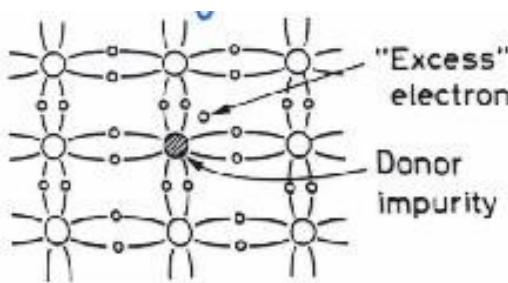
Metall



• gezielter Verunreinigungen (Dotierung)

n-dotiert

mit 5-wertigen  
Element  
(z.B. Phosphor)

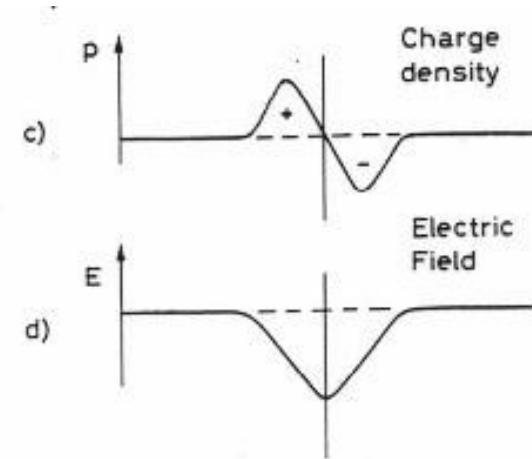
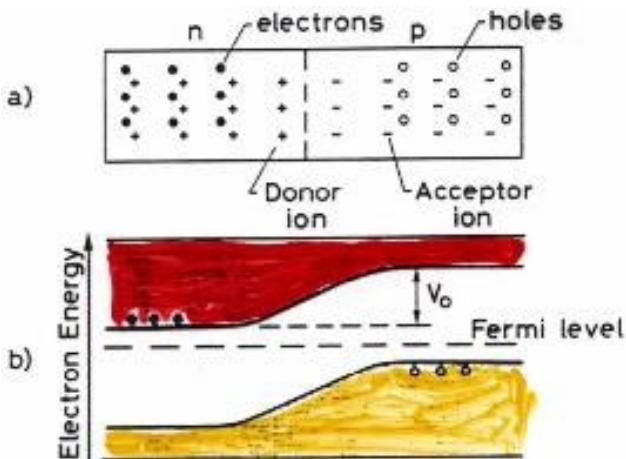


mit 3-wertigen  
Element  
(z.B. Beryllium)

• p-n-Übergang (Diode)

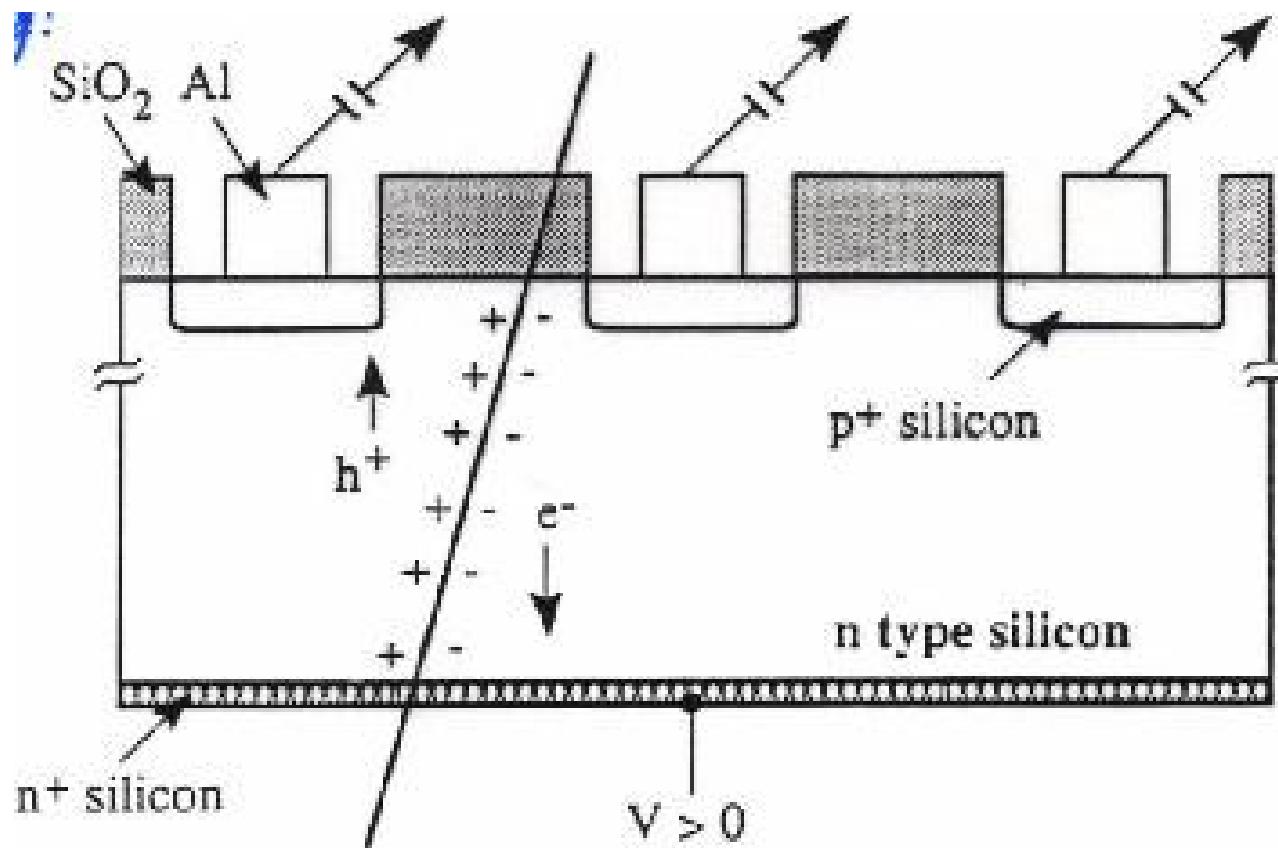
Ladungsträgerverarmte Zone (depleted) ist sensitiver Bereich

statisches  
el. Feld  
→ e-h-Loch-  
Paare  
Tetraedert  
+ messbares  
Signal



Ionen rausge-  
erzeugter  
statischer  
Raumladung  
→ el. Feld

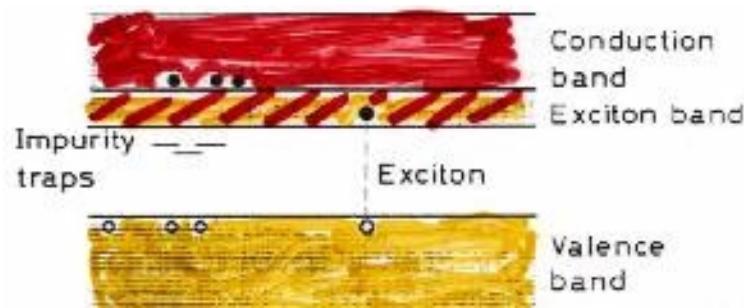
## • Detektorprinzip (Streifen / Pixeldetektor)



Mikrostrukturierung mit  $p^+$ -Streifen / Pixeln und  
Aluminiumkontakte → Ortsinfo aus Streifen / Pixel-  
positioning

## 5.3 Szintillatoren $\rightarrow$ Zeitmessung

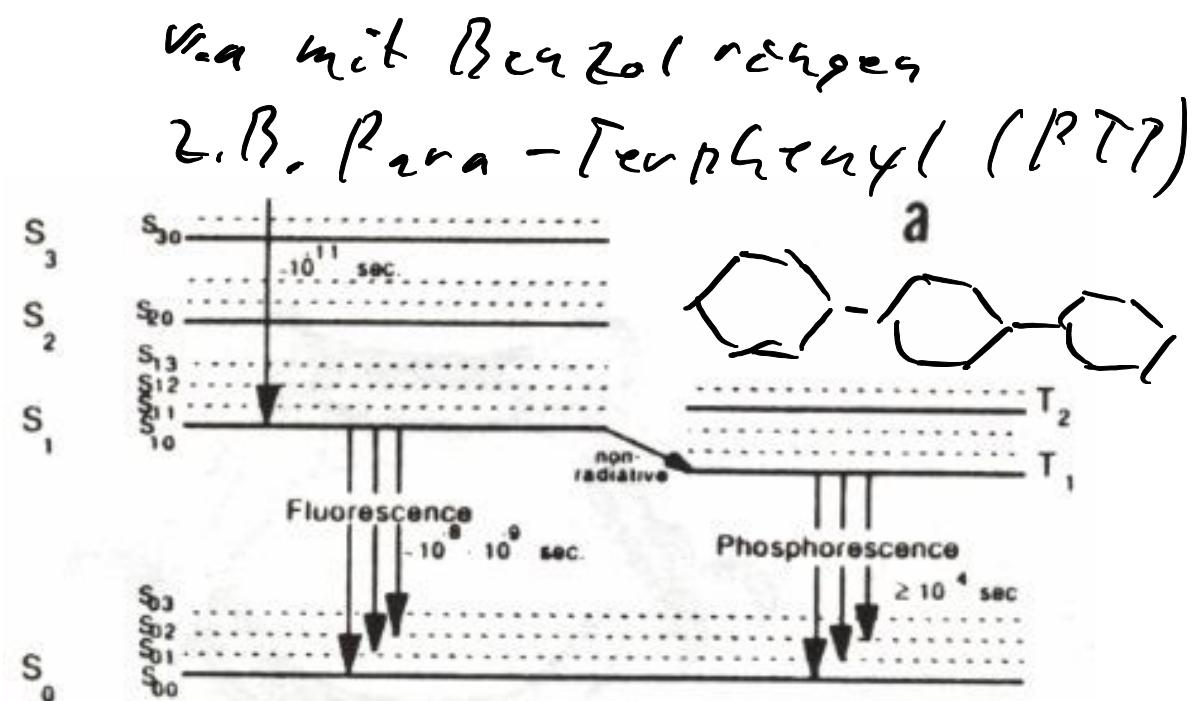
- Nach Ablregung von Material durch Teilchenstrahl tritt bei Abregung Lichtemission auf  $\Leftrightarrow$  Szintillation
- Szintillation tritt auf in anorganischen Kristallen und organischen Stoffen



Bsp. Na I(71)

$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO)

$\text{PbWO}_4$

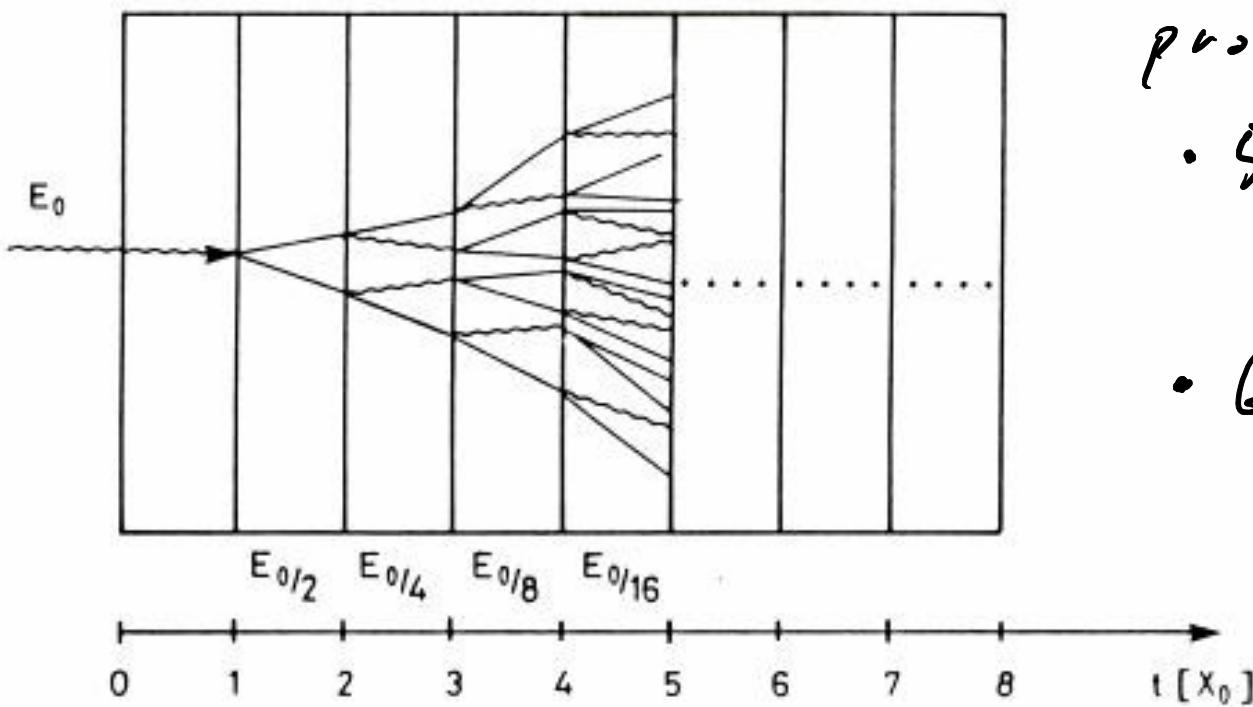


- Kurze Antwortzeit: einige 100 ps bis 1 μs  $\rightarrow$  Zeitmessung

## 5.4 Energiemessung = Kalorimeter

- Energiemessung durch Totalabsorption eines Teilchens  
 → Kalorimeterprinzip

Beispiel: Kalorimeter für  $e^-, e^+, \gamma$



pro  $X_0$

- 54% Paarbildungswahrscheinlichkeit
- 63% Bremsstrahlungswahrscheinlichkeit

→ Abschauzung von  $e^-, e^+, \gamma$  bis  $E < E_c$  (kritische Energie)

- pro  $X_0$ :  $\approx$  Verdopplung der  $e^-, e^+, \gamma$ : Anzahl:  $N(t) = 2^t$   
typische  $e^-, e^+$  & Energie:  $E(t) = \frac{E_0}{N(t)} = E_0 2^{-t}$
- Schauermaximum:  $E(t_{\max}) = E_0 2^{-t_{\max}} \stackrel{!}{=} E_c$
- $t_{\max} = \ln_2(E_0/E_c) + \begin{cases} 0,5 & \gamma \\ -0,5 & e^-, e^+ \end{cases}$

- Gesamtzahl von Teilchen im Schauer

$$S = \sum_{t=0}^{t_{\max}} N(t) = \sum_{t=0}^{t_{\max}} 2^t = 2^{t_{\max}+1} - 1 \approx 2^{t_{\max}+1}$$

mit  $E_0/E_c = 2^{t_{\max}}$

$$S = 2 \frac{E_0}{E_c} \sim E_0 \quad \text{Map für } E_0$$

- Energieresolvergenzgenauigkeit

$$\frac{\Delta E}{E} \sim \frac{1}{S} = \frac{1}{1S} \sim \frac{1}{E}$$

Bauformen:

- \* homogene Kalorimeter

(Absorber = Detektor, z.B.  $\text{BCO}, \text{PbWO}_4, \dots$ )

- \* Sampling-Kalorimeter

(abwechselnd passiver Absorber und aktive Detektorschichten)

Kalorimeter für  $p, \gamma, \pi^\pm, K^\pm, \bar{K}^\pm, \dots$

$\rightarrow$  Schacherbildung durch Teilchen-Kugel-Wechselwirkung

$\rightarrow$  Wechselwirkungslänge  $\lambda$ ,  $\lambda \gg x_0$

