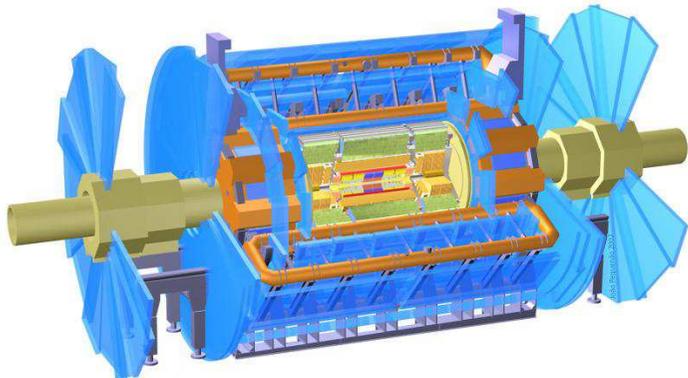
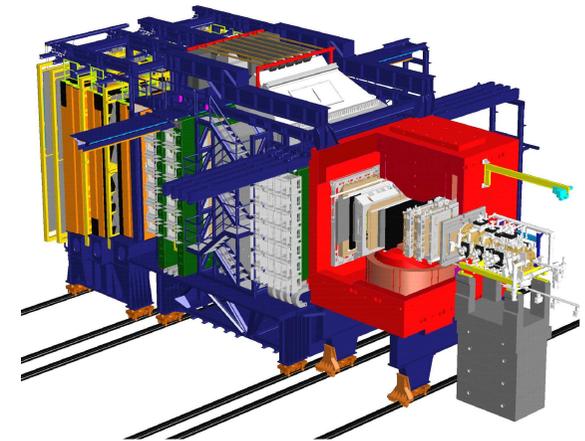


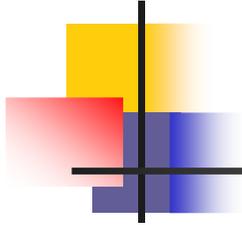
Teilchendetektoren und Experiment an ELSA

Thema 2: Detektoren und Nachweis von Teilchen



von Max Becker





Gliederung

1. Wechselwirkung von Teilchen mit Materie
 - a) für Photonen
 - b) für geladene Teilchen
 - c) elektromagnetische Schauer

2. Detektoren für:
 - a) Ortsbestimmung
 - b) Impulsbestimmung
 - c) Energiebestimmung

I.a Wechselwirkung von Photonen mit Materie

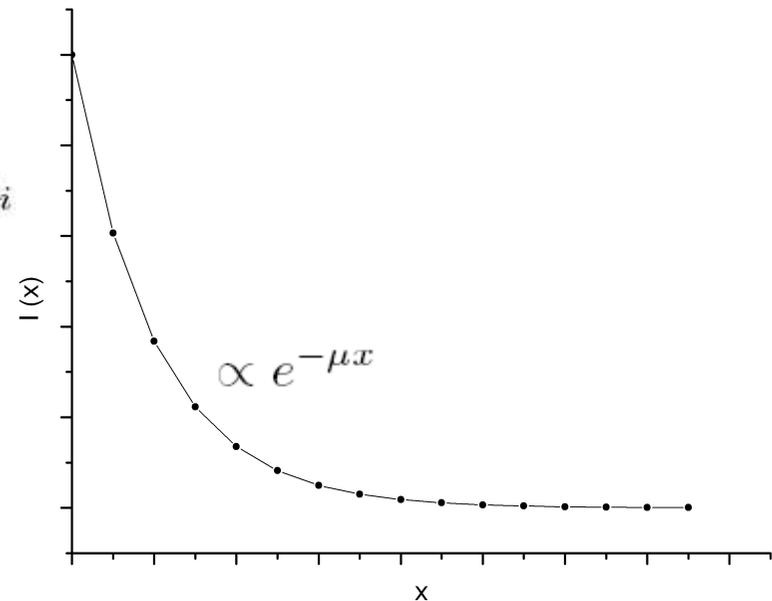
Photon → geladene Teilchen → Ionisation → Detektorsignal

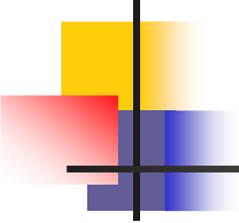
Unterschied zu geladenen Teilchen:

Photon entweder vollständig absorbiert oder unter großem Winkel abgelenkt

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad \text{wobei} \quad \mu = \frac{N_A}{A} \cdot \sum_i \sigma_i$$

σ_i : Wirkungsquerschnitt des Prozesses i





Photoeffekt

γ -Teilchen schlägt unter voller Absorption Elektron aus
Atombindung: $\gamma + Atom \rightarrow Atom^+ + e^-$

NUR bei gebundenen Elektronen möglich aus
Impulserhaltungsgründen

à Kern übernimmt bis zu 80% des Rückstoßes

$$E_e = E_\gamma - E_{Bindung}$$

Wirkungsquerschnitt: $\sigma_{Photo} \propto \frac{Z^5}{E_\gamma^2}$

Dominanter Energiebereich: Ionisationsenergie $\leq E_\gamma \leq 100keV$

Photoeffekt

Nach Photoeffekt:

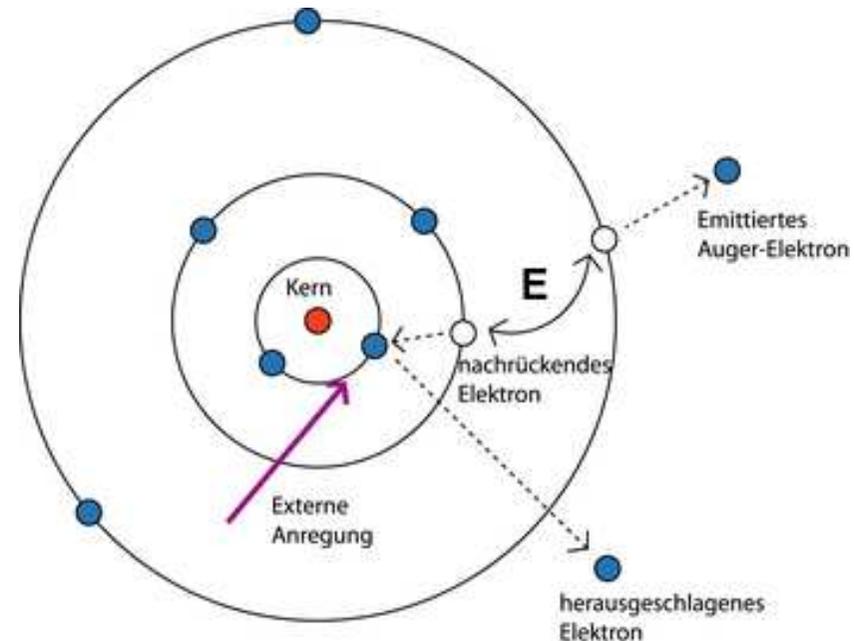
Auffüllen der Fehlstelle in innerer Schale durch Elektron

1) Röntgenstrahlungsemission

à Charakteristisch
für Material

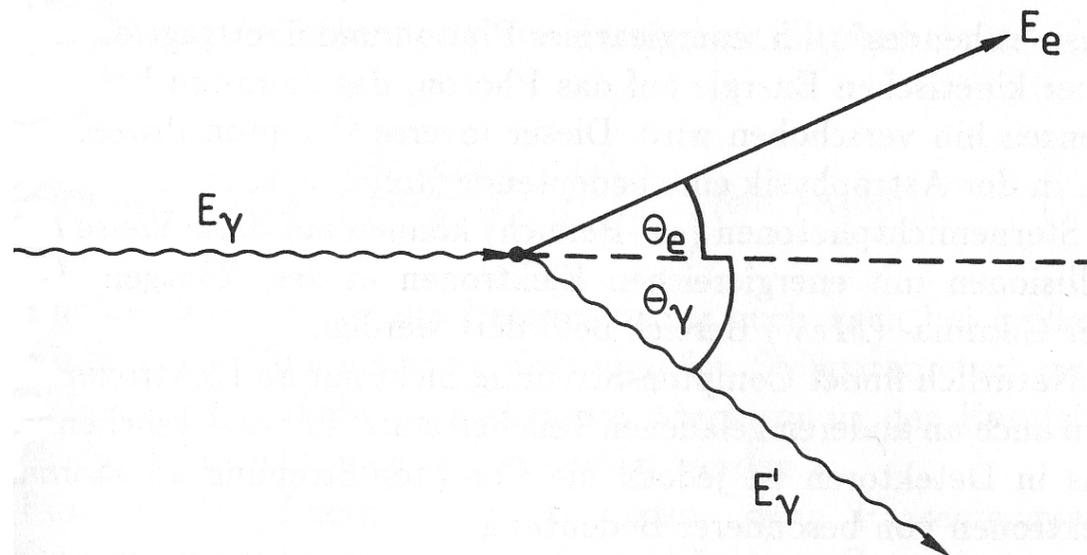
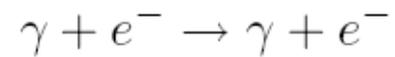
2) Auger-Effekt:

$$E_{Auger} < E_e$$



Compton-Effekt

Elastische Streuung eines γ -Teilchens mit einem freien Elektron



Compton-Effekt

$$\frac{E'_\gamma}{E_\gamma} = \frac{1}{1 + \epsilon \cdot (1 - \cos(\Theta))}$$

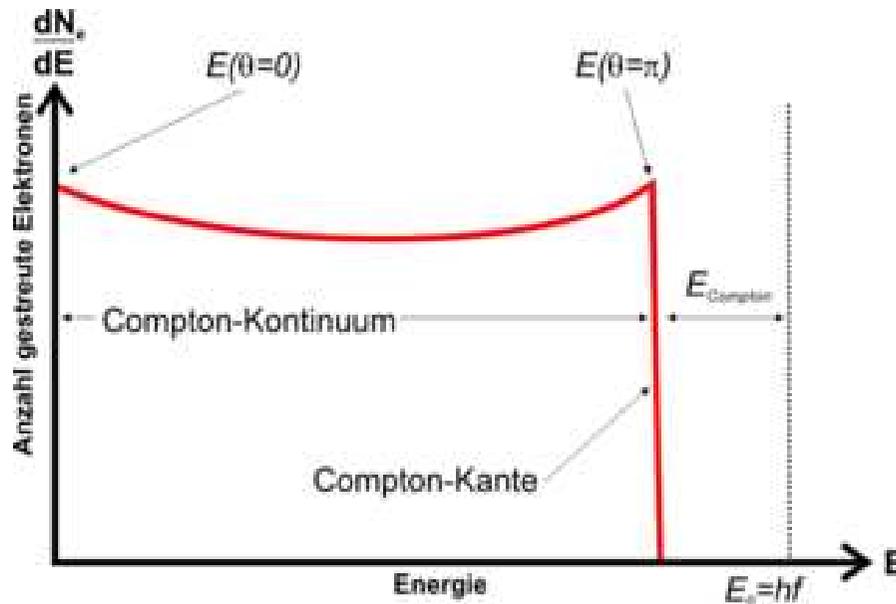
mit

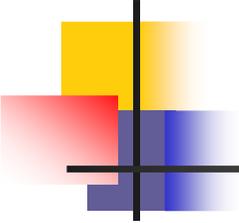
$$\epsilon = \frac{E_\gamma}{m_e c^2}$$

reduzierte
Photonenenergie

$$E_e = E_\gamma - E'_\gamma$$

Rückwärtsstreuung ($\Theta = \pi$) à maximaler Energieübertrag
auf Elektron (Compton-Kante)





Compton-Effekt

Wirkungsquerschnitt: $\sigma_{Compton} \propto \frac{Z}{E_\gamma}$

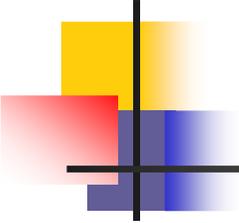
Dominanter Energiebereich: $50keV < E_\gamma < 5MeV$

Thomson- oder Rayleigh-Streuung:

Niederenergetischer Grenzfall

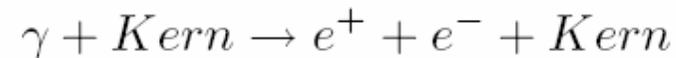
à γ -Teilchen streut elastisch (ohne Energieverlust)

à Nur Richtungsänderungen



Paarbildung

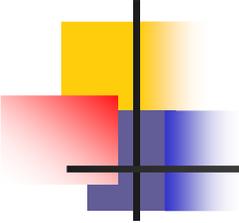
Erzeugung von Elektron-Positron-Paaren
durch γ -Teilchen im Atomcoulombfeld



γ -Teilchen muss Energie
für Ruhemasse von den beiden Teilchen
+ Rückstoßenergie auf den Kern aufbringen

$$E_\gamma \geq 2m_e c^2 + 2 \cdot \frac{m_e^2}{m_{\text{Kern}}} \cdot c^2$$

Mit $m_{\text{Kern}} \gg m_e$ à $E_\gamma \geq 2m_e c^2 \approx 1,05 \text{ MeV}$



Paarbildung

Wirkungsquerschnitt:

$$\text{Bei } 1 \ll \epsilon < \frac{1}{\alpha \cdot Z^{\frac{1}{3}}} : \quad \sigma_{Paar} \propto Z^2 \cdot \ln(\epsilon)$$

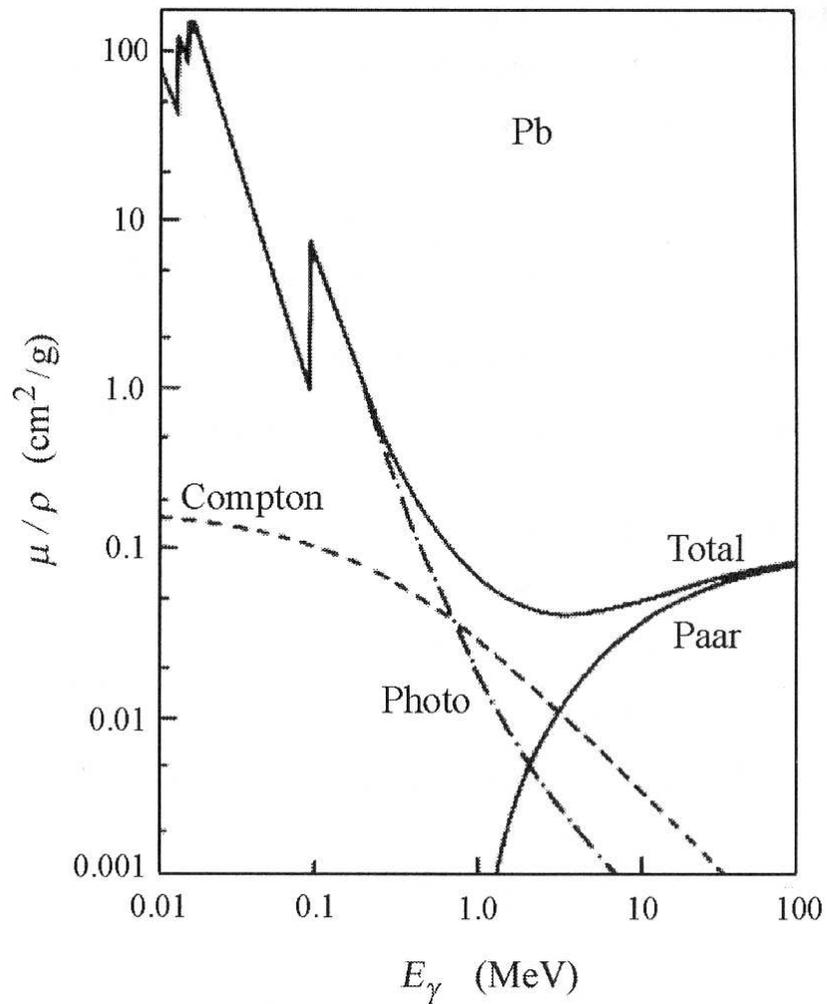
$$\text{Bei } \epsilon \gg \frac{1}{\alpha \cdot Z^{\frac{1}{3}}} : \quad \sigma_{Paar} \propto Z^2 \cdot \ln(Z^{-\frac{1}{3}})$$

à „Screening“: Bei großen Energien ist Paarbildung schon im äußeren Kerncoulombfeld möglich (Kernladung abgeschirmt)!

à Wirkungsquerschnitt hat energieunabhängigen Grenzwert

Dominanter Energiebereich: $E_\gamma \gg 1\text{MeV}$

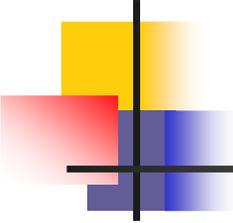
Zusammenfassung



$$\sigma_{Photo} \propto \frac{Z^5}{E_\gamma^{\frac{7}{2}}}$$

$$\sigma_{Compton} \propto \frac{Z}{E_\gamma}$$

$$\sigma_{Paar} \propto Z^2 \cdot \ln(\epsilon)$$



I.b Wechselwirkung von geladenen Teilchen mit Materie

Geladene Teilchen verlieren bei Durchgang durch Materie Energie:

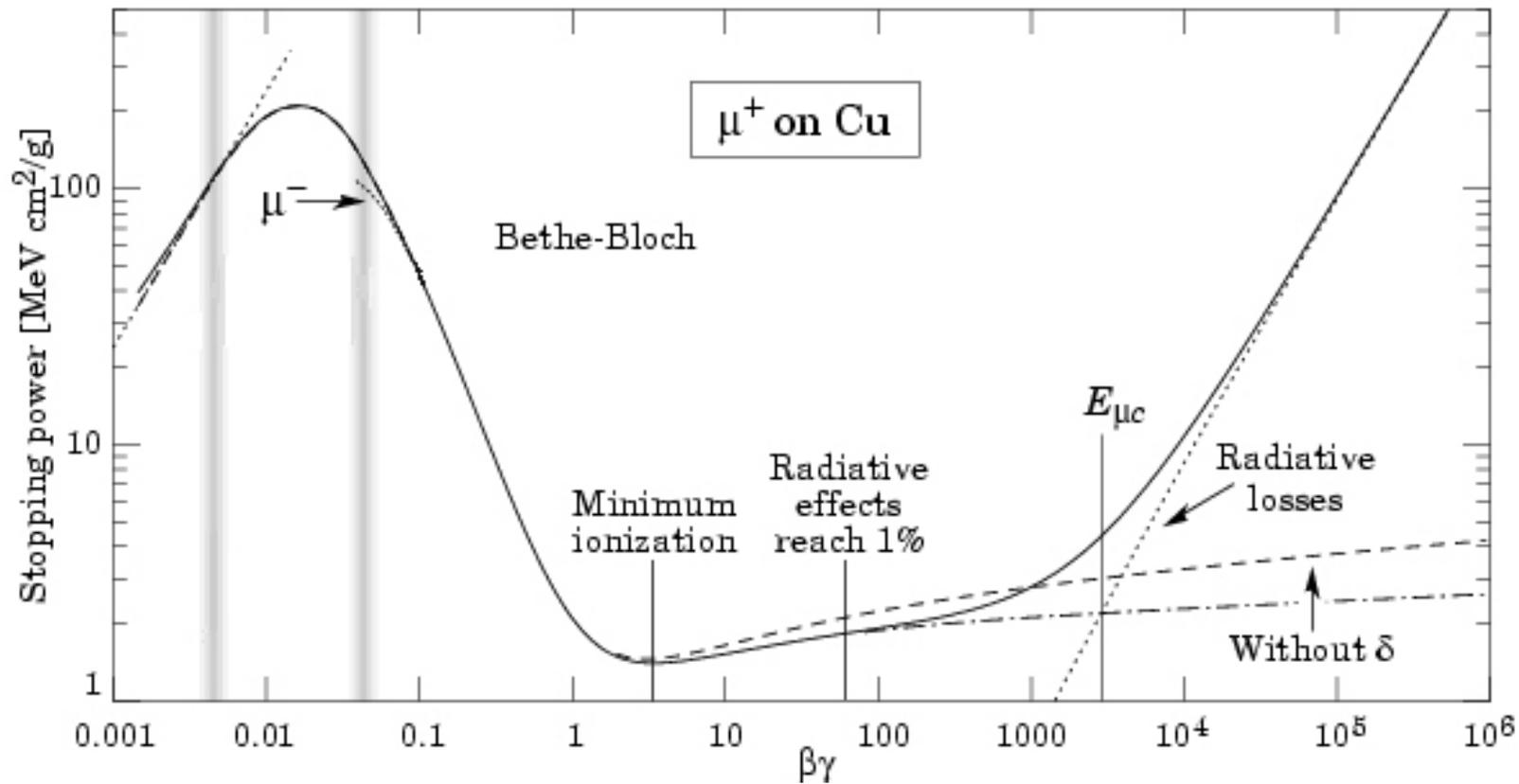
1) Anregung gebundener Elektronen
à niederenergetische γ -Teilchen

2) Ionisation, bei $m_0 \gg m_e$, beschrieben durch
Bethe-Bloch-Formel

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{Z}{A} \cdot \frac{z^2}{\beta^2} \cdot (\ln(\gamma^2 \cdot \beta^2) - \beta^2 - \frac{\delta}{2})$$

δ ist Parameter für „Dichte-Effekt“ (elektrisches Feld der Teilchen durch Ladungsdichte der Atome abgeschirmt)
à Energieverlust kompensiert

Ionisation und Anregung von gebundenen Elektronen



Bremsstrahlung

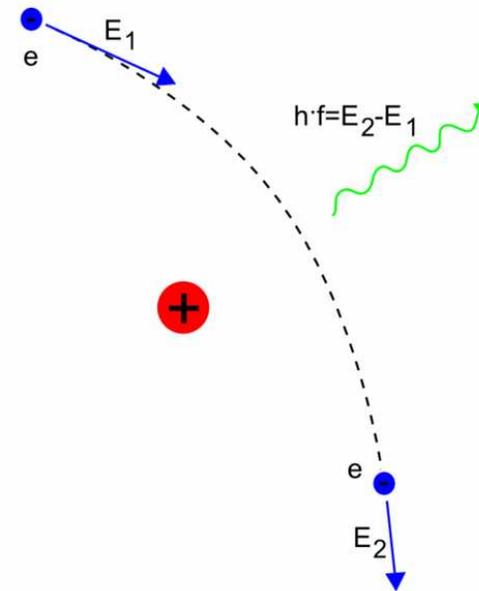
Schnelle geladene Teilchen werden am Atomcoulombfeld abgebremst und geben dabei einen Teil ihrer kinetischen Energie als γ -Strahlung ab

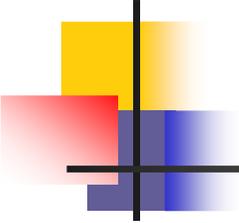
Energieverlust bei großen Energien:

$$-\frac{dE}{dx} \propto \frac{Z^2}{A} \cdot \frac{z^2}{m^2} \cdot E \cdot \ln(Z^{-\frac{1}{3}})$$

Da m_e sehr klein:

à Bremsstrahlungseffekt bei Elektronen wichtig!





Bremsstrahlung

$$\dot{\rightarrow} -\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0} \quad X_0 : \text{„Strahlungslänge“ (Eindringtiefe wo Energie auf } 1/e \text{ gefallen ist)}$$

$$\dot{\rightarrow} E = E_0 \cdot e^{-\frac{x}{X_0}}$$

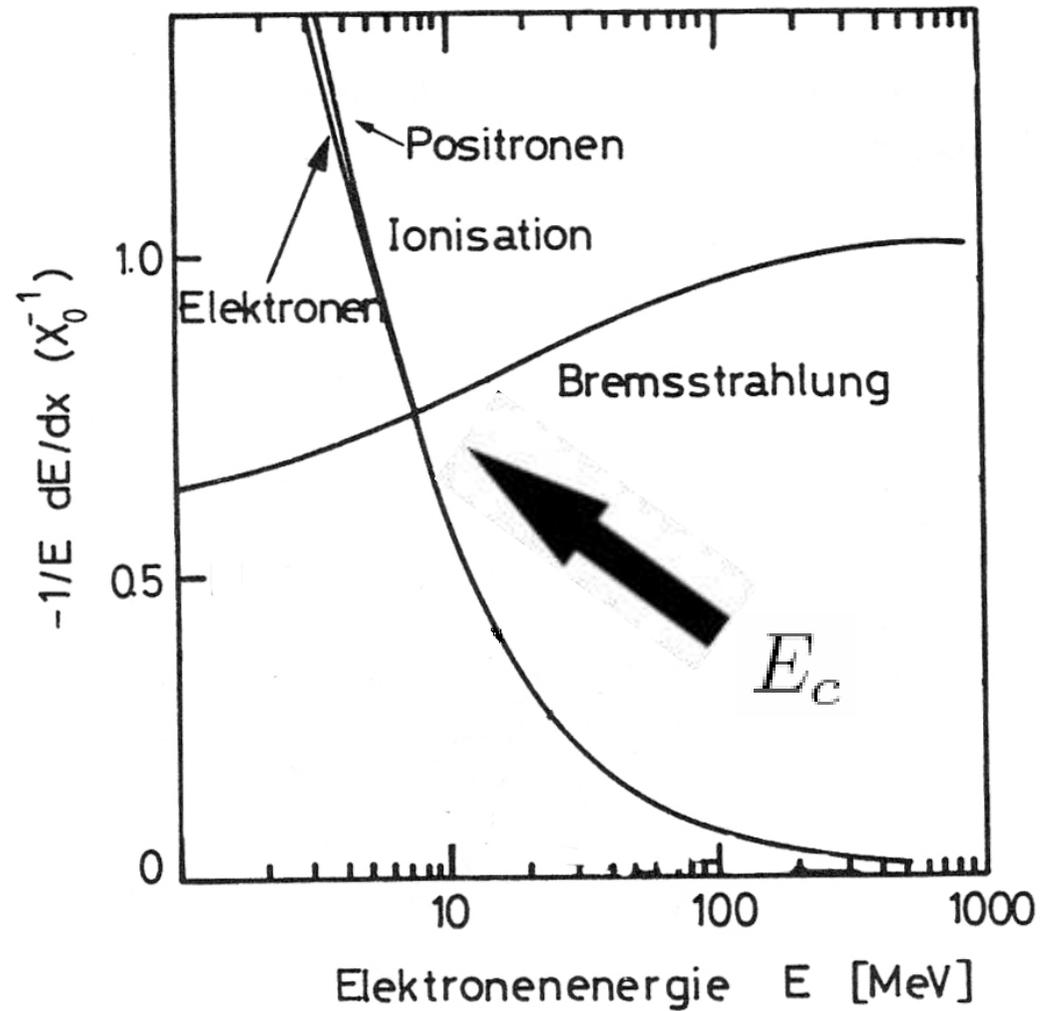
Vergleiche:

$$-\frac{dE}{dx}_{Bremsstr} (E_c) = -\frac{dE}{dx}_{Ion,Minimum} (E_c)$$

mit E_c : „kritische Energie“

Bei $Z \geq 13$ gilt näherungsweise:
$$E_c = \frac{550 \text{ MeV}}{Z}$$

Bremsstrahlung

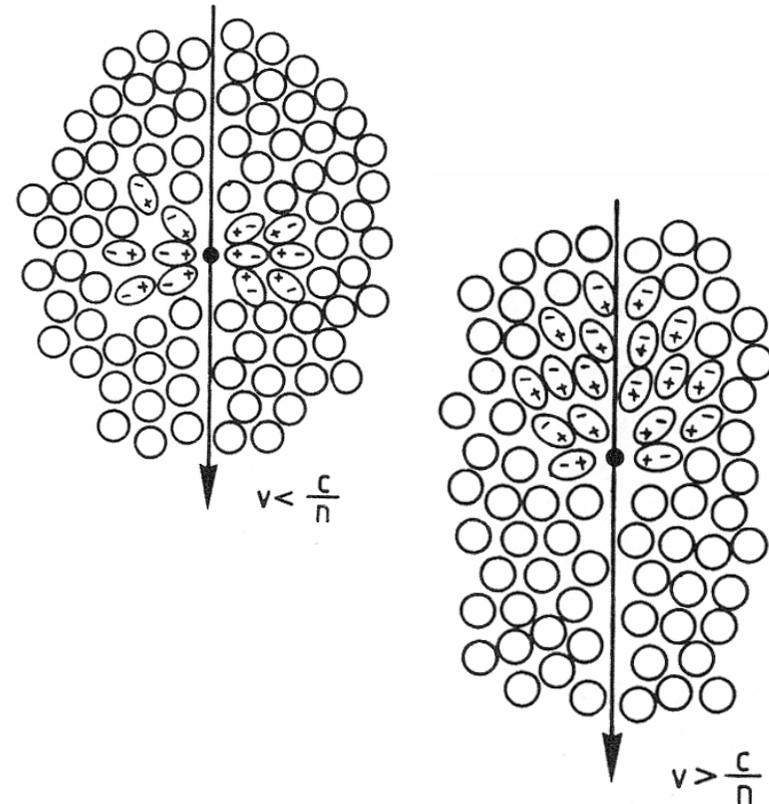


Cherenkov-Strahlung

Geladene Teilchen polarisieren beim Durchgang durch Materie
Moleküle entlang ihrer Flugbahn
à Strahlungsemission

Normalfall: $v < \frac{c}{n}$
à Dipole symmetrisch angeordnet
à Strahlung interferiert destruktiv

Cherenkov-Effekt: $v > \frac{c}{n}$
à Strahlung wird schneller erzeugt
als sie ausgelöscht wird



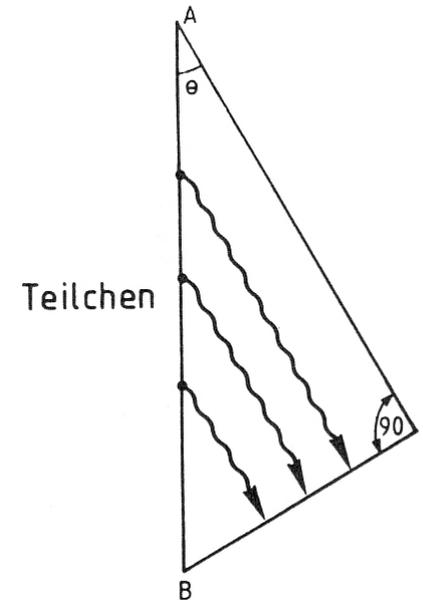
Cherenkov-Strahlung

Energieverlust: $\frac{dE}{dx}_{Cher} \lll \frac{dE}{dx}_{Ion}, \frac{dE}{dx}_{Bremsstr}$

ABER: liefert wichtige Information über
Richtung der Teilchen:

$$\text{à } \cos(\Theta) = \frac{v_{\gamma}}{v_{Teilchen}} = \frac{c}{vn} = \frac{1}{\beta n}$$

Wenig Lichtausbeute!

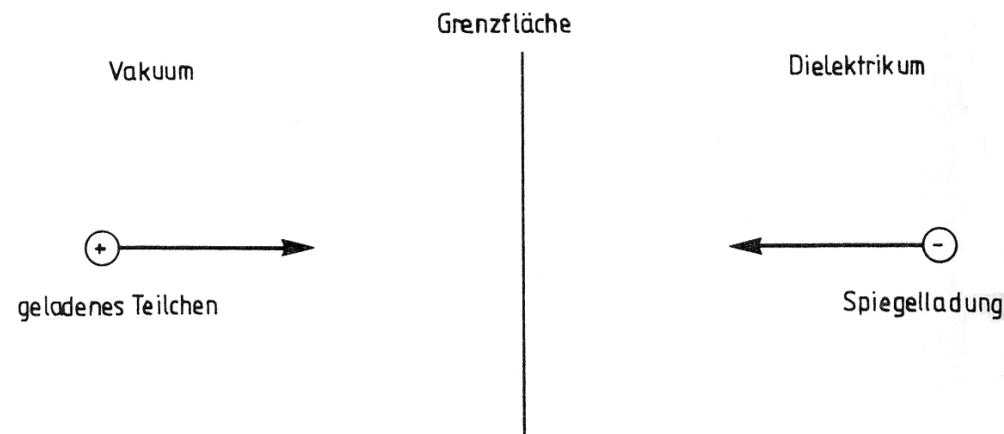


Bekanntestes Experiment: „Super-Kamiokande“

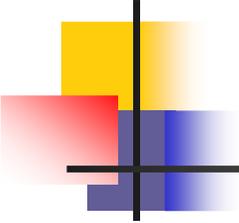
à Indirekter Neutrino-Nachweis

Übergangsstrahlung

Geladenes Teilchen trifft auf dielektrischen Übergang im Medium und erzeugt γ -Teilchen:



- à Teilchen + Spiegelladung = elektrischer Dipol
- à Feldstärke ändert sich zeitlich mit Bewegung des Teilchens
- à Wenn Teilchen in Medium übergeht, Feldstärke = 0
- à Zeitlich veränderliche Dipolfeldstärke bewirkt Emission von γ -Teilchen



Übergangsstrahlung

Effekt lässt sich erhöhen durch Vielzahl von Grenzflächen

WICHTIG: $E_\gamma \propto \gamma_{\text{Teilchen}} = \frac{E_{\text{Teilchen}}}{m_0 c^2}$ nicht nur $\propto v_{\text{Teilchen}}$

Ionisation, Cherenkov-Strahlung usw. alle nur $\propto v_{\text{Teilchen}}$

à Geringe Identifizierungsmöglichkeit bei

relativistischen Teilchen $\beta \rightarrow 1$

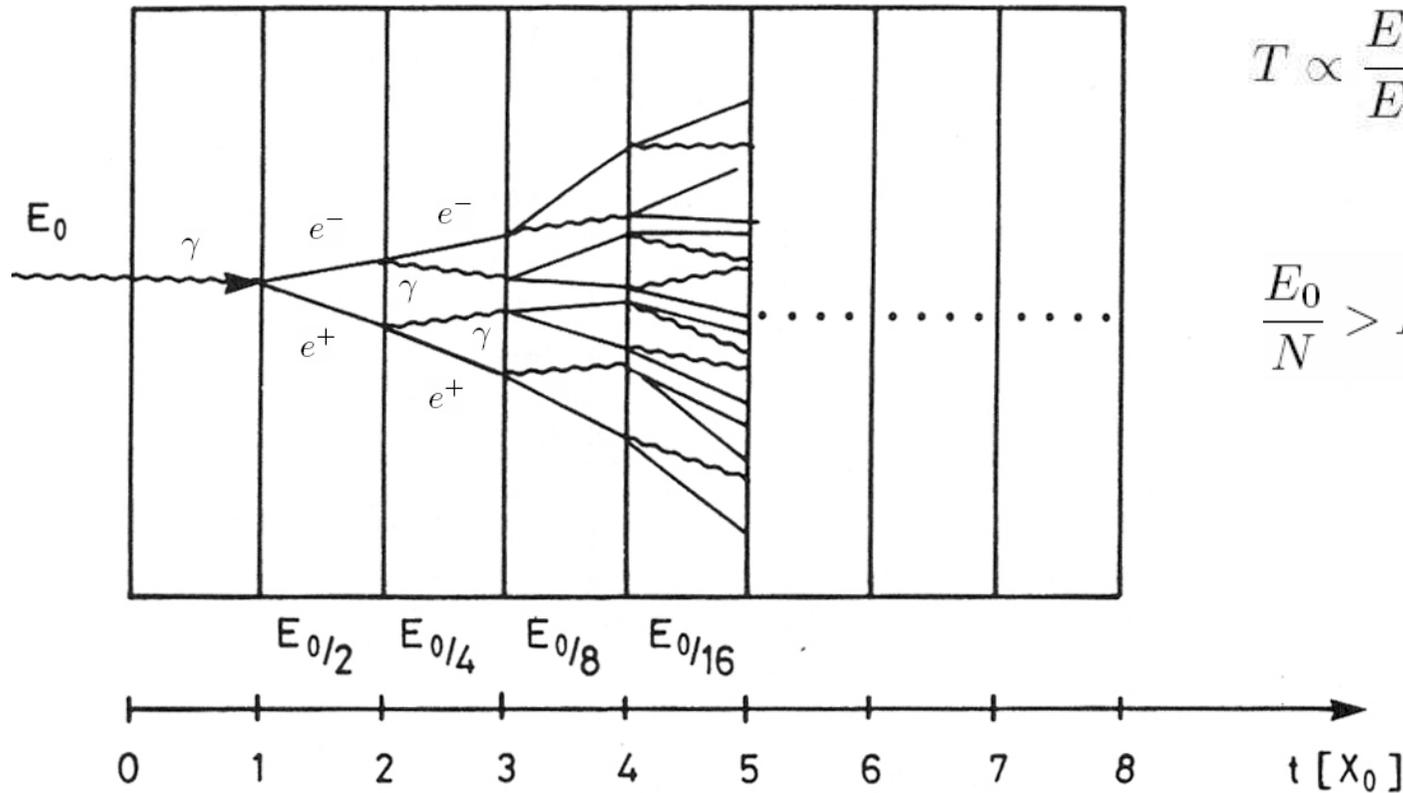
à γ -Abhängigkeit der Übergangsstrahlung gut

für Teilchenidentifizierung

à Sehr kleiner Öffnungswinkel gut für Spurnachweis!

I.c Elektromagnetische Schauer

Bei großer Energie ($E \approx 1\text{GeV}$): Bremsstrahlung und Paarbildung
 à Elektromagnetische Schauer



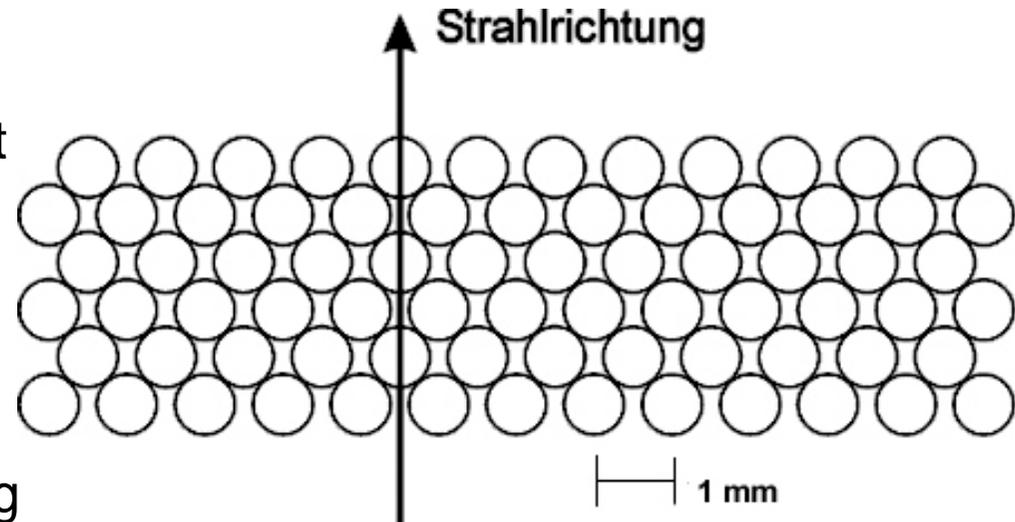
$$T \propto \frac{E_0}{E_c} \quad N(t) = 2^t$$

$$\frac{E_0}{N} > E_c \quad !!$$

II.a Detektoren für die Ortsbestimmung - Fiber-Detektoren

Szintillierende Fasern
in Bleimatrix angeordnet

Vorteil: Fasern können
einzeln ausgelesen
werden
à Gute Ortsbestimmung

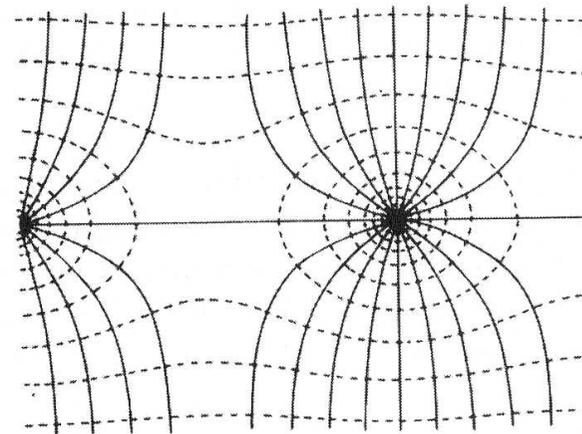
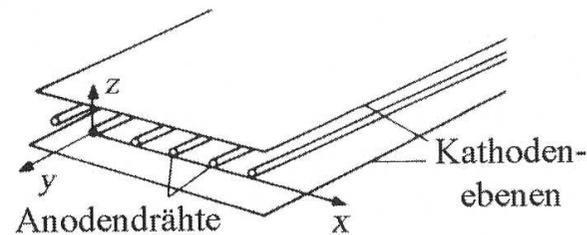


Ortsauflösung: ca. 1mm

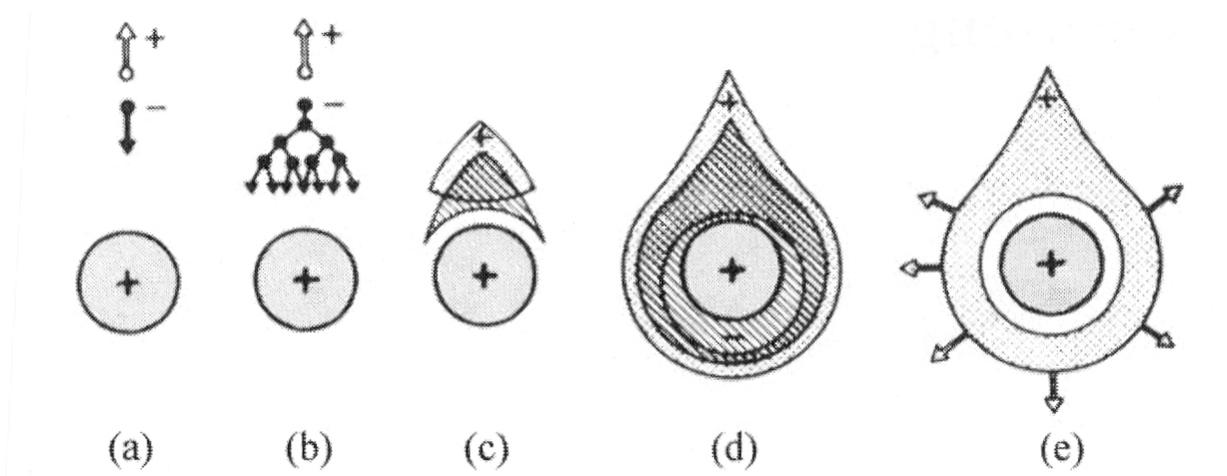
Vieldraht-Proportionalkammer

Gasgefülltes Volumen in dem ein Elektrisches Feld durch Kathodenebenen und Anodendrähte aufgebaut wird, um Wechselwirkung der Teilchen mit dem Gas zu untersuchen

Üblicher Drahtabstand:
 $d \approx 2mm$



Vieldraht-Proportionalkammer



- Primäres Elektron bewegt sich zur Anode
- Beschleunigung durch elektrisches Feld, Atomeionisation
- Elektron- und Ionenwolke driften auseinander
- Wegen Diffusion: Elektronenwolke ordnet sich asymmetrisch um Draht an
- Ionenwolke entfernt sich radial zur Kathodenebene

Vieldraht-Proporionalkammer

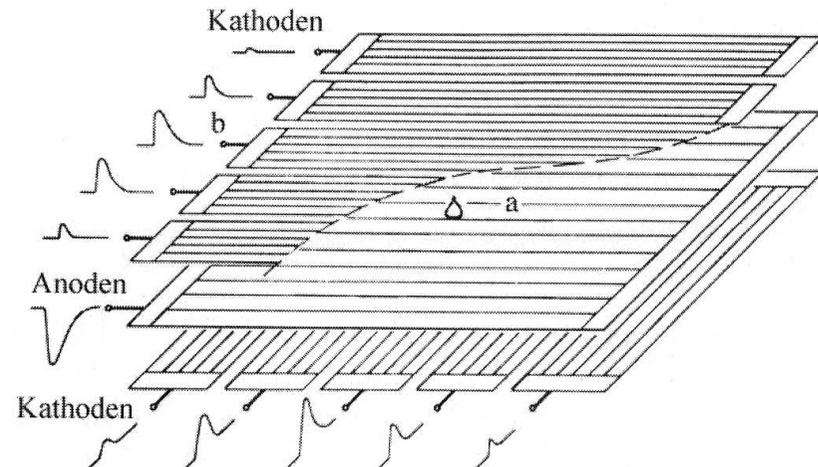
Mit Spannungsschwelle für eintreffende Teilchen:

à Nur Ortsinformation

Ortsauflösung: $\approx \frac{d}{\sqrt{12}} \approx 60\mu m$

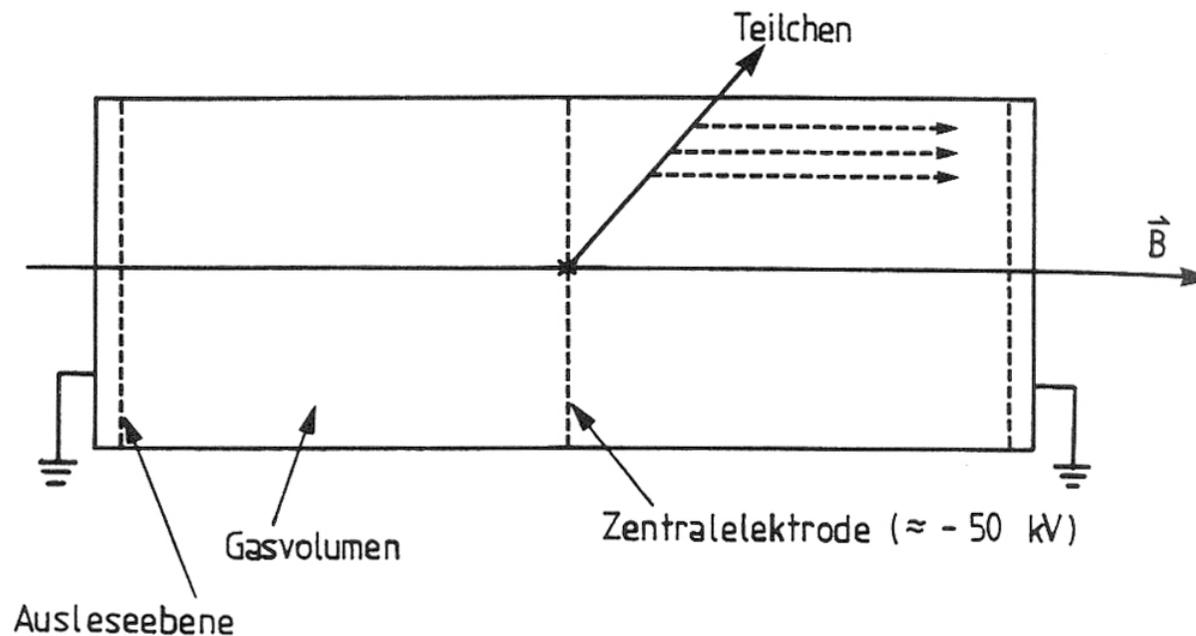
Für bessere Ortsauflösung:

à Kathodeneben in Streifen



Zeit-Projektions-Kammer

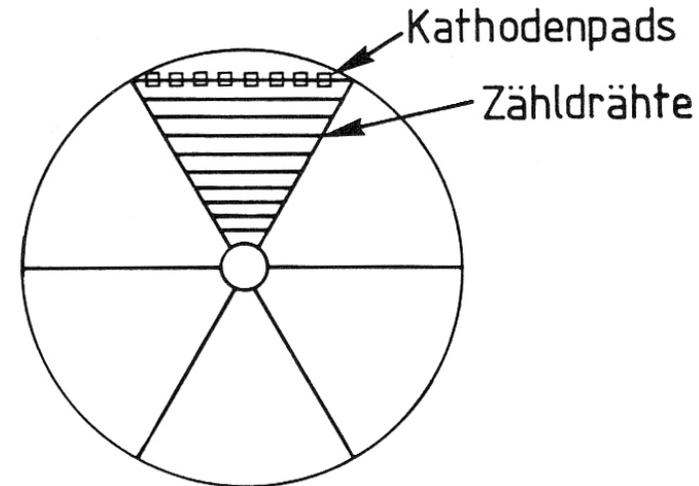
Gasgefülltes Volumen in dem ein elektrisches und ein magnetisches Feld parallel gerichtet sind
à Aufnahme der Driftspur des einfallenden Teilchens



Zeit-Projektions-Kammer

B-Feld verhindert Diffusion senkrecht zum Feld!

Auslesen der Signale
an den Kathodenpads
à Spurrekonstruktion +
Teilchenidentifizierung
(analoge Information)

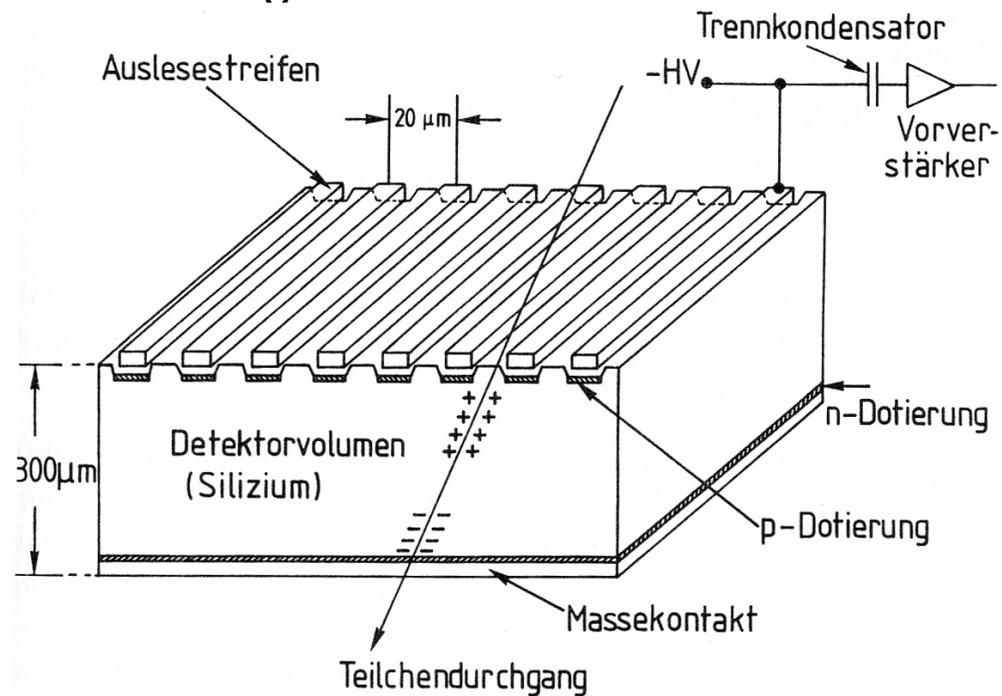


Ortsauflösung stark abhängig von verwendetem Gas
à Neon schneller als Argon

Ortsauflösung: ca. 50-100 μ m

Silizium-Streifen-Detektor

In p-n-Übergang werden durch einfallende Teilchen Elektron-Loch-Paare gebildet



Ortsauflösung: ca. 7-10 μm

Pixeldetektor

Viele Halbleiterdetektoren als Pixel auf einem Element zusammengefasst

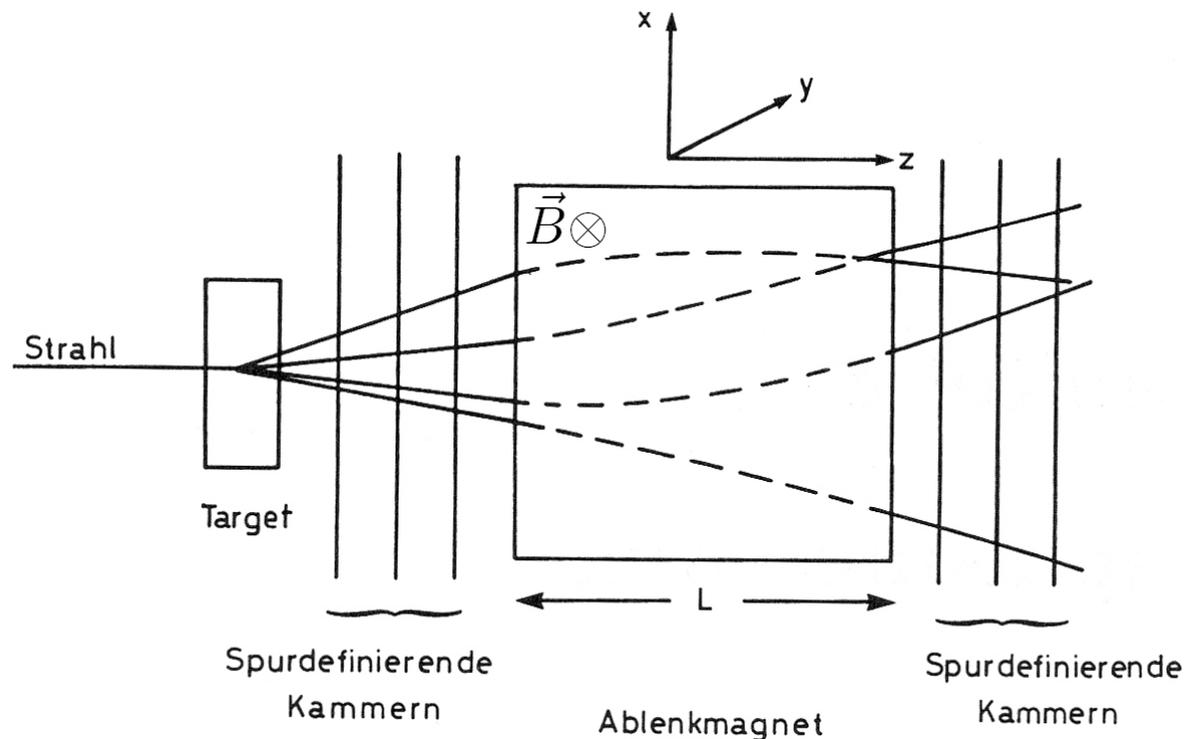
Bsp. aus dem ATLAS-Detektor

Ortsauflösung: ca. 7-10 μ m



II.b Detektoren für die Impulsbestimmung - Magnetspektrometer

Geladene Teilchen werden im Magnetfeld aufgrund
der Lorentzkraft auf eine Kreisbahn gelenkt
à Impulsinformation

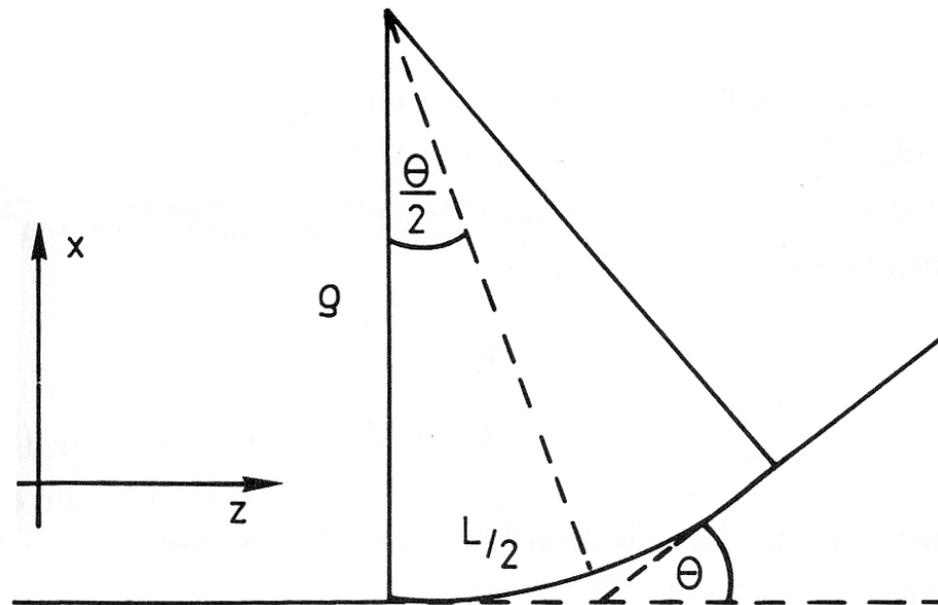


Magnetspektrometer

$$\rightarrow F_Z = F_L$$

$$\leftrightarrow \frac{mv^2}{\rho} = q \cdot v \cdot B_y$$

$$\rightarrow \rho = \frac{p}{q \cdot B_y}$$

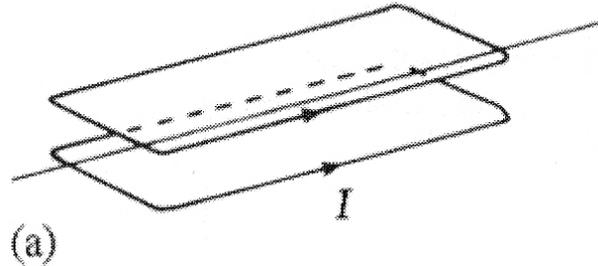


Weil $L \ll \rho$ gilt näherungsweise: $\Theta \approx \frac{L}{\rho} = \frac{L}{p} \cdot q \cdot B_y$

Magnetspektrometer

Verschiedene Magnetformen möglich:

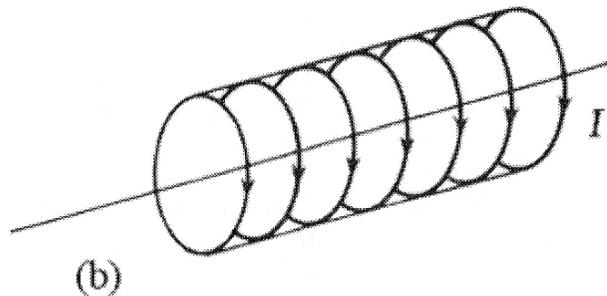
a) Dipolmagnet



à Gute Impulsinformation in Strahlrichtung

à Transversal keine Messung möglich

b) Solenoid



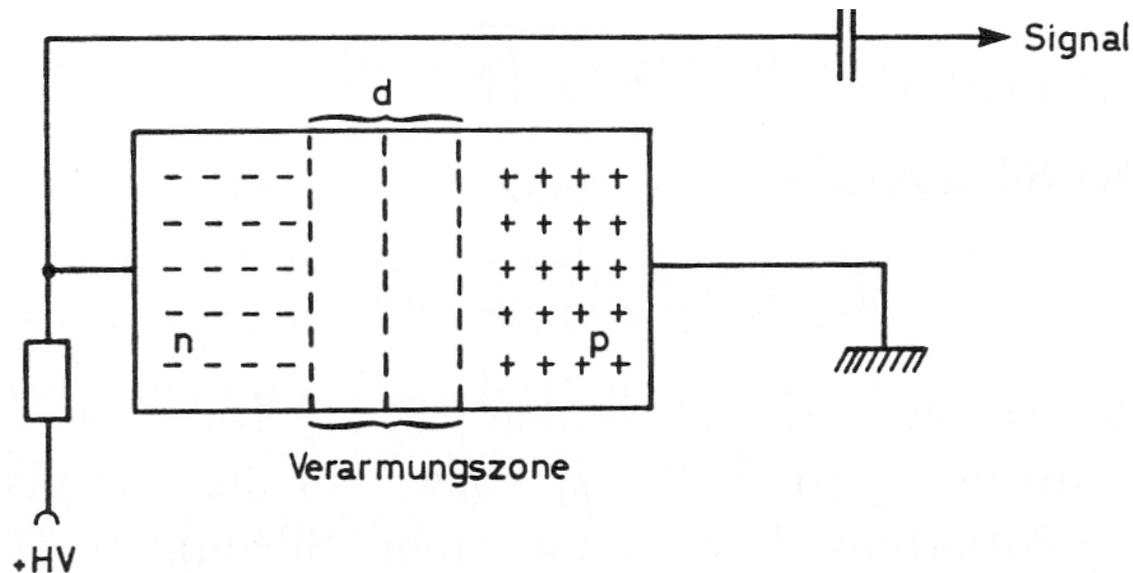
à Gute Impulsinformation senkrecht zur Strahlrichtung

à Keine Synchrotron-Strahlung wegen parallelem B-Feld

II.c Detektoren für die Energiebestimmung - Halbleiterzähler

Geladene Teilchen erzeugen Elektron-Loch-Paare in der Verarmungszone ($d = 300\mu\text{m}$) eines p-n-Halbleiterübergangs

Bevor diese rekombinieren werden sie durch die angelegte Spannung (in Sperrrichtung!) abgesaugt:



Halbleiterzähler

Vorteil des Detektors:

à Nur geringe Energien nötig, um Bandlücke zu überwinden

Silizium: 3,6 eV

Germanium: 2,8 eV

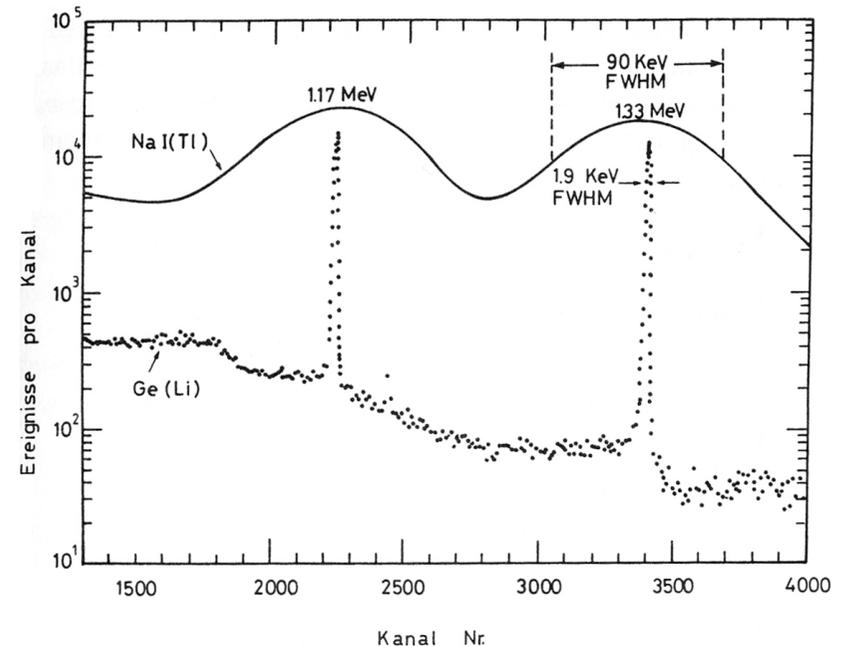
Szintillator: 400-1000 eV

à Bessere Energieauflösung

Nachteil des Detektors:

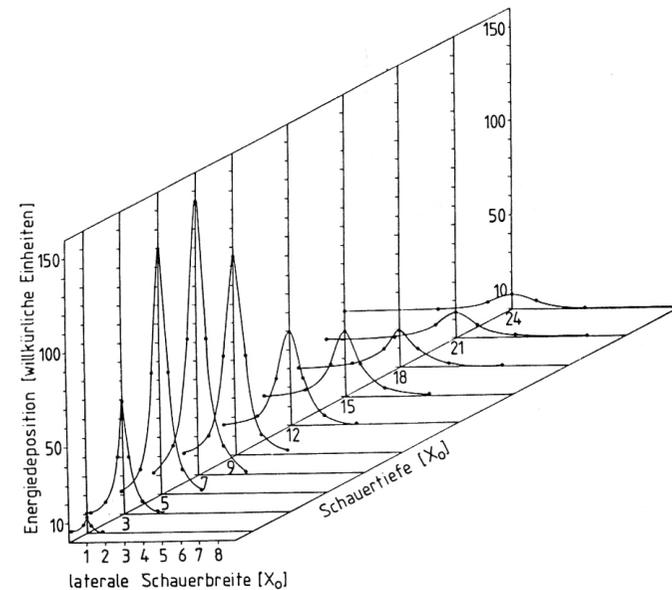
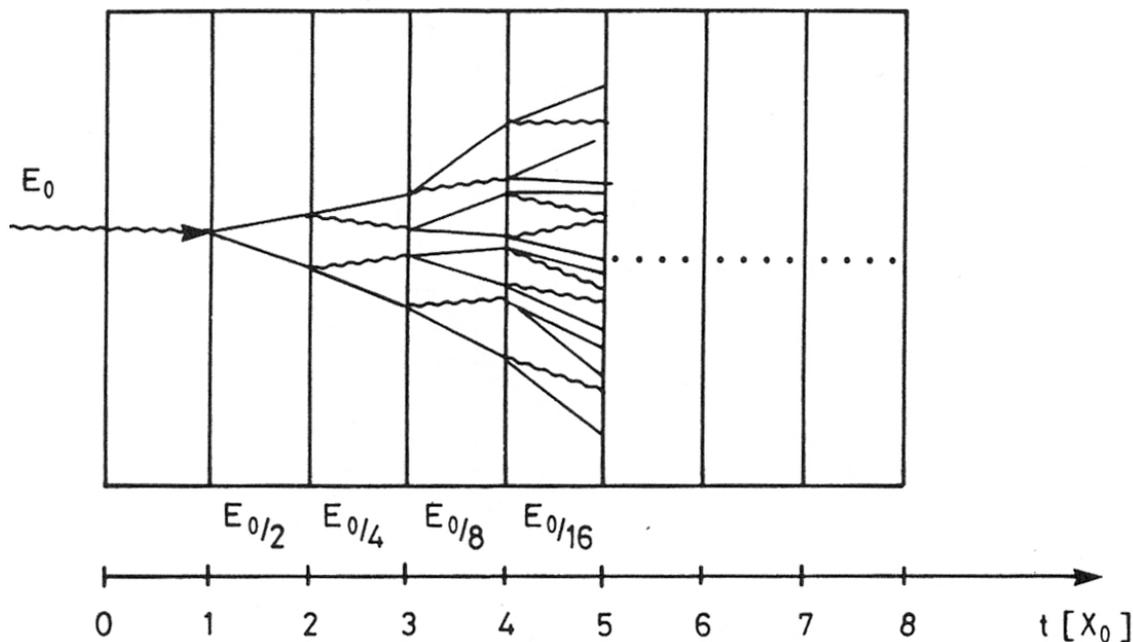
à Müssen stark gekühlt werden, um thermisches Rauschen zu verhindern

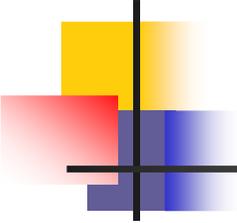
Energiebereich: $\approx 1\text{MeV}$



Elektron-Photon-Kalorimeter

Geladene Teilchen oder Photonen mit hoher Energie werden in einem Absorbermaterial oder Szintillatorkristall abgebremst
à Elektromagnetischer Schauer, dessen Photonen im optischen Bereich stufenweise oder im Maximum ausgelesen werden





Elektron-Photon-Kalorimeter

Homogenes Kalorimeter:

Anorganischer Szintillatorkristall mit einem Detektor
(Photomultiplier oder Photodiode) am Ende

à Muss so gebaut sein, dass Energie vollständig absorbiert wird!

Sampling-Kalorimeter:

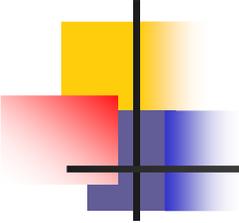
Absorberschicht – Detektor – Absorberschicht – Detektor - ...

à Schauerenergie wird stichprobenartig gemessen

à Mehr Fluktuationen durch die Detektorschichten
(schlechtere Energieauflösung)

à Detektor: Drahtkammer oder Szintillator

Energiebereich: $\geq 1\text{GeV}$



Szintillator

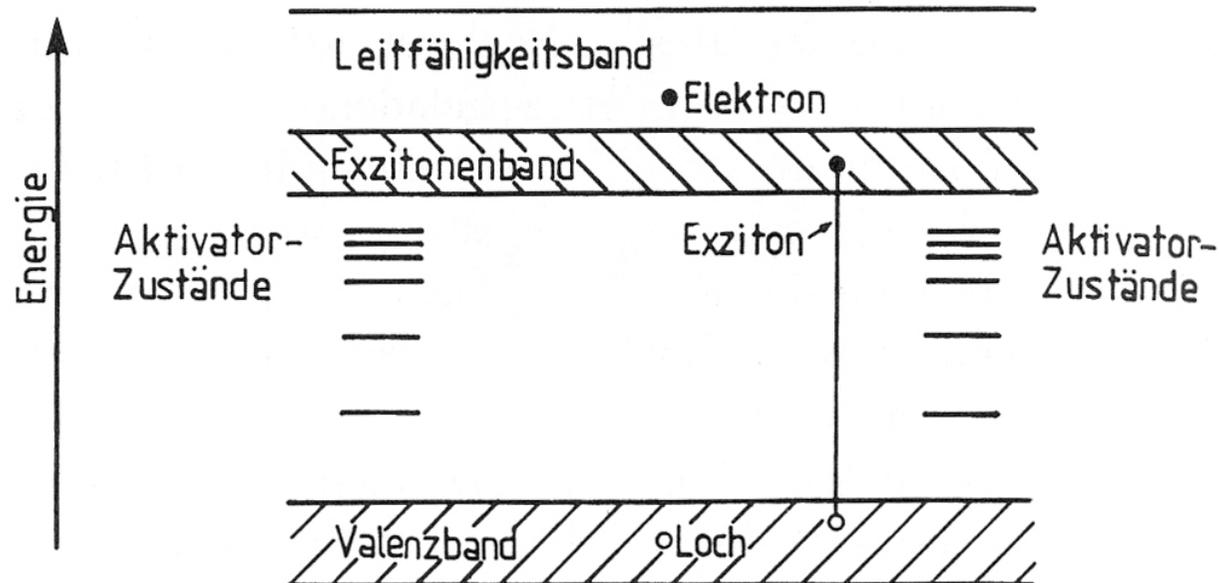
Material, das beim Durchgang von geladenen Teilchen oder Photonen, wieder Photonen, meist im UV- oder Röntgenbereich, abgibt

Anorganische: Einkristalle, die mit Fremdatomen dotiert werden, um sie transparent für die emittierten Photonen zu machen

Organische: Flüssigkeiten, Kristalle oder polymere Festkörper

Szintillator

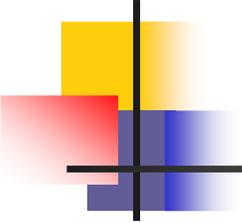
Anorganisch:



γ - / geladenes Teilchen regen Elektron aus Valenzband an...

1) ...ins Leitungsband: durch Rekombination entsteht γ -Teilchen

2) ...ins Exzitonenband: Elektron-Loch-Paar entsteht und wandert durch den Kristall bis es sich an Aktivatorzentrum abregt à γ

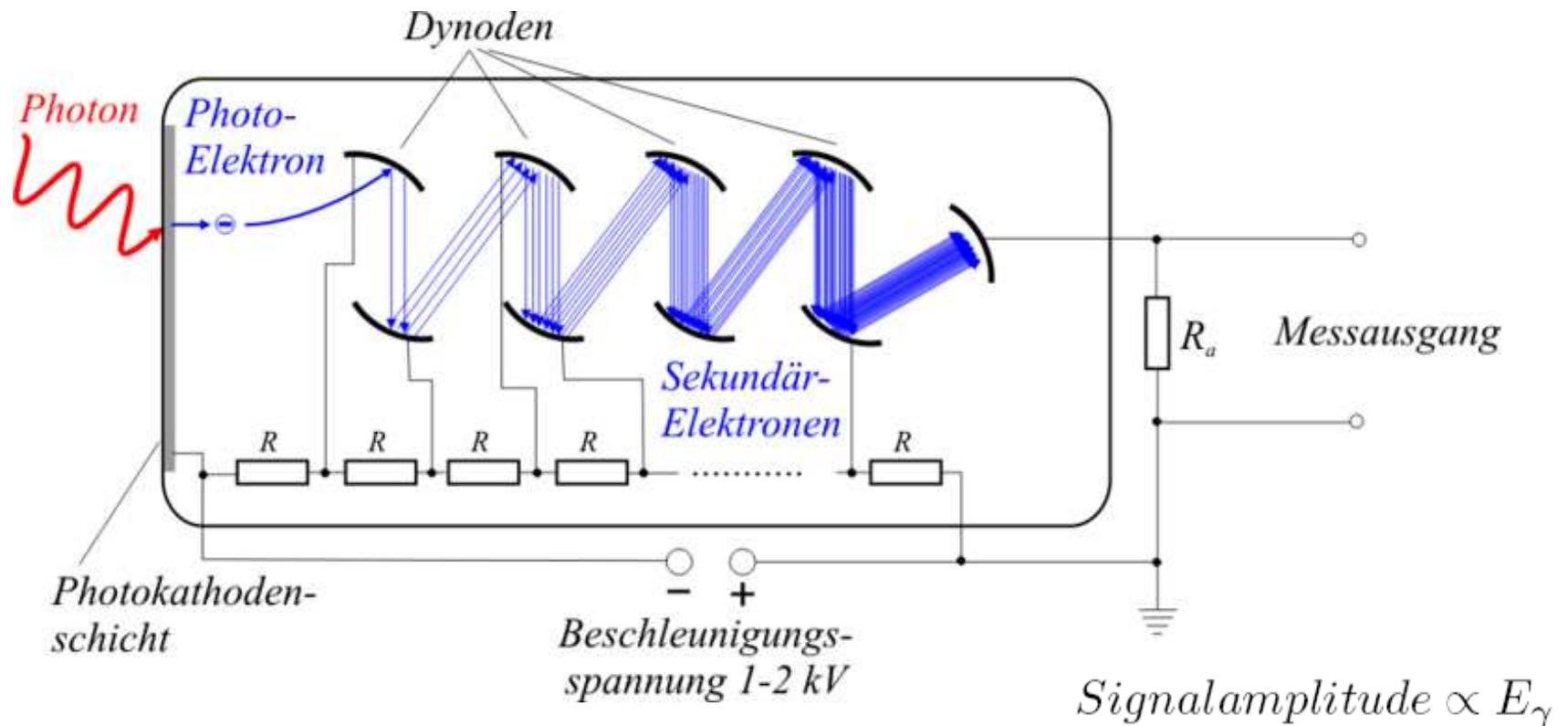


Szintillator

Organisch:

- 1) Primärer Fluoreszenzstoff wird angeregt
- 2) UV-Licht wird emittiert
ABER: Fluoreszenzstoff nicht transparent für sein Licht!
- 3) Sekundärer Fluoreszenzstoff beigemischt, der das UV-Licht absorbiert und Licht mit geringerer Frequenz reemittiert („Wellenlängenschieber“)

Photomultiplier



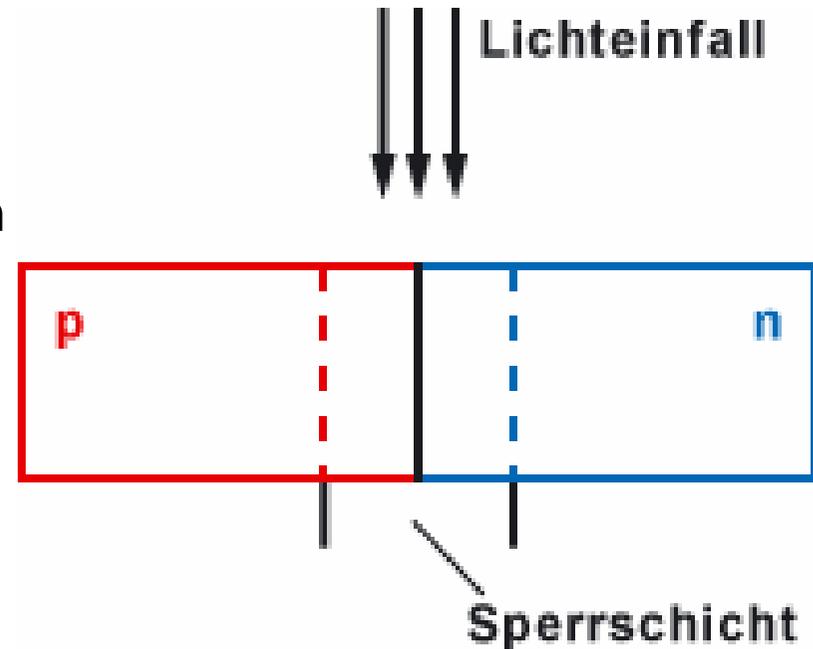
Verstärkung von $10^7 \dots 10^8$ möglich!

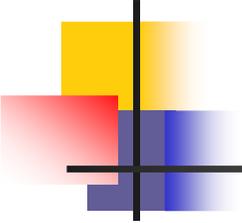
Photodiode

Halbleiterdiode, meist aus Silizium oder Germanium:
à Einfallende Teilchen erzeugen Elektron-Loch-Paare, die über die angelegte Spannung abgesaugt werden

à Strom ist proportional zur Energie des Teilchens

à Einsatz bei größerer Lichtmenge





Zusammenfassung

Was will ich an meinem Experiment messen?

1. Ort:

Wie genau will ich den messen?

Sehr gute Ortsauflösung à **Si-Streifen-Detektor**

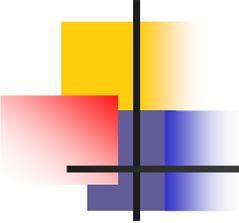
Grobe Ortsauflösung à **Fiber-Detektor**

Will ich dabei noch die Teilchen identifizieren?

Mit analogen Spannungssignalen von dem

Si-Streifen-Detektor oder der **Zeit-Projektions-Kammer**

ist das möglich!



Zusammenfassung

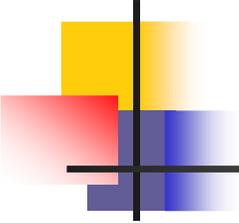
2. Impuls:

à **Magnetspektrometer**

Was für eine Richtung der resultierenden Teilchen erwarte ich?

Longitudinal à **Dipolmagnet**

Transversal à **Magnet in Solenoidform**



Zusammenfassung

3. Energie:

In welchem Energiebereich liegen meine Teilchen?

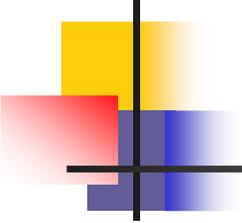
1MeV à **Halbleiterdetektor**

1GeV à **Elektron-Photon-Kalorimeter**

Welchen Lichtdetektortyp wähle ich?

Eher kleinere Lichtausbeute à **Photomultiplier**

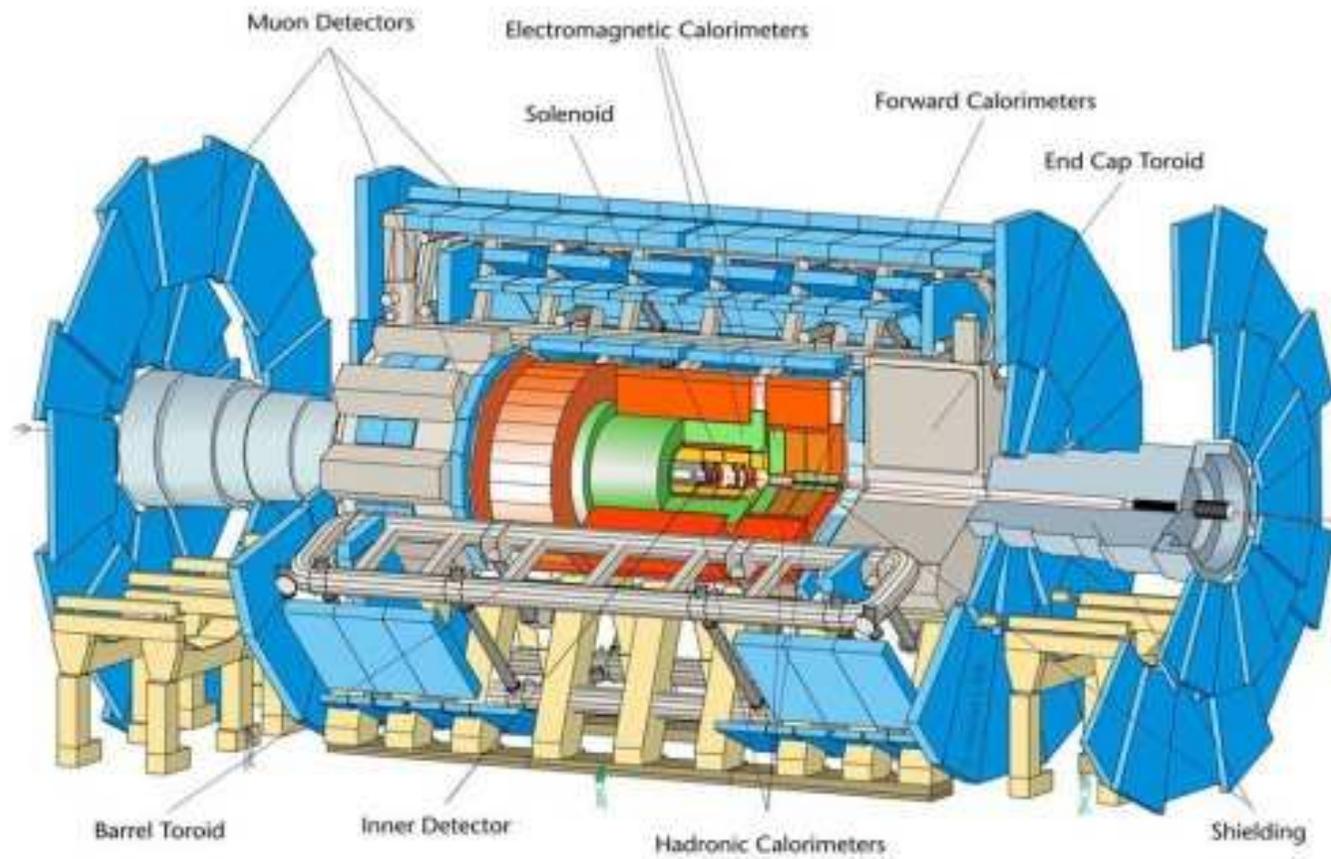
Große Lichtmenge à **Photodiode**

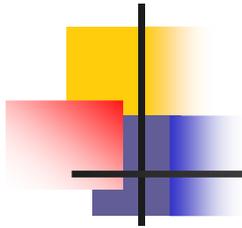


Quellen

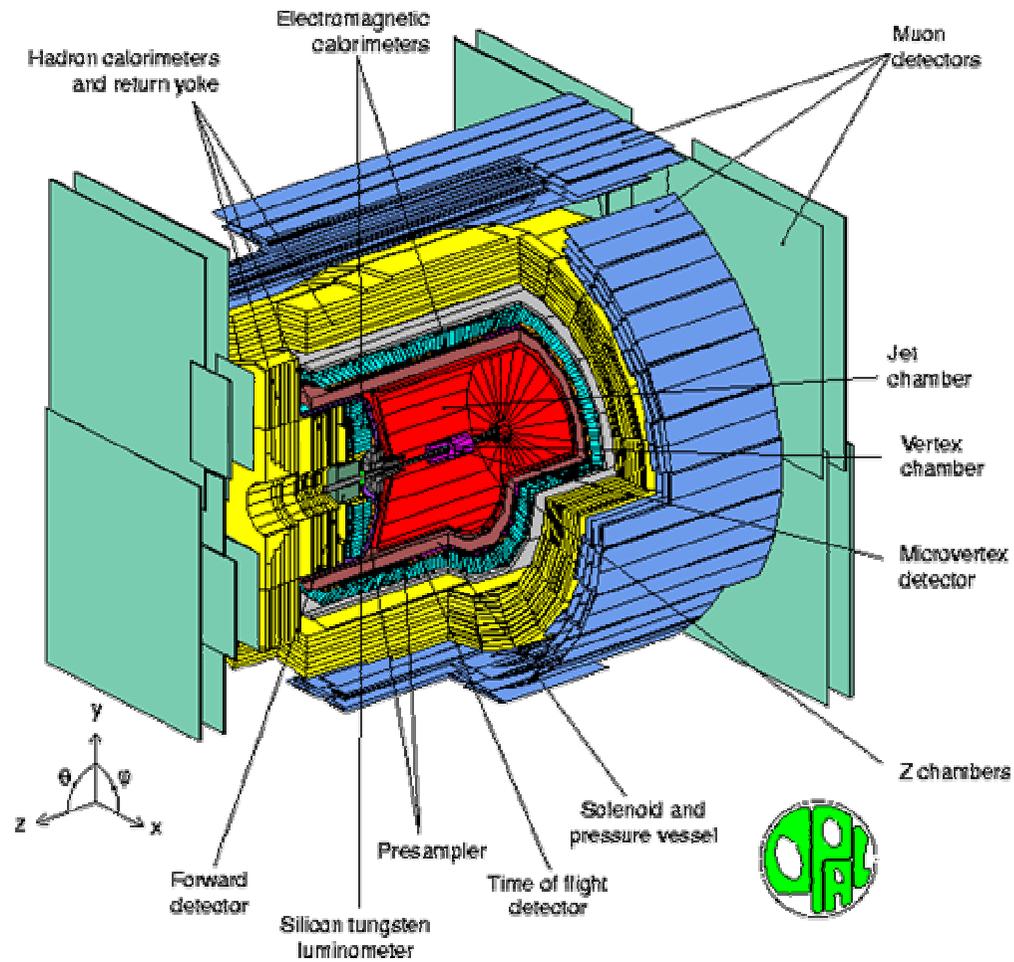
- Detektoren für Teilchenstrahlung, Konrad Kleinknecht
- Teilchendetektoren, Claus Grupen
- <http://physics.web.cern.ch/Physics/ParticleDetector/BriefBook/>
- Particle Data Group booklet, Kapitel: „passage of radiation through matter und particle detectors“
- Unterlagen zur Vorlesung: „Experiment an ELSA“ von Prof. Schmieden & Prof. Beck
- Wikipedia

ATLAS

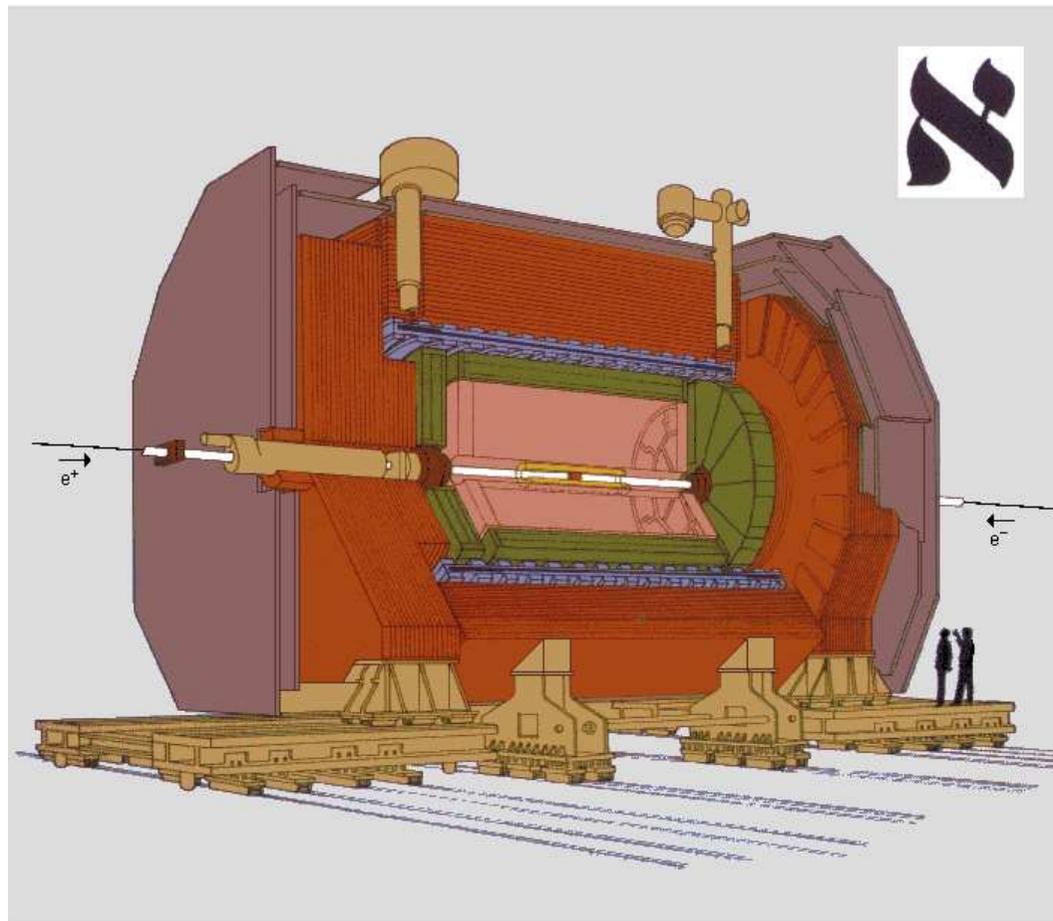




OPAL



ALEPH



-  Vertex Detector
-  Inner Tracking Chamber
-  Time Projection Chamber
-  Electromagnetic Calorimeter
-  Superconducting Magnet Coil
-  Hadron Calorimeter
-  Muon Chambers
-  Luminosity Monitors