

Teilchendetektoren

Rainer Stamen

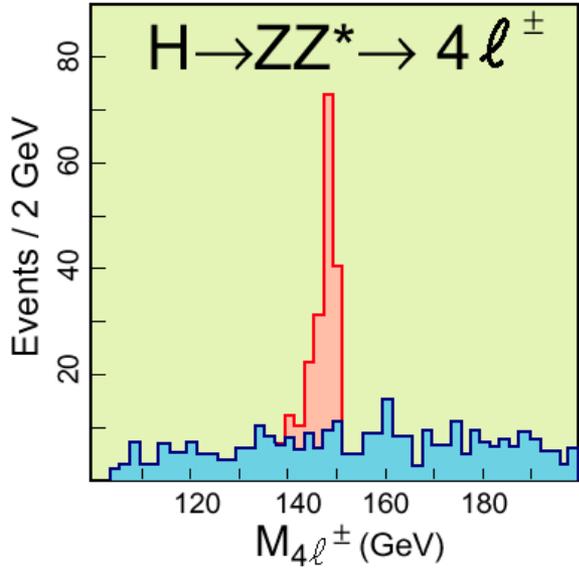
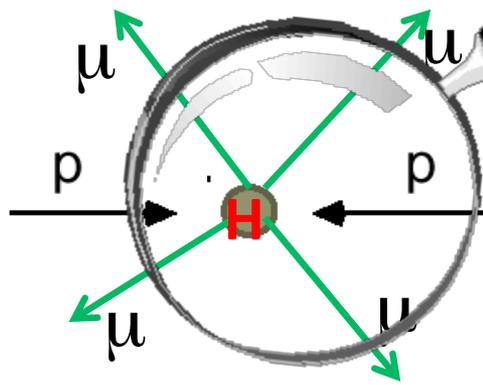
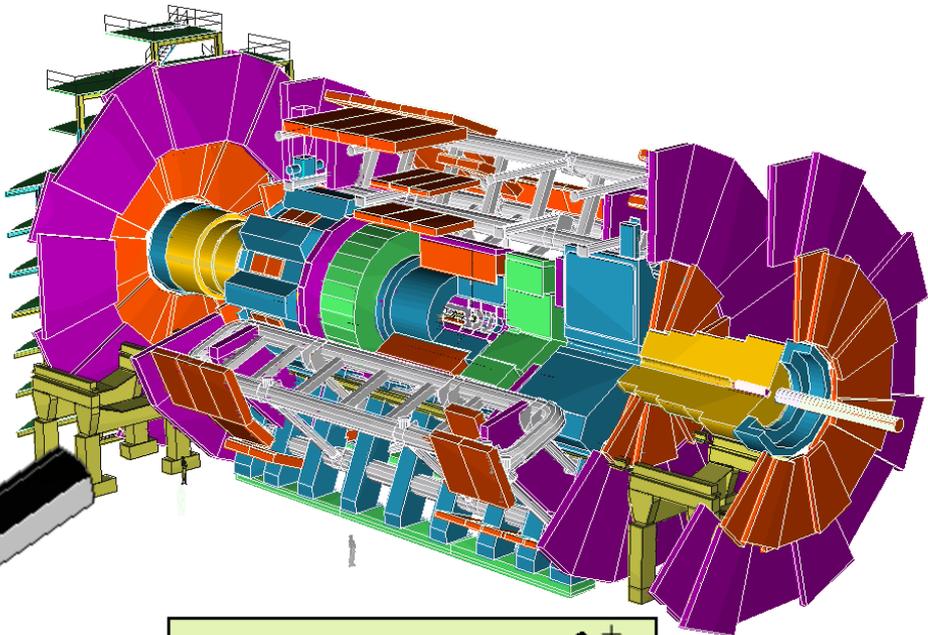
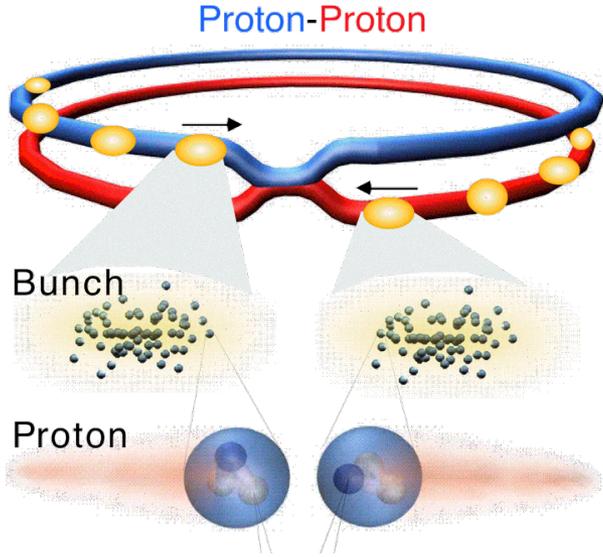
Vorwort

- „Teilchendetektoren“ – 2SWS Vorlesung + Seminar/Journal Club
- Dies ist eine stark kondensierte Version
- Mehr Beschreibung – Weniger Erklärung
- Grundlegende Konzepte

Inhalt

- Aufgaben von Teilchendetektoren
- Wechselwirkung von Teilchen mit Materie
- Detektoren - Subdetektoren
- Detektorsysteme - Experimente

Methodik



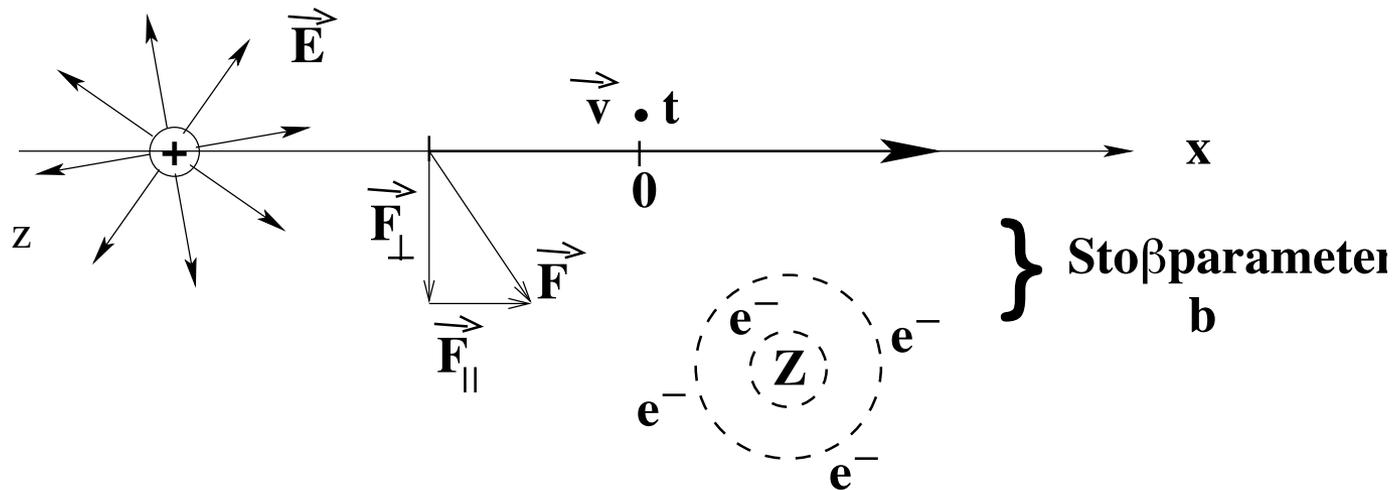
Aufgaben von Teilchendetektoren

- Identifikation der produzierten Teilchen
- Bestimmung von Energie und Impuls der Teilchen
- Bestimmung der fehlenden (transversalen) Energie in einem Ereignis
- Bestimmung des Ursprungsorts (Vertex) der Teilchen
- ...

Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

- Anregung und Ionisation von Materie durch (schwere) geladene Teilchen
- Vielfachstreuung
- Wechselwirkung von Photonen mit Materie (Photoeffekt, Compton-Streuung, Paarbildung)
- Bremsstrahlung
- Cerenkovstrahlung
- Übergangsstrahlung
- Vorgänge in Szintillatoren
- ...

Anregung und Ionisation von Materie durch (schwere, langsame) geladene Teilchen



Semiklassische Ableitung (Bethe und Bloch)

- Impulsübertrag während des Vorbeiflugs (Verschiedene Approximationen)
- Summiere über alle Materieteilchen
- Berücksichtige Anregungen (quantisiert) und Ionisation (kontinuierlich)
- Berechnung des Energieverlusts pro Wegstrecke dE/dx

Bethe-Bloch Formel

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi r_e^2 mc^2 \frac{L\rho}{A} Z \frac{z^2}{\beta^2} \left(\ln \frac{2mc^2 \gamma^2 \beta^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right)$$

m – Masse des Teilchens

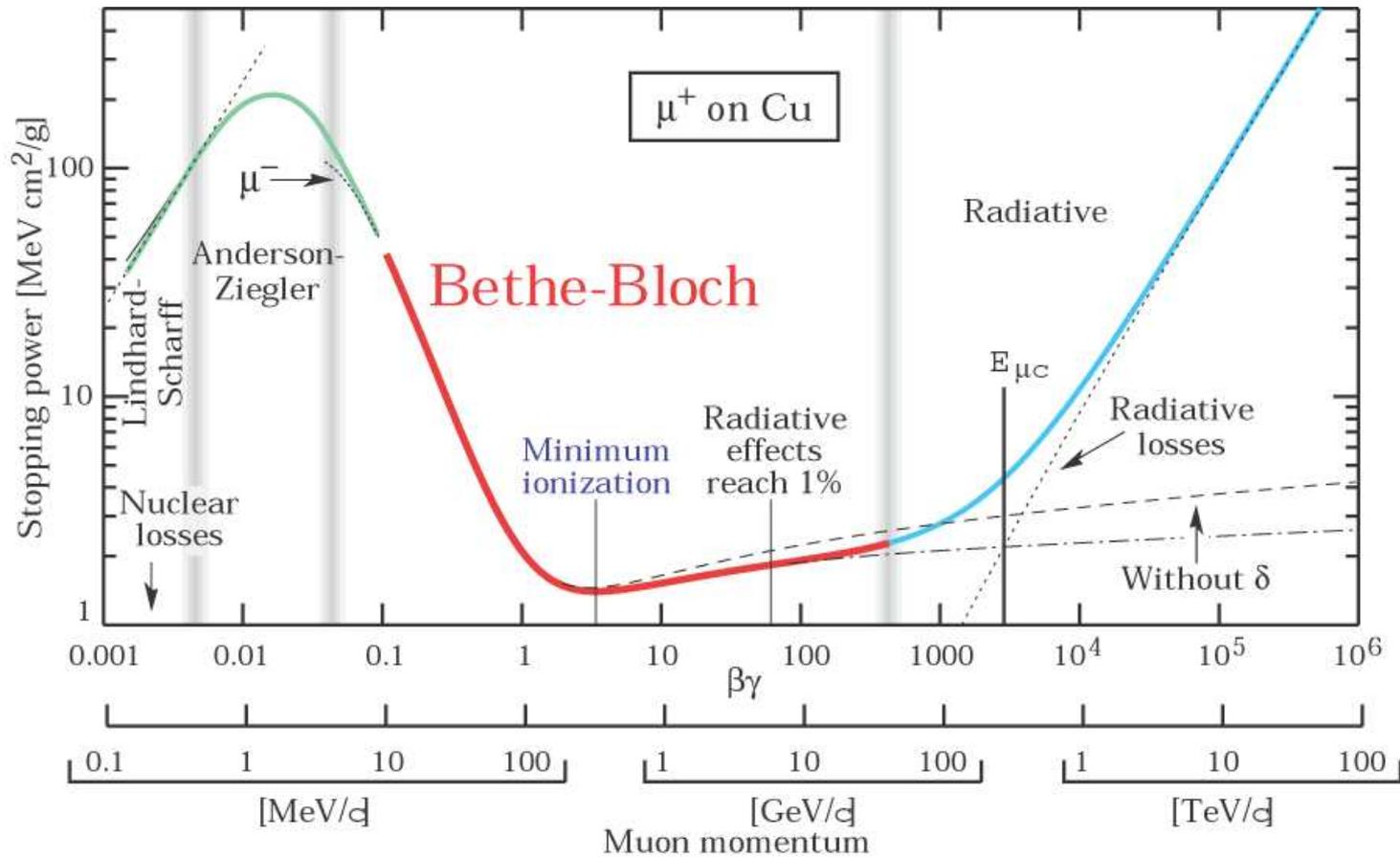
z – Ladung des Teilchens

$\beta = v/c$ - Geschwindigkeit des Teilchens

Z,A – Ladung und Atomzahl der Atome in der Materie

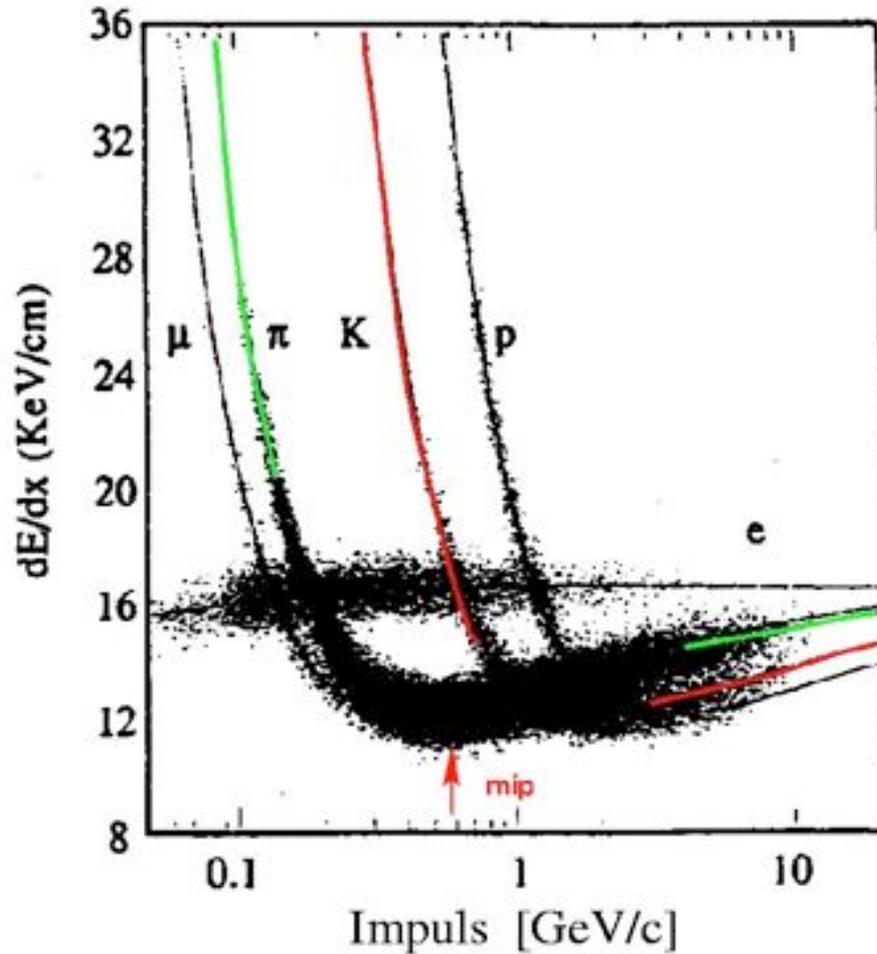
I – Ionisationsenergie

Bethe-Bloch Formel



Gültigkeitsbereich der Bethe-Bloch-Formel: $0.05 < \beta\gamma < 500$, $m \geq m_{\text{Myon}}$

Bethe-Bloch Formel



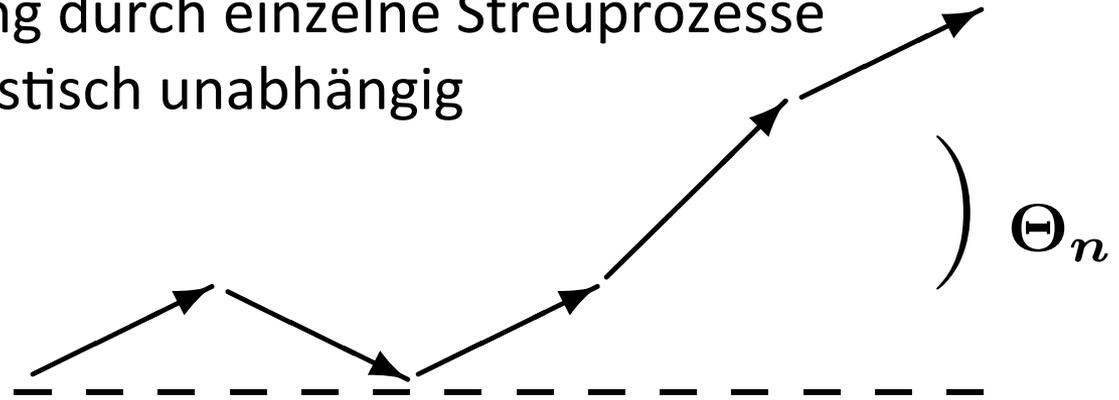
- Energieverlust durch Ionisation
- Erzeugung einer Teilchenspur
- Teilchenidentifikation

Vielfachstreuung

Bethe-Bloch: geradlinige Teilchenbahn

Betrachte nun Ablenkung durch einzelne Streuprozesse

Streuprozesse sind statistisch unabhängig



$$\sqrt{\langle \Theta^2 \rangle} = \frac{21 \text{ MeV}}{\beta \cdot p \cdot c} \cdot z \sqrt{\frac{x}{X_0}}$$

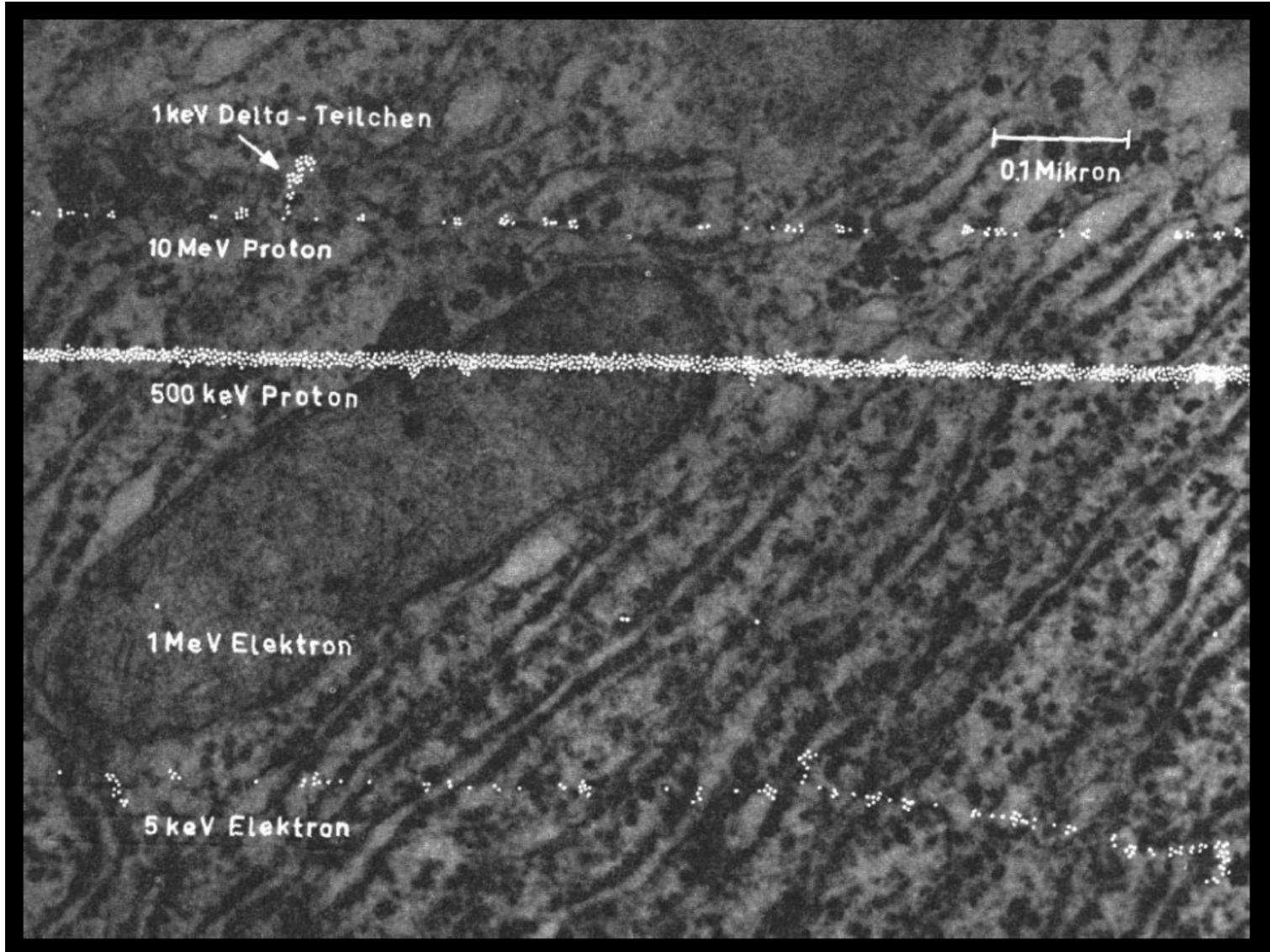
Molière-Formel

$$X_0 = \frac{\alpha}{4Z^2 n \left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}}}$$

Strahlungslänge

-> Charakterisiert die Materie in der die Wechselwirkung stattfindet

Ionisationsdichten: Simulation



Wechselwirkung von Photonen mit Materie

Es gibt drei dominierende Effekte:

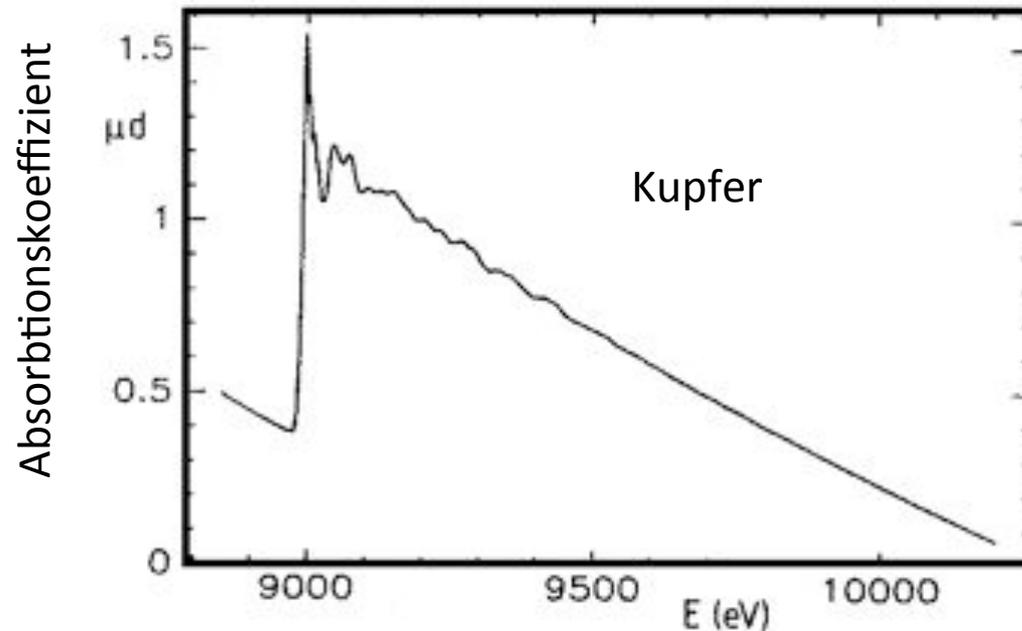
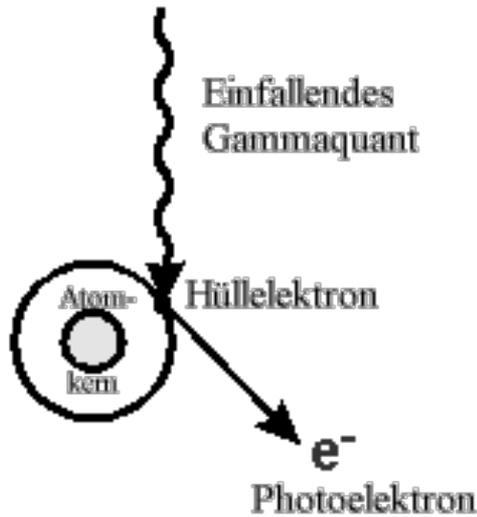
Photoeffekt	$\gamma + \text{Atom}$	->	$\text{Atom}^+ + e^-$
Comptoneffekt	$\gamma + e^-$	->	$\gamma + e^-$
Paarbildung	$\gamma + \text{Kern}$	->	$e^+ + e^- + \text{Kern}$

Weitere Effekte können im Allgemeinen vernachlässigt werden

- Rayleigh Streuung
- Thomson Streuung
- Kernphotoeffekt
- Kernresonanzstreuung
- Delbrückstreuung
- Hadron Paarbildung

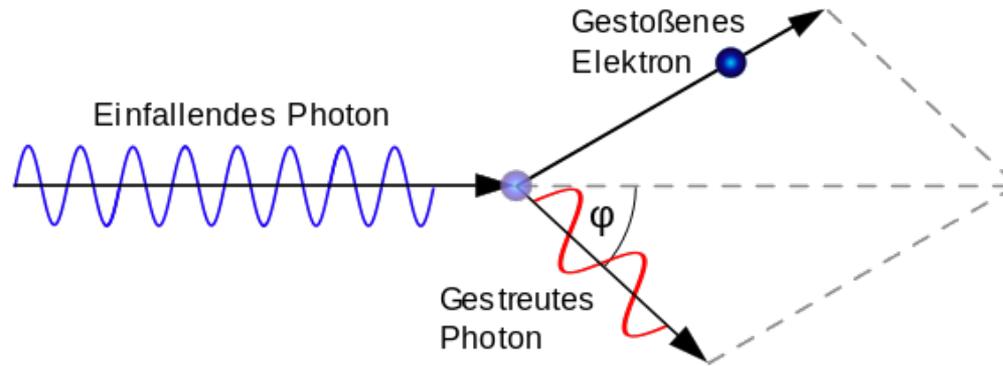
Relevant bei sehr niedrigen Energien,
bzw. sehr niedriger Wirkungsquerschnitt

Photoeffekt



- Stark abfallende Energieabhängigkeit des Wirkungsquerschnitts
- Kantenstruktur (Energieniveaus im Atom)-

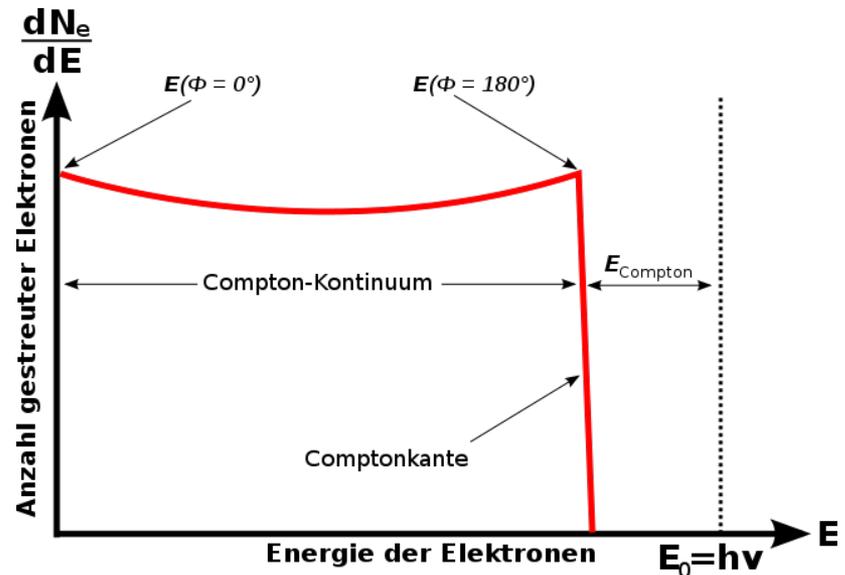
Comptoneffekt



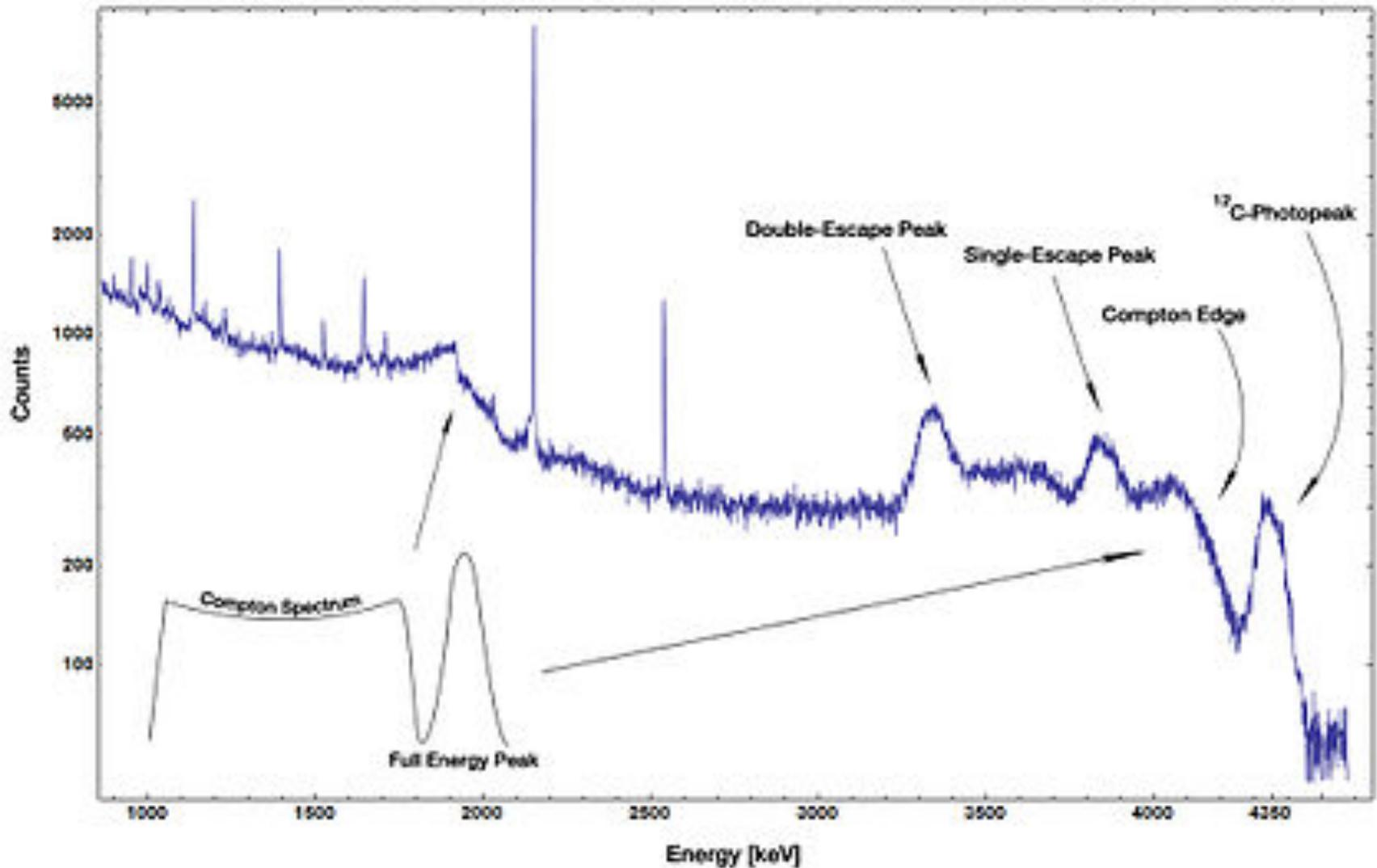
Streuung von Photonen an schwach gebundenen Hüllenelektronen

Energie-Impulserhaltung führt zu fester Beziehung zwischen Energien und Streuwinkeln der Teilchen im Endzustand

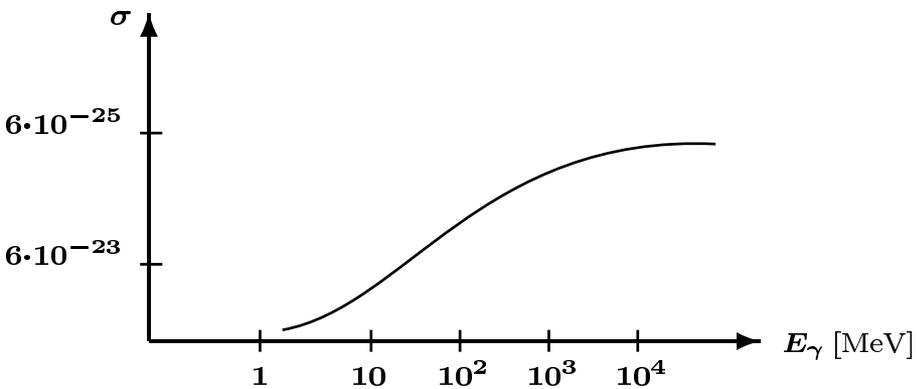
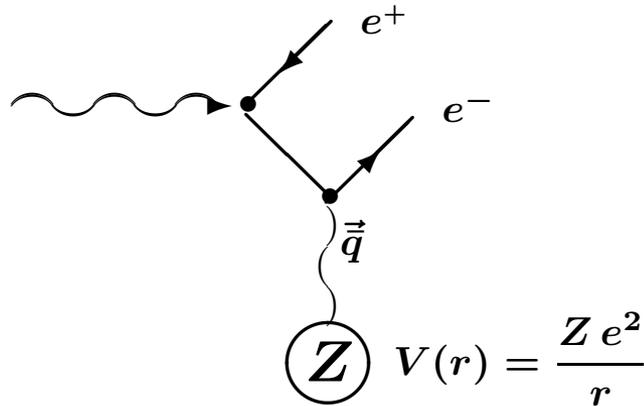
Wirkungsquerschnitt (QFT-1 Vorlesung)
Semiklassische Herleitung



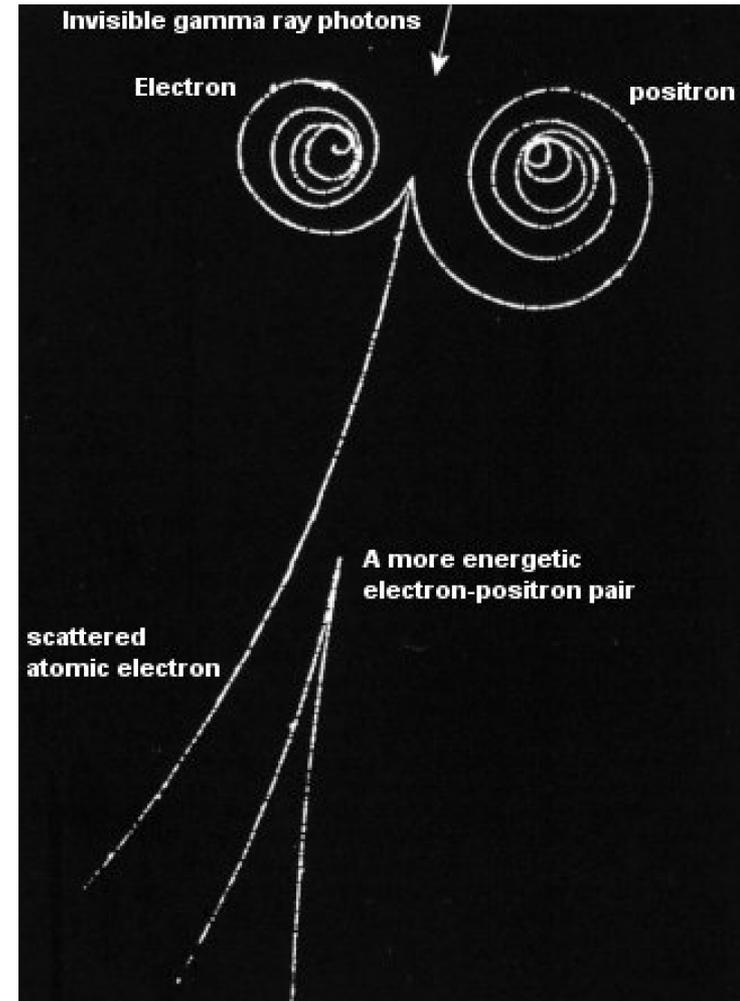
Photoeffekt und Comptoneffekt in der Praxis



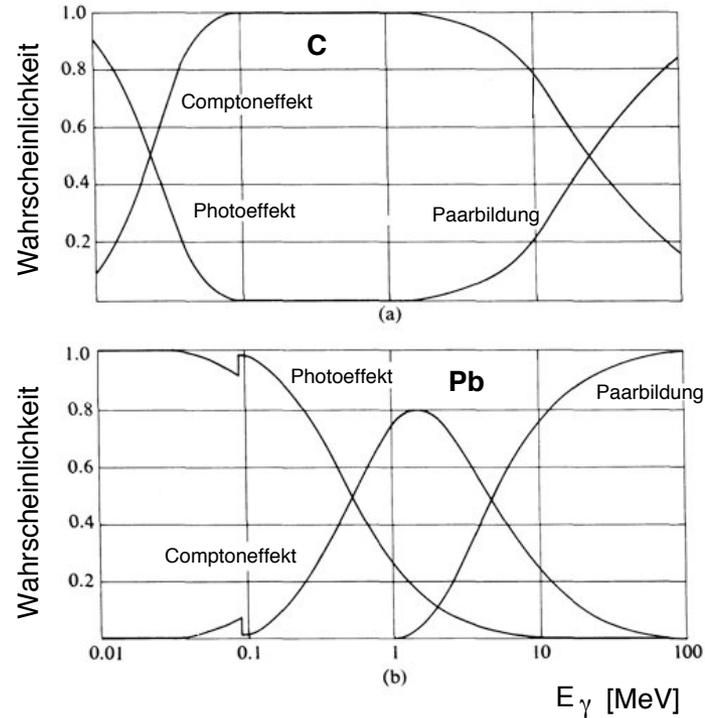
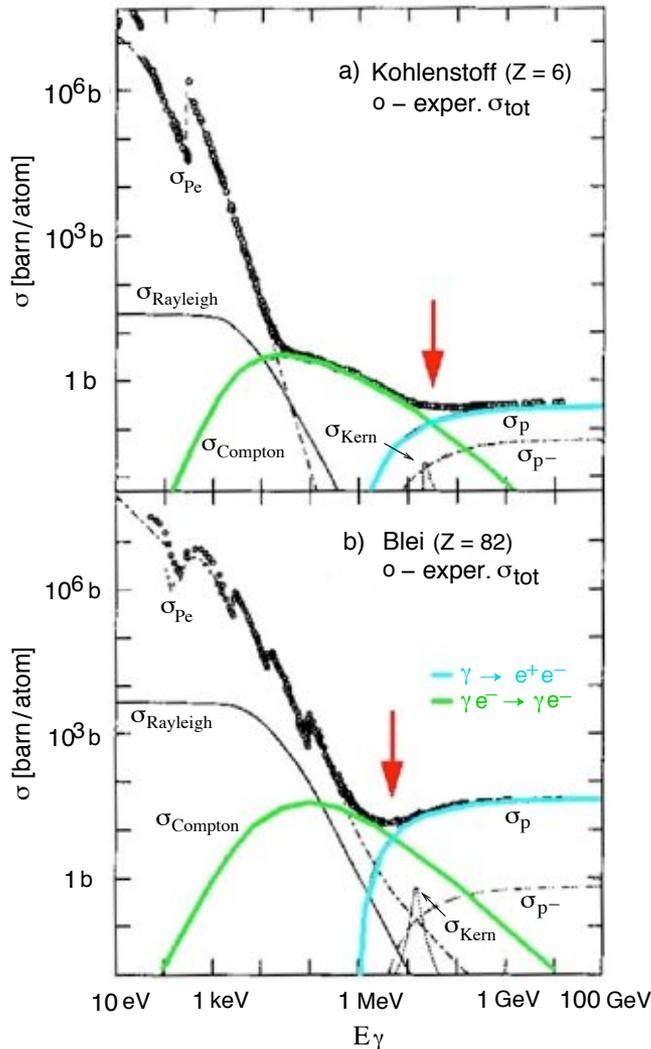
Paarbildung



- Erzeugung eines Elektron-Positronpaares im Kernfeld
- Schwelleneffekt: $E > 2m_e$



Wechselwirkung von Photonen mit Materie

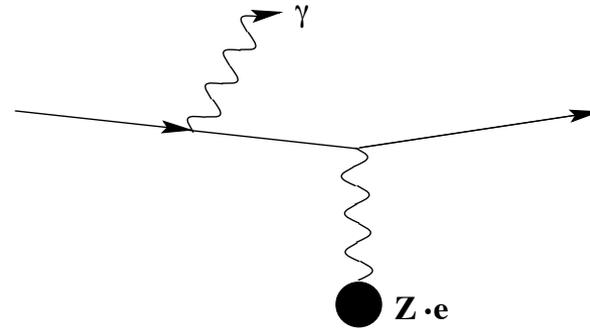
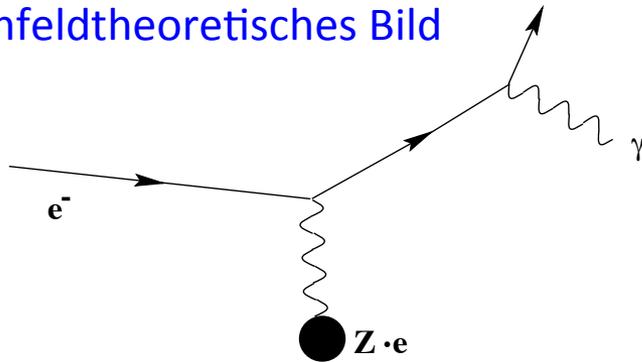


Effekt	Wirkungsquerschnitt	E_γ -Abhängigkeit	dominant für
Photoeffekt	$\sigma_{ph} \sim (Z^4 \dots Z^5)r_e^2\alpha^3$	\searrow	$E_\gamma < 30 \text{ keV}$
Compton-Effekt	$\sigma_c \sim Zr_e^2$	\searrow	$0.03 \dots 5 \text{ MeV}$
Paarbildung	$\sigma_P \sim Z^2r_e^2$	\nearrow	$> 5 \text{ MeV}$

Bremsstrahlung

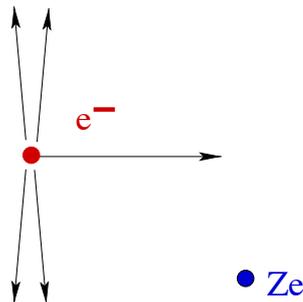
Photonabstrahlung von (schnellen, leichten) geladenen Teilchen im Kernfeld

Quantenfeldtheoretisches Bild

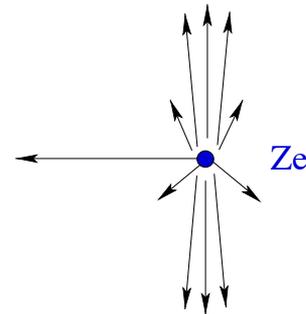


Semiklassisches Bild: Weizsäcker Williams

Labor

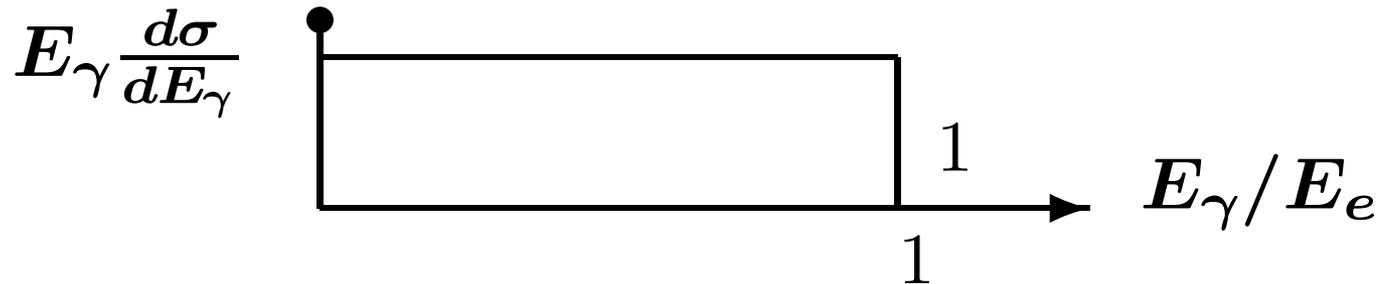


e^- -Ruhsystem



Bremsstrahlung

Energiespektrum der erzeugten Photonen



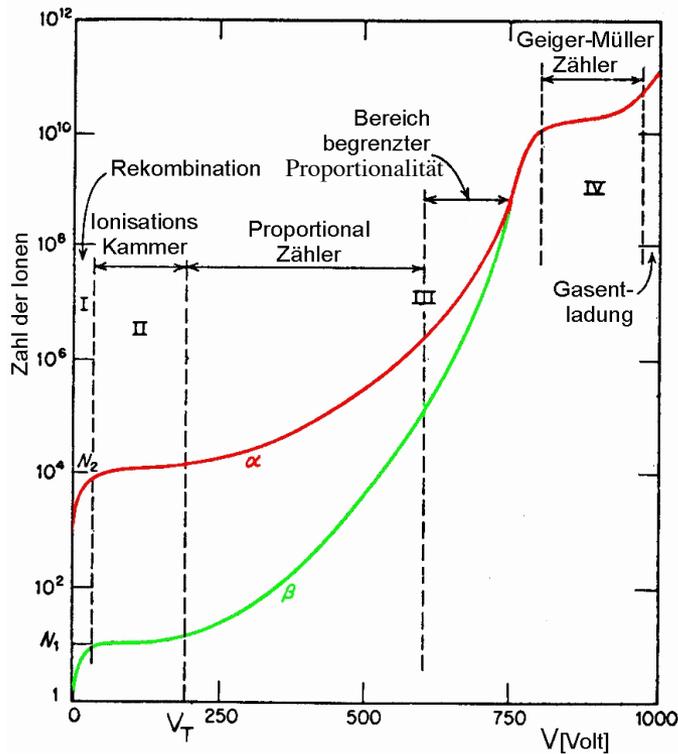
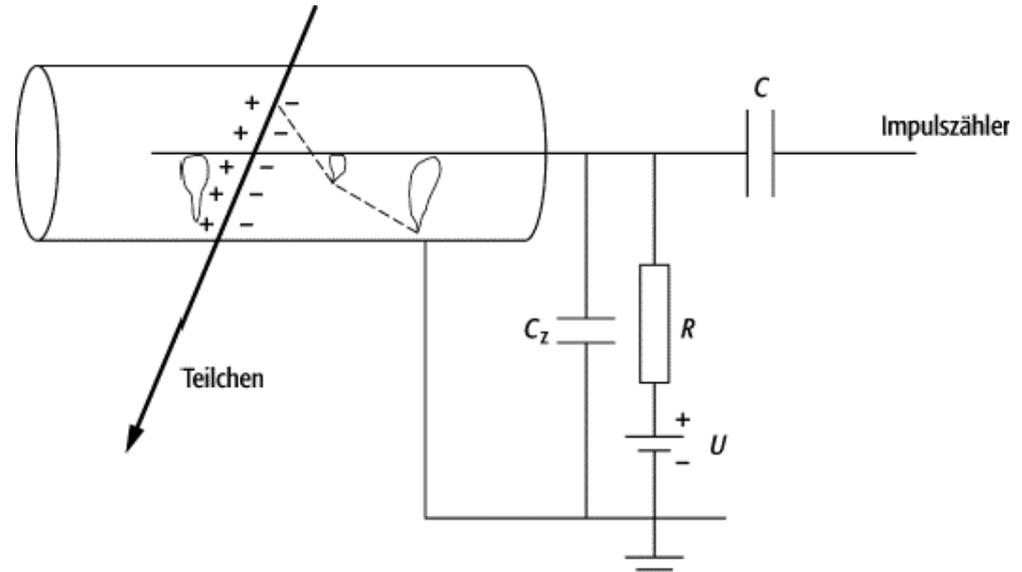
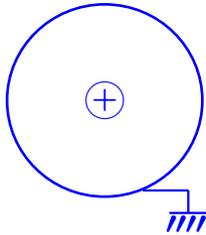
Energieverlust der geladenen Teilchen

$\frac{dE}{dx}$	$=$	$-4Z^2$	$\frac{L \cdot \rho}{A}$	$\frac{r_e^2}{137}$	E_e	$\ln \frac{183}{Z^{1/3}}$	$=$	$-\frac{E_e}{X_0}$
		↑	↑	↑	↑			
		Stärke	# Kerne	Wkq.	Photonenspektrum			
		Coulombfeld						

Detektoren

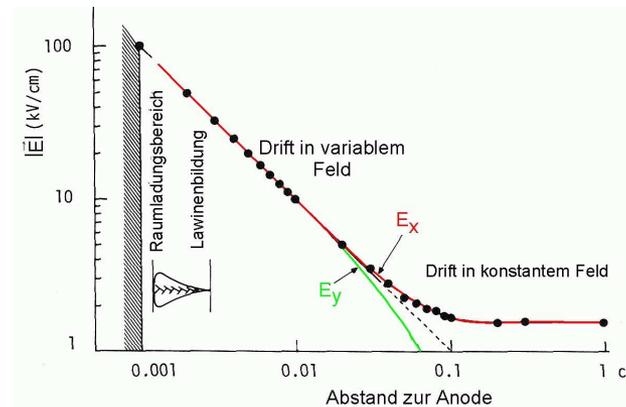
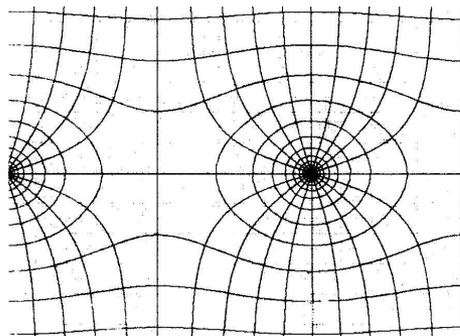
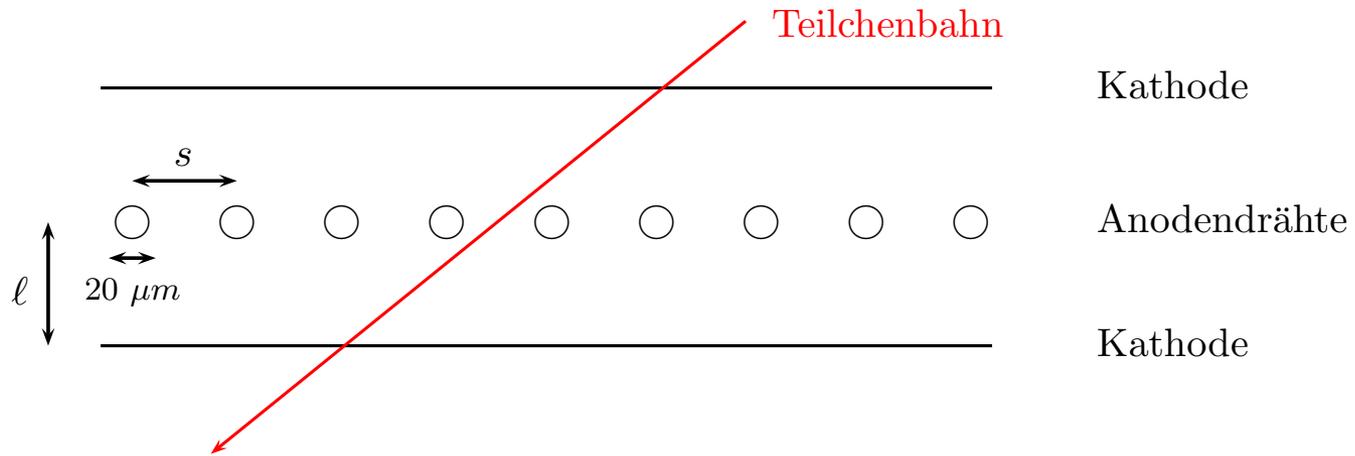
- Spurdetektoren
 - Driftkammern
 - Siliziumdetektoren
- Kalorimeter
 - Elektromagnetische Kalorimeter
 - Hadronische Kalorimeter

Geiger Müller Zählrohr



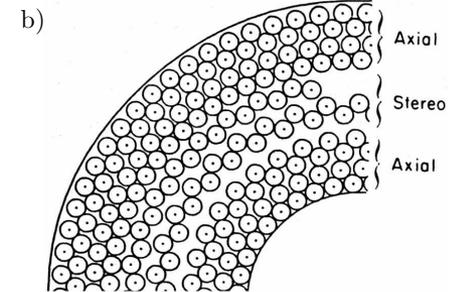
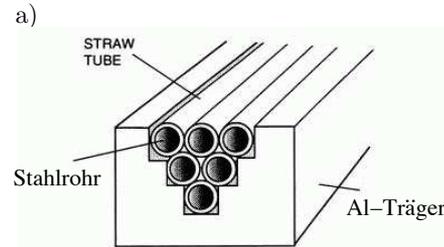
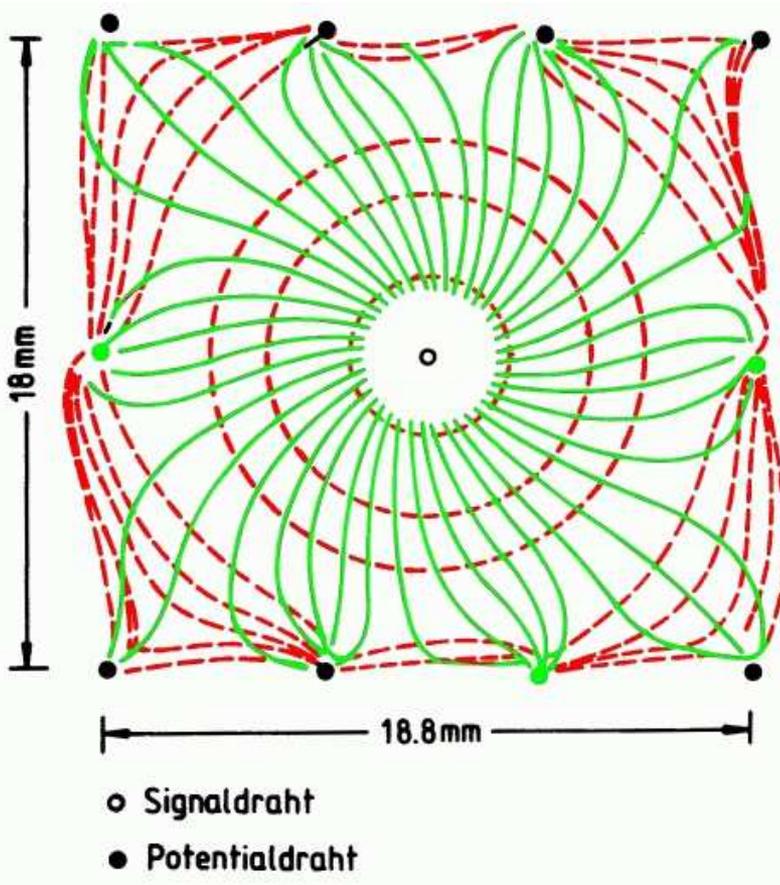
- Ionisation des Gases im Zählrohr
- Drift der Elektronen zur Anode
- Signalcharakteristik hängt von der Anodenspannung ab

Multi-Wire Proportional Chamber (Charpak, Nobelpreis 1992)



Driftzeit unterstützt Spurrekonstruktion

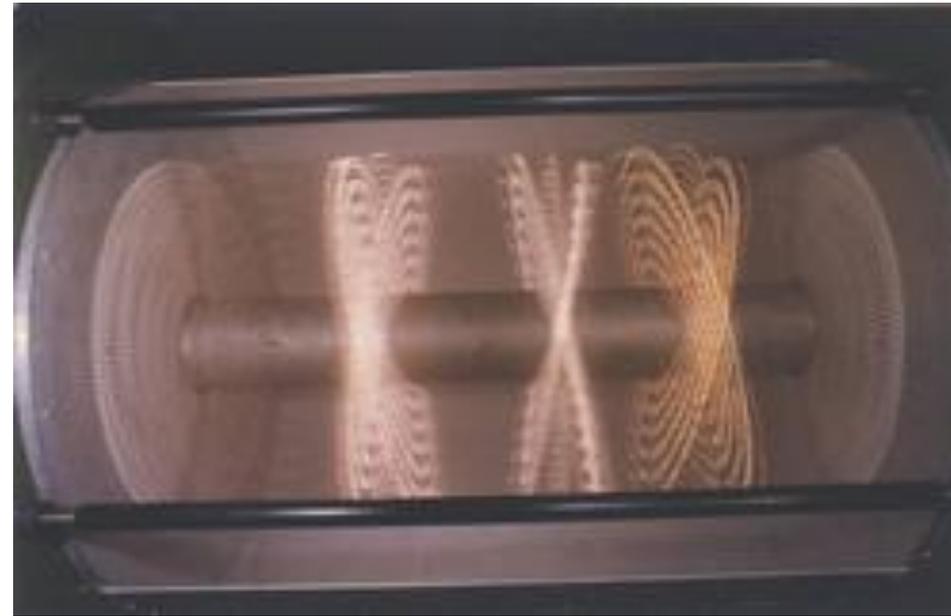
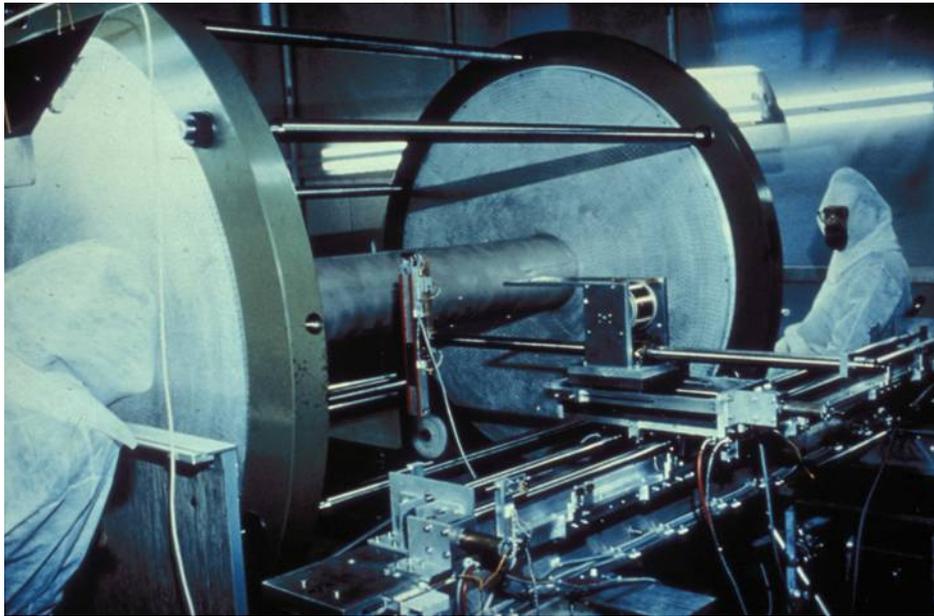
Driftkammer



- Grosse Anzahl von Signaldrähten ($> 10^4$)
- Möglichst homogenes E-Feld
- Kombination mit Magnetfeld durch eine Solenoidspule

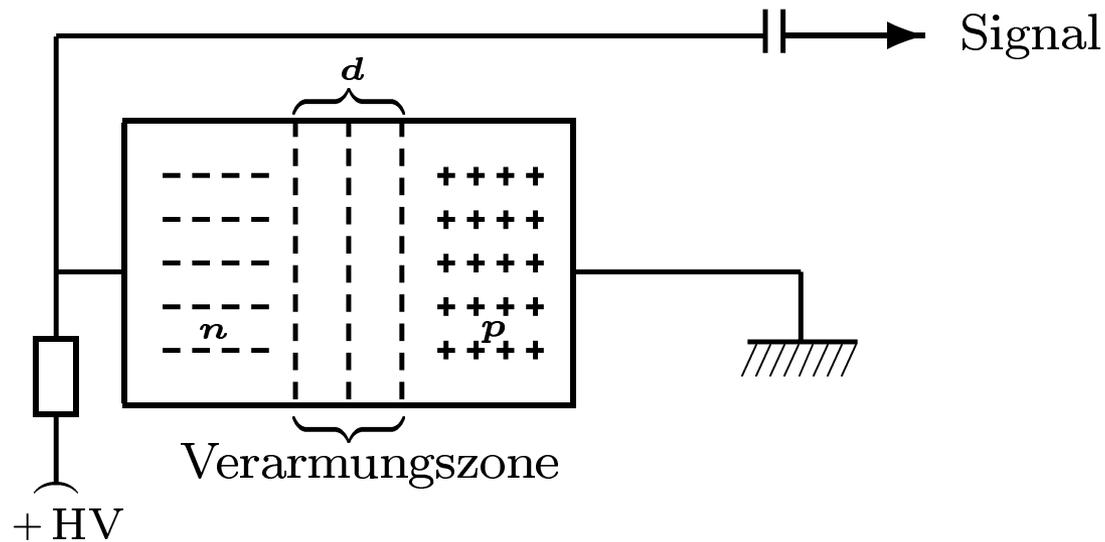
ARGUS-Experiment

ARGUS Driftkammer



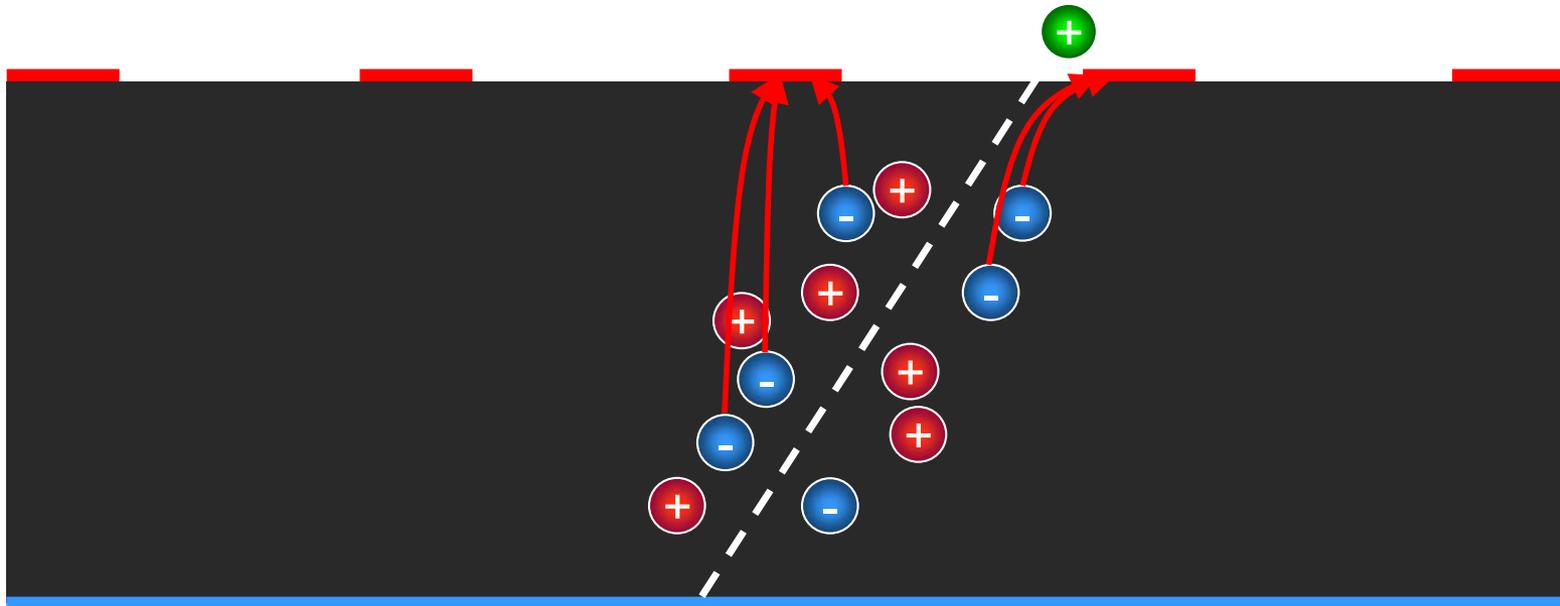
Siliziumdetektoren

pn-Übergang als Detektor



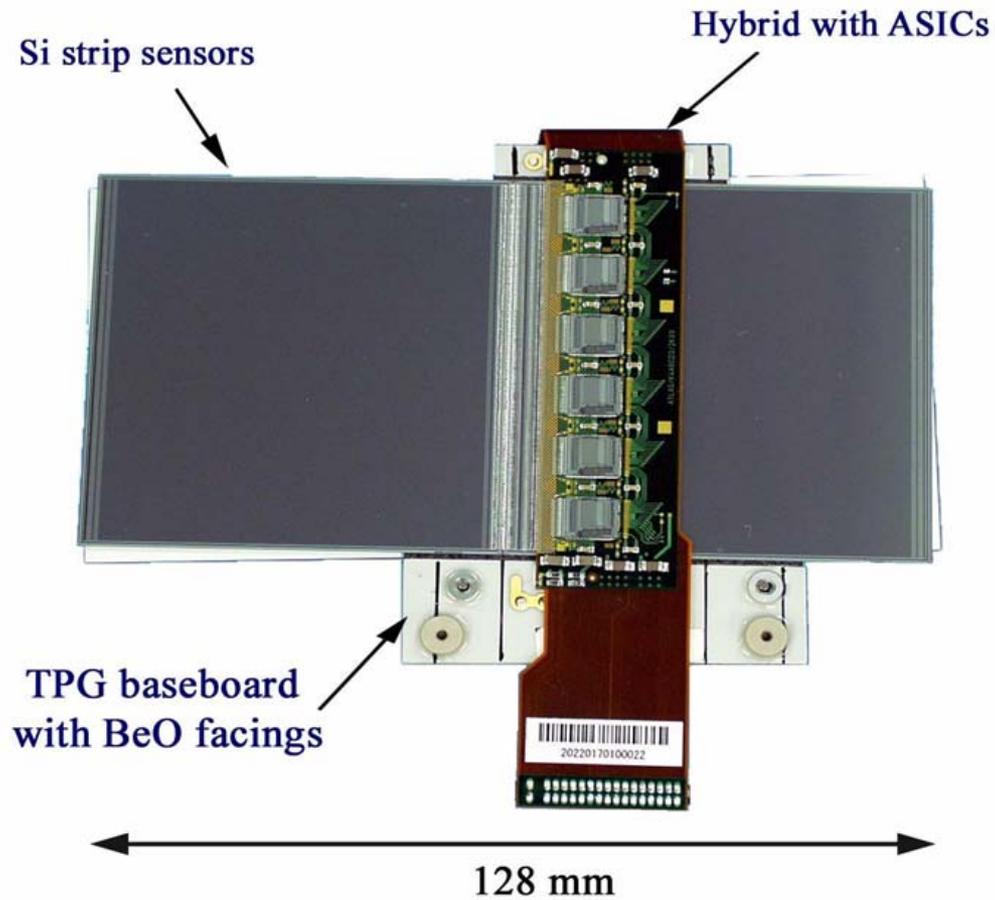
- Ionisation in der Verarmungszone
- Ladungstrennung durch elektrisches Feld
- Drift der Ionisationsladung zu Anode und Kathode

Siliziumdetektoren

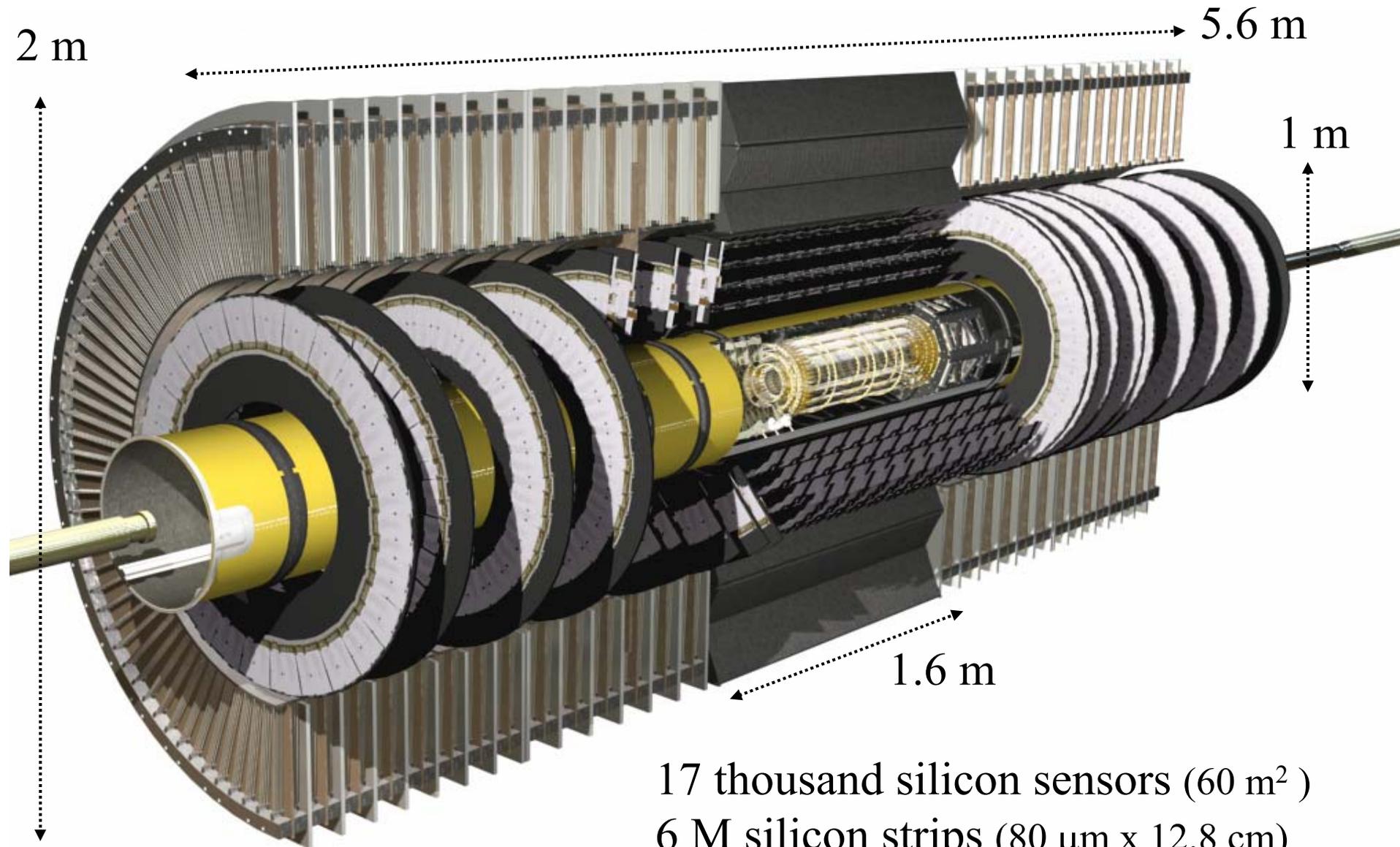


- Siliziumscheibe ($\sim 300 \mu\text{m}$)
- Anodenschicht (unten)
- Kathode (Streifen oder Pixel)

Siliziumdetektoren: ATLAS Modul



ATLAS Silicon Tracker



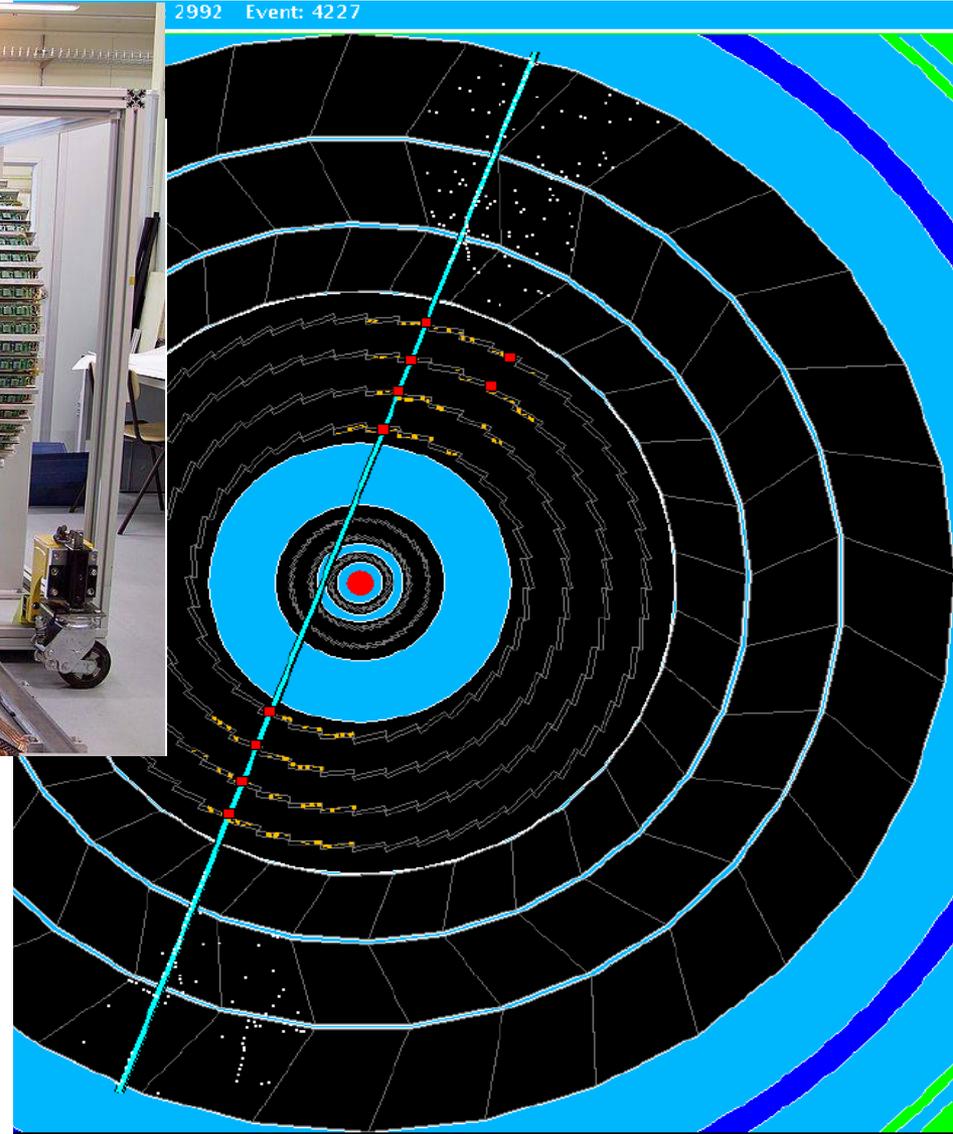
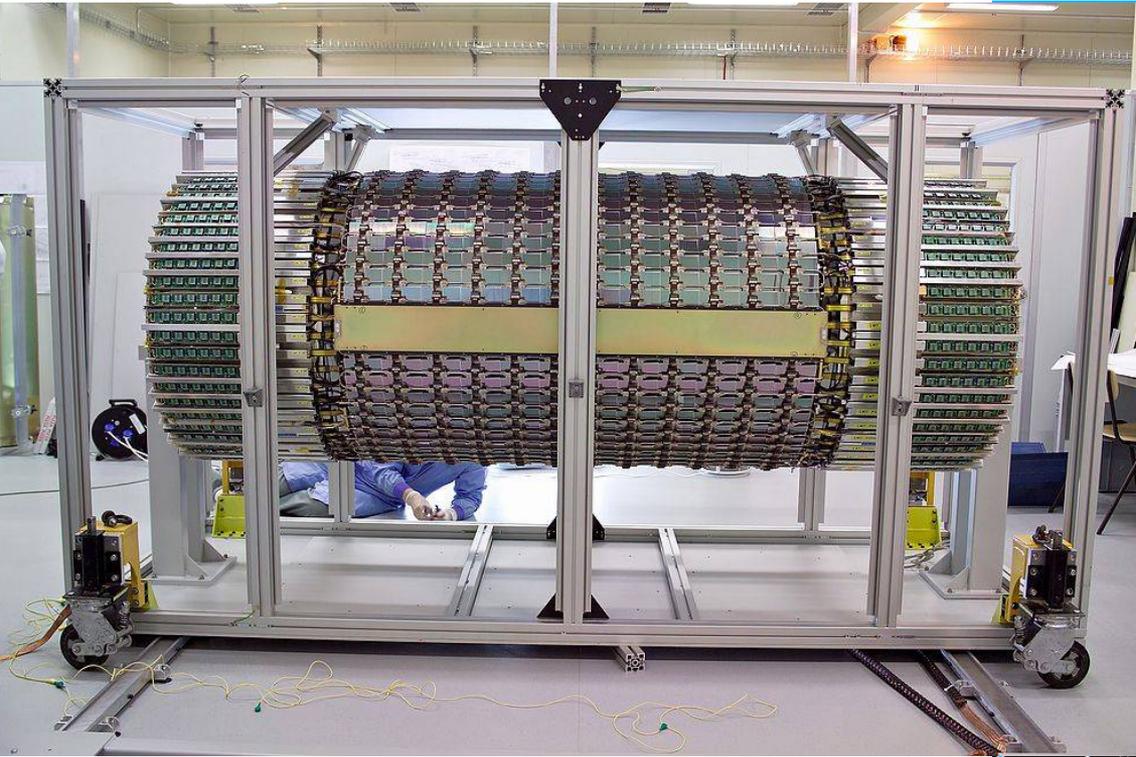
17 thousand silicon sensors (60 m^2)

6 M silicon strips ($80 \mu\text{m} \times 12.8 \text{ cm}$)

80 M pixels ($50 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$)

40 MHz event rate; > 50 kW power

Siliziumdetektoren

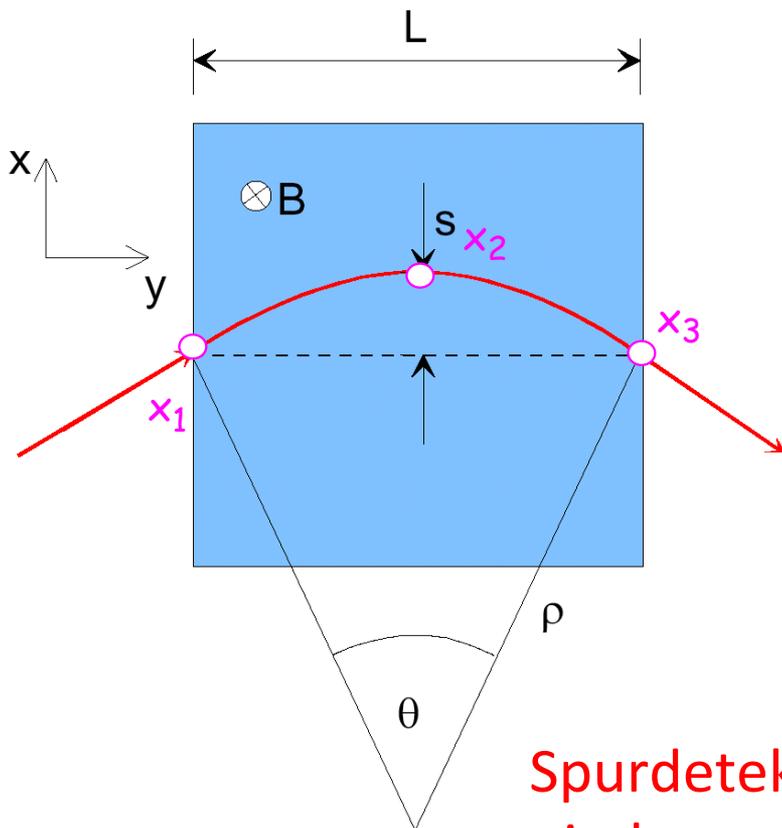


Spurdetektoren: Impulsmessung

Impuls eines geladenen Teilchens

$$p_T = qB\rho$$

$$\frac{\sigma(p_T)}{p_T} = \frac{\sigma_s}{s} = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma_x \cdot \frac{8p_T}{0.3BL^2}$$



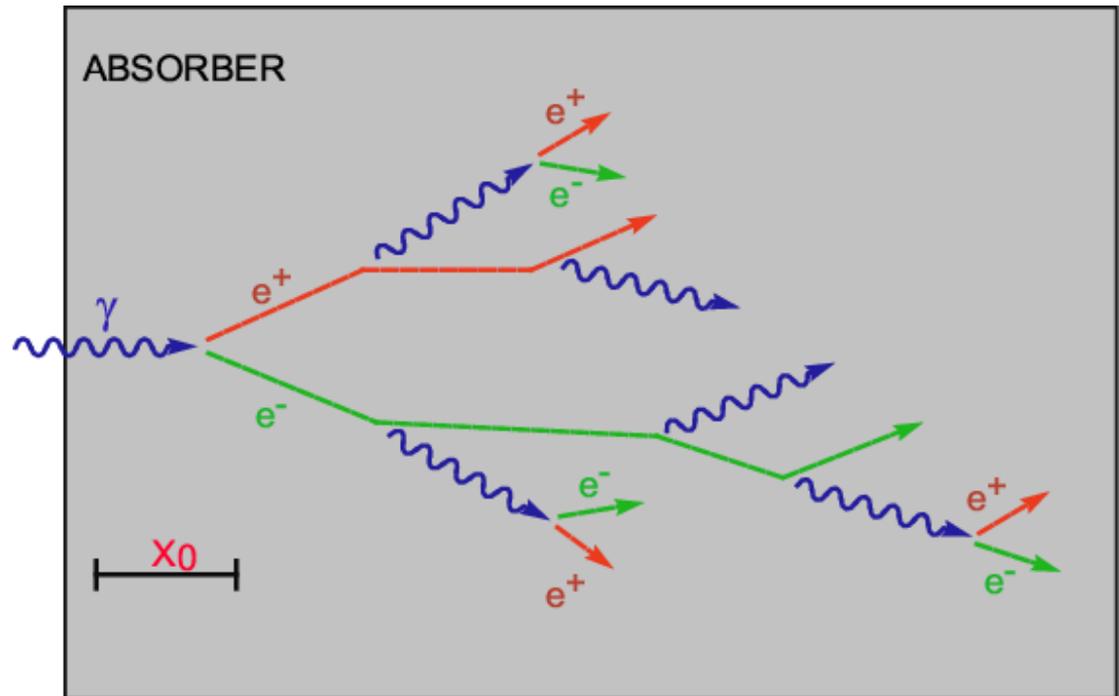
Spurdetektoren können gut den Impuls von niederenergetischen geladenen Teilchen messen

Kalorimeter

- Energiemessung von geladenen und neutralen Teilchen durch totale Absorption
- Elektromagnetische Kalorimeter
 - Elektronen, Photonen
- Hadronische Kalorimeter
 - Protonen, Neutronen, geladene Pionen

Elektromagnetischer Schauer

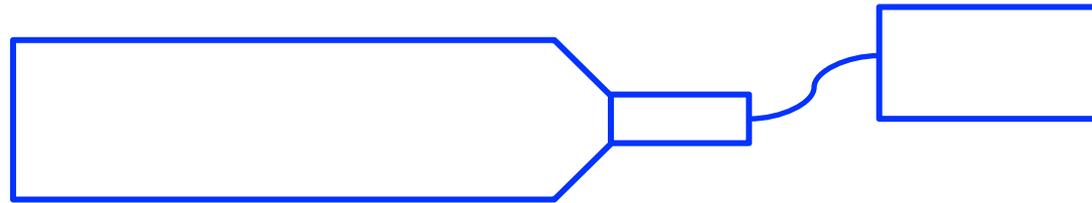
Energieabsorption von
Elektronen und Photonen
in einem dichten Medium



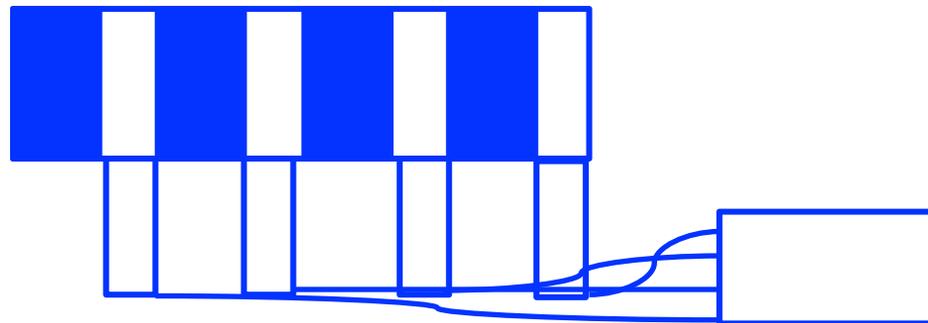
Kombination aus Bremsstrahlungs- und Paarbildungsprozessen
Charakteristische Längenskala ist die Strahlungslänge X_0
Niederenergetische Teilchen am Ende der Kaskade erzeugen Signal
(Licht oder Ladung)

Kalorimetertypen

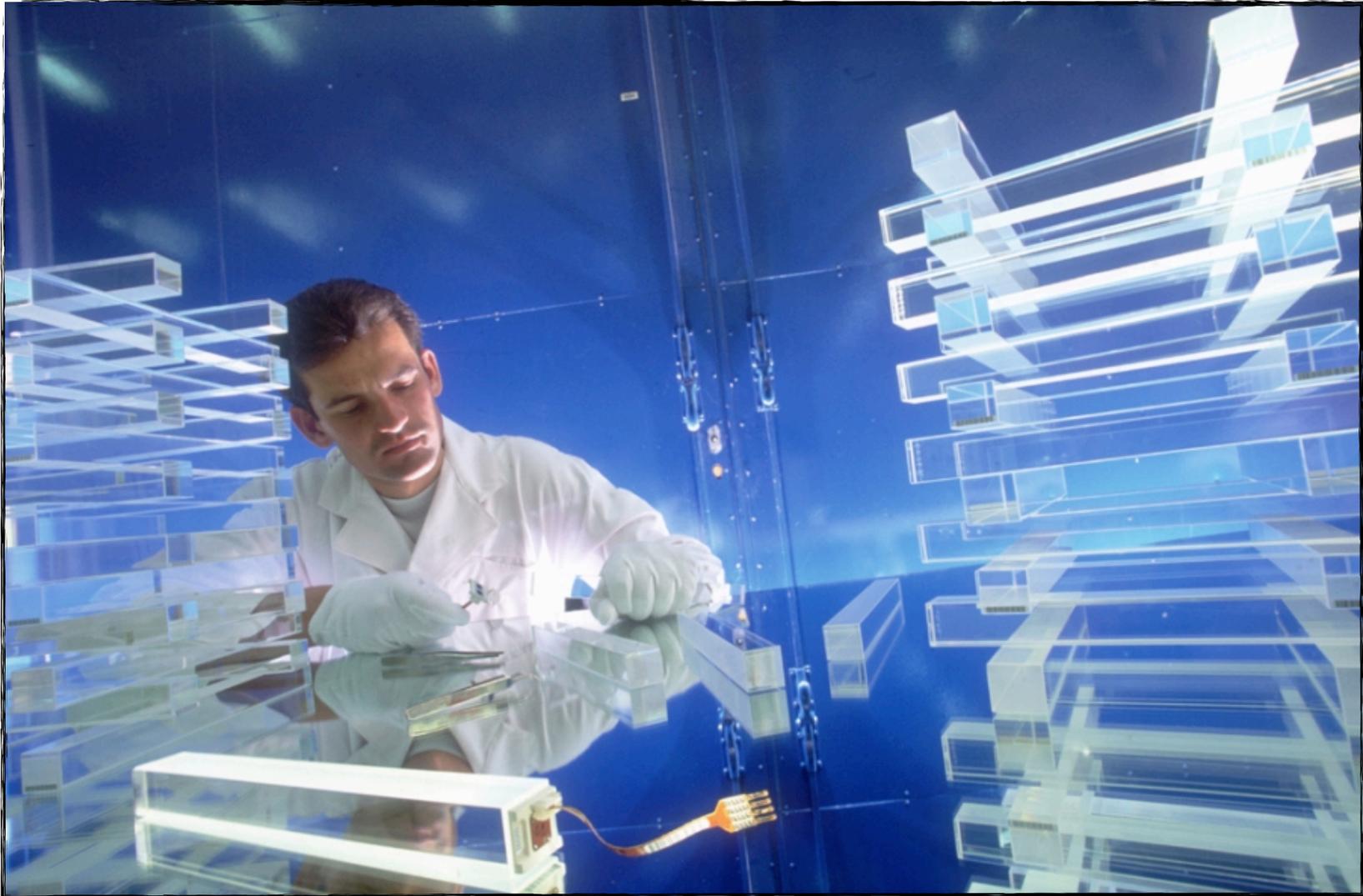
Homogene Kalorimeter: Aktives Medium + Signaldetektor + Elektronik



Sampling Kalorimeter: Passives Medium + Aktives Medium + Signaldetektor + Elektronik

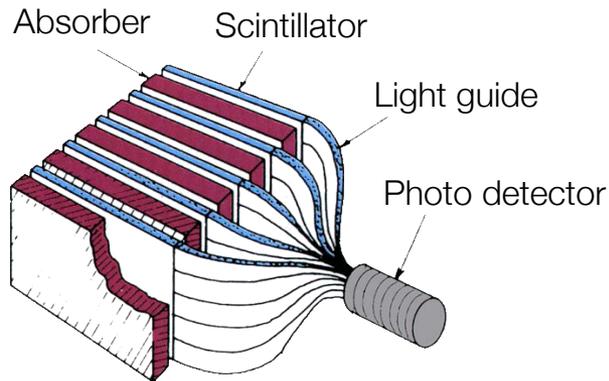


CMS Kristallkalorimeter



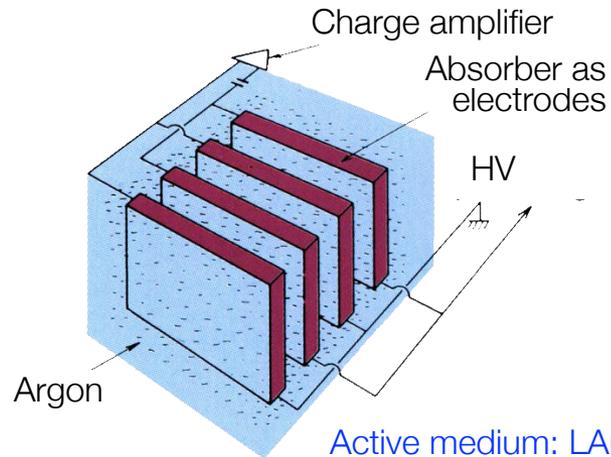
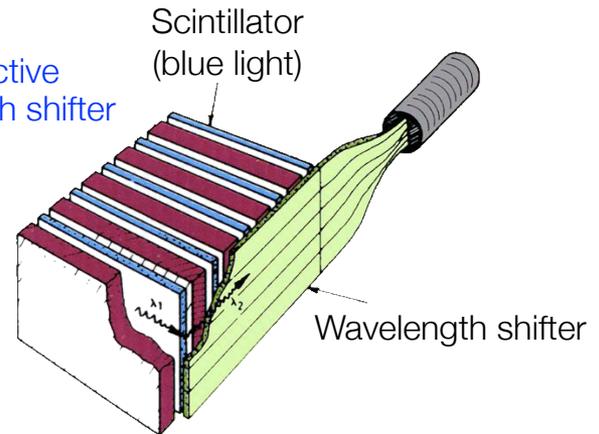
Sampling Kalorimeter

Scintillators as active layer;
signal readout via photo multipliers



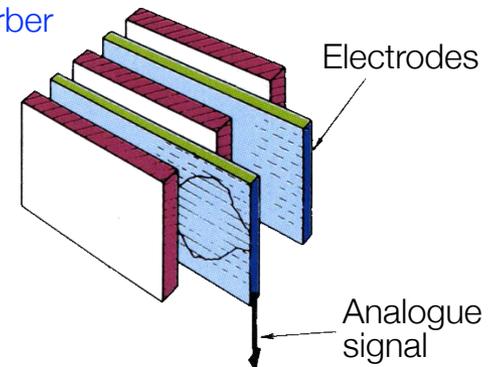
Possible setups

Scintillators as active layer; wave length shifter to convert light

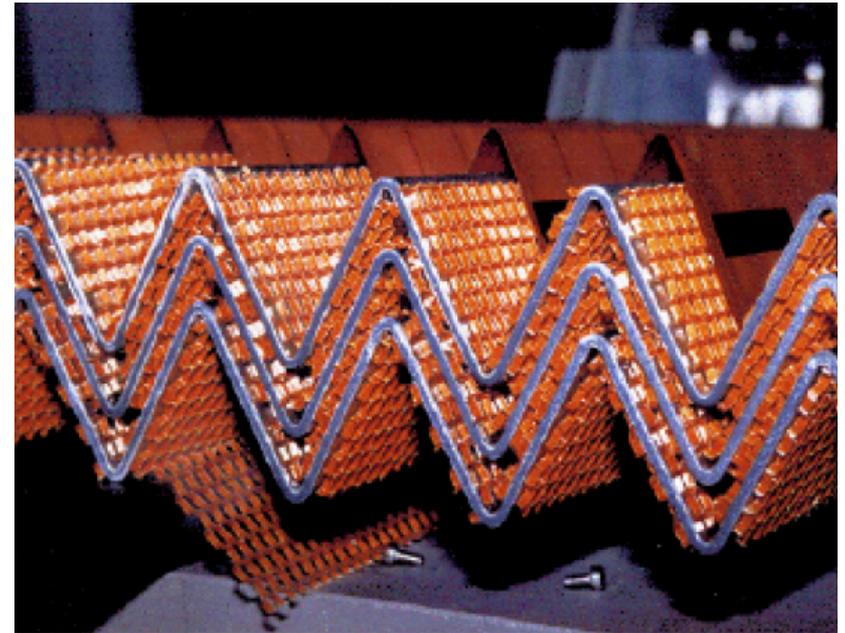
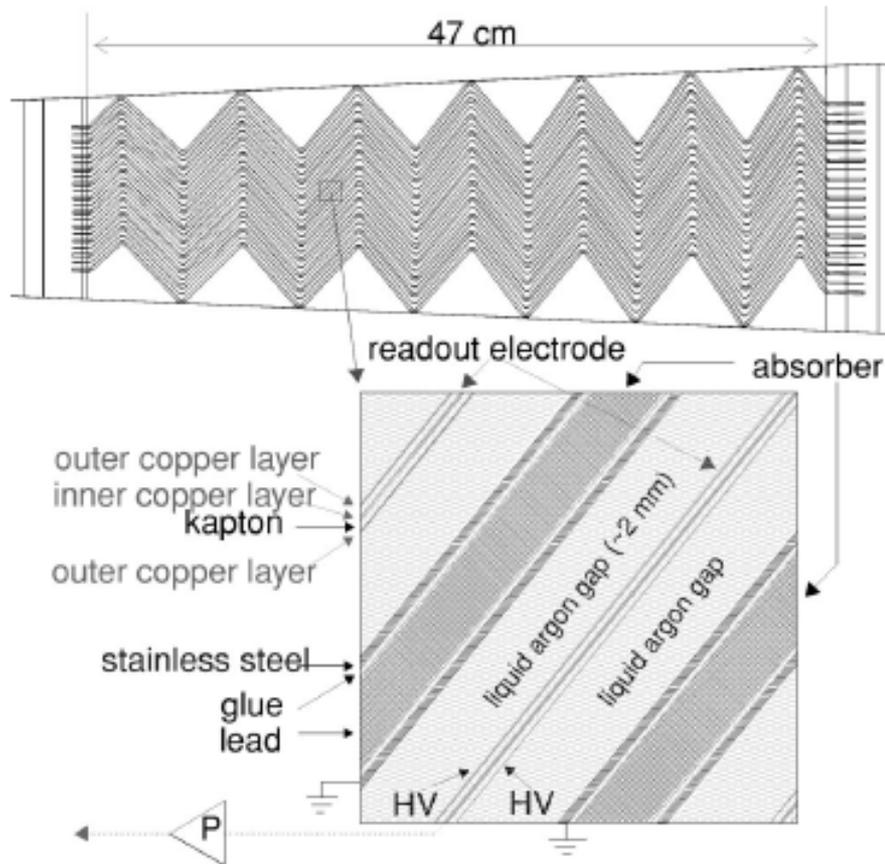


Active medium: LAr; absorber embedded in liquid serve as electrodes

Ionization chambers between absorber plates



Sampling Kalorimeter: ATLAS LAr

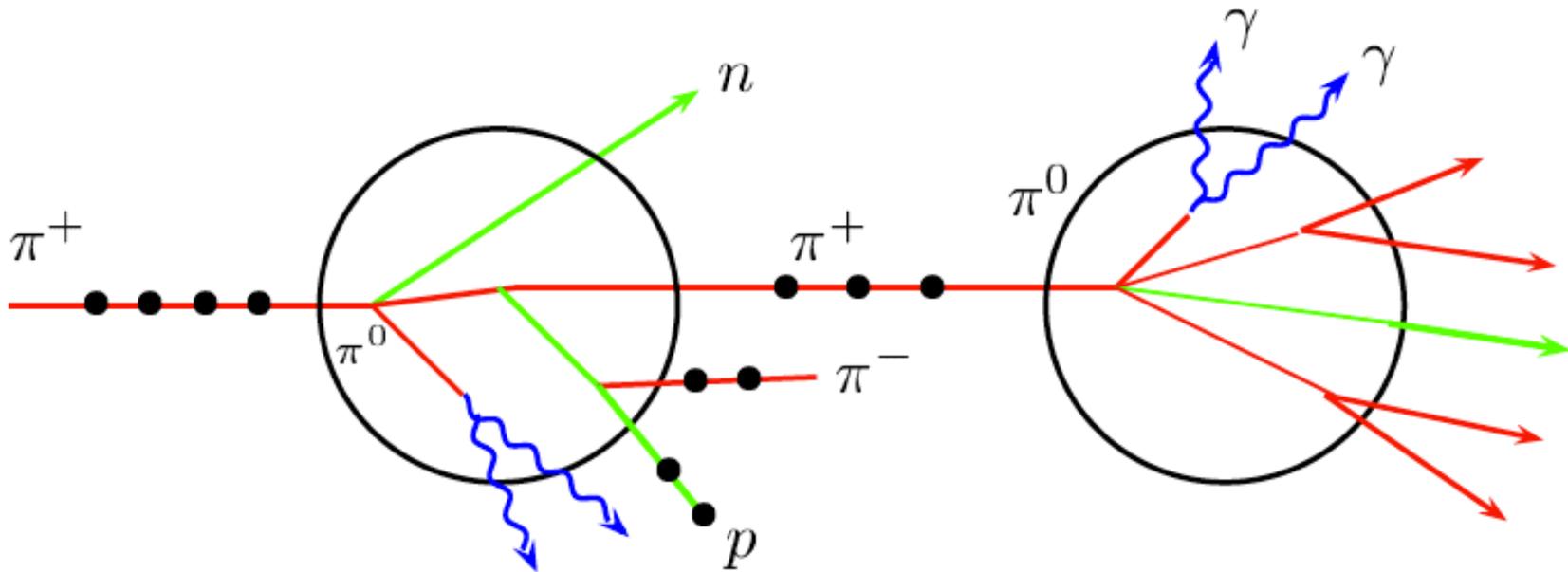


Accordion structure:
No gaps, cracks, holes in ϕ

Wechselwirkung von Hadronen mit Materie

1st Schritt: Intra-Nukleare Kaskade

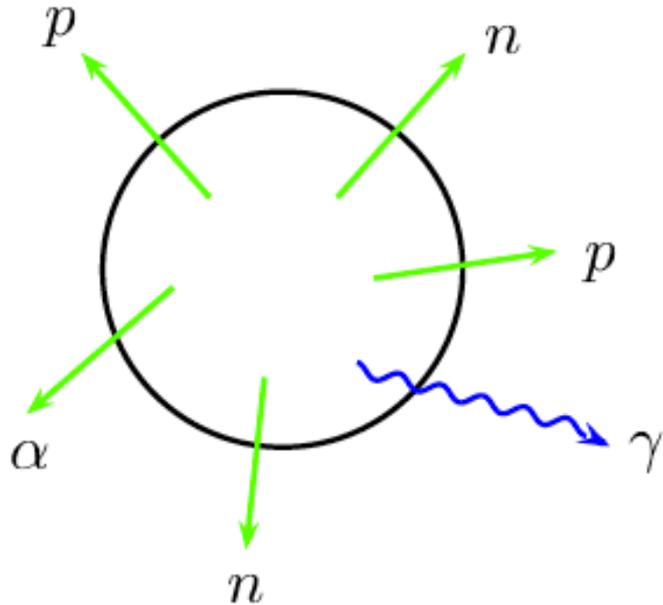
Inter-Nukleare Kaskadende



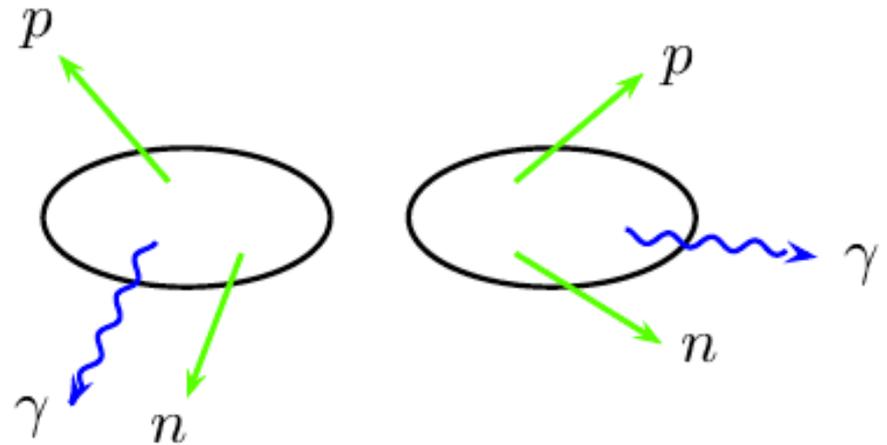
Wechselwirkung von Hadronen mit Materie

2nd Schritt:

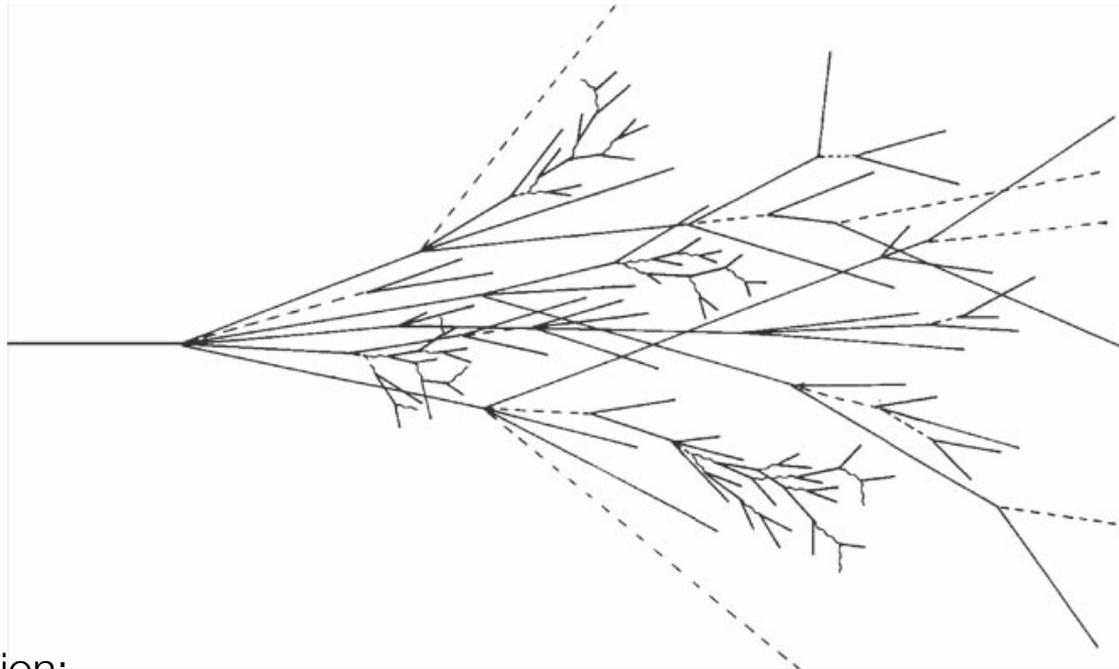
Verdampfung hochangeregter Kerne



Spaltung hochangeregter Kerne



Hadronische Schauer



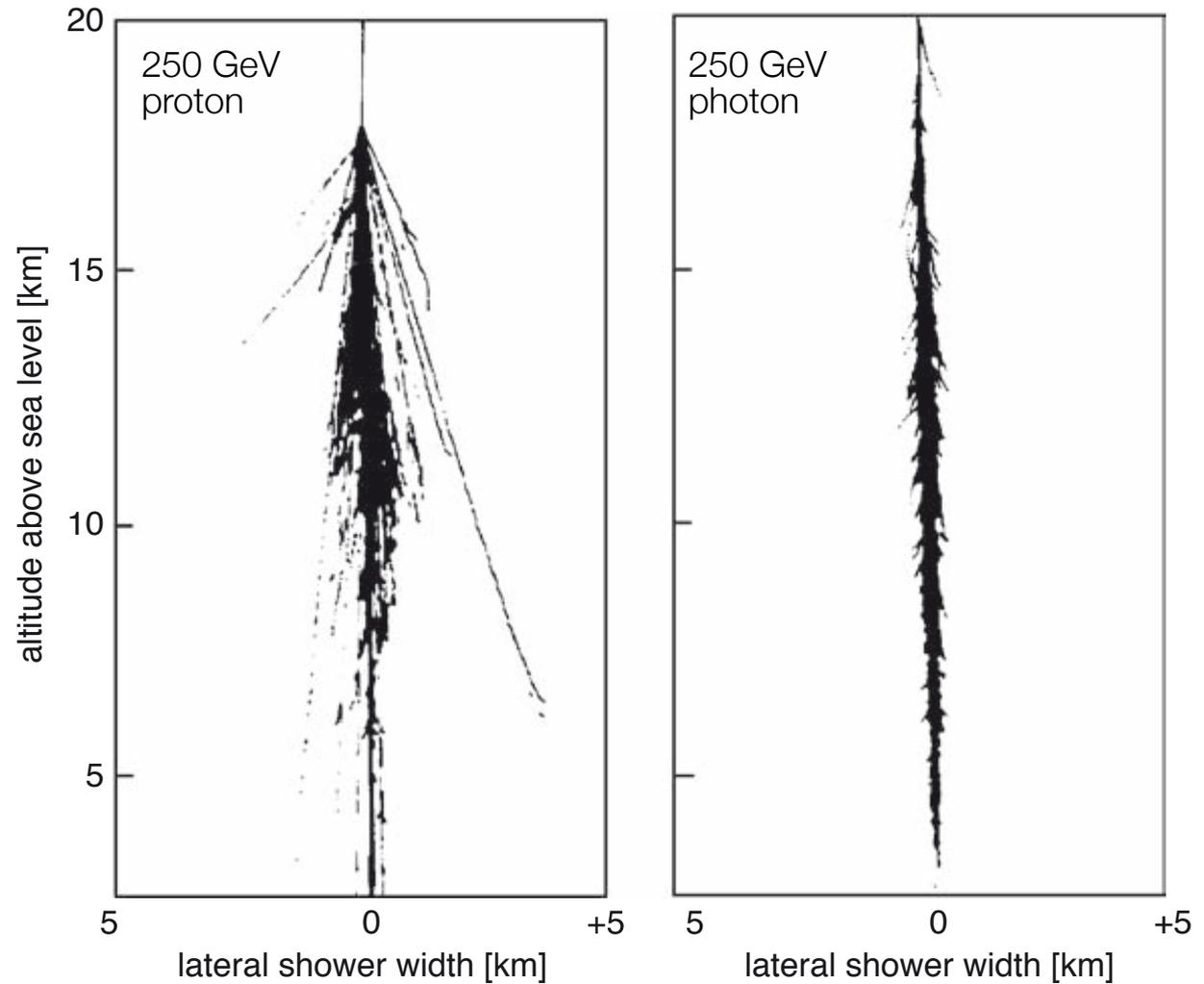
Cascade energy distribution:
[Example: 5 GeV proton in lead-scintillator calorimeter]

Ionization energy of charged particles (p, π, μ)	1980 MeV [40%]
Electromagnetic shower (π^0, η^0, e)	760 MeV [15%]
Neutrons	520 MeV [10%]
Photons from nuclear de-excitation	310 MeV [6%]
Non-detectable energy (nuclear binding, neutrinos)	1430 MeV [29%]
	<hr/>
	5000 MeV [29%]

**Subject to large
fluctuations**

Hadronische Schauer

Simulated airshower



ATLAS Tile Calorimeter



Particle ID

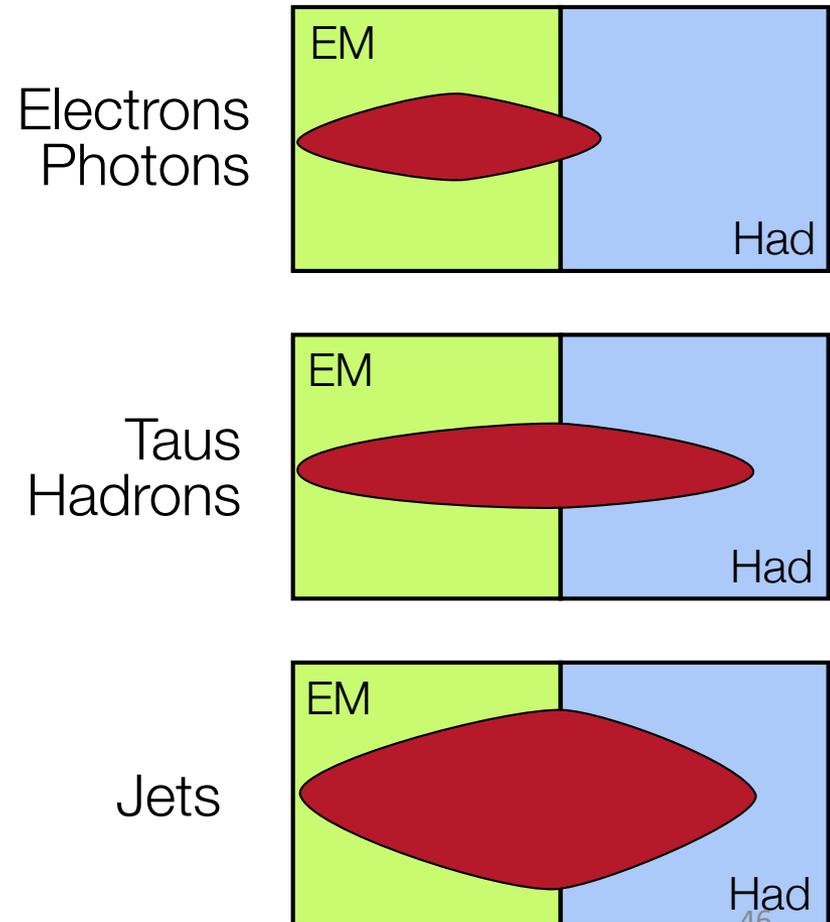
Typical HEP detector consist of two calorimeter systems:
electromagnetic and hadronic

Different setups chosen for optimal energy resolution

But:
Hadronic energy measured in both parts of the calorimeter

Needs careful consideration
of different response

Schematic of a
typical HEP calorimeter



Resolution: Master Formula

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$$

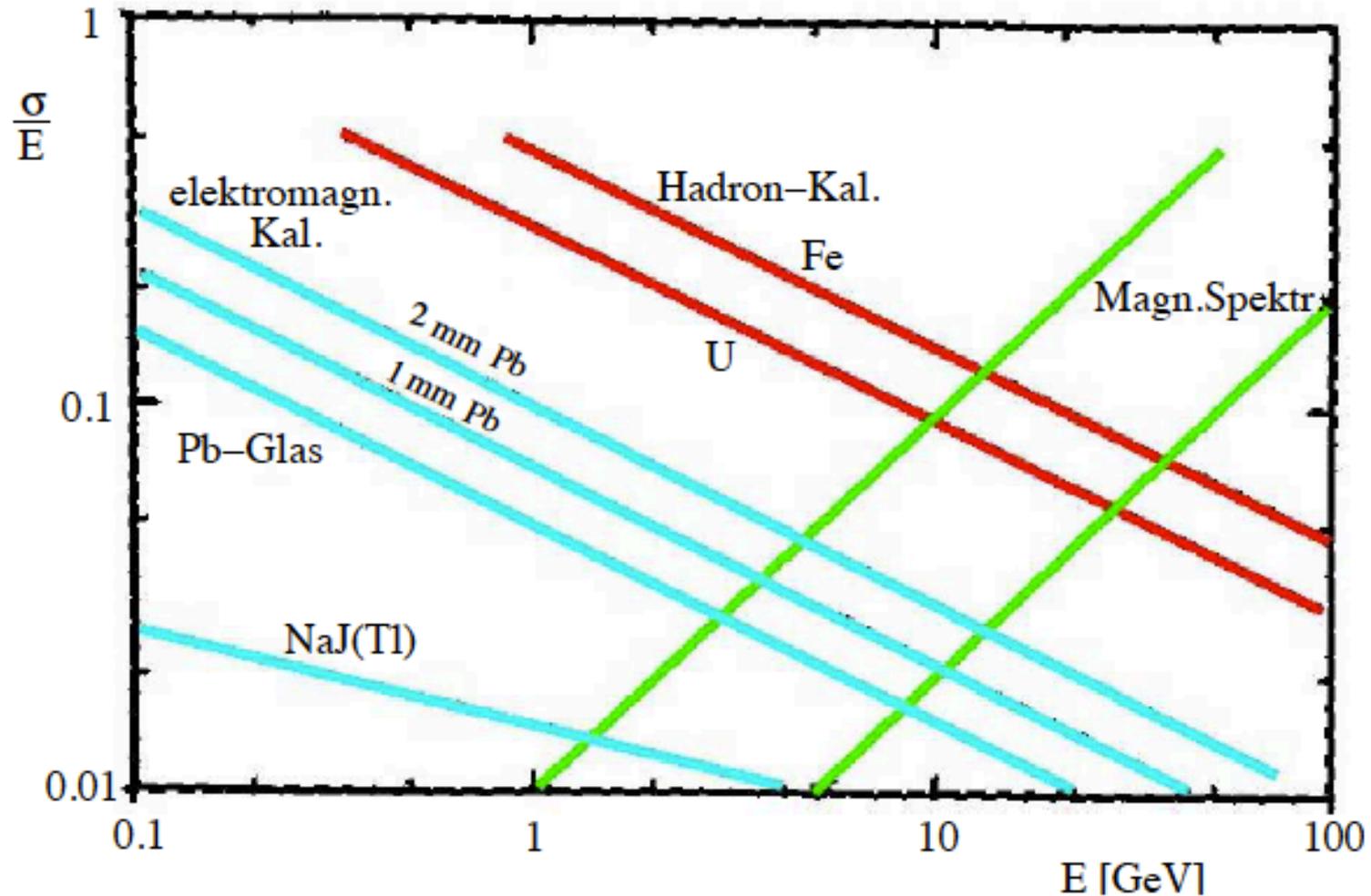
a – stochastic term (fluctuations)

b – noise term

c – constant term (miscalibration, inhomogenities)

Kalorimeter sind gut zur Messung hochenergetischer Teilchen

Vergleich: Spurdetektoren vs. Kalorimeter

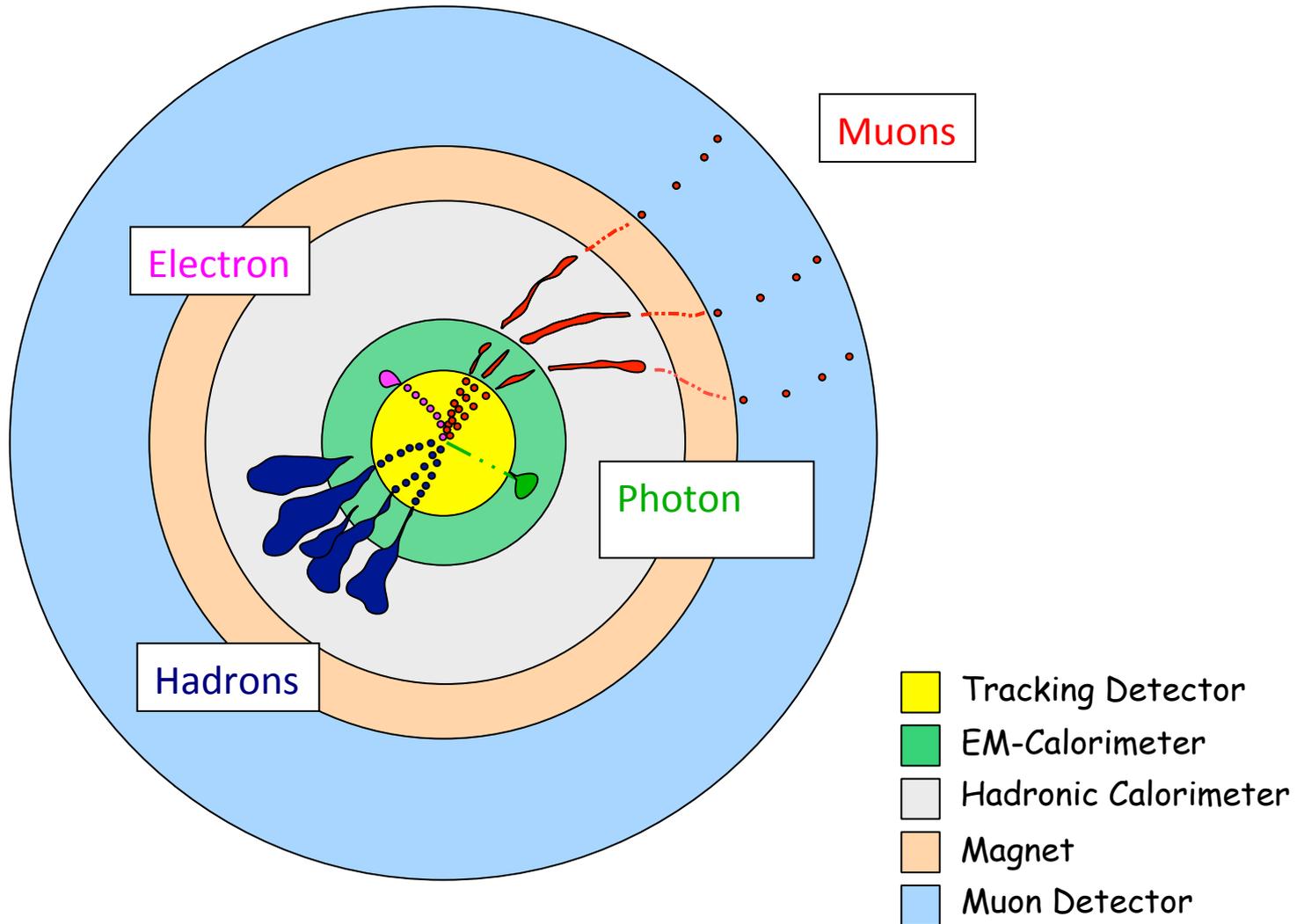


**Bei niedrigen Energien/Impulsen sind Spurdetektoren besser.
Bei hohen Energien sind Kalorimeter besser**

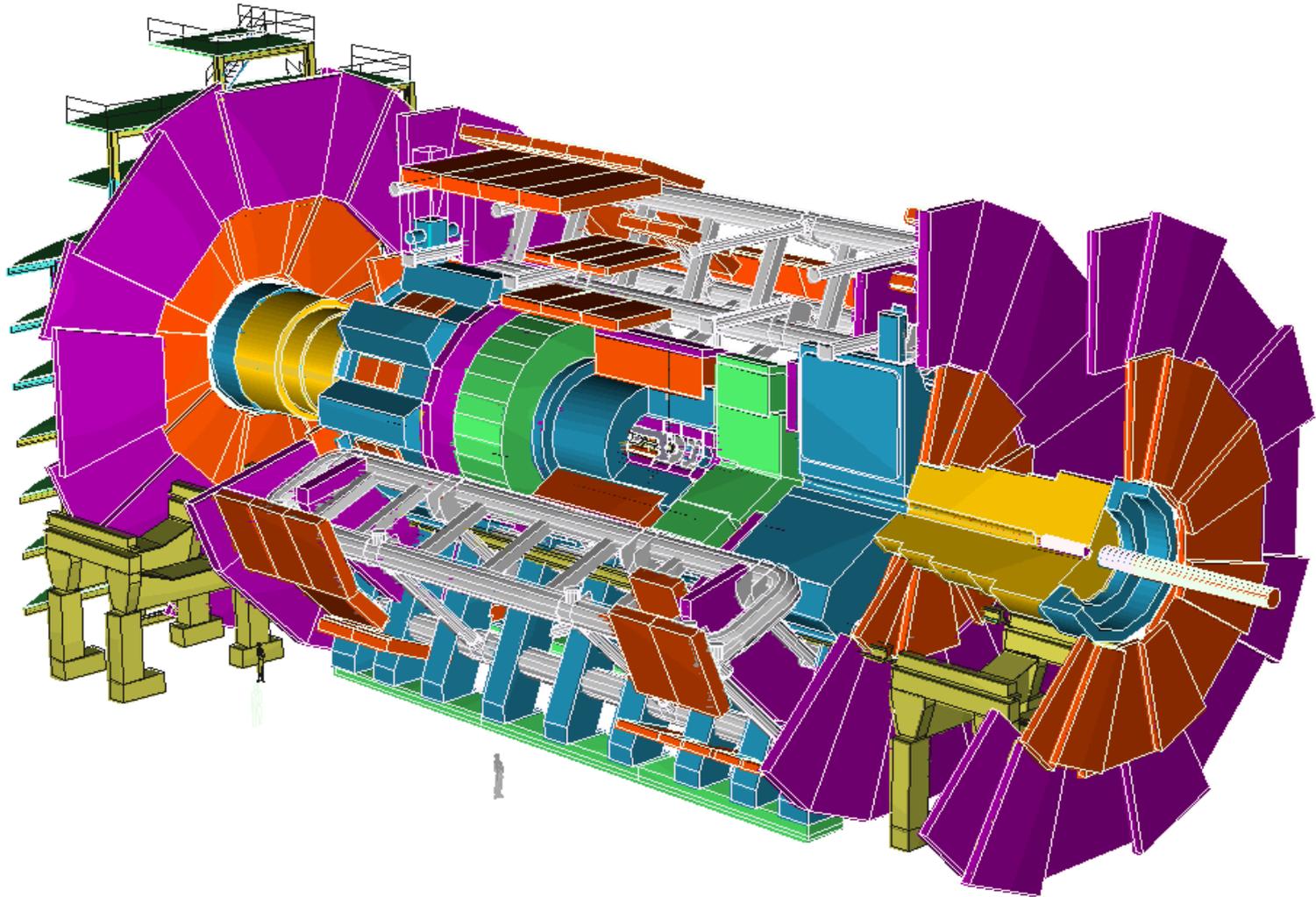
Detektorsysteme - Experimente

- Viele Beschleunigerexperimente sind Vielzweckexperimente
- Hohes Anforderungsprofil an die Detektoren
- Moderne Detektoren sind immer Kombinationen von verschiedenen Technologien

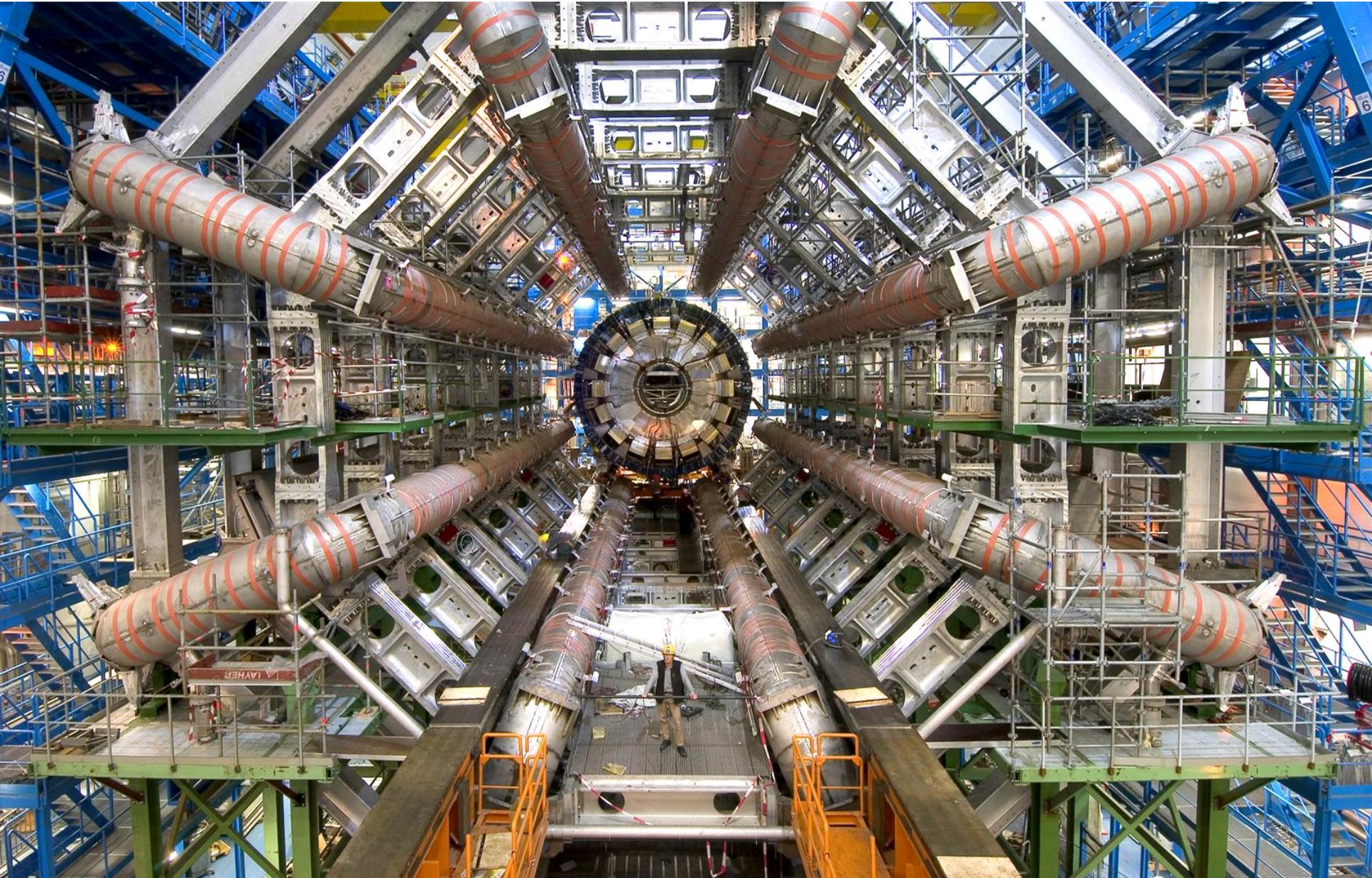
Typical Collider Detectors



ATLAS



ATLAS im „Rohbau“



Der Innere Detektor

Übergangsstrahlungs-Spurdetektor

- 4mm Strohalm Detektoren
- 350 000 Kanäle

Silizium Streifen Detektor:

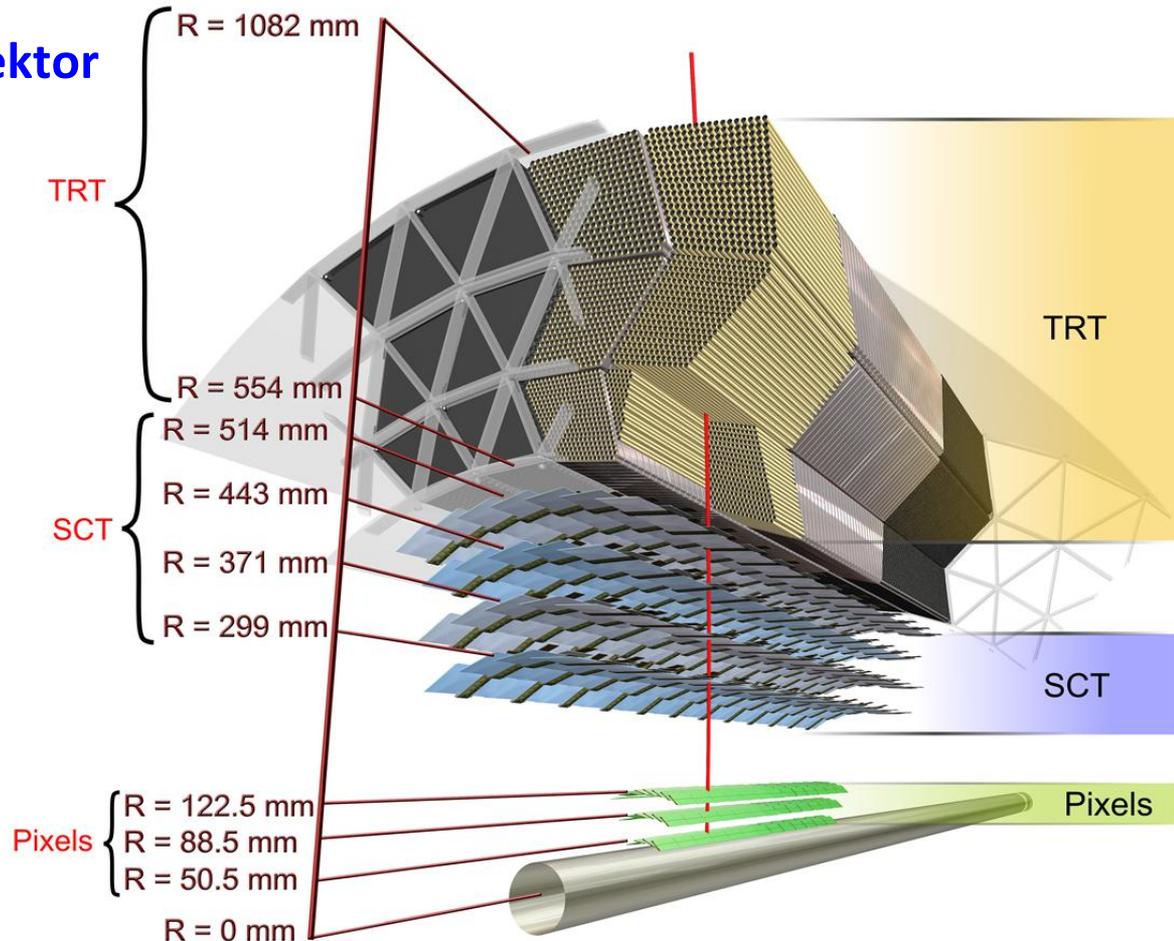
- 80 μm x 62 mm
- 6.2 Millionen Kanäle

Silizium Pixel Detektor:

- 50 x 400 μm
- 80 Millionen Kanäle

Auflösung

- Impulsmessung: $\sigma/p_T \approx 5 \cdot 10^{-4} p_T \oplus 0.001$
- Impact Param.: $\sigma(d_0) \approx 15 \mu\text{m} @ 20 \text{ GeV}$



Rekonstruktion, Identifikation und Impulsmessung geladener Teilchen

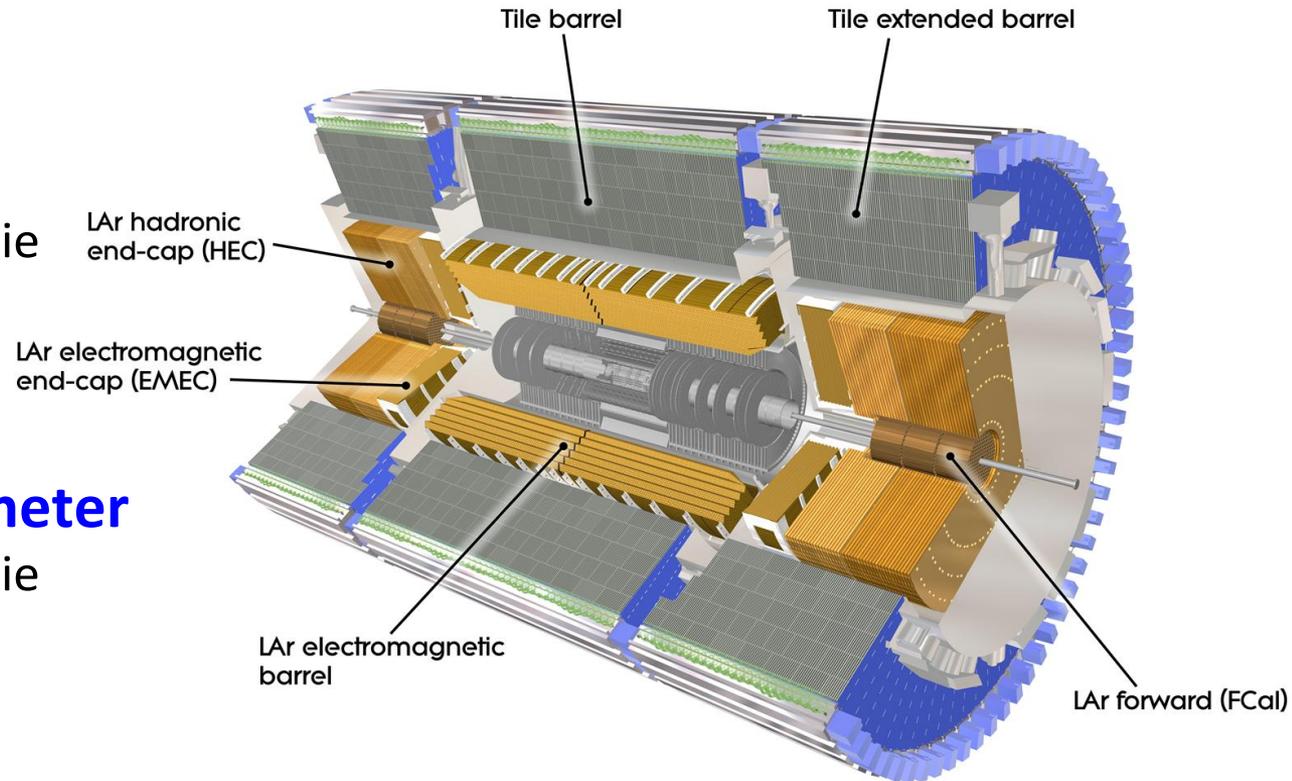
Das Kalorimetersystem

Elektromagnetisches Kalorimeter

- Flüssig Argon Technologie
- 120 000 Kanäle

Hadronisches Kalorimeter

- Flüssig Argon Technologie
 - 70 000 Kanäle
- Tile Kalorimeter
 - 10 000 Kanäle

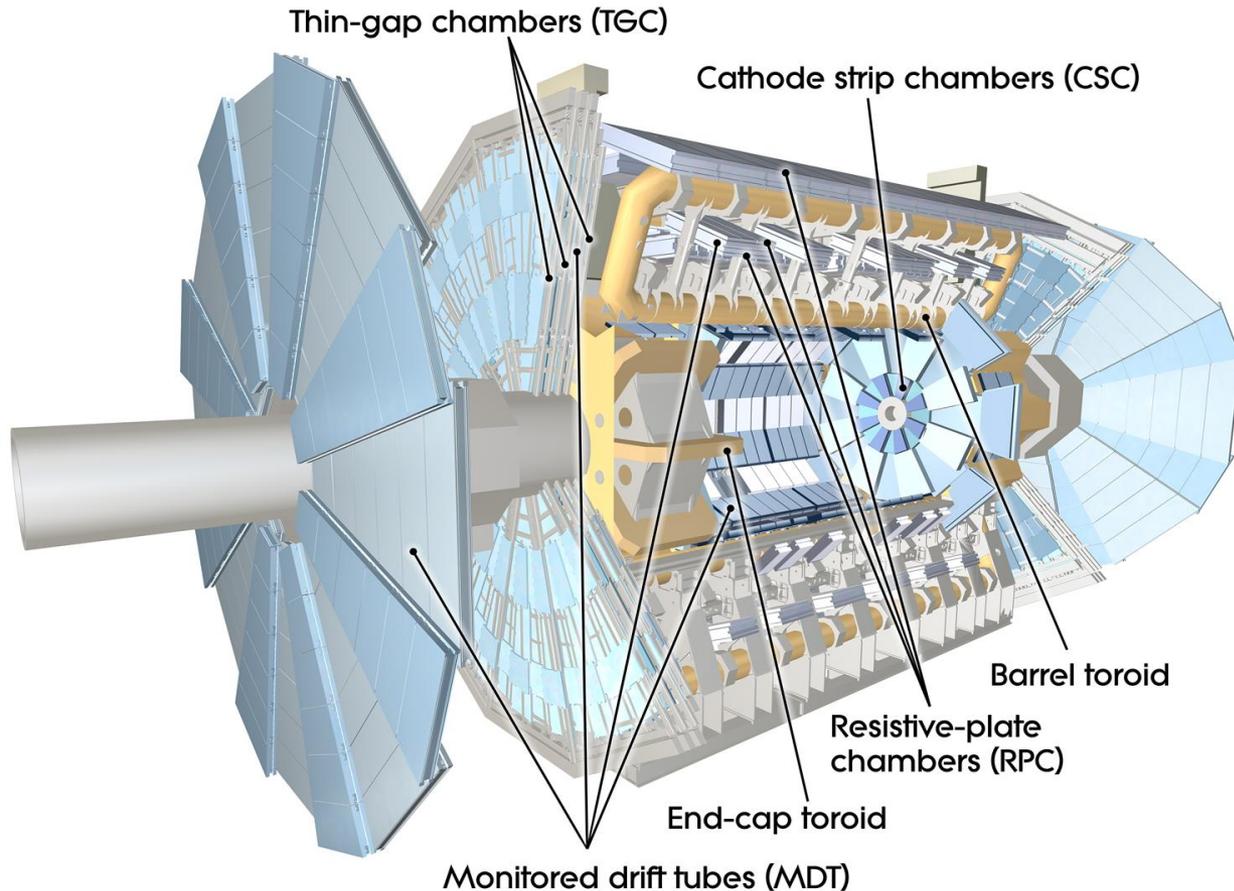


Energiemessung von
Elektronen, Photonen
und Hadronen

Auflösung

- EM: $\sigma(E)/E = 10\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$
- Had. (jets): $\sigma(E)/E = 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$

Das Myonsystem



Präzisionskammern

- Driftröhren
- 360 000 Kanäle

Triggerkammern

- Resistive Plate chambers
- Thin Gap chambers
- 680 000 Kanäle

Identifikation und Impulsmessung von Myonen

Auflösung

- $\Delta p_T/p_T < 10\%$ bei 1 TeV

Quellen

- Skript: D. Wegener: Detektoren
- http://www.e5.physik.uni-dortmund.de/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=55&Itemid=93