



Kern- und Teilchenphysik

10. Konzepte für subatomare Untersuchungen

10.2 Detektoren

Hans Rudolf Schmidt

Wintersemester 2018/2019



4. Konzepte für subatomare Untersuchungen

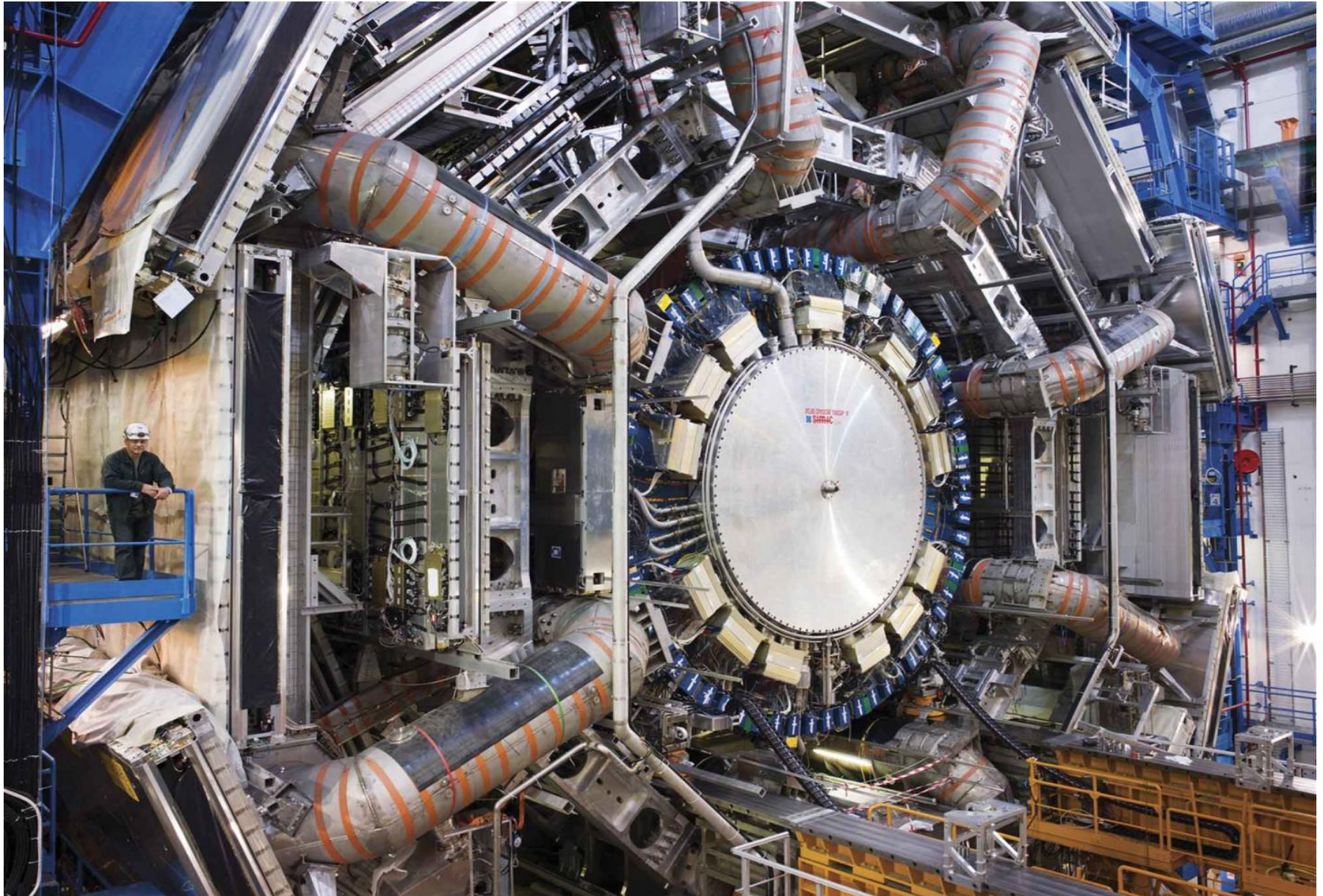
4.3 Werkzeuge - Detektoren

- i. Gasgefüllte Ionisationsdetektoren
- ii. Halbleiterzähler
- iii. Kalorimeter
- iv. Beispiel: der CMS Detektor am LHC

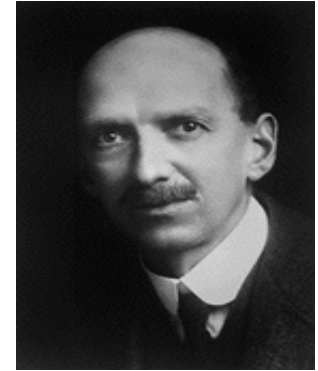
Nebelkammer (1910)



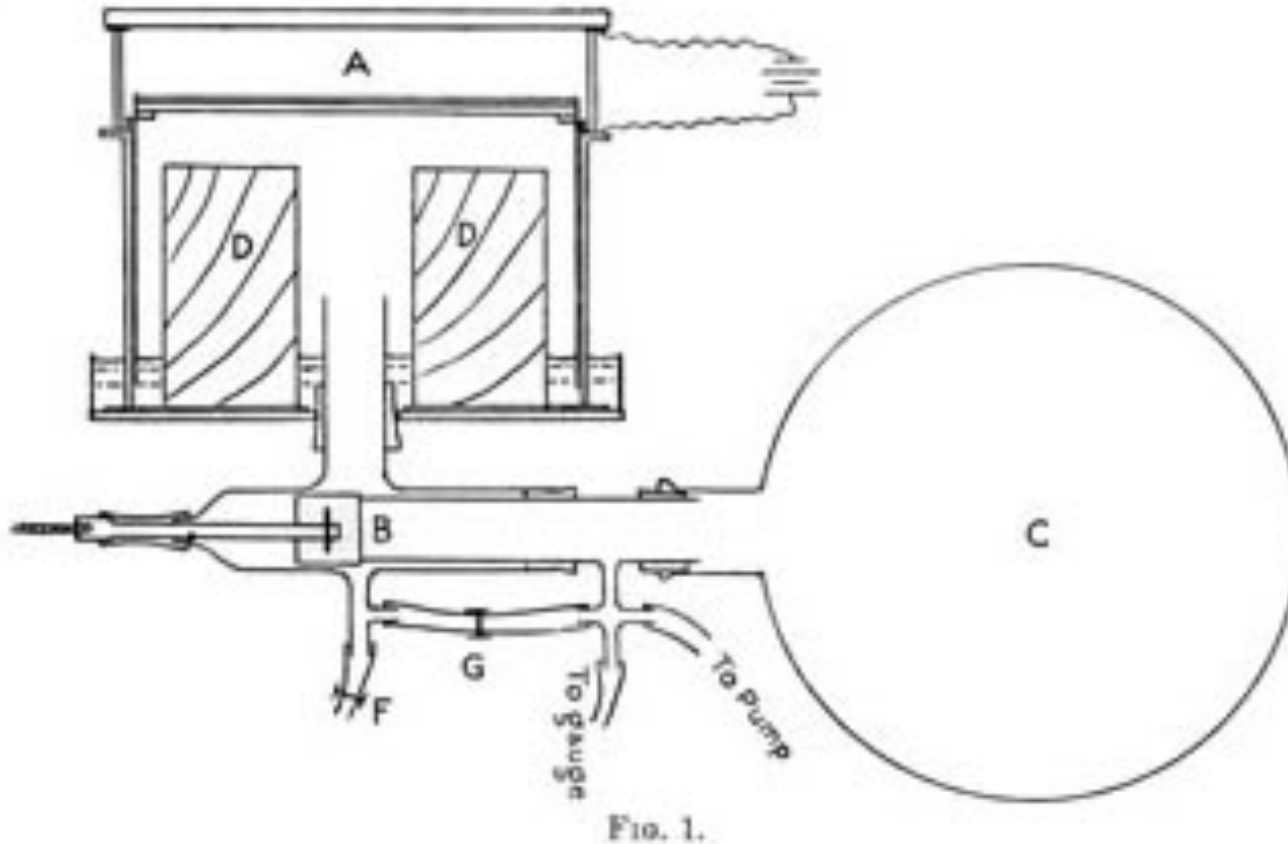
100 Jahre später: ATLAS CERN (2010)



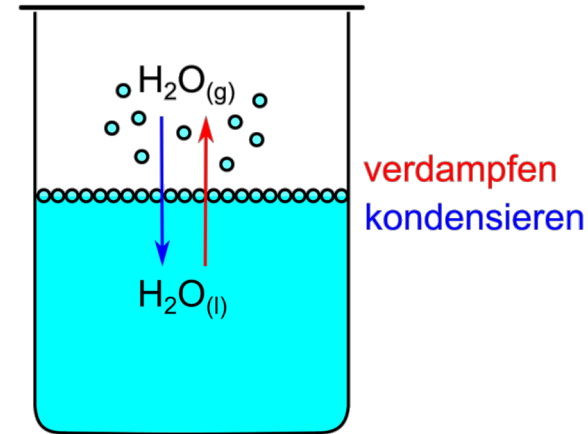
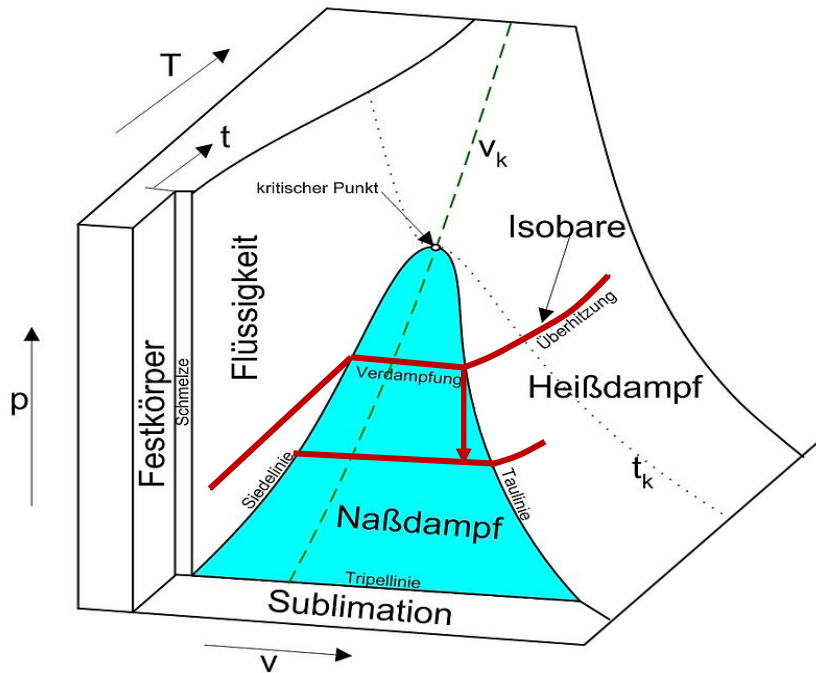
Nebelkammer (1910)



Charles Wilson
Nobel Preis 1927



A diagram of Wilson's apparatus. The cylindrical cloud chamber ('A') is 16.5cm across by 3.4cm deep.



- Volumen (A) gefüllt mit Wasserdampf am Sättigungspunkt
- Volumen (B) ist abgepumpt (Vakuum)
- **adiabatische Expansion** (Schieber B wird geöffnet) durch Druckerniedrigung produziert **übersättigten** Wasserdampf
- ionisierendes Teilchen bildet **Kondensationskeim** $\Rightarrow$ **sichtbare Tröpfchenbildung**
- Limitation: extrem langsamer Detektor

Teilchenspuren

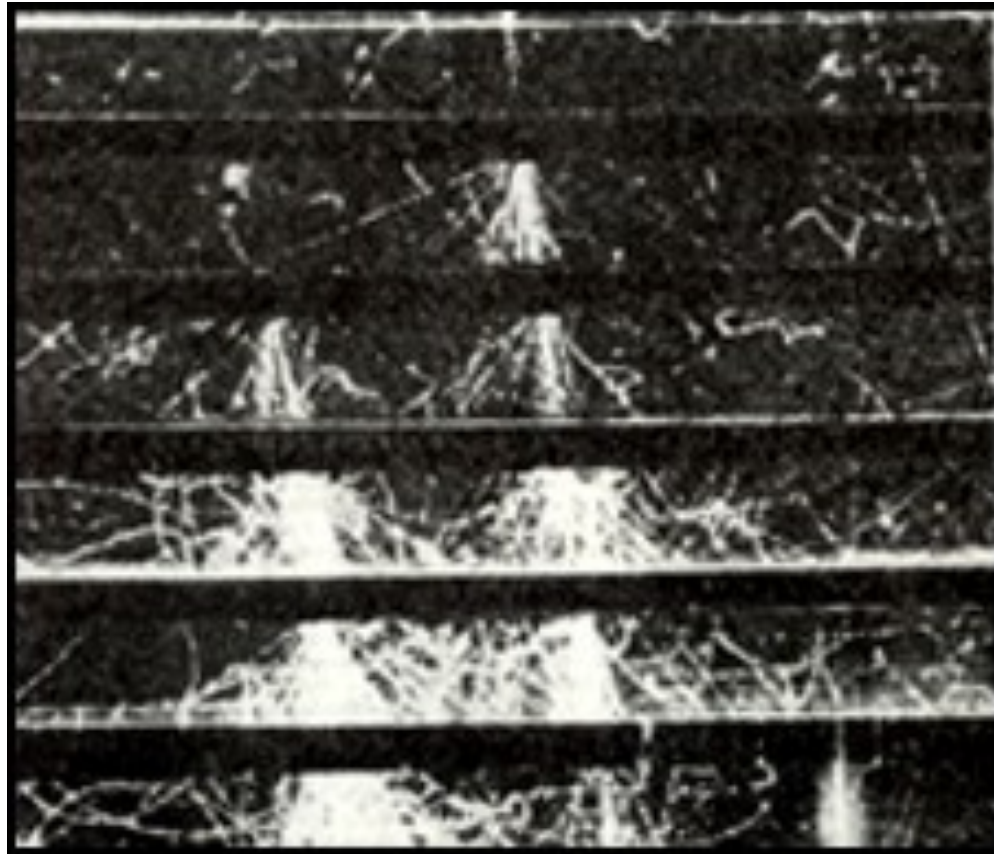


- allererstes Foto von Teilchenspuren



radioaktive Quelle

Erste Visualisierung von Kosmischer Strahlung (1932)

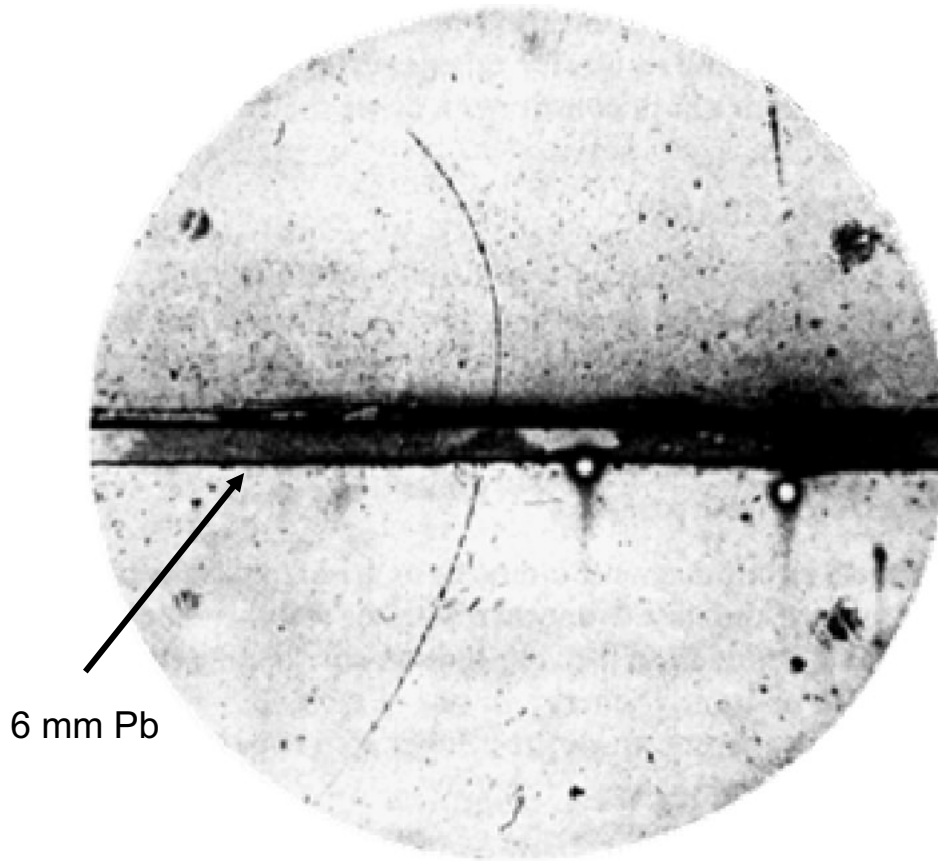


Nebelkammer (Wilson, 1910)

Discovery of the Positron



C. Anderson (Nobel Price 1936)

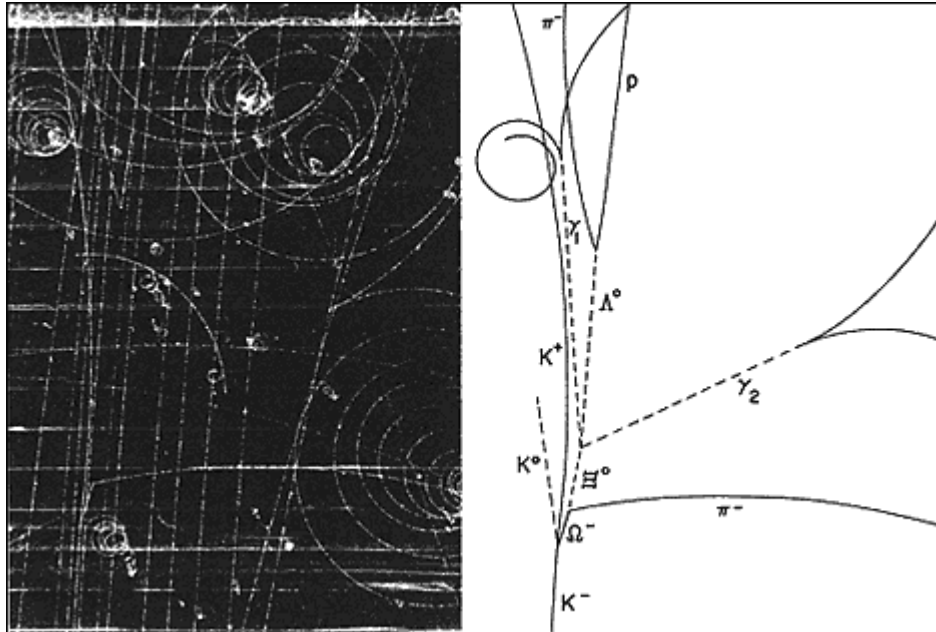


Warum zeigt die Spur ein **Positron**?

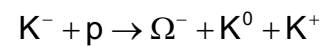
- Ionisierungsdichte (Bethe-Bloch)
 $\Rightarrow Z=1$
- Krümmung im Magnetfeld $\Rightarrow$ positive Ladung und Impulsmessung
- Energieverlust in 6 mm Pb (zusammen mit bekanntem Impuls und Ladung, Bethe-Bloch) $\Rightarrow m < 20m_e$ ($\Rightarrow$ **kein Proton**,)
 $\Rightarrow$ Elektron mit positive Ladung, später **Positron** genannt

Nebelkammer-Aufnahme des Positrons

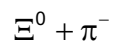
Blasenkammer: Entdeckung des Ω^-



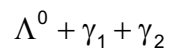
BNL (USA)



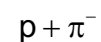
↓



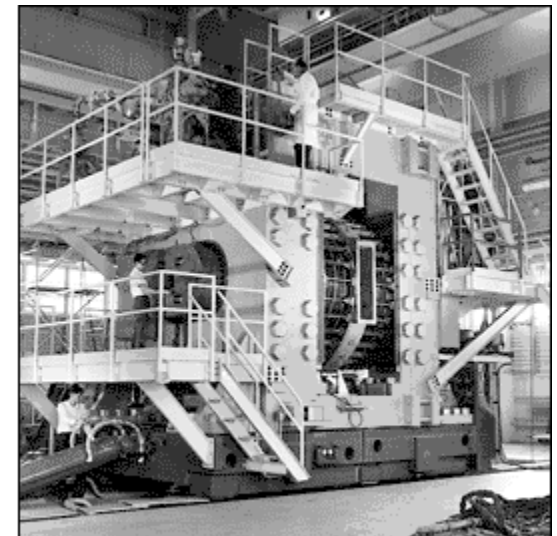
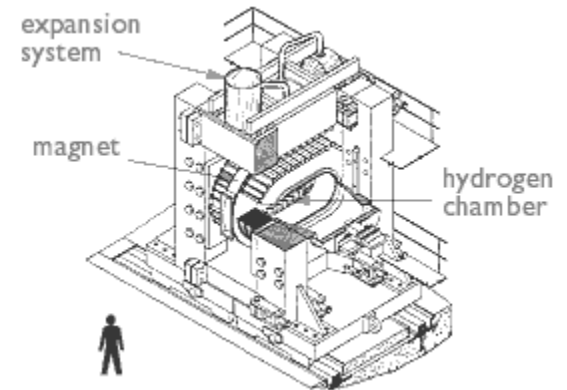
↓



↓



Existenz des Ω^- :
bestätigt SU_3 Symetrie



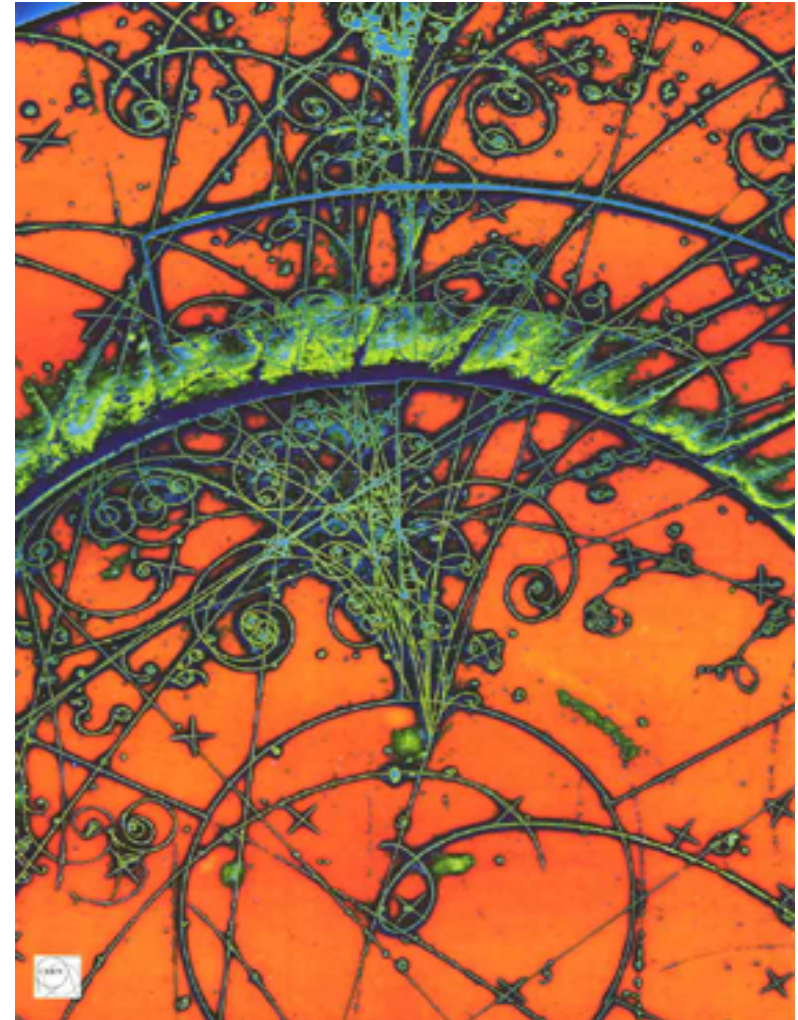
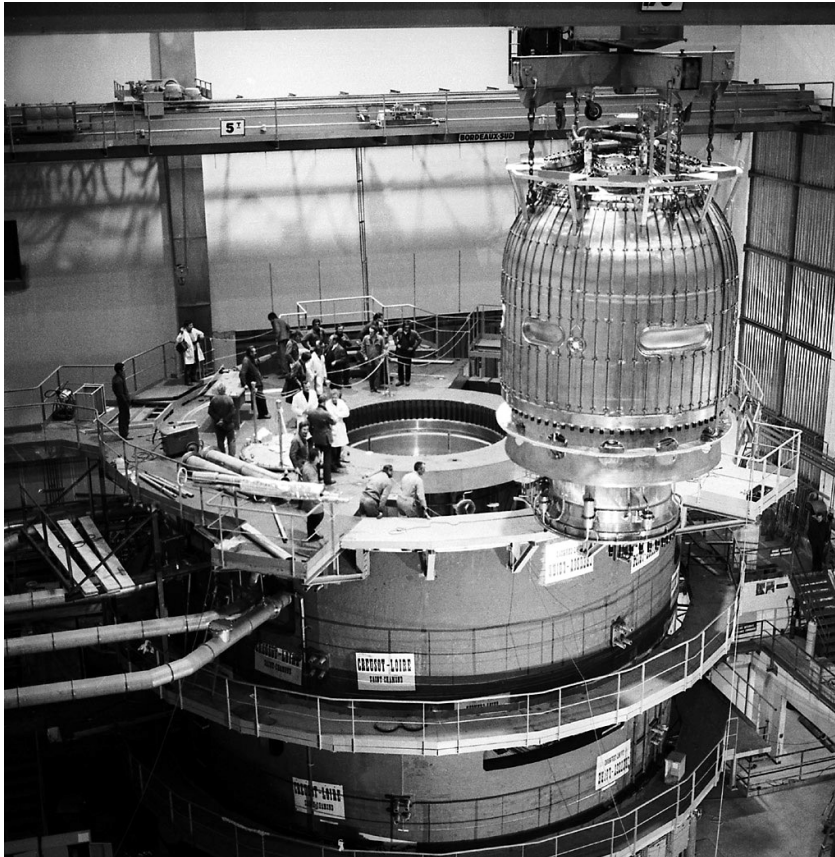
The 80-inch Bubble Chamber

BEBC (CERN)

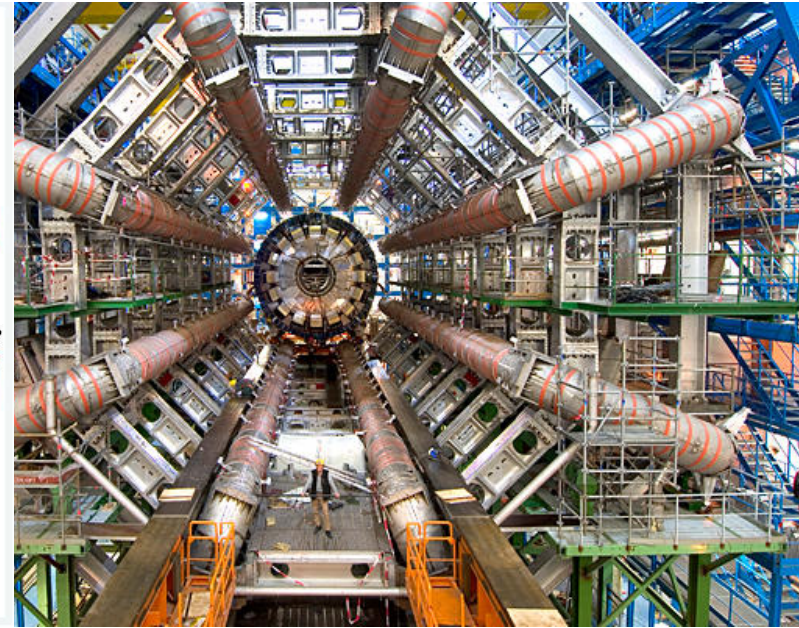
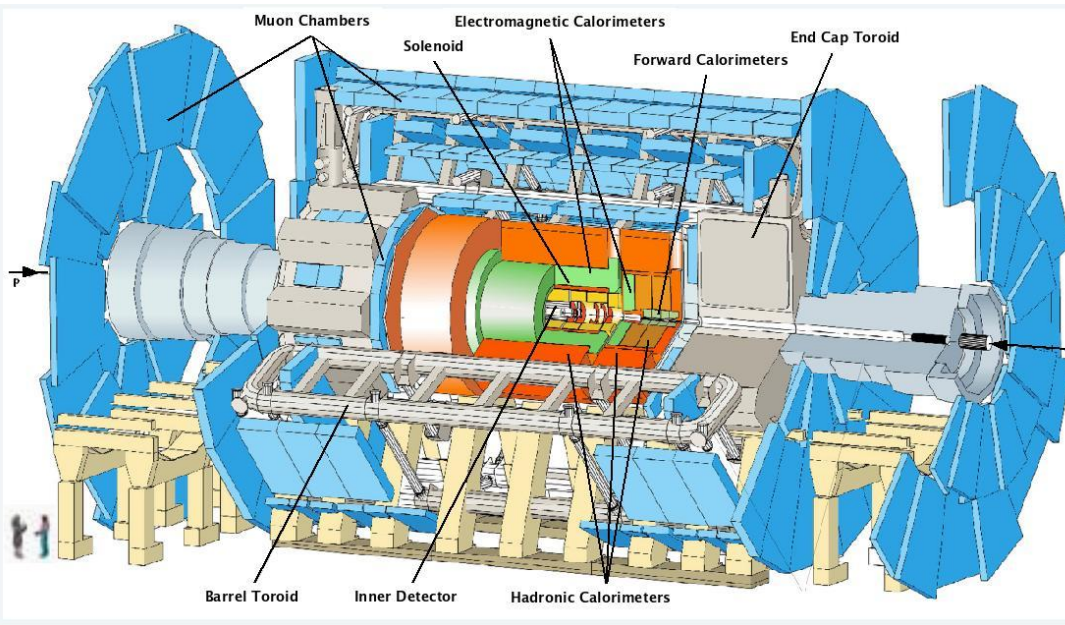


BEBC (Big European Bubble chamber)

- 35 m³ flüssiger Wasserstoff
- in Betrieb bis 1983



Limitation: Ratenfähigkeit, 6.3 M Bilder (=Ereignisse) in 7 Jahren;
kann mit modernen Detektoren in wenigen Sekunden gemessen werden



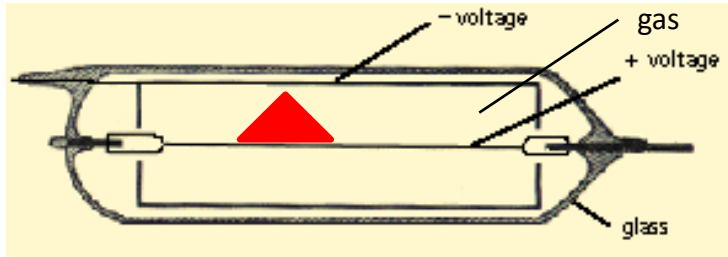
Moderne Hochenergie-Detektoren bestehen i.w. aus drei grundlegend unterschiedlichen Detektor-Typen:

- Gaszähler
 - Silizium-Halbleiterzähler
 - Kalorimeter (EM & hadronisch)
- } + Auslese-Elektronik



Gasgefüllte Detektoren

Gaszähler: Geiger-Müller-Counter



elektronisch
messbares Signal



H. Geiger

1908: entwickelt von Hans Geiger und Erwin Müller
1910: exp. Nachweis der Rutherford



Ernest Rutherford and Hans Geiger
with apparatus for counting alpha
particles, Manchester, 1912

Gaszähler – Physikalisches Prinzip

Energieverlust eines geladenen Teilchens im Gas

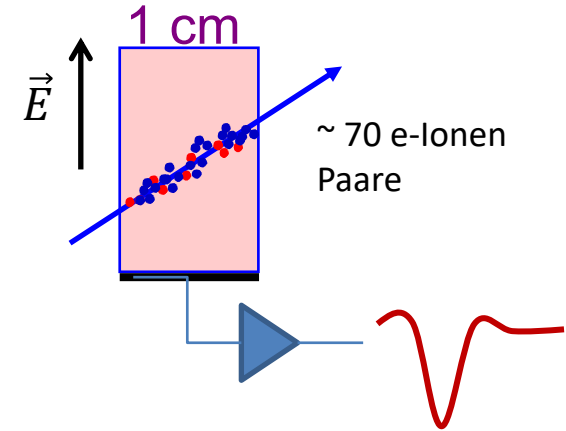
Beispiel:

Gaszähler mit 10 mm, gefüllt mit Argon $\Rightarrow$

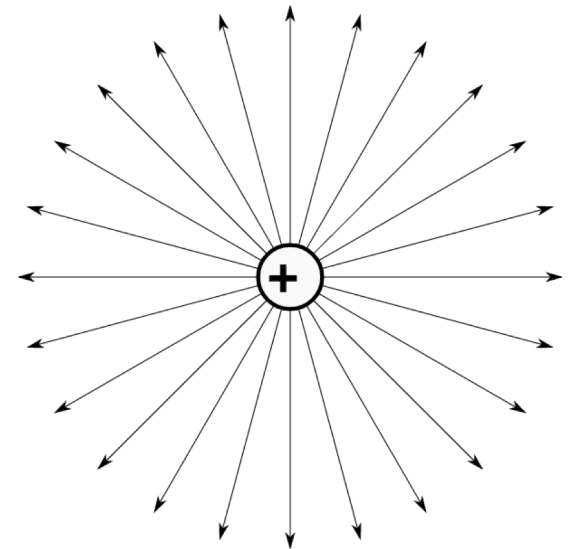
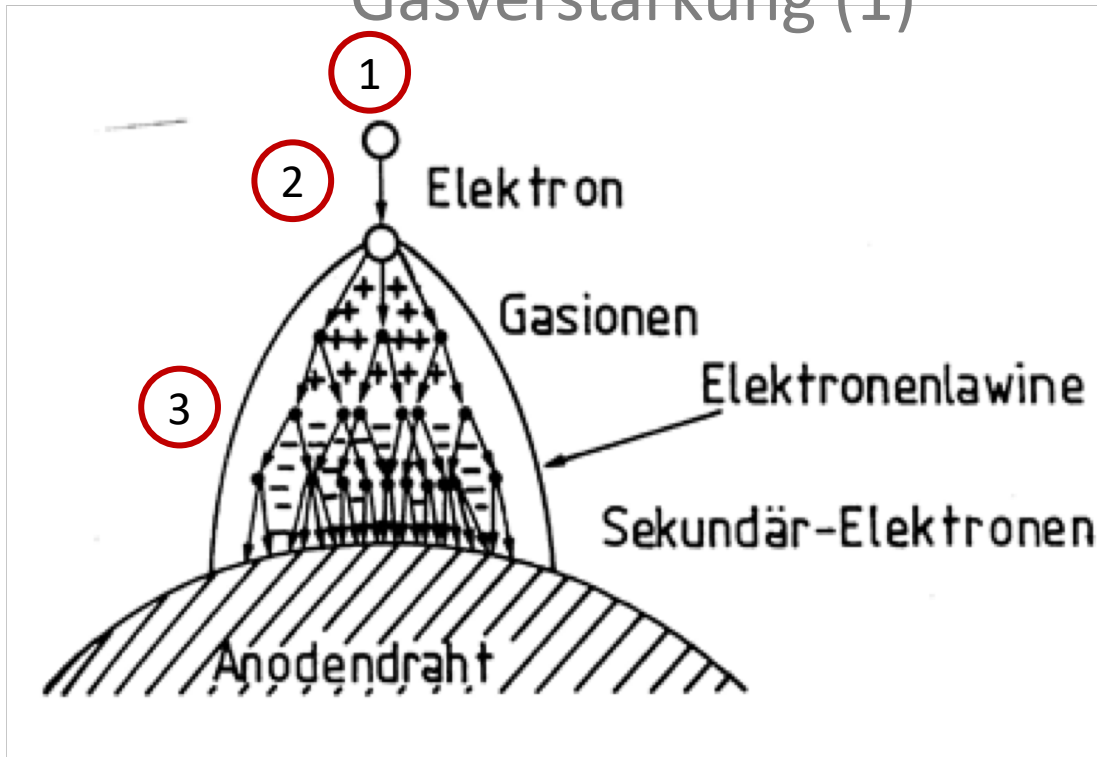
- Ein geladenes Teilchen ($Z = 1$) erzeugt in einem Gaszähler pro cm-Wegstrecke etwa **70 Ionenpaare**
- Die Elektronen driften im elektrischen Feld E zu einer Sammelelektrode und werden dort (im Prinzip) nachgewiesen (Ionisationskammer)

aber:

- ≈ 70 Elektronen sind nicht einfach nachzuweisen!
- **Verstärker-Rauschen** typisch ≈ 1000 e- (ENC) !
- man muss die Anzahl der Elektronen (rauschfrei!) erhöhen!
- $\Rightarrow$ **Gasverstärkung** notwendig!



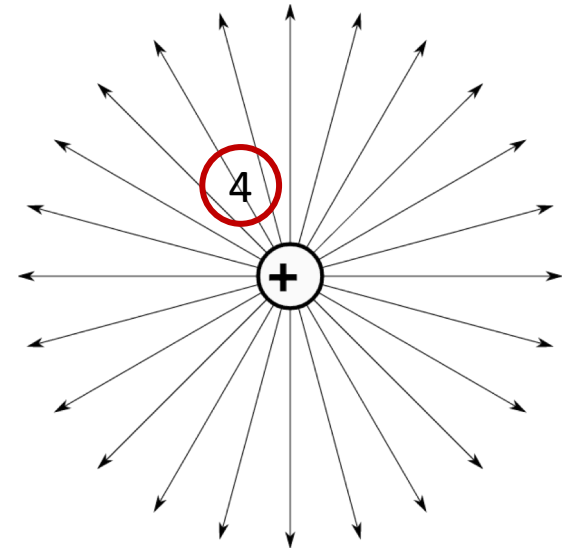
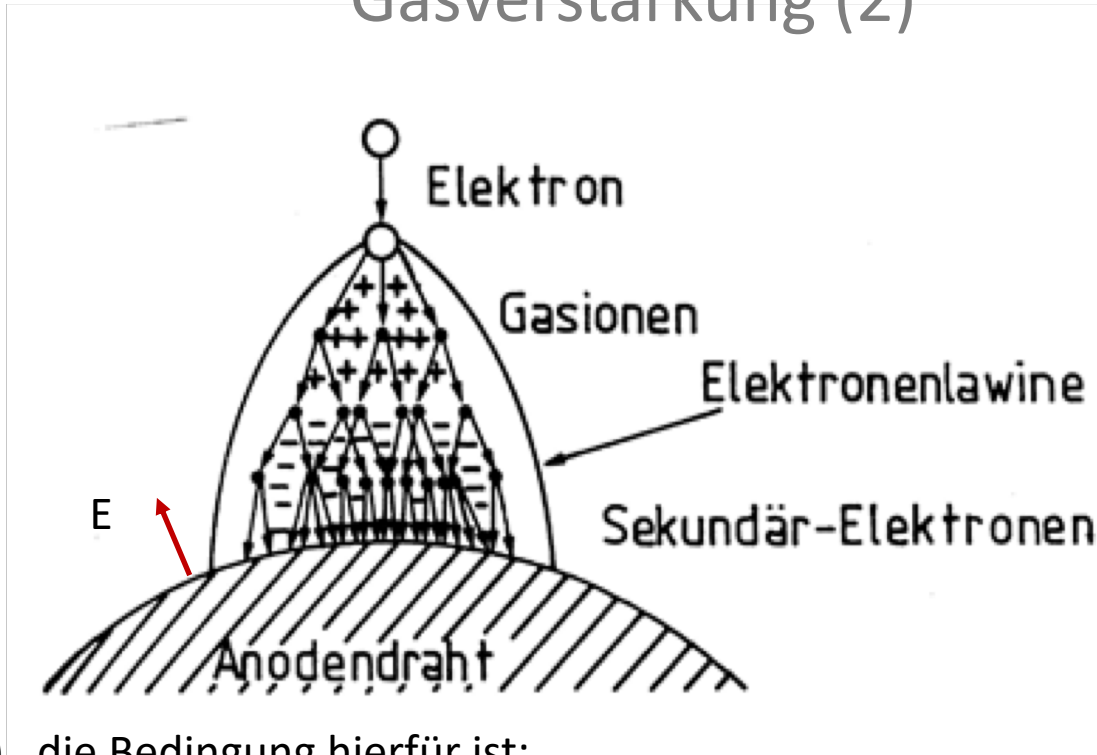
Gasverstärkung (1)



- 1) ein geladenes Teilchen löst durch Stoßionisation ein oder mehrere Elektronen aus einem Gasatom ($dE/dx \sim n_{\text{primär}}$)
- 2) die Elektronen werden im elektrischen Feld (das zw. Kathode und Anode anliegt) beschleunigt
- 3) bei hinreichend großer Elektronengeschwindigkeit kommt es zur Sekundärionisation und es entwickelt sich eine Lawine. Die Bedingung ist:

$$\lambda \times eE > I_0$$

Gaszähler – Physikalisches Prinzip: Gasverstärkung (2)



4) die Bedingung hierfür ist:

$$E > \frac{I_0}{\lambda} \approx 10^5 \text{ V/cm}$$

I_0 = Ionisationpotential (abhängig von Gasart, etwa 10 – 20 eV), λ = mittlere freie Weglänge, etwa 1 – 2 μm

In Drahtkammern ($d_{\text{Draht}} < 20 \mu\text{m}$) wird diese Bedingung nahe der Oberfläche des Drahtes erreicht (Region mit hoher Feldstärke): $E(r) \sim 1/r$

Gaszähler – Physikalisches Prinzip:

Gasverstärkung (3)



- Das Signal S ist proportional zur primären Ionisation $n_{\text{primär}}$ (Energieinformation!) solange gilt:

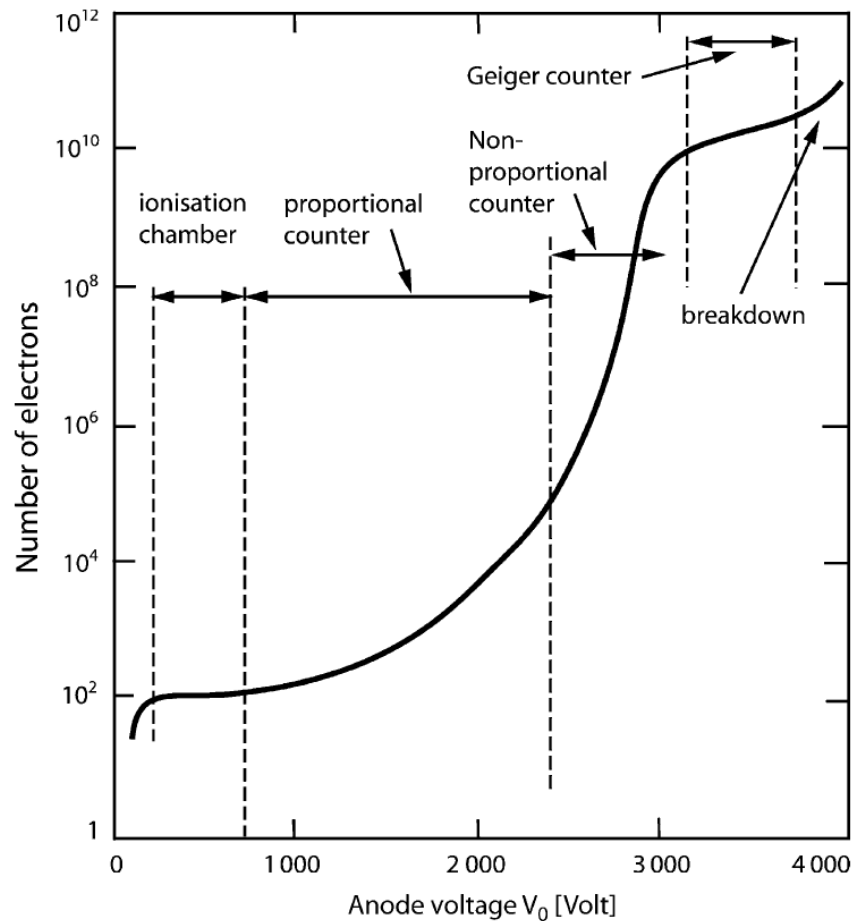
$$S = n_{\text{primär}} \cdot G < 10^8 \text{ Elektronen (Raether Limit)}$$

für $S > 10^8$ kommt es zu Überschlägen zw. Kathode und Anode

- Verstärkung in Proportionalbereich ist typisch $10^3 - 10^5$ (13 – 20 Generationen)
- Signalerzeugung:

$$\left. \begin{array}{l} v_{\text{Elektron}} \sim 10^5 \frac{\mu\text{m}}{\mu\text{s}} \\ \lambda_{\text{mfW}} \sim 5 \mu\text{m} \end{array} \right\} \Delta t \sim \frac{20\lambda}{v_{\text{Elektron}}} \sim 1 \text{ ns}$$

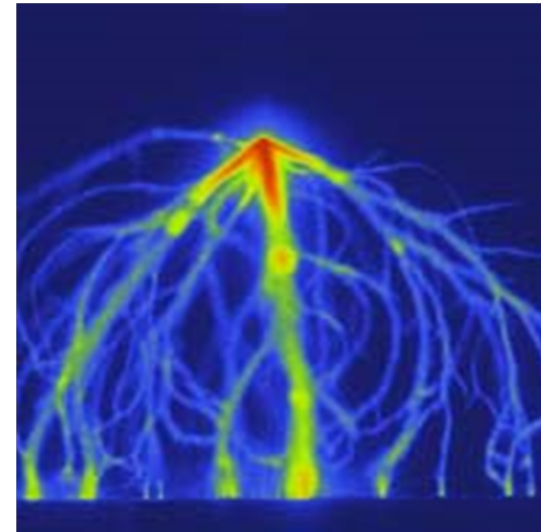
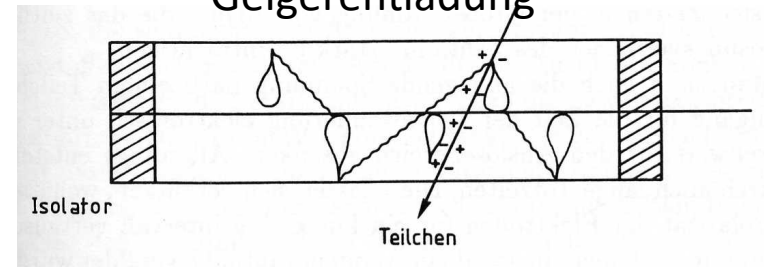
d.h. Gaszähler sind schnelle Detektoren, die Zählraten in MHz -Bereich verarbeiten können!



proportional

Geiger

Geigerentladung



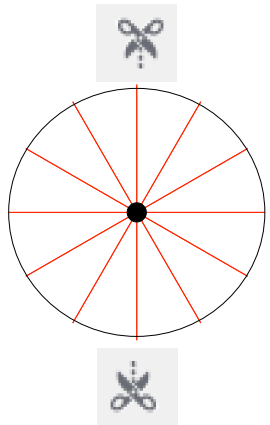
im Geigerbereich werden durch UV-Photonen sekundäre Lawinen initiiert, Entladung 100 % Effizienz, aber kein Energieinformation

Violdrahtkammer

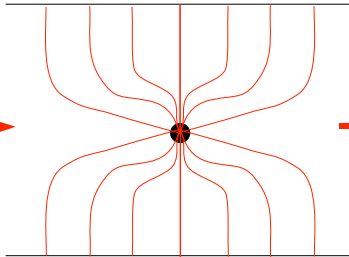


Idee:

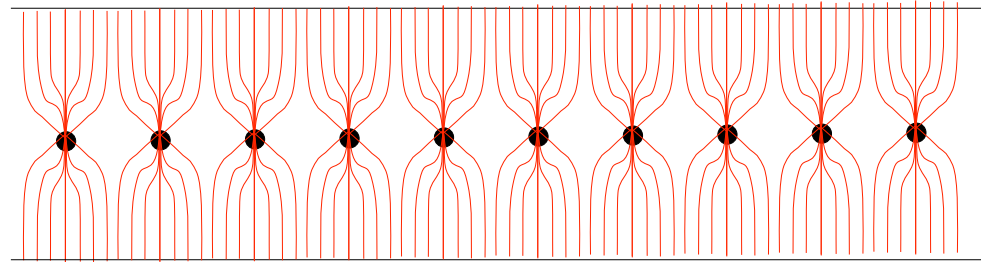
Einzeldraht



Einzeldraht mit
planaren
Kathoden



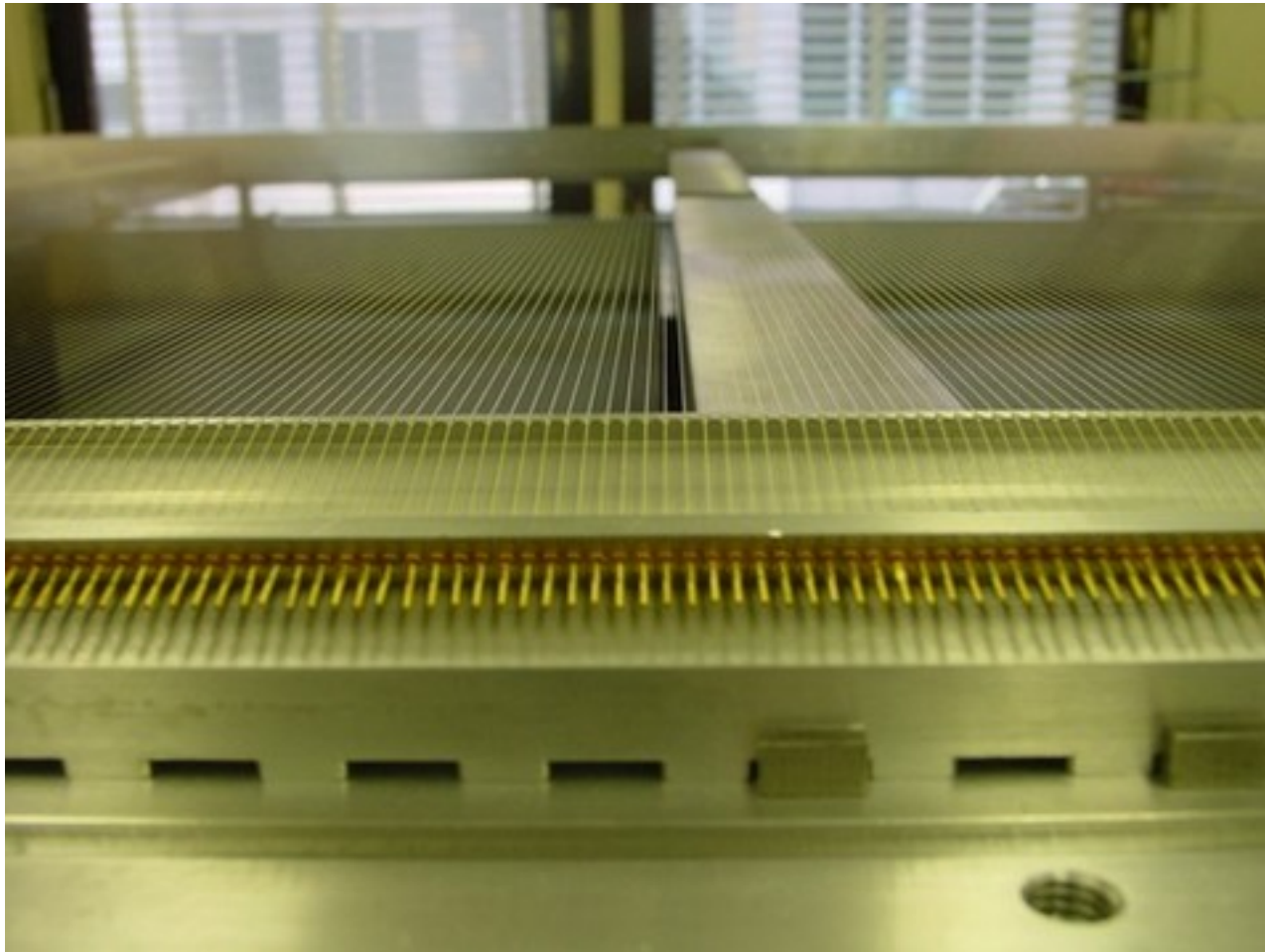
Violdrahtkammer mit planarer Kathode,
homogenes (lineares) Fernfeld



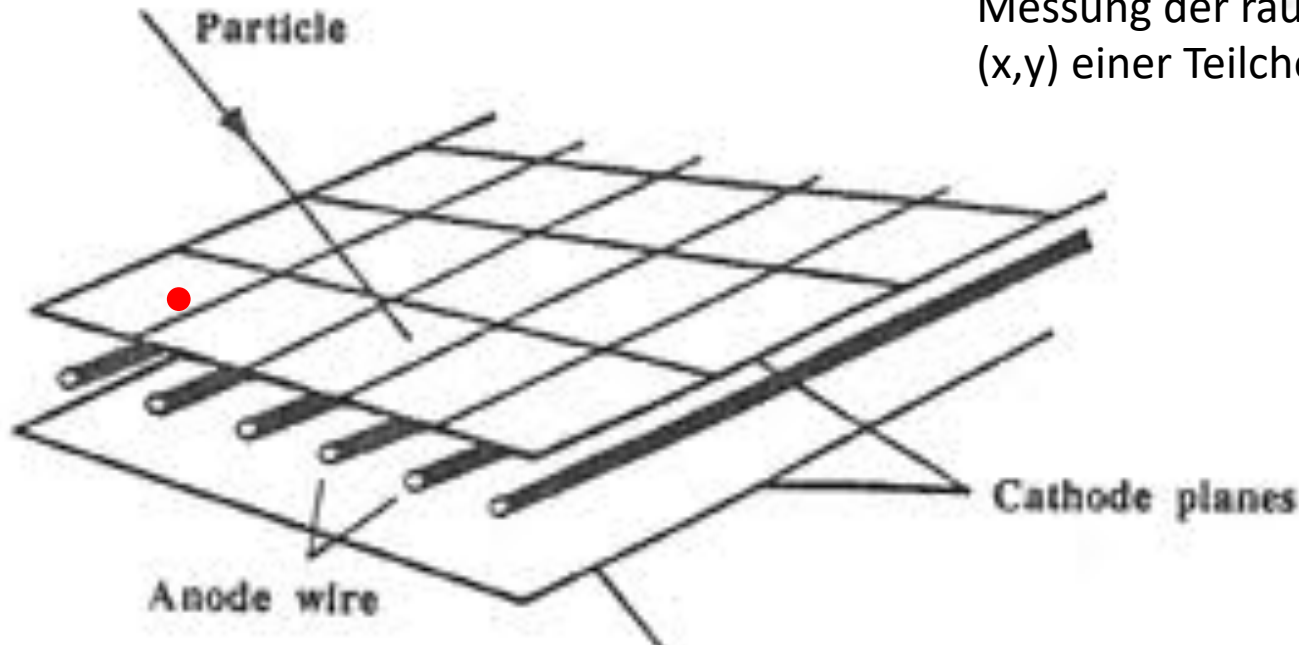
MWPC: Multi-Wire-Proportional-Chamber



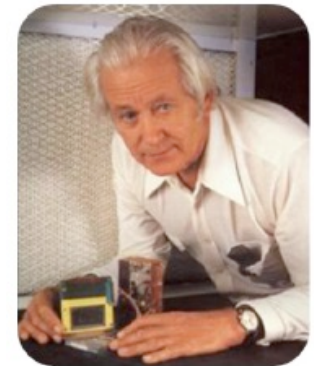
deutsch: Vieldrahtkammer



Messung der räumlichen Koordinate
(x,y) einer Teilchenspur

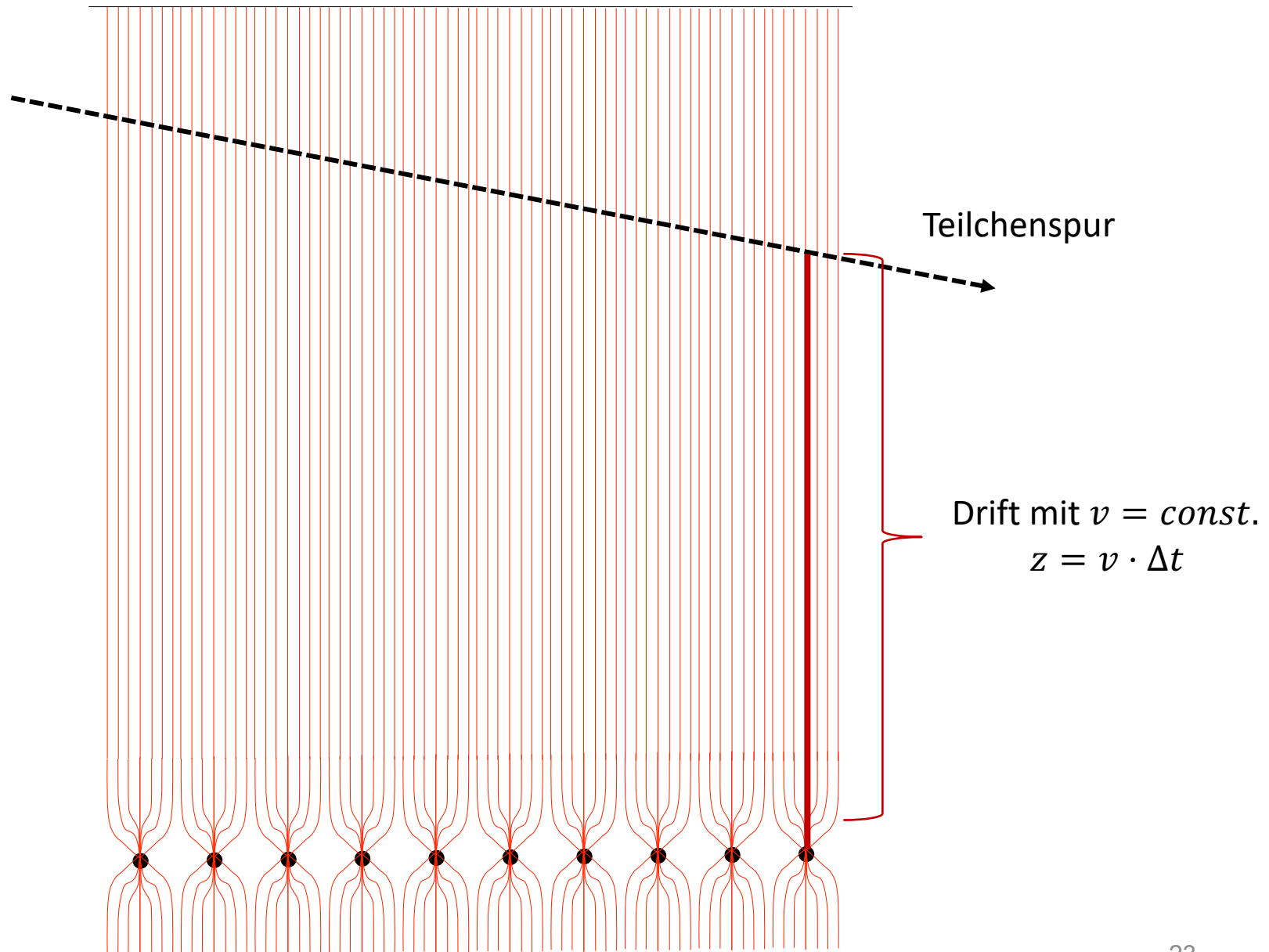


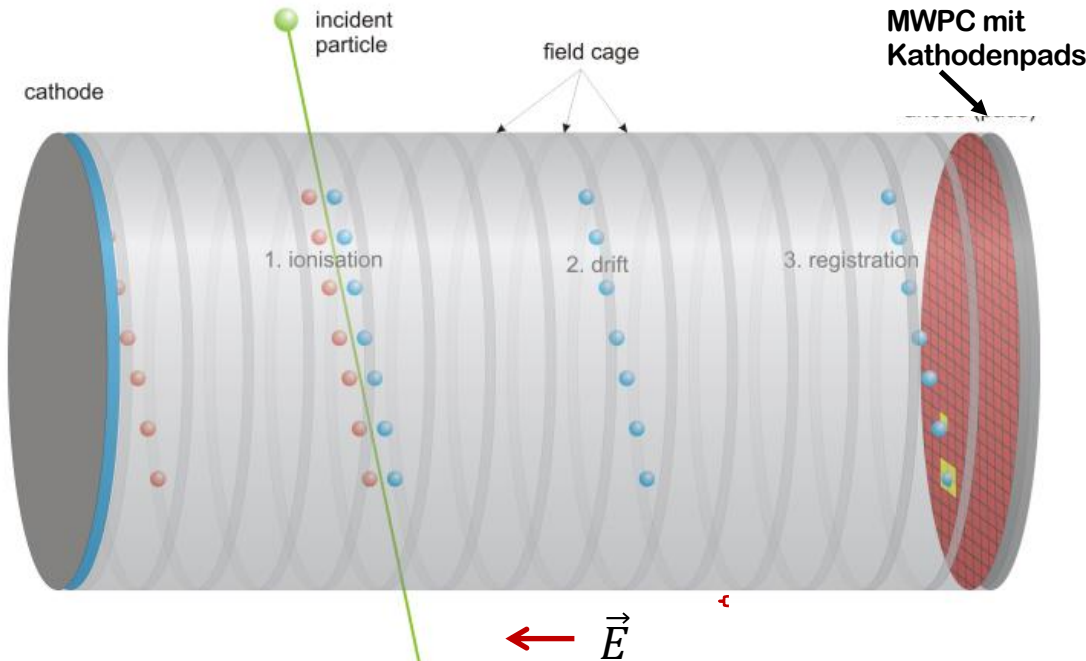
- Aufbau: großflächig (m^2 , planar, oft mehrere Ebenen)
 - Jeder Draht arbeitet als unabhängiger Proportionalzähler
 - Anode: Drähte $\phi \sim 20 \mu m$, Abstand $d \sim 2 mm$
 - Kathode: oft segmentiert (Streifen, Pads $\rightarrow x, y$)
 - Auslese: Anode (Ladung) und/oder Kathode (kapazitiv induziertes signal)
 - Zählgas: z.B. Argon (90%) + Isobuton (10%) („Quencher“ Absorption von UV-Photonen)
 - Ortsauflösung: $\sigma = \frac{d}{\sqrt{12}} \approx 500 \mu m$, Zeitauflösung: $\tau < 1 ns$



G. Charpak
Nobelpreis 1992

Erweiterung: z-Koordinate





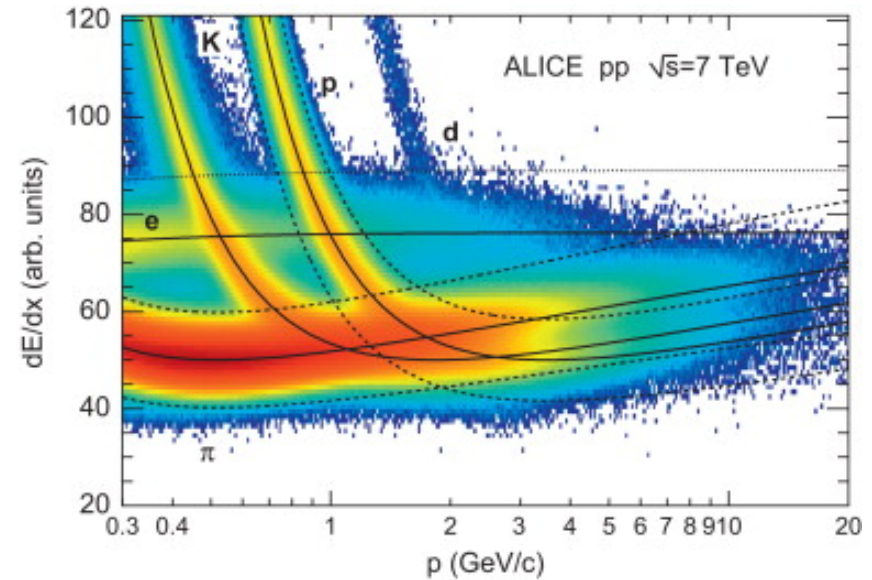
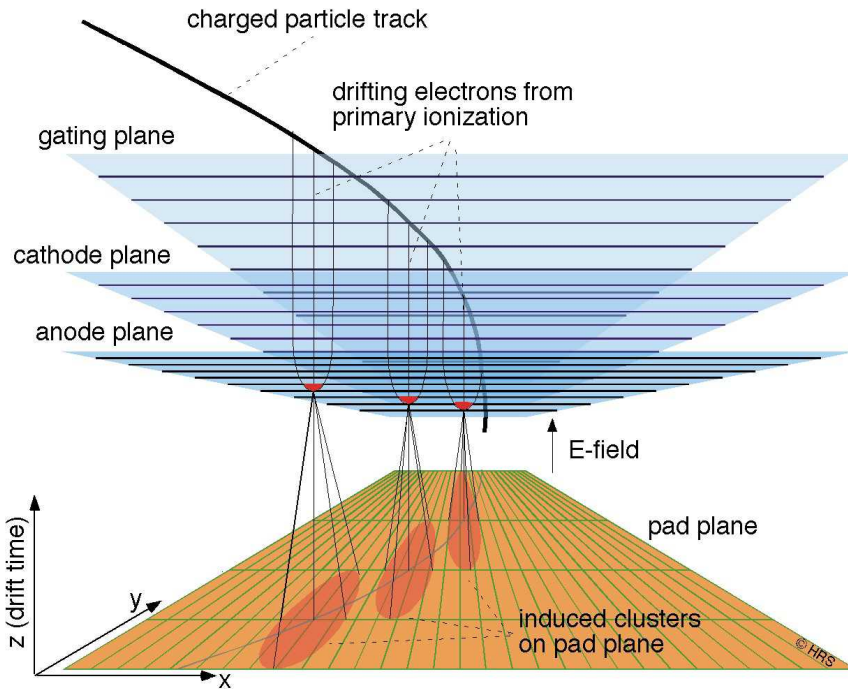
- 3D-Rekonstruktion von Spuren geladener Teilchen
- Driftfeld: $< 1000 \text{ V/cm}$
- v_{Drift} : $1 - 4 \text{ cm}/\mu\text{s}$
- B-Feld: Bestimmung des Impulses aus Spurkrümmung

Primärionisation des Gases durch geladenes Teilchen: es werden entlang der Spur positive Ionen und Elektronen erzeugt.

Drift der Primär-Elektronen zur Anode mit konstanter Driftgeschwindigkeit
 $\rightarrow z = t \cdot v_{\text{Drift}}$

Verstärkung und Nachweis der Primärelektronenspur in 2D-MWPC mit Kathodenpads $\rightarrow x, y$ mit Zeitmessung $\rightarrow t$

Anwendung: Time Projection Chamber(2)



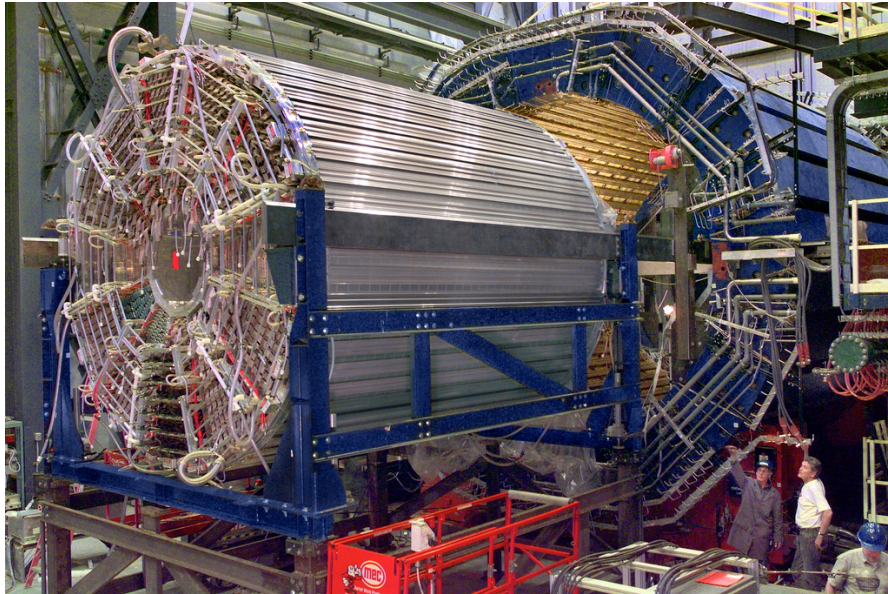
Meßgröße: 3D-Spurpunkte $(x_i, y_i, z_i) \Rightarrow$
 $p = 0.3 \cdot Z \cdot B \rho$ ρ =Spurkrümmung

$$\text{Meßgröße: } \frac{dE}{dx} \sim \frac{z^2}{\beta^2} \sim (mz)^2 \cdot \frac{1}{p^2} \Rightarrow$$

$$m = \frac{p}{\beta\gamma} = p \cdot \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{\beta}$$

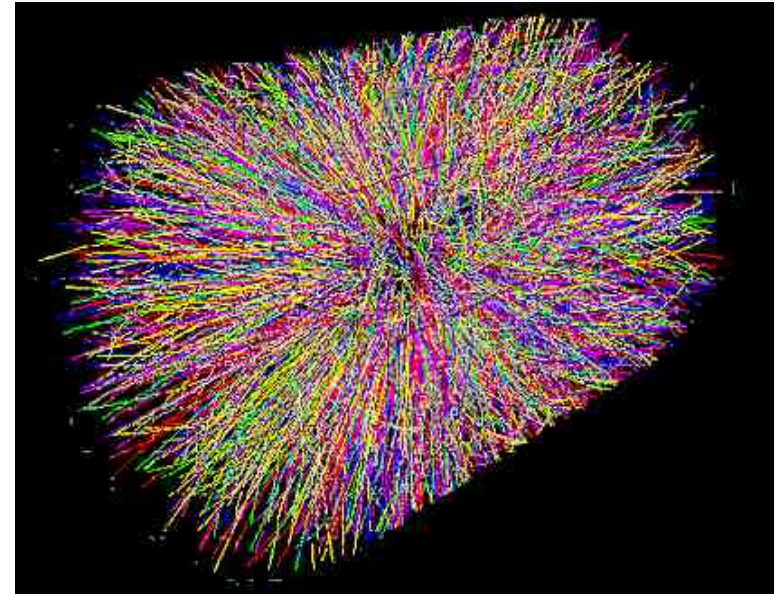
Teilchenidentifikation (Impuls und Masse·Ladung, Masse bei Kenntnis von Geschwindigkeit)

STAR-TPC am RHIC des BNL



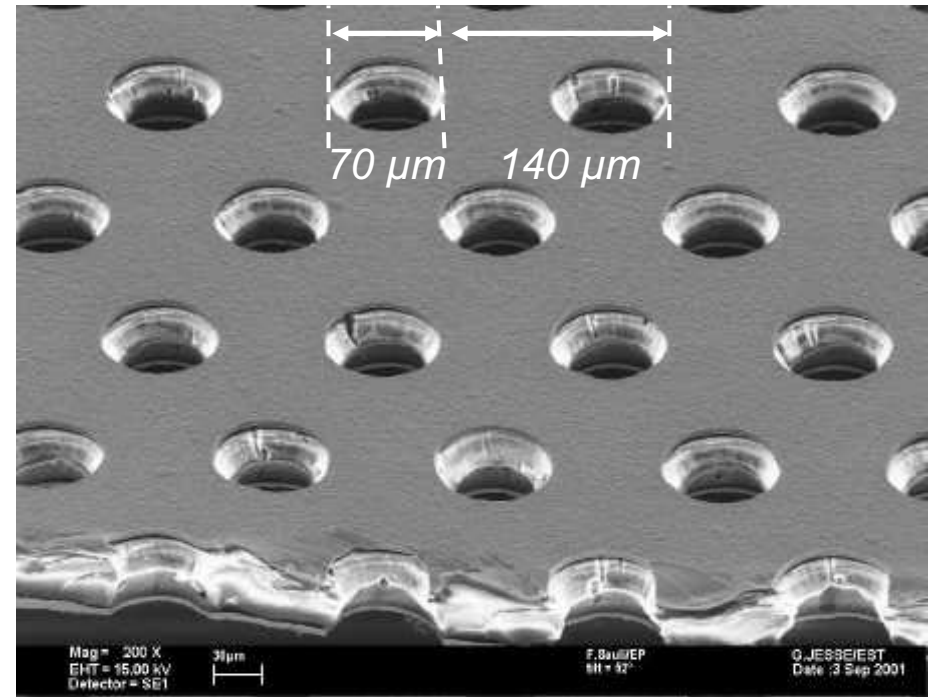
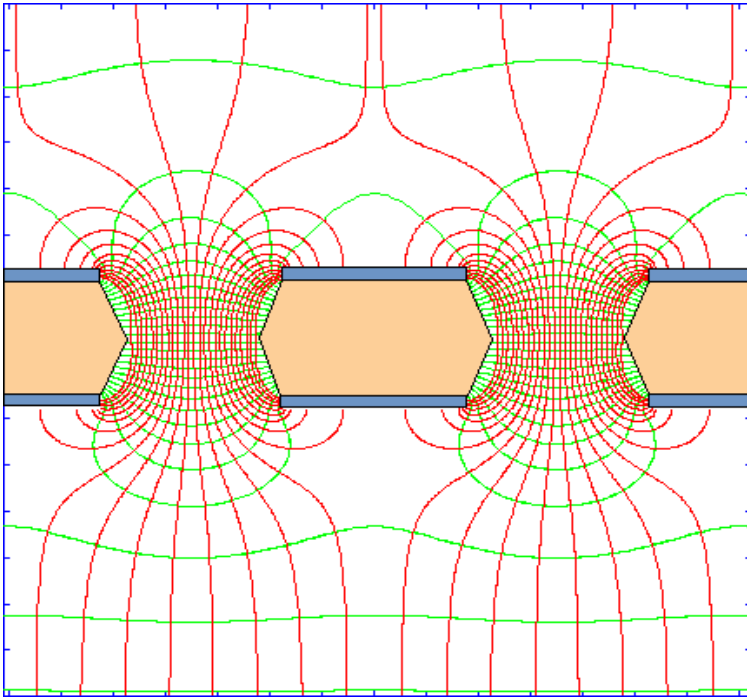
TPC des STAR Experiments ausserhalb des Magneten. Das Experiment ist am RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) am BNL (Brookhaven National Lab) aufgebaut.

3D-Rekonstruktion eines Kollision



Elektronisch rekonstruierte Spuren
Spuren von Sekundärteilchen einer Au+Au Kollision. Aus der Krümmung der Spuren kann der Impuls der Teilchen berechnet werden.

Miniaturisierung: Region mit hoher Feldstärke mittels Micro-Löcher in dünner Folie

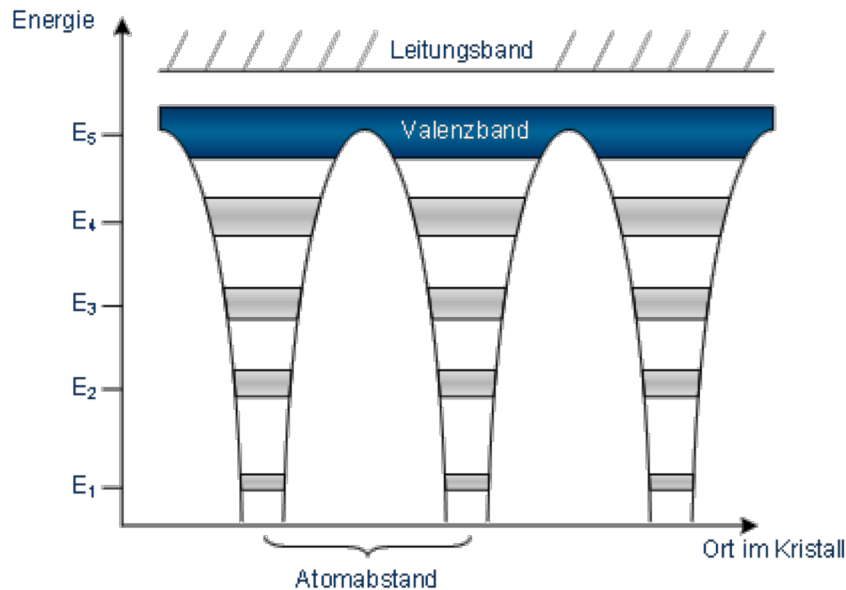


Vorteile:

- hohe Zählraten, sehr gute Ortsauflösung möglich
- Folien können hineinader gestaffelt werden (Multiplikation der Verstärkung)
- industrielle Produktion (Fotolithographie)
- fast beliebige Geometrie

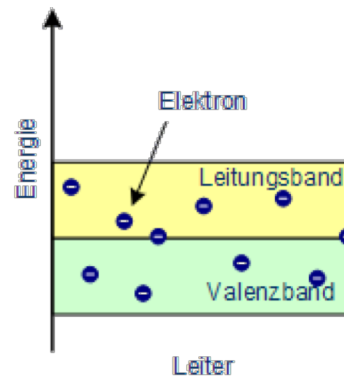
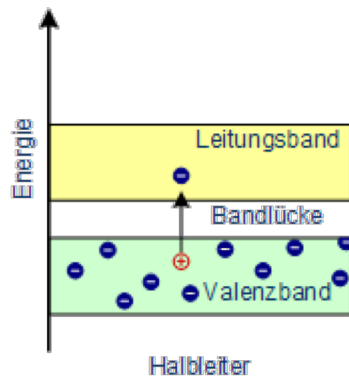
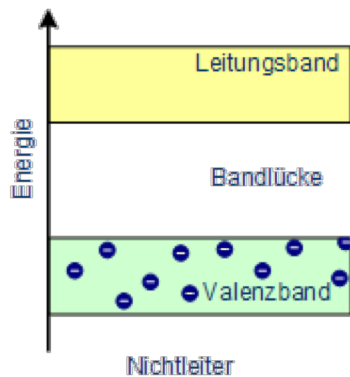


Halbleiterzähler



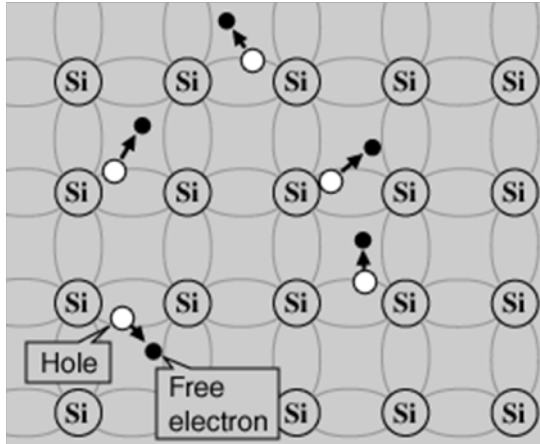
Energiebänder im Gitter:

- In Kristallen hat man anstatt der Energieniveaus von Atomen breite Bänder, die für höhere Energien nicht mehr einzelnen Gitteratomen zuzuordnen sind → frei bewegliche Ladungsträger



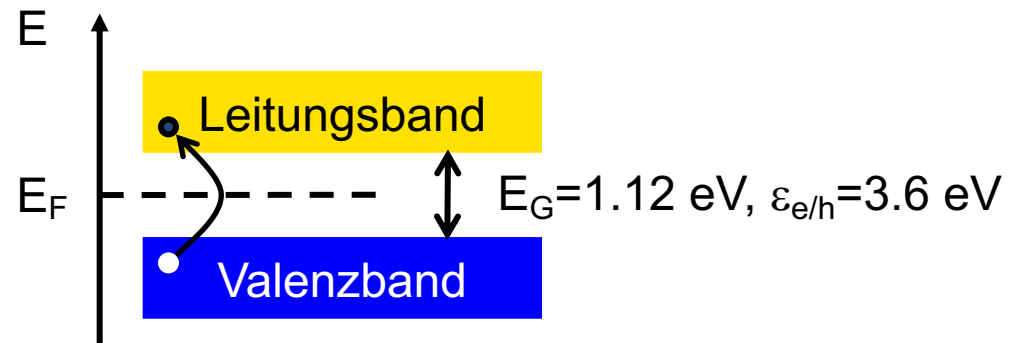


Intrinsische Halbleiter:



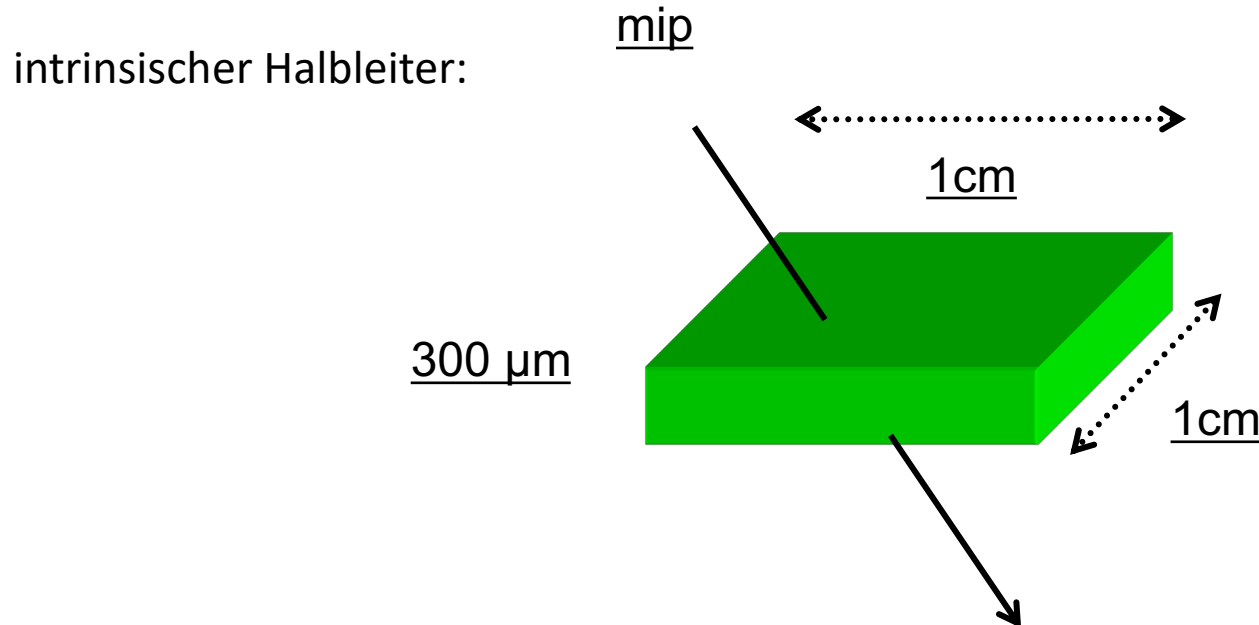
kovalente Bindung des Siliziumkristalls

Elektron-Loch-Paare $\Rightarrow$
Löcherleitung



durch thermische Anregung werden
Elektronen ins Leitungsband gehoben $\Rightarrow$
bewegliche Elektron-Loch Paare

Halbleiter –Prinzip (1)



$n_i = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ (freie Ladungsträger bei Zimmertemperatur = thermisches Rauschen)

Im Volumen V_i sind $0.03 \text{ cm}^3 \times 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} = 4.35 \times 10^8$ freie Ladungsträger bei 300 K.

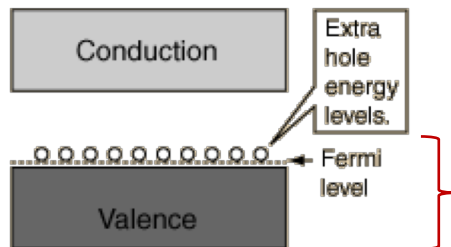
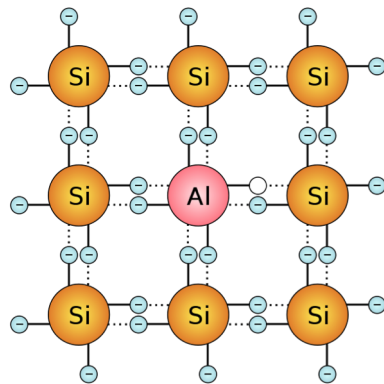
Ein mip erzeugt 3.2×10^4 Elektron-Loch-Paare! **Kein Signal detektierbar!**

Lösung: Reduzierung der freien Ladungsträger durch **Kühlung** und/oder **Verarmung** (Depletion)

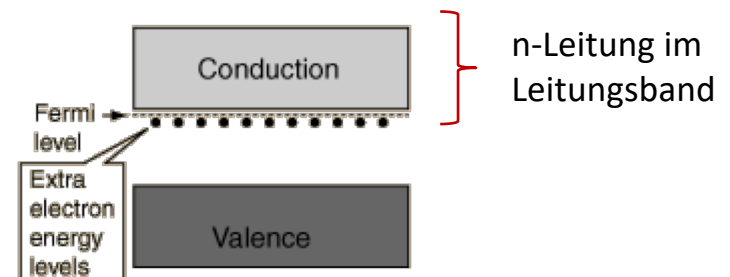
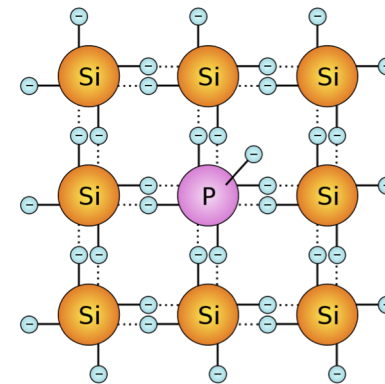


Durch sog. Doping mit Fremdatomen wird die Anzahl der freien Ladungsträger (Elektronen oder pos. Löcher) stark angehoben!

- durch Dotierung mit Aluminium ist eine kovalente Bindung nicht vollständig → positives Lochleitung
- durch Dotierung mit Phosphor zusätzliches, freies Elektron → negative Elektronenleitung



p-Leitung im Valenzband



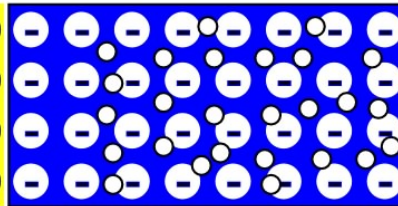
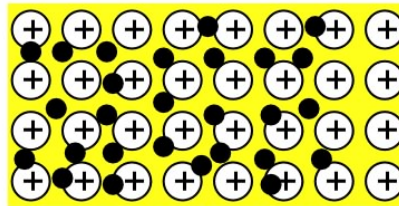
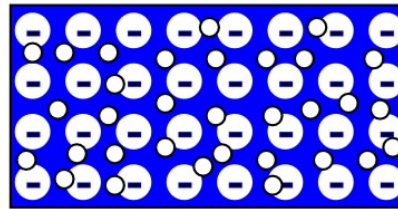
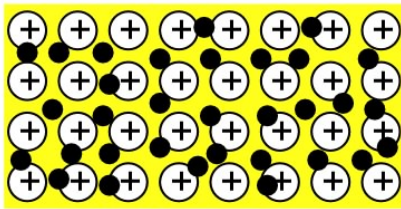
Typische Dotierungen: 10^{-4} – 10^{-7} Fremdatome

Der p-n Übergang

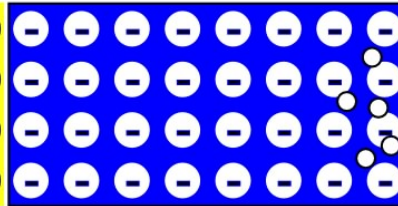
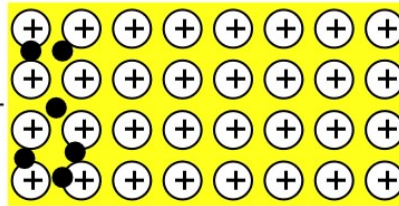


n

p



im thermischen
Äquilibrium diffundieren
Elektronen und Löcher
nach p bzw n Schicht, wo
sie annihilieren



unter Sperrspannung
(reverse bias)

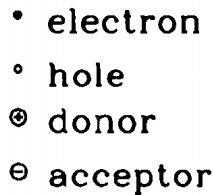
$+V_B$

n-layer

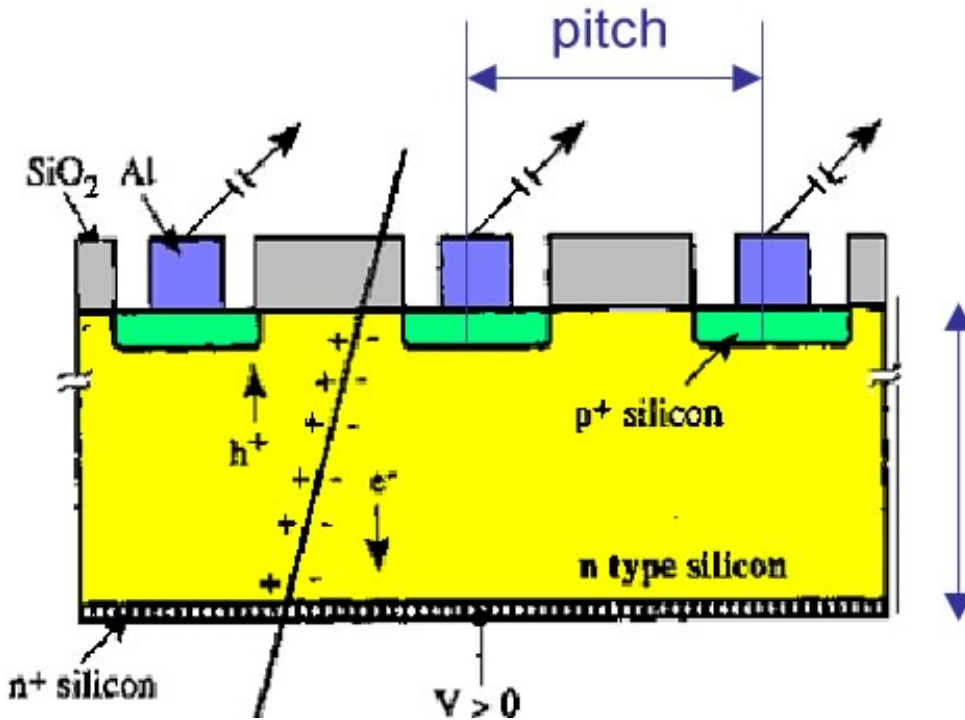
p-layer

Elekt. Feld erzeugt Verarmungszone,
keine freien Ladungsträger

Teilchen (MIP)



- 34



Streifen oder Pixel Signalaufnahme

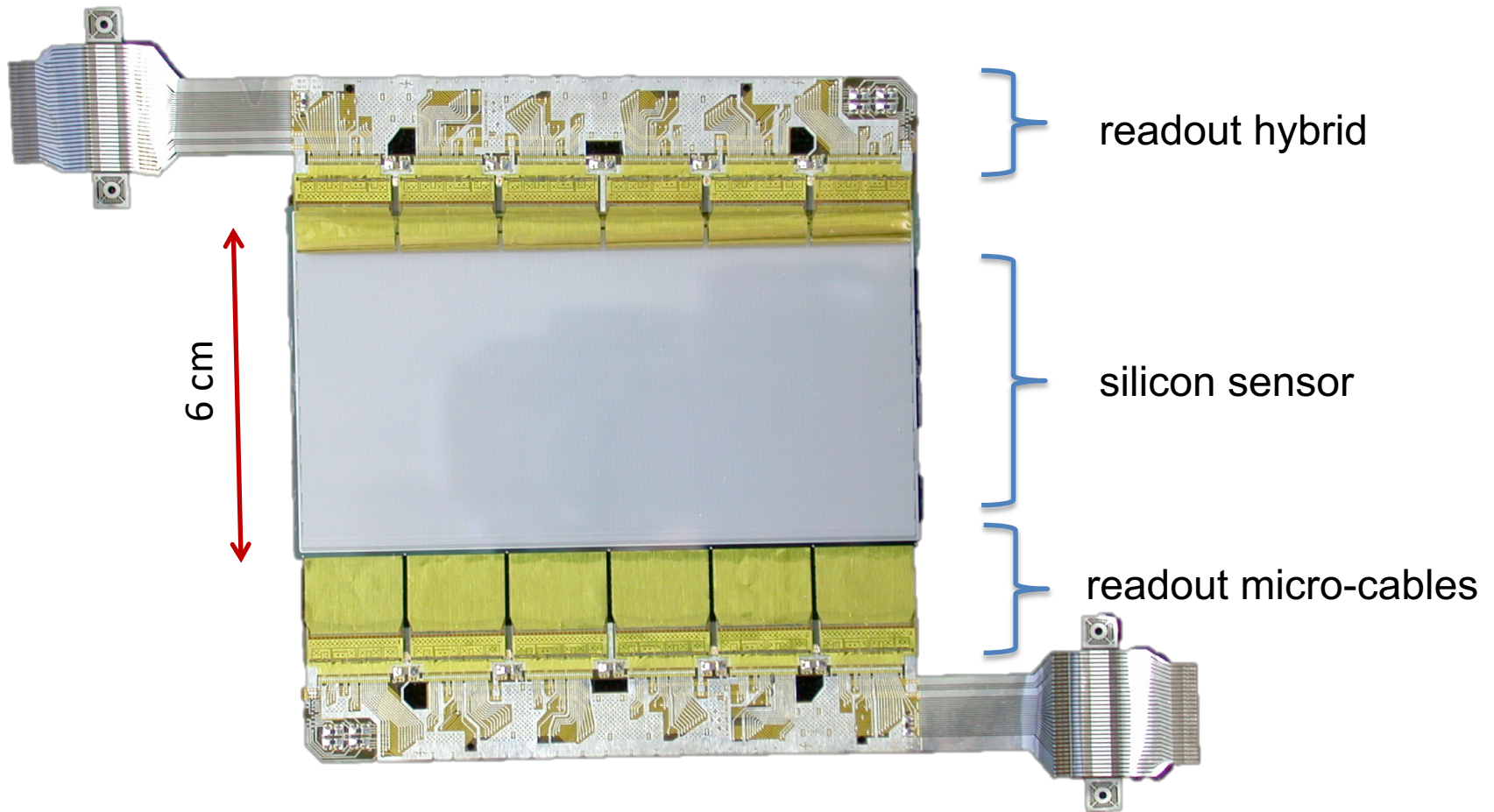
d.h., **Segmentation** der p⁺-Schicht in Streifen mit individuelle Auslese ergibt Positionsinformation

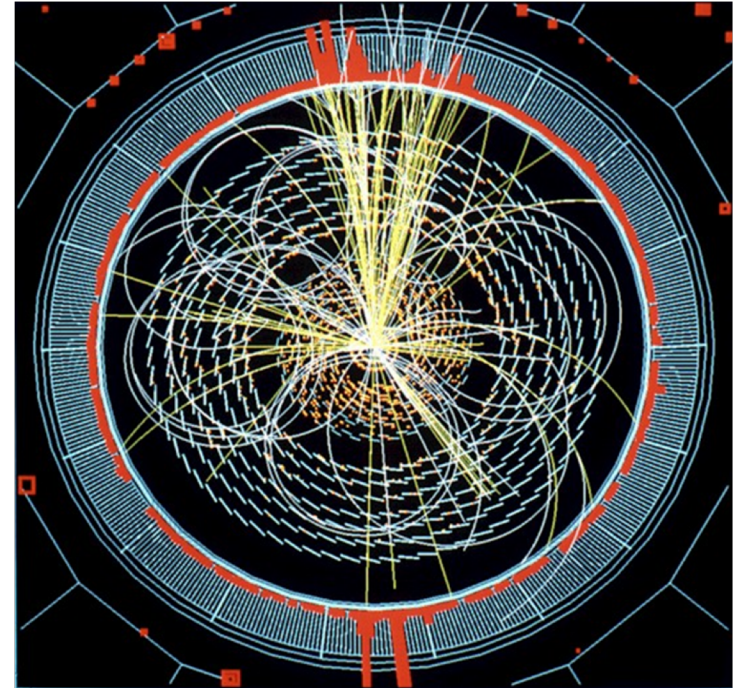
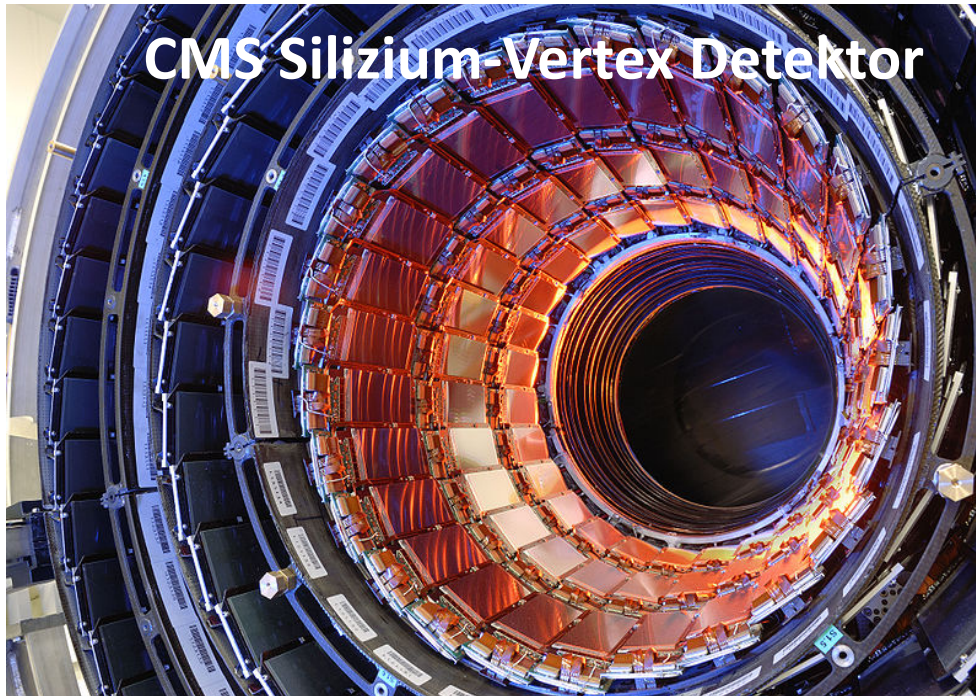
typische Dicke des Siliziums ist 300 μm (150 – 500 μm möglich)

n-type Silizium mit spez. Widerstandf von 2 $\text{k}\Omega\text{cm}$ ($N_D = 2.2 \cdot 10^{12} / \text{cm}^3$) erfordert **Verarmungsspannung von etwa 150 V**

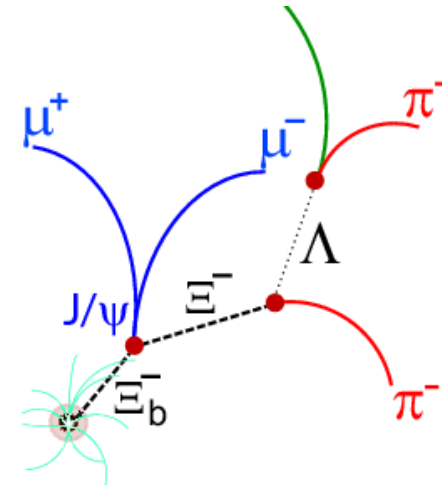
die räumliche Auflösung eines Streifenzählers hängt von Streifenabstand ab, typische Werte sind 20 - 150 μm , 50 μm ergibt eine "digitale" Auflösung von 14.4 μm ($\sigma = \text{pitch} / 12^{-1/2}$), deutlich besser mit Ladungsteilung über mehrere Streifen (Gaus'sche Interpolation)

Silicon Strip - Module





- Rekonstruktion der Spurpunkte
- Bestimmung des Wechselwirkungspunktes (Vertex) mit großer Präzision $\sim 10 \mu m$
- Bestimmung sekundären Vertices langlebiger Teilchen (z.B: $D^0 = (c\bar{u}) \rightarrow K^- \pi^+$, $c\tau = 123 \mu m$)





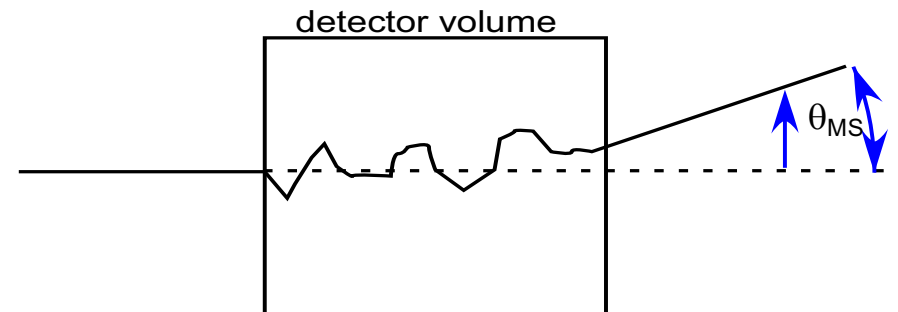
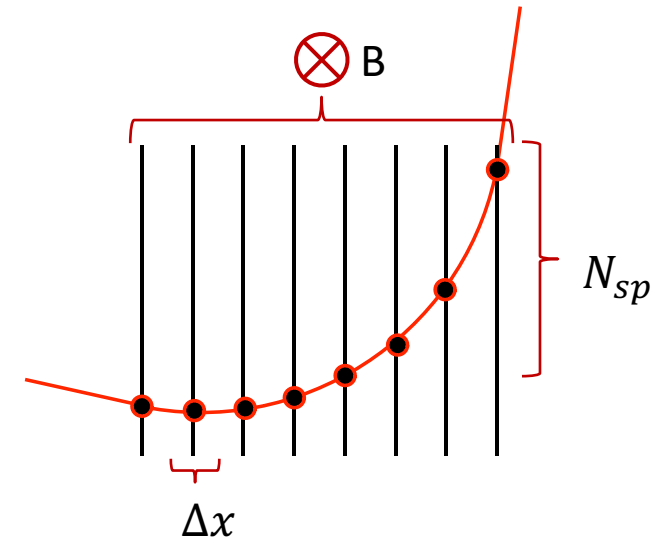
relative Impulsauflösung $\Delta p/p$ bestimmt durch:

- Magnetfeld
- Anzahl und Fehler der Spurpunkte
- Absolutwert des Impulses

$$\frac{\Delta p_{\perp}}{p_{\perp}} \sim p_{\perp} \cdot \sqrt{N_{SP}} \cdot \Delta(x) \cdot \frac{1}{B}$$

- Mehrfachstreuung für rel. Teilchen

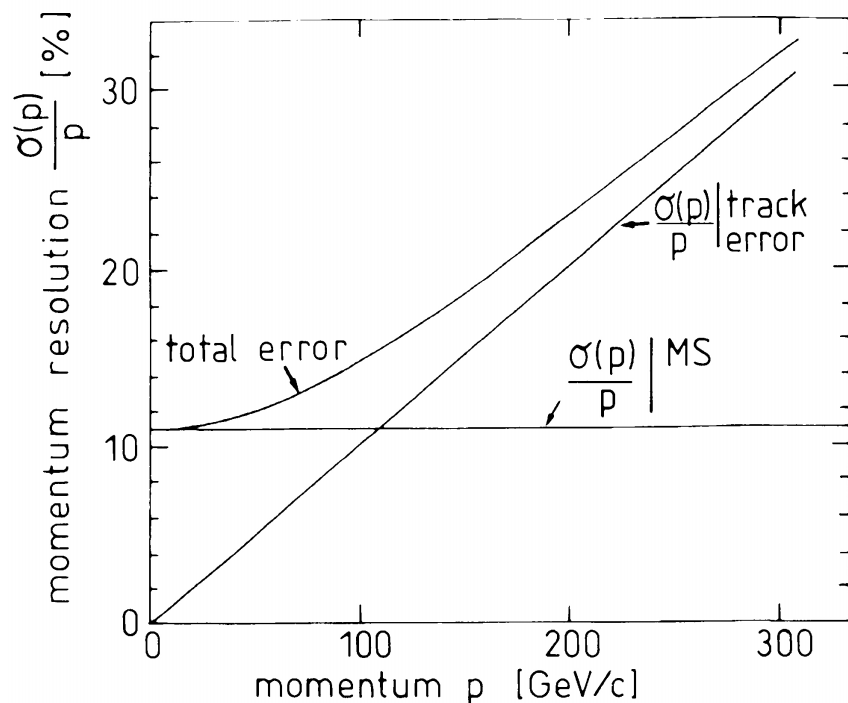
$$\frac{\Delta p_{\perp}^{MS}}{p} \sim \Theta_{rms}^{MS} \sim \frac{1}{\sqrt{LX_0B}}$$



hängt nur von der Menge
und Art des Materials
("Materialbudget") ab

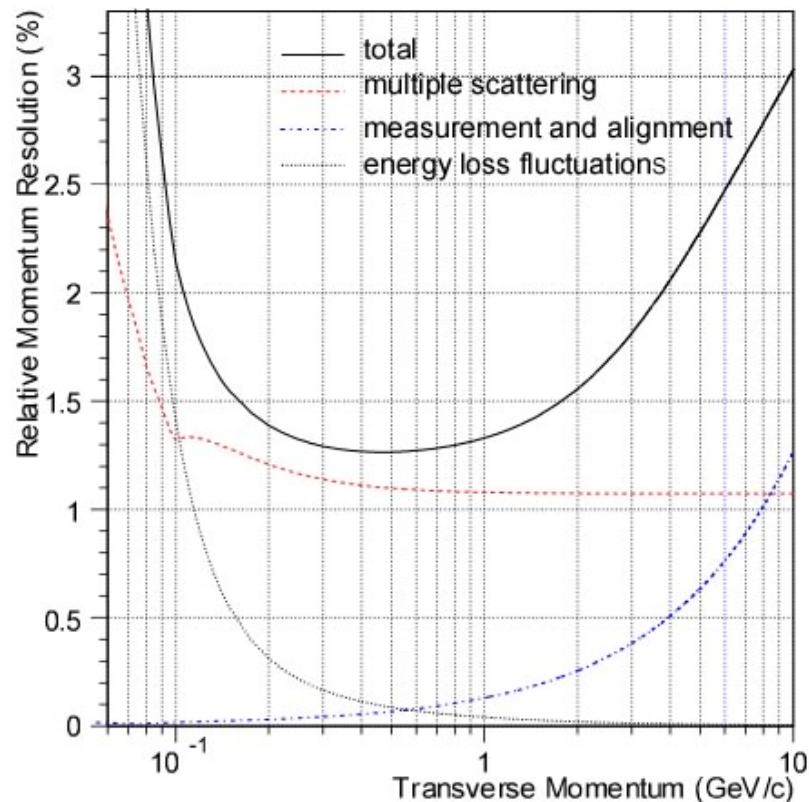


- Gesamtfehler als Summe aus Fehler aus Spurbestimmung und Fehler durch Mehrfachstreuung
- bei kleinen Energie dominiert Fehler aus Mehrfachstreuung



Beispiel ALICE Si-Tracker (6 Lagen)
 $X/X_0 \sim 5 - 6\%$

Impulsauflösung $< 2 \text{ GeV}/c$ wird durch Mehrfachstreuung (Materialbudget) bestimmt.





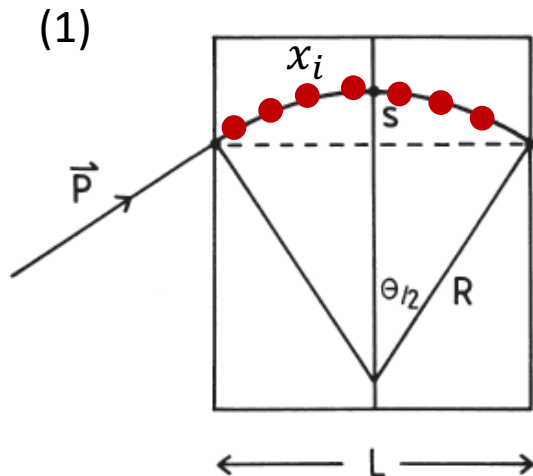
Der Impuls eines geladenen Teilchens wird gemessen durch die Krümmung im Magnetfeld:

$$m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow p_{\perp} = 0.3 \cdot Z \cdot B_z \rho$$

B [Tesla], p [GeV/c]

Die Genauigkeit der „Krümmungsmessung“ ist gegeben durch:

- (1) Anzahl und Genauigkeit der Bestimmung der Raumpunkte (x,y,z)
- (2) Verschmierung durch Mehrfachstreuung der Teilchen im Detektormaterial



$$p_{\perp} = eBR \approx eB \cdot \frac{L}{\theta} \Rightarrow \frac{dp_{\perp}}{d\theta} = eBL \cdot \frac{1}{\theta^2} = \frac{p_{\perp}}{\theta} \Leftrightarrow \frac{1}{\theta} = \frac{p_{\perp}}{eBL}$$

$$\Rightarrow \frac{dp_{\perp}}{p_{\perp}} = \frac{d\theta}{\theta} \Leftrightarrow \frac{\sigma(p)}{p_{\perp}} = \frac{\sigma(\theta)}{\theta}$$

$$\sigma^2(\theta) = \frac{\sum \sigma^2(x_i)}{R^2} \approx N_{SP} \cdot \sigma^2(x)/R^2$$

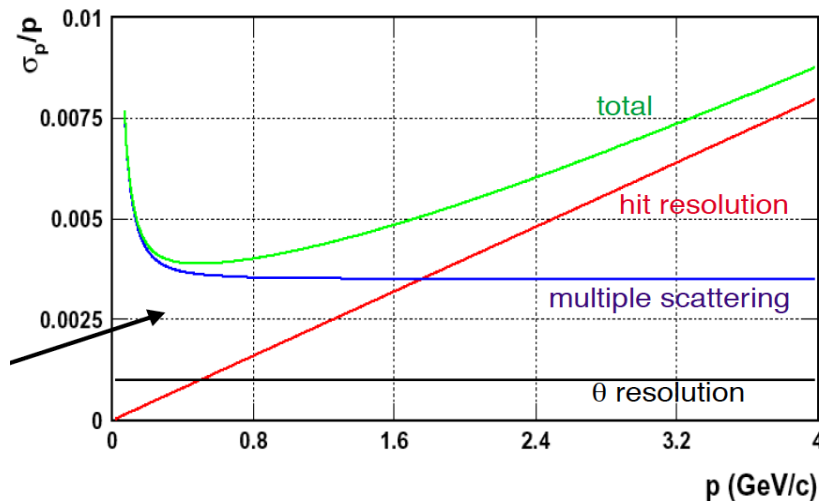
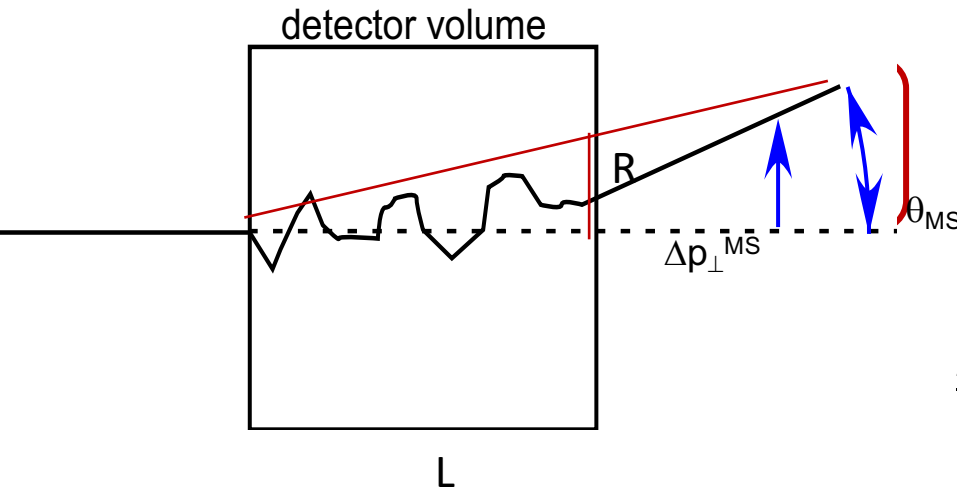
$$\frac{\sigma(p_{\perp})}{p_{\perp}} = \frac{\sigma(\theta)}{\theta} = \sqrt{N_{SP}} \cdot \frac{\sigma(L)}{R} \cdot \frac{1}{\theta} = \sqrt{N_{SP}} \cdot \frac{\sigma(L)}{R} \cdot \frac{p_{\perp}}{eBL}$$

$$\frac{\Delta p_{\perp}}{p_{\perp}} \sim p_{\perp} \cdot \sqrt{N_{SP}} \cdot \Delta(x) \cdot \frac{1}{B}$$



(2) Mehrfachstreuung:

Aus der **Moliere-Theorie** ergibt sich die mittlere Ablenkung durch Mehrfachstreuung zu



$$\Theta_{rms}^{MS} = \frac{19.2 \text{ MeV}}{\beta_{cp} [MeV/c]} \cdot z \cdot \sqrt{L/X_0}$$

$$\frac{\Delta p_{\perp}^{MS}}{p_{\perp}} \sim \Theta_{rms}^{MS}/\theta = \Theta_{rms}^{MS} \left(\frac{L}{R}\right) \sqrt{X/X_0} \quad \text{für } \beta \rightarrow 1$$

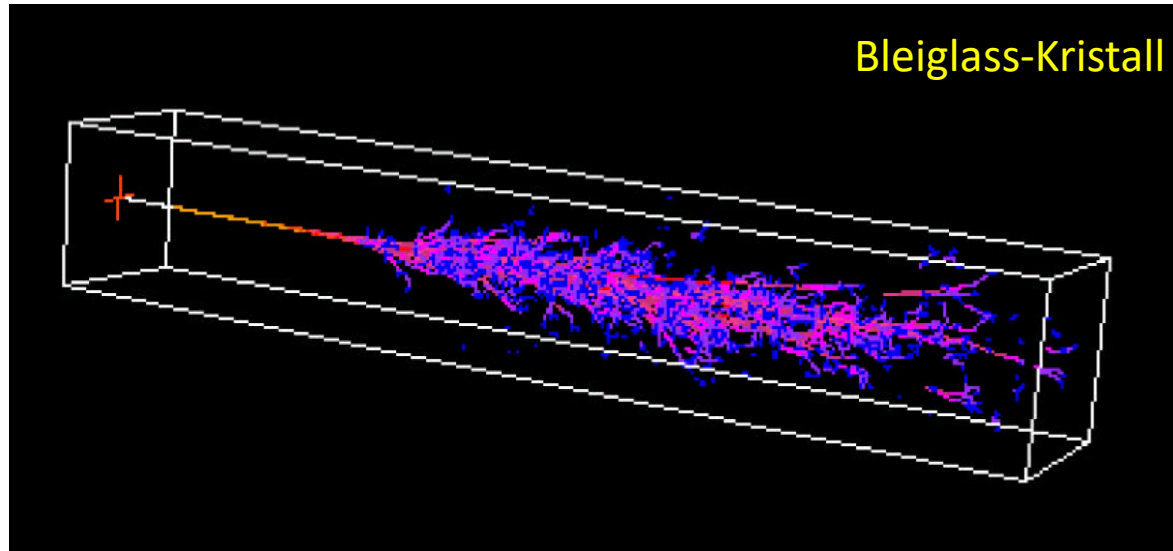
$$\frac{\Delta p_{\perp}^{MS}}{p_{\perp}} \sim \frac{\Theta_{rms}^{MS}}{\theta} = \Theta_{rms}^{MS} \cdot \frac{R}{L} = \Theta_{rms}^{MS} \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{p}{eB}$$

$$\frac{\Delta p_{\perp}^{MS}}{p_{\perp}} \sim \frac{1}{\sqrt{LX_0 B}}$$

relative Impulsauflösung durch
Mehrfachstreuung im Magnetfeld wird nur
durch **Materialbudget** bestimmt für $\beta \rightarrow 1$



Kalorimeter



Bleiglass-Kristall

$l \sim 50 \text{ cm}$

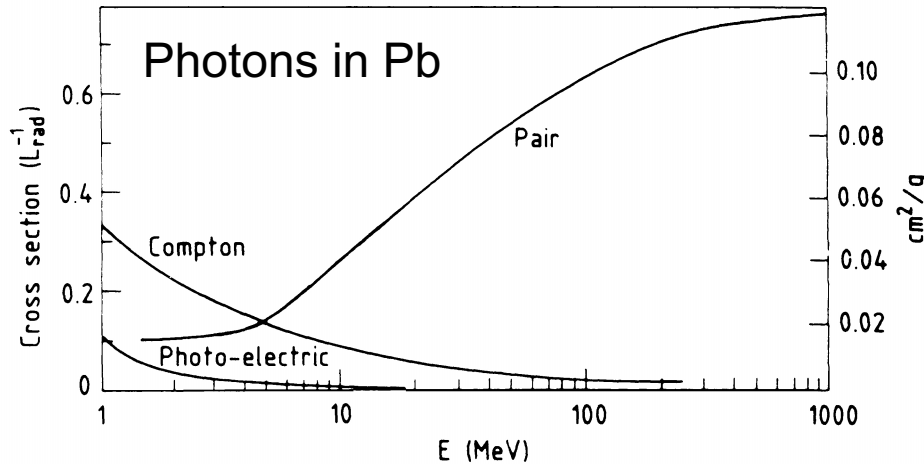
Das Grundprinzip des EM-Kalorimeters ist die Erzeugung und der Nachweis eines **elektromagnetischen Schauers**

- letztlich wird die **Gesamtenergie** des Teilchens wird durch **Ionisation** oder Anregung von Materie umgewandelt ($\rightarrow$ **Cherenkov- oder Szintillationslicht**).
- Kalorimetrische Messungen sind:
 - **destruktiv**, die gesamte Energie des Teilchens wird absorbiert.:
 - **komplementär** zu Impulsmessungen in Trackern
 - der einzige direkte Weg die Energie von **neutralen** Teilchen zu messen
- Design: Sampling Kalorimeter, Flüssig-Argon, Kristalle (Bleiglass)
 - Länge um Schauermaximum zu messen: bis zu $20X_0$

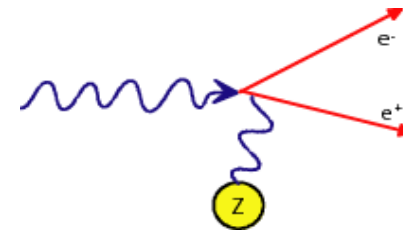
Elektromagnetische Kalorimeter – Energieverlustmechanismen (1)



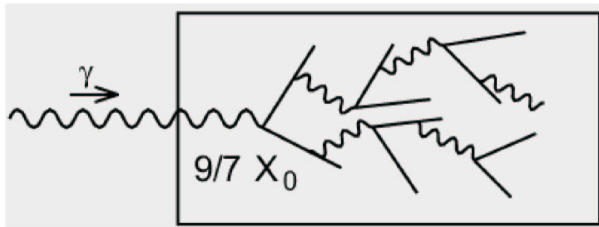
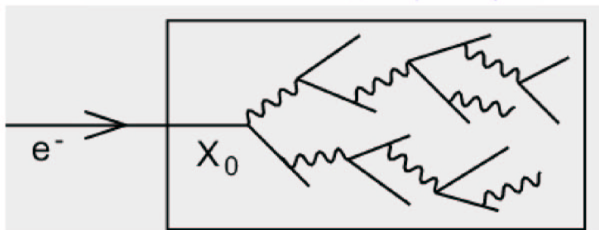
Nachweis hochenergetischer Photonen durch **Aufschauern** (sukzessive Paarproduktion) in dichtem Material



dominanter Effekt: **Paarproduktion**



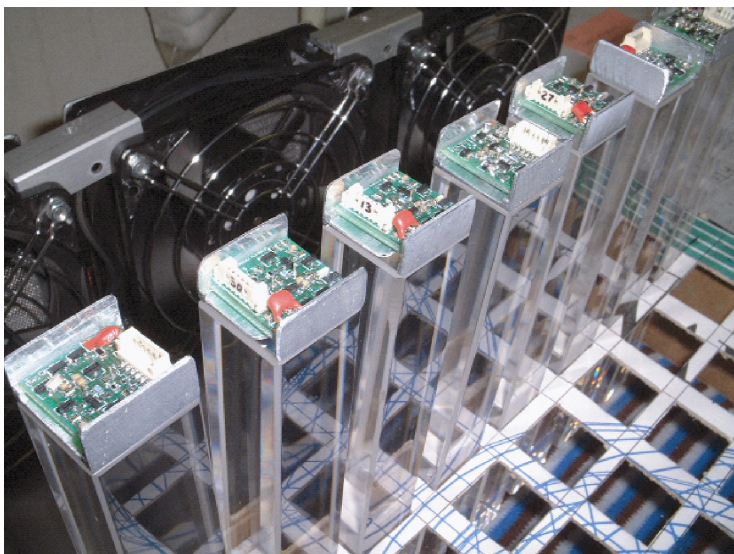
$$\gamma + \text{nucleus} \rightarrow e^+ e^- + \text{nucleus}$$



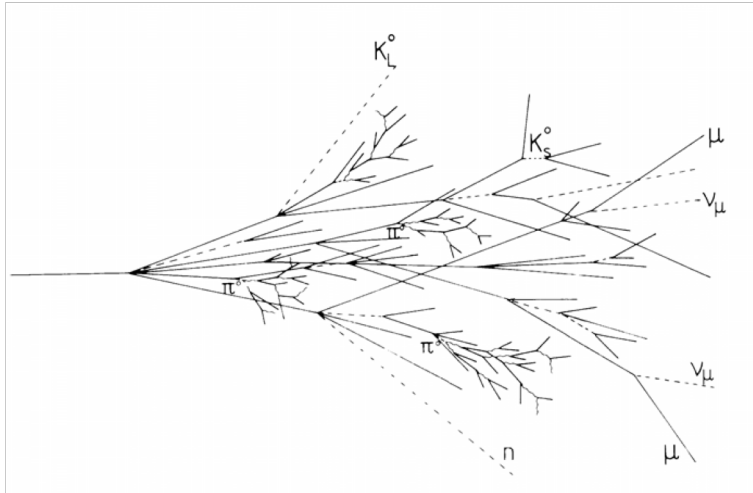
Photonenschauer $\approx$ Elektronenschauer

$$\lambda_{\text{Paar}} = \frac{9}{7} X_0$$

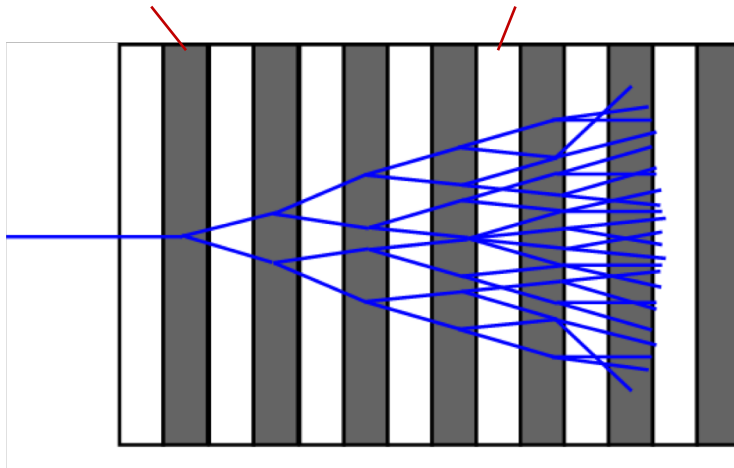
Beispiel: ALICE EM-Kalorimeter



In hadronischen Kalorimetern wird durch nukleare Wechselwirkung die wesentliche komplexere hadronischen Kaskade ausgelöst.



Absorption/Reaktion Nachweis



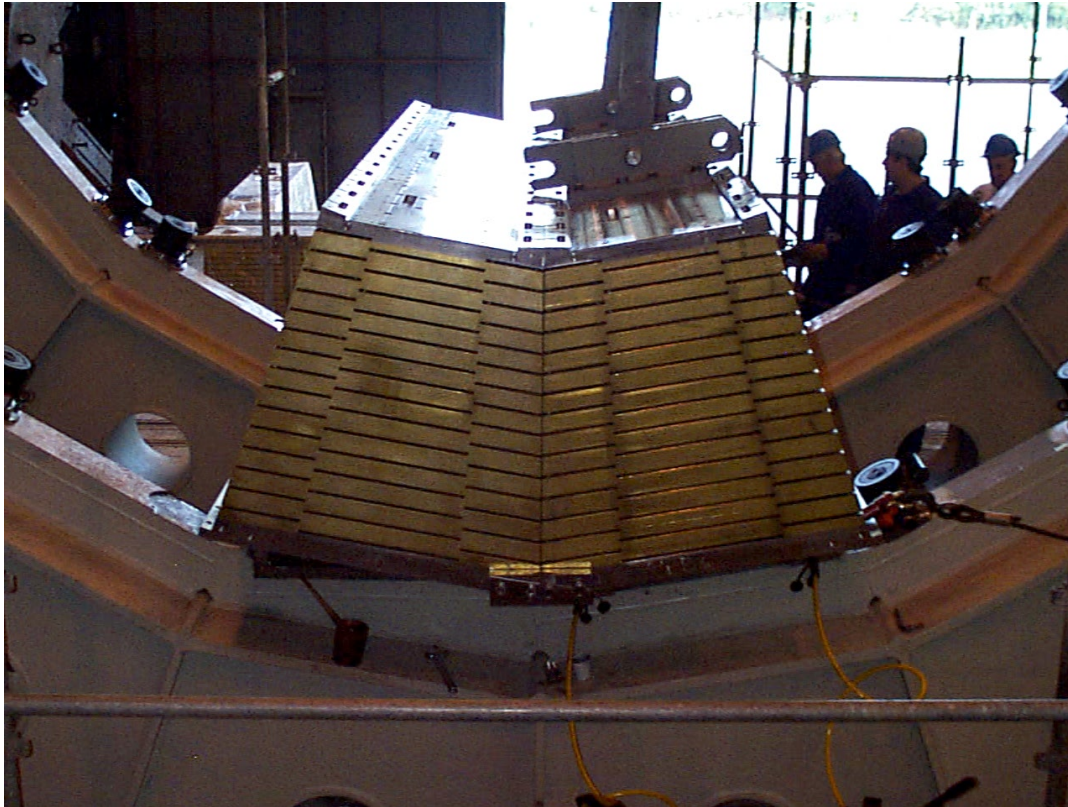
ein Grossteil der hadronischen Kaskade wird nicht nachgewiesen:

- Aufbruch von Kernbindungen (bis zu 20%)
- Produktion niederenergetischer Kernfragmente, die die bereits in den Absorptionslagen komplett absorbiert werden
- langlebige, stabile Teilchen (n, K_L^0, ν, μ) geben nur einen kleinen Teil ihrer Energie an das Kalorimeter ab oder sind komplett unsichtbar

- das Äquivalent zu X_0 ist die

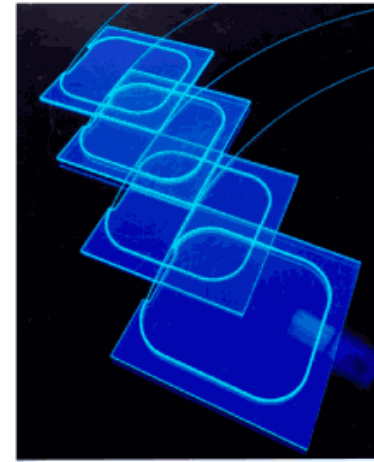
$$\lambda_{had} = \frac{1}{\sigma \cdot n} \left[\frac{g}{cm^2} \right]$$

$$\lambda_{had} \gg X_0 \text{ (Pb: 10 vs 0.89 cm)}$$



Sampling Kalorimeter

- Absorber/Szintillator Platten
- Absorber sind **Kupfer/Zn**-Platten von insgesamt 11 Absorptionslängen (λ_i)
- Auslese des Szintillationslichtes via „**wave length shifting**“ Fasern
- Nachweise des Lichtes in **HPD's**

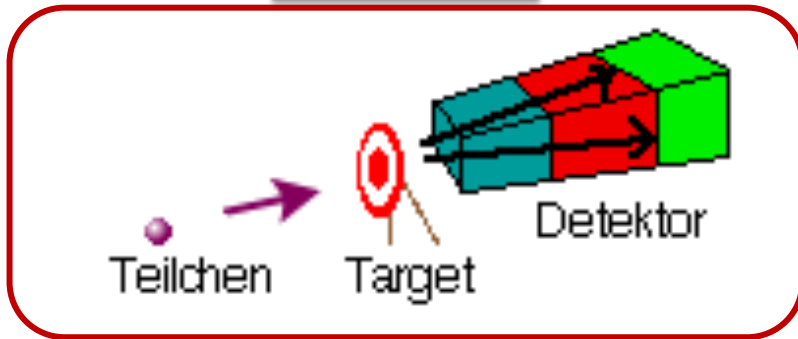




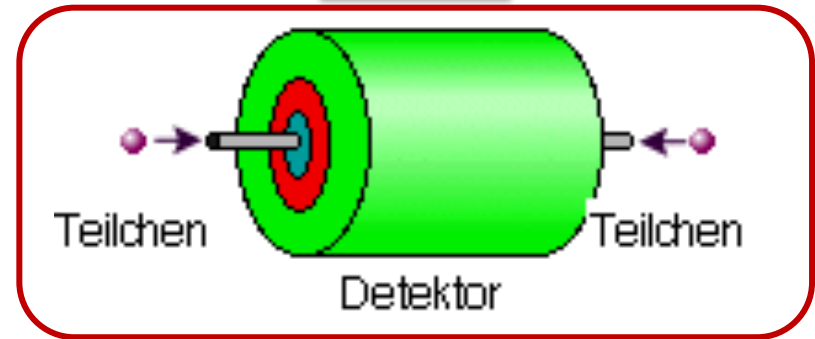
Der CMS Detektor am LHC

Zwei grundsätzlich verschieden Anordnungen von Detektoren an Beschleunigern:

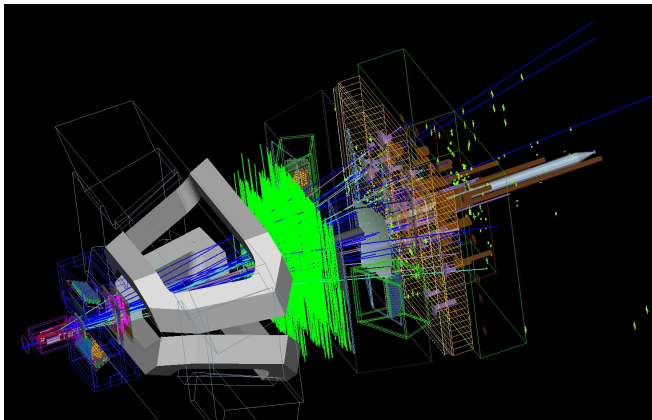
fixed Target



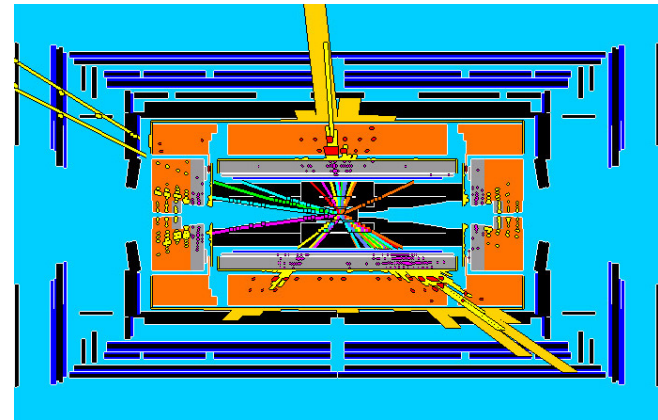
Collider



Die Anordnung der Detektoren ist an die „Event-Topologie“ angepasst:



kinematische Fokussierung



4π : hermetische Abdeckung

36 Nations, 160 Institutions, 2008 Scientists and Engineers (November 2003)

TRIGGER & DATA ACQUISITION

Austria, CERN, Finland, France, Greece, Hungary, Italy, Korea, Poland, Portugal, Switzerland, UK, USA

TRACKER

Austria, Belgium, CERN, Finland, France, New Zealand
Germany, Italy, Japan*, Switzerland, UK, USA

CRYSTAL ECAL

Belarus, CERN, China, Croatia, Cyprus, France, Ireland
Italy, Japan*, Portugal, Russia, Serbia, Switzerland, UK, USA

PRESHOWER

Armenia, Belarus, CERN, Greece, India, Russia, Taipei, Uzbekistan

RETURN YOKE

Barrel: Czech Rep., Estonia, Germany, Greece, Russia
Endcap: Japan*, USA, Brazil

SUPERCONDUCTING MAGNET

All countries in CMS contribute to Magnet financing in particular:
Finland, France, Italy, Japan*, Korea, Switzerland, USA

FEET
Pakistan China

HCAL

Barrel: Bulgaria, India, Spain*, USA
Endcap: Belarus, Bulgaria, Russia, Ukraine
HO: India

FORWARD CALORIMETER

Hungary, Iran, Russia, Turkey, USA

MUON CHAMBERS

Barrel: Austria, Bulgaria, CERN, China, Germany, Hungary, Italy, Spain,
Endcap: Belarus, Bulgaria, China, Korea, Pakistan, Russia, USA

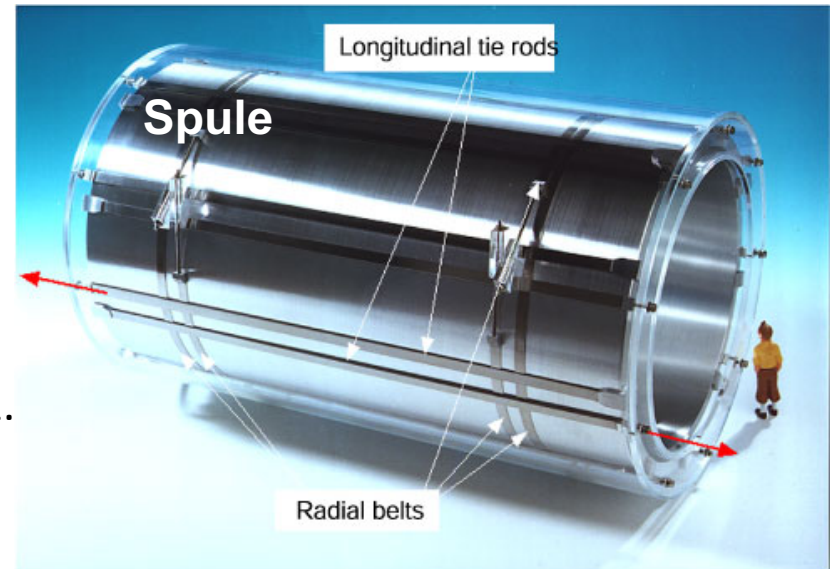
Total weight : 12500 T
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 21.5 m
Magnetic field : 4 Tesla

* Only through industrial contracts

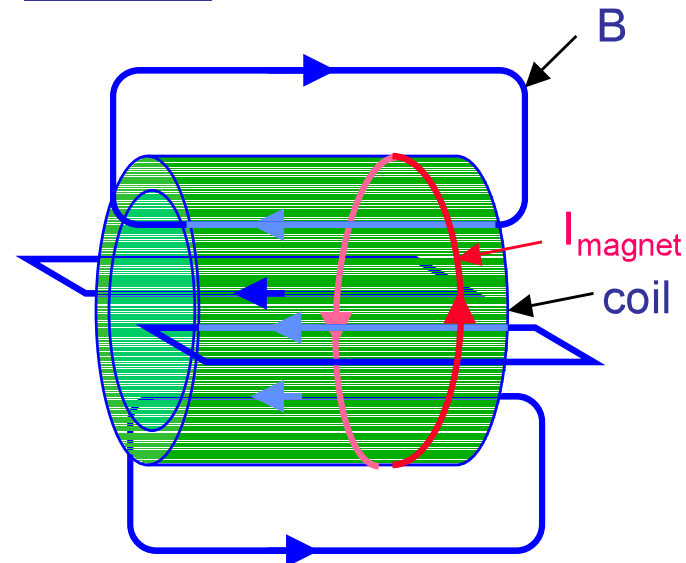
Der CMS Magnet



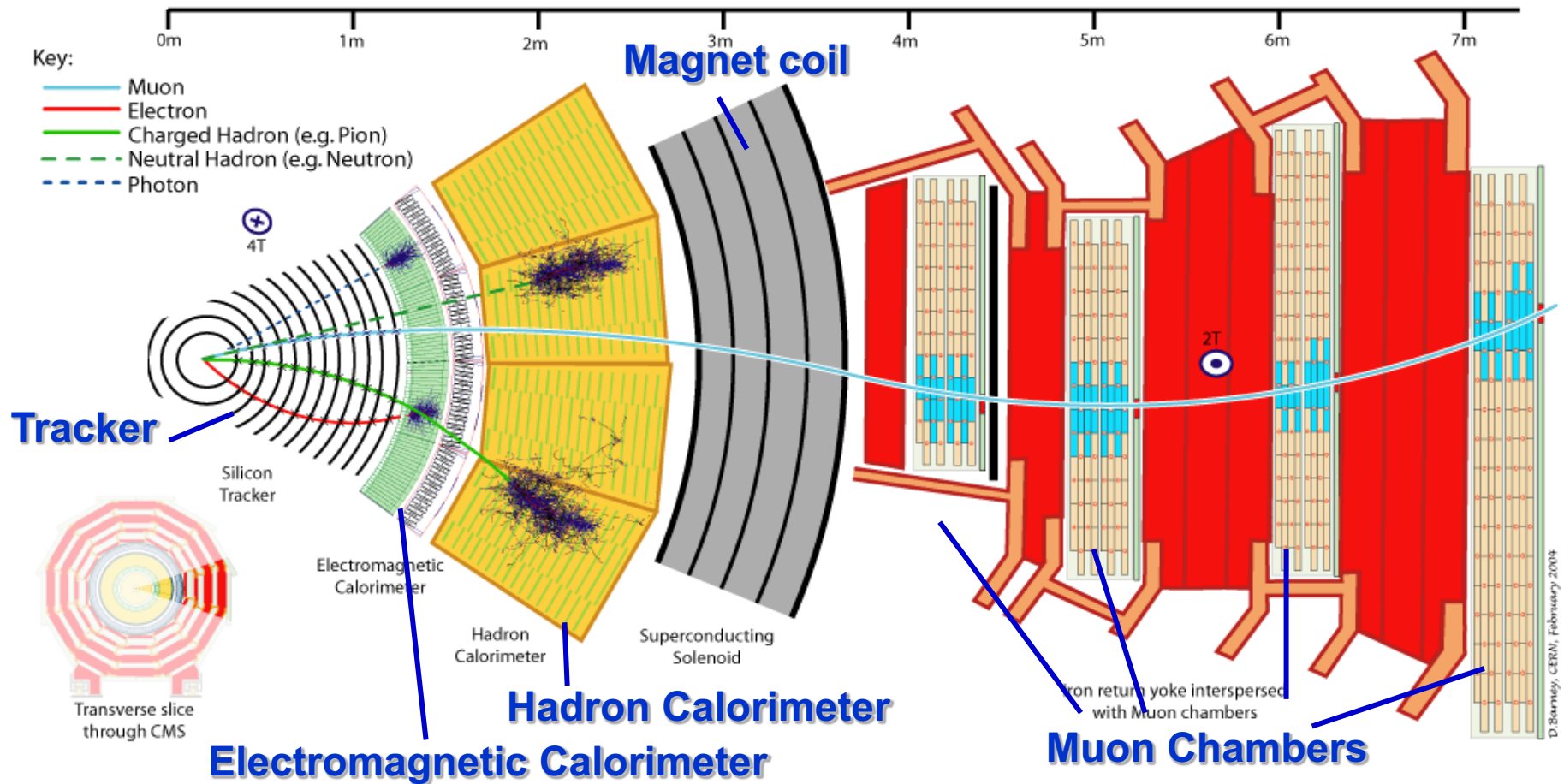
- supraleitender Solenoid
 - $B=4\text{ T}$
 - $I=19.5\text{ kA}$
 - 14 m Durchmesser, 21.6 m Länge,
 - 12000 t
 - weltgrößter supraleitender Magnet
 - Magnetfeld im (saturierten) Joch ca. 1.
 - 5 Ringe a 1400 t (total 7000 t Eisen)
 - Funktion: Muonfilter



solenoid



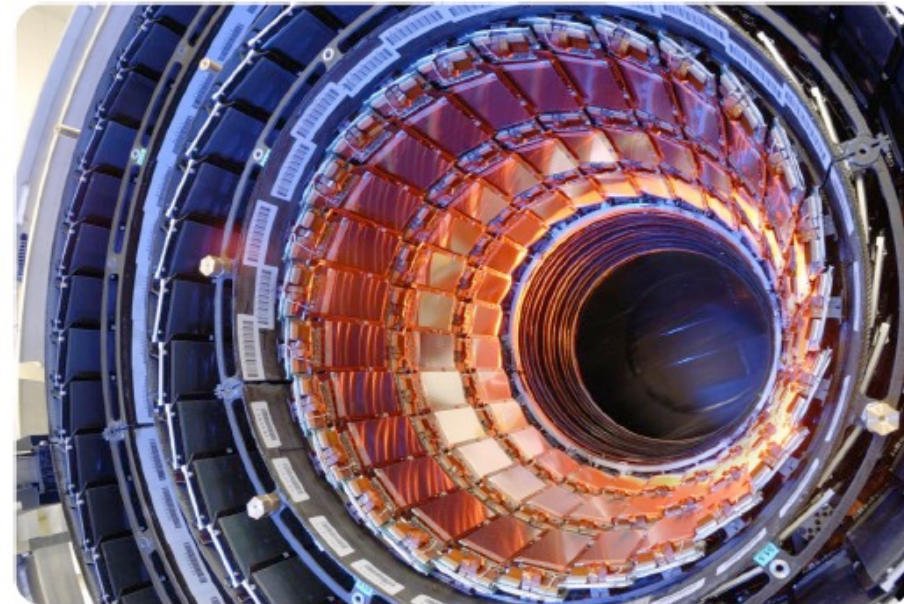
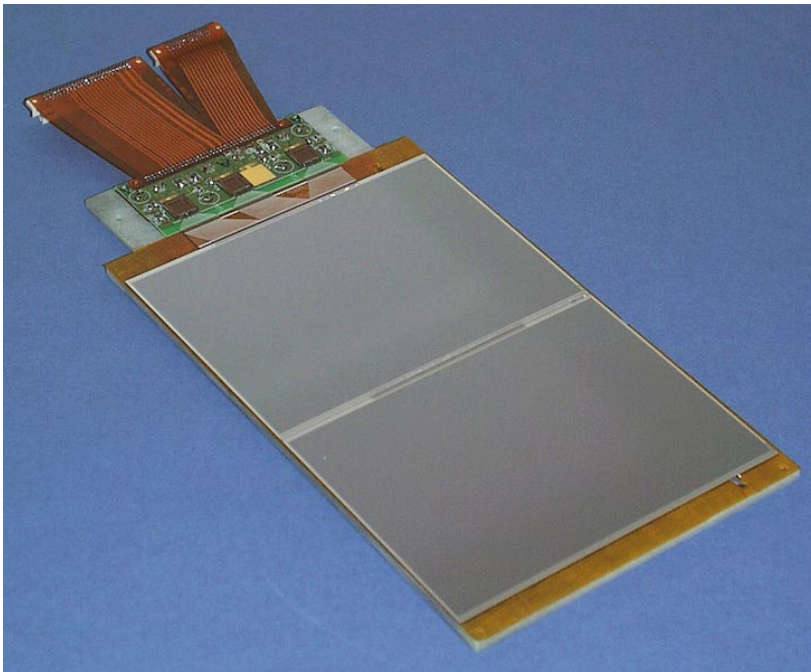
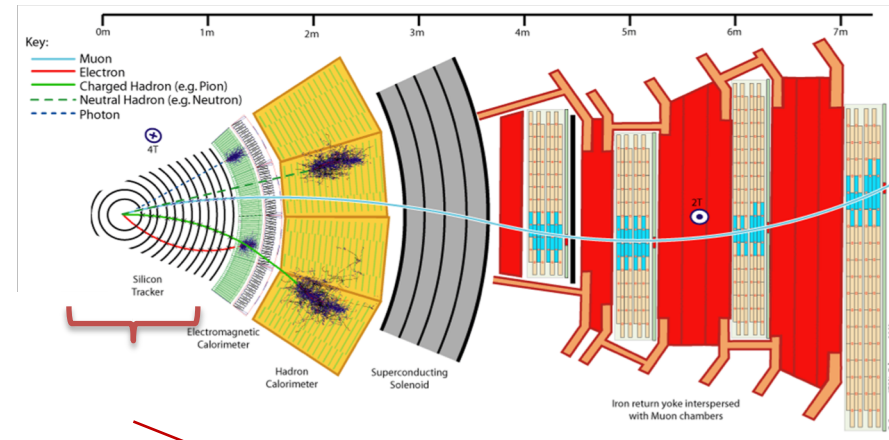
Kombination mehrerer Detektorsysteme zur Identifikation und Messung verschiedener Teilchensorten



CMS Inner Silizium Tracker

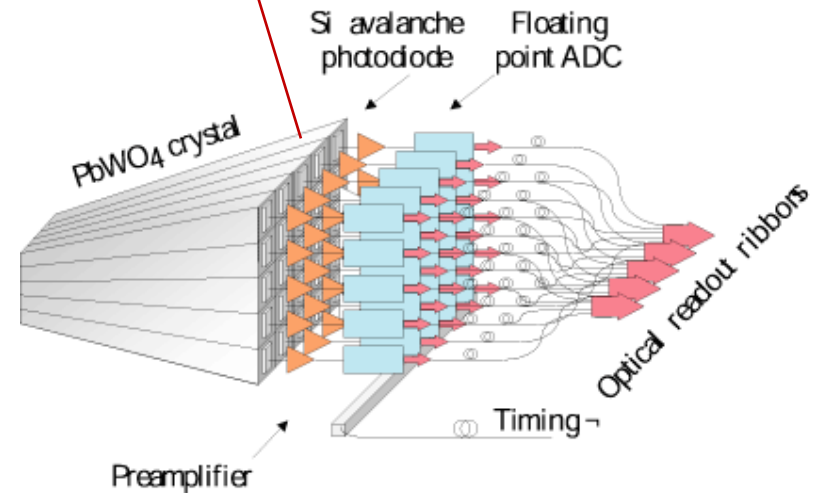
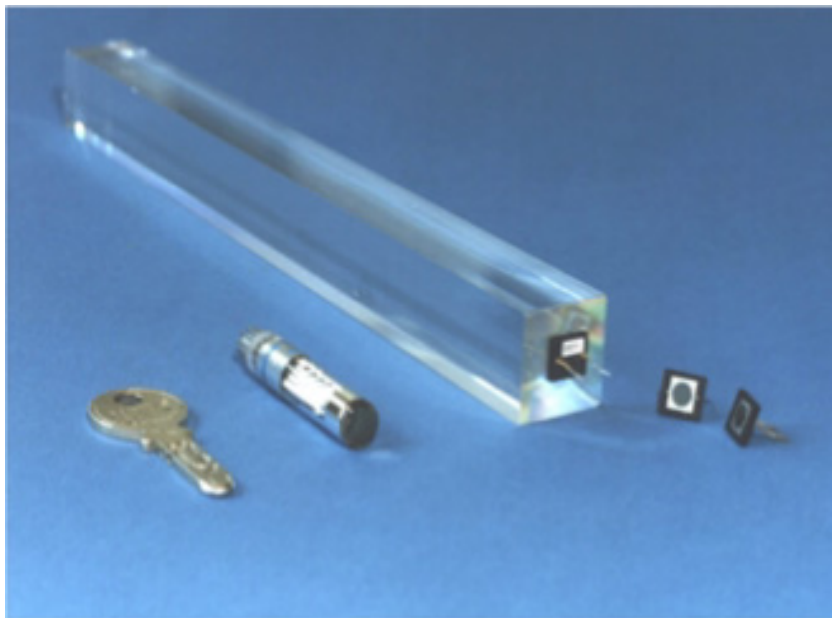
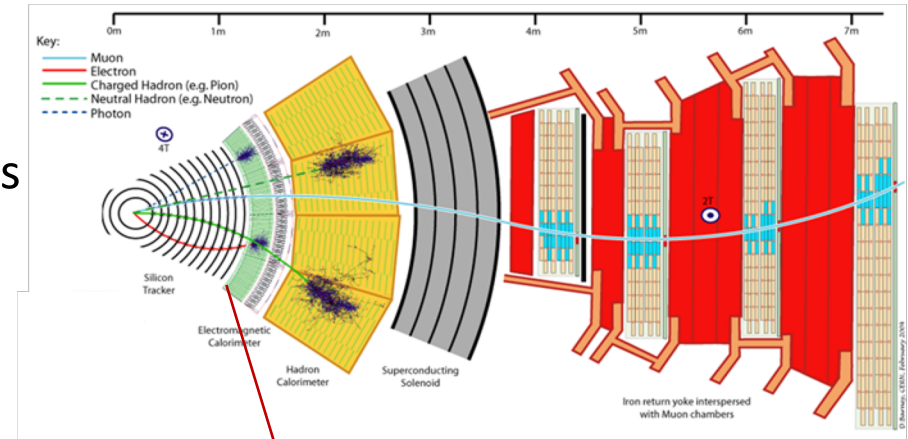


- **Aufgabe:**
 - Rekonstruktion der Spuren nahe am primären Eventvertex (Auflösung $\sim 10 \mu m$)
- **Design:**
 - Fläche = $206 m^2$ (weltgrößter Tracker)
 - 13 Lagen an Si-Halbleiterzählern
 - Si-Pixel & Si-Mikro-Streifen
 - 10 Mio. Auslesekanäle



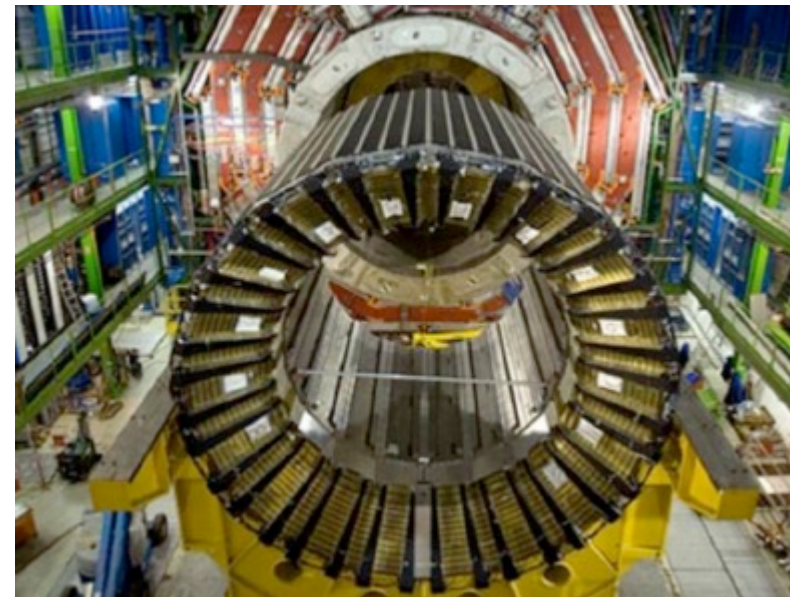
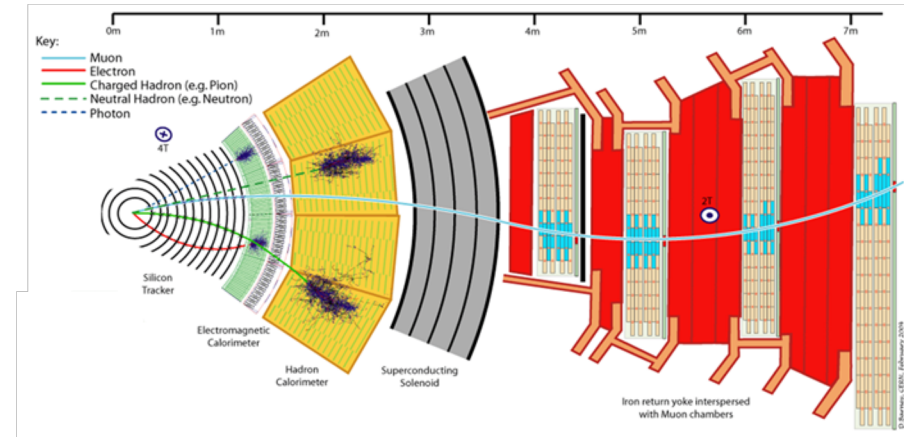


- **Aufgabe:**
 - Bestimmung der EM-Energie eines Ereignisses ($e^\pm, \gamma, \pi^0, \dots$)
- **Design:**
 - 61200 $PbWO_4$ -Kristalle
 - hohe Dichte ($8g/cm^3$)
 - Größe: $22 \times 22 \times 230 \text{ mm}^3$





- **Aufgabe:**
 - Bestimmung der hadronischen Energie eines Ereignisses
- **Design:**
 - **Sampling Kalorimeter**
 - alternierende Lagen eines passiven Absorbers und eines aktiven Szintillators
 - **aktiver Detektor:** Plastiksintillator mit Faser-Auslese
 - **passives Material:** Messing (Cu/Zi) / Eisen (Fe)

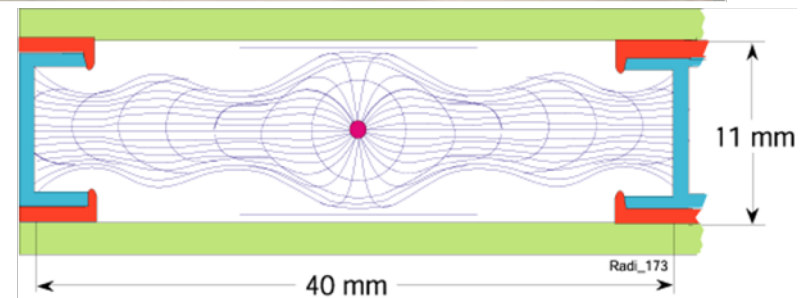
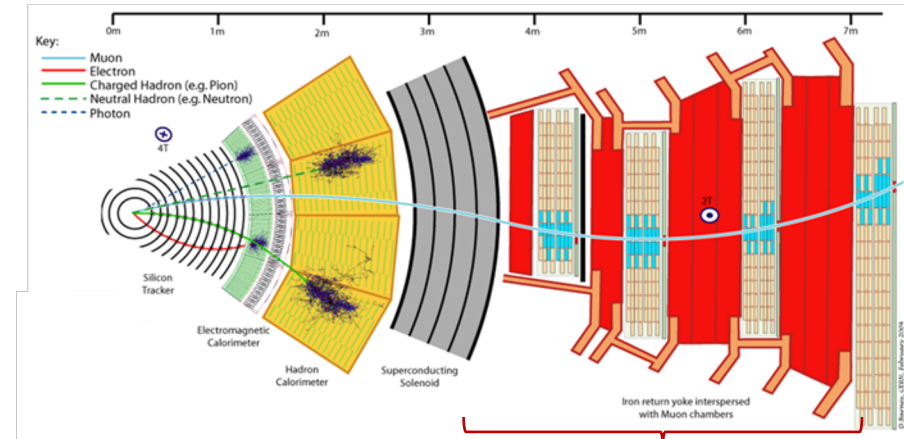


■ Aufgabe:

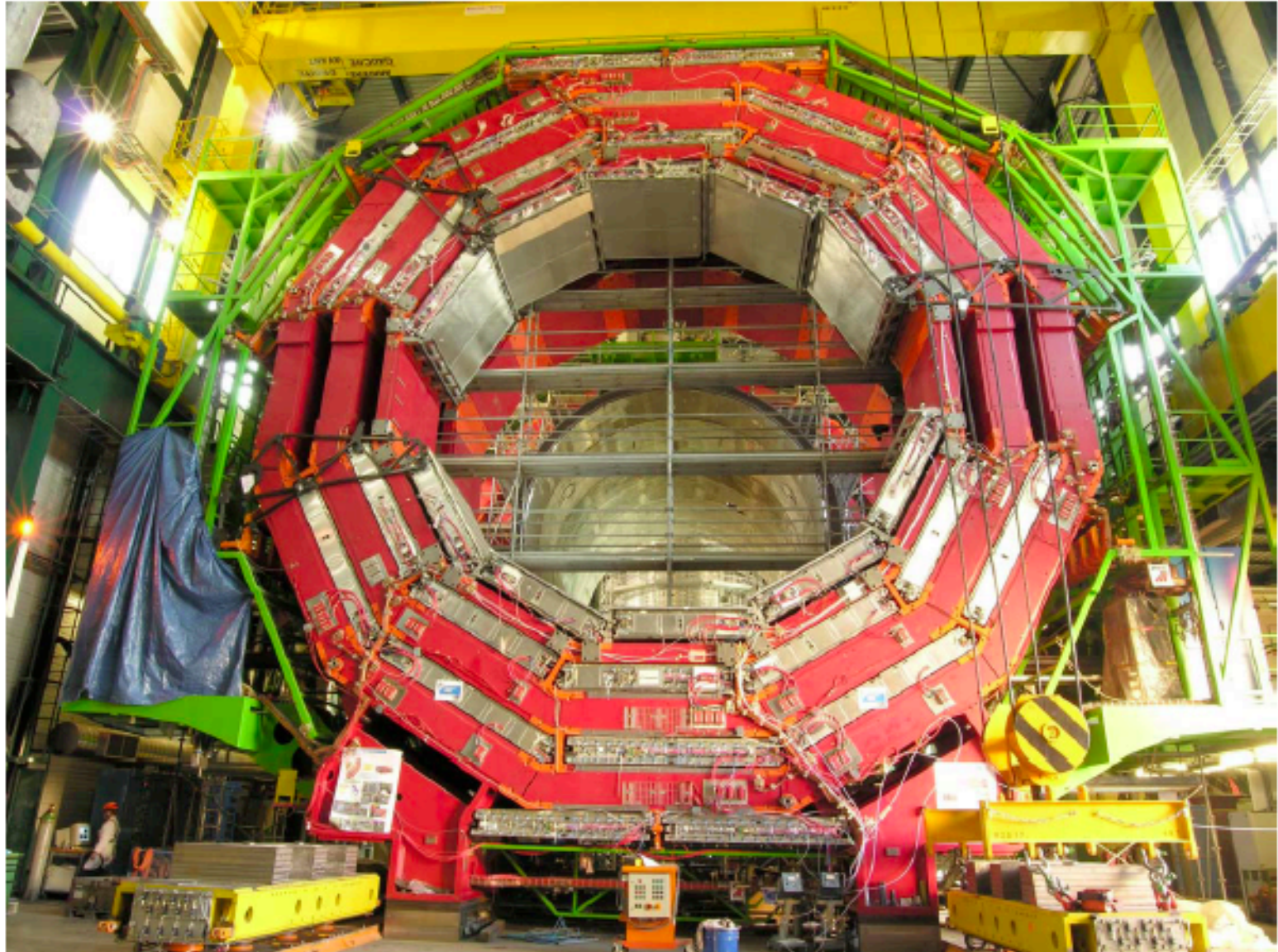
- Identifikation von Myonen und Bestimmung ihres Impulses

■ Design

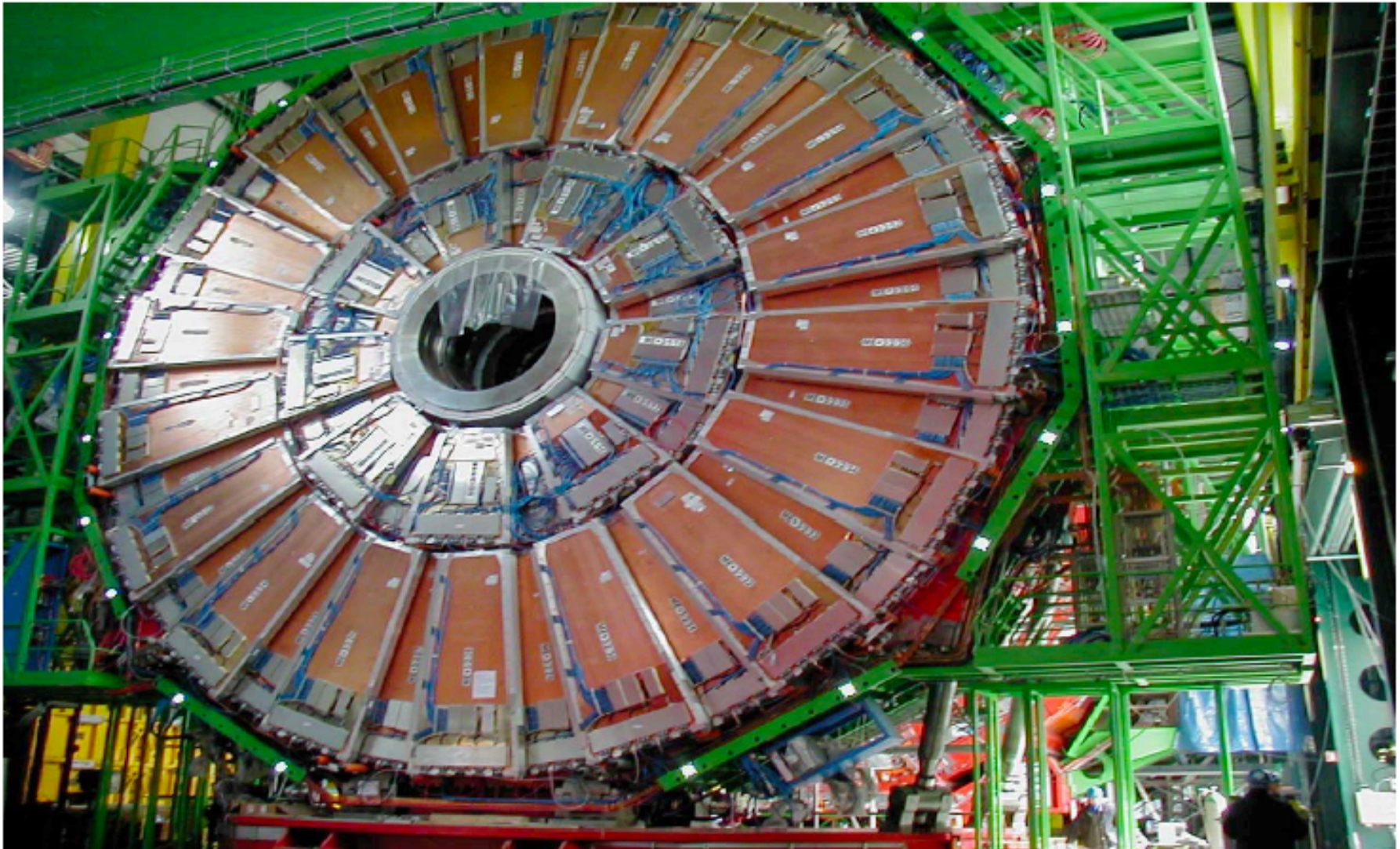
- Gaszähler:
- Drift Tube Chambers
- Cathode Strip Resistive Plate Chambers



Barrel Yoke mit Drift Tube Muon Kammern



Cathode Strip Endcap Muon Chambers





Anforderung an Detektoren für moderne Hochenergieexperiment:

Silizium Vertex Tracker:

- ✓ Vertexbestimmung komplexer Zerfälle
- ✓ mehrlagige hochpräzise Silizium Detektoren (Pixel, Streifen)

Elektromagnetische Kalorimeter:

- ✓ Bestimmung der Elektromagnetischen Energie von Zerfällen, z.B. $H \rightarrow \gamma\gamma$
- ✓ Kristalle mit hohem Z (sehr gut & teuer), oder Sampling Calorimeter (kostengünstig)

Hadronische Kalorimeter:

- ✓ Bestimmung der hadronischen Energie eines Ereignisses
- ✓ fast immer Sampling Kalorimeter

Gasdetektoren:

- ✓ Großflächige Tracker , kontinuierliches Tracking und Teilchidentifikation
- ✓ Driftkammern, Resistive Plate Chambers, Transition Radiation,...., [Spurendriftkammer](#)
- möglichst hermetische Abdeckung des kompletten Raumwinkels
- verträglich mit hohen Ereignisraten (Auslese und Strahlungshärte)