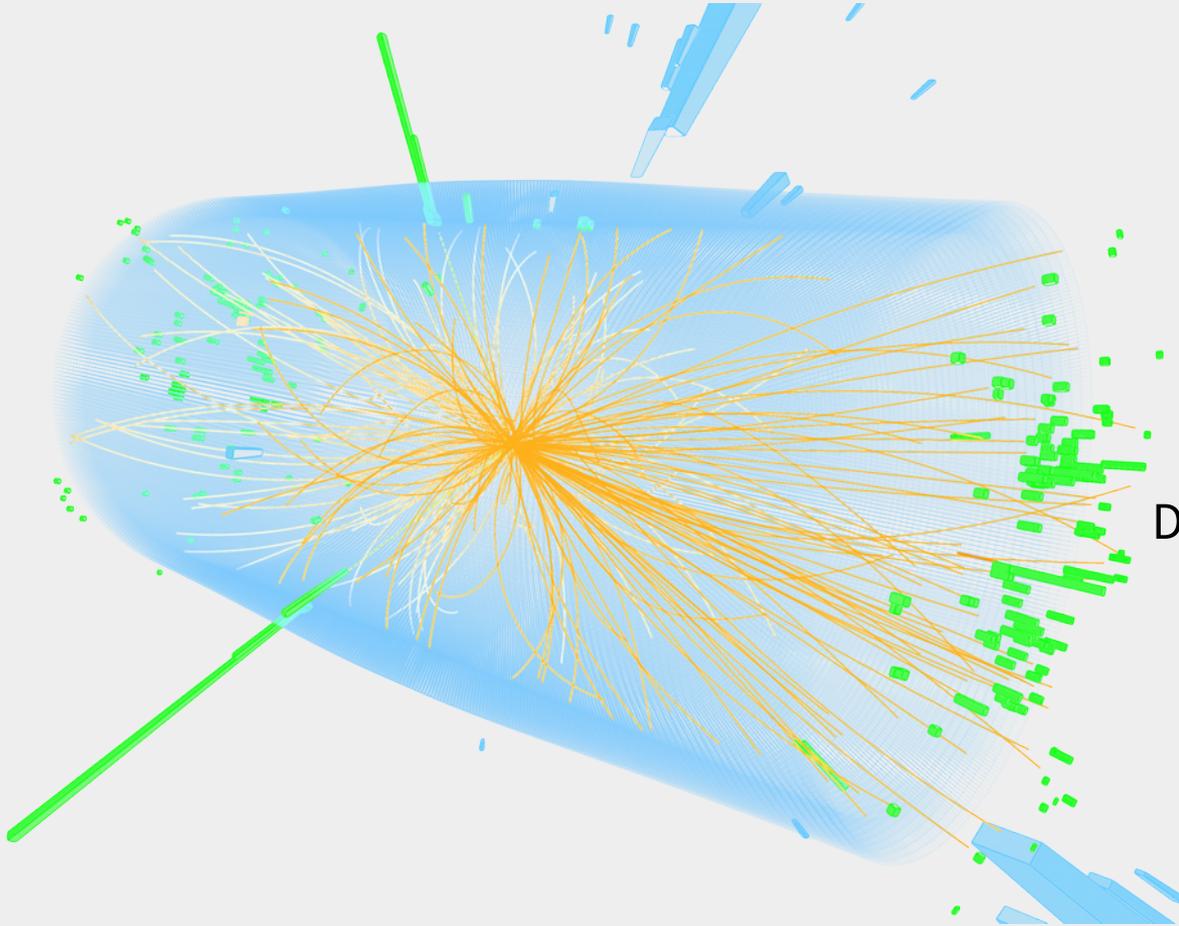


# Teilchendetektoren

Teilchennachweis in der Hochenergiephysik



**Simon Spannagel, CERN**  
Deutsches Lehrerprogramm  
19. Juni 2019

Event-Display:



# Inhaltsverzeichnis

- Was messen wir?
  - Stabile Teilchen
  - Vermessung von Teilcheneigenschaften
  - Detektorsysteme
- Wechselwirkung mit Materie
  - Geladene Teilchen
  - Photonen
  - Hadronische Wechselwirkung
  - Neutrinos
- Detektortypen
  - Historischer Überblick
  - Gasdetektoren
  - Halbleiterdetektoren
  - Szintillatoren
  - Kalorimeter
  - Cherenkovdetektoren
- Detektorsysteme an LHC-Experimenten

# Prolog: Einheiten

- Elementarladung:  $e = 1,602\ 176\ 6208 \times 10^{-19} \text{ C}$
- Energieeinheit eV:  $1 \text{ eV} = 1,602\ 176\ 6208 \times 10^{-19} \text{ J (CV)}$   
Energie eines Elektrons, durch 1V beschleunigt
- Masse eines Elektrons:  $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$   
 $= 511 \text{ keV} / c^2$
- Faktor  $c^2$  wird oft nicht angegeben, Einheiten definiert mit  $c = 1$  (und  $\hbar = 1$ ):  
MeV, GeV, TeV...  
für Energie, Impuls, (Ruhe-) Masse
- Wissenschaftliche Schreibweise: Mantisse plus Exponent zur Basis 10:  $a \times 10^b$

# Was messen wir?

Bestimmung von Teilcheneigenschaften

# Welche Teilchen können wir nachweisen?

- Teilchen müssen langlebig genug sein, um den Detektor zu erreichen...
  - Viele Elementarteilchen haben eine sehr kurze Lebensdauer (Higgs, W, Z...)
  - Gemessen werden Zerfallsprodukte

$$d = c \tau \gamma, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c}$$

- Teilchen müssen wechselwirken!
  - Nicht jedes Teilchen nimmt an allen Kräfte teil
  - Möglichkeiten der Detektion hängen stark von Kräften ab

• Elementarteilchen:  $e^\pm, \mu^\pm, \nu^e, \bar{\nu}^e, \nu^\mu, \bar{\nu}^\mu, \nu^\tau, \bar{\nu}^\tau, \gamma$

• Baryonen:  $p^\pm, n, \Sigma^\pm, \Xi_0^\pm, \Xi^\pm, \Omega^\pm$

• Mesonen:  $\pi^\pm, K^\pm, K_0 (K_0^S, K_0^L)$

$$\tau_n \approx 15 \text{ min}$$

$$\tau_\mu \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

# Messgrößen

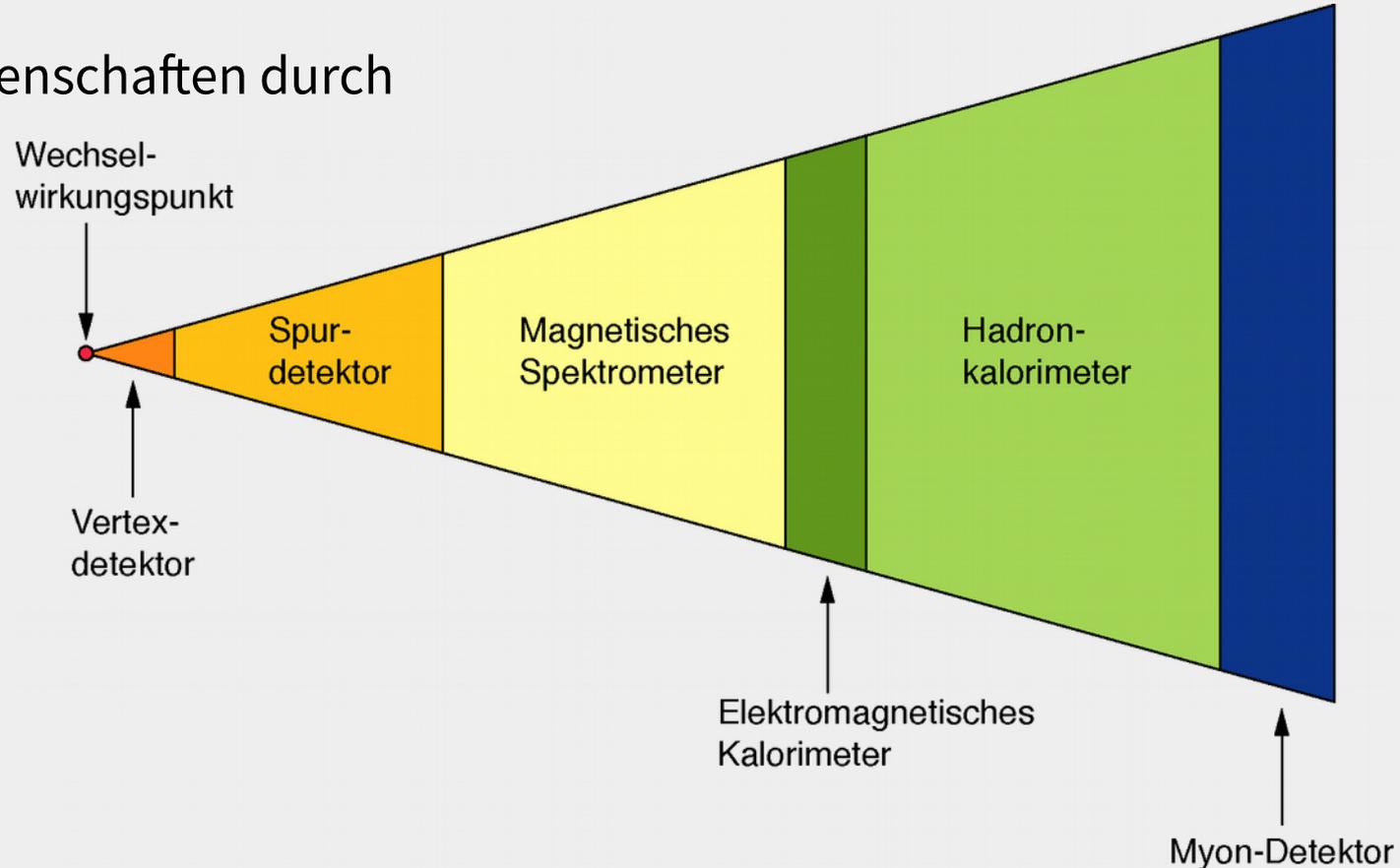
- Impuls **p** Krümmungsradius im Magnetfeld
- Geschwindigkeit **v** Flugzeitmessung, RICH, etc.
- Teilchenladung **Q** Flugbahnkrümmung im Magnetfeld
- Lebensdauer  **$\tau$**  Messung der Zerfallsstrecke
- Energie **E** Absorption in Kalorimetern
- Teilchenmasse **m** Indirekte Bestimmung z.B. aus dem Impuls und Energie oder Geschwindigkeit

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2 \quad p = \gamma m v = \frac{m v}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}}$$



# Typischer Aufbau eines Experiments

- Kombination von komplementären Nachweismethoden
- Messung einzelner Eigenschaften durch separate Detektoren
- Reihenfolge wichtig!  
Manche Messungen “destruktiv“
- Aufbau vieler Experimente sehr ähnlich



# Detektor-Begrifflichkeiten

- **Totzeit:**

*Zeitspanne unmittelbar nach dem Nachweis eines Teilchens, während der der Detektor noch nicht wieder bereit ist, ein weiteres Teilchen nachzuweisen*

- Nicht verlängerbare Totzeit: Neu eintretendes Ereignis bewirkt nichts
- Verlängerbare Totzeit: Neu eintretendes Ereignis verlängert Totzeit

- **Auflösung:**

*Erzielbare Unsicherheit auf die Messgröße*

- **Effizienz:**

*Zahl der aufgezeichneten Ereignisse geteilt durch alle eingetretenen Ereignisse*

# **Wechselwirkung von Strahlung mit Materie**

## Energieverlust und Wechselwirkungsprozesse

# Wechselwirkung mit Materie

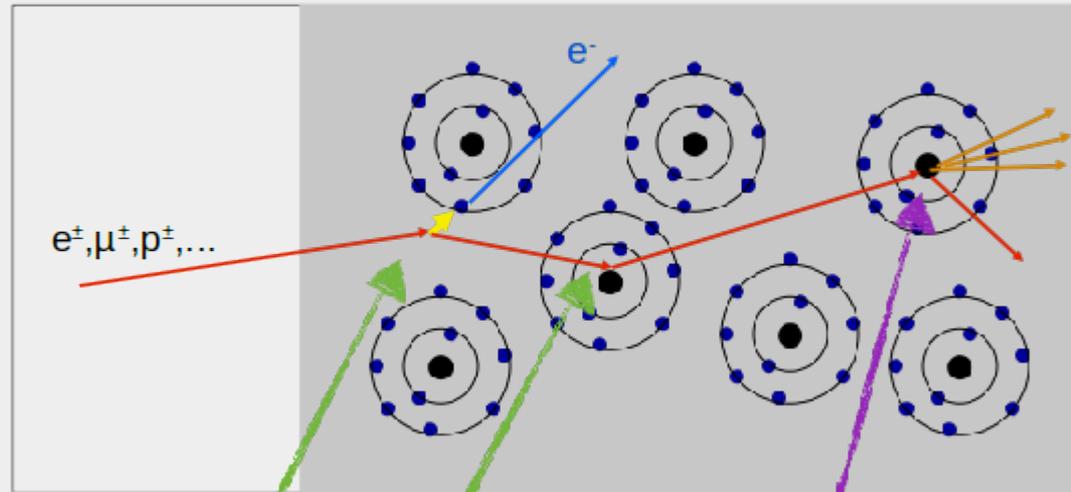
- Hochenergetische Teilchen wechselwirken über verschiedene Prozesse mit Materie, je nach
  - Teilchenart
  - Energie
  - Material
- Energieverlust des Teilchens durch Wechselwirkung
  - Übertragung der Energie an Materie oder andere Teilchen
  - In Detektoren: Energieverlust = Signal!

# Geladene Teilchen

Ionisation

Elastische Streuung  
Rückstoß am Atom /  
Kristallgitter → Phononen

Inelastische Streuung



Elektromagnetische Wechselwirkung

Elektromagnetische oder  
Schwache oder  
Starke Wechselwirkung

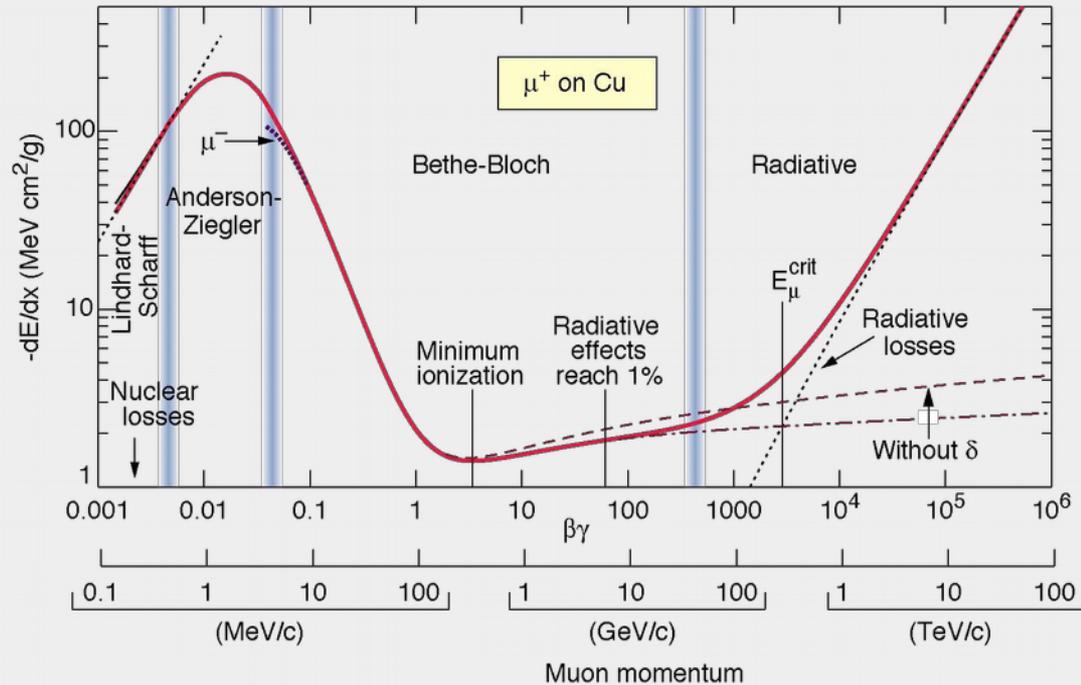
# Mittlerer Energieverlust

- geladene Teilchen wechselwirken mit den Elektronen im Material
- Für schwere geladene Teilchen: **Bethe-Bloch-Formel**

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \approx K q^2 \frac{1}{\beta^2} \frac{Z}{A} \left[ \ln \left( \frac{2 m_e c^2}{I} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right]$$

- Energieverlust hängt ab von

- Projektil-Eigenschaften: Ladung, Energie
- Target-Eigenschaften: Kernladungszahl, Ionisationsenergie, Dichte

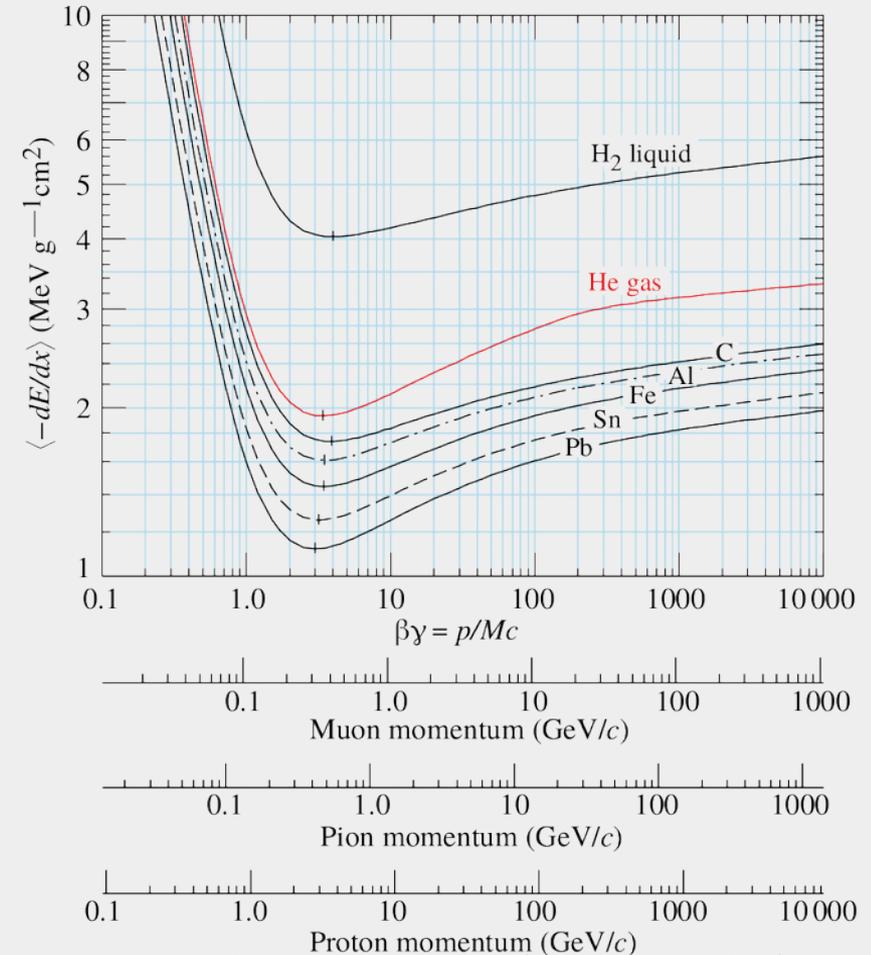


# Mittlerer Energieverlust

- Verschiedene Komponenten dominieren :
  - Bei geringen Energien:  $\sim 1/\beta^2$
  - Bei hohen Energien:  $\sim \ln \gamma$

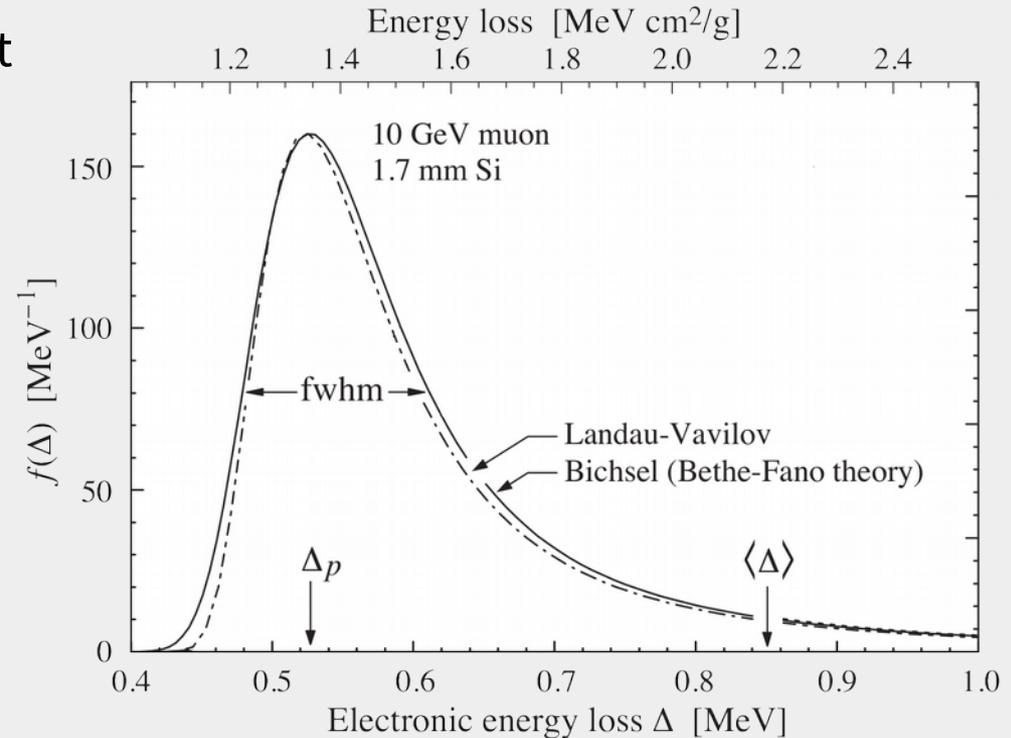
$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \approx K q^2 \frac{1}{\beta^2} \frac{Z}{A} \left[ \ln \left( \frac{2 m_e c^2}{I} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right]$$

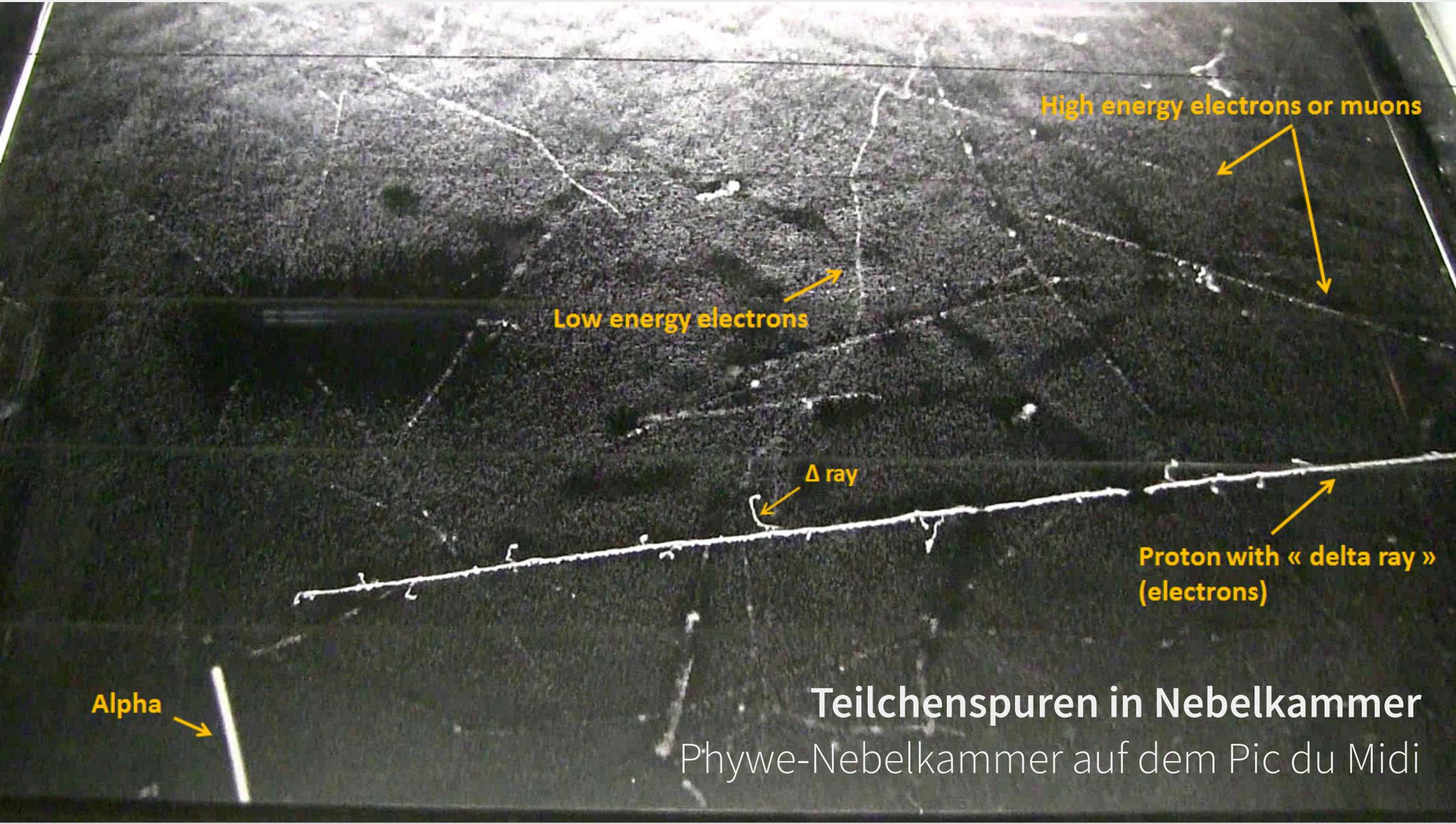
- Minimaler Energieverlust für  $\sim \beta\gamma$ 
  - MIP: Minimum Ionizing Particle
- $[dx] = g / cm^2 = cm \times g / cm^3$



# Fluktuationen im Energieverlust

- Tatsächlicher Energieverlust fluktuiert
- **Landau-Vavilov-Verteilung** mit langen Ausläufern zu hohen Energien
  - Wahrscheinlichster Wert  $\ll$  Mittelwert
- Hüllenelektronen können sehr großen Energieübertrag erfahren
  - Erzeugung von Delta-Elektronen
  - Delta-Elektronen haben genügend Energie für weitere Ionisation





High energy electrons or muons

Low energy electrons

$\Delta$  ray

Proton with « delta ray »  
(electrons)

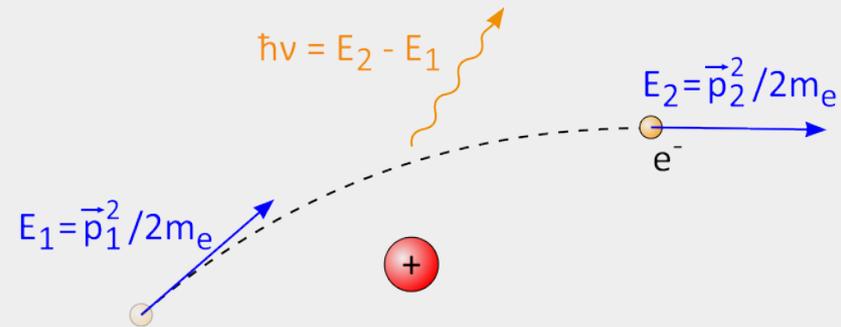
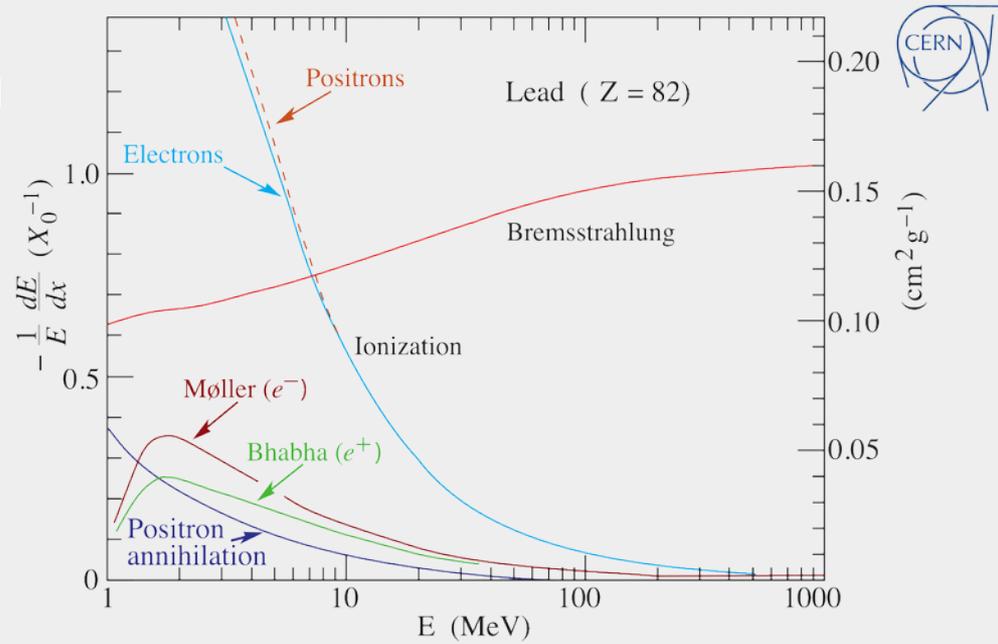
Alpha

Teilchenspuren in Nebelkammer

Phywe-Nebelkammer auf dem Pic du Midi

# Sonderfall: Elektron & Positron

- Sonderfall: geringe Masse  
 $m_e = 0.511 \text{ MeV} / c^2$   
 $m_\mu = 106 \text{ MeV} / c^2 \approx 200 m_e$
- Bei hohen Energien: Bremsstrahlung
  - Englisch: „bremstrahlung“
  - entsteht bei Impulsänderung eines geladenen Teilchens, z.B.
    - ...im Coulomb-Feld eines Kerns
    - ...im Magnetfeld: Synchrotronstrahlung
  - Hier: Teilchen werden in Materie gebremst
  - Relevant für Elektronen:  $-\frac{dE}{dx} \sim E \cdot \frac{1}{m^2}$



# Cherenkov-Strahlung

- Wird emittiert, wenn Teilchengeschwindigkeit > Lichtgeschwindigkeit

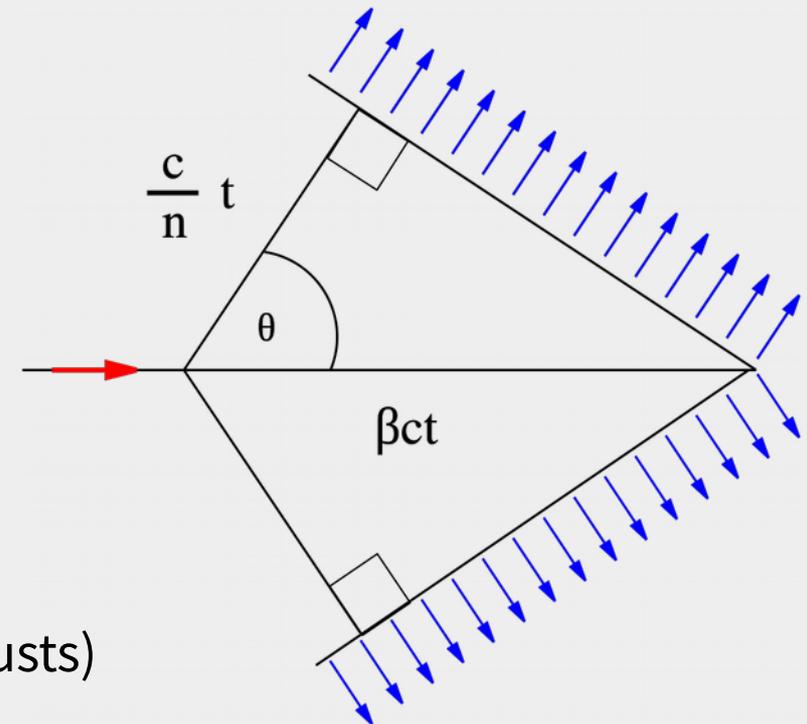
$$c_{\text{Medium}} = \frac{c_{\text{Vakuum}}}{n} < v_{\text{Teilchen}} < c_{\text{Vakuum}}$$

n: Brechungsindex des Mediums

- Elektromagnetische Schockwelle mit konischer Form wird abgestrahlt unter Winkel  $\theta$ :

$$\cos(\theta) = \frac{1}{\beta n}, \quad \beta = \frac{v}{c}$$

- Geringer Energieverlust (ca. 1% des totalen Verlusts)



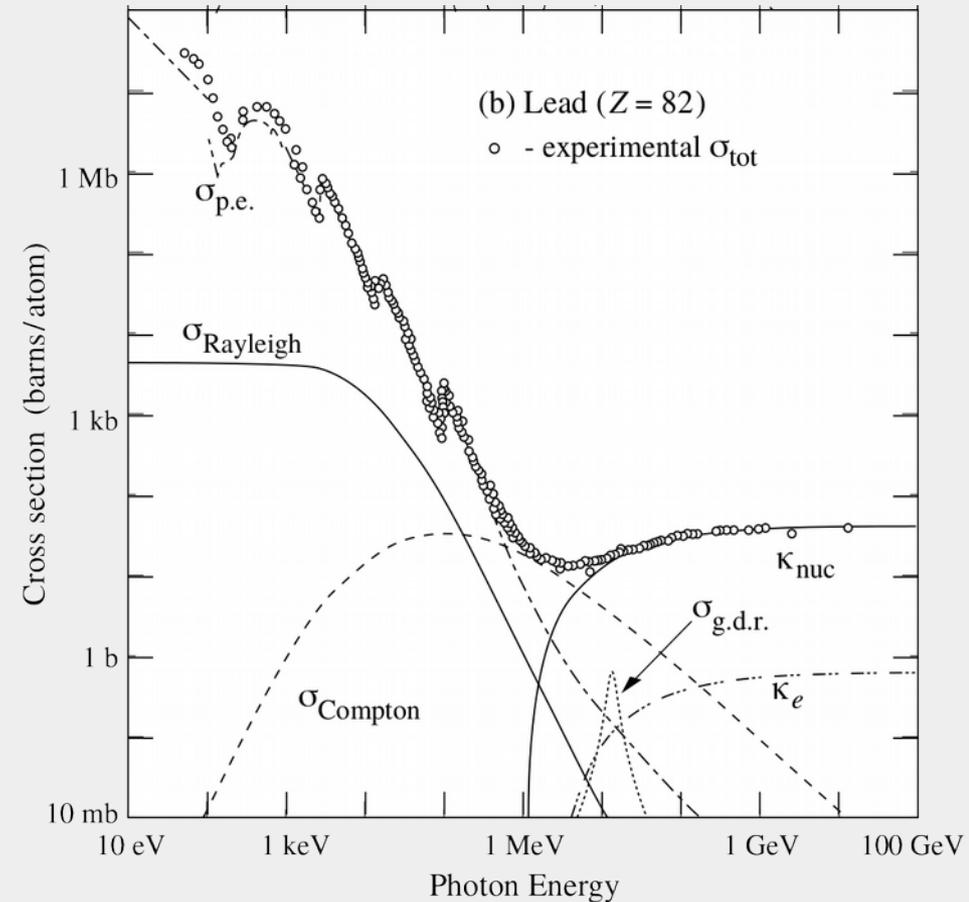
# Cherenkov-Strahlung von Kernreaktor

Advanced Test Reactor, INL



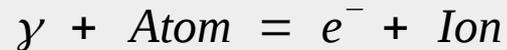
# Photonen

- Elektromagnetische Wechselwirkung
- Unterschiedliche Prozesse dominant, je nach Photon-Energie:
  - Photoeffekt
  - Rayleigh-Streuung
  - Compton-Effekt
  - Paarbildung

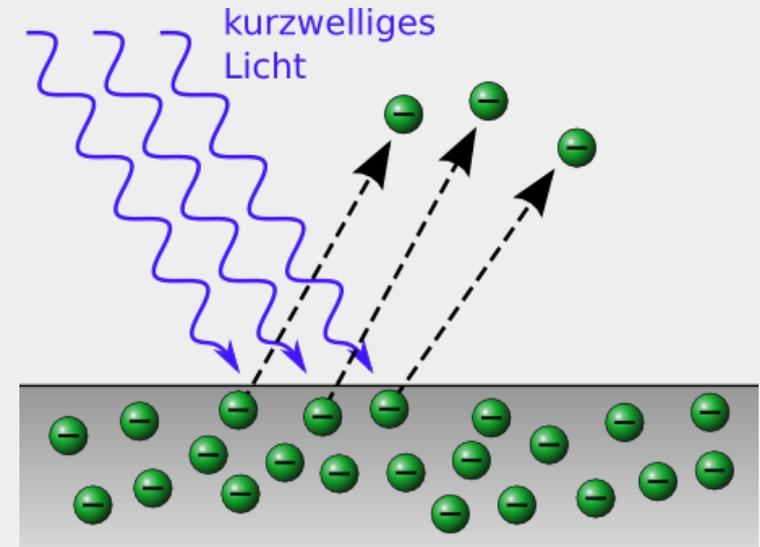


# Photoelektrischer Effekt

- Theoretische Beschreibung des Photoeffekts: **Nobelpreis 1921 für Albert Einstein**
- Photon wird von Elektron der Atomhülle absorbiert
- Übertragene Energie setzt das Elektron frei



- Prozess nur im Feld des Atomkerns möglich:
  - Impulserhaltung
  - Kern fängt Rückstoß auf
- Wirkungsquerschnitt des Fotoeffekts zeigt Schalenstruktur des Atoms

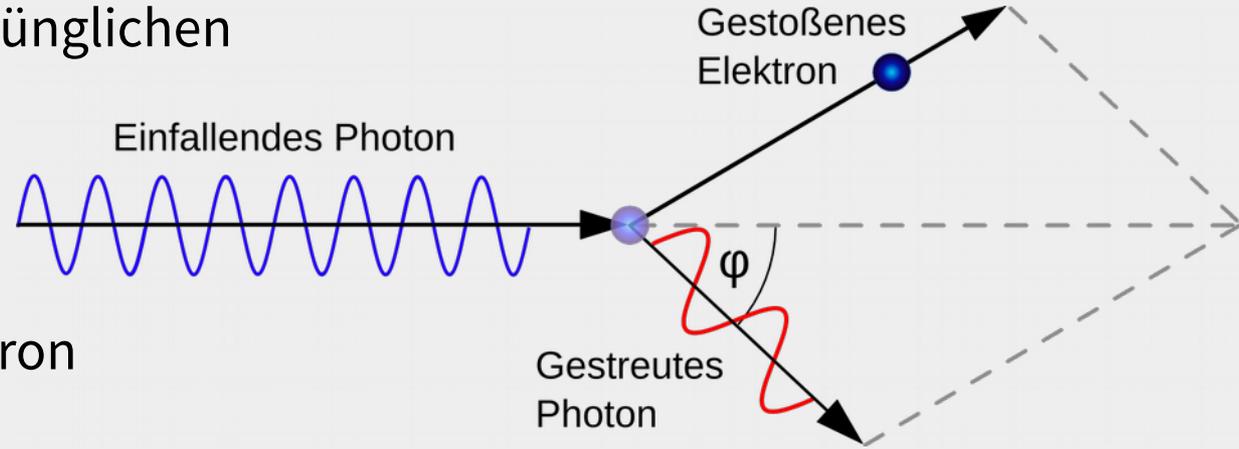


# Compton-Effekt

- Beschreibt Streuung eines Photons an einem “quasi-freien” Elektron



- Photon wird von seiner ursprünglichen Bahn abgelenkt
- Wellenlänge des Photons ändert sich durch Energieübertrag an das Elektron



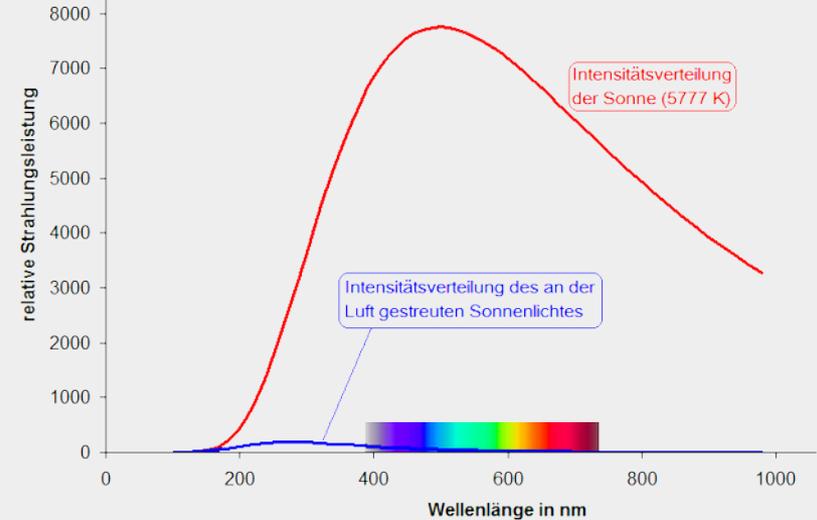
# Photonen: Thomson/Rayleigh-Streuung

- Elastische Streuungen: kaum Energieübertrag auf Medium
- Thomson-Streuung:  
Photon-Streuung an freiem Elektron
- Rayleigh-Streuung:  
Photon-Streuung an gesamtem Atom

- Streuquerschnitt  $\sigma_{\text{Rayleigh}} \sim f^4$

- Grund für Blau- / Rotfärbung des Himmels  
in Abhängigkeit vom Zenitwinkel

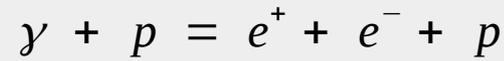
- Mittag: kurzer Weg durch Atmosphäre, kaum blaues Licht gestreut
- Morgen-Abend: Langer Weg durch Atmosphäre, viel blaues Licht gestreut



$$\frac{\sigma_{\text{blau}}}{\sigma_{\text{rot}}} = \frac{1/\lambda_{\text{blau}}^4}{1/\lambda_{\text{rot}}^4} = \left( \frac{650 \text{ nm}}{450 \text{ nm}} \right)^4 \approx 4.4$$

# Photonen: Paarbildung

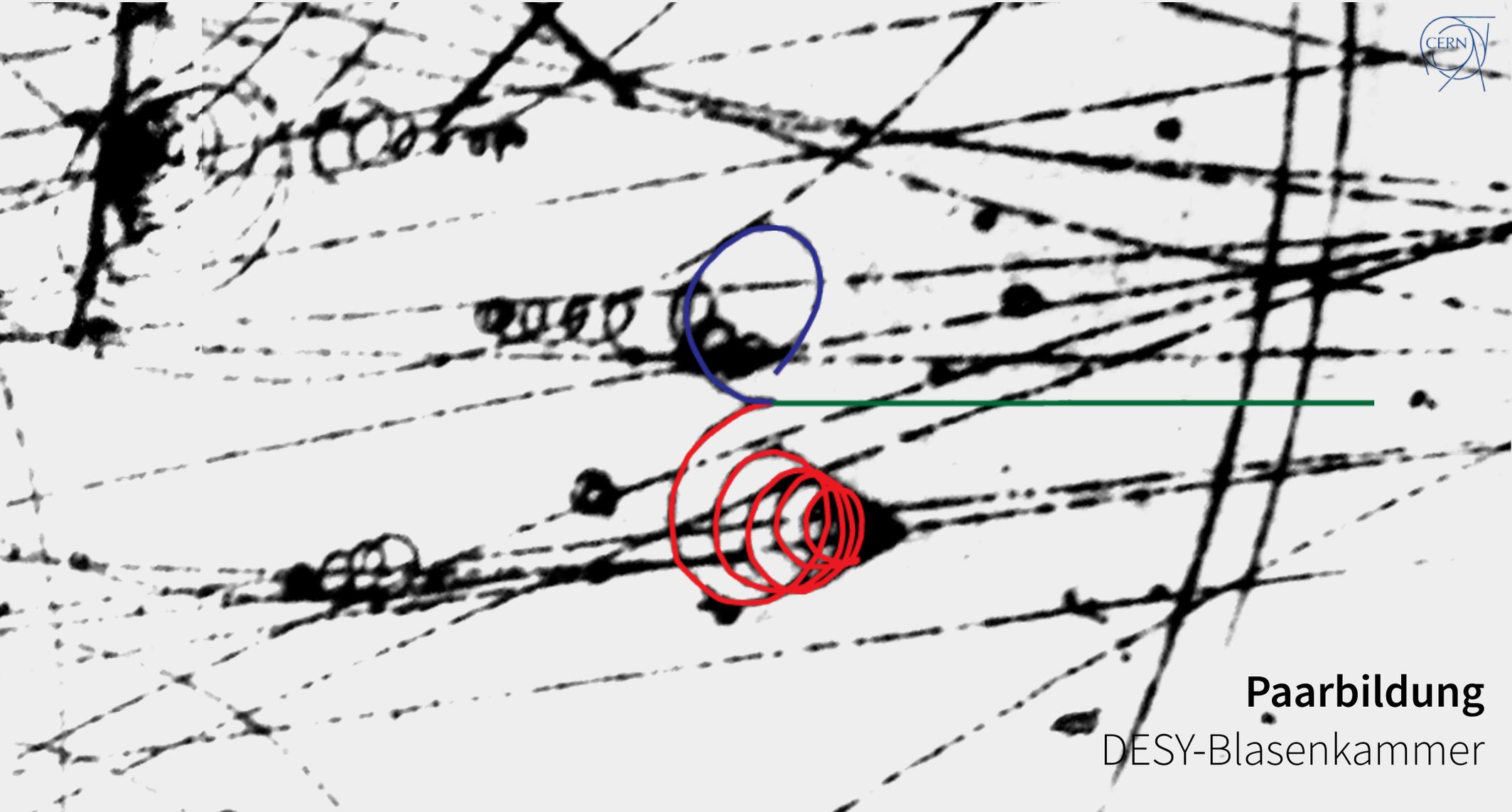
- Paarbildung ist die Produktion eines Elektron-Positron-Paares durch ein Photon
- Paarbildung im Feld eines Stoßpartners, der den Rückstoß aufnimmt (Atomkern, aber auch Hüllenelektron)



- Photon muss mindestens Ruhemasse des  $e^+e^-$ -Paares plus Rückstoßenergie aufbringen:

$$E_\gamma \geq 2m_e c^2 \left(1 + \frac{m_e}{M}\right)$$

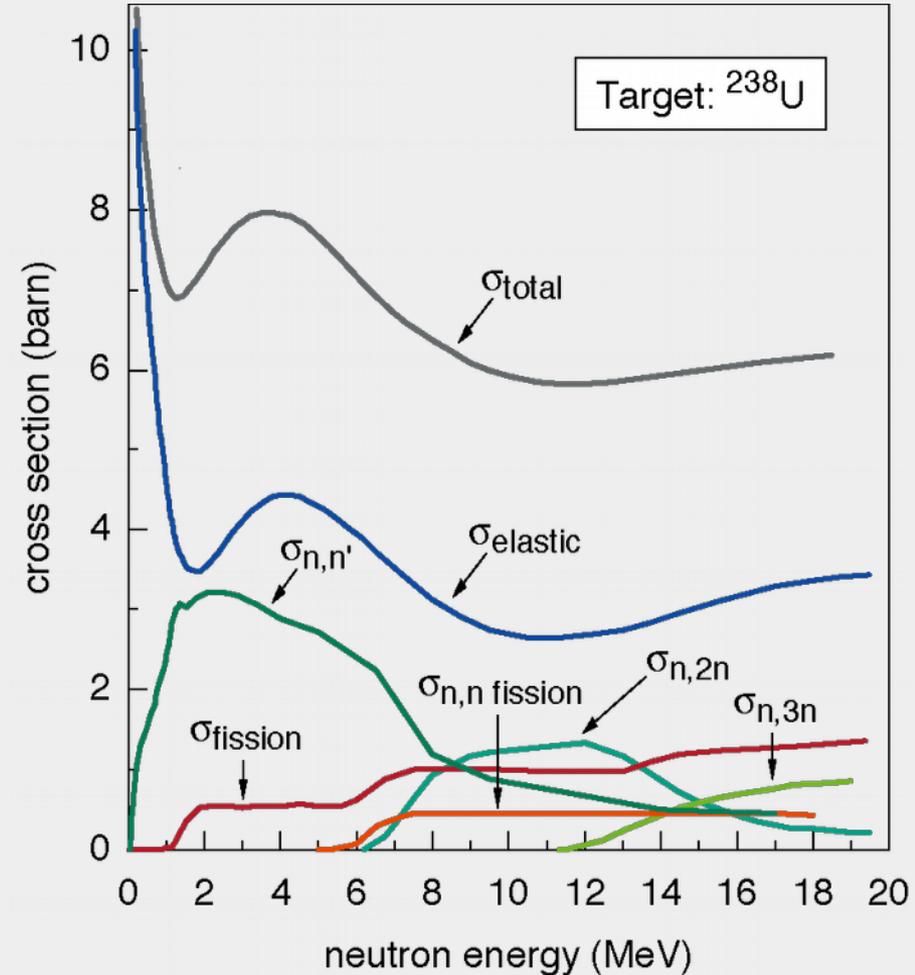
- Rückstoßenergie kann oft vernachlässigt werden, e.g. Ge-Detektor:  $\frac{m_e}{M} \approx 7.6 \cdot 10^{-6}$



# Paarbildung DESY-Blasenkammer

# Hadronische Wechselwirkung

- Interaktionen eines Hadrons mit Atomkern
- Basiert auf der starken Wechselwirkung
  - Geringe Reichweite
  - Geringe Wahrscheinlichkeit für hadronische Reaktionen
  - Neutronen können nur stark wechselwirken: sehr durchdringend
- Viele mögliche Prozesse (energieabhängig)
  - Elastische, inelastische Streuung; Neutroneneinfang; Reaktionen mit Abstrahlung geladener Teilchen; Kernspaltung



# Wechselwirkung von Neutrinos

- Neutrinos unterliegen ausschließlich der schwachen Wechselwirkung
- Mögliche Interaktionen



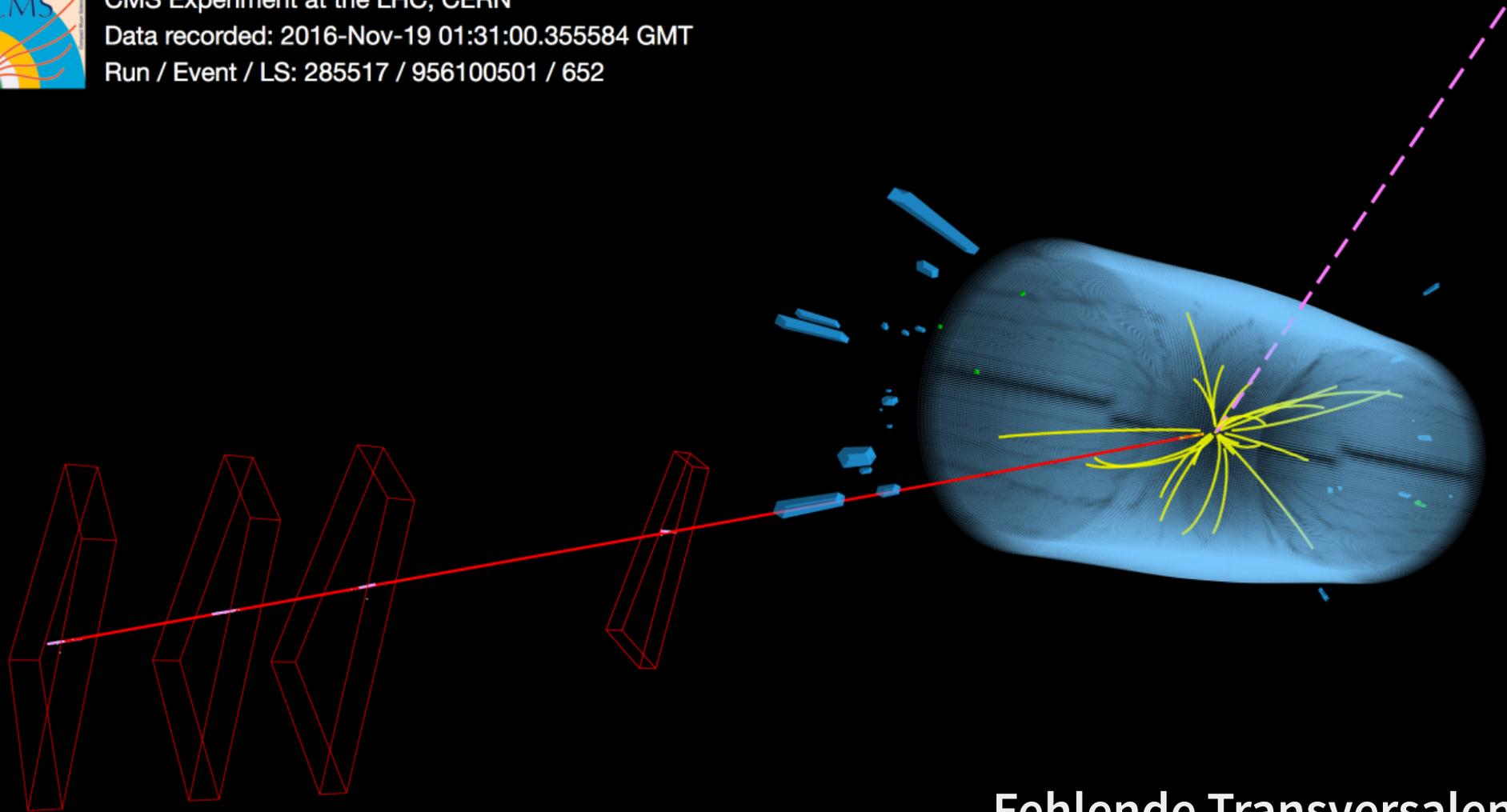
- Neutrinowechselwirkungen haben sehr geringer Wirkungsquerschnitt
- Nachweis von Neutrinos benötigt
  - sehr großen Detektor und hohe Neutrinoflüsse oder
  - hermetischen Detektor für Messung fehlender Energie



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2016-Nov-19 01:31:00.355584 GMT

Run / Event / LS: 285517 / 956100501 / 652



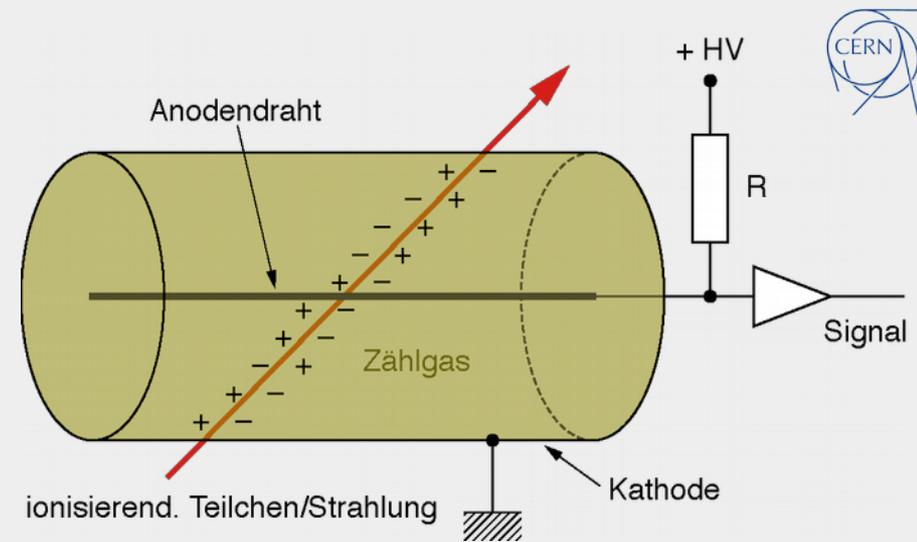
**Fehlende Transversalenergie**  
Messung von Neutrinos

# Teilchendetektoren

## Historischer Überblick

# Geiger-Müller-Zählrohr

- „Klick“ = Teilchendurchgang
- „Viel Klick“ = Viele Teilchen
- „Sehr viel Klick“ = Schnell weg...

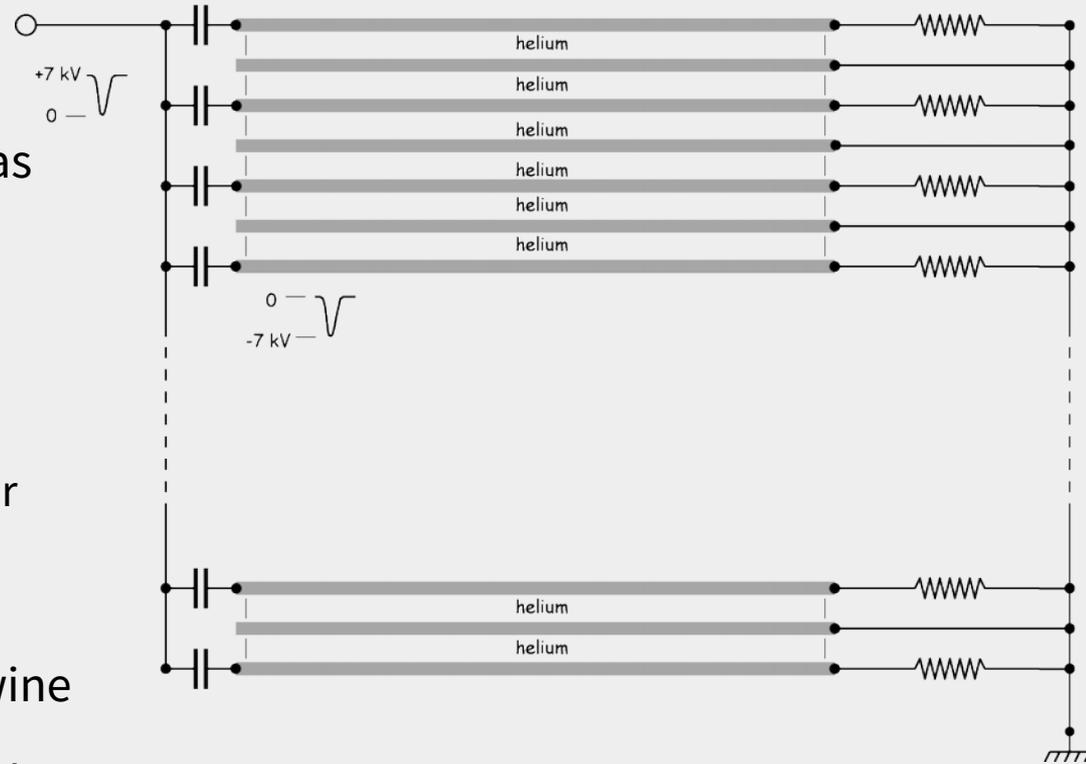


- Detektor gefüllt mit Edelgas
  - Geladene Teilchen ionisieren Edelgas-Atome
  - Hohe Spannung zwischen Elektroden verstärkt Signal
- Signal: Strompuls an Lautsprecher: Klick



# Funkenkammer

- „Viele Geigerzähler“
- Durchsichtige Kammer, gefüllt mit Edelgas und vielen parallelen Platten
  - Spannung ( $\sim$  kV) zwischen Platten
  - Teilchen ionisieren Edelgasatome
  - Kleine Funken entlang der Teilchenspur
- Analyse durch Fotos oder Mikrofone
- Relativ große Totzeit: Abklingzeit der Lawine
- Eingesetzt während der 1930er-1960er Jahre
- **Funkenkammer in Aktion: CERN Globe**

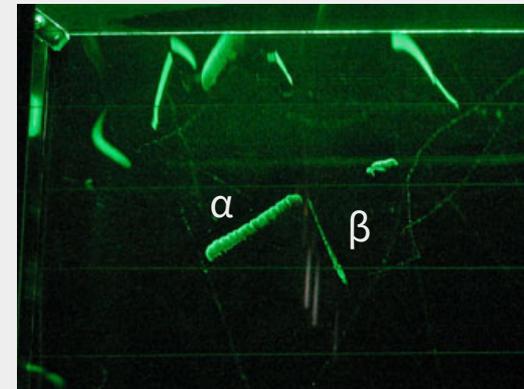
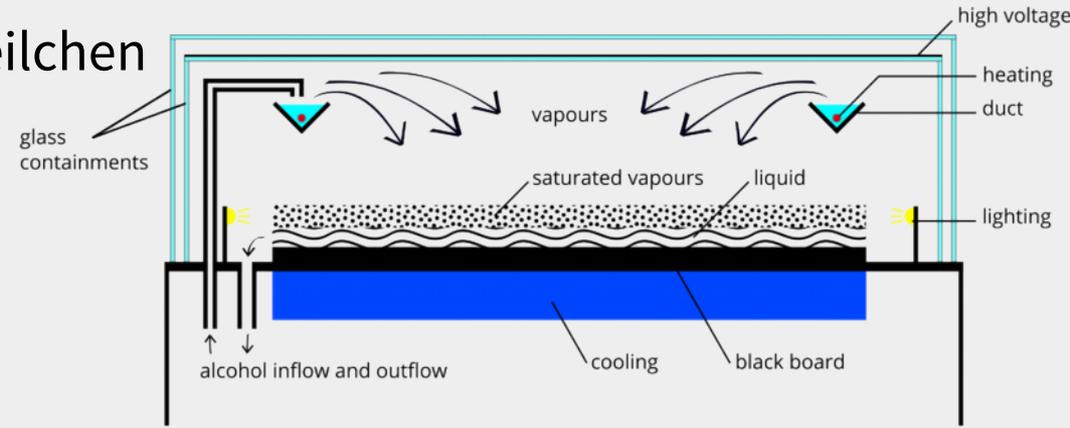




**Funkenkammer**  
CERN Globe Exhibition

# Nebelkammer

- Optischer Nachweis von geladenen Teilchen
  - Durchsichtige Kammer mit übersättigtem Luft-Alkohol-Gemisch
  - Energiereiches, geladenes Teilchen erzeugt durch Stoßionisation Ionen
  - Ionen agieren als Kondensationskeime, Tröpfchenbildung im Gasgemisch
- Art der Spuren lassen sich (manchmal) Teilchen zuordnen
- **Nobelpreis 1927 für Charles Thomson Rees Wilson**
- **Heute, 14:00: Nebelkammer Workshop**

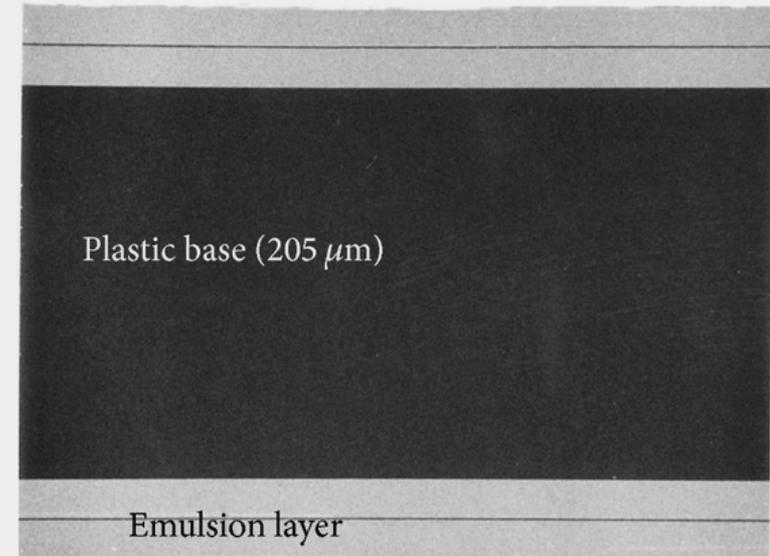




**Detailaufnahme von Tröpfchen**  
Nebelkammer mit Isopropylalkohol

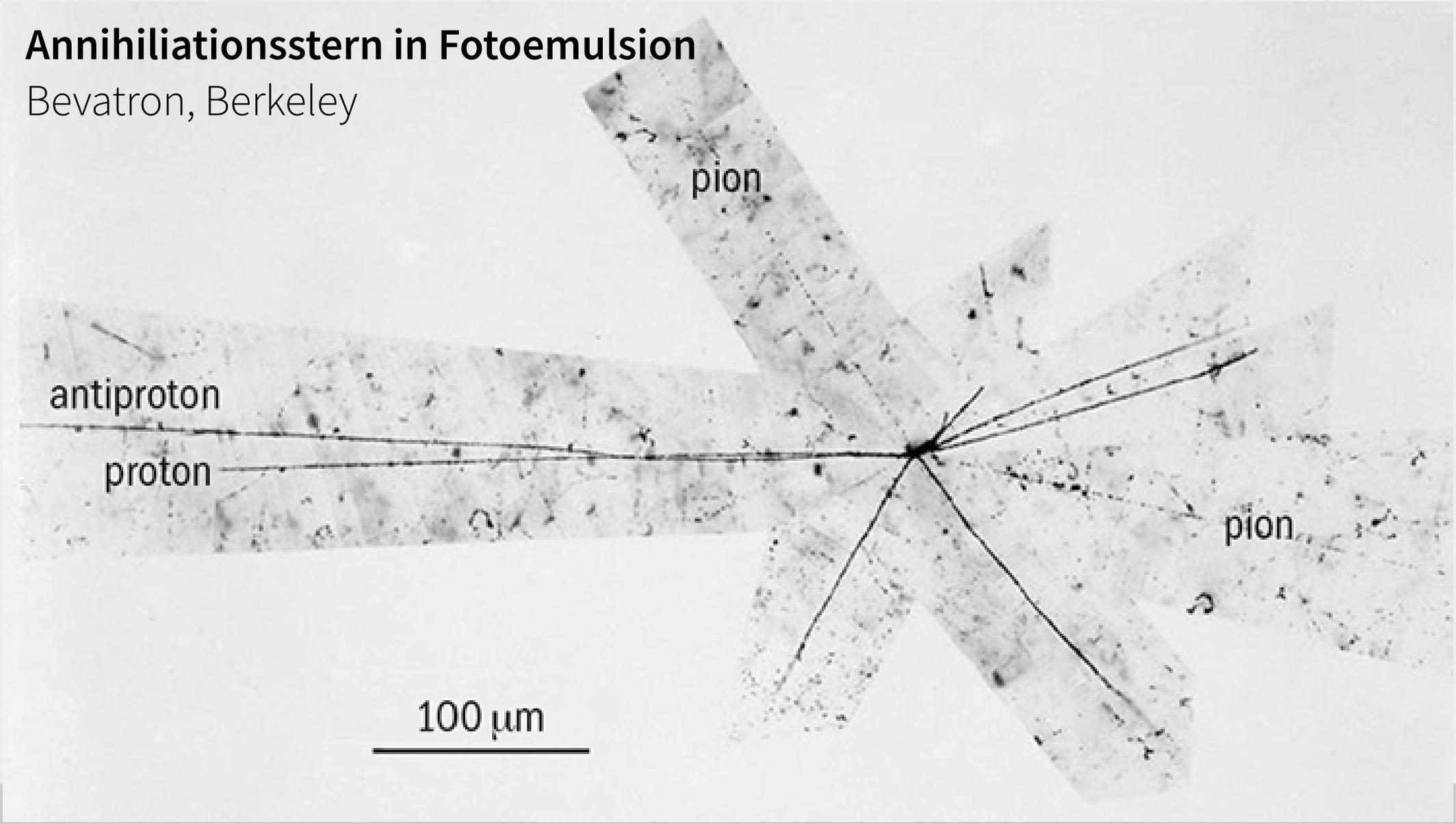
# Photoemulsion

- Fotoplatte mit dicker empfindlicher Schicht und sehr gleichmäßiger Korngröße
  - Ionisierende Strahlung hinterlässt Spuren
  - Entwicklung der Platte
  - Spuren der Teilchen (geschwärzt durch Silber) sichtbar mit Mikroskop
- **Nobelpreis 1950 für Cecil Powell**
- OPERA Experiment in Gran Sasso
  - Photoemulsions-Platten zur Teilchenrekonstruktion
  - AgBr-Emulsion, Kooperation mit Fuji Film: 9 Millionen Filme, je ca. 10 x 12 cm

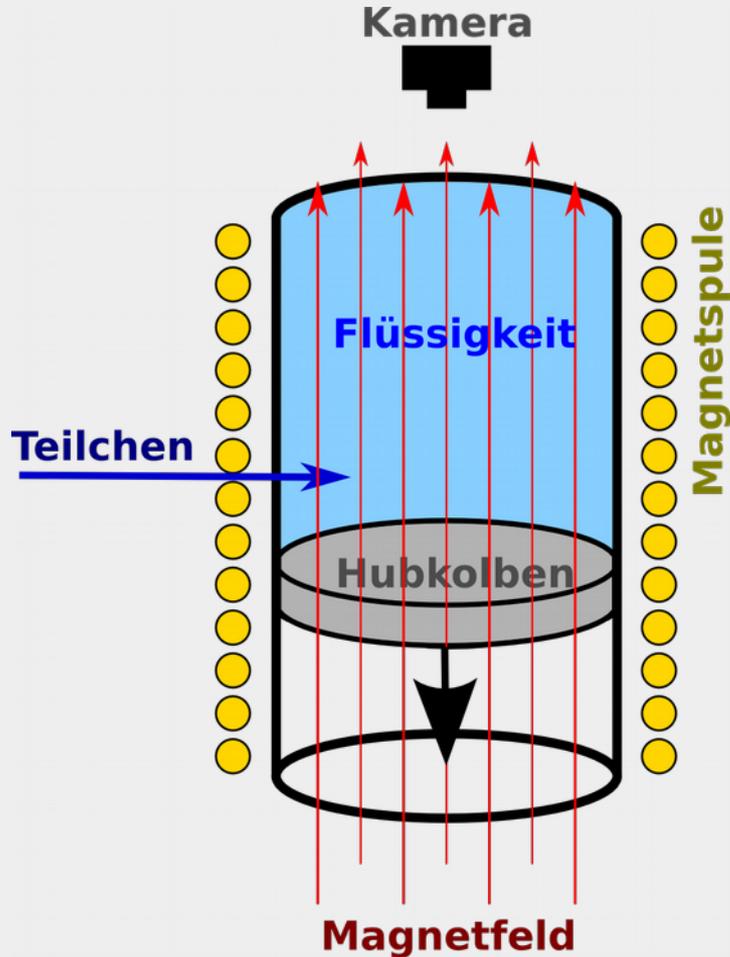


# Annihilationsstern in Fotoemulsion

Bevatron, Berkeley

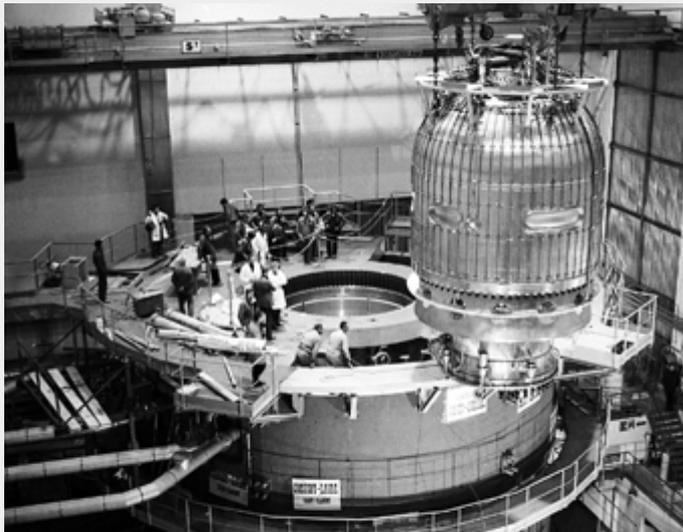


# Blasenkammer



- Optisch durchsichtige Kammer gefüllt z.B. mit flüssigem Wasserstoff
  - Temperatur der Flüssigkeit nahe des Siedepunktes
  - Verringerung des Kammerdrucks mit Kolben
  - Temperatur der Flüssigkeit liegt nun oberhalb des Siedepunktes
  - Geladene Teilchen erzeugen Ionen entlang Spur
  - Ionen dienen als Keime für Gasblasen
- Analyse von Fotos der Spuren
- **Nobelpreis 1960 für Donald A. Glaser**

# Blasenkammern @ CERN



- Wichtigster Teilchendetektor-Typ in den 1970er
- Teilchenquelle: Proton-Synchrotron
- Gargamelle – 1970–1978
  - 4.8 m x 1.88 m, 12 000 l
  - Erstmaliger Nachweis des Z-Bosons
- BEBC – 1971–1984
  - Big European Bubble Chamber
  - 3.5 T Magnetfeld von supraleitenden Spulen
  - Entdeckung des D-Mesons
- Zu besichtigen hinter „Microcosm“

# Blasenkammer-Aufnahme

Big European Bubble Chamber @ CERN



# Problematik früher Teilchendetektoren

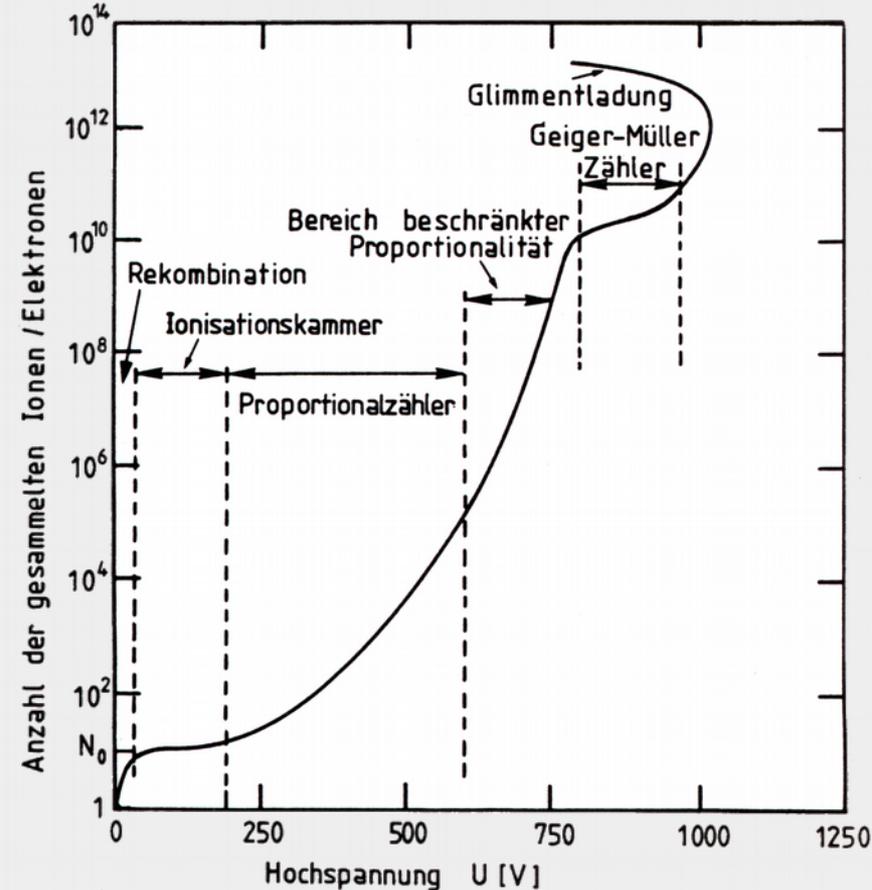
- Viele basierend auf fotografischen Aufnahmen
  - Datenauswertung aufwendig und nur von Hand möglich
  - Limitierung der Datenmenge
- Lange Detektor-Totzeiten
  - Keine weitere Messung möglich, bis Gas-Lawine abgeklungen/Bläschen verschwunden sind
  - Nur geringe Teilchenraten möglich
- Nur wenig Information in Messung
  - Aussage über Teilchenort (& -Impuls), aber keine Energie/Zeit-Messung

# Gasdetektoren

Primär- & Sekundärionisation von Gasatomen

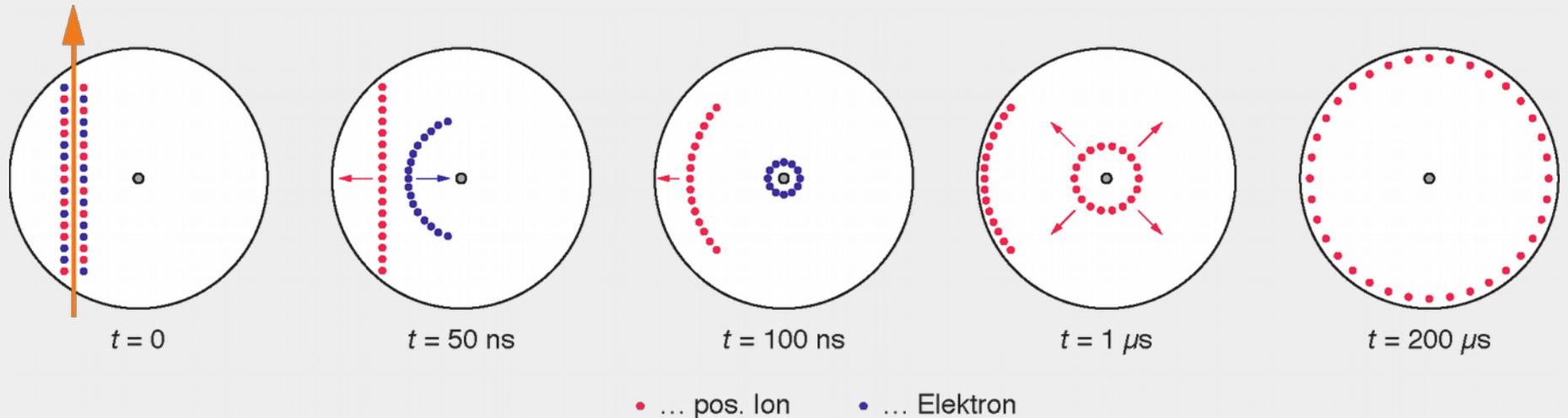
# Gasdetektoren: Funktionsprinzip

- **Primärsignal:** geladenes Teilchen erzeugt durch Ionisation Elektron-Ion-Paare
  - Edelgase: relativ geringe Ionisationsenergie
  - Mittlere Energie zur Erzeugung eines Paares  $\sim 30$  eV
  - Anzahl proportional zu deponierter Energie
- **Verstärkung:** verschiedene Arbeitsbereiche je nach angelegte Spannung
  - Mittlere Spannungen: proportionale Verstärkung
  - Hohen Spannungen: Lawinenbildung durch Sekundärionisationen

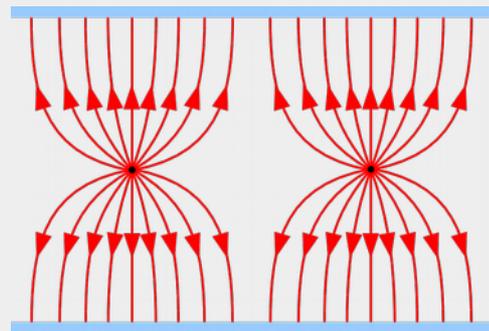
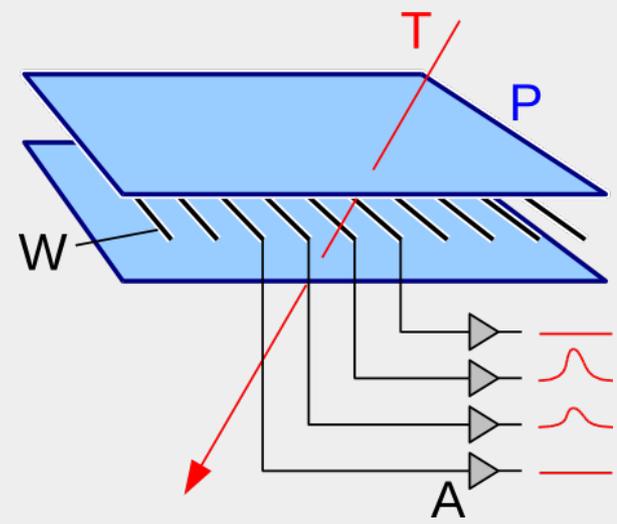


# Proportional-Zählrohr

- Sehr ähnlich zum Geigerzähler: Anode in Form von dünnem Draht
- Hohes Feld in Drahtnähe führt zu Elektronenvervielfachung / Signalverstärkung
- Wahl der Spannung: Proportionalbereich
  - Ausgangssignal proportional zu ursprünglicher Zahl von Ionisationen



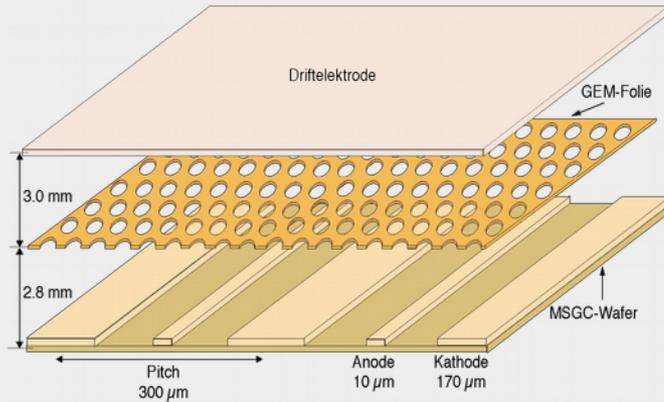
# Vieldraht-Proportionalkammern



- Englisch: Multi Wire Proportional Chamber, MWPC
- Wie ebene Lage von vielen Proportionalzählrohren ohne trennende Zwischenwände
- Drähte im Abstand von wenigen Millimetern
  - Gute Ortsauflösung eines durchquerenden Teilchens
  - Große Flächen möglich
  - Elektronische Auslese
- Hohe Raten möglich: 1000 Teilchen/s  
zum Vergleich, Blaskammer: 1-2 Teilchen/s
- **Nobelpreis 1992 für Georges Charpak**

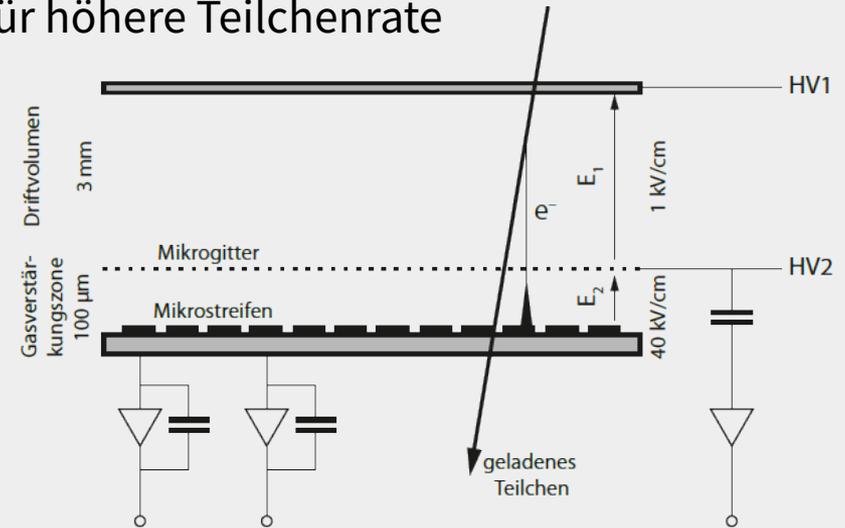
# Micropattern-Gas-Detektoren

- Ersetzen der fragilen Drähte durch Mikrostrukturen
- Potentiell bessere Ortsauflösung und anwendbar für höhere Teilchenrate



## Gas-Elektronenverstärker (GEM)

- Perforierte, metallisierte Kapton-Folie, Hochspannung zwischen Elektroden
- Starkes Dipol-Feld in Perforationslöchern: Gasverstärkung

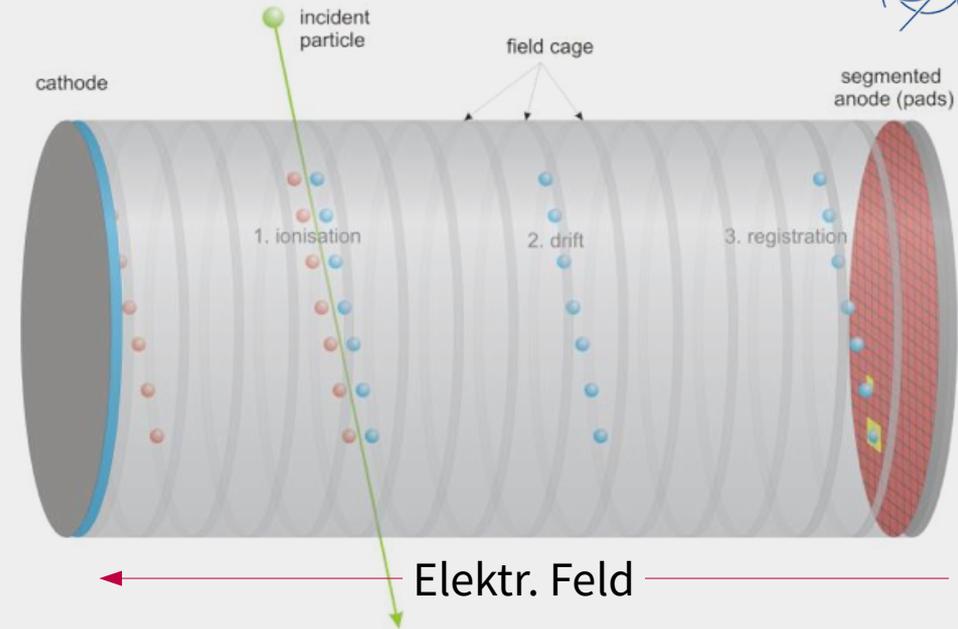


## Micro-Mesh Gas Detectors (Micromegas)

- Metallisches Mikrogitter
- Elektron-Lawinenentwicklung in Nähe des Gitters: Gasverstärkung

# Zeitprojektionskammern (TPC)

- Großes Gasedetektor-System
- Ionisation entlang der Teilchenspur
  - Elektronen und Ionen driften im E-Feld
  - Segmentierte Anode: 2D-Information
  - Messung der Driftzeit: 3D-Information
- Auslese an Anodenseite z.B. über Vieldraht-Proportionalkammer, GEMs, ...





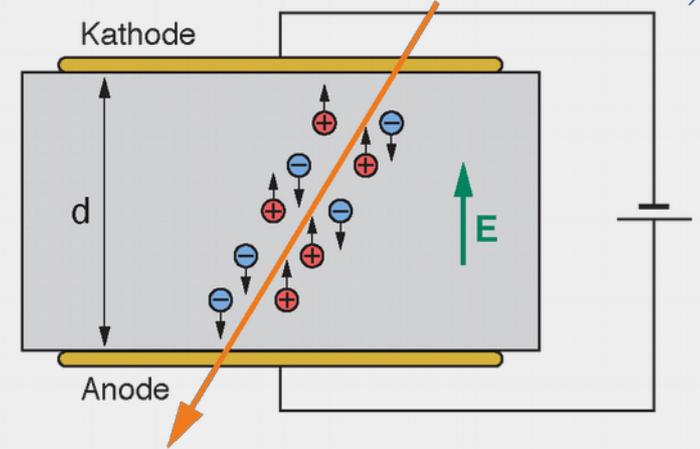
Zeitprojektionskammer  
ALICE Experiment @ LHC

# Halbleiterdetektoren

Über die Bandlücke ins Leitungsband

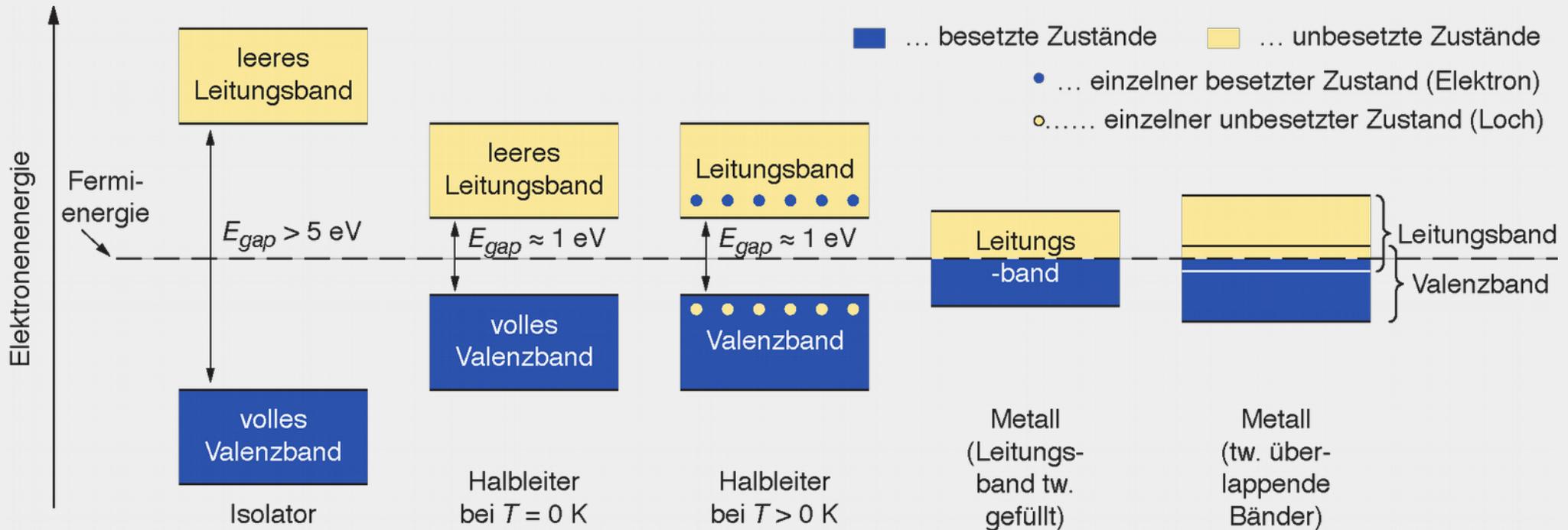
# Detektionsprinzip

- Festkörperdetektor
  - Viele höhere Dichte als Gas-Detektoren
  - Hoher Energieverlust auf relativ kurzer Strecke
- Funktionsprinzip analog zu Gasdetektoren
  - „Ionisation“ zur Erzeugung von freien Ladungsträgern
  - Drift durch elektrisches Feld
  - Detektion als elektrisches Signal an Elektroden
- Halbleiter:
  - Silizium, Diamant, Germanium, GaAs, CdTe, ...



# Bändermodell: Isolator – Halbleiter – Leiter

- Im Kristallgitter verschimmen diskrete Energieniveaus zu Energiebändern
- Position des Valenz- und Leitungsbandes entscheidet über Leitungseigenschaft:

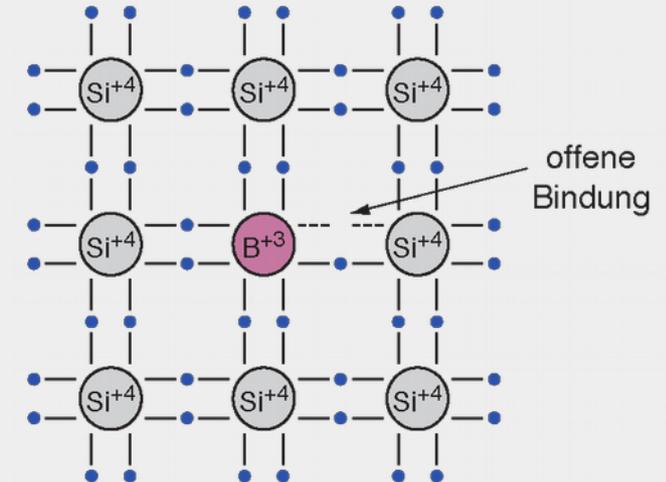
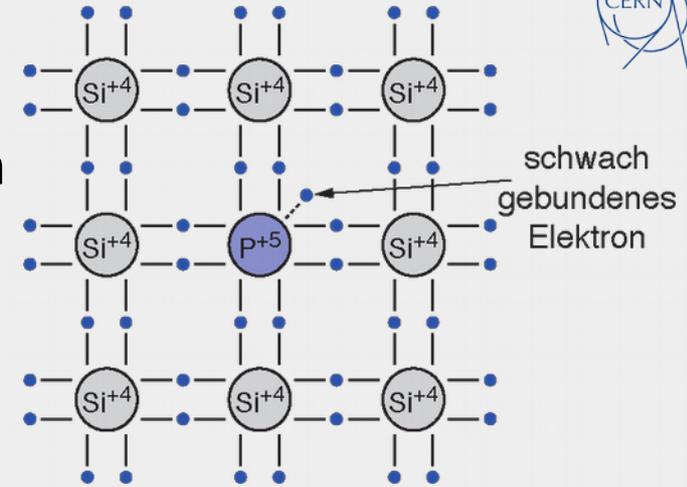


# Wahl des Halbleiters

- Halbleiterdetektoren in der Hochenergiephysik: fast ausschließlich **Silizium**
  - Industriell verfügbar über IT-Branche (Verfügbarkeit, Weiterentwicklung)
  - Bandlücke groß genug  $E_G = 1.12 \text{ eV}$  für Betrieb bei Raumtemperatur
  - Mittlere Energie zur Elektron-Loch-Erzeugung:  **$E = 3.64 \text{ eV}$**  (Gasdetektor: x 10)
- Germanium:  $E_G = 0.74 \text{ eV}$ 
  - Bei Raumtemperatur zu viele freie Ladungsträger, benötigt Kühlung
  - Bessere Energieauflösung, wird oft in Spektrometern eingesetzt
- Diamant:  $E_G = 5.4 \text{ eV}$ , wird manchmal für besondere Strahlenhärte eingesetzt
- GaAs, CdTe, CYT... : Hauptsächlich eingesetzt in Röntgenspektroskopie

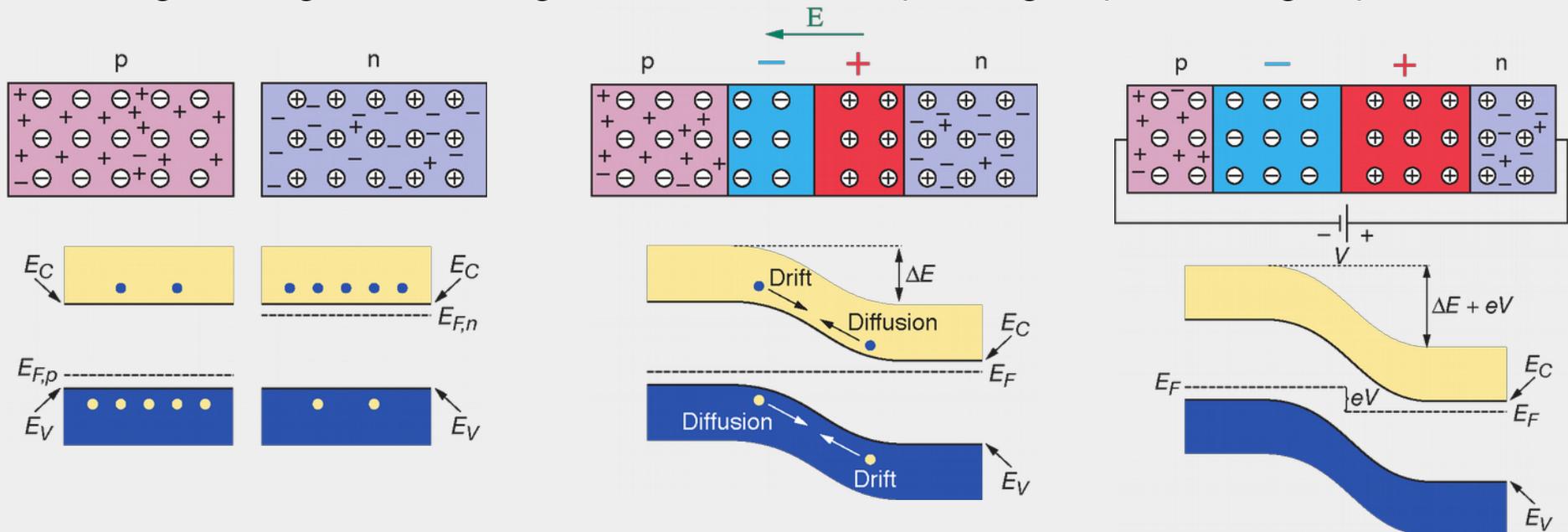
# Dotierung von Halbleitern

- Anpassung der Materialeigenschaften durch Dotieren (Englisch: Doping)
- Silizium: IV. Gruppe, kristallin, bei  $T = 0\text{ K}$  keine freien Ladungsträger
- Ersetzen einiger Siliziumatome durch z.B.
  - V. Gruppe: Phosphor
  - III. Gruppe: Bor
- Zusätzliche Energieniveaus in der Bandlücke
- Zusätzliche Elektronen ( $n$ -Typ) bzw. Löcher (Defektelektronen,  $p$ -Typ)



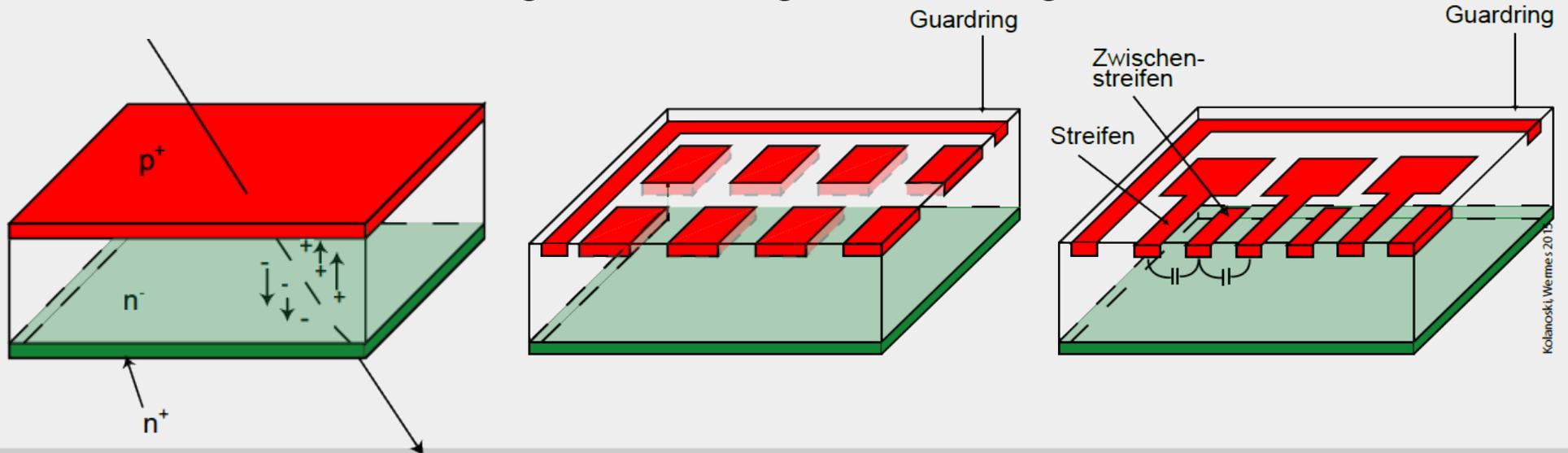
# Der $pn$ -Übergang

- Freie Ladungsträger: Intrinsisches Silizium  $O(10^9) \leftrightarrow$  Signal  $O(10^4)$
- Kombination von  $p$ - und  $n$ -dotiertem Silizium: Rekombination, Verarmungszone
  - Ladungsungleichgewicht erzeugt elektrisches Feld in Verarmungszone
  - Vergrößerung der Verarmungszone durch externer Spannung in Sperrrichtung: Depletion



# Segmentierung der Elektroden

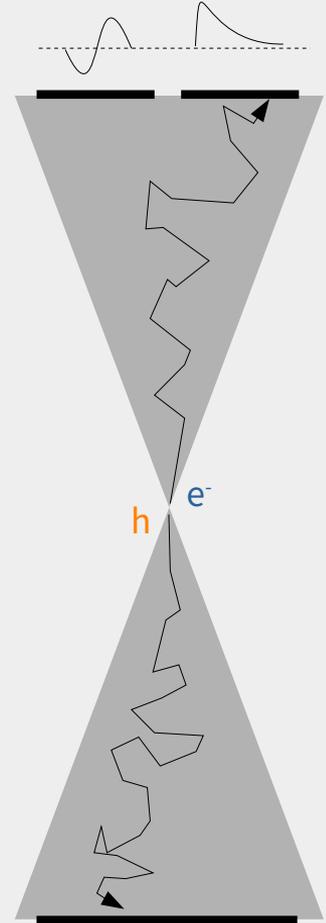
- Ionisierendes Teilchen regt beim Durchgang e- aus Valenzband ins Leitungsband: Erzeugung von e/h-Paaren
- e/h-Paare driften im elektrischen Feld zu den Elektroden, induzieren Signal
- Segmentierung der Elektrode: sehr hohe Ortsauflösungen  
Kleine Strukturen von wenigen 10  $\mu\text{m}$  möglich; Erfahrung aus Elektronikindustrie



# Signalbildung in Silizium-Detektoren

- Induzierter Strom durch Bewegung der Ladungsträger
  - Diffusion
    - Temperatur-bedingte, zufällige Bewegung, nicht gerichtet
    - Langsame Bewegung
  - Drift
    - Gerichtete Bewegung durch elektrisches Feld
    - Nur in depletierten Bereichen
    - Schnelle Bewegung
- Gesamtbewegung: Überlagerung
- Beste Ortsauflösung:  
Interpolation des Signals zwischen zwei Elektroden:

$$x = \frac{\sum_i Q_i x_i}{\sum_i Q_i}$$



# Streifendetektoren

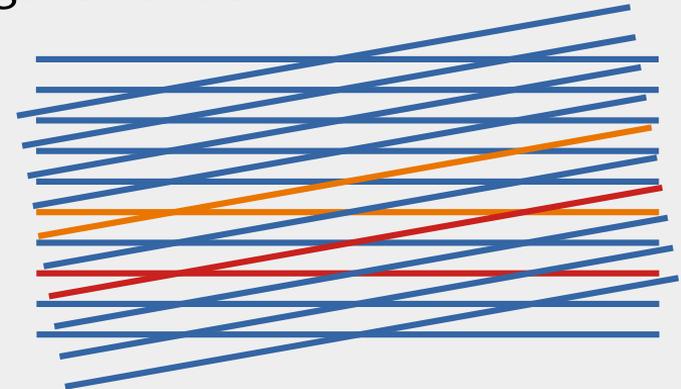
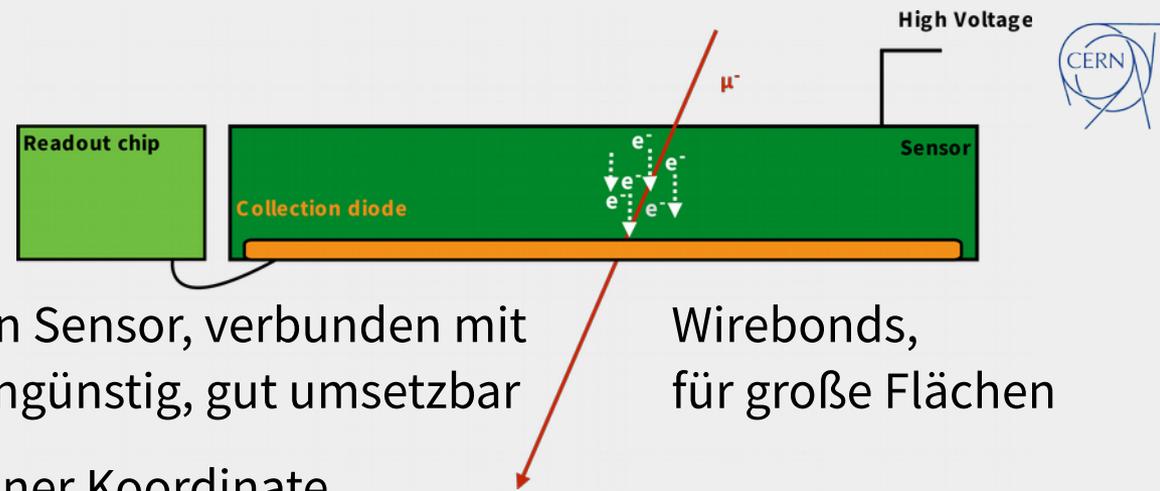
- Streifen als Ausleseelektroden

- Vorteil: Ausleseelektronik neben Sensor, verbunden mit Relativ einfach zu bauen, kostengünstig, gut umsetzbar
- Nachteil: Ortsmessung nur in einer Koordinate

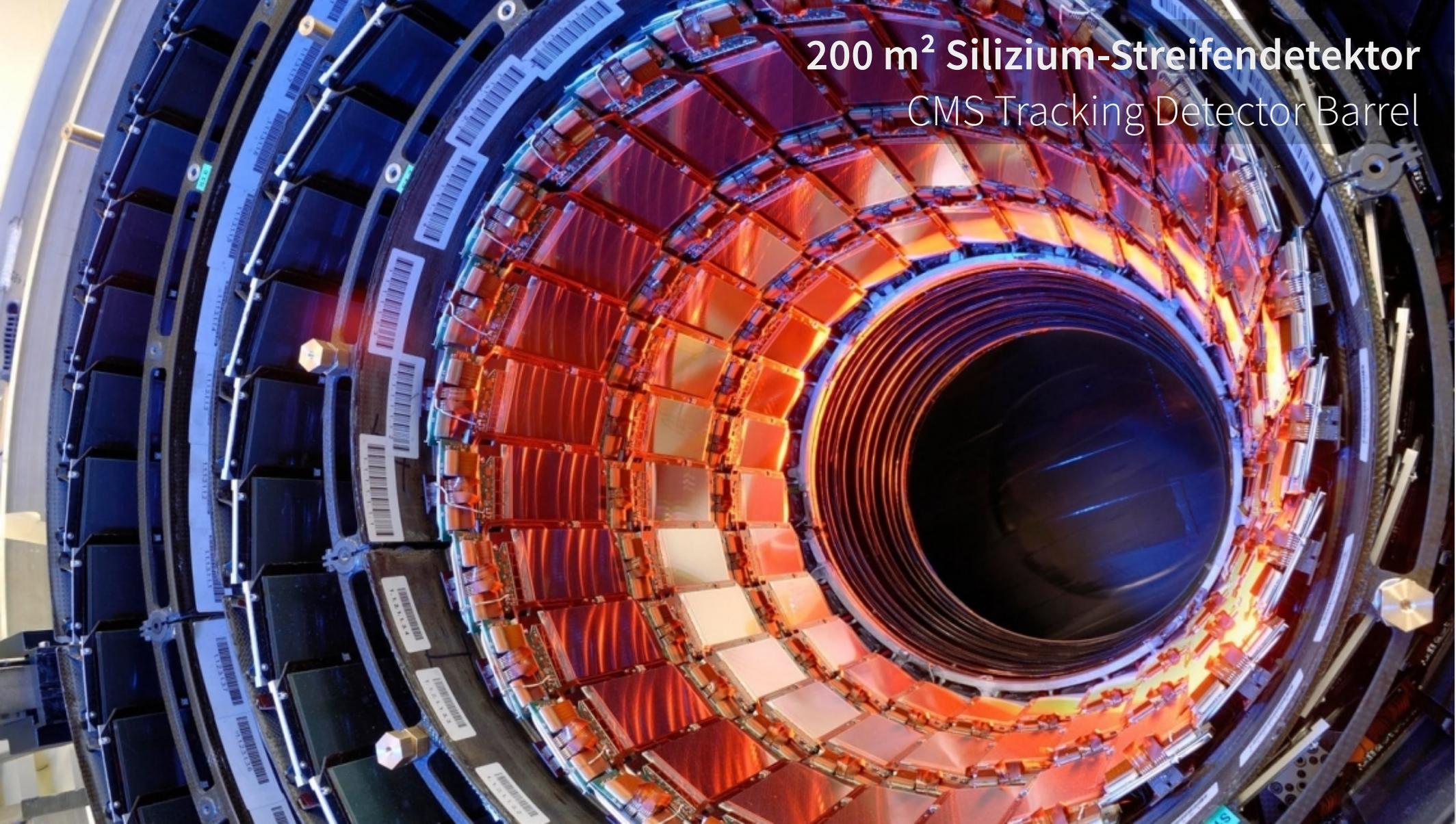
- 2D Messung über Stereo-Winkel

- Zwei Detektormodule übereinander, leicht rotiert gegeneinander
- Ratenlimitierung durch Mehrdeutigkeiten

- Verwendet für große Flächen:  
Große Radii vom Interaktionspunkt,  
großer Hebelarm für Impulsmessung



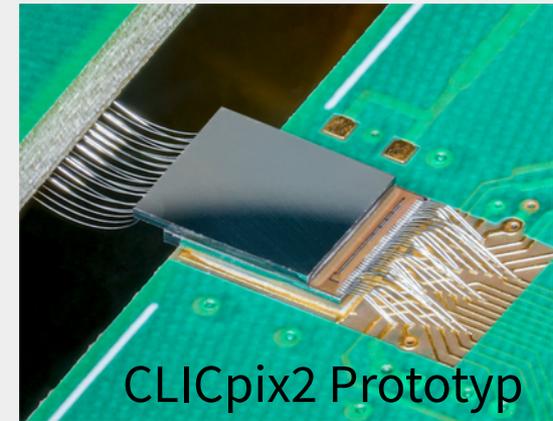
200 m<sup>2</sup> Silizium-Streifendetektor  
CMS Tracking Detector Barrel



# Silizium-Pixeldetektoren

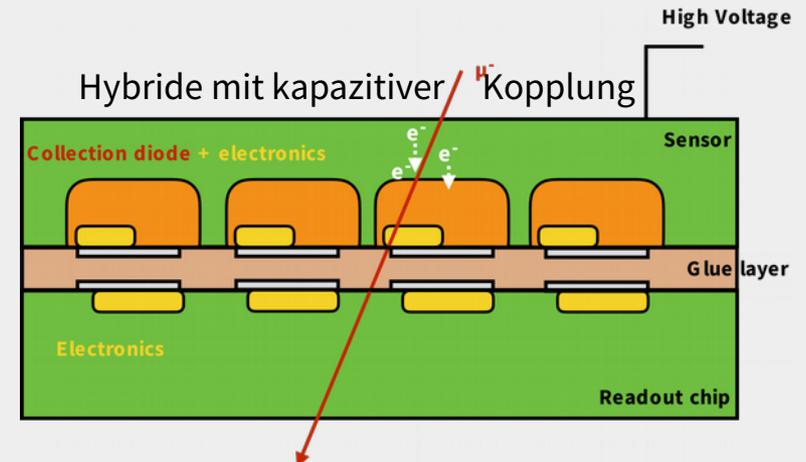
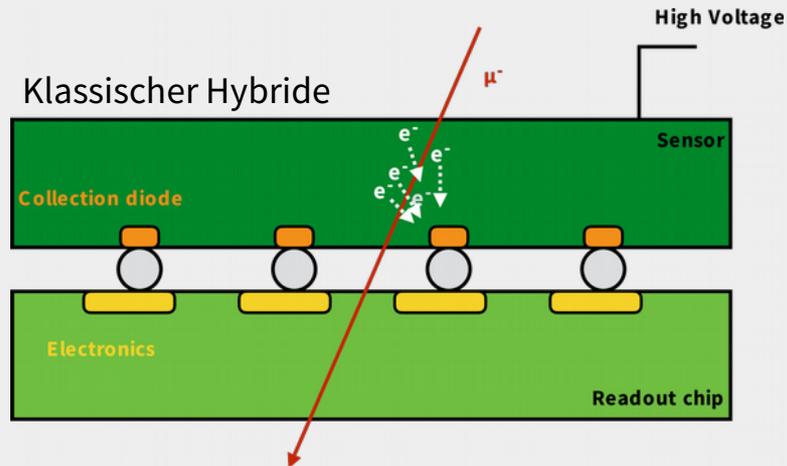


- Segmentierung in zwei Dimensionen
  - Vorteil: Direkt 2D Ortsmessung, kein Stereo-Winkel
  - Nachteile: Verbindung zur Ausleseelektronik, sehr viel mehr Kanäle
- Verschiedene Technologien, Auslesekonzepte, Sensor-Aufbauten
  - Genauer Aufbau eines Sensors sehr komplex (Metallisierung, Passivierung...)
  - Detektoren konzipiert und optimiert für jeweiligen Einsatzzweck (Experiment)
- Pixelgrößen von wenigen  $10\ \mu\text{m}$  → gute Ortsauflösung
- Sensordicken von wenigen  $100\ \mu\text{m}$  → Wenig Vielfachstreuung bei Durchgang



# Pixeldetektor-Technologie: Hybride

- Trennung von Ausleseelektronik und Sensor in zwei Silizium-Chips
  - Verbindung über kleine Metallkugeln (Bump Bonds) oder Klebelage
  - Sensor-Doping wie gewünscht, hohe Spannung zum Depletieren möglich
  - Auslese-Chip kann volles Potential kommerzieller Prozesse ausschöpfen
- Kleine Pixelgrößen mit viel Funktionalität möglich – aber sehr teuer zu produzieren

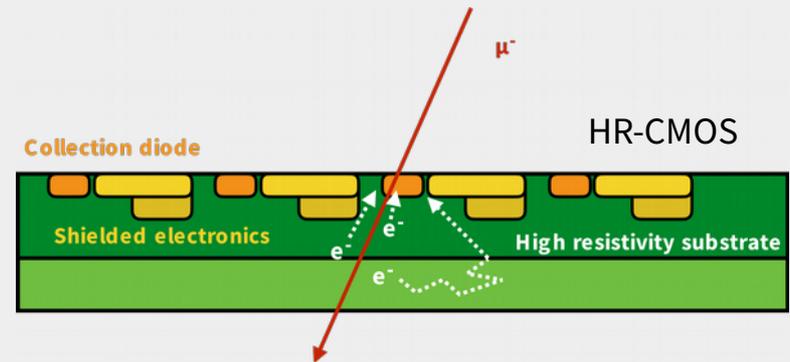
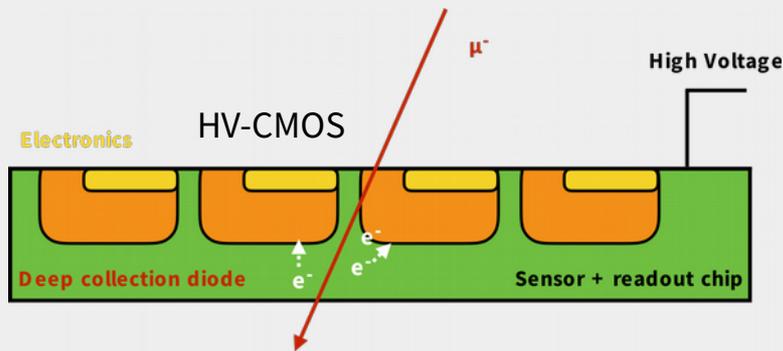


A photograph of a hybrid silicon pixel detector assembly. It features a large, square, light-colored silicon sensor chip mounted on a green printed circuit board (PCB). The sensor is connected to the PCB via a gold wire bond interface. The PCB has a yellow border around the sensor. The text "101" is visible on the right side of the PCB. The background is a blurred green surface.

**Hybrider Silizium-Pixeldetektor**  
100  $\mu\text{m}$  Timepix mit 100  $\mu\text{m}$  Sensor

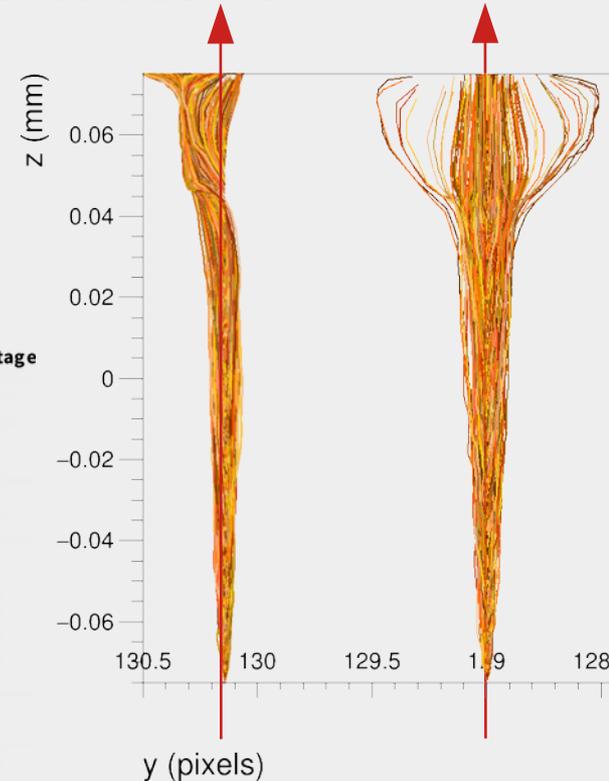
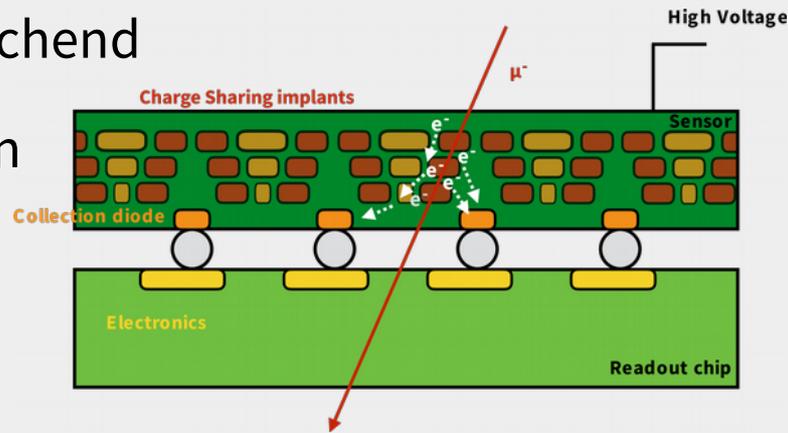
# Pixeldetektor-Technologie: Monolithische Sensoren

- Ziel: minimales Material bei größtmöglicher Präzision
- Entfernung des Auslesechips, Implementierung der Elektronik im Sensor
  - Günstiger, da kein Bump Bonding, weniger Material
  - Problem: CMOS-Elektronik verträgt nur ca 3 V Spannung, keine Depletion
- Verschiedene Technologien, um „Sensor“ und „Elektronik“ zu isolieren



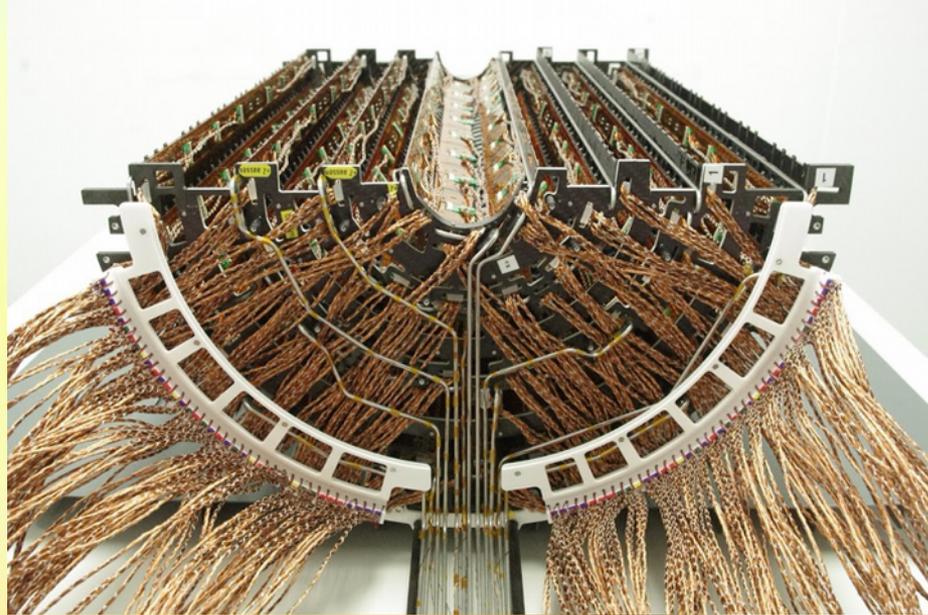
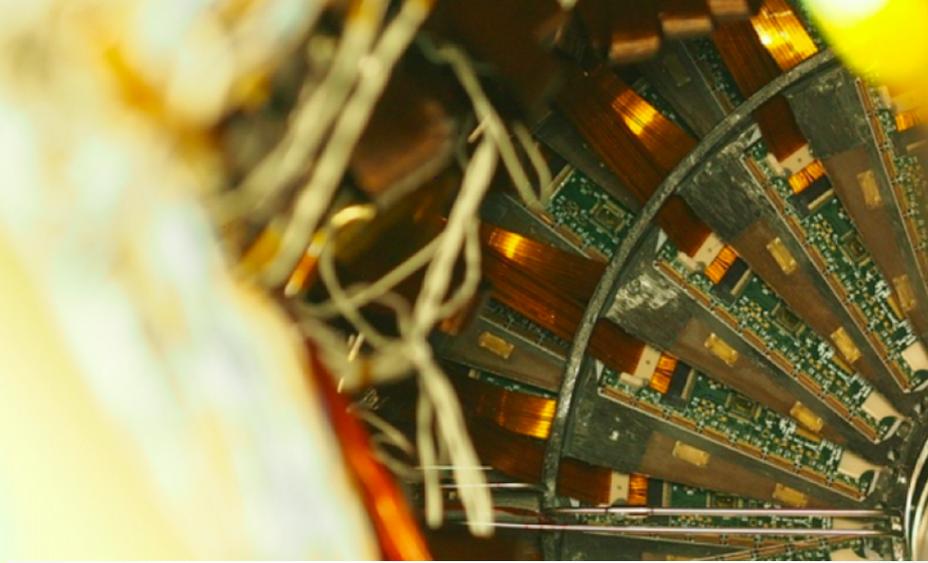
# Pixeldetektor-Technologien: Neue Konzepte

- Problem: bei sehr dünnen Sensoren kaum mehr Ladungsteilung zwischen Pixeln
- Künstliches Verstärken der Ladungsteilung durch zusätzliches Dotieren
  - Implantate erzeugen laterale Feldkomponenten
  - Ladung wird auf mehrere benachbarte Pixel verteilt
  - “Enhanced Lateral Drift Detectors”
- Simulationen vielversprechend
- Validierung an Prototypen steht noch aus





Installation des neuen Pixeldetektors  
CMS-Experiment @ LHC



**Endkappe und Zylinderhälfte**  
CMS Phase I Pixeldetektor

# Spur-Rekonstruktion & Impulsmessung

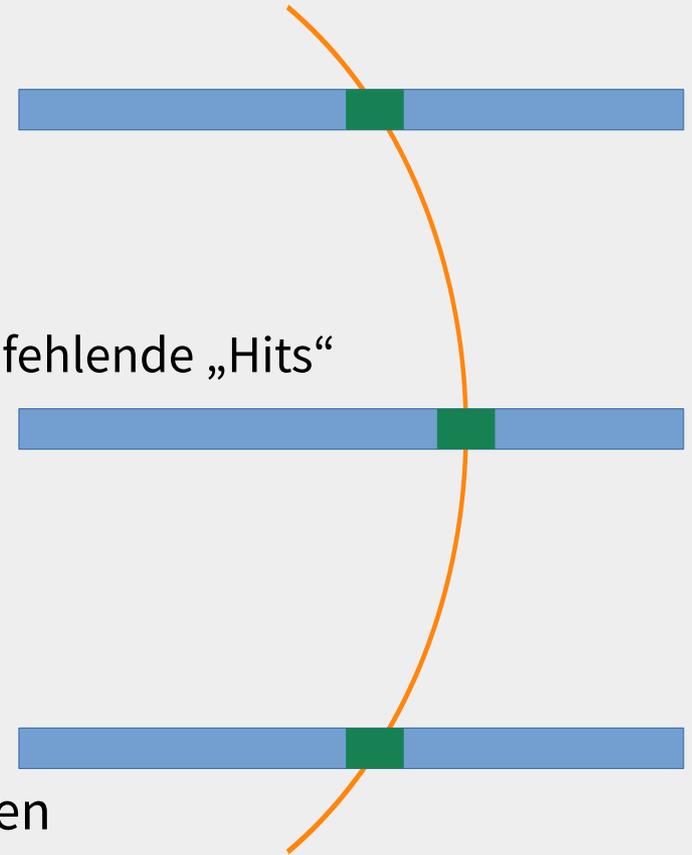
- Rekonstruktion von Teilchen-Trajektorien:
  - Homogenes B-Feld: Helix, Zylinderkoordinaten
  - Getrennte Mustererkennung für y und  $r\varphi$
  - Schwierigkeit: sehr viele Spuren, Mehrdeutigkeiten, fehlende „Hits“

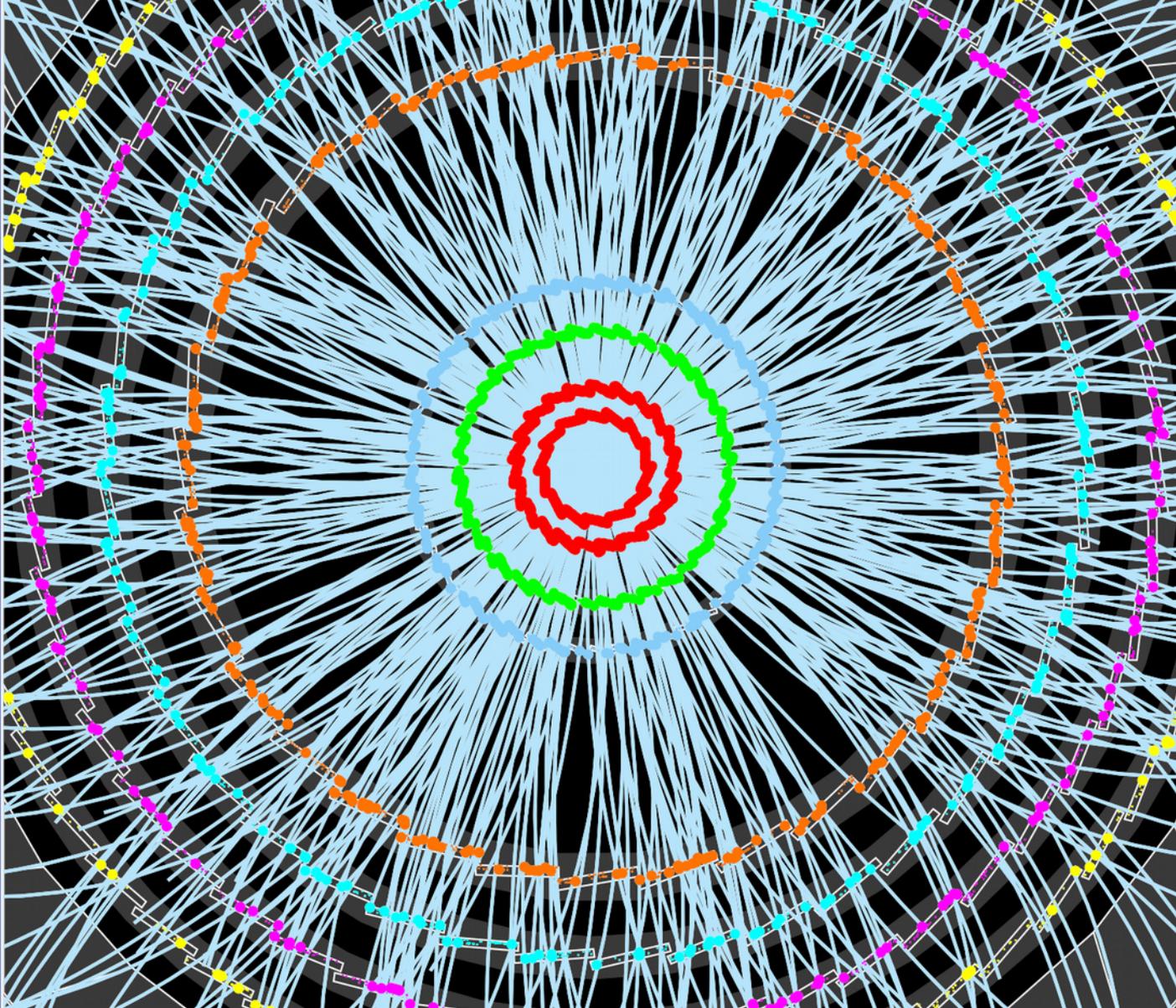
- Impulsmessung: Bahnkrümmung im Magnetfeld, Lorentzkraft:

$$F_L = Q \cdot [\vec{v} \times \vec{B}] \quad F_Z = mv^2/r$$

$$p = Q \cdot B \cdot r$$

- Gute Auflösung mit starkem B-Feld und großen Radien



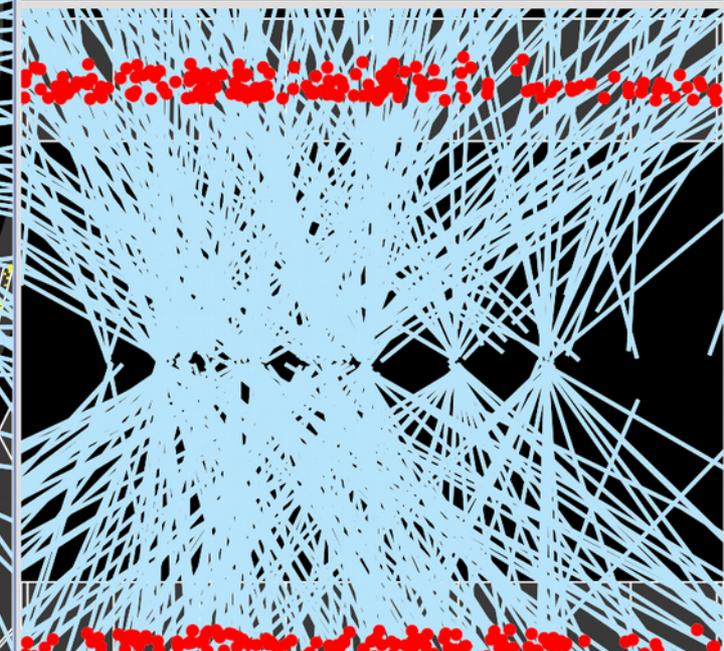


# ATLAS

EXPERIMENT

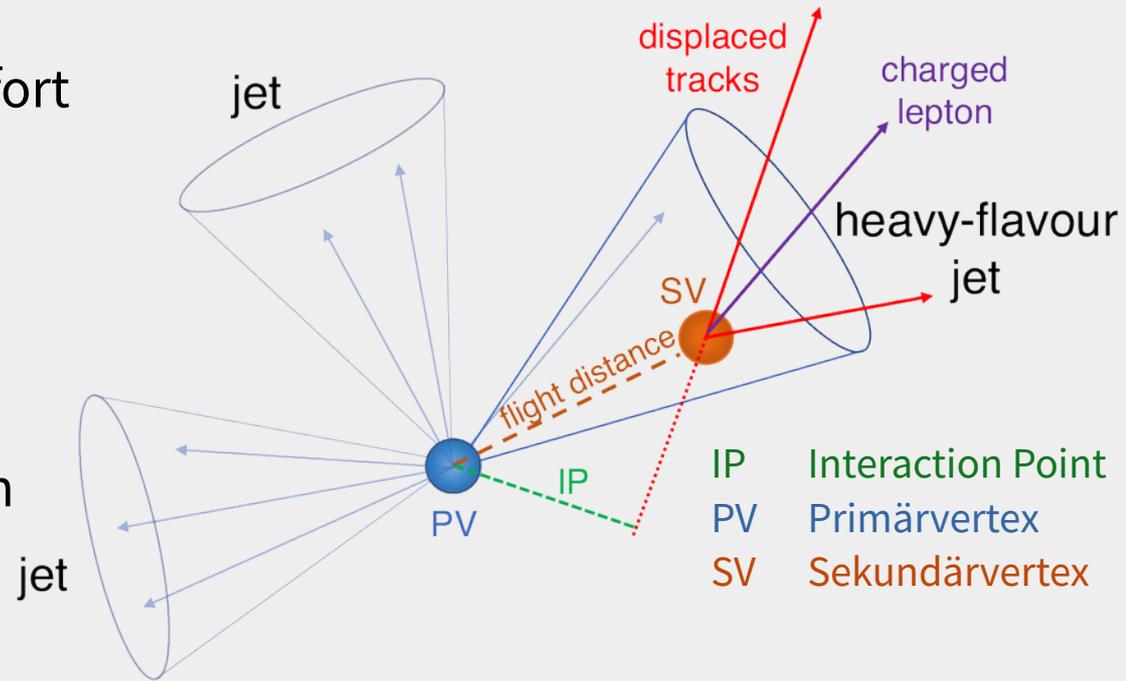
Run Number: 266904, Event Number: 25884805

Date: 2015-06-03 13:41:54 CEST



# Sekundärvertex-Rekonstruktion

- Manche Teilchen zerfallen nicht sofort
  - Produktion in Kollision (PV)
  - Flug während Lebensdauer
  - Zerfall an Sekundärvertex
- Wichtige Messung zur Identifikation
- Benötigt präzise Ortsauflösung nah des Kollisionpunkts
- Wichtig z.B. für b-Quark-Bestimmung (Zerfall von Top Quarks),  
Lebenszeit von b-Mesonen  $\tau \approx 10^{-12}$  s  $\rightarrow$   $d/\gamma \approx 0.1$  mm

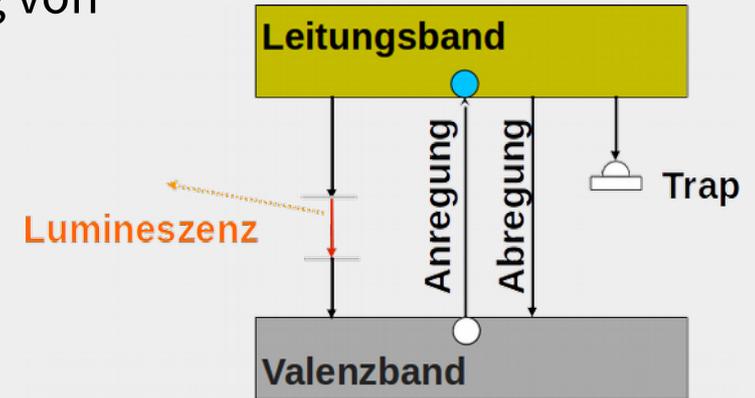


# Szintillatoren

## Anregung und Lumineszenz

# Funktionsprinzip

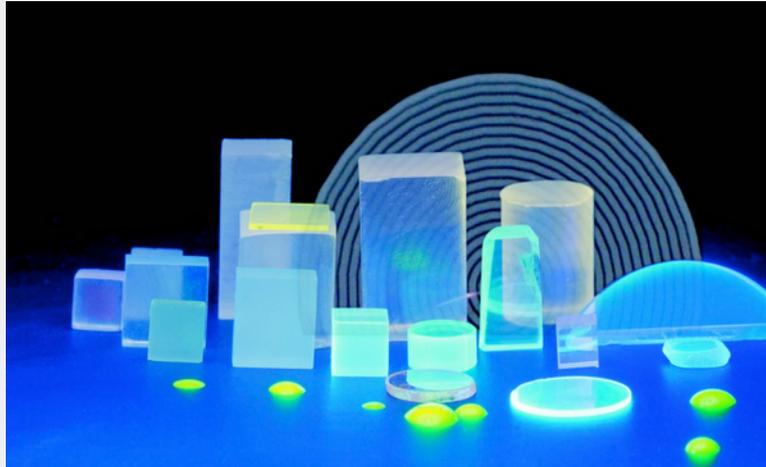
- Szintillation: Emission von Photonen nach Anregung von Atomen oder Molekülen durch Teilchen
- Sehr komplexer Vorgang
  - Viele Zwischenniveaus
  - Strahlende und nicht strahlende Übergänge
  - Anregung von anderen Elektronen durch emittiertes Photon
- Umwandlung eines Bruchteils der Anregungsenergie in Licht
- Auslese z.B. mit **Photomultiplier-Tubes** oder **Silizium-Photomultipliern**



# Materialien

## Anorganische Kristalle

- NaI, PbWO<sub>4</sub>, BaF<sub>2</sub>, ...
- Relativ langsam: 10-1000 ns Abklingzeit
- Hohe Dichte
- Wellenlänge: 300-500 nm

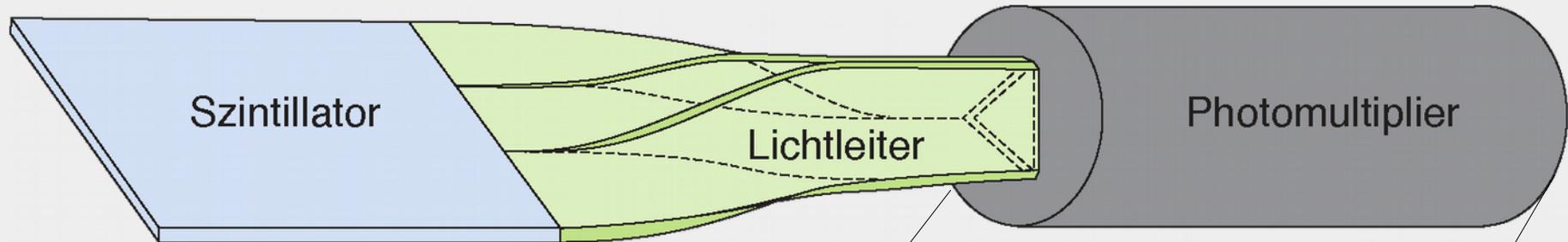


## Plastik-Szintillatoren (organisch)

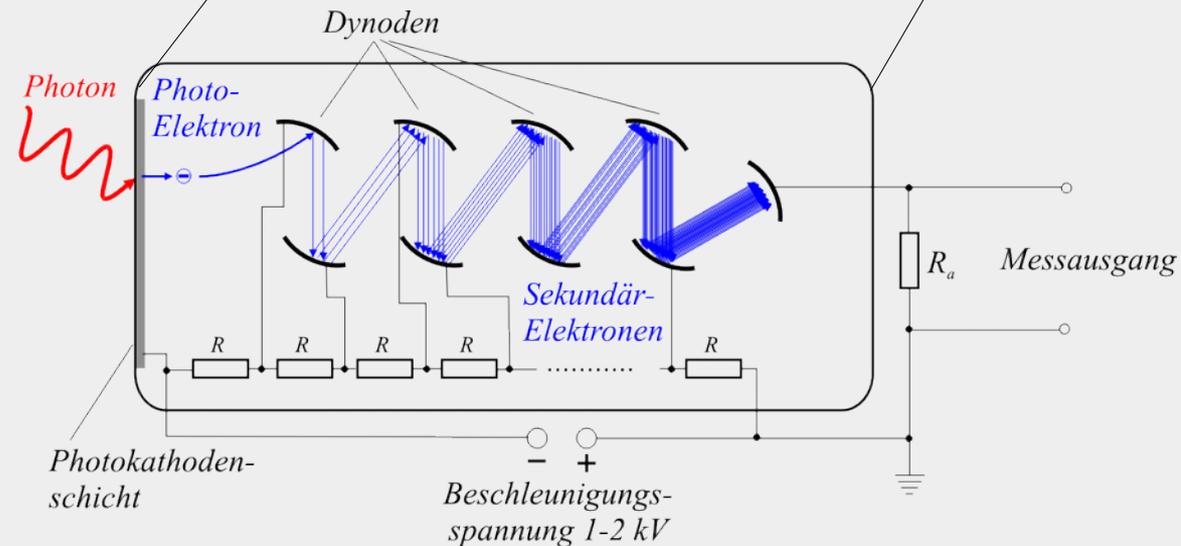
- Große Auswahl an Materialien
- Schnell: 1-10 ns Abklingzeit
- Geringe Dichte, einfache Verarbeitung
- Wellenlänge: 300-400 nm



# Szintillator mit PMT-Auslese

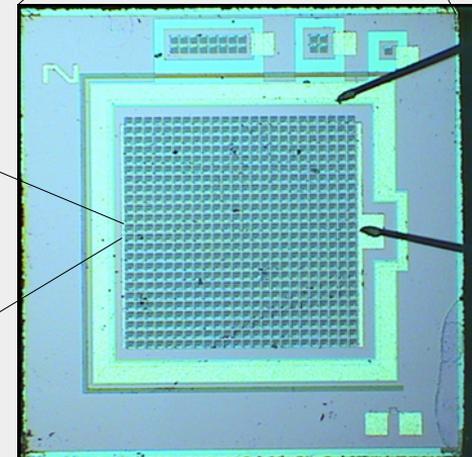
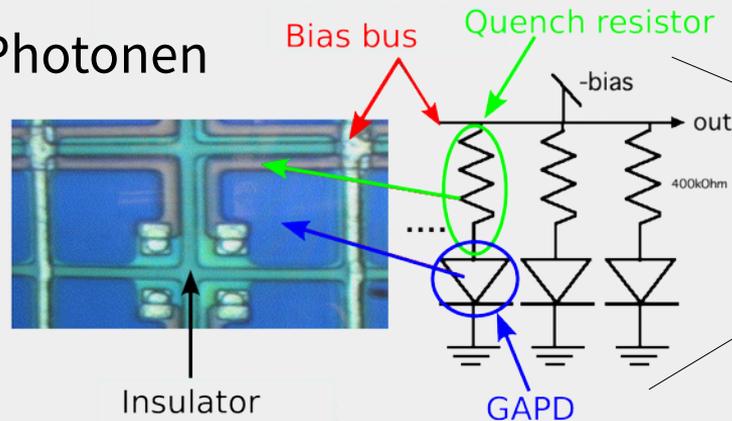
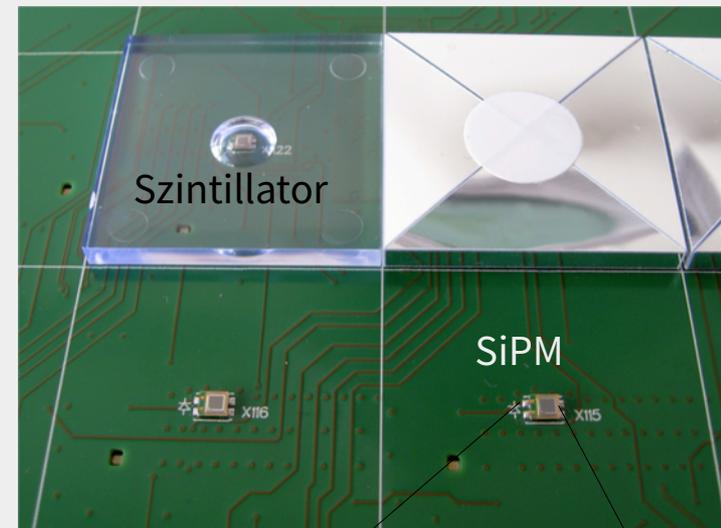


- Leicht zu bauen, viel verwendet
- Referenzmessung, Trigger, ...
- Für HEP-Experiment unpraktisch:
  - Relativ groß
  - Funktioniert nicht in Magnetfeldern



# Szintillator mit SiPM-Auslese

- SiPM: Silicon Photo-Multiplier
- Matrix von Photodioden im Geiger-Modus
- Einzelnes Photon  $\rightarrow$  Photoelektrischen Effekt:  
Lawine von Elektronen ( $10^5 - 10^7 e^-$ )
- Lawine wird mit Quench-Widerständen abgebrochen
- Nachweis von einzelnen Photonen

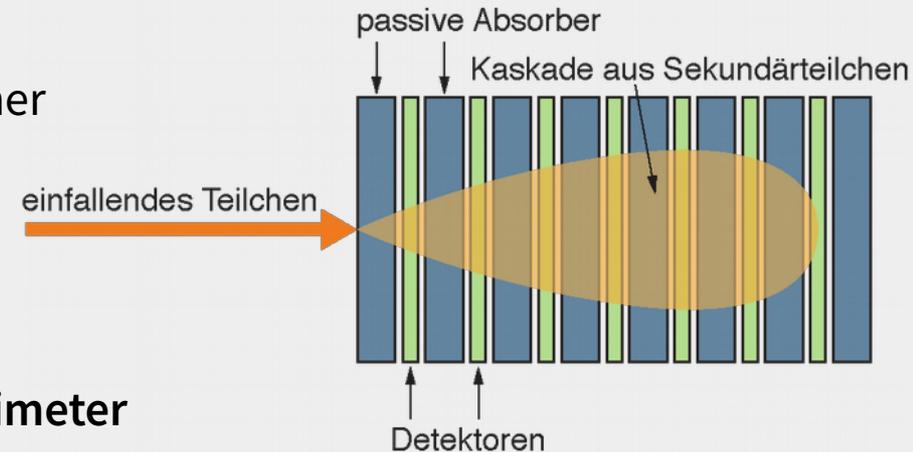
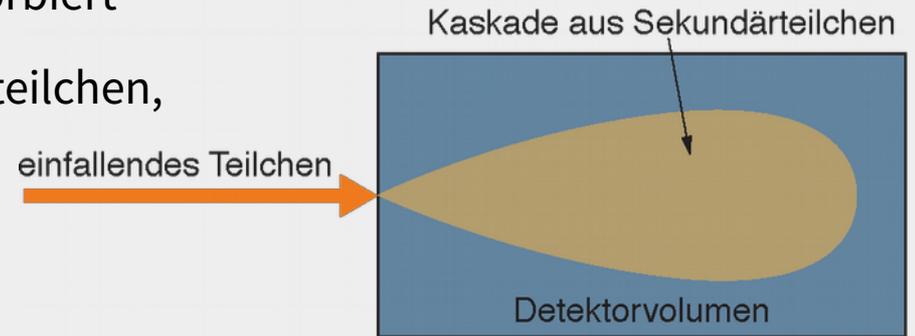


# Kalorimeter

Schauer, Absorption, Messung

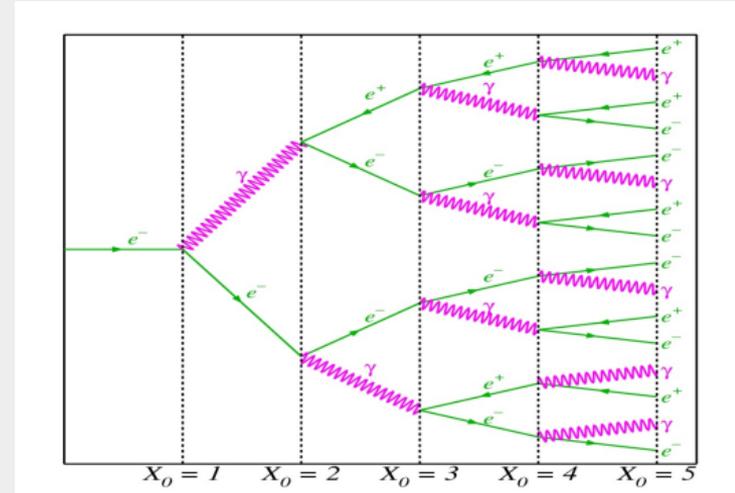
# Kalorimeter-Konzepte

- Dichter Detektor, der das Teilchen vollständig absorbiert
- Das Teilchen erzeugt einen Schauer von Sekundärteilchen, die ihre Energie im Detektor deponieren
  - Wärme, Ionisation, Atomare Anregung
  - Bremsstrahlung
  - Cherenkov-Licht, Szintillations-Licht
- Die Form des Schauers hängt vom Teilchen und seiner Energie ab
- Ideales Kalorimeter:  
Signal  $\propto$  deponierte Energie  $\propto$  Teilchenenergie
- Man unterscheidet **homogene** und **Sampling-Kalorimeter**



# Elektromagnetische Schauer

- Kaskade aus Photonen & Elektron-Positron-Paaren
  - $e^\pm$  emittiert  $\gamma$  via Bremsstrahlung
  - $\gamma$  erzeugt ein  $e^+e^-$ -Paar
  - Rasch anwachsende Zahl von  $e^+$ ,  $e^-$ ,  $\gamma$  bis  $E_c$
- Strahlungslänge  $X_0$ :  
Strecke, in der Projektilenergie durch Strahlungsverluste um  $1/e$  (63%) kleiner wird
- Relativ kompakter Schauer durch großen Wirkungsquerschnitt der Wechselwirkung

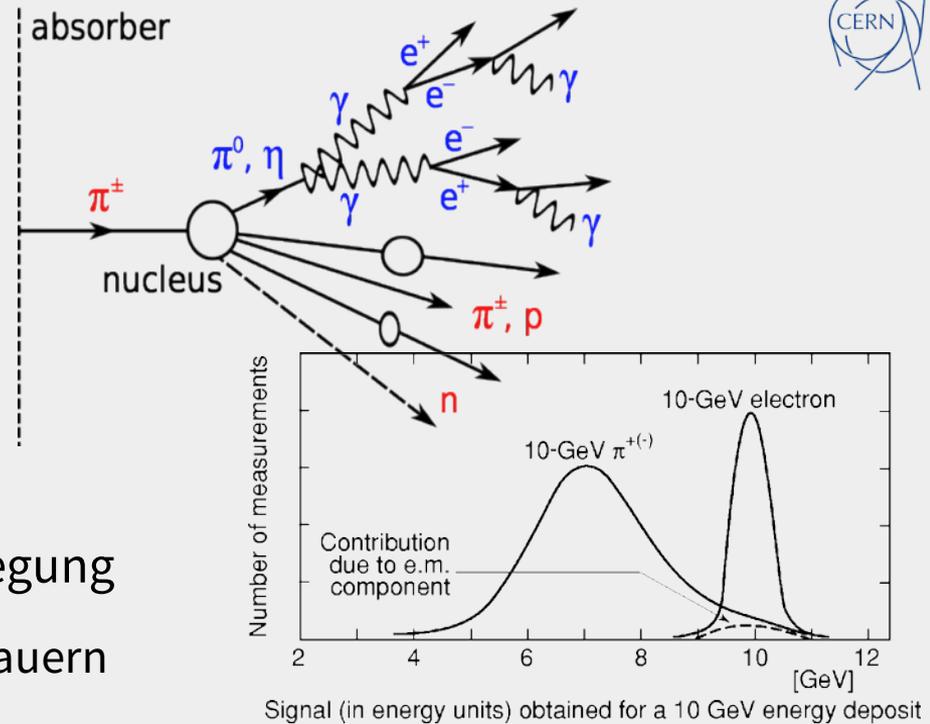


$x$	0	$X_0$	$2X_0$	$3X_0$	$4X_0$
$N$	1	2	4	8	16
$\langle E \rangle$	$E_0$	$E_0/2$	$E_0/4$	$E_0/8$	$E_0/16$

Material	Strahlungslänge $X_0$ (cm)
Luft	30000
Stahl	1.76
Blei	0.56
Uran	0.33

# Hadronischer Schauer

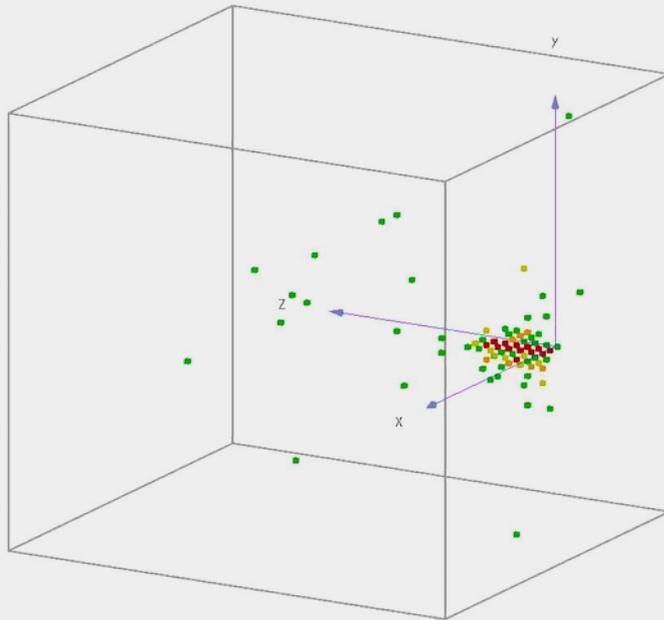
- Hadron wechselwirkt über die starke Kraft mit Detektormaterial
  - Erzeugung von Mesonen und Baryonen, Spallation, Kernanregung, Kernspaltung
- Erzeugung von immer mehr Teilchen, Energieverlust durch durch Ionisation und Anregung
  - Ausbildung von elektromagnetischen Teil-Schauern
  - „Unsichtbare Energie“: Verlust durch Bindungsenergien
  - Späte Komponenten durch Neutronen
- Starke Interaktion: kleineren Wirkungsquerschnitt, höhere Eindringtiefe von Hadronschauern



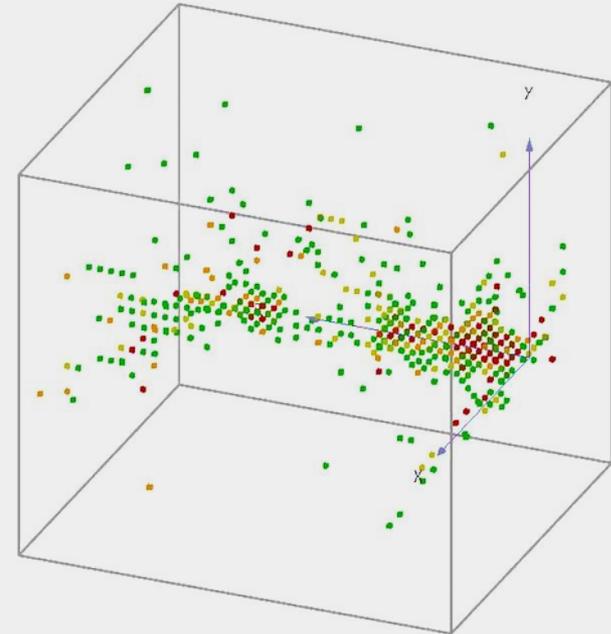
Material	Absorptionslänge $\lambda_a$ (cm)
Luft	75000
Stahl	16.8
Blei	17.6
Uran	11.0

# Schauertiefe - Vergleich

15 GeV Positron - EM-Schauer



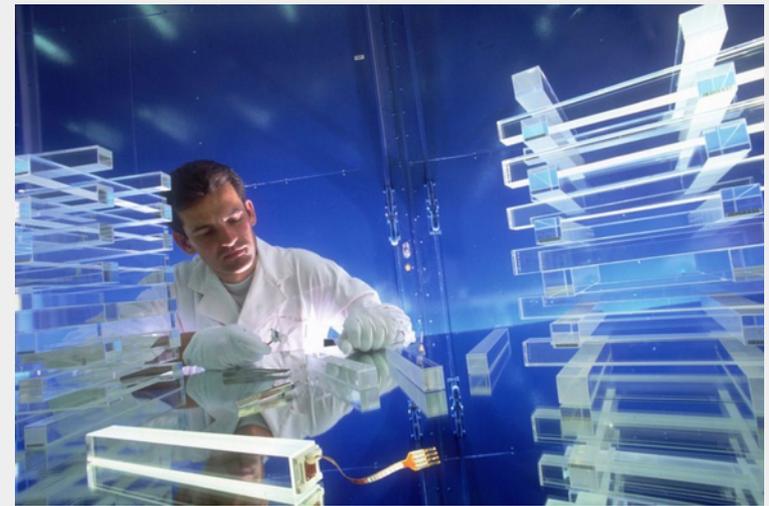
80 GeV Pion - Hadronischer Schauer



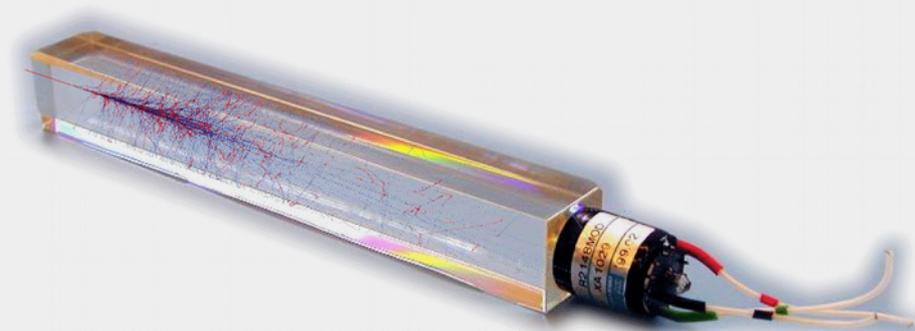
CALICE W-AHCAL

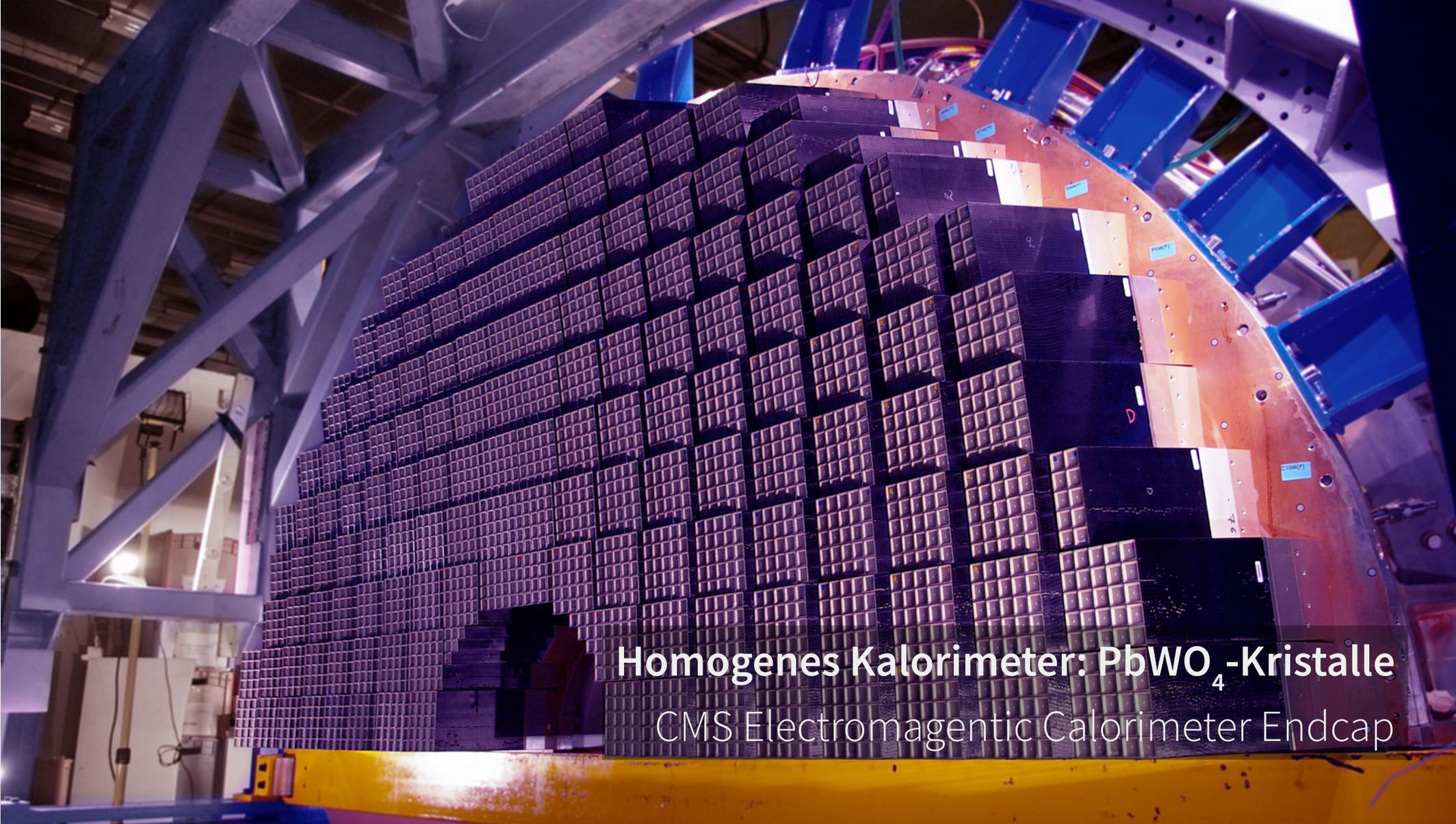
# Homogene Kalorimeter

- Detektormaterial ist sowohl Absorber als auch das aktive Material
  - Kristalle
  - Bleiglas,  $\text{PbWO}_4$
  - Flüssige Edelgase (z.B. Argon)
- Solche Materialien werden fast ausschließlich für elektromagnetische Kalorimeter verwendet
- Vorteil: Sehr gute Energieauflösung, gesamte Schauer wird gemessen
- Nachteil: Kosten, begrenzte Informationen zur Ausdehnung und Substruktur des Schauers



CMS EM-Kalorimeter:  
 $\text{PbWO}_4$ -Kristalle (95% Blei)





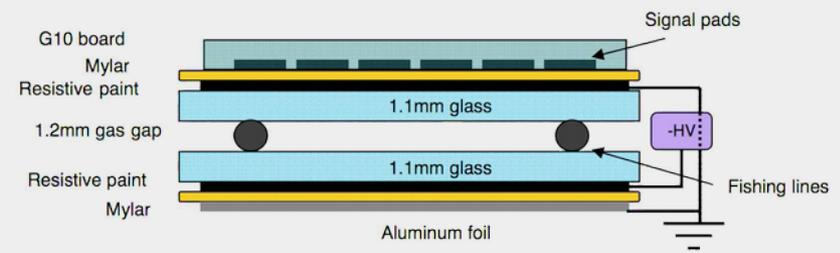
**Homogenes Kalorimeter:  $\text{PbWO}_4$ -Kristalle**  
CMS Electromagnetic Calorimeter Endcap

# Sampling-Kalorimeter

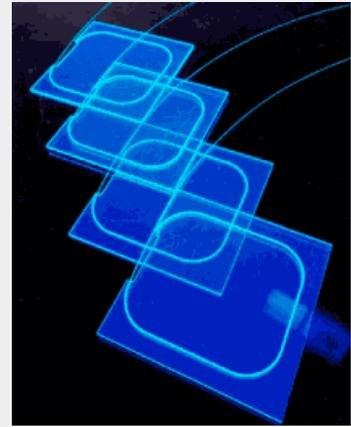
- Absorber-Material rein passiv, nur Schichten von aktivem Material:
  - Szintillatoren
  - Silizium-Sensoren
  - Flüssiges Edelgas
  - Gas-Detektoren
- Vorteil: geringere Kosten, mehr Information über Schauerform
- Nachteil: Nur ein Teil des Schauers wird gesampelt, schlechtere Energieauflösung



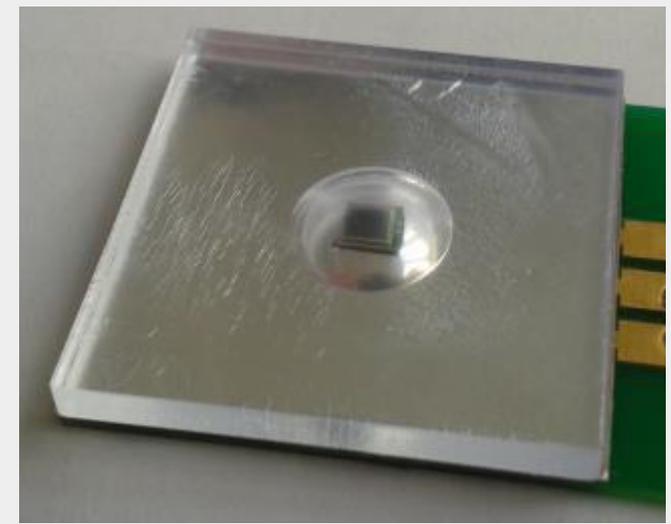
Resistive place chambers ( $1 \times 1 \text{ cm}^2$ )



CMS Szintillator-Kachel



CALICE  
Szintillator-Kachel ( $3 \times 3 \text{ cm}^2$ ), SiPMs



# Samplingkalorimeter mit Eisen/Plastiksintillatoren

## ATLAS Tile Calorimeter Endkappe



# Energiemessung

- Ideales, räumlich unbegrenztes, homogenes Kalorimeter:  
Energieauflösung  $\sigma_E/E$  begrenzt durch statistische Fluktuationen der Schauerteilchenzahl  $N$

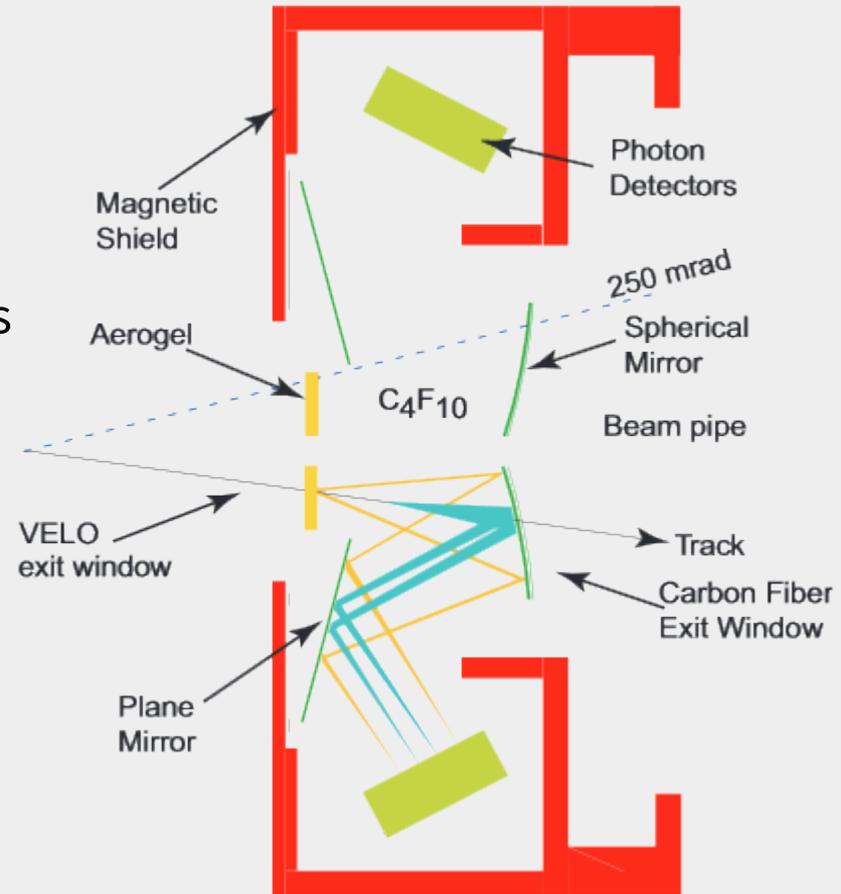
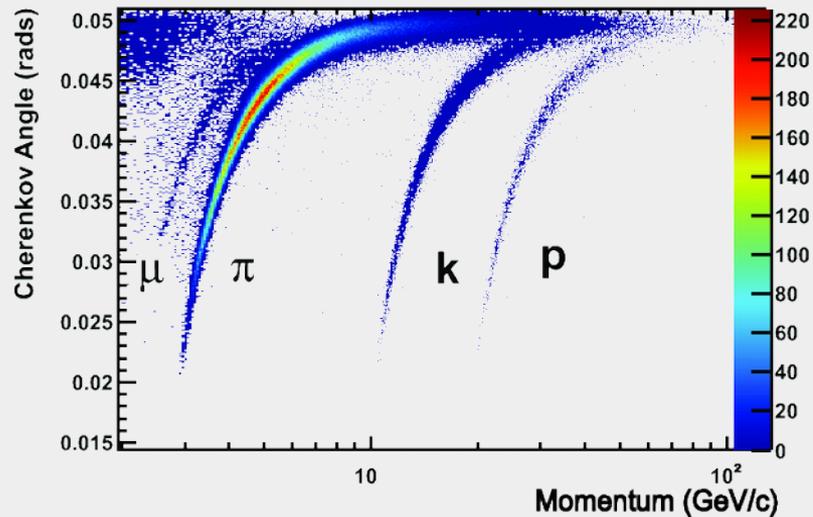
$$\frac{\sigma_E}{E} \propto \frac{\sigma_N}{N} \approx \frac{\sqrt{(N)}}{N} = \frac{1}{\sqrt{(N)}} + \text{Rauschen} + \text{const.}$$

- Maximal erzeugbare Anzahl an detektierbaren Teilchen:  $N_{max} = E/E_C$ 
  - Siliziumdetektoren:  $E_C \approx 3.6 \text{ eV}$
  - Gasdetektoren:  $E_C \approx 30 \text{ eV}$
  - Plastikszintillatoren:  $E_C \approx 100 \text{ eV}$
- Weitere Probleme der Energiemessung:
  - Ineffizienzen bei Photonenmessung, Leakage, Fluktuationen im Schauer: Sampling, Landau
  - Ungleichförmigkeiten, Kalibrationsfehler

# Cherenkov-Detektoren

# Messprinzip eines RICH-Detektors

- Ring Imaging Cherenkov Detektoren
  - Material zur Erzeugung von Cherenkov-Licht
  - (Meistens) Spiegelsystem
  - Photodetektoren zur Messung des Ring-Radius





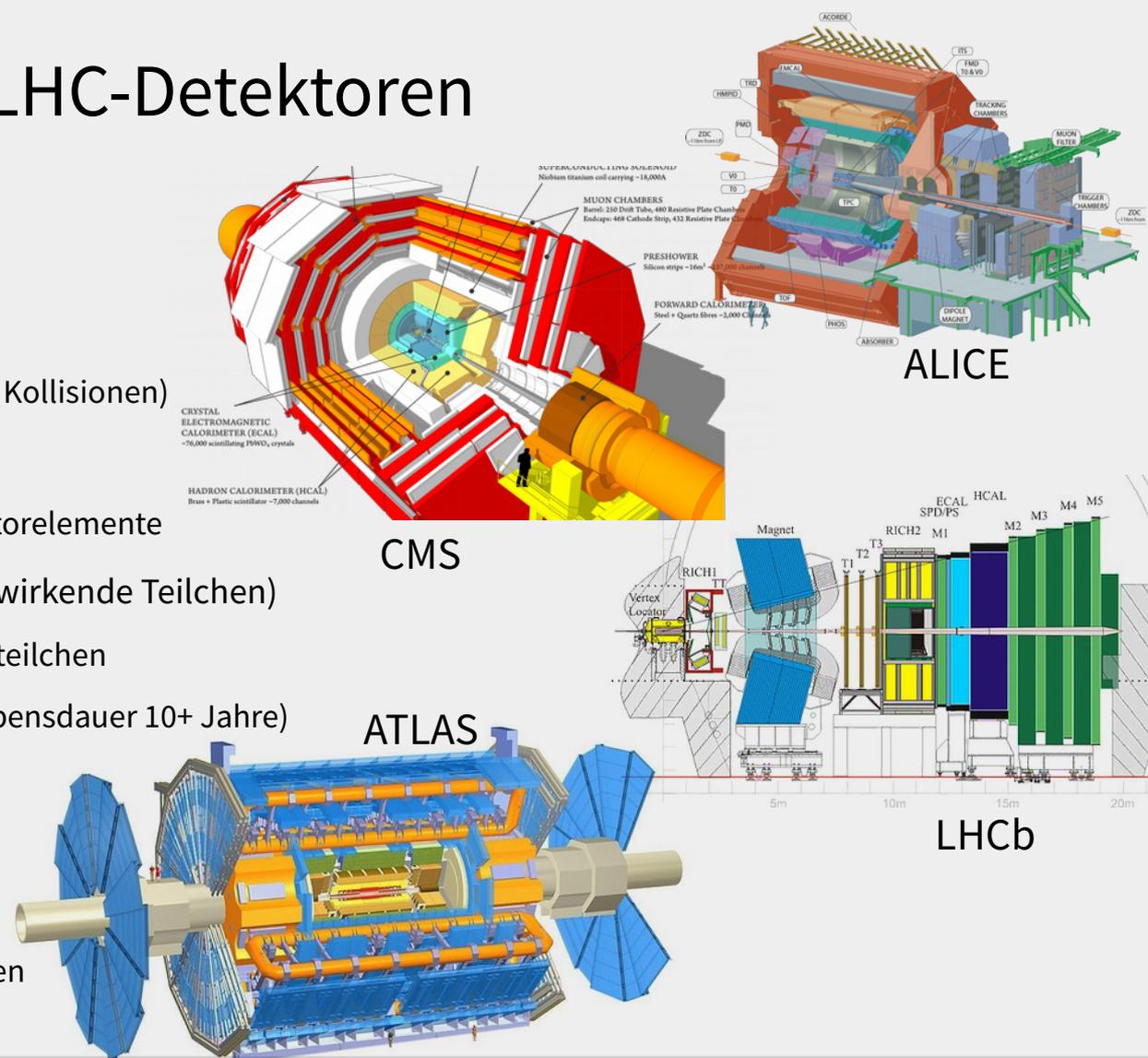
**Hybrid Photodetectors**  
LHCb RICH Detector

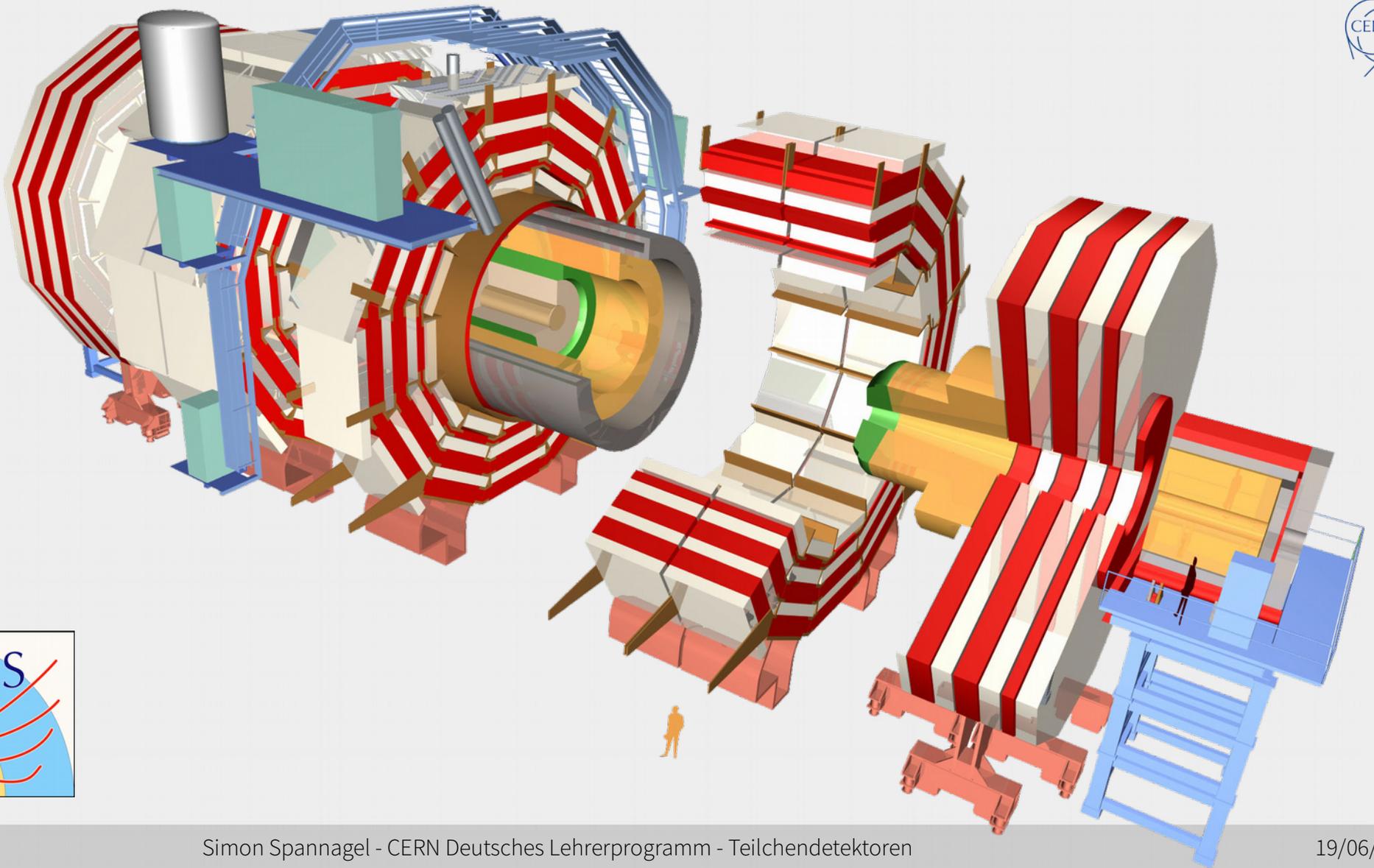
# Detektorsysteme

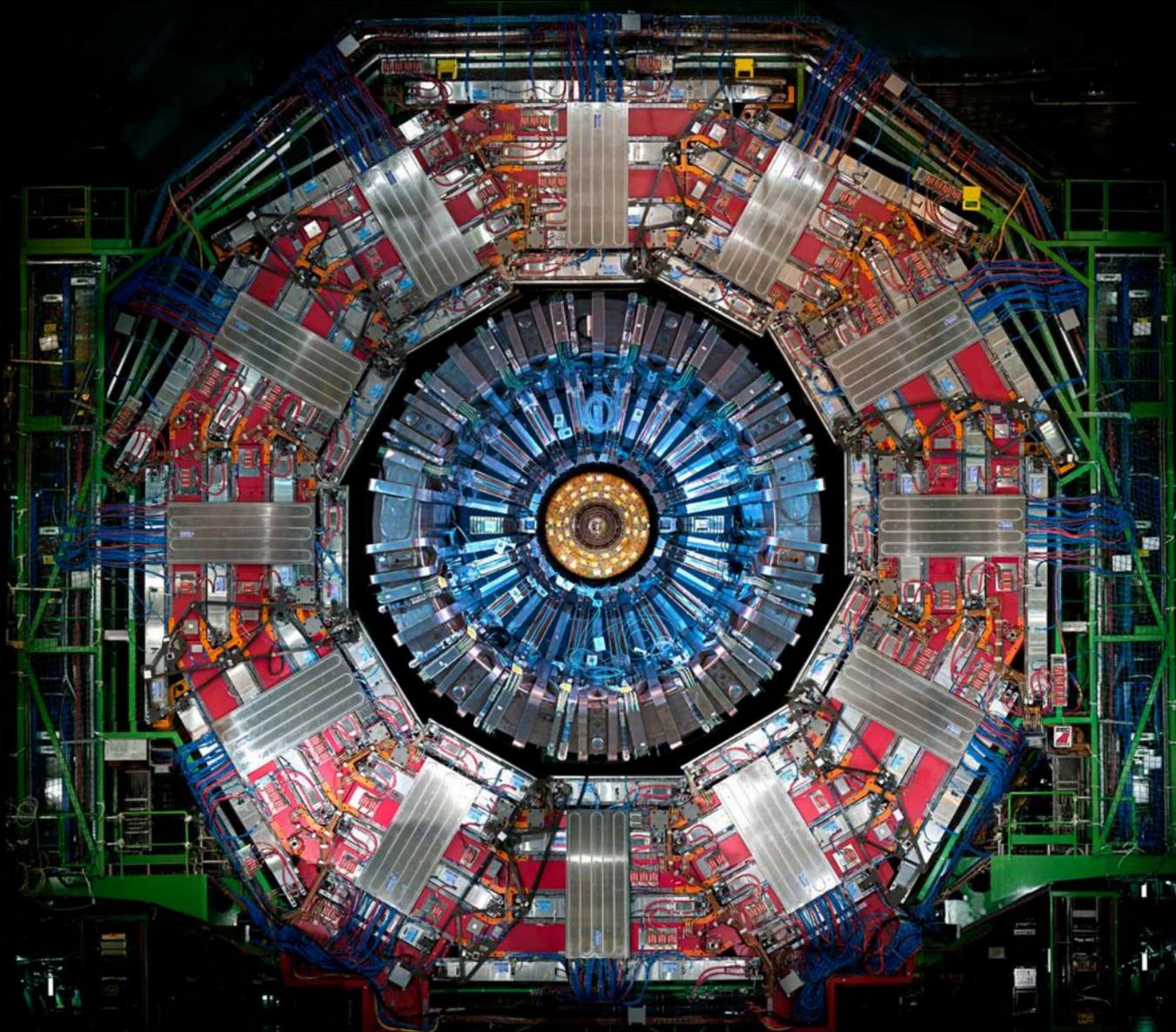
Experimente am LHC und zukünftigen Beschleunigern

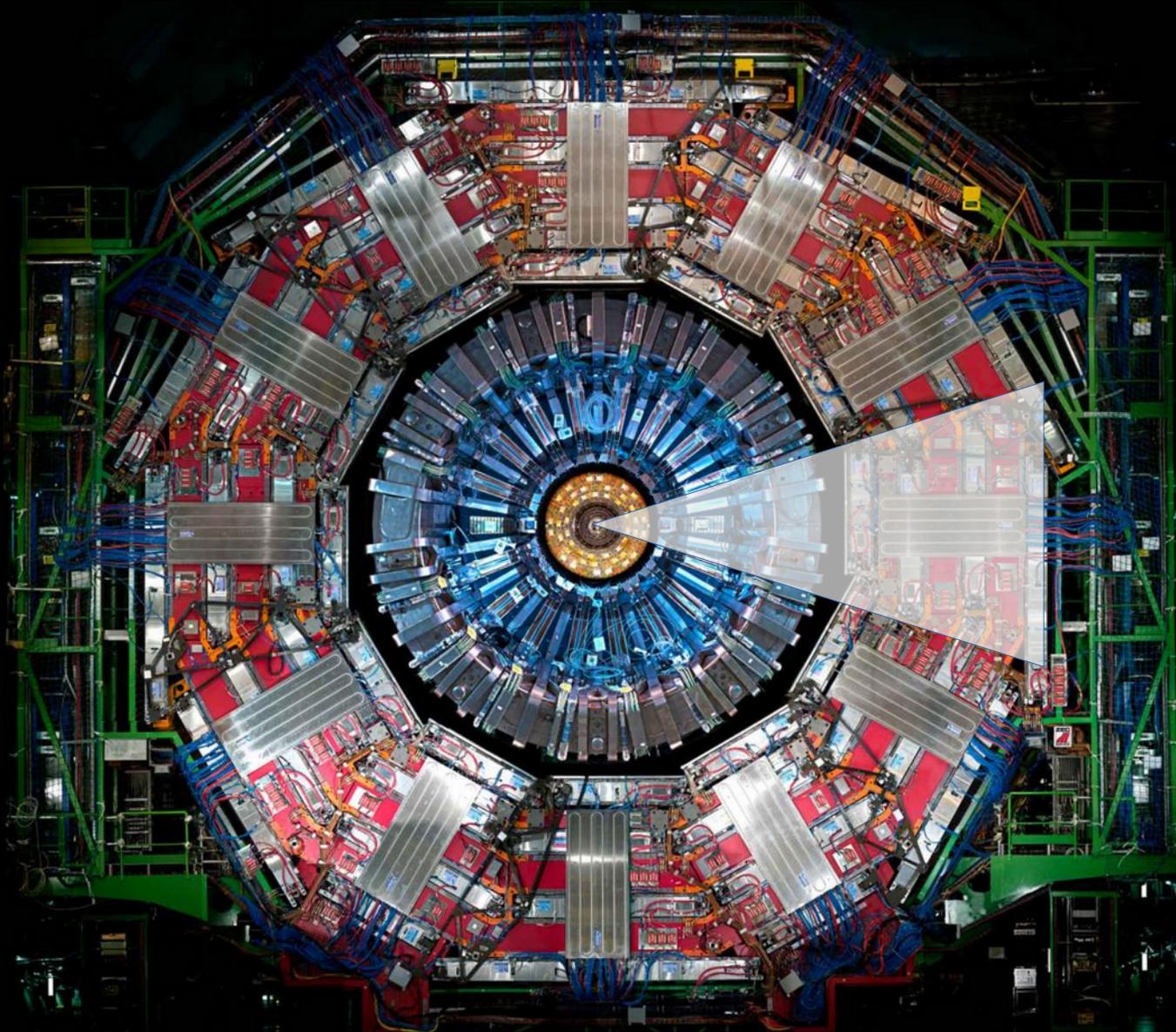
# Herausforderungen für LHC-Detektoren

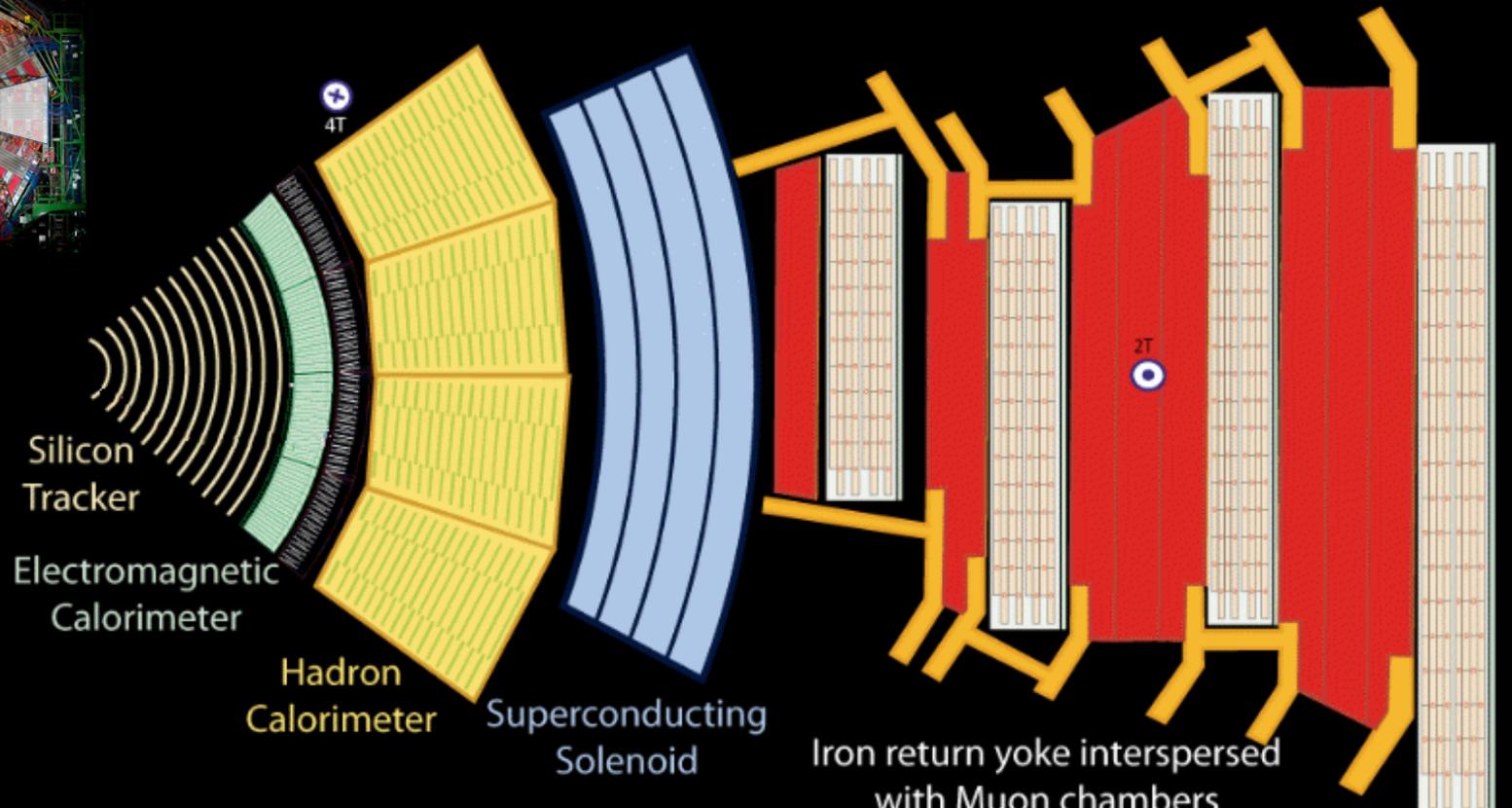
- **Kollisionen bei höchsten Energien**
  - Gute Impulsauflösung bis hin zur TeV-Skala
- **Hohe Luminosität** (große Kollisionsrate)
  - Schnelle Detektoren (nur 25 ns zwischen den Kollisionen)
- **Große Teilchendichte**
  - Hohe Granularität, ausreichend kleine Detektorelemente
- **Hohes Strahlungsniveau** (viele stark wechselwirkende Teilchen)
  - Strahlung hauptsächlich durch die Kollisionsteilchen
  - Strahlenharte Detektoren und Elektronik (Lebensdauer 10+ Jahre)
- **Große Kollaborationen**
  - O(3000) Physikers jeweils in ATLAS und CMS
  - Kommunikation, soziologische Aspekte
  - Viele Meetings, Telefon- und Videokonferenzen



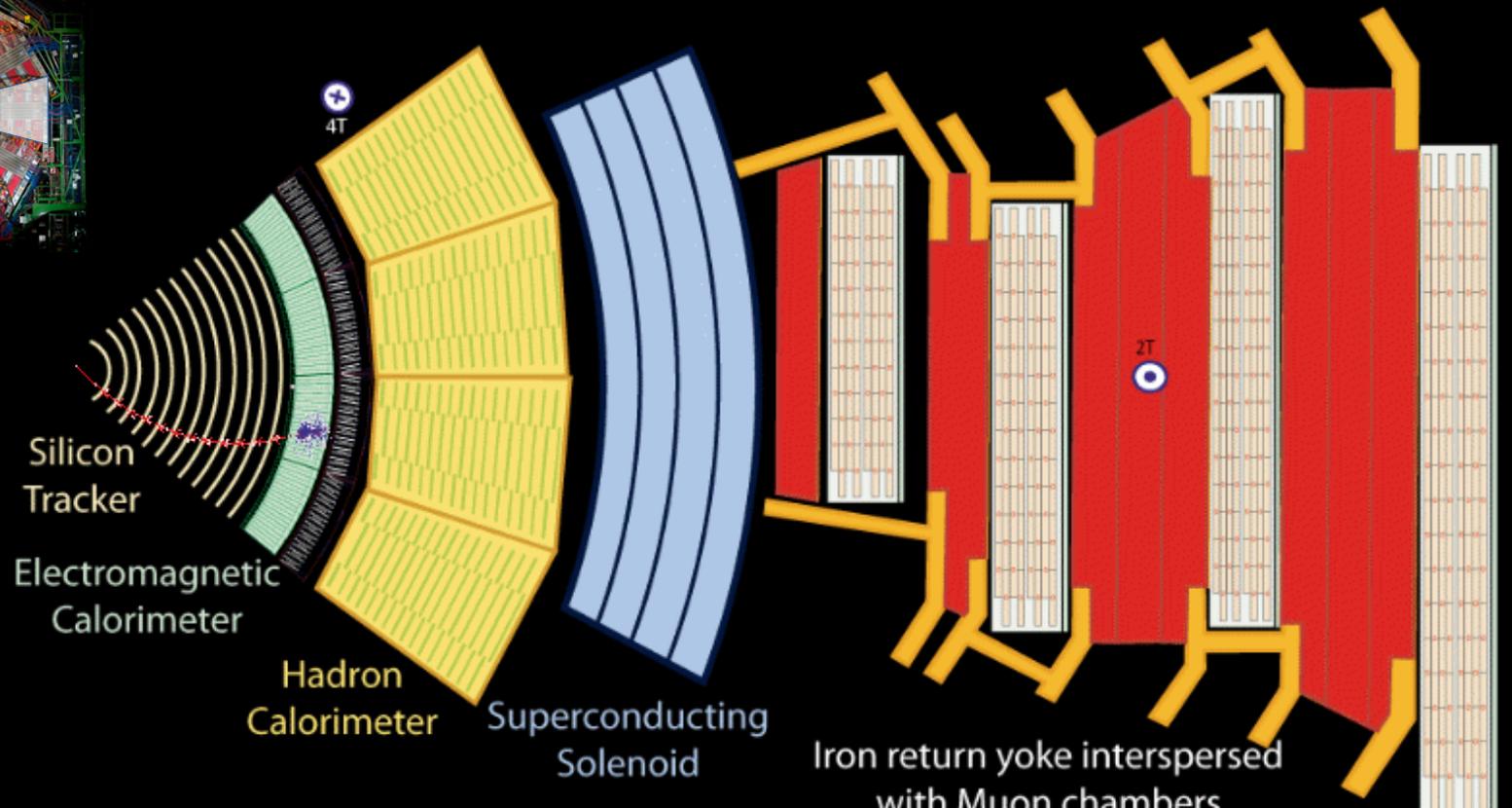
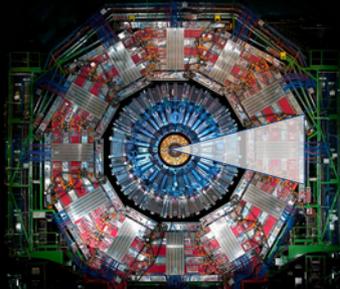




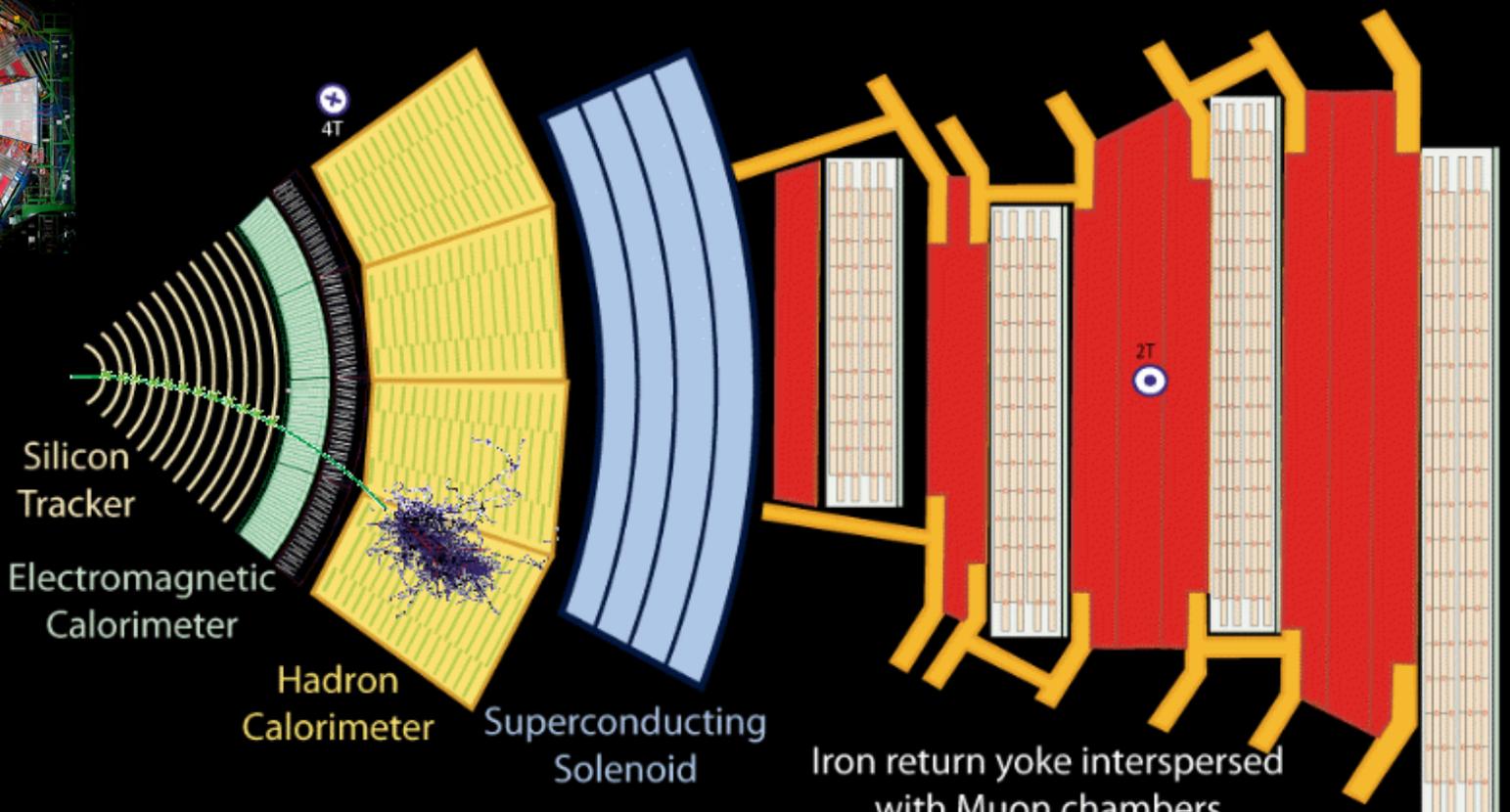
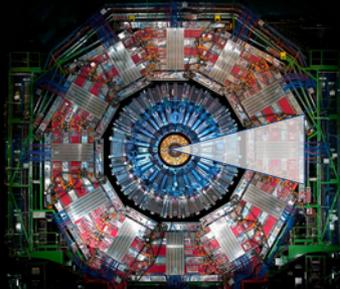




- Key:
- Muon
  - Electron
  - Charged Hadron (e.g. Pion)
  - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
  - Photon



- Key:
- Muon
  - Electron
  - Charged Hadron (e.g. Pion)
  - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
  - Photon



Key:

— Muon

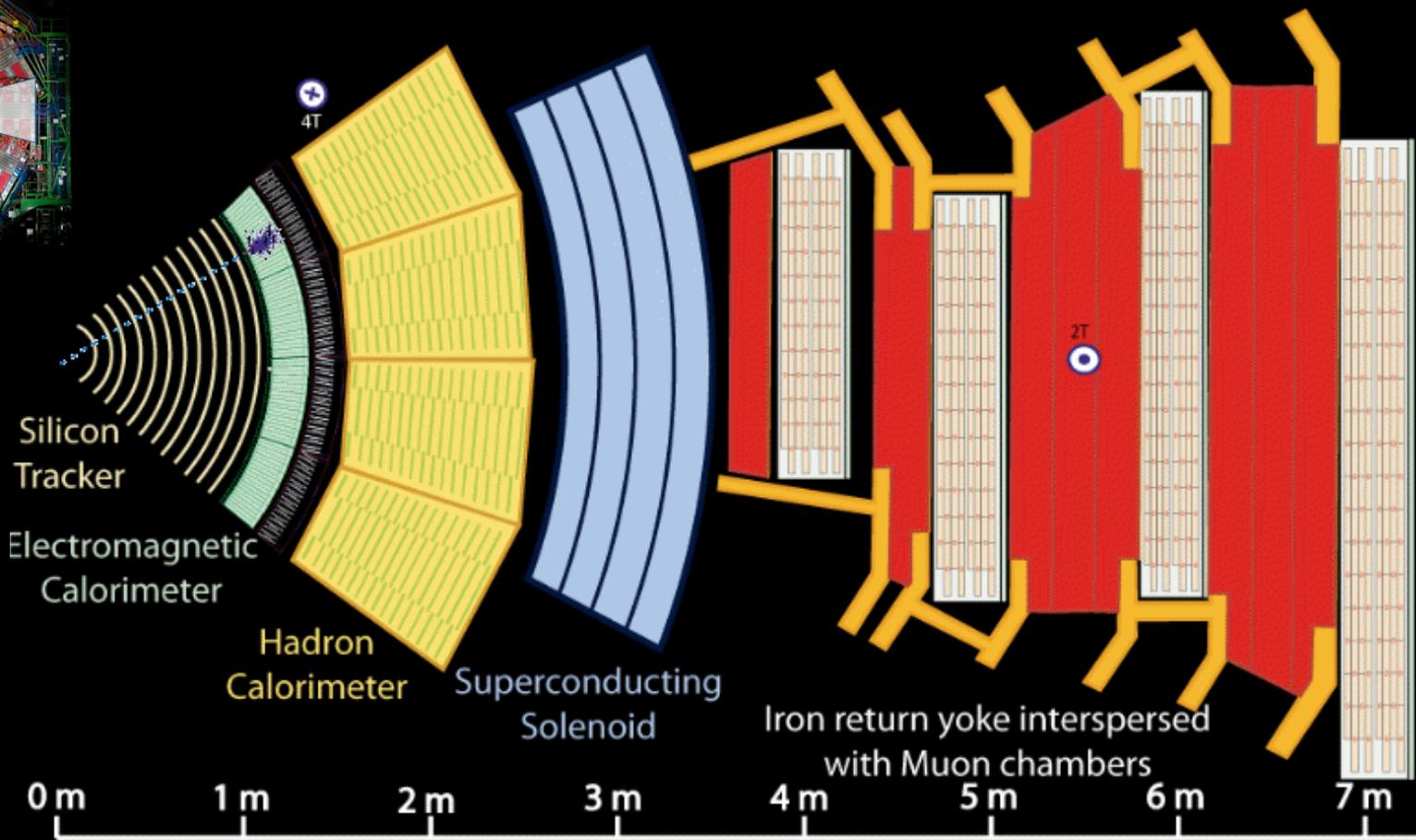
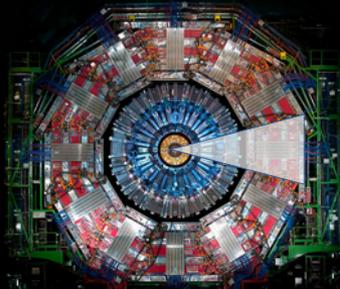
— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

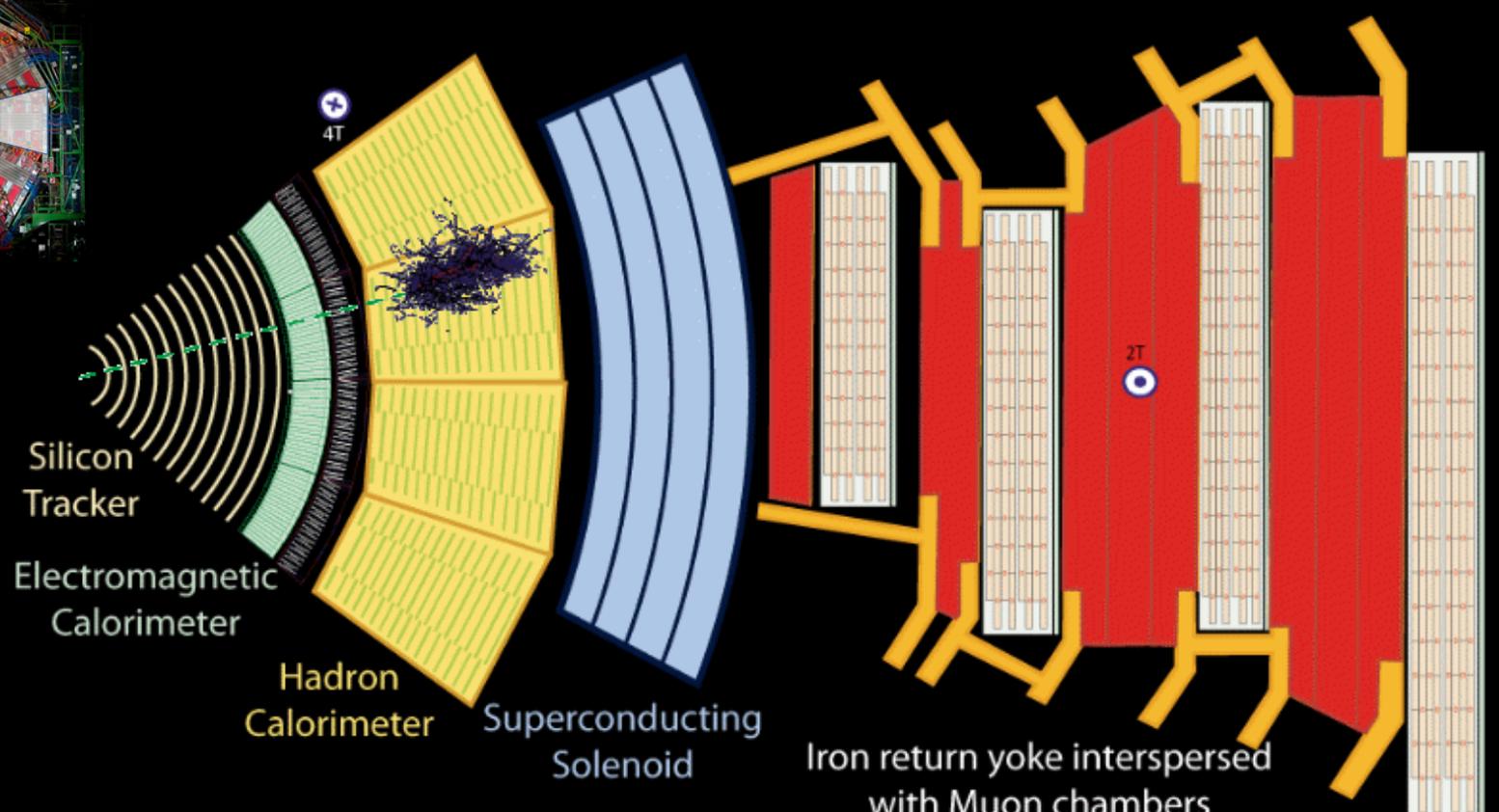
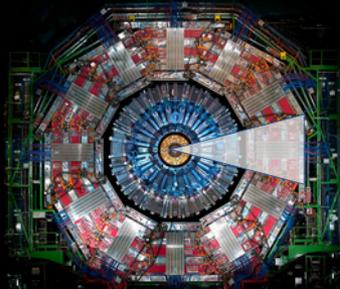
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon

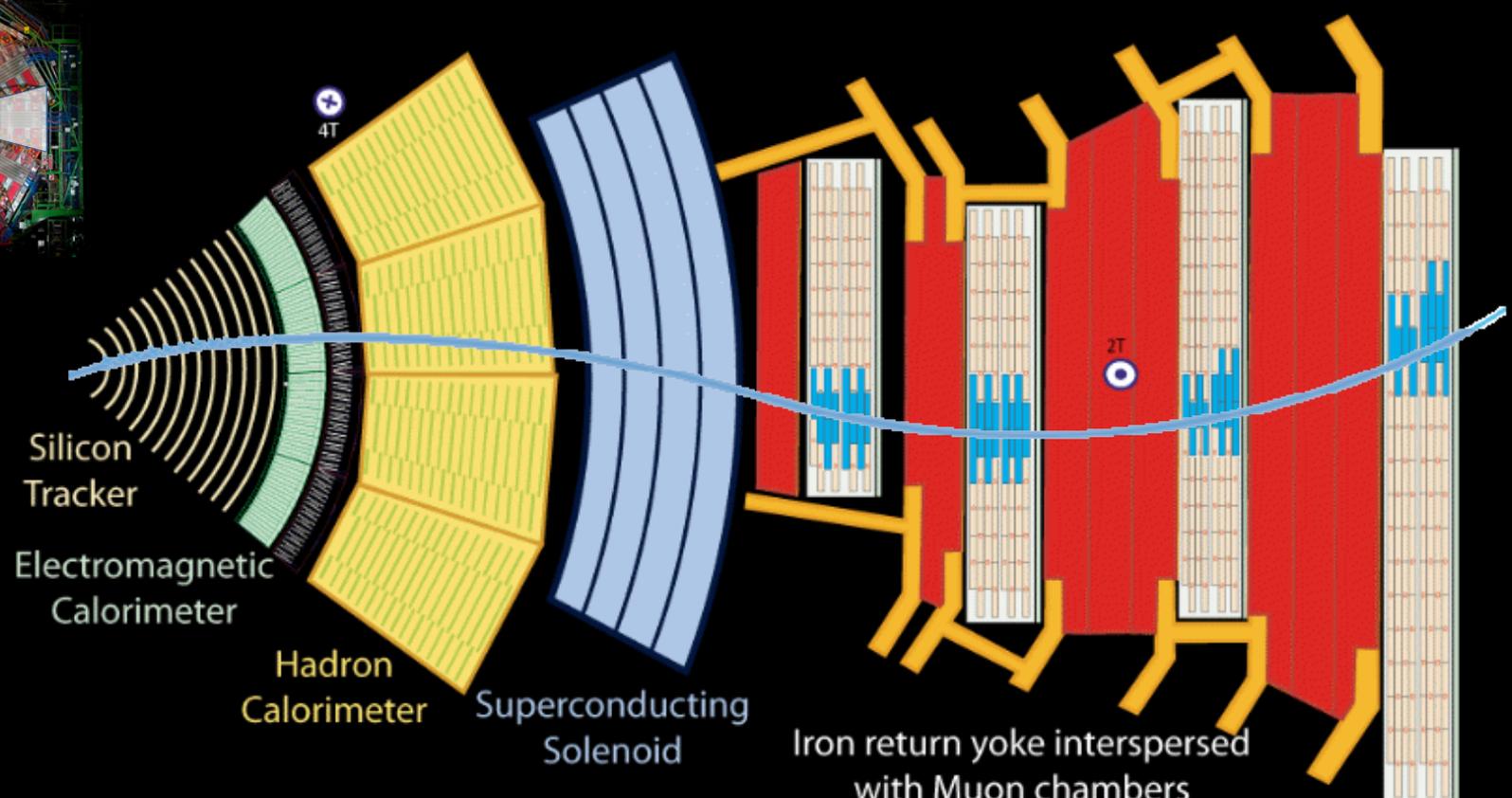
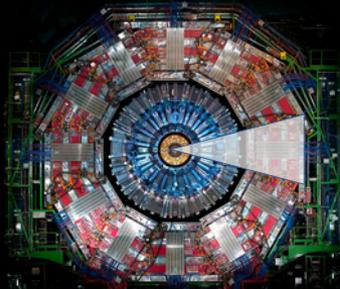




- Key:
- Muon
  - Electron
  - Charged Hadron (e.g. Pion)
  - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
  - Photon



- Key:
- Muon
  - Electron
  - Charged Hadron (e.g. Pion)
  - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
  - Photon

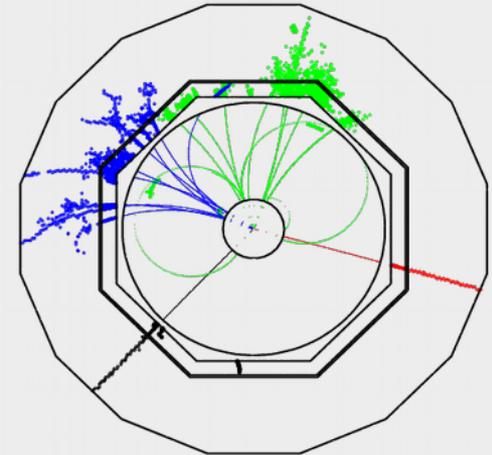
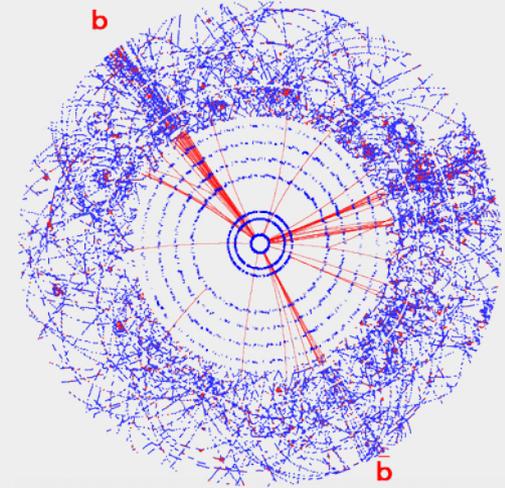


- Key:
- Muon
  - Electron
  - Charged Hadron (e.g. Pion)
  - - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
  - - - Photon



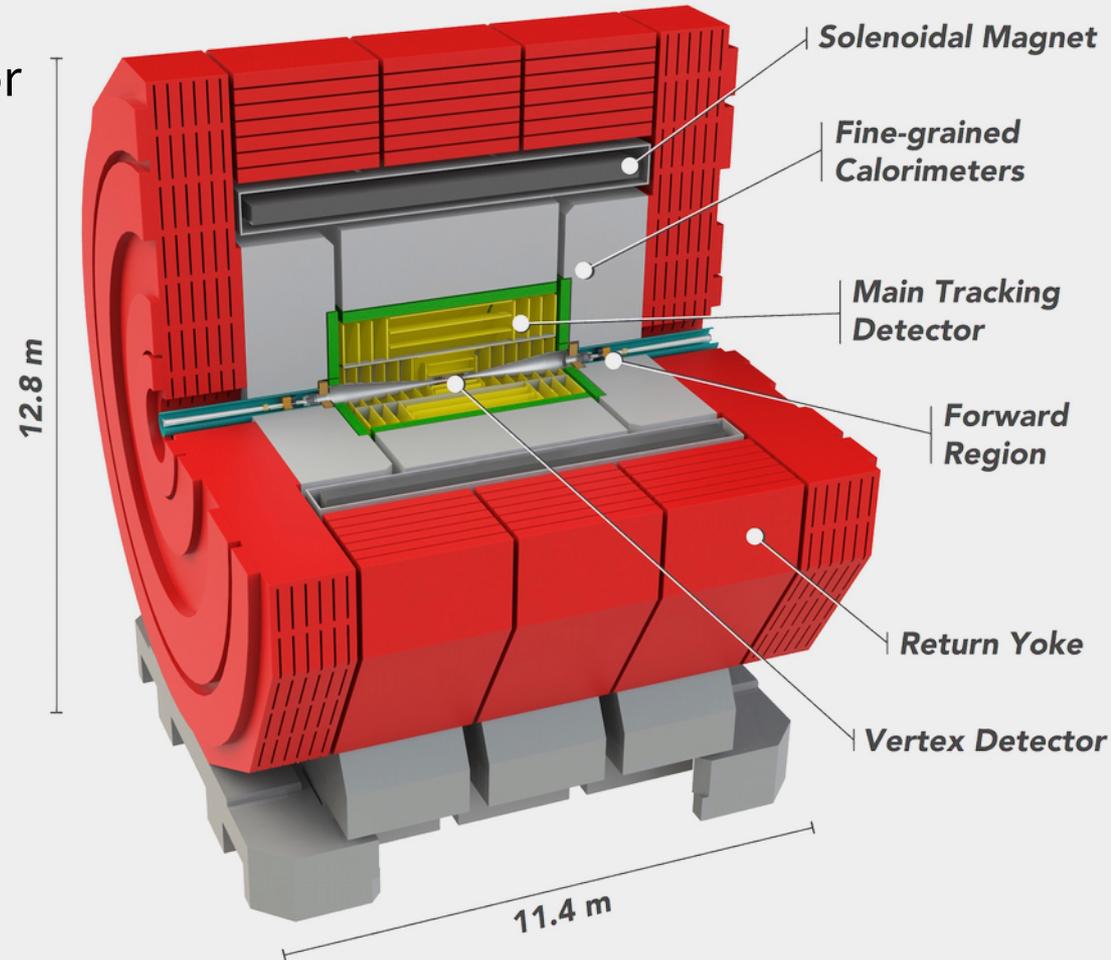
# Anforderungen an Detektoren an e+e- Beschleunigern

- Einige Projekte/Konzepte für e+e- Beschleuniger:  
CLIC, ILC, FCC-ee, CEPC
- Experimentelle Bedingungen und Anforderungen unterscheiden sich von LHC
- Weniger Strahlung
  - Detektoren müssen weniger strahlenhart sein
- Hochpräzisionsmessung:
  - Vertex- und Spurendetektoren mit sehr wenig Material
  - Hochgranulare Kalorimeter



# Beispiel: CLICdet – Experiment an CLIC

- Silizium-Vertex- und Tracking-Detektor  
R = 1.5 m
- Hocho granulare Kalorimeter
  - ECAL:  $22 X_0 + 1 \lambda_I$   
40 Lagen Si-Sensoren, W-Absorber
  - HCAL:  $7.5 \lambda_I$   
60 Lagen Plastiksintillator/SiPM,  
Stahl-Absorber
- 4 T supraleitender Solenoid
- Rückführjoch, instrumentiert mit Myon-Detectoren



# Zusammenfassung I

- Teilchendetektion
  - Messung erfolgt durch Wechselwirkung des zu messenden Teilchens mit Detektormaterial
  - Es gibt kein einzelnes Detektorkonzept, das alle Teilchenarten / -Eigenschaften nachweisen kann
  - Man benötigt mehrere Detektortechnologien und -konzepte
- Wechselwirkung von Strahlung und Materie
  - Ionisation und Anregung der Detektoratome, Bremsstrahlung, Cherenkov-Strahlung
  - Photoeffekt, Compton-Effekt, Paarproduktion,
  - Hadronische Wechselwirkung, fehlende Energie, ...
- Historische Detektoren
  - Nebelkammer, Fotoemulsion, Blaskammer, Funkenkammer
- Gasetektoren
  - Funktionsprinzip
  - Proportionalzählrohr, Vieldraht-Proportionalkammer
  - Micropattern-Gas-Detektoren
  - Spurendriftkammer

# Zusammenfassung II

- Halbleiterdetektoren
  - Nutzung der kleinen Bandlücke von Halbleitern zur Erzeugung freier Ladungsträger
  - Sehr hohe Ortsauflösung, verwendet in Vertex- und Spurdetektoren
- Szintillatoren
  - Anregung von Lumineszenz
  - Verschiedene Materialien (organisch, anorganisch) mit unterschiedlichen Eigenschaften
  - Auslese wahlweise mit Photomultipliern oder SiPMs
- Kalorimeter
  - Dichte Detektoren zum Stoppen von Teilchen
  - Im Idealfall: Signal  $\sim$  deponierte Energie  $\sim$  Teilchenenergie
  - Homogene und Sampling-Kalorimeter
- Detektorsysteme
  - Zusammenspiel vieler Detektortechnologien
  - Anforderungen verschieden für Detektoren an Hadron- und Lepton-Beschleunigern

# Ressourcen / Quellen

- Vorangegangene Vorlesungen im CERN Lehrerprogramm:  
Eva Sicking, Kristof Schmieden
- Websites:
  - Particle Data Group – Passage of particles through matter  
<http://pdg.lbl.gov/2018/reviews/rpp2018-rev-passage-particles-matter.pdf>
  - Deutsche / englische Wikipedia – Beschreibungen, Formeln, Diagramme, Photos
  - CERN CDS Server – Photos alter Experimente  
<https://cds.cern.ch>
  - Websites der LHC-Experimente – Event Displays, Photos  
[ALICE](#), [ATLAS](#), [CMS](#), [LHCb](#)
- Literatur:
  - Povh, Rith: Teilchen und Kerne, Springer – Beschreibung der Materie: Teilchen, Kerne, Wirkungsquerschnitte
  - Kolanoski, Wermes: Teilchendetektoren, Grundlagen und Anwendungen, Springer – Überblick zu Detektoren

