

Universität Karlsruhe (TH)

Forschungsuniversität • gegründet 1825

Detektoren

Frank Hartmann

Institut für Experimentelle Kernphysik

Überblick

- Wechselwirkung --- Teilchennachweis
- Bestimmung der Teilcheneigenschaften
 - Teilchenphysik
- HEP Detektoren
 - Spurdetektoren
 - Energiebestimmung
 - Teilchenidentifizierung

 - „Multipurpose“ (Vielzweck-) Detektoren
 - Infrastruktur

Wechselwirkungen

Eigenschaften

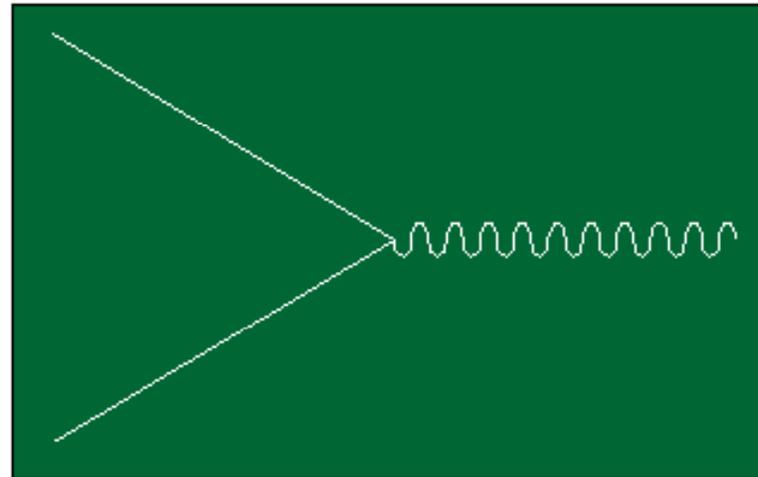
NACHWEIS

Teilchen können nicht “direkt” gesehen/gemessen werden.
Nur das Resultat einer Wechselwirkung mit dem
Detektor(material) kann beobachtet werden!
Schlussendlich wird alles konvertiert in

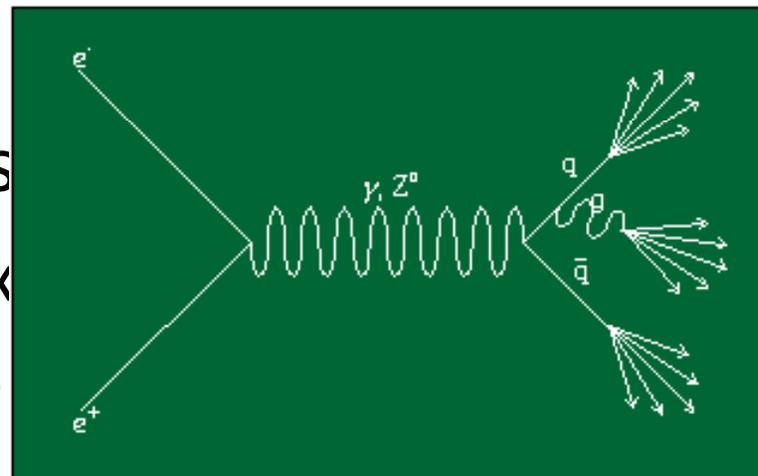
- Optische Bilder
- Strom oder Spannungssignale

Teilchen – Teilchen Interaktionen

- Streuung
- Annihilation
- und die Produktion neuer Teilchen



- All Ereignisse ents
– Colliding Beam Ex
– Fixed Target Expe



Wechselwirkungen

- **Photonen**

- Compton Streuung
- Photo Effekt
- Paarbildung

- **Geladene Teilchen**

- Streuung (mit Atomen, Elektronen, etc.) unerwünscht
- Ionisation (Herausschlagen eines Elektrons)
 - Bethe-Bloch-Formel
- Anregung/Excitation (Elektron in höheres Niveau → Rückfall → Lichtabstrahlung)
 - (z.B. Szintillatorlicht)
- Photonabstrahlung
 - Bremsstrahlung (beschleunigte Ladung strahlt Photonen ab)
 - Übergangsstrahlung (transition radiation)
 - Cherenkov Licht (Überlichtgeschwindigkeit im Medium)

- **Hadronische Wechselwirkungen**

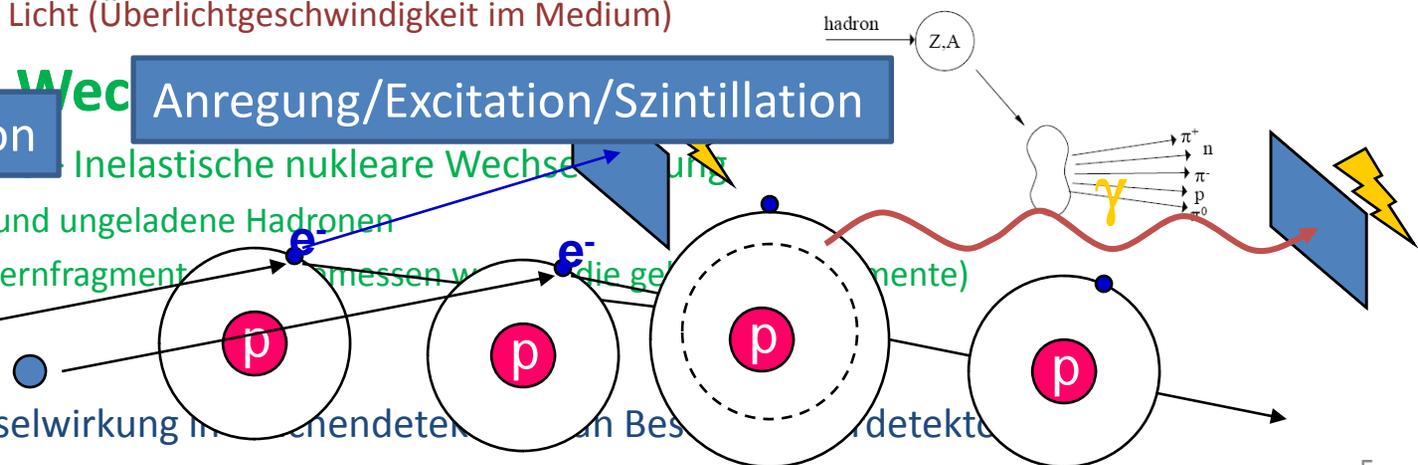
Ionisation

Anregung/Excitation/Szintillation

- **Streuung**
 - Inelastische nukleare Wechselwirkung
 - Geladene und ungeladene Hadronen
 - Resultat: Kernfragmente (gemessen via die geladenen Fragmente)

- **Neutrinos**

- „Keine“ Wechselwirkung im Standardmodell (nur an Besondere Detektoren)
- Signatur: Fehlende Energie (Missing Energy)



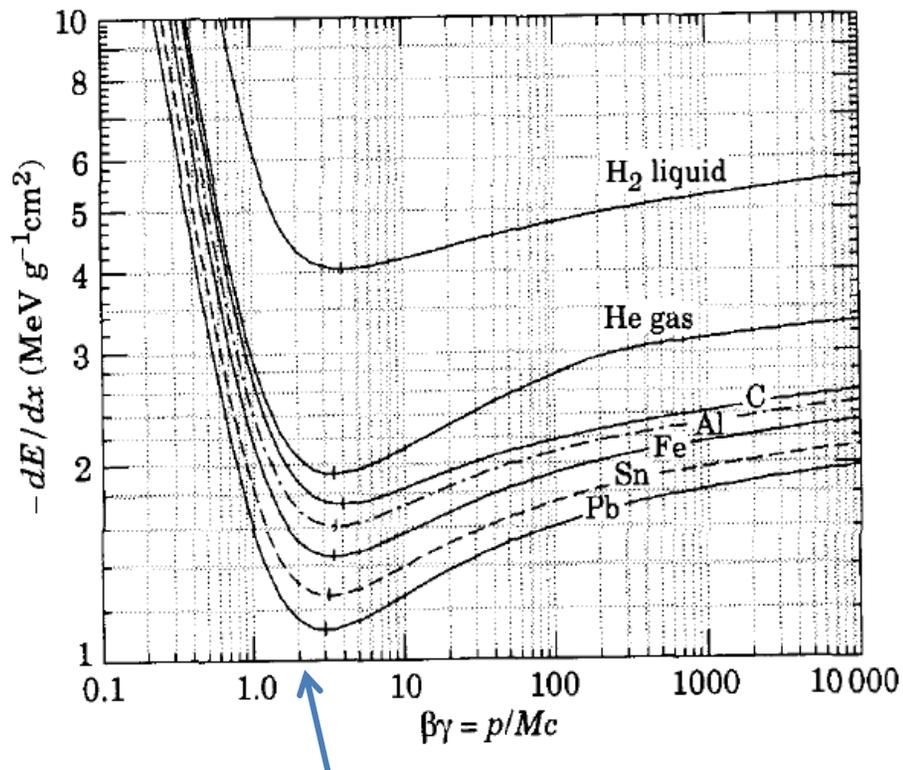
Ionisation: Bethe-Bloch-Formel

Colombwechselwirkung

Energieverlust der Teilchen pro Wegstrecke

→ Ionisation (Ionen, Elektron-Lochpaare können nachgewiesen werden)

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{coll}} = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z z^2}{A \beta^2} \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2 W_{\text{max}}}{I^2}\right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right]$$



Minimal ionisierendes Teilchen MIP

z ... Ladung des einfallenden Teilchens

Z, A ... Ordnungszahl und Massenzahl des Targets

ρ ... Targetdichte,

N_A ... Avogadrozahl

I ... mittleres Ionisationspotential (Materialkonstante des Targets)

W_{max} ... max. Energieübertrag in einer Einzelkollision

δ ... Dichtekorrektur (Polarisationseffekt, $\delta \approx 2 \cdot \ln \gamma + K$)

C ... Schalenkorrektur (wichtig für kleine Projektilgeschwindigkeiten)

β : Geschwindigkeit/ c

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

$$r_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{m_e c^2} \dots \text{klassischer } e^- \text{ - Radius}$$

Teilchen Eigenschaften

- Welche Eigenschaften hat ein Teilchen?
 - Energie
 - Impuls
 - Ladung
 - ~~– Masse~~
 - Lebenszeit (life time)
 - ~~– Spin~~
 - Zerfallsmoden
- Welche sind ***direkt*** messbar?

Teilchen Eigenschaften

$$\vec{p} = \left. \begin{array}{c} E \\ \left(\begin{array}{c} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{array} \right) \end{array} \right\} \left(\begin{array}{c} E \\ \vec{p} \end{array} \right)$$

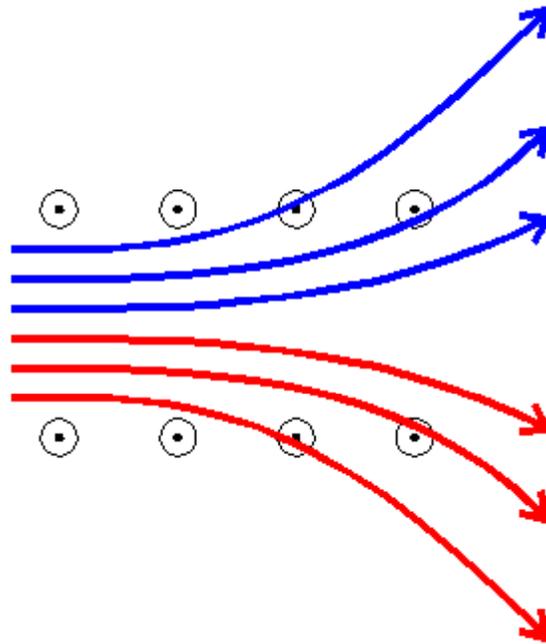
- Welche Eigenschaften können hergeleitet werden?

Masse: $E^2 = m^2 \cdot c^4 + \vec{p}^2 c^2 \Rightarrow m = \frac{\sqrt{E^2 - \vec{p}^2 c^2}}{c^2}$

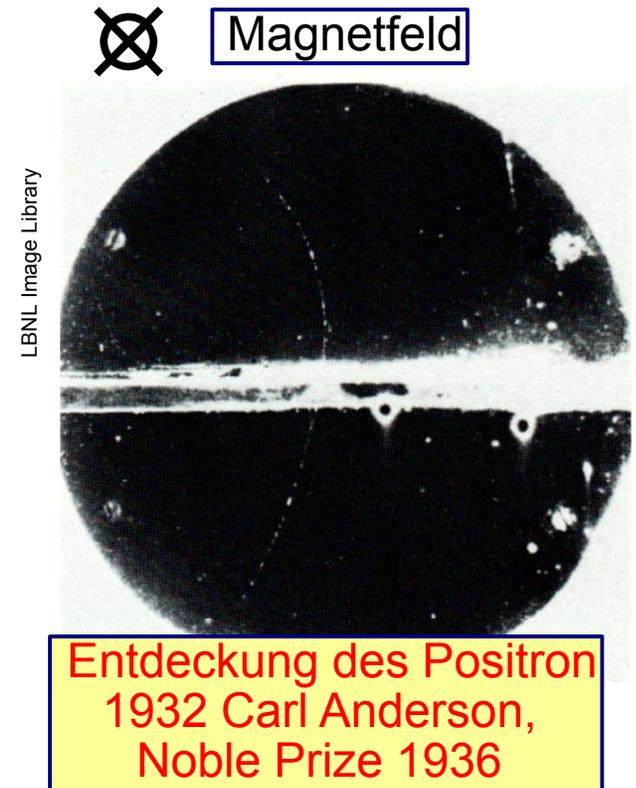
Spin: etwas abstrakter aus der Winkelverteilung

Messen der Teilcheneigenschaften

- Ladung
– Richtung

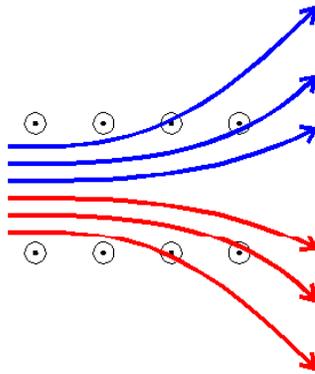


- Lifetime
– Messe Strecke



Messen der Teilcheneigenschaften

- Impuls



$$F = q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

$$\Rightarrow q \cdot B \cdot R = m \cdot v = |\vec{p}|$$

- Geschwindigkeit

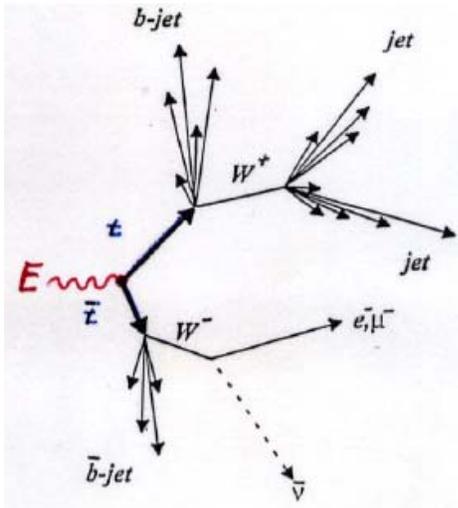
- Flugzeitmessung: time of flight TOF
- RICH (siehe später)

- Energie

- Kalorimeter

Das Prinzip am Beispiel eines TOP Quarks

Theorie



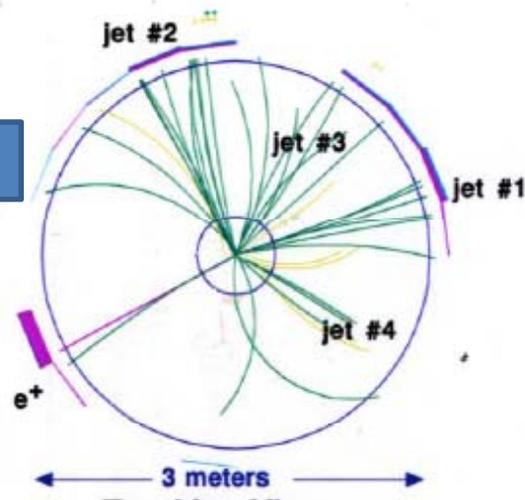
NACHWEIS ANHAND DER ZERFALLSPRODUKTE



Realer Detektor
CDF in Chicago

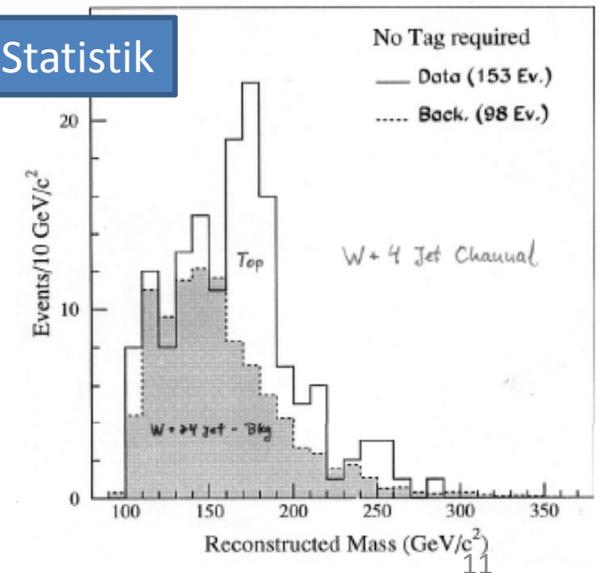


Ereignis



TOP-ANTITOP-EREIGNIS

Statistik

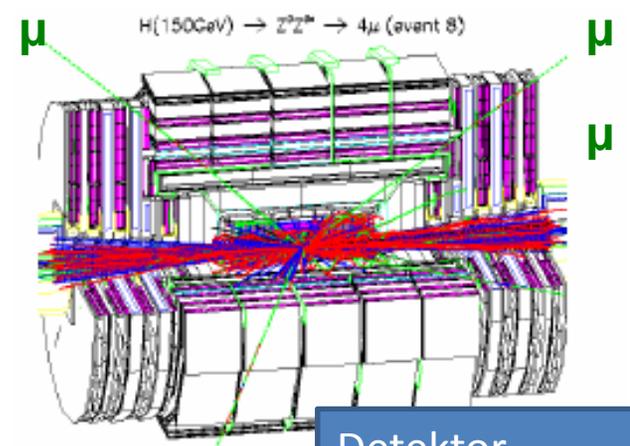
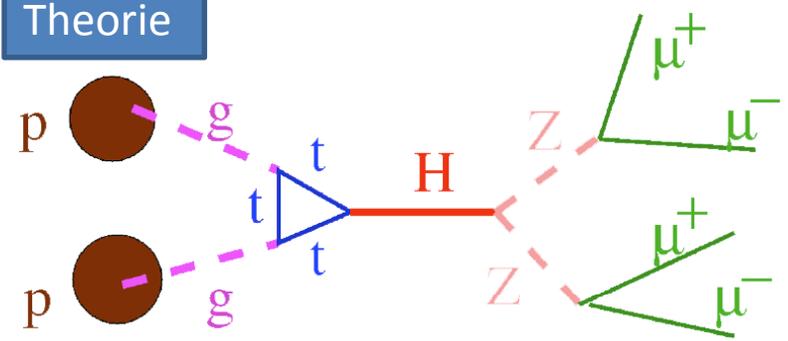


TOP-QUARK-SIGNAL

Higgs Boson, ein Beispiel

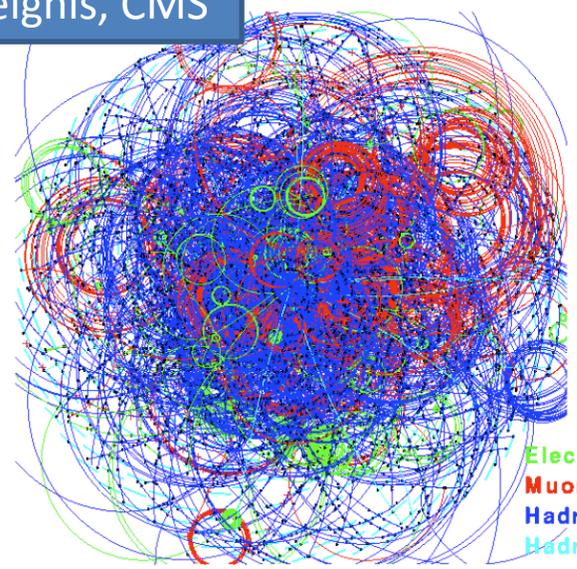
pp → H → ZZ → 4μ

Theorie



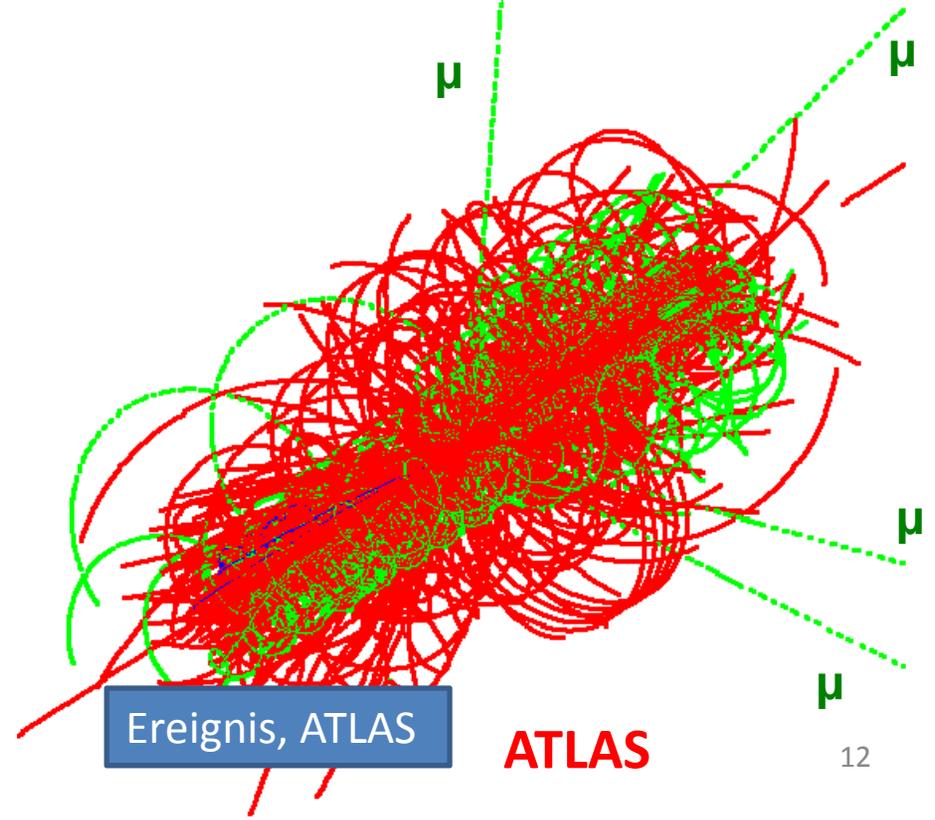
Detektor
CMS in Genf, CERN

Ereignis, CMS



CMS
H → μμμμ
m(H)=150GeV
+ 20 Min bias

Electrons
Muons
Hadrons pt<2GeV
Hadrons pt>2GeV



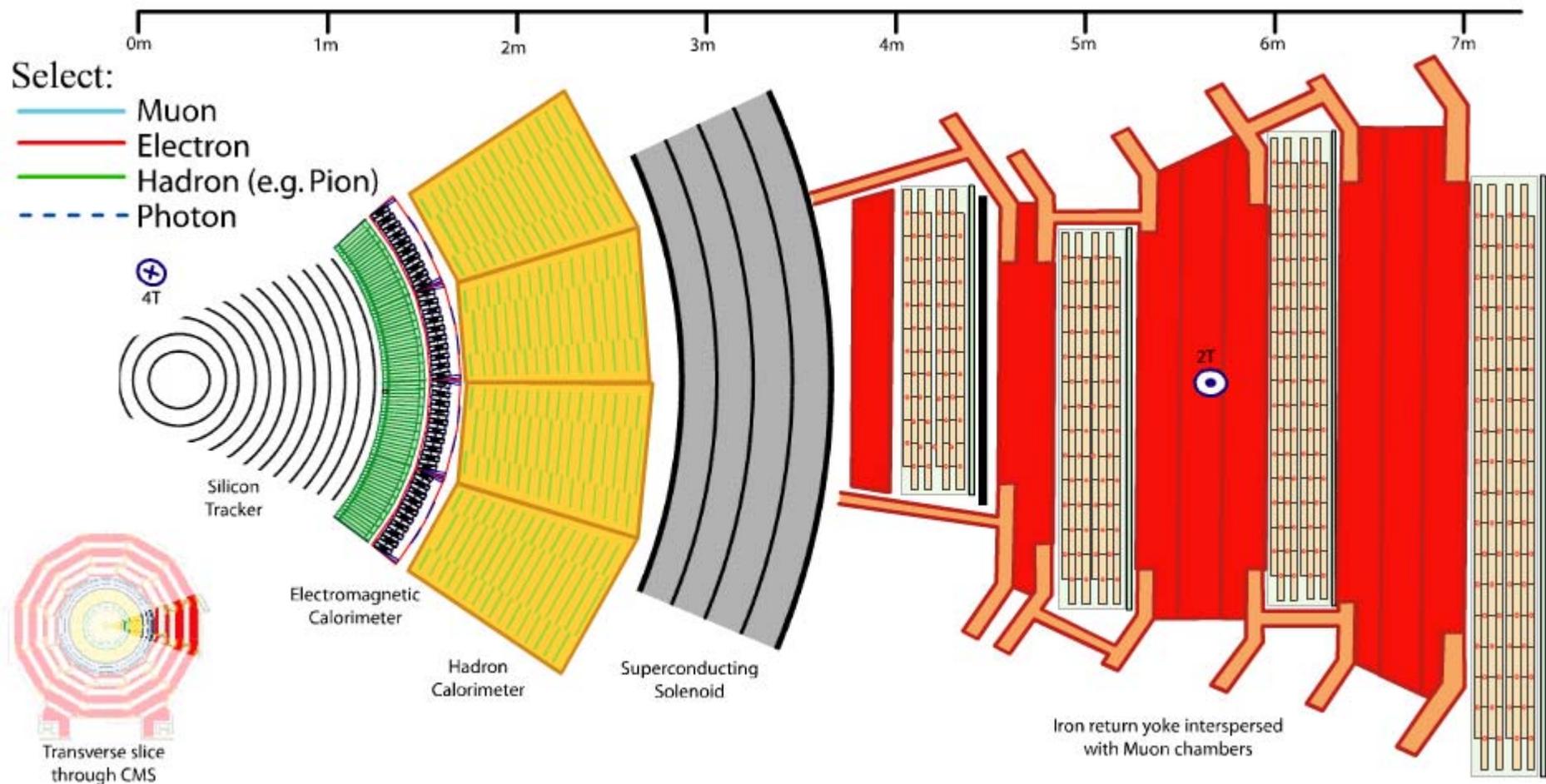
Ereignis, ATLAS

ATLAS

Schnitt durch den CMS Detektor

Teilchen Wechselwirkung und Rekonstruktion

Jedem Teilchen "SEINEN" Detektor



Spurdetektoren (Spur: Impuls, Ladung, Zerfall)

Kalorimeter (Energie)

ECAL: Elektromagnetisches Kalorimeter

HCAL: Hadron Kalorimeter

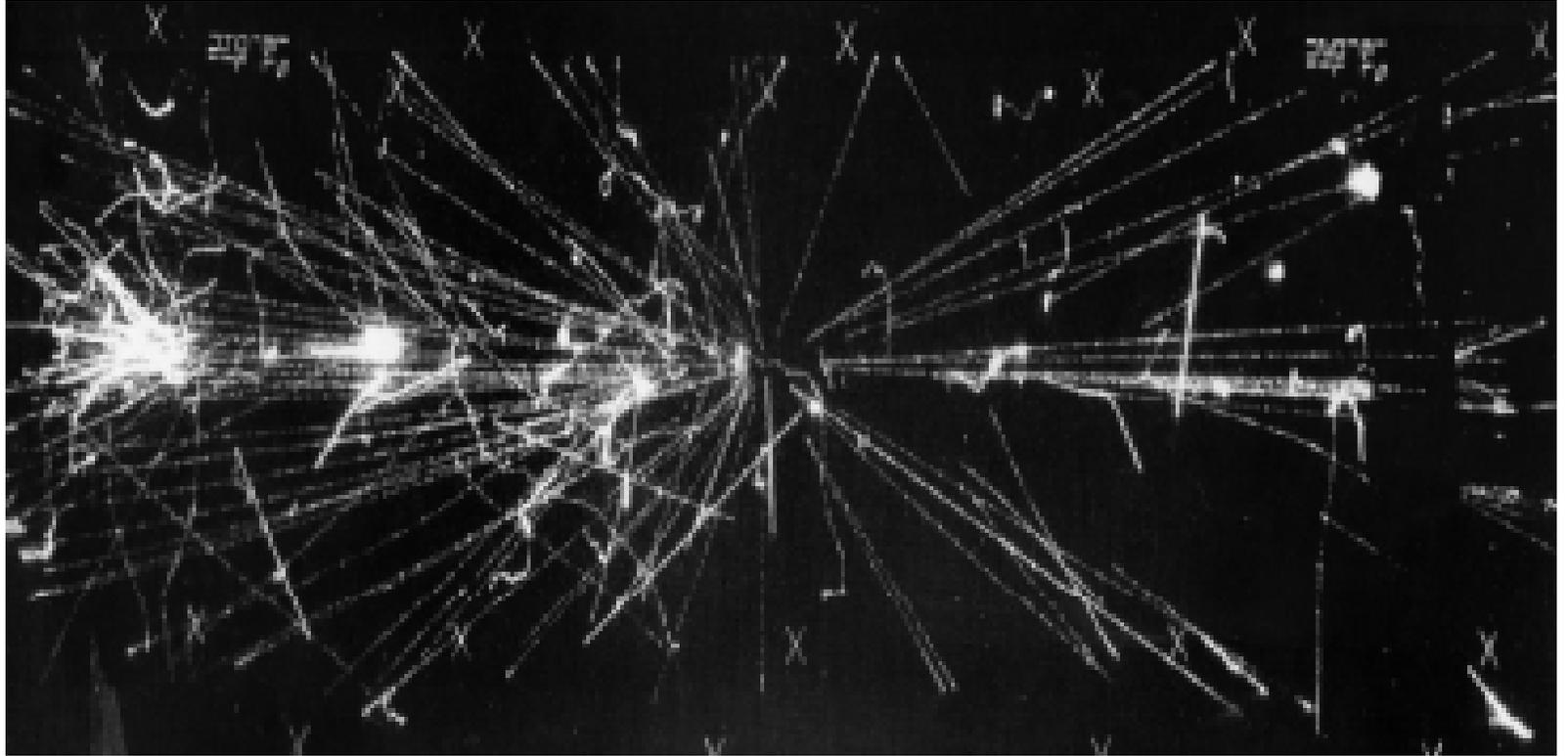
Teilchenidentifikation

Myonkammer (Spur, Myonnachweis)

Vielzweckdetektor

(Multipurposedetektor: alles zusammen)

DETEKTORARTEN



- Nebel-, (Funken-), Blasen-kammer

HISTORISCHE SPURDETEKTOREN

“Historischer” D

Anderson und seine Nebelkammer

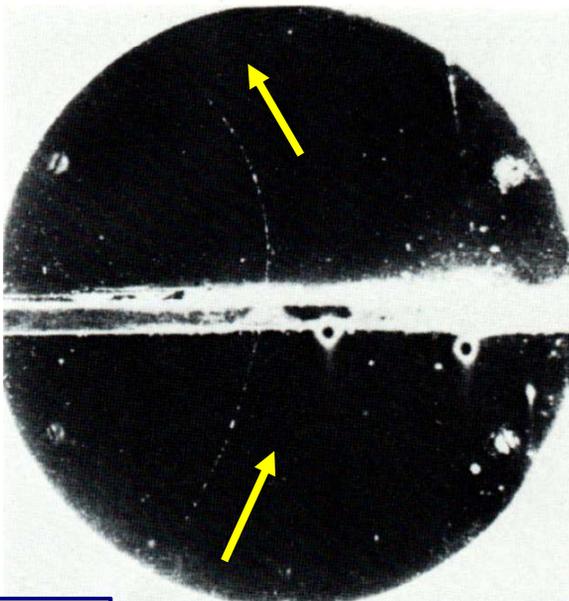
- **Nebelkammer** (1911 by Charles Wilson)
 - Kammer mit saturiertem Wasser
 - Geladene Teilchen hinterlassen Spur
 - Wasser kondensiert an den Ionen
 - Sichtbare Spur kleiner Wasserdropfen
 - **Photographie**



© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved. Commercial use or modification of this material is prohibited.

Charged particle Free ions Condensation droplets

LBL Image Library



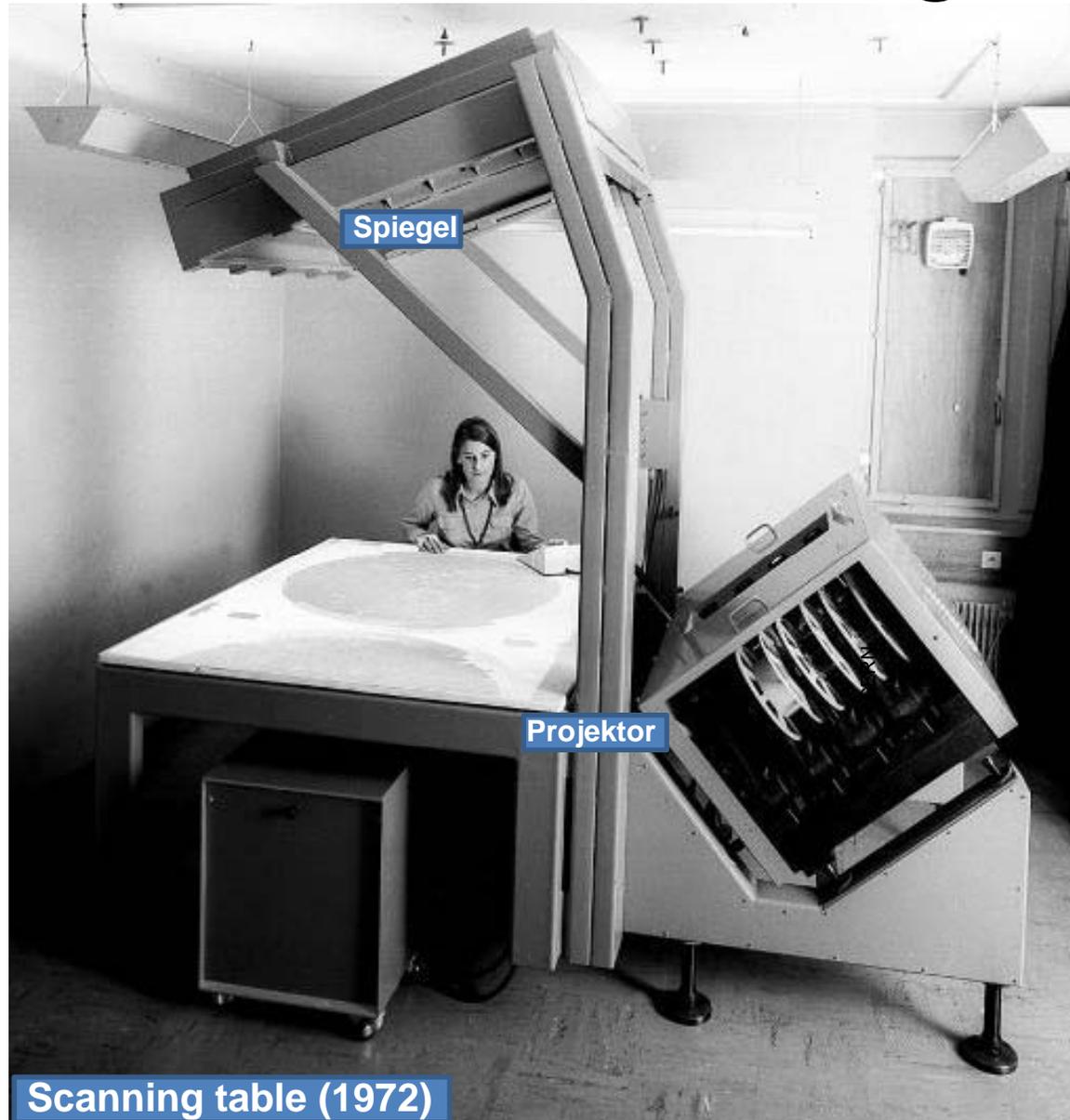
Stahlplatte

⊗ Magnetfeld

Positron

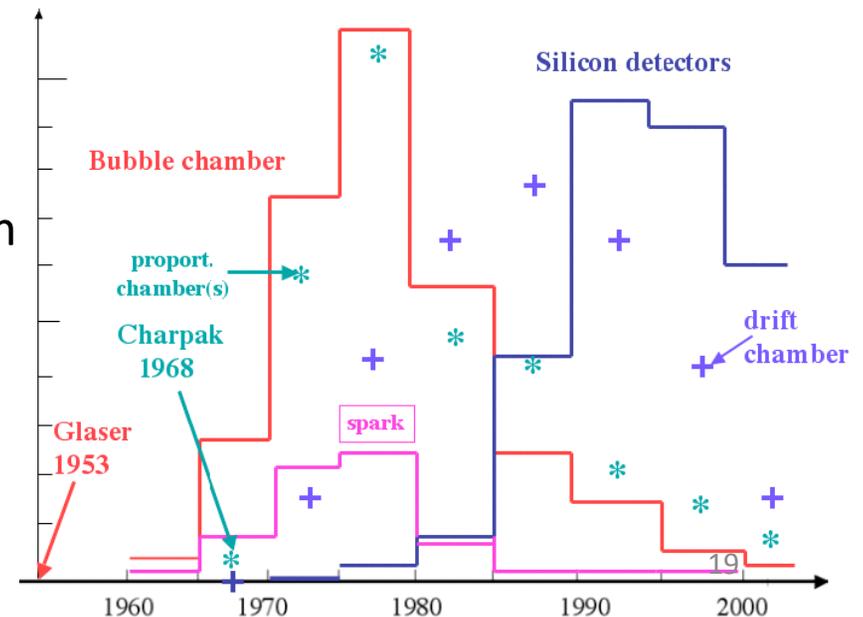
**Entdeckung des Positrons¹⁶
(1932 Carl Anderson, Noble Prize 1936)**

Die Soziale Komponente Das Zeitalter der „Scanning Girls“



Detektoren, geschichtlich

- Nebelkammern dominierten bis in die 50er
 - Aktuell sehr populär in Ausstellungen 😊
- Blasenkammern hatten ihren Höhepunkt 1960-1985
 - Letzte große Blasenkammer: Big European Bubble Chamber; zu besichtigen im CERN Mikrococosmos
- Draht- und Driftkammer dominierten seit den 80er
 - Noch heute im Einsatz
- Seit den frühen 90er sind Halbleiterdetektoren im Einsatz
 - Zu Beginn: kleine Vertexdetektoren
 - Heute ~200 m² Siliziumspurendetektor in



Historische Detektoren

Nebelkammer (Cloud Chamber)

Blasenammer (Bubble Chamber)

Funkenkammer

Gasdetektoren

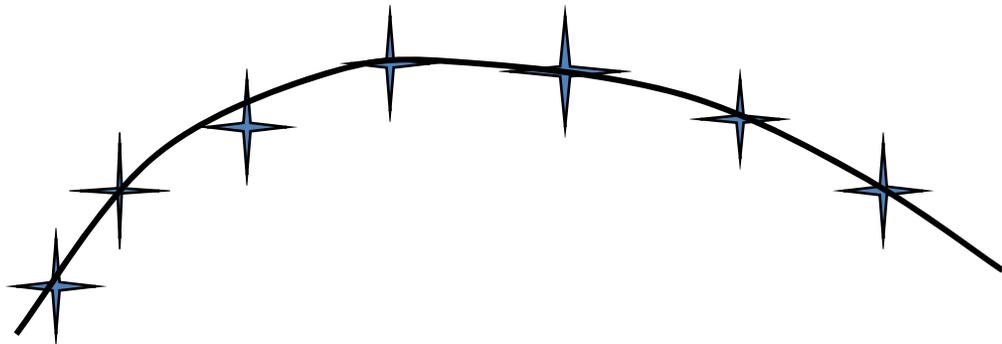
Festkörper- (Halbleiter-) Detektoren

(Szintillator-Spurendetektor)

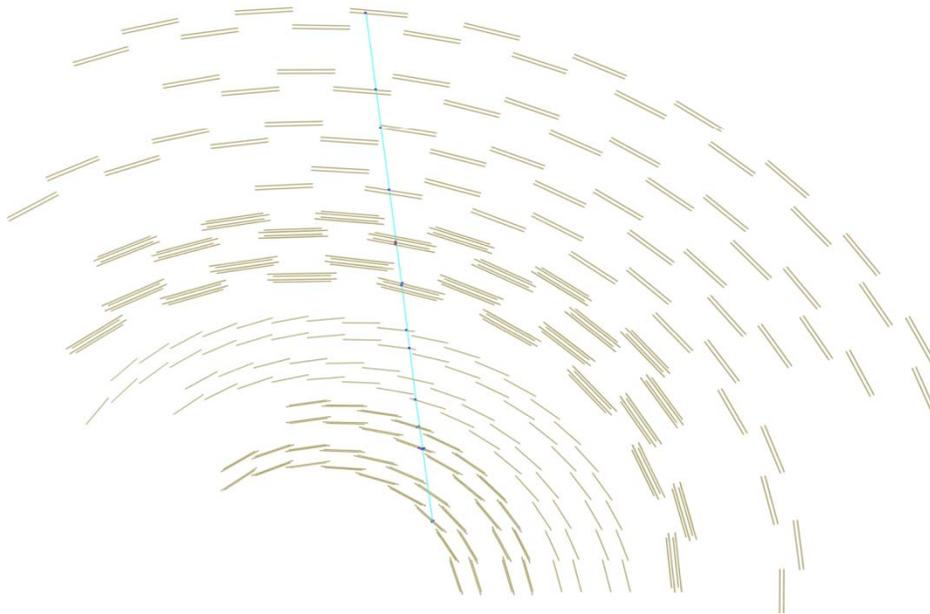
SPURENDETEKTOREN HEUTE **ELEKTRONISCHE DATENNAME**

Funktion von Spurendetektoren

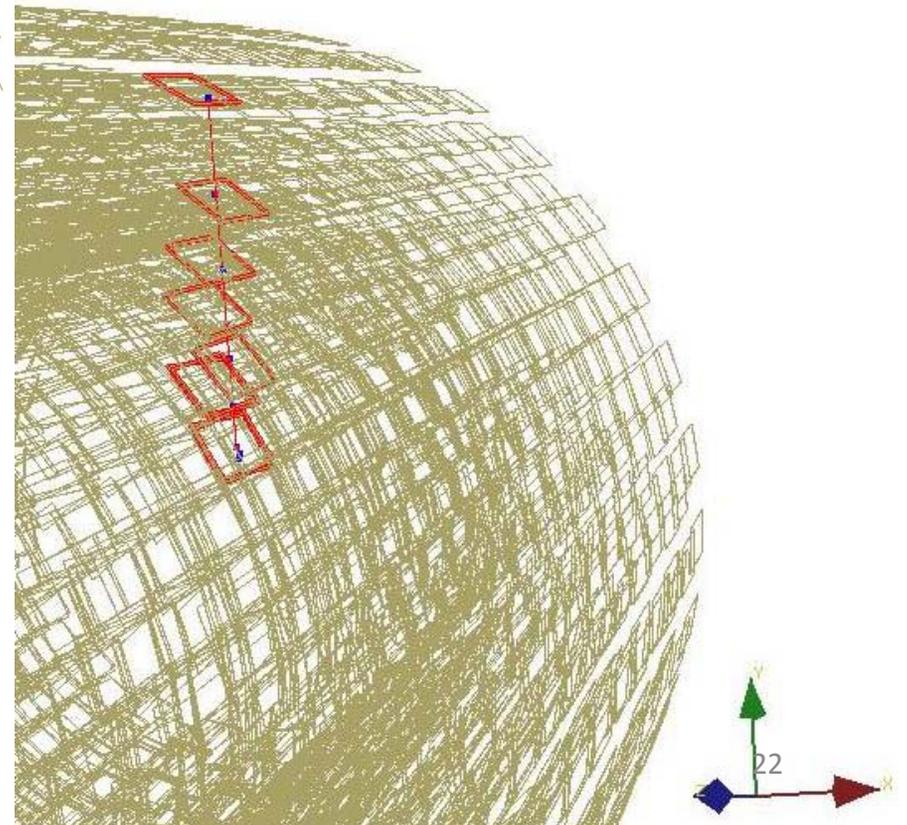
- Vermessung der Teilchenspur
 - Ermittle
 - Ladung
 - Impuls
- in Verbindung mit einem Magnetfeld
- Spuren werden aus Raumpunkten rekonstruiert



Rekonstruktion der Spuren



CMS Spurdetektor aktuell im Test



Ionisationszähler (Geiger-Müller-Zähler)

Proportionalkammer

Vieldrahtproportionalkammer

Driftkammer

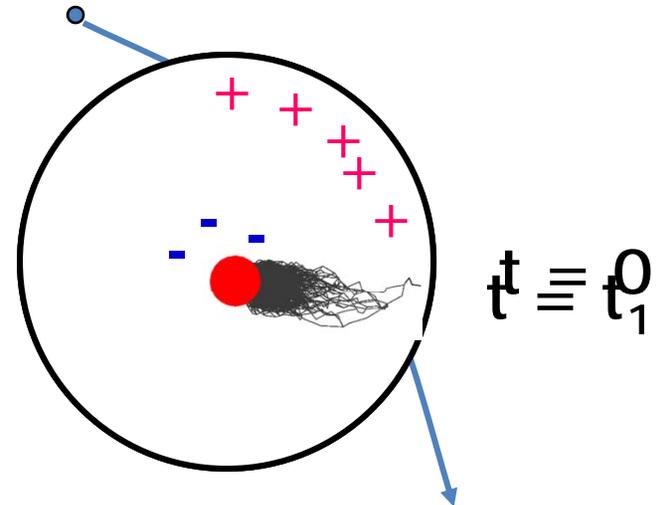
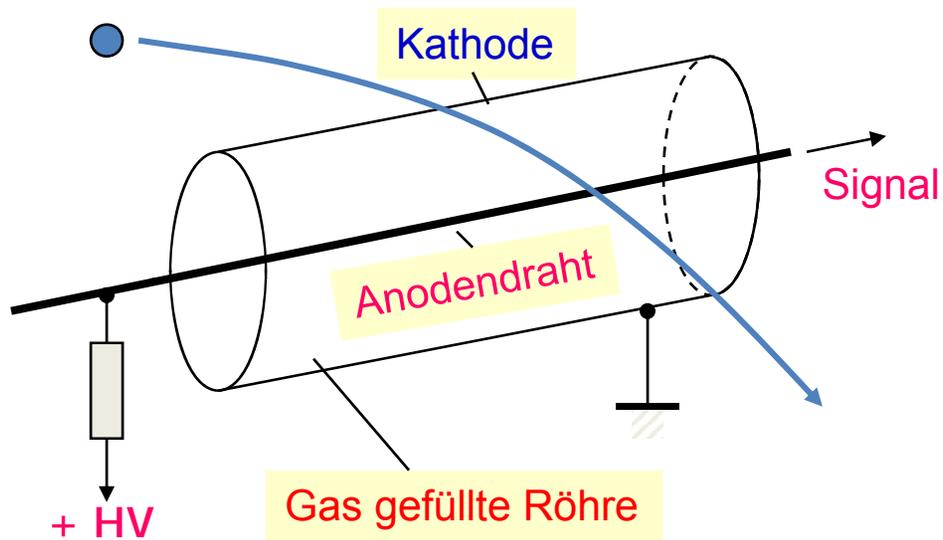
Zeitprojektionskammer

Mikro-Streifen-Gasdetektoren

Resistive Plate Chambers

SPURENDETEKTOREN GAS

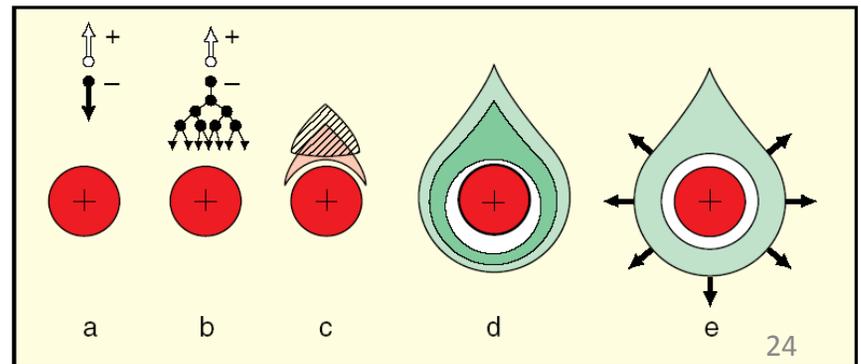
Ionisationszähler



- Lawinenbildung nahe der Anode
- Signal proportional zur deponierten Energie

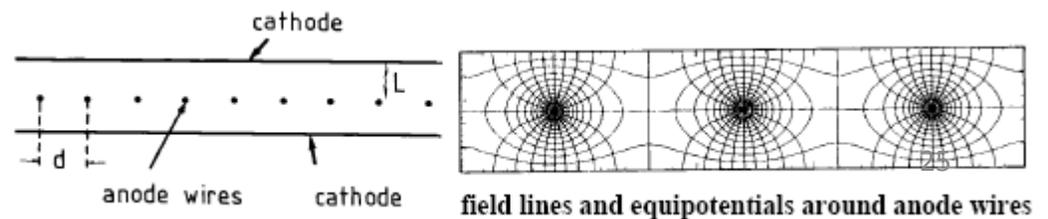
Signalentwicklung

F.Sauli, CERN 77-09



Entwicklung der Gasdetektoren

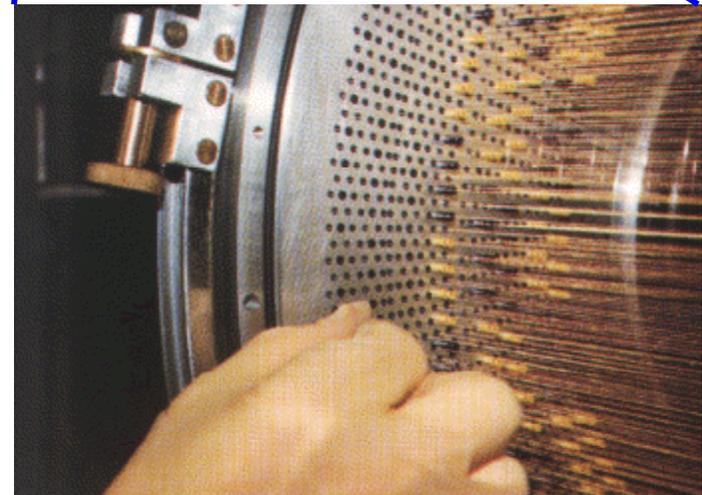
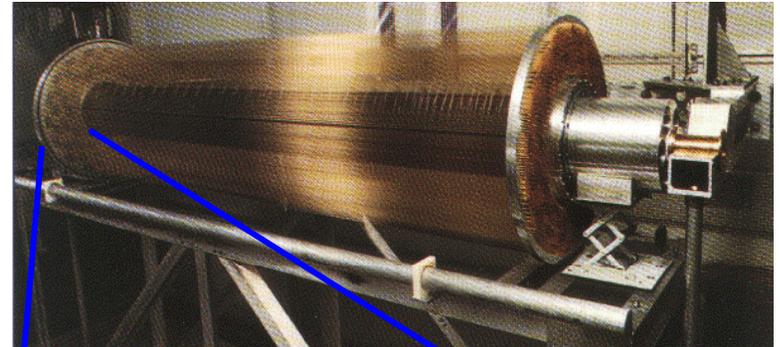
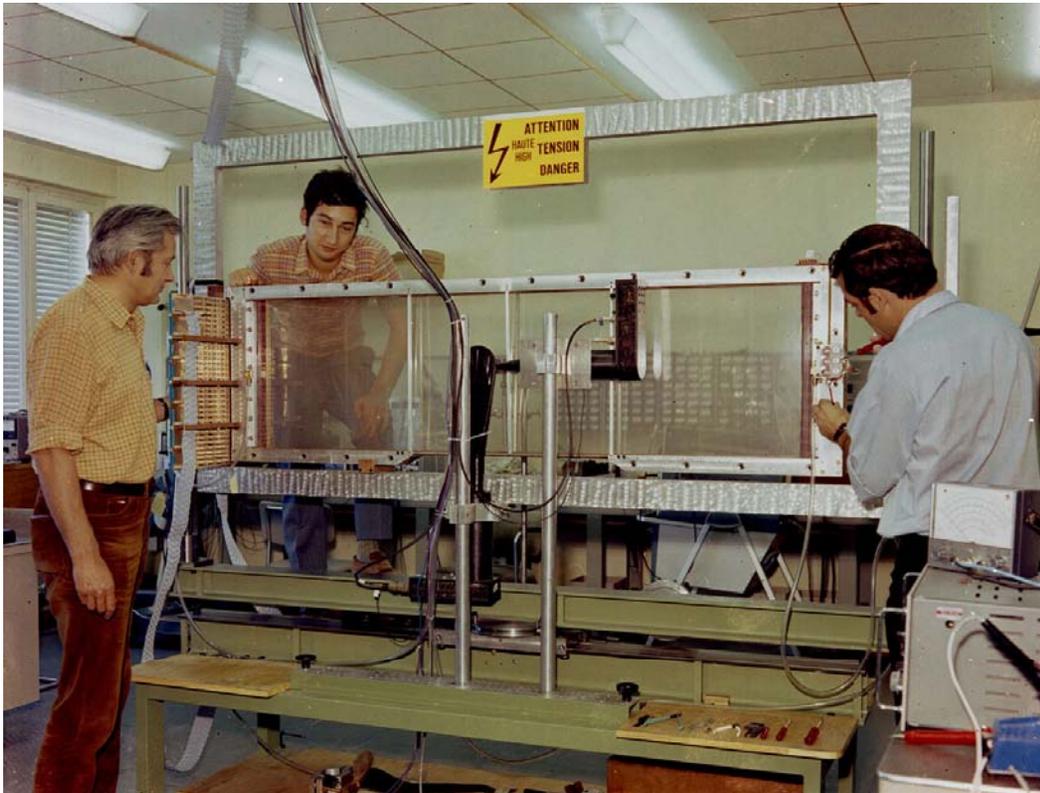
- **Geiger-Zähler:** Binäre Antwort
 - Anzahl Teilchen
 - Jedes Teilchen gleiche Ladung
- **Proportionalzähler:**
 - Primärionisation → Sekundärionisation (Lawine)
- **Vieldrahtproportionalkammer**
 - Viele Proportionaldrähte in einer Kammer
 - Anodendrähte wechseln mit Kathoden ab
 - Ortsauflösung (Spurenerkennung)
 - Nobelpreis: G. Charpak, 1992



MWPC

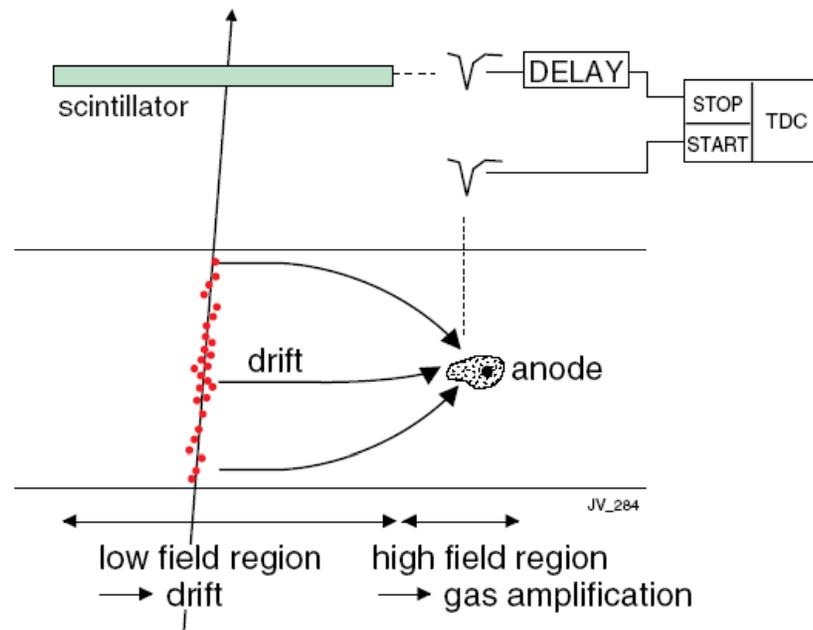
ITC (ALEPH)

Inner Tracking Chamber



Driftkammer

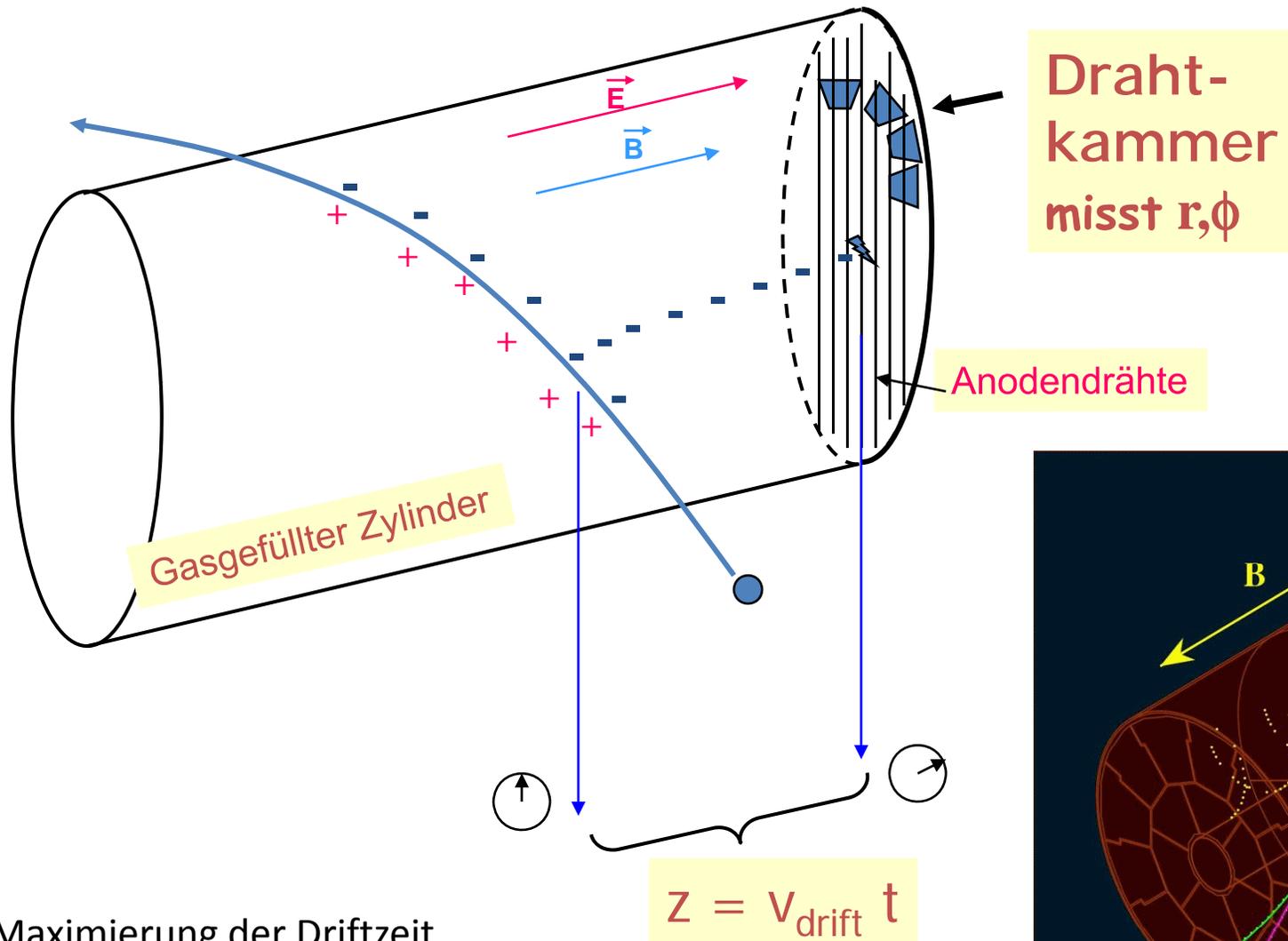
- Standard Drahtkammern sind begrenzt in der Auflösung durch den minimalen Drahtabstand
- Driftkammern weiten den Abstand und berücksichtigen die Driftzeit
 - Natürlich muss die Zeit des Teilchendurchgangs bekannt sein



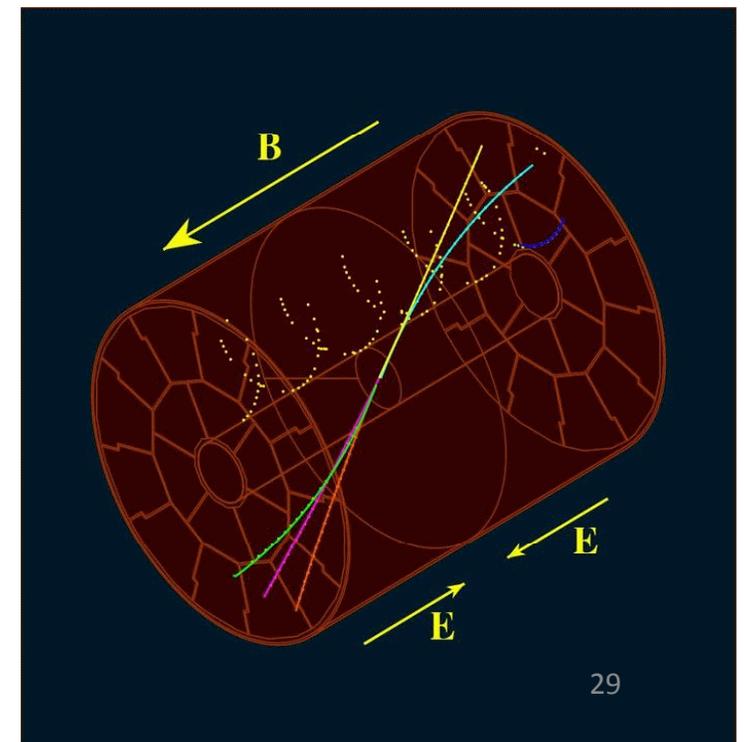
Kloe Driftkammer in Frascati

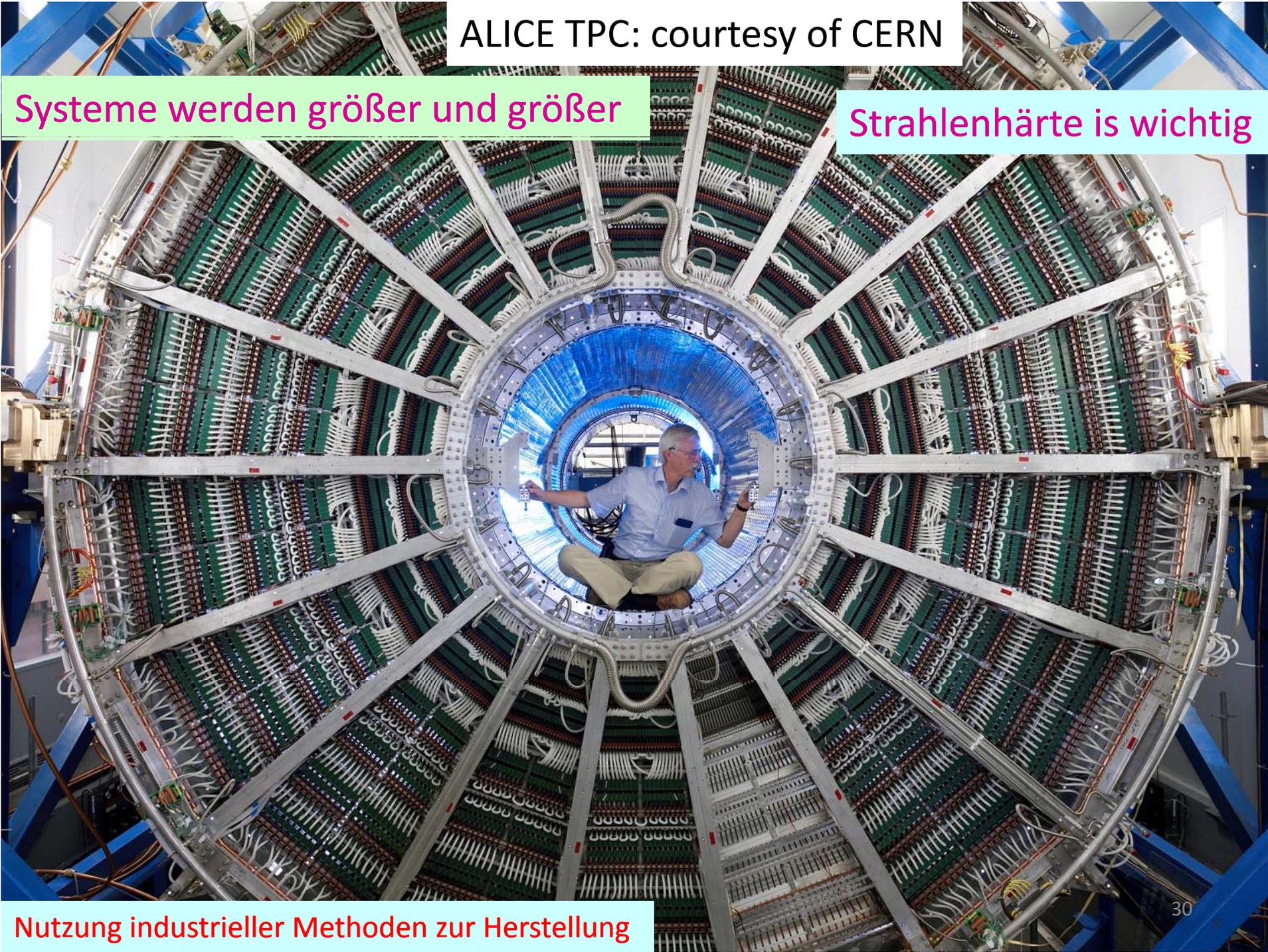


Zeitprojektionskammer (TPC)



Maximierung der Driftzeit
 Nicht für große Raten geeignet
 Perfekt für (1) Elektron-Positron Kollider
 und (2) Schwerionen Kollider



The image shows the ALICE TPC detector, a large cylindrical structure composed of many layers of green and white components. A person is sitting in the center of the detector, providing a sense of scale. The detector is surrounded by a complex network of cables and structural supports.

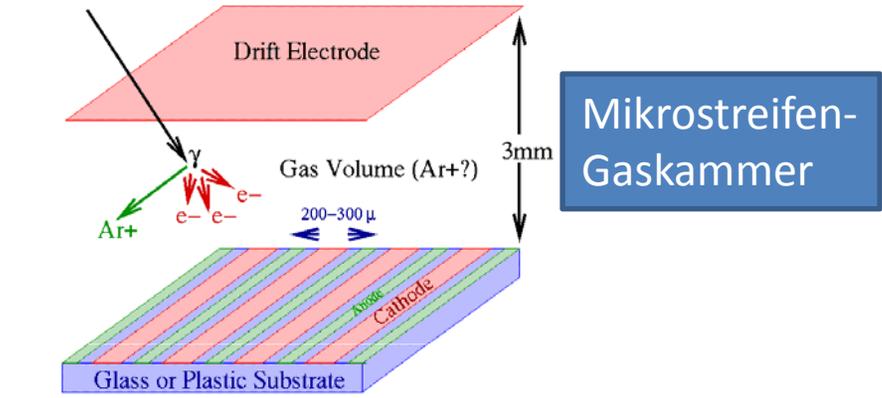
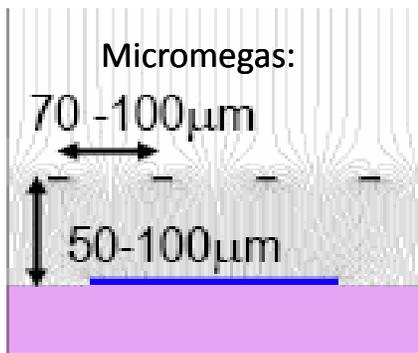
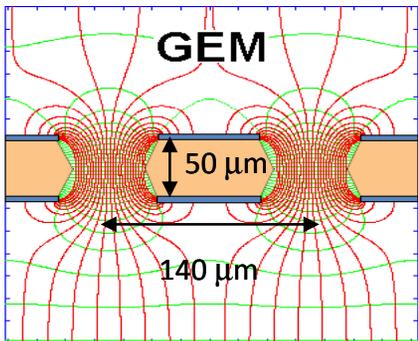
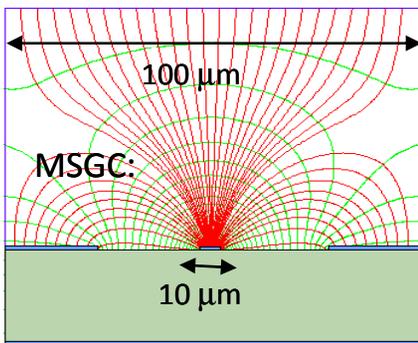
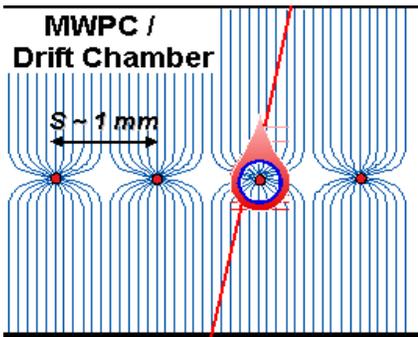
ALICE TPC: courtesy of CERN

Systeme werden größer und größer

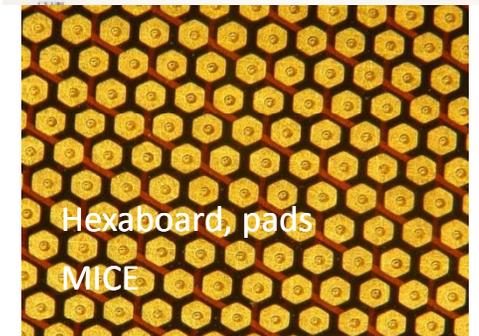
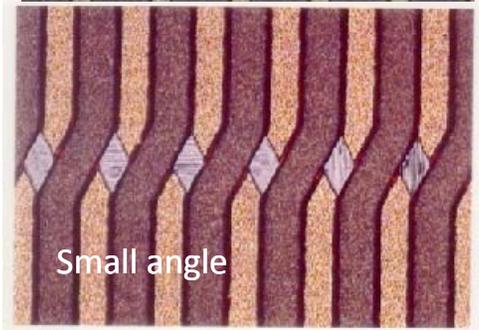
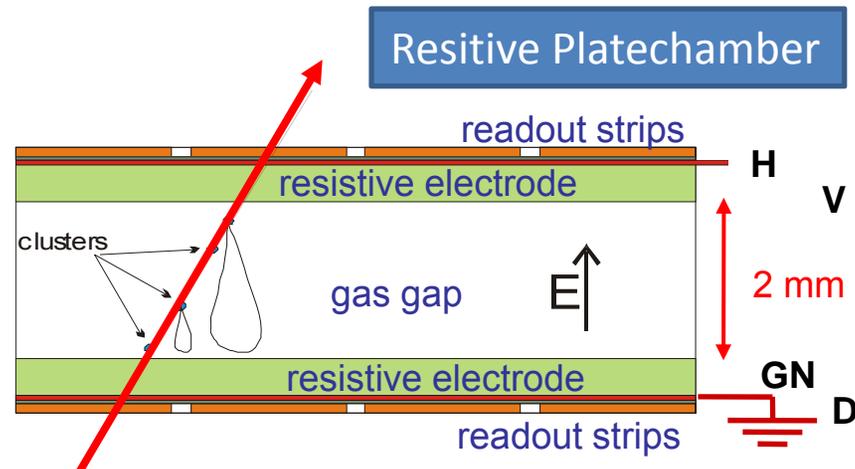
Strahlenhärte ist wichtig

Nutzung industrieller Methoden zur Herstellung

Gasdetektoren ohne Drähte



- Strukturierte Ebenen statt Drähte
- Dünne Kammern; HOCHspannung
- Spezielle Feldkonfigurationen zur Gasverstärkung



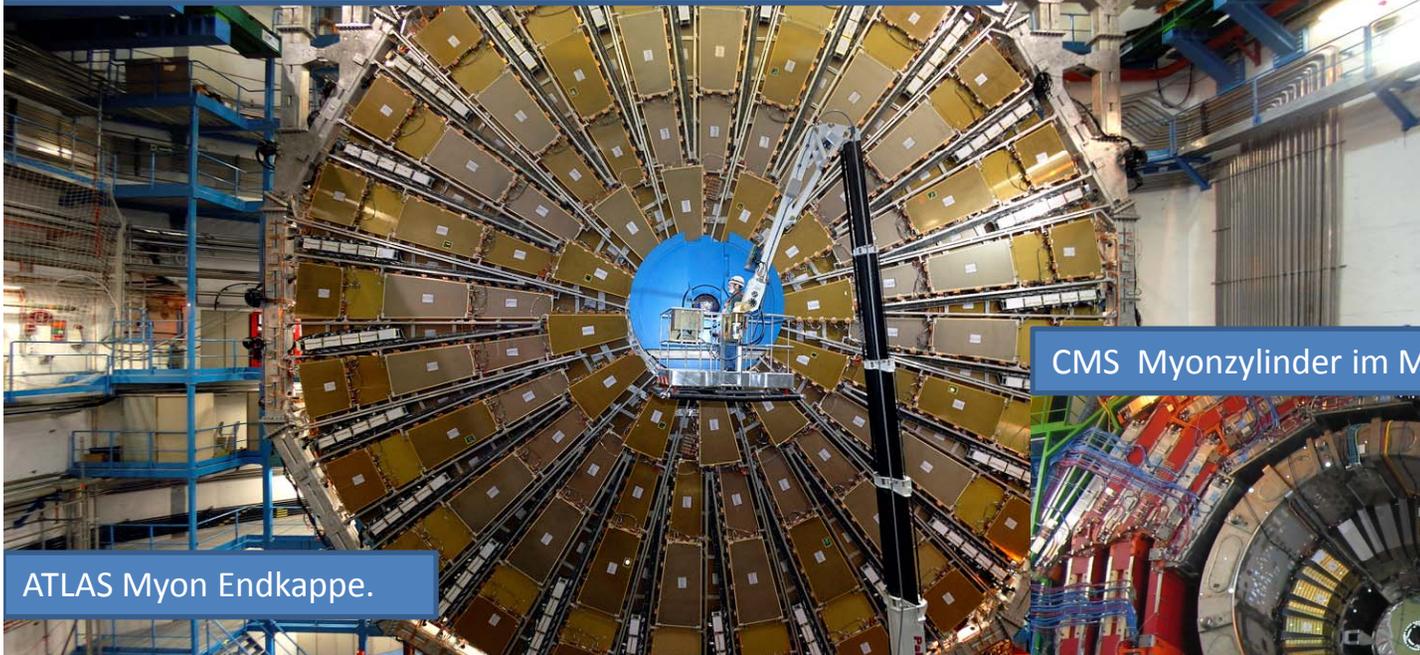
Myonen-“detektoren”

Myonen passieren sowohl die Kalorimeter, als auch das Magnetjoch

→ alles außerhalb sind Myonen (abgesehen von Neutrinos)

→ Gasdetektoren messen nun die Myonenspur im Magnetfeld

ATLAS 1200 Myonen-Kammern mit 5500 m²



ATLAS Myon Endkappe.

CMS Myonzylinder im Magnetjoch.



Myonendetektoren

Neuer Chip mit Zeitauflösung TIMEPIX @ Freiburg

TIMEPIX Chip: Add 3rd coordinate (TIME) and TOT

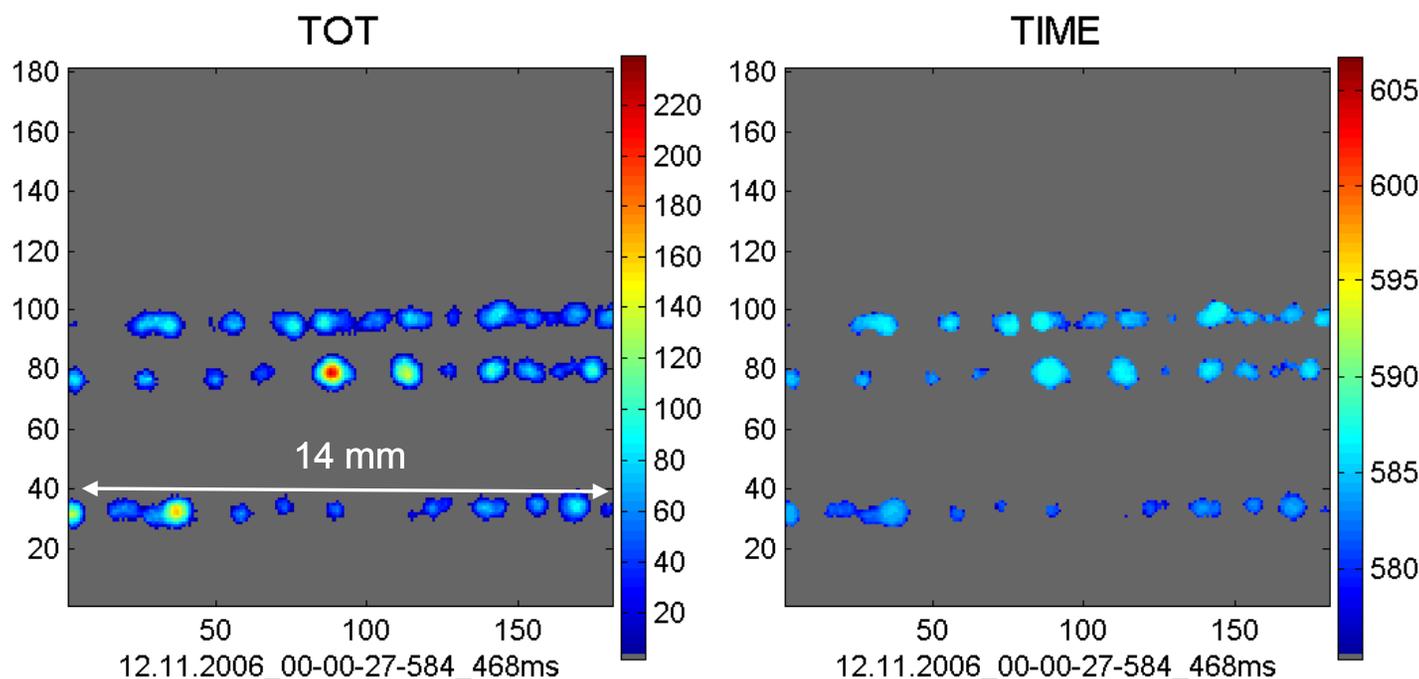
TIME Mode → determine time arrival of electron
(clock ~ 48 MHz, 580-600 counts range → ~ 400 ns)

Time Over Threshold (TOT) Mode →
possibility to evaluate cluster charge and to correct
for time-walk (25 - 600 count range → 800 - 35000 e⁻)

Mixed Mode (both measurements at the same time) →
consecutive pixels are in TOT / TIME mode

FINE GRANULARITY
3D TRACKING
+ TOT Information :

- Superior double track resolution
- Benefit from TOT & TIME information simultaneously (correct timewalk using TOT)



Hier mit Gasetektor
Funktioniert aber auch
mit anderen Sensors

Streifenzähler

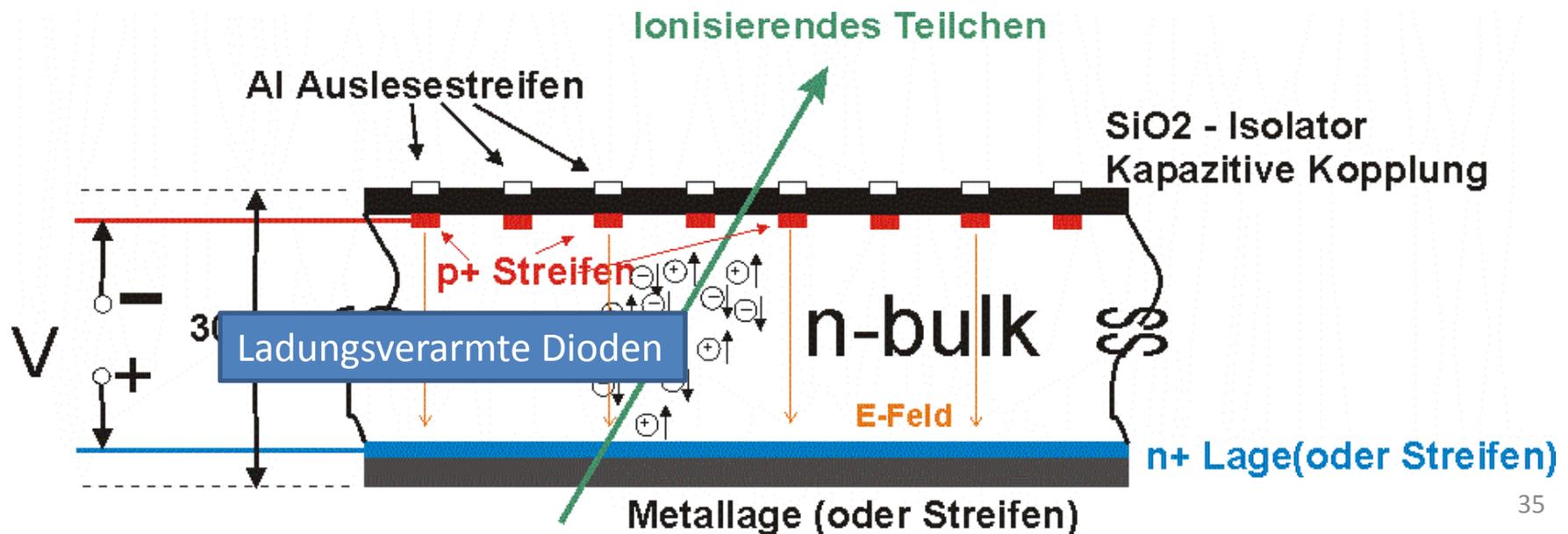
Pixel

(Silizium-Drift-Sensor; DepFET, CCD, CMOS)

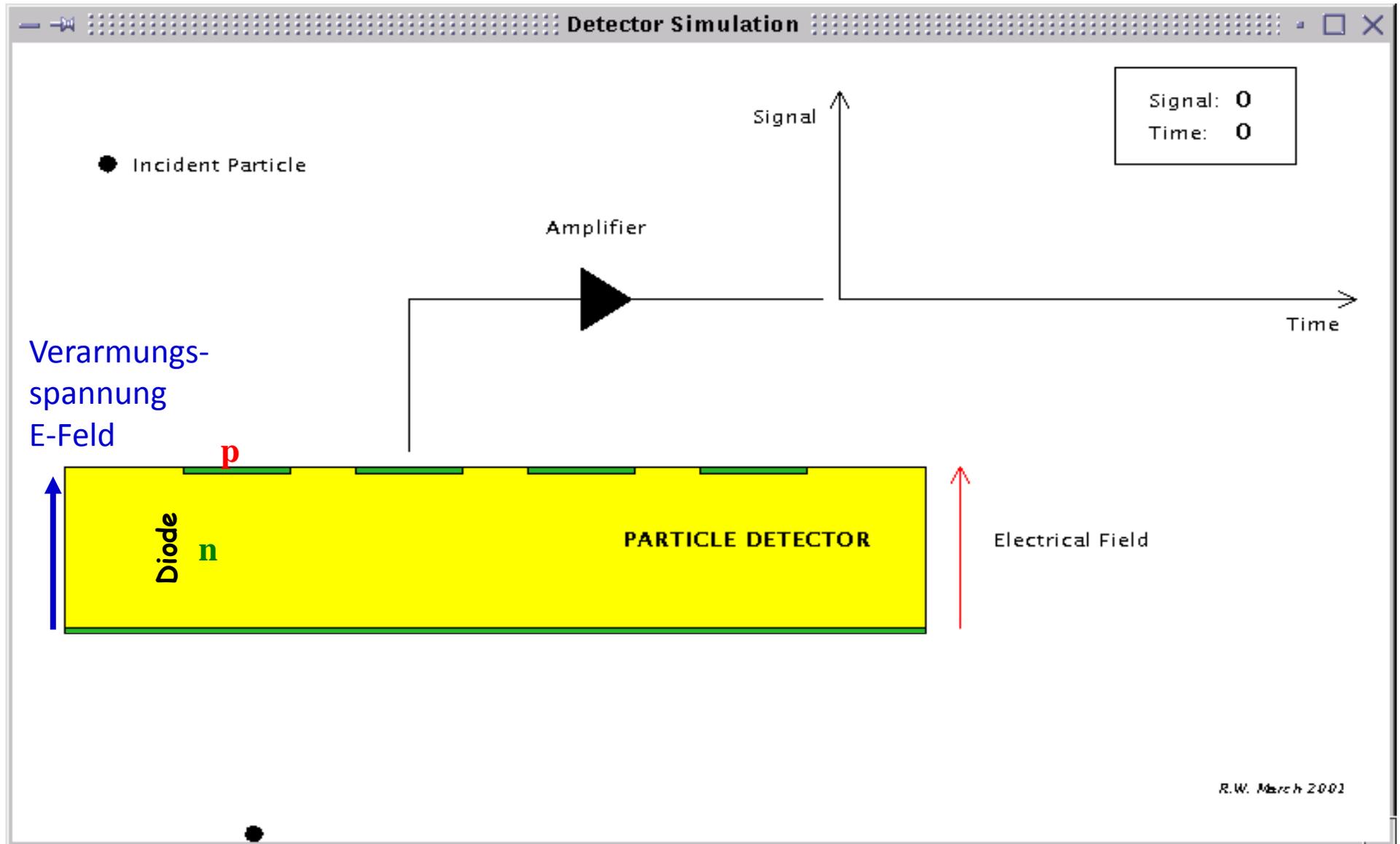
HALBLEITERDETEKTOREN - SILIZIUM

Halbleiterdetektoren (Silizium)

- Funktionsweise: Siehe Gasdetektoren ;-)
 - Ionisation im Festkörper, statt im Gas
 - **Keine** Ladungsverstärkung!
 - Ca. 10^{12} freie Ladungsträger gegenüber 10^8 erzeugte Ladungsträger (bei Zimmertemperatur) ☹️ → **Ladungsverarmung nötig**
 - Segmentierung / Strukturierung von Dioden, welche in Sperrrichtung betrieben werden!

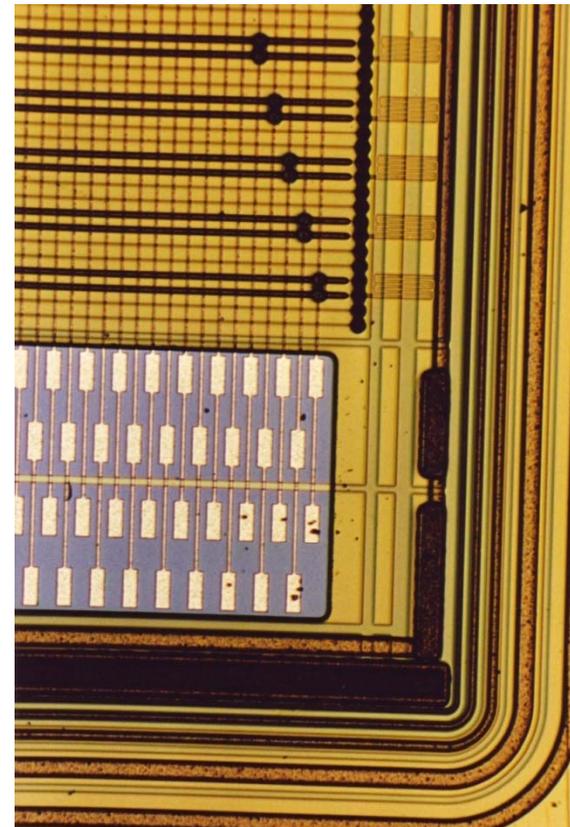
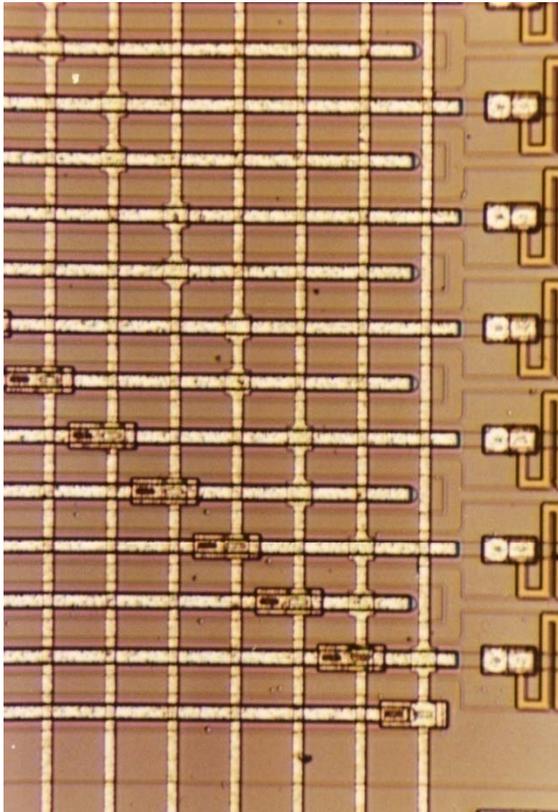


Funktionsweise



R.W. March 2001

Siliziumstreifendetektor von oben und Ihre Eigenschaften



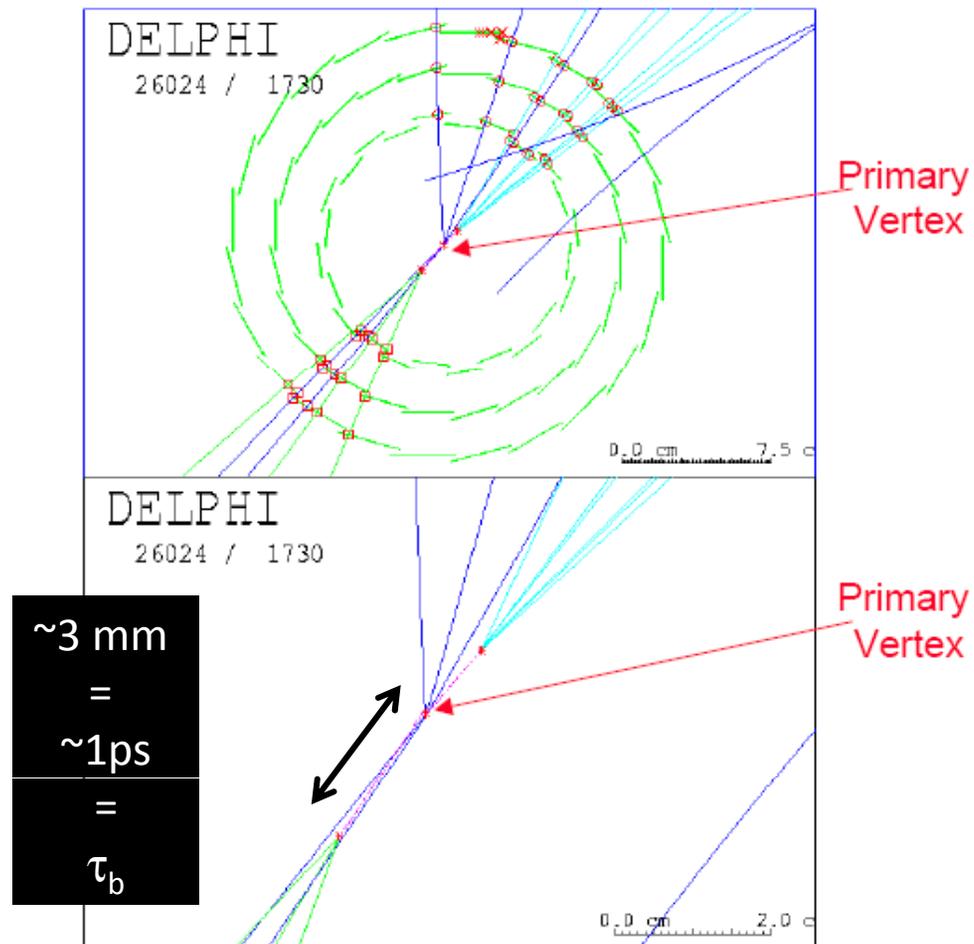
- Sehr kleine Streifenabstände möglich 20-200 μm
- Sehr gute Auflösung $\sim 3\text{-}5\mu\text{m}$
- Sehr schnell

Braucht man so eine hohe Auflösung?

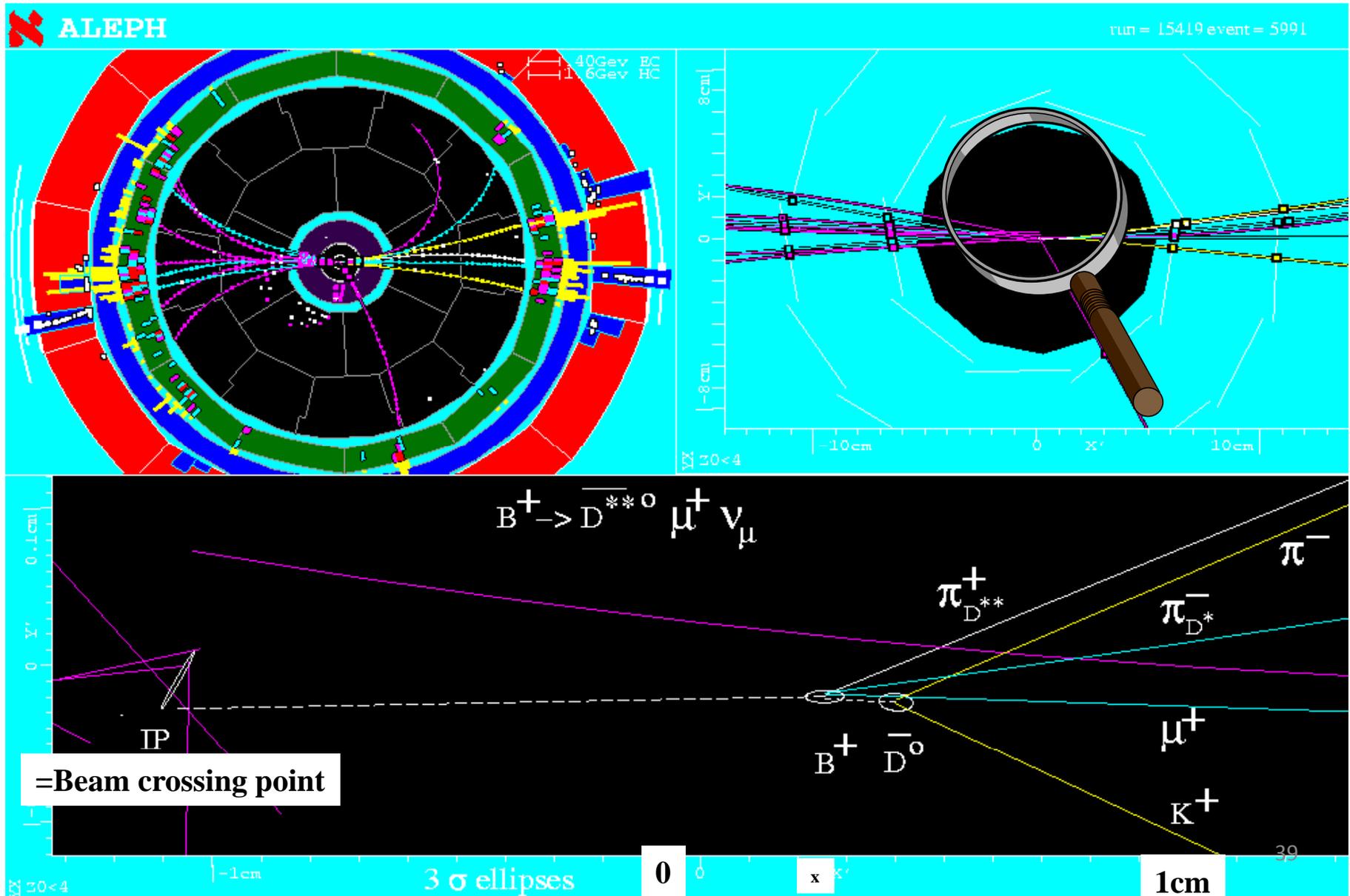
Reconstructed B-mesons in the DELPHI
micro vertex detector

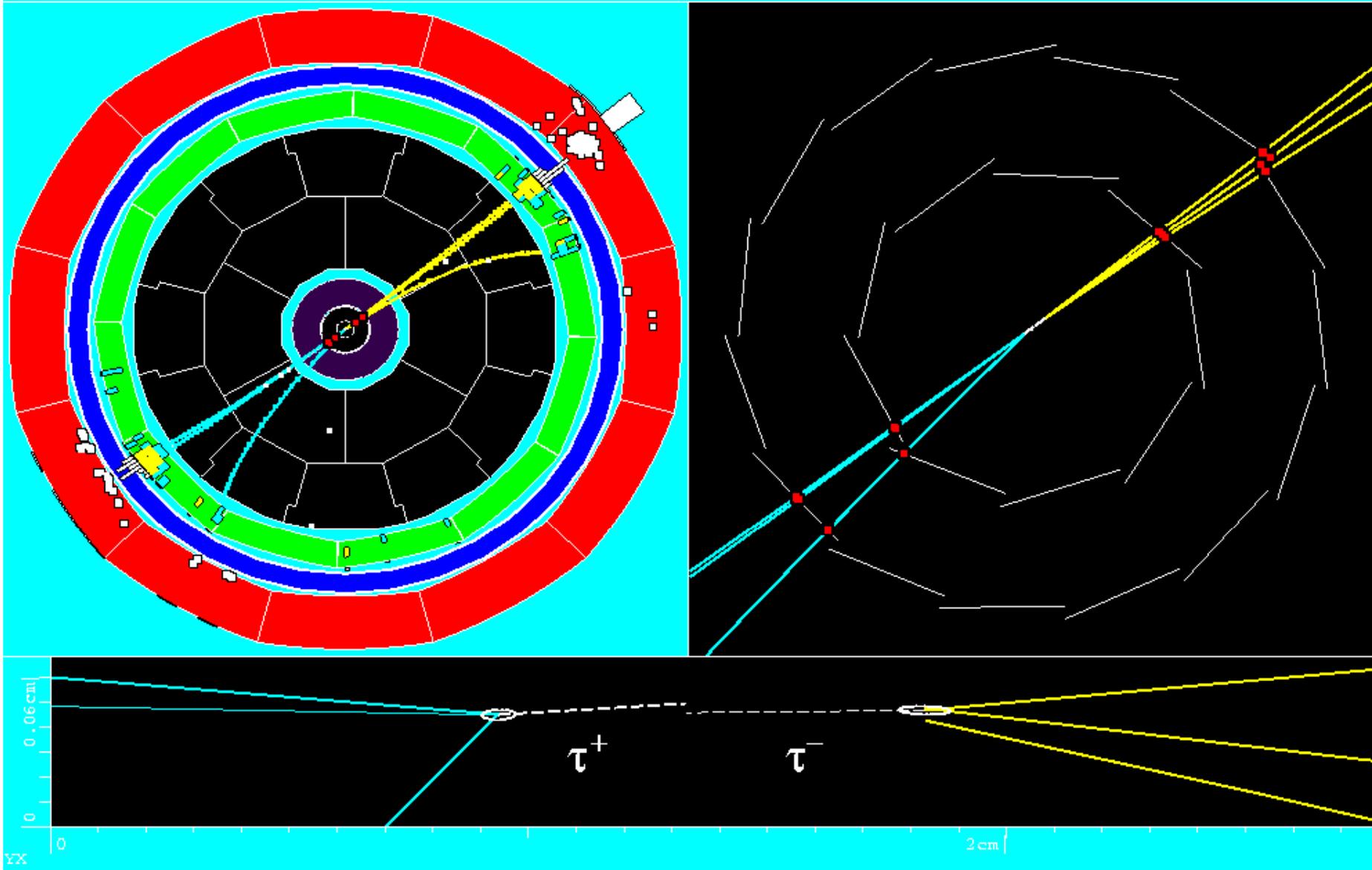
$$\tau_B \approx 1.6 \text{ ps} \quad l = c\tau \approx 500 \text{ } \mu\text{m} \cdot \gamma$$

Identifikation eines
b-Quark Ereignisses



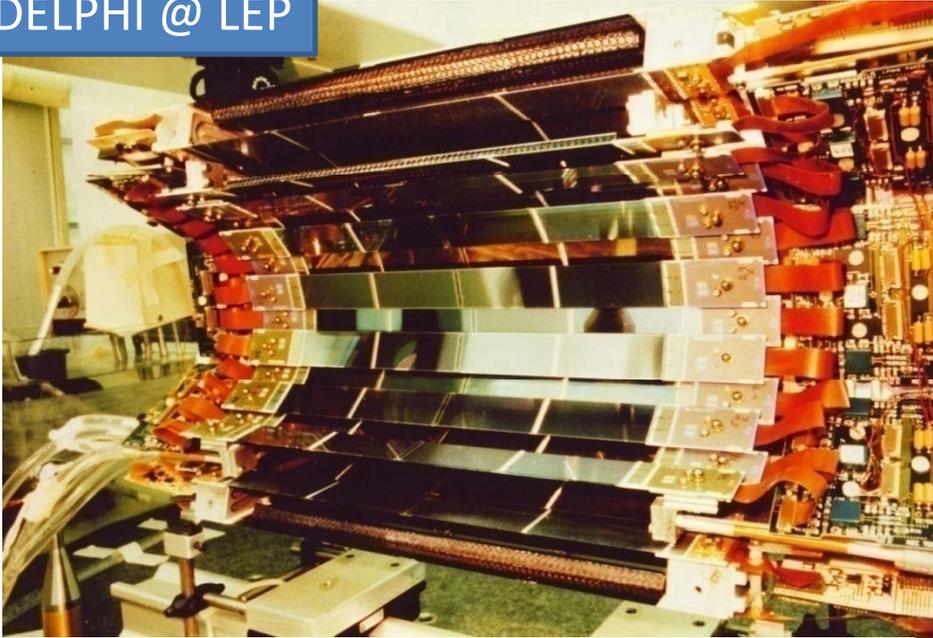
Increase in precision



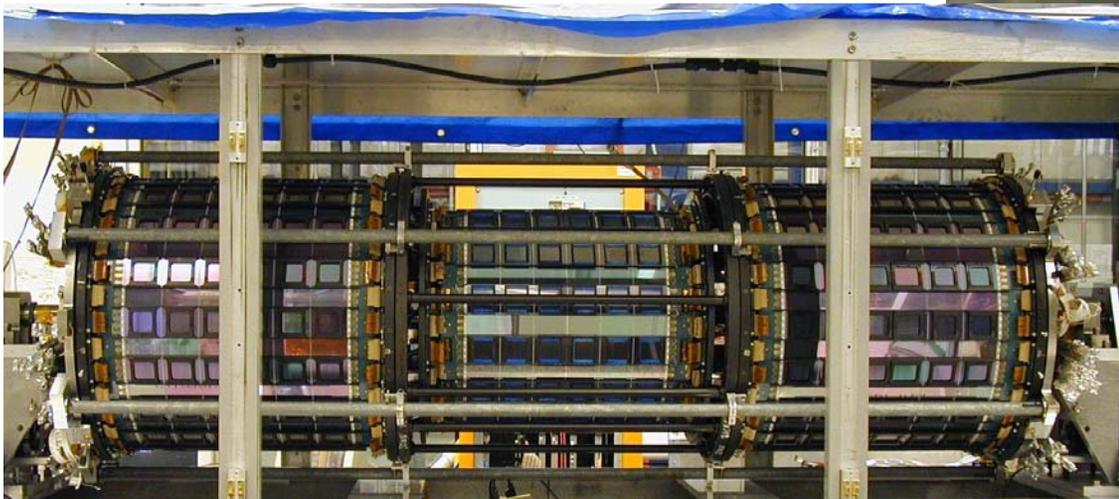
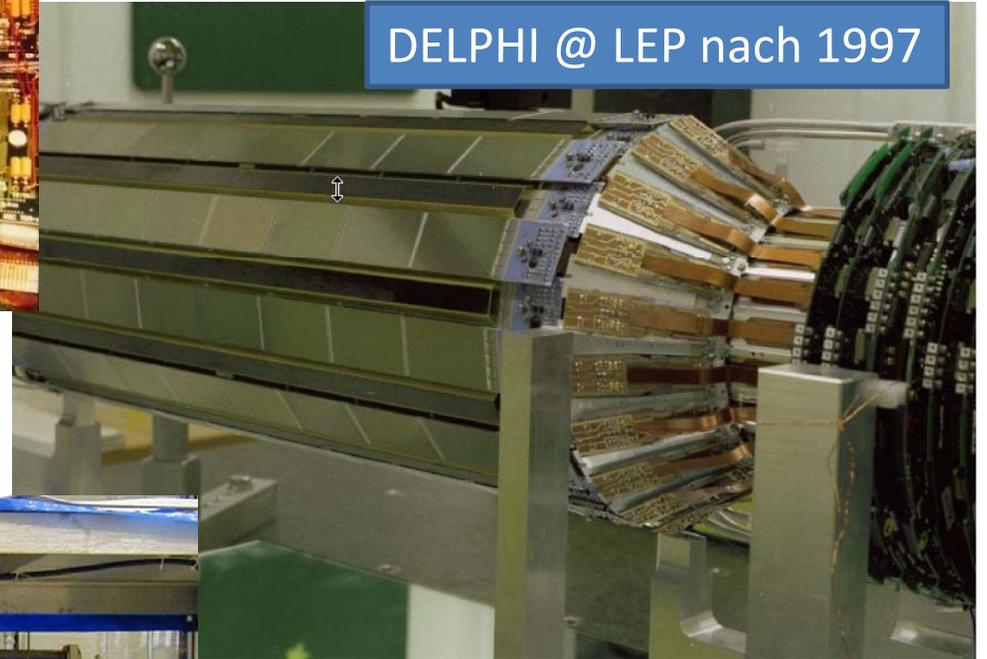


Mean Lifetime of tau $\tau = 290 \times 10^{-15}$ sec !! --> $c\tau = 87 \mu\text{m}$!?

DELPHI @ LEP



DELPHI @ LEP nach 1997

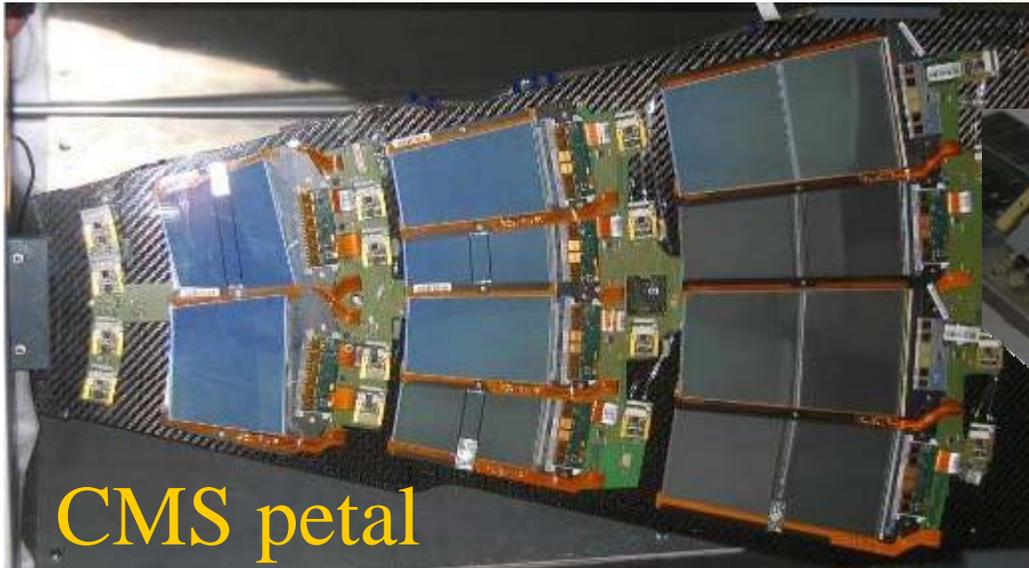


CDF @ Fermilab in Chicago (nimmt aktuell Daten)

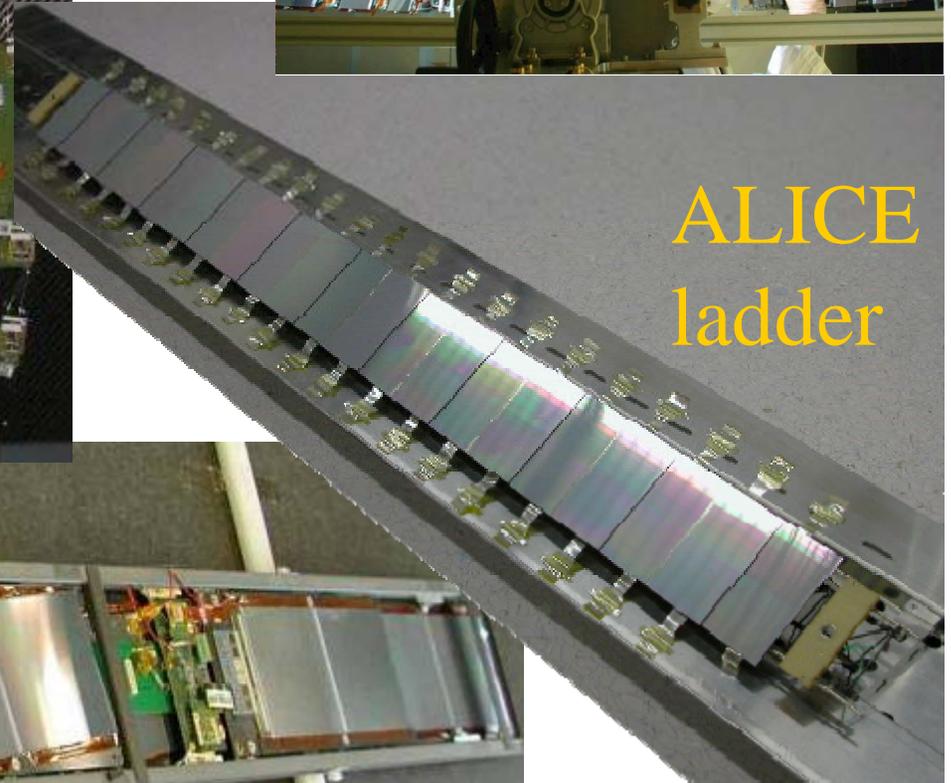
Blütenblätter & Stäbe & Leitern & Halbschalen: Wer baut denn so was?



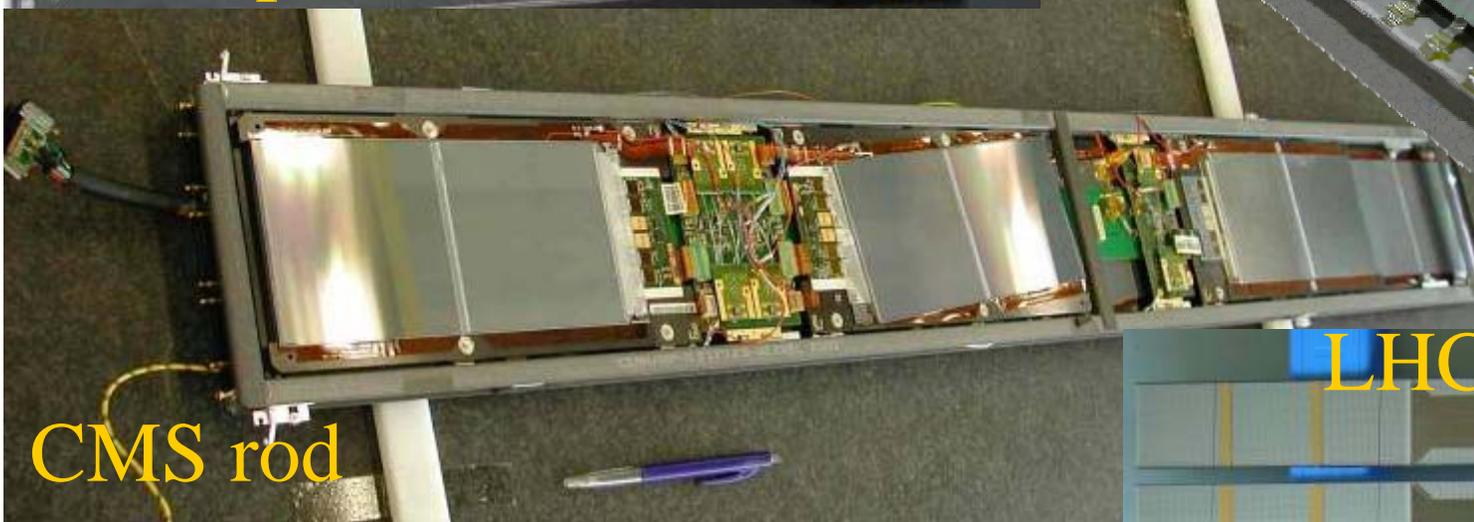
CMS halfshell



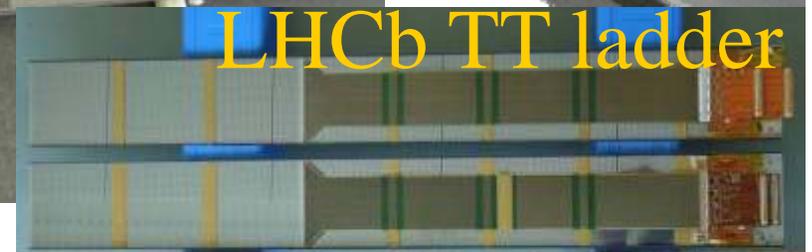
CMS petal



ALICE ladder



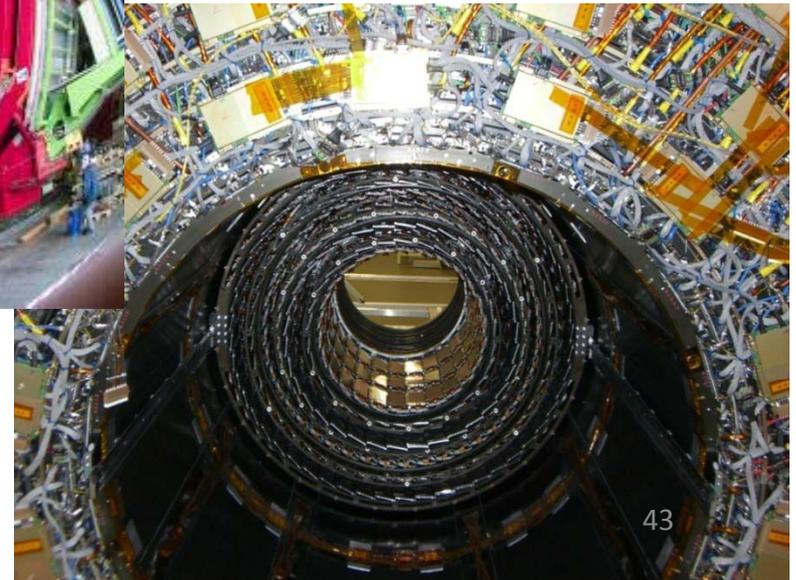
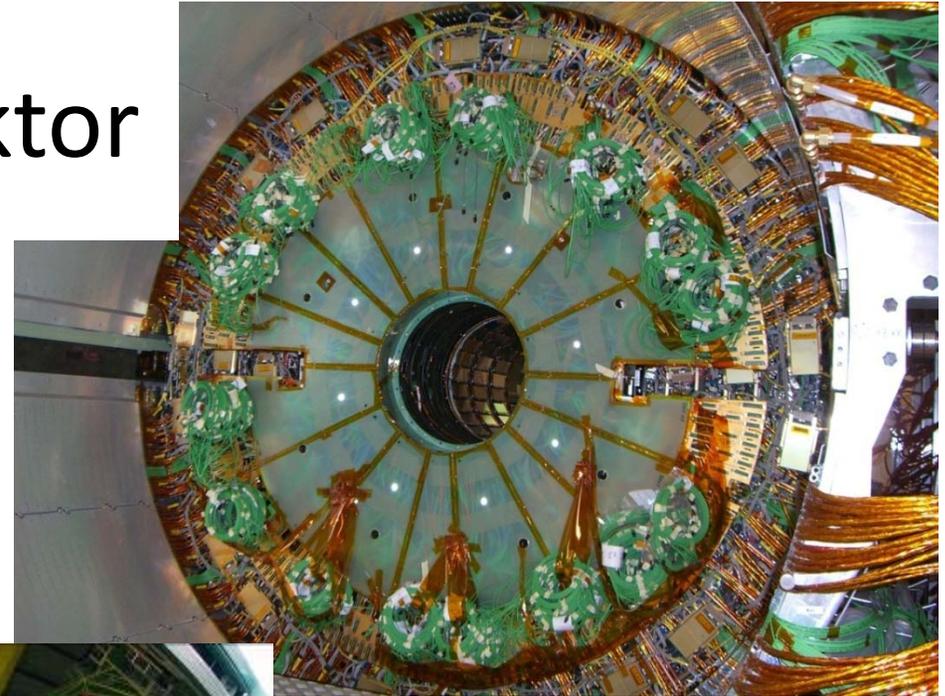
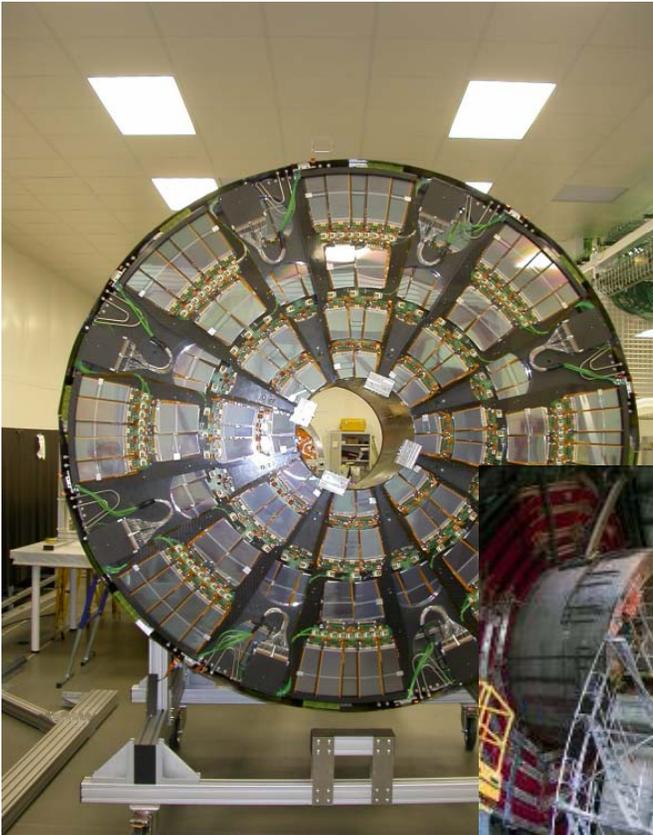
CMS rod



LHCb TT ladder

Bis zu 14 Sensoren pro Leiter(4 Sensoren pro Hybrid)

Der CMS Spurendetektor



206 m² Fläche

25.000 Siliziumsensoren

10Mio Streifen \equiv Elektronische Kanäle

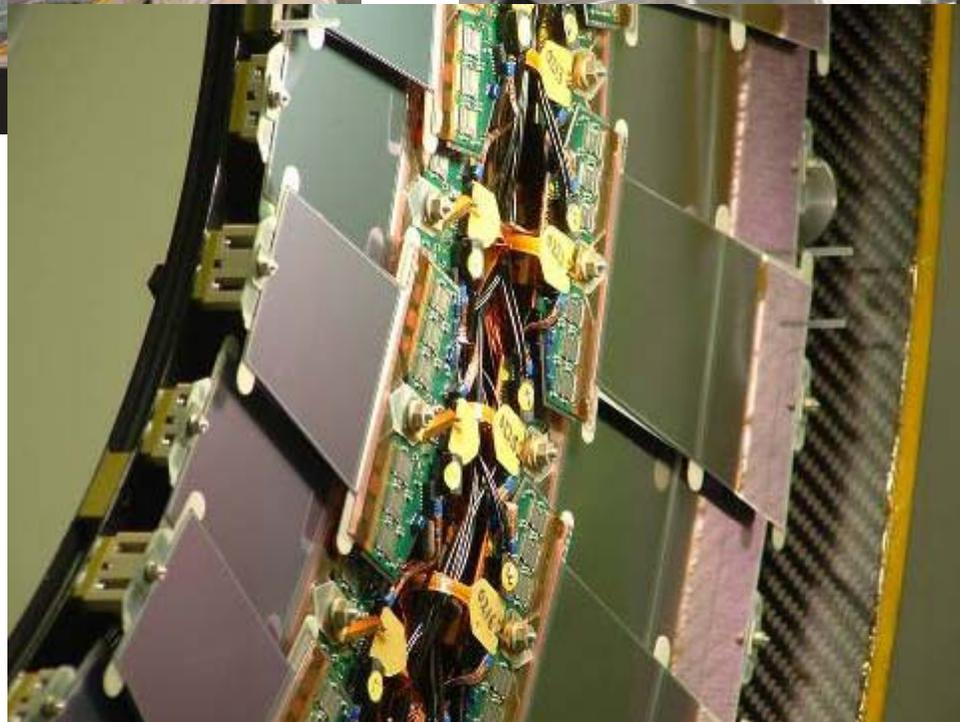
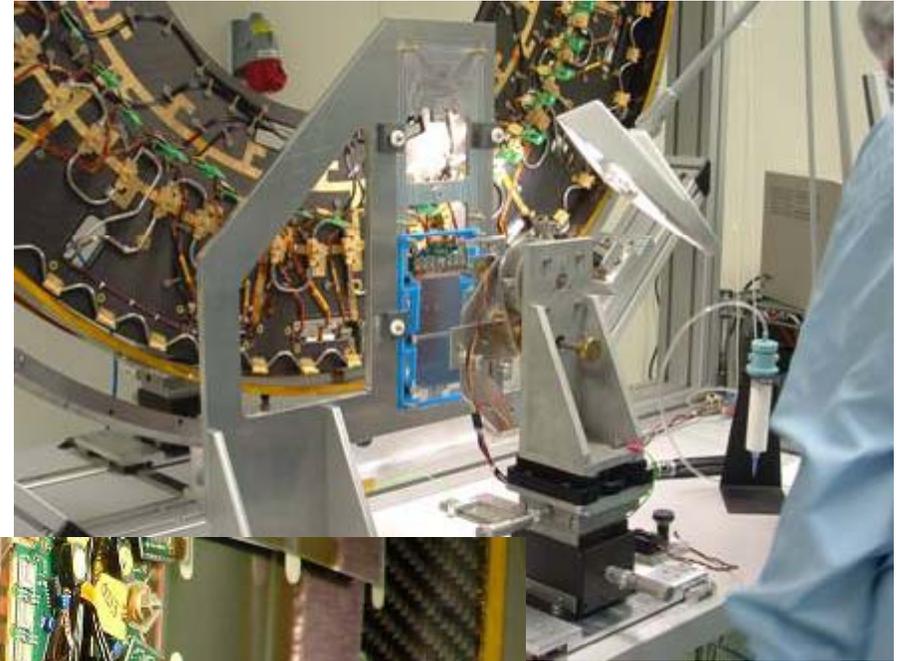
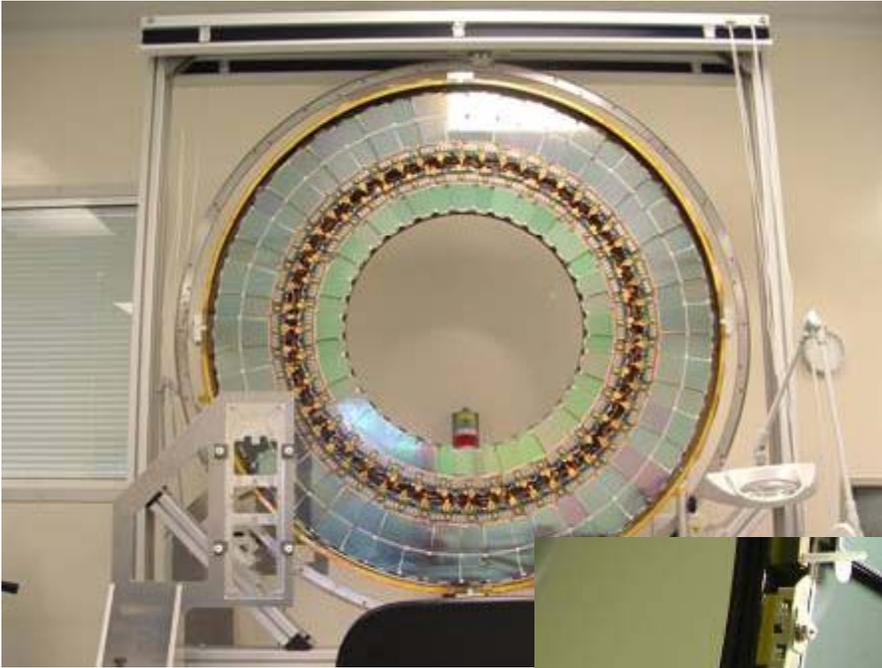
75.376 Auslesechips

26.000.000 Bonds

37.000 Analog optische Links

3.000 km optische Fibern

ATLAS Endkappe



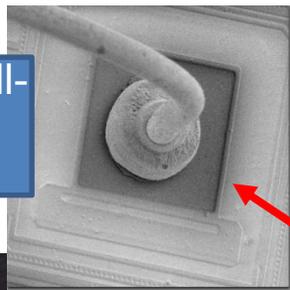
ATLAS Barrel 3



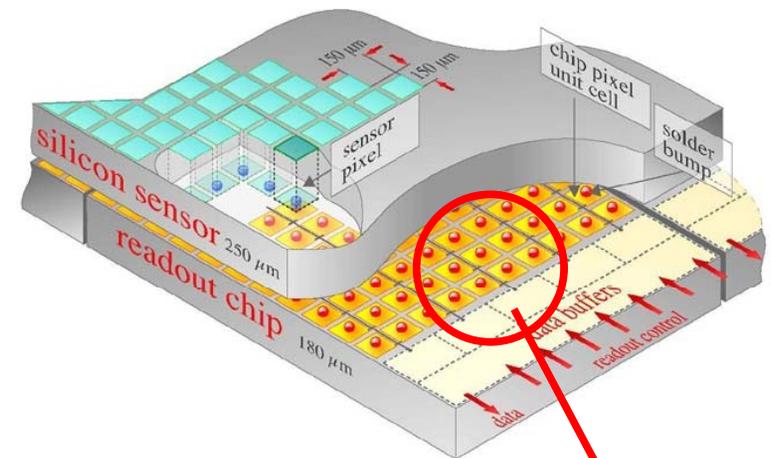
Silizium-Pixel-Sensoren

- Funktionsprinzip: siehe Siliziumstreifensensoren
- Segmentierung: Pixel(-dioden) statt Streifen(-dioden)
 - Elektronik aufgesetzt, um alle Pixel zu erreichen

Draht-Ultraschall-
Verschweißung
"bonding"



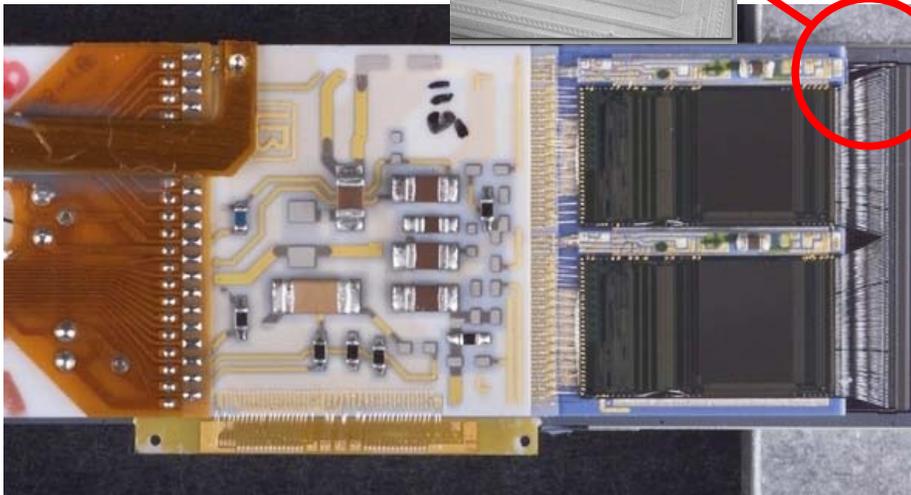
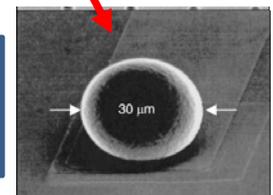
Streifen: Nur eine Koordinate,
Pixel sind 2D Detektoren



Sensor

"bump" bonding

Kanäle: $\sim 10^8 - 10^9$



ECAL

Elektromagnetisches Kalorimeter

Elektronen und Photonen

HCAL

Hadronisches Kalorimeter

Hadronen:

Mesonen (z.B. Pionen)

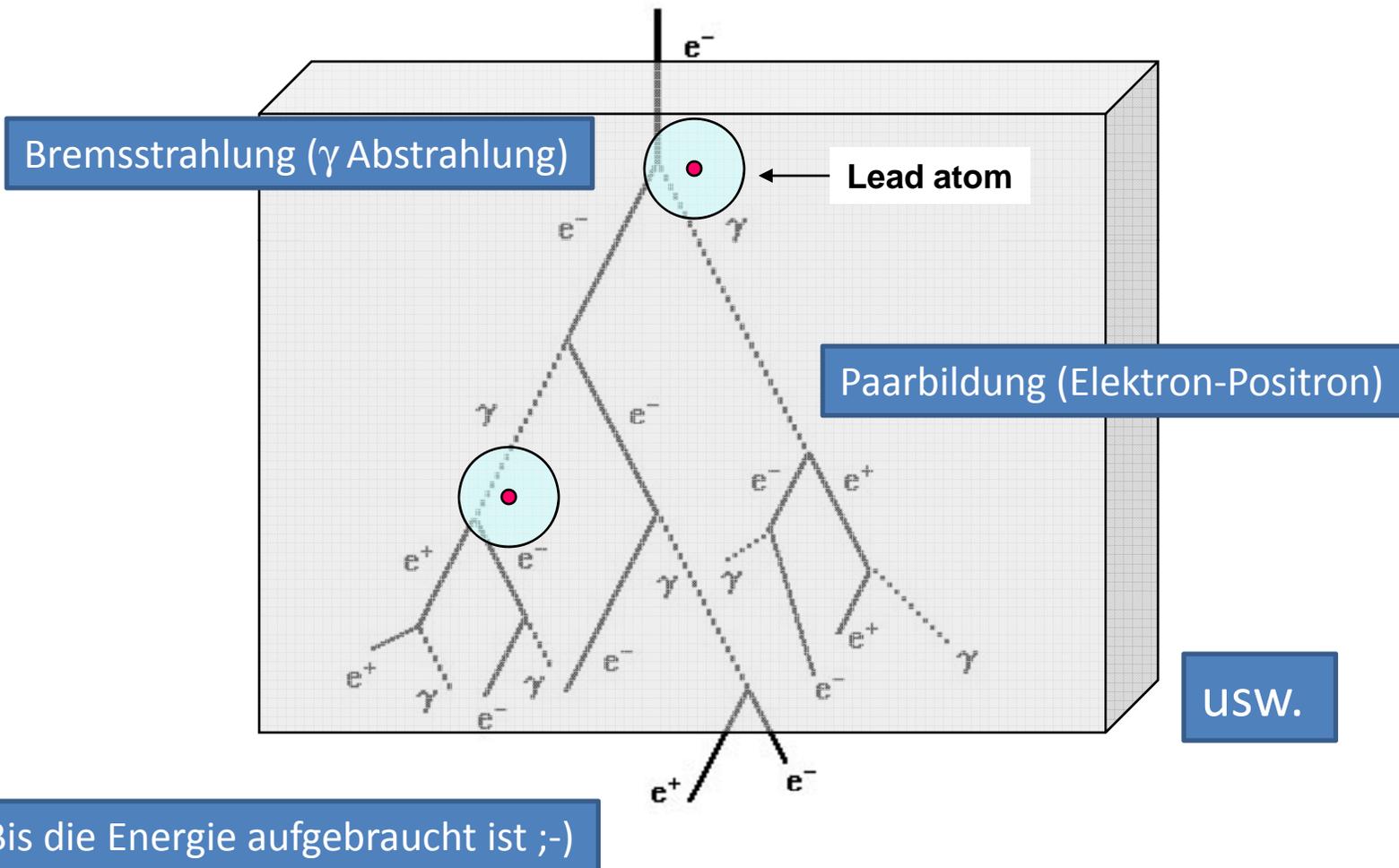
Baryonen (z.B. Protonen)

KALORIMETER (ENERGIEMESSER)

Aufgabe eines Kalorimeters

- Messung der Energie durch totale Absorption (destruktiv)
- Detektorantwort $\sim E$ für
 - Geladene Teilchen
 - Elektronen/Positronen und Hadronen
 - Neutrale Teilchen (n, γ)
- Prinzipielle Funktionsweise:
 - Elektromagnetische **Schauer**
 - Hadronische **Schauer**
- Konversion in Ionisation oder Anregung des Detektormaterials \rightarrow Strom, Spannung

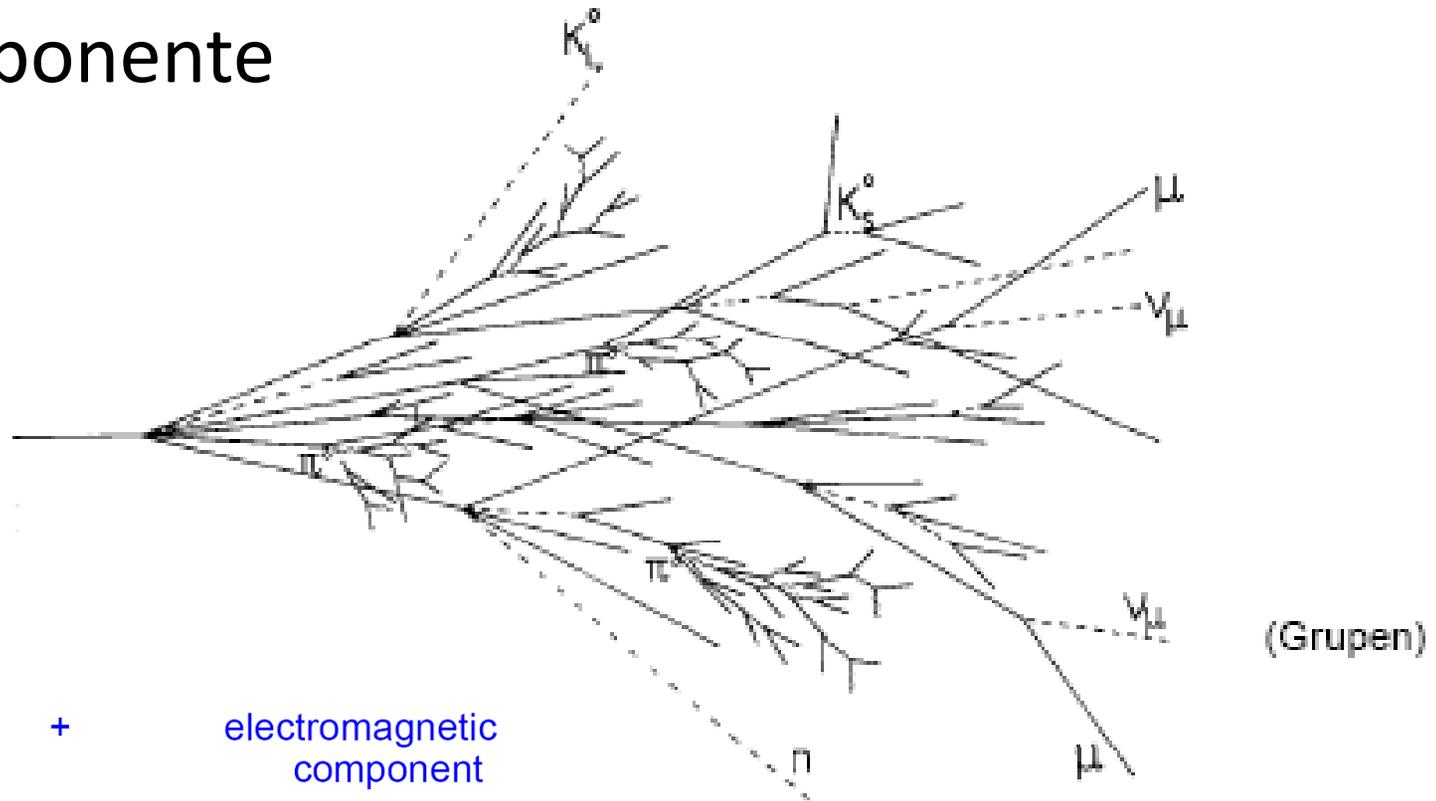
Elektromagnetischer Schauer



Strahlungslänge: X_0 = Länge bei der ein Elektron $1/e$ seiner Energie durch Bremsstrahlung verliert

Hadronisches Kalorimeter

- Kaskade mit elektronischer und hadronischer Komponente



Hadronic

+

electromagnetic
component



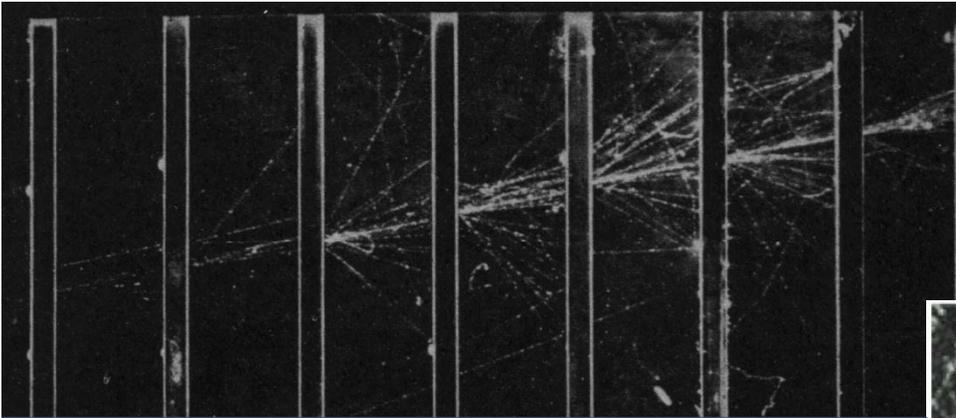
charged pions, protons, kaons
Breaking up of nuclei
(binding energy),
neutrons, neutrinos, soft γ 's
muons \rightarrow invisible energy



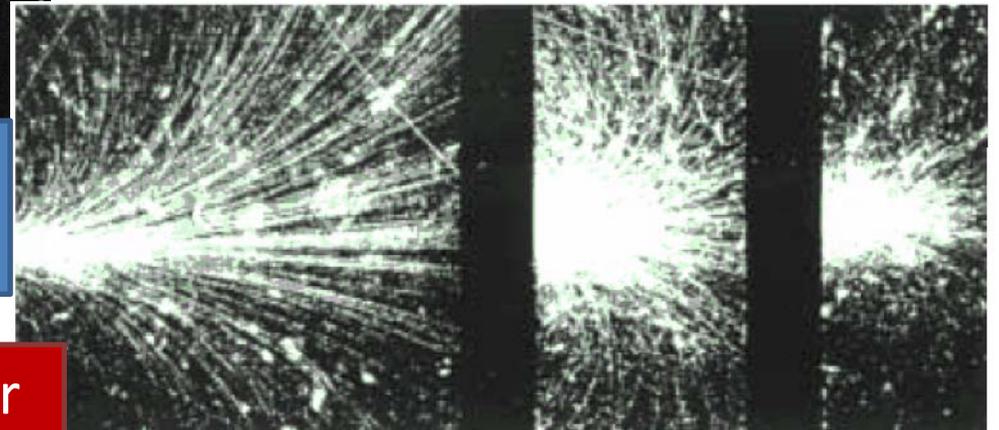
neutral pions $\rightarrow 2\gamma \rightarrow$
electromagnetic cascade
 $n(\pi^0) \approx \ln E(\text{GeV}) - 4.6$
example 100 GeV: $n(\pi^0) \approx 18$

Kalorimeter und Schauer

Wie misst man nun die Energie?



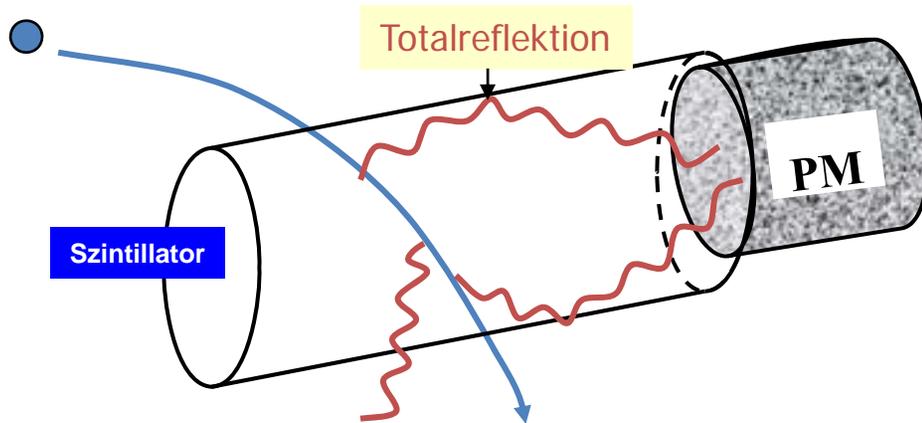
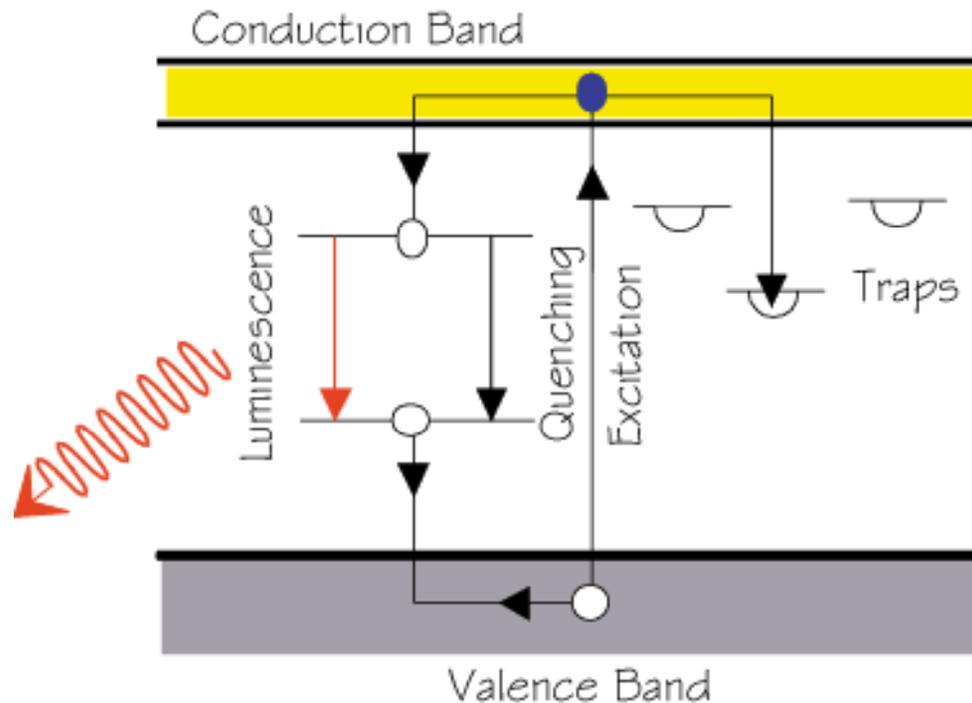
Photon-induzierter Schauer in einer Nebelkammer;
die schwarzen Bereiche sind Blei-Platten;
senkrecht zur Bildebene wirkt ein Magnetfeld



Die Energie ist nun proportional zur
Lichtmenge & Eindringtiefe
des Schauers

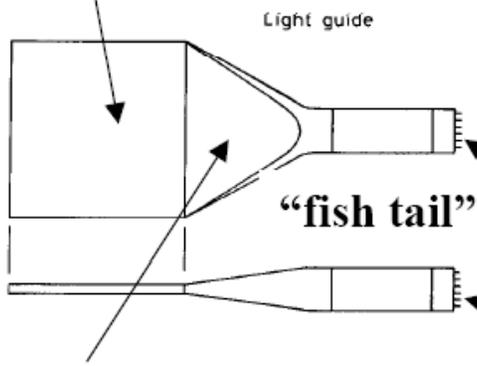
Dies ist nun mit bloßem Auge etwas mühselig ;-)
Also müssen wir die Lichtmenge und Wegstrecke **elektronisch** messen!

Szintillator: Funktionsweise



Photomultiplier/Sekundär-Elektronenvervielfacher:
Konvertiert Licht in ein elektronisches Signal

Szintillator



Lichtleiter:

lichtdicht eingepackt, Lichttransfer via innere Totalreflexion

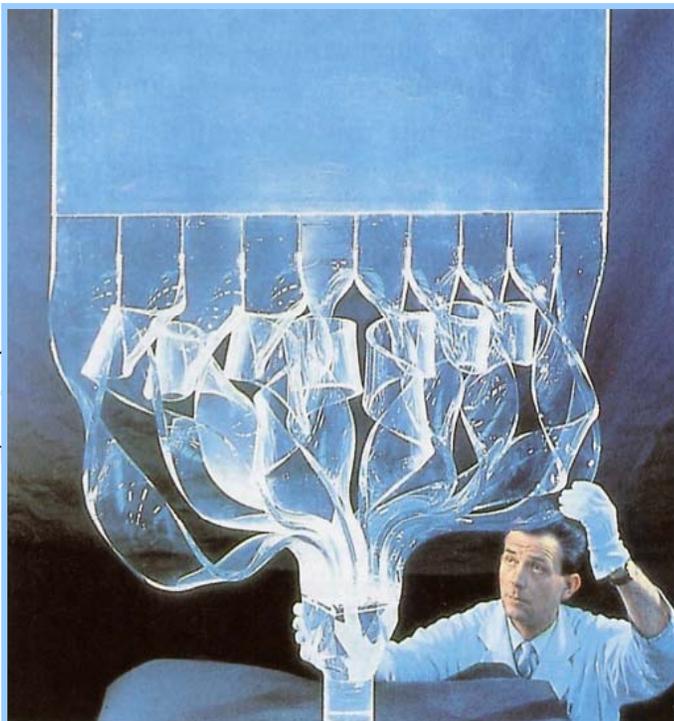
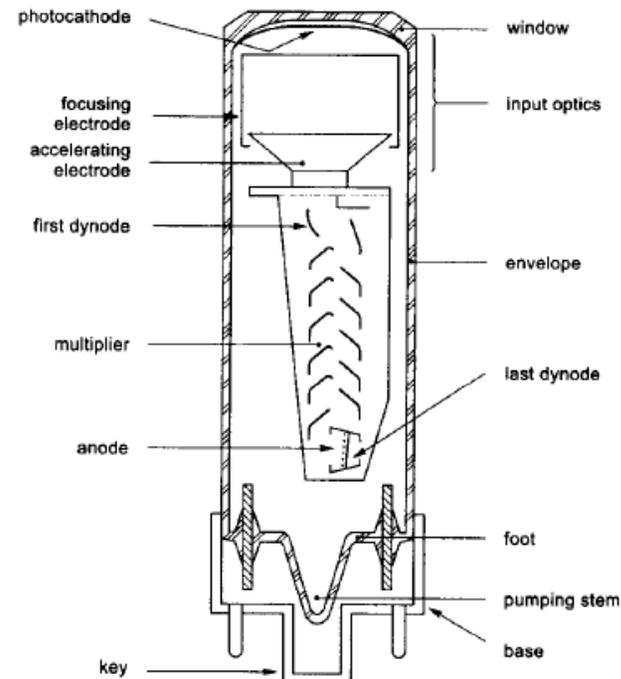


Photo-Multiplier

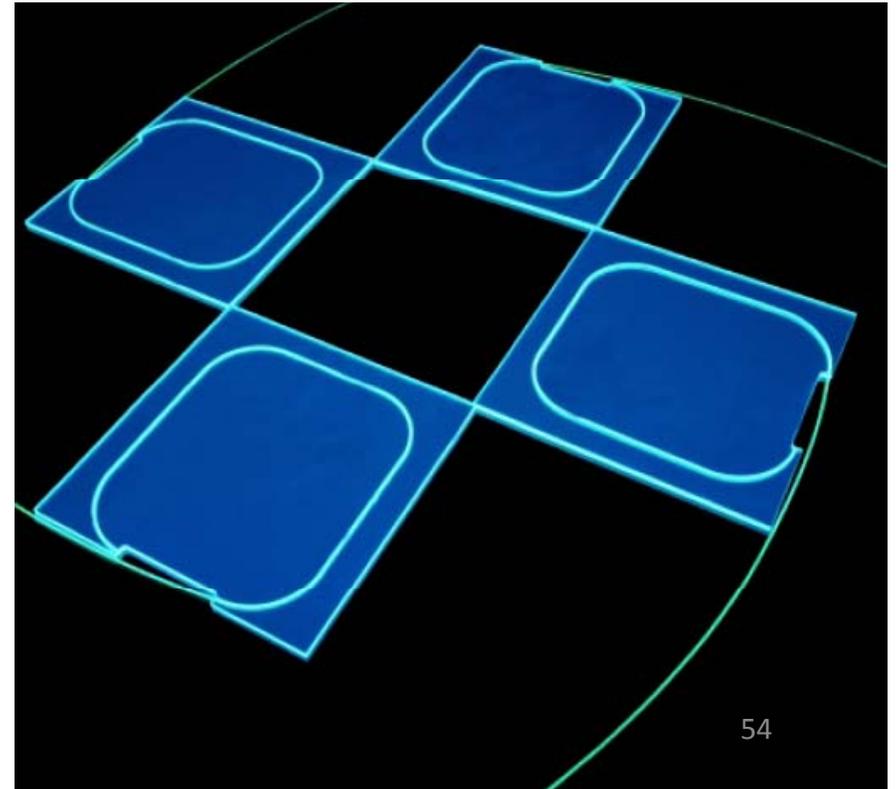
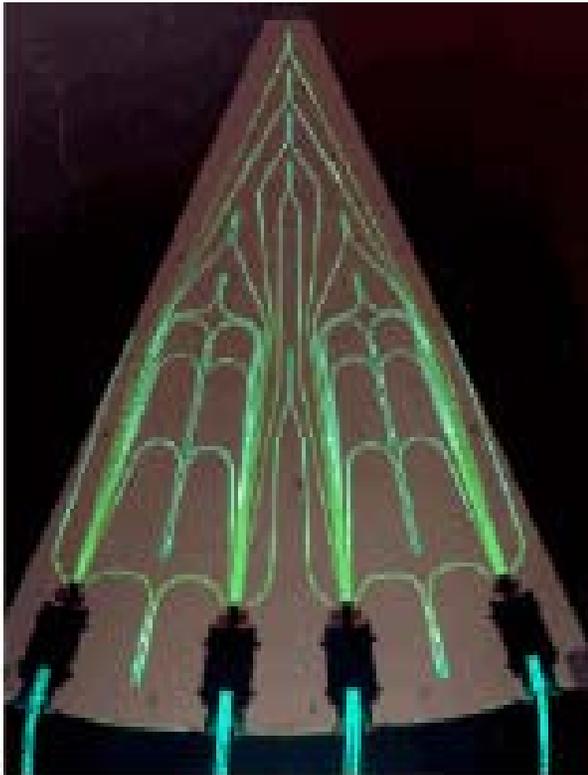
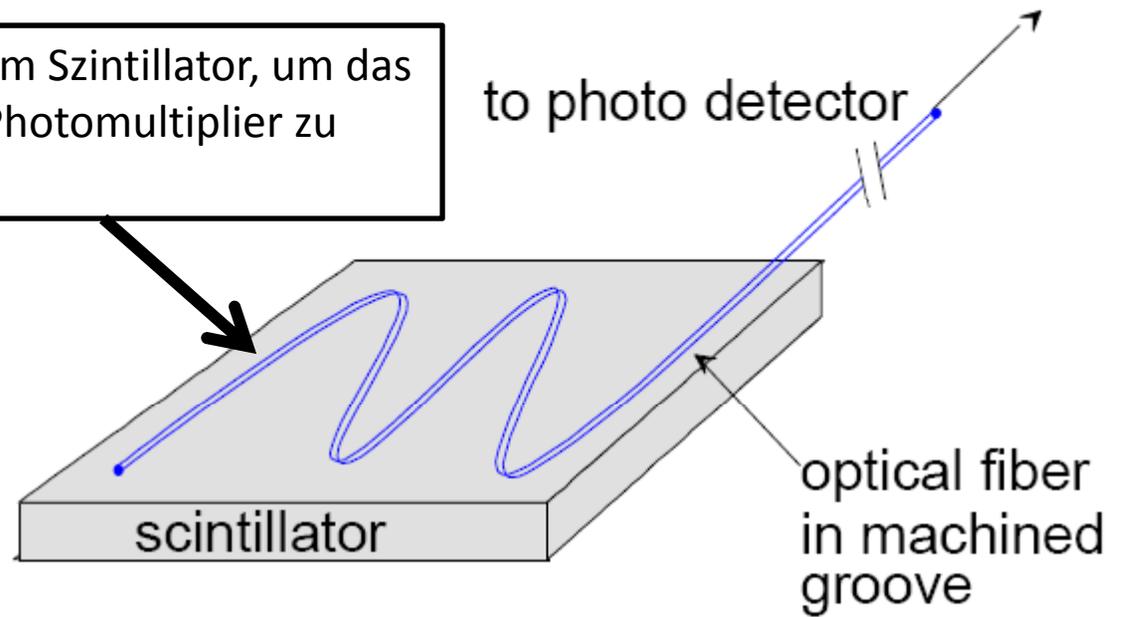


Photoeffekt an der Photokathode
↔ sichtbares Licht $\lambda > 400\text{nm}$

Teilchendurchgang → Atomanregung
→ γ Abstrahlung → Führung zur Photokathode
→ Photoeffekt → Primärelektron →
Vervielfachung via Dynoden unter Spannung 53

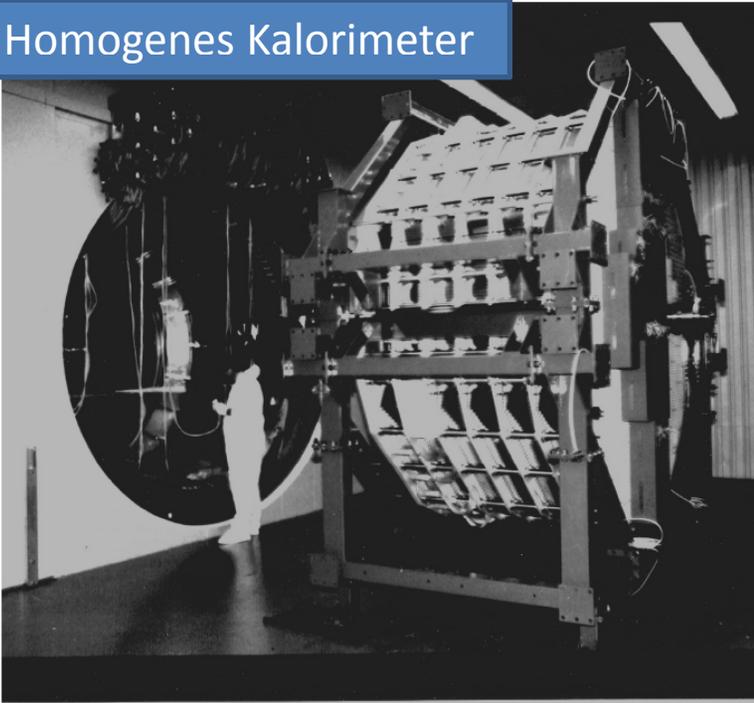
CMS Hadron Kalorimeter

Lichtleiter im Szintillator, um das Licht zum Photomultiplier zu führen.



Kalorimeter

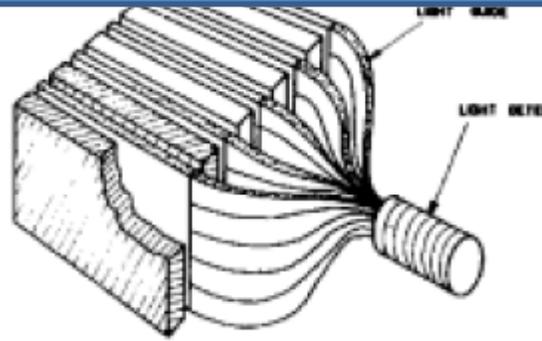
Homogenes Kalorimeter



The NA48 LKr calorimeter prior to installation in the cryostat.



Sampling Kalorimeter
Szintillator wechselt mit Absorbermaterial

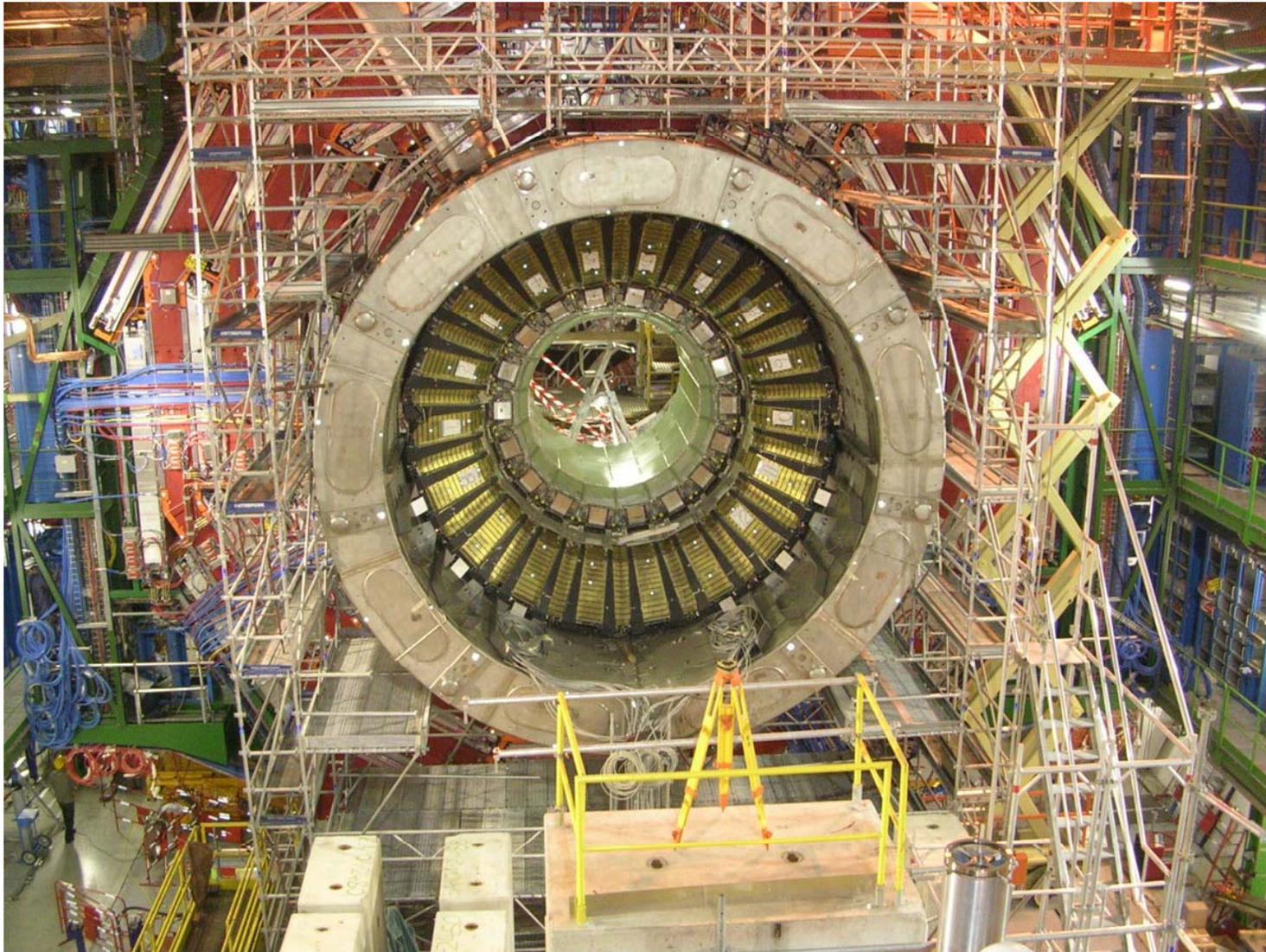


Lichtleiter & PM

Sampling Kalorimeter



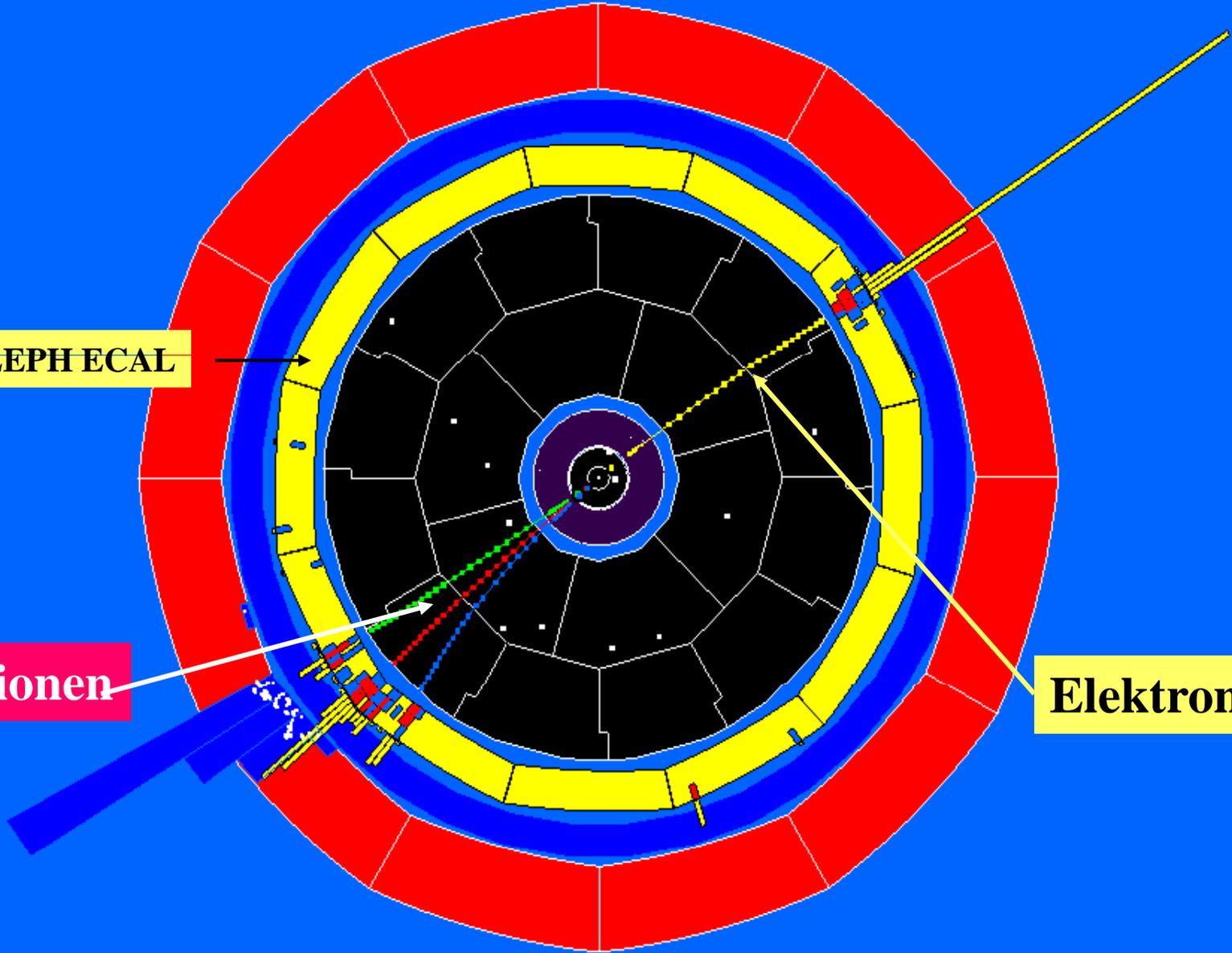
CMS ECAL in der Kaverne 2007

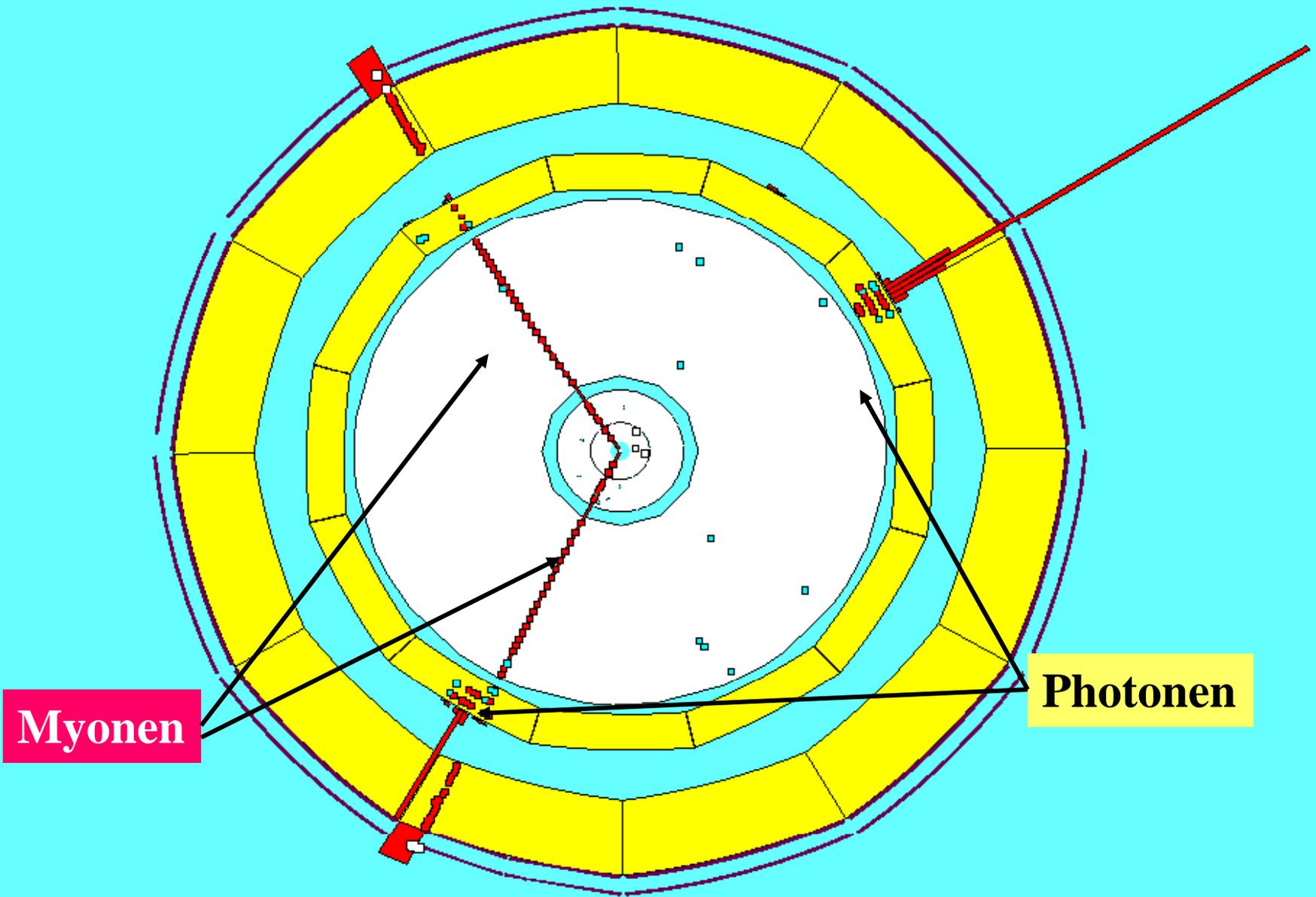


ALEPH ECAL

Pionen

Elektron





TOF (Time Of Flight / Flugzeitmesser)

RICH (Ring Image Cherenkov Counter)

Überlichtgeschwindigkeit! Geht das?

dE/dx (Energieverlustmessung pro Strecke)

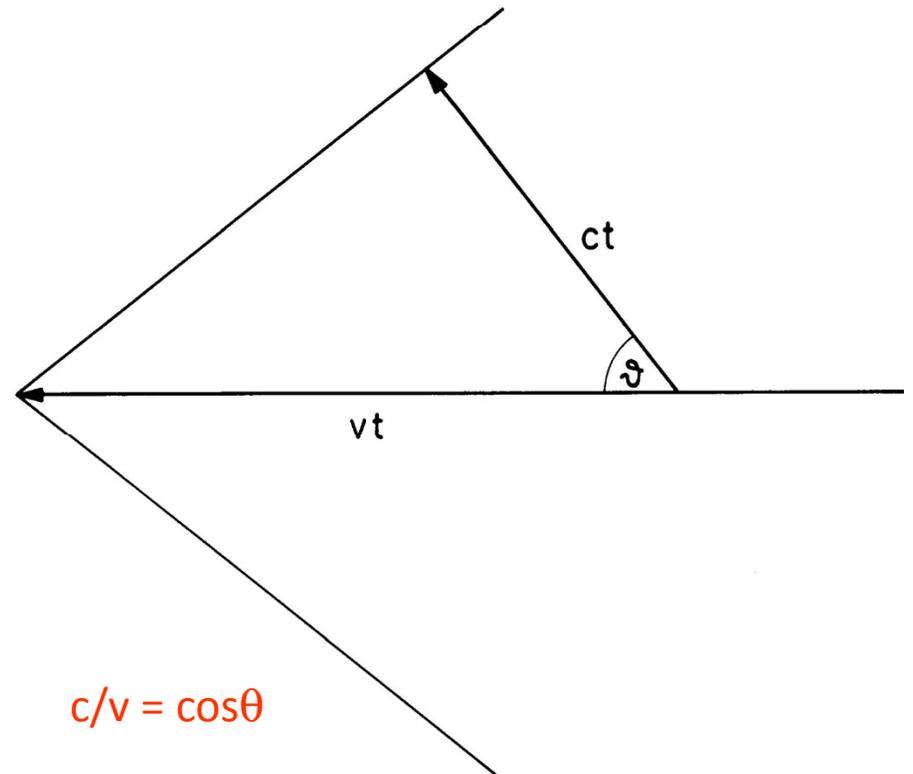
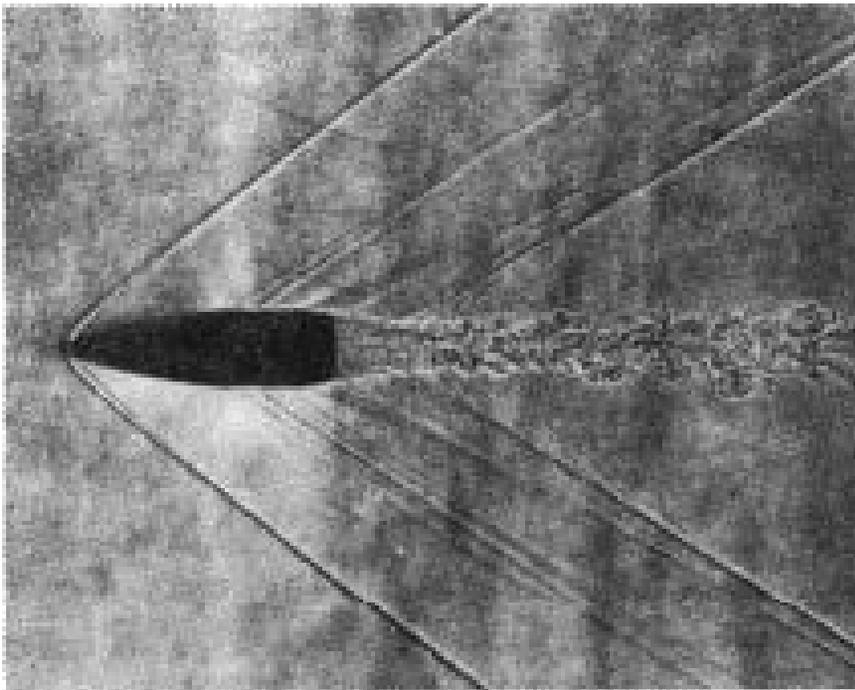
PARTICLE ID

TEILCHENIDENTIFIZIERUNG

Impuls & **Geschwindigkeit?**
→ Masse (Identität) ⁵⁹

Exkurs: Geschwindigkeit durch Vermessung einer Schockwelle!

Geschwindigkeit des Geschosses?



Siehe Bild:

Winkel 52° , $v = c/\cos\theta = 340\text{m/s} / \cos 52^\circ = 552\text{m/s}$

Siehe auch Mach'scher Kegel beim Überschallflugzeug

Cherenkov Strahlung

Bestimmung der Teilchengeschwindigkeit

1. Grundlegend: Durchgang eines geladenen Teilchens →
Atomanregung → Photonenabstrahlung

2. Teilchengeschwindigkeit größer als die
„Lichtgeschwindigkeit im Medium“

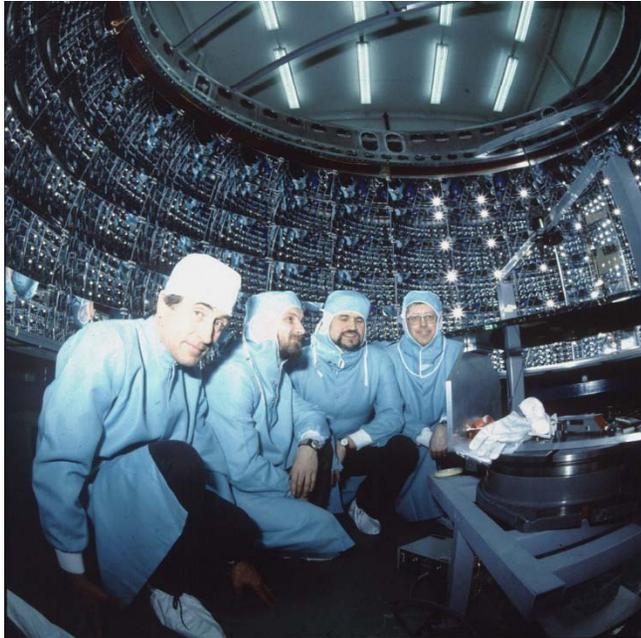
$$c_{\text{Medium}} = \frac{1}{n} c_{\text{Vakuum}}$$

3. Schockwelle → v

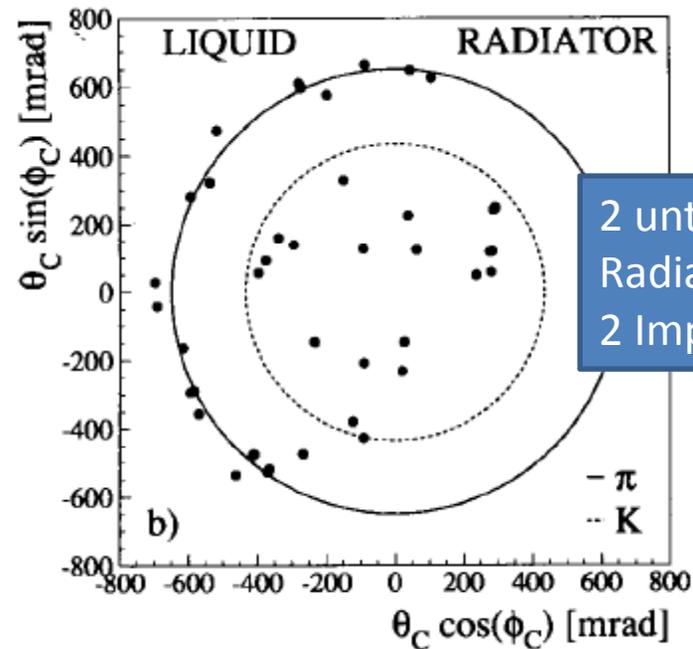
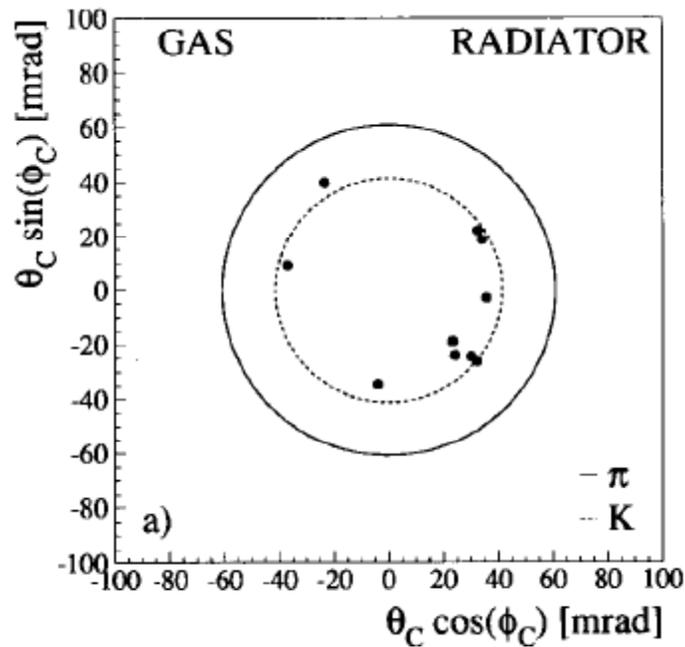
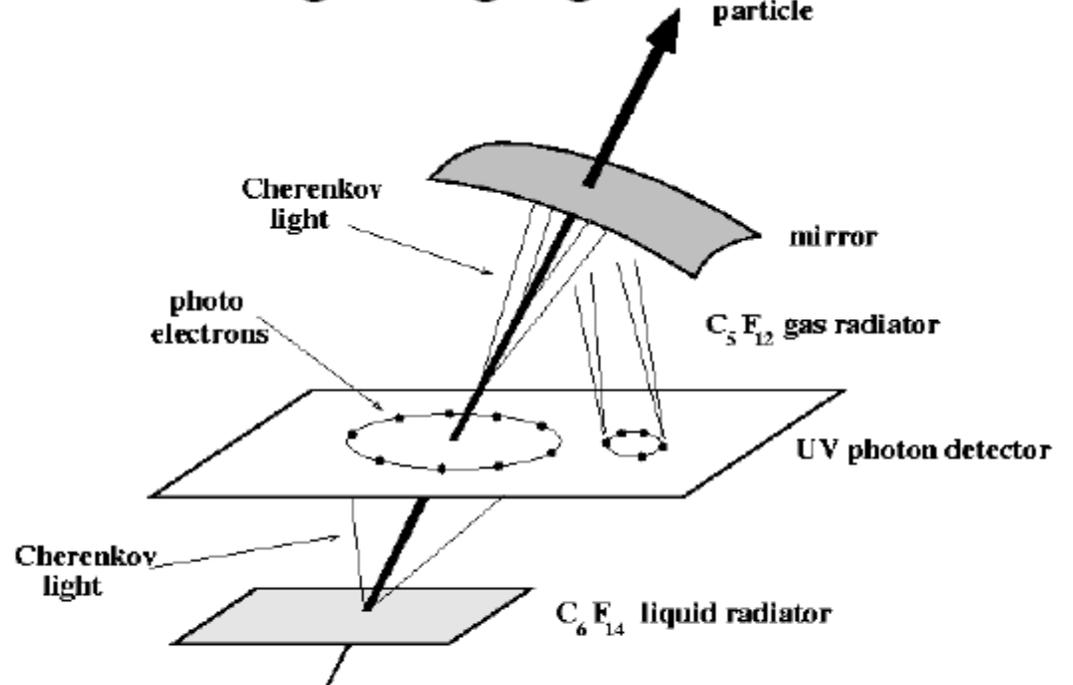
$$v = \frac{c_{\text{Medium}}}{\cos \alpha} = \frac{c_{\text{Vakuum}}}{n} \frac{1}{\cos \alpha}$$

4. Abbildung des Kegels auf einen Kreis im bestimmten
Abstand → α → v

DELPHI (LEP/CERN):



Ring Imaging Cherenkov particle

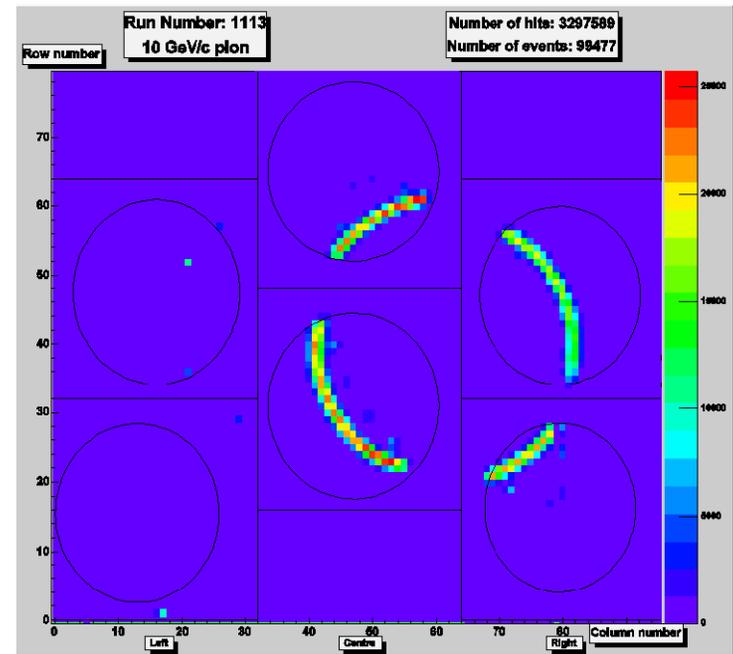


2 unterschiedliche Radiatoren = 2 Impulsbereiche

LHC ALICE RICH Installation

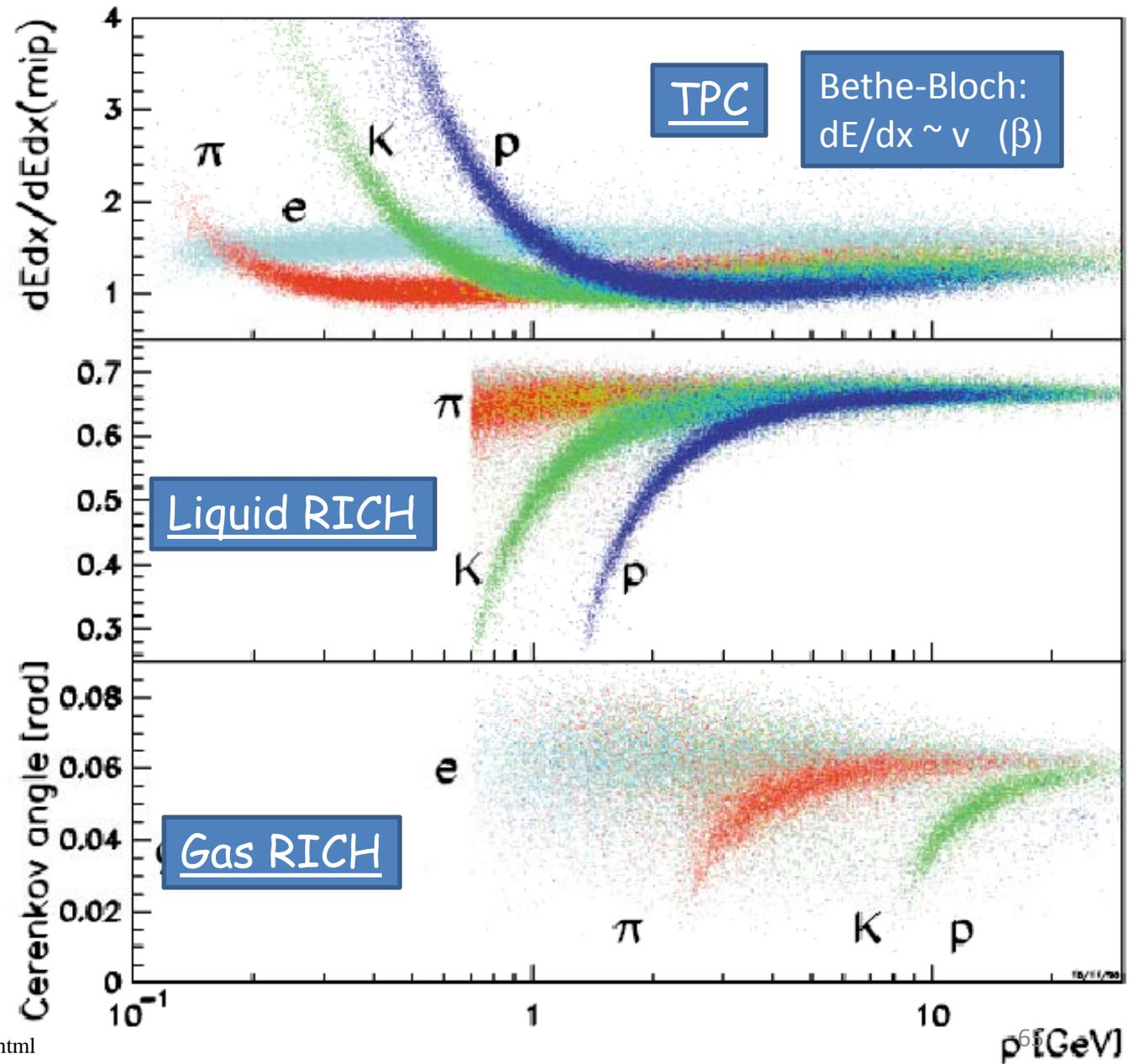


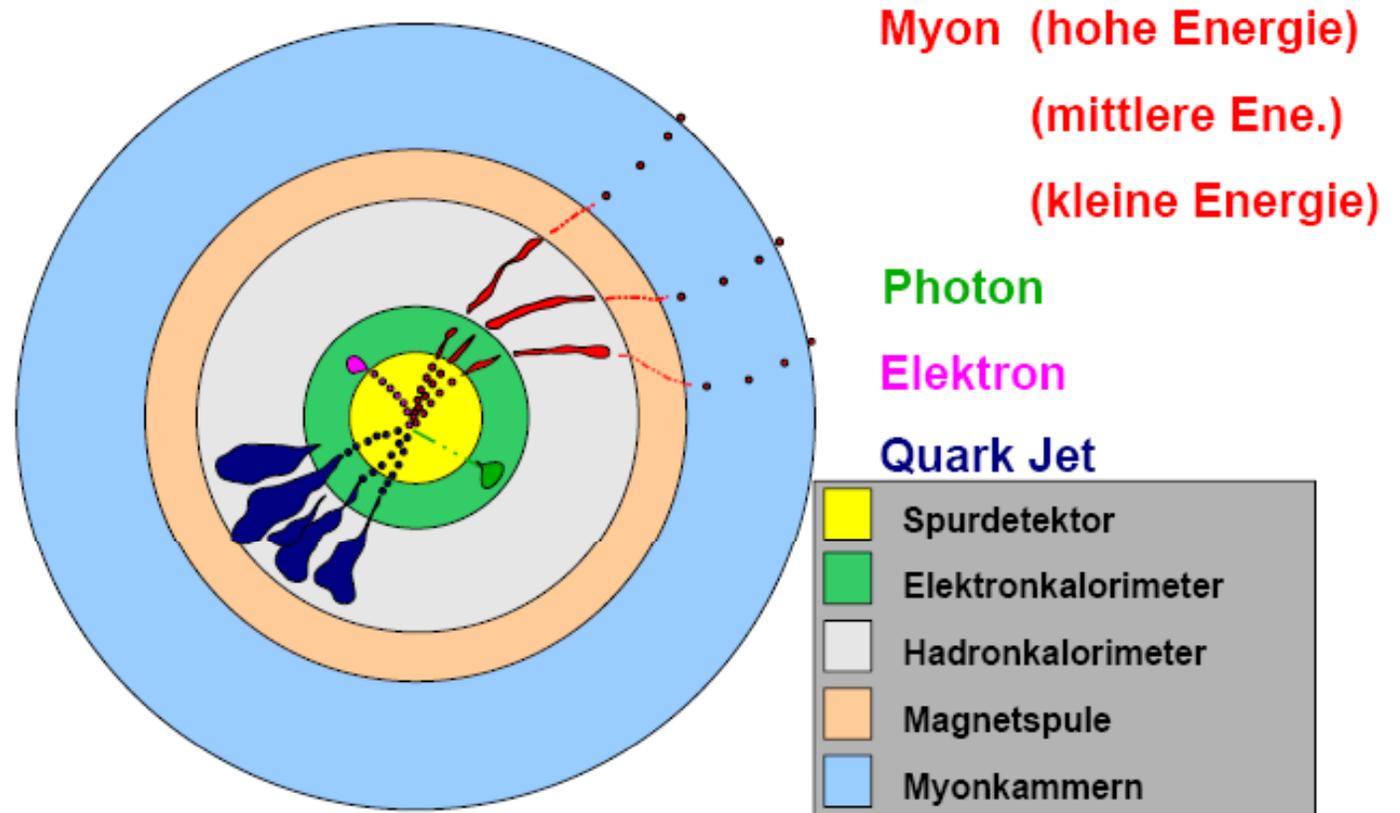
LHCb RICH System test



DELPHI Teilchen Identifikation

DELPHI particle ID



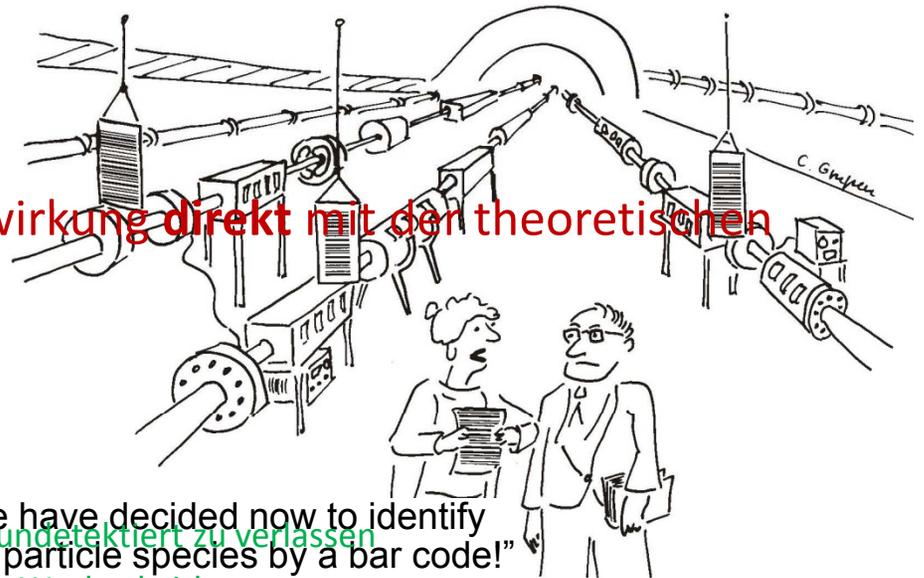


Wiederholung: Ort und Aufgabe der einzelnen Detektoren

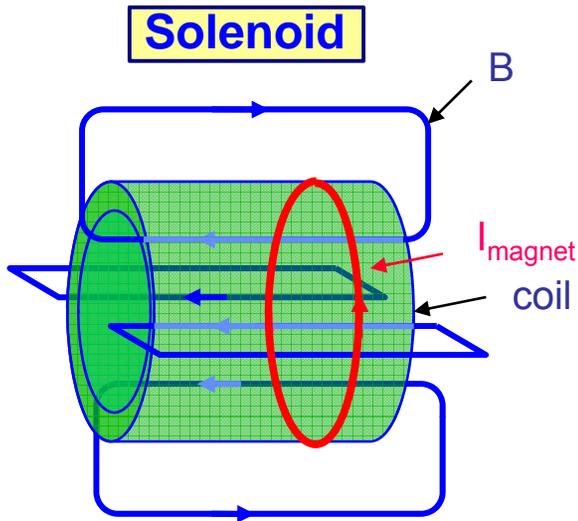
Vielzweckdetektoren – Multipurpose

Exkurs: Der Perfekte Detektor

- Sollte **alle** Wechselwirkungen und alle Teilchen mit 100% Effizienz rekonstruieren **ohne** ihre Eigenschaften zu ändern
 - Mit unbegrenzter Auflösung und für alle Energien, Impuls, Teilchen gleich
 - Er muss den gesamten Raumbereich von 4π lückenlos abdecken
 - Alle Teilchen sollten direkt identifizierbar sein
 - Einfacher Zugang zur Wartung
 - Strahlenhart
- Dann wären wir in der Lage alle Wechselwirkung **direkt mit den theoretischen Vorhersage zu vergleichen**
- **Warum geht das nicht?**
 - Effizienz:
 - Nicht alle Teilchen werden nachgewiesen
 - Löcher, Spalten erlauben Teilchen den Detektor undetektiert zu verlassen
 - Rauschen: Kanäle sprechen statistisch auch ohne Wechselwirkung an
 - Wechselwirkung
 - Jede Wechselwirkung ändert die Teilcheneigenschaft (siehe Kalorimeter):
 - Eigentlich sollten alle Kabel, Kühlleitungen, Trägerstrukturen masselos sein, damit keine ungewollte Streuung passiert
 - Zugang
 - Großdetektoren sind wie Satellitenexperimente
 - Bestrahlt, sehr kompakt und kompliziert; Wartung ist faktisch nicht möglich (oder nur sehr schwer)

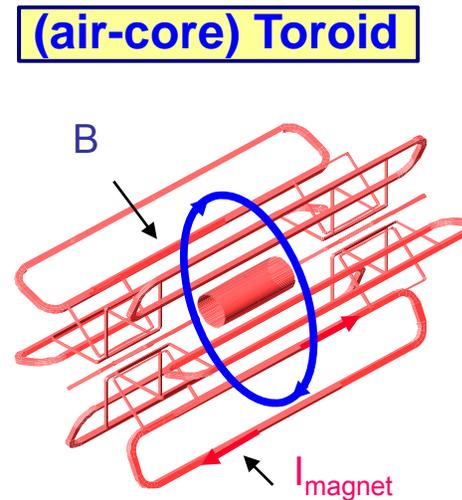
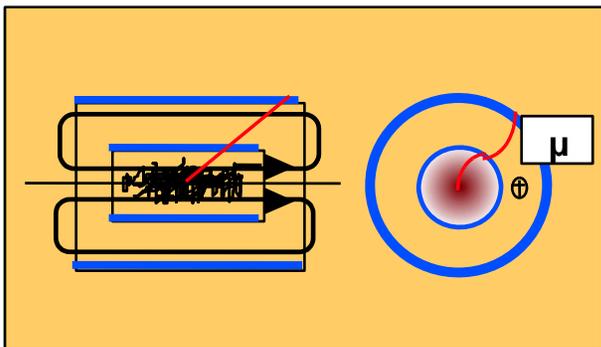


Magnet Konfigurationen der LHC Experiments



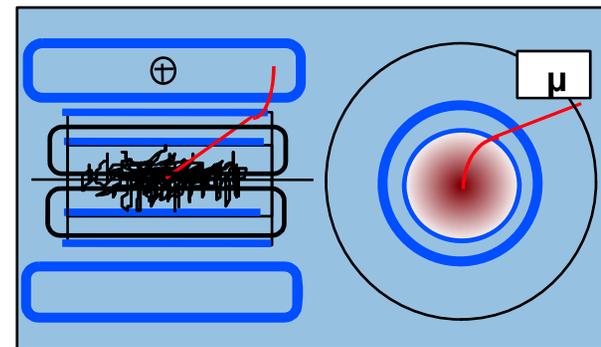
- + Starkes homogenes Feld in der Spule
- Großes Eisen-Rückführjoch notwendig
- Größe Limitiert (Kosten)
- Spulendicke (Strahlungslänge)

CMS, ALICE, LEP Detektoren

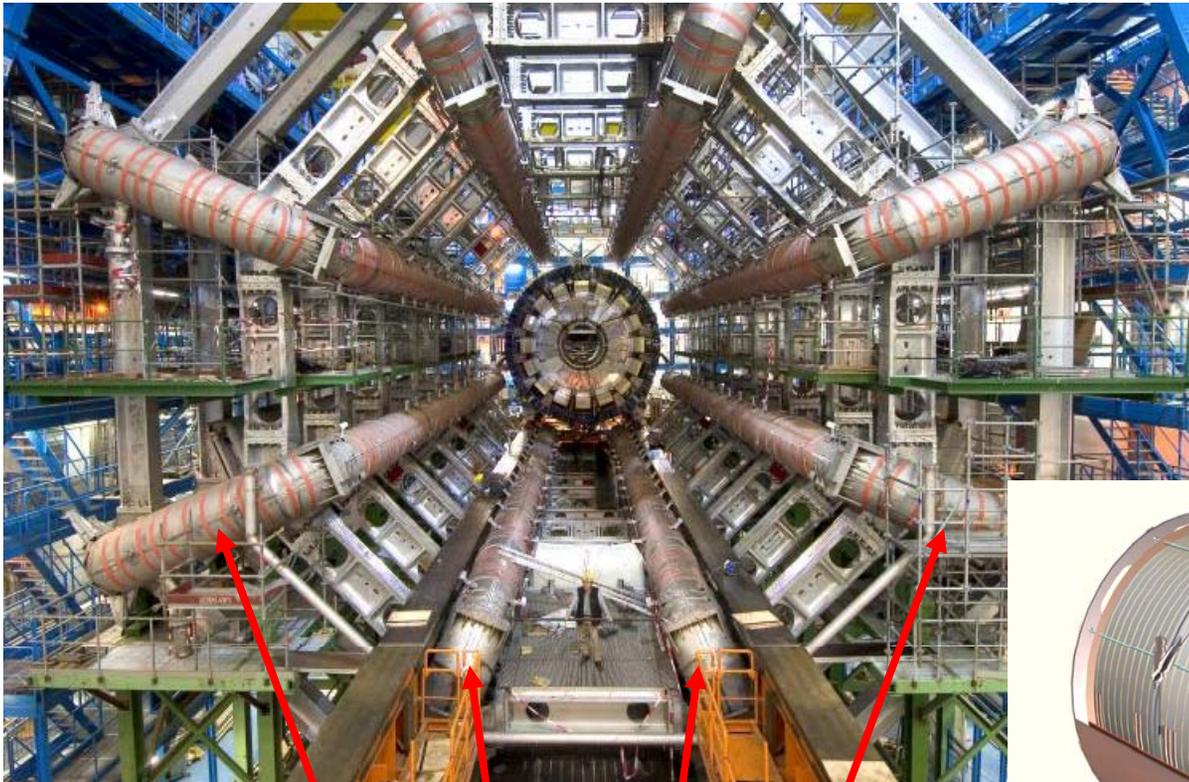


- + großes Volumen
- + „Luftkern“, kein Eisen, wenig Material
- Zusätzlicher Solenoid im Innern nötig
- inhomogenes Feld
- Komplexe Struktur

ATLAS



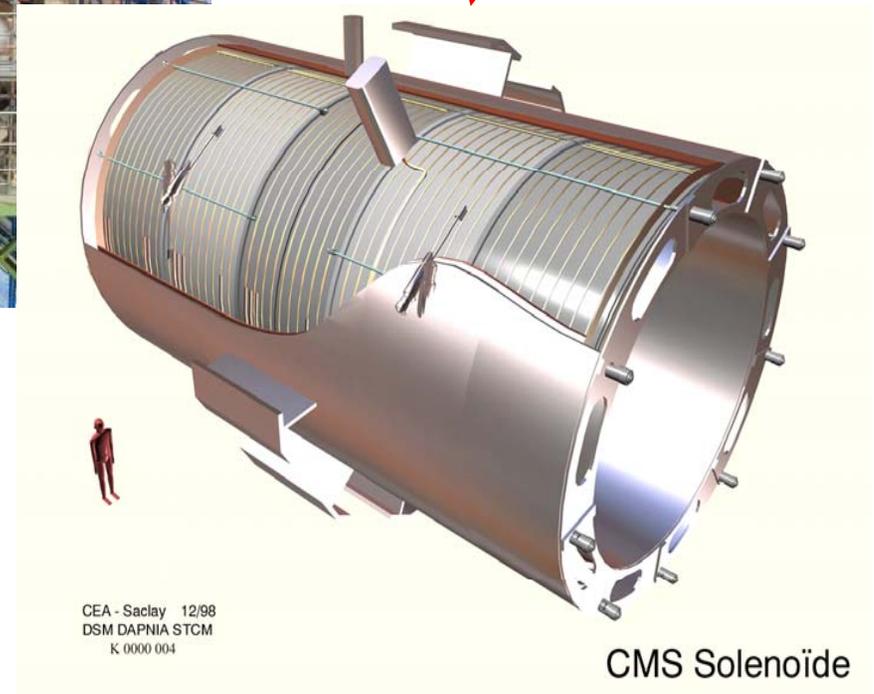
ATLAS und CMS Spulen



ATLAS Toroid Spulen

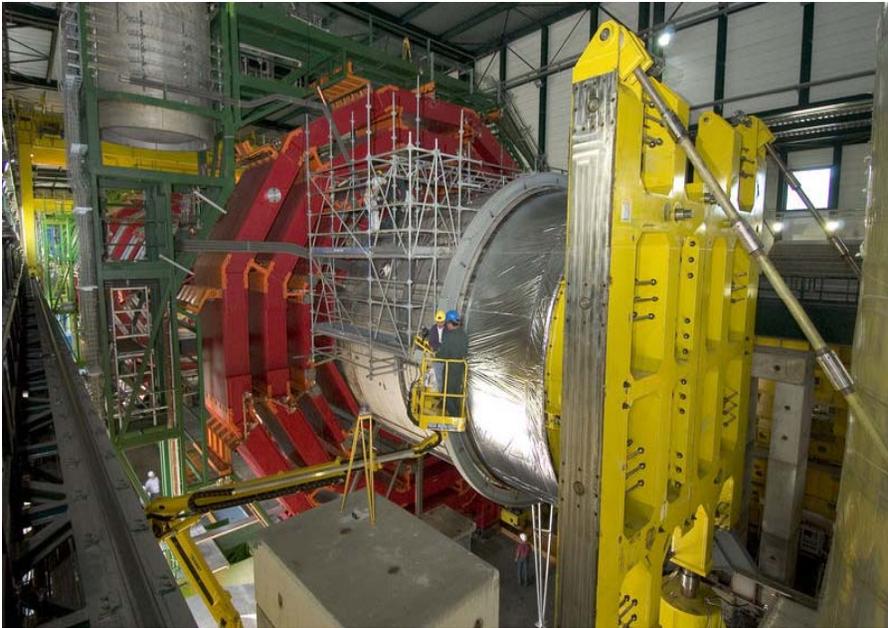
Herbst 2005

**CMS Solenoid
(5 Segmente)**

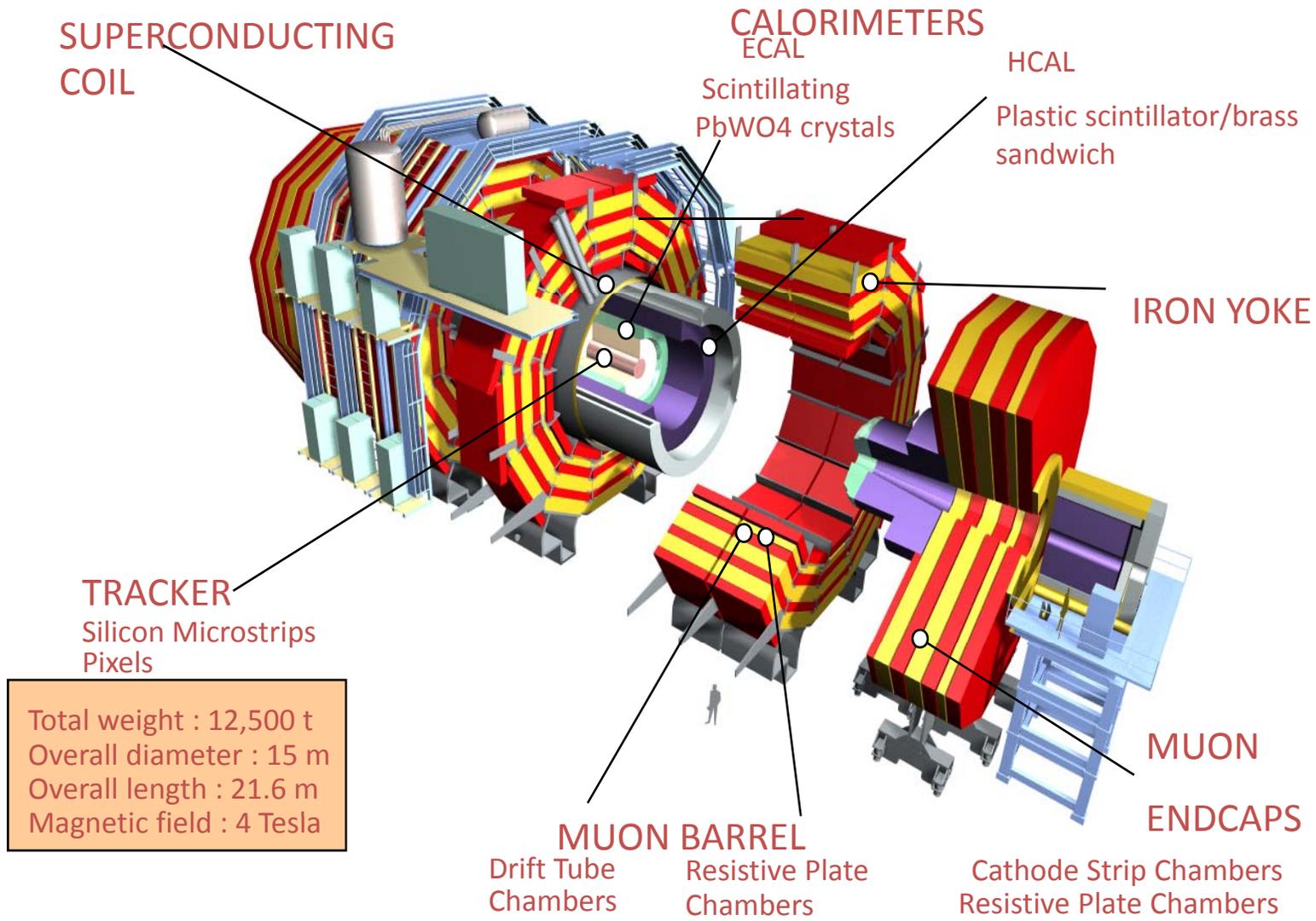


CMS Solenoïde

Coil Assembly in Surface Hall (Aug05)

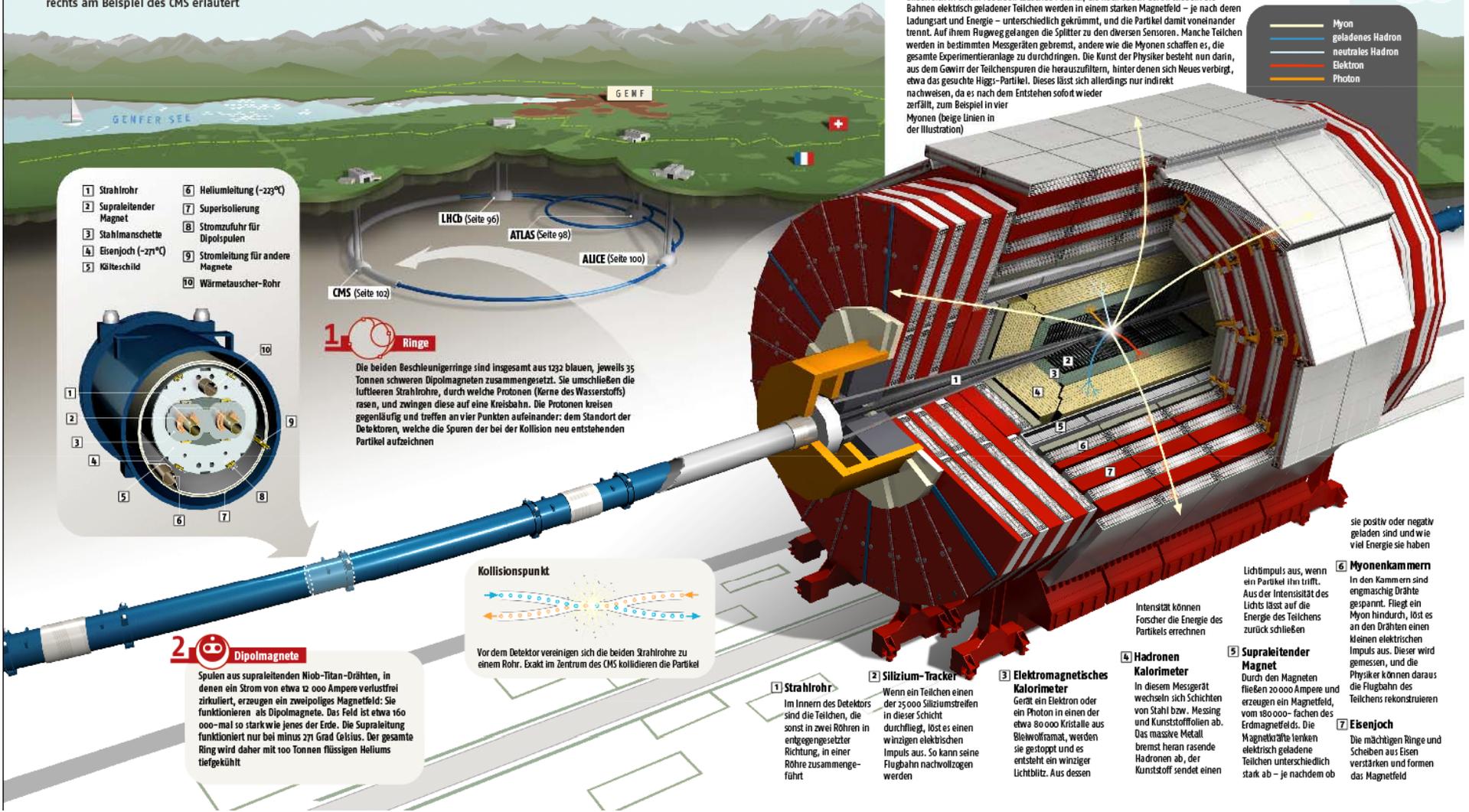


Exploded View of CMS



So funktioniert der Large Hadron Collider

Nahe Genf entsteht die leistungsstärkste Beschleunigeranlage der Welt: der Large Hadron Collider (LHC). In einem zwischen 50 und 175 Meter tiefen Tunnel ist ein 27 Kilometer langes Ringsystem untergebracht. In das von einem kleineren Ring vorbeschleunigte Teilchen eingeschleust werden. Kernstück des LHC sind „Strahlrohre“, die durch vier, in gewaltigen Kavernen installierte Detektoren führen. Deren Funktionsprinzip wird rechts am Beispiel des CMS erläutert



3 Compact Muon Solenoid (CMS)

Um einen Kollisionspunkt der Teilchen herum haben Wissenschaftler und Ingenieure den riesigen Detektor errichtet: 15 Meter hoch, 22 Meter lang und mit 12 500 Tonnen das schwerste der vier Nachweigeräte im Ring. Wie auch die anderen Detektoren ist der CMS aus mehreren Lagen von Sensoren aufgebaut, die nach unterschiedlichen Prinzipien arbeiten. Stoßen im Zentrum der komplexen Maschine aus entgegengesetzten Richtungen herankommende Protonen zusammen, bilden sich in einem Feuerball tausende Partikel, die nach außen davon fliehen. Die Bahnen elektrisch geladener Teilchen werden in einem starken Magnetfeld – je nach deren Ladungsart und Energie – unterschiedlich gekrümmt, und die Partikel damit voneinander trennt. Auf ihrem Flugweg gelangen die Splitter zu den diversen Sensoren. Manche Teilchen werden in bestimmten Messgeräten gebremst, andere wie die Myonen schaffen es, die gesamte Experimentieranlage zu durchdringen. Die Kunst der Physiker besteht nun darin, aus dem Gewirr der Teilchenspuren die herauszufiltern, hinter denen sich Neues verbirgt, etwa das gesuchte Higgs-Partikel. Dieses lässt sich allerdings nur indirekt nachweisen, da es nach dem Entstehen sofort wieder zerfällt, zum Beispiel in vier Myonen (beige Linien in der Illustration)

- Myon
- geladenes Hadron
- neutrales Hadron
- Elektron
- Photon

- 1 Strahlrohr
- 2 Supraleitender Magnet
- 3 Stahlmanschette
- 4 Eisenjoch (-271°C)
- 5 Kälteschild
- 6 Heliumleitung (-223°C)
- 7 Superisolierung
- 8 Stromzufuhr für Dipolspulen
- 9 Stromleitung für andere Magnete
- 10 Wärmetauscher-Rohr



1 Ringe

Die beiden Beschleuniger sind insgesamt aus 1232 blauen, jeweils 35 Tonnen schweren Dipolmagneten zusammengesetzt. Sie umschließen die luftleeren Strahlrohre, durch welche Protonen (Kerne des Wasserstoffs) rasen, und zwingen diese auf eine Kreisbahn. Die Protonen kreisen gegenläufig und treffen an vier Punkten aufeinander: dem Standort der Detektoren, welche die Spuren der bei der Kollision neu entstehenden Partikel aufzeichnen



2 Dipolmagnete

Spulen aus supraleitenden Niob-Titan-Drähten, in denen ein Strom von etwa 12 000 Ampere verlustfrei zirkuliert, erzeugen ein zweipoliges Magnetfeld: Sie funktionieren als Dipolmagnete. Das Feld ist etwa 100 000-mal so stark wie jenes der Erde. Die Supraleitung funktioniert nur bei minus 271 Grad Celsius. Der gesamte Ring wird daher mit 100 Tonnen flüssigen Heliums tiefgekühlt

1 Strahlrohr

Im Innern des Detektors sind die Teilchen, die sonst in zwei Röhren in entgegengesetzter Richtung, in einer Röhre zusammengeführt

2 Silizium-Tracker

Wenn ein Teilchen einen der 25 000 Siliziumstreifen in dieser Schicht durchfliegt, löst es einen winzigen elektrischen Impuls aus. So kann seine Flugbahn nachvollzogen werden

3 Elektromagnetisches Kalorimeter

Gerät ein Elektron oder ein Photon in einen der etwa 80 000 Kristalle aus Bleiwolframat, werden sie gestoppt und es entsteht ein winziger Lichtblitz. Aus dessen

4 Hadronen Kalorimeter

In diesem Messgerät wechseln sich Schichten von Stahl bzw. Messing und Kunststofffolien ab. Das massive Metall bremst heran rasende Hadronen ab, der Kunststoff sendet einen

5 Supraleitender Magnet

Durch den Magneten fließen 20 000 Ampere und erzeugen ein Magnetfeld, vom 180 000-fachen des Erdmagnetfelds. Die Magnetspulen lenken elektrisch geladene Teilchen unterschiedlich stark ab – je nachdem ob

sie positiv oder negativ geladen sind und wie viel Energie sie haben

6 Myonenkammern

In den Kammern sind engmaschig Drähte gespannt. Fliegt ein Myon hindurch, löst es an den Drähten einen kleinen elektrischen Impuls aus. Dieser wird gemessen, und die

7 Eisenjoch

Physiker können daraus die Flugbahn des Teilchens rekonstruieren

Die mächtigen Ringe und Scheiben aus Eisen verstärken und formen das Magnetfeld

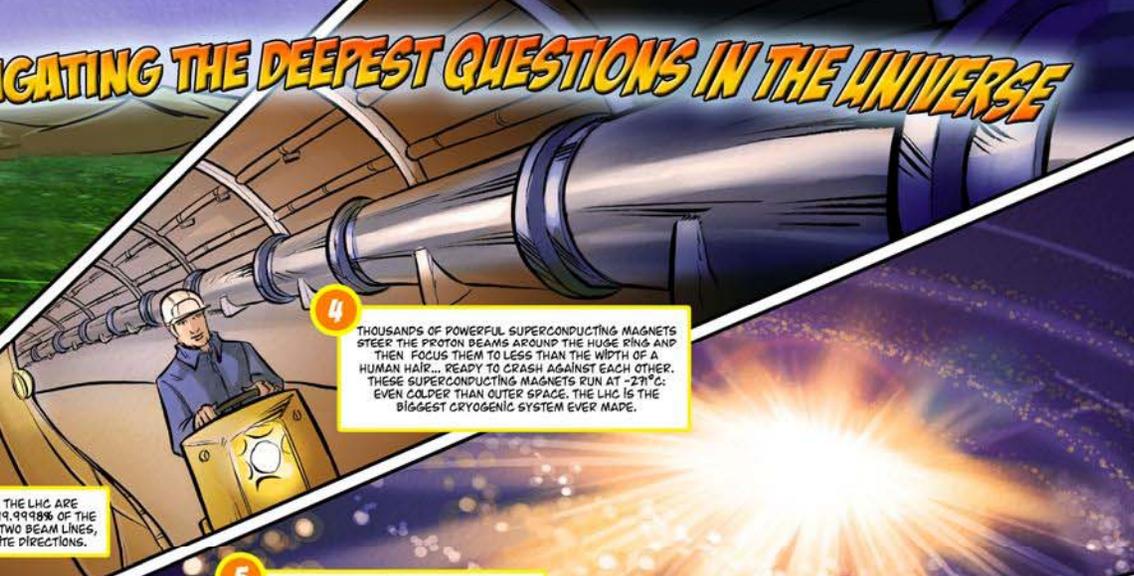
CMS: INVESTIGATING THE DEEPEST QUESTIONS IN THE UNIVERSE

1 AT THE BORDER BETWEEN FRANCE AND SWITZERLAND, THE EUROPEAN CENTER FOR NUCLEAR RESEARCH, CERN.



2 100M UNDERGROUND VAST CATHEDRAL-SIZED CAVERNS HOUSE FOUR GIANTIC PARTICLE DETECTORS FOR THE WORLD'S BIGGEST SCIENTIFIC TOOL: A MASSIVE PARTICLE ACCELERATOR, 27 KM AROUND, THE LHC: LARGE HADRON COLLIDER.

3 THE PROTONS IN THE LHC ARE ACCELERATED TO 99.9998% OF THE SPEED OF LIGHT IN TWO BEAM LINES, MOVING IN OPPOSITE DIRECTIONS.



4 THOUSANDS OF POWERFUL SUPERCONDUCTING MAGNETS STEER THE PROTON BEAMS AROUND THE HUGE RING AND THEN FOCUS THEM TO LESS THAN THE WIDTH OF A HUMAN HAIR... READY TO CRASH AGAINST EACH OTHER. THESE SUPERCONDUCTING MAGNETS RUN AT -271°C: EVEN COLDER THAN OUTER SPACE. THE LHC IS THE BIGGEST CRYOGENIC SYSTEM EVER MADE.

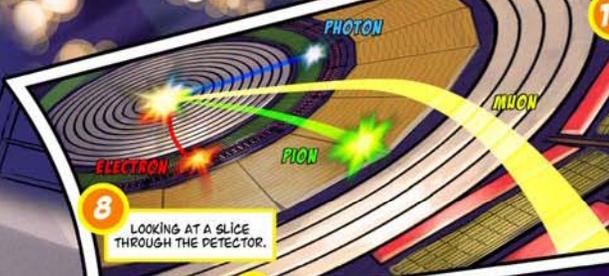
5 THE COLLISION GENERATES SO MUCH ENERGY THAT PARTICLES EXIST SINCE THE BIG BANG (14 BILLION YEARS AGO), LIKE THE HIGGS PARTICLE, REAPPEAR BRIEFLY.

THESE ANCESTRAL PARTICLES SURVIVE FOR ONLY THE TINIEST FRACTION OF A SECOND BEFORE THEY DISINTEGRATE INTO CASCADES OF MORE FAMILIAR PARTICLES. SCIENTISTS NEED ULTRAFAST, ULTRAPRECISE DETECTORS, AND STATE-OF-THE-ART CUSTOM MADE ELECTRONICS TO SEE THE CASCADE...THEY NEED CMS: THE COMPACT MUON SOLENOID.

9 CMS HAS BEEN ASSEMBLED IN LAYERS FROM MILLIONS OF PARTS WITH WATCH-MAKING PRECISION. EACH LAYER OF DETECTORS HAS A SPECIAL JOB TO DO: TO IDENTIFY AND MEASURE AS MANY PARTICLES AS POSSIBLE.

10 A TOTAL OF 1 TERABYTE OF DATA IS GENERATED IN CMS EVERY SECOND, EQUIVALENT IN VOLUME TO STORING THE NAMES AND ADDRESSES OF EVERY LIVING HUMAN BEING.

11 TO CRUNCH AND SWALLOW ALL THIS INFORMATION IS JUST NOT POSSIBLE. POWERFUL ELECTRONICS FILTERS THE DATA SIGNALS SO THAT, EVERY SECOND, ONLY THE RESULTS FROM THE 100 MOST INTERESTING COLLISIONS ARE STORED.



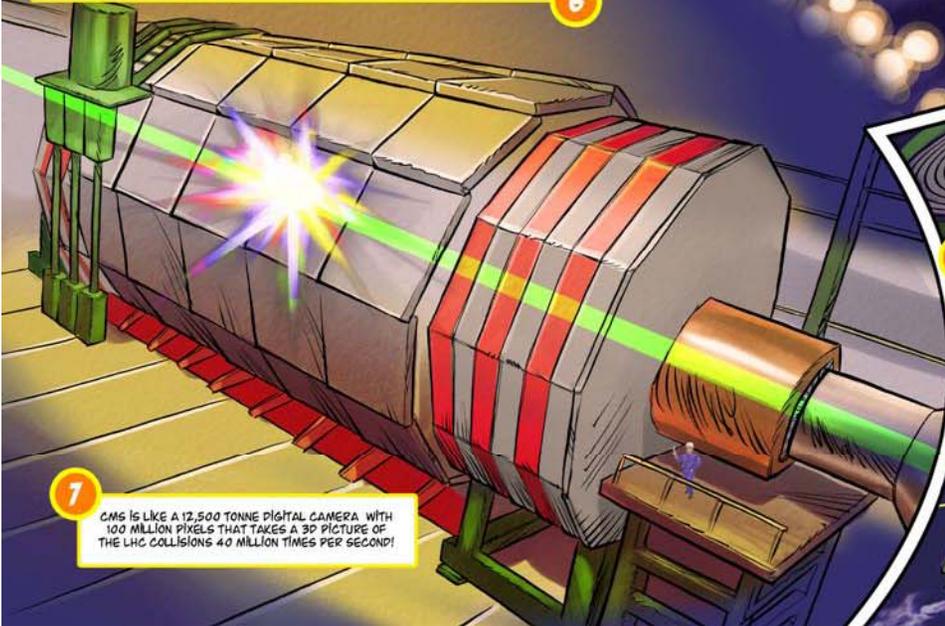
8 LOOKING AT A SLICE THROUGH THE DETECTOR.

12 A HUGE COMPUTING NETWORK, THE GRID, SENDS THE CMS DATA OUT ALL OVER THE WORLD...

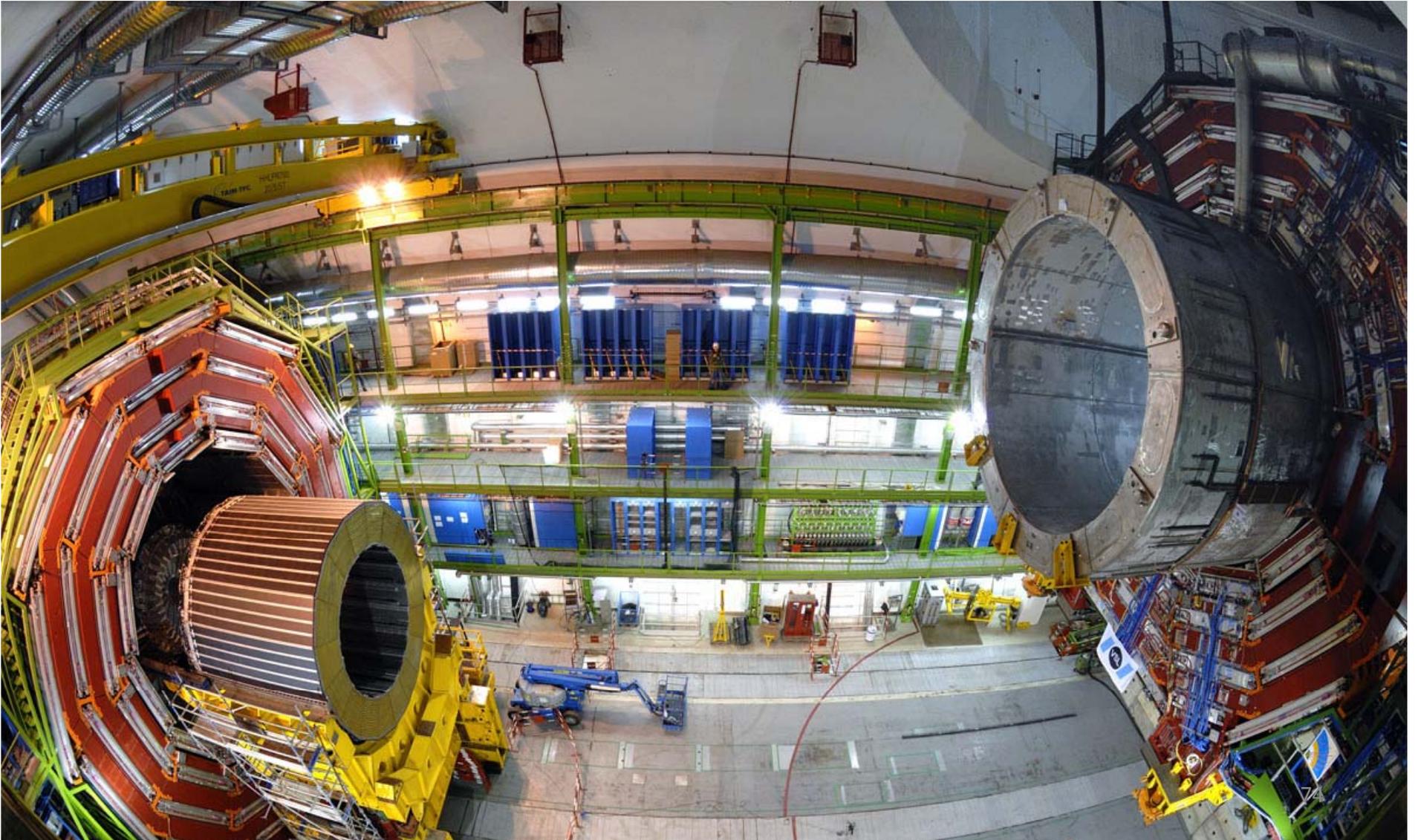
7 CMS IS LIKE A 12,500 TONNE DIGITAL CAMERA WITH 100 MILLION PIXELS THAT TAKES A 3D PICTURE OF THE LHC COLLISIONS 40 MILLION TIMES PER SECOND!

13 A PHYSICS STUDENT SAT AT THEIR PC ANYWHERE IN THE WORLD CAN HARNESS THE POWER OF THOUSANDS OF PCs OVER THE GRID...

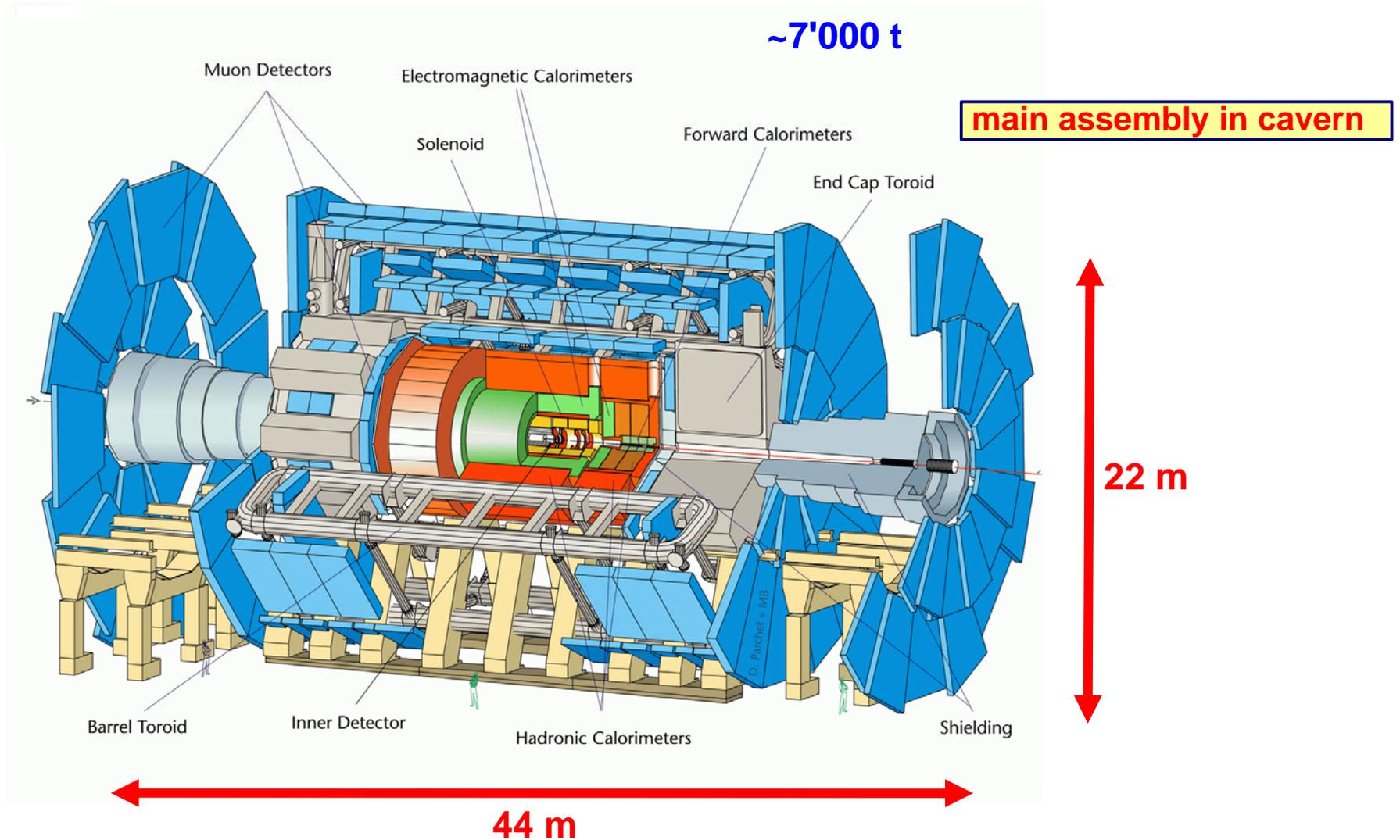
14 TO SEARCH FOR RARE COLLISIONS AND NEW PHYSICS...



Der Mittelteil des CMS Detektors auf der Reise in die Kaverne



ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)



Reichen Beschleuniger und Detektoren? Was brauchen wir noch?

- Infrastruktur
 - Elektronik, Elektronik, Elektronik
 - Kabel, Kabel, Kabel (Logistik)
 - E.g. PC, Kühlung, Gas, Werkstätten, ...
 - E.g. schnelle ADCs, Controller Spannungsversorgung, Kabel, ...
- Trägerstrukturen
- Kontrollsoftware
- Auslesesoftware und Speicherung
- Analysesoftware der gespeicherten Daten
- Monte Carlo (Simulation)
- Jede Menge Menschen!!!!!!
- ...

Ein Beispiel: Completion of Services on YB0

Nov. '07

Estimated ~50,000 man-hours of work in last 5 months!!

Scale of the project (huge):

- Install 18 km of Tk cooling pipes with special insulation and wvb.
- Install over 1 km of cables trays (many types):
 - Standard
 - Cooled Tk radial
 - Cooled EB-LV radial
 - Cooled EB-LV periphery
- Install 100 km of tracker LIC cables
- Install 80 km of EB cables, optical fibers and pipes
- Install 19 km of HB cables, optical fibers and pipes
- Install 30 km of Tk optical fibers
- About 6,100 cables, 700 optical fiber cables/bundles, 700 pipes for a grand total of about 250km and tens of thousands connection!

Chips & Module (Im Prinzip eine eigene Vorlesung)

- Nicht zu vergessen ist, dass meistens die komplette Elektronik eine Eigenentwicklung ist!
 - Chips und Treiberkarten werden speziell auf die Experimente zugeschnitten
 - **Zeit**konstanten, Strahlungsumgebung, Magnetfeld muss berücksichtigt werden
 - Kapazitäten, Ströme, Spannungen, ...

Rahmen aus Kohlefaser

Mikroverschweißungen

Front-end Hybrid

Ein Beispiel:

Bei Ereignissen alle 25ns haben die Teilchen eines Aufpralls den Detektor (mit $v=c$) noch nicht verlassen bevor der nächste Aufprall passiert. D.h. Der Zeitstempel muss sehr genau sein und die Chips am Sensor müssen Informationen eine Weile speichern

Chips

Sensoren

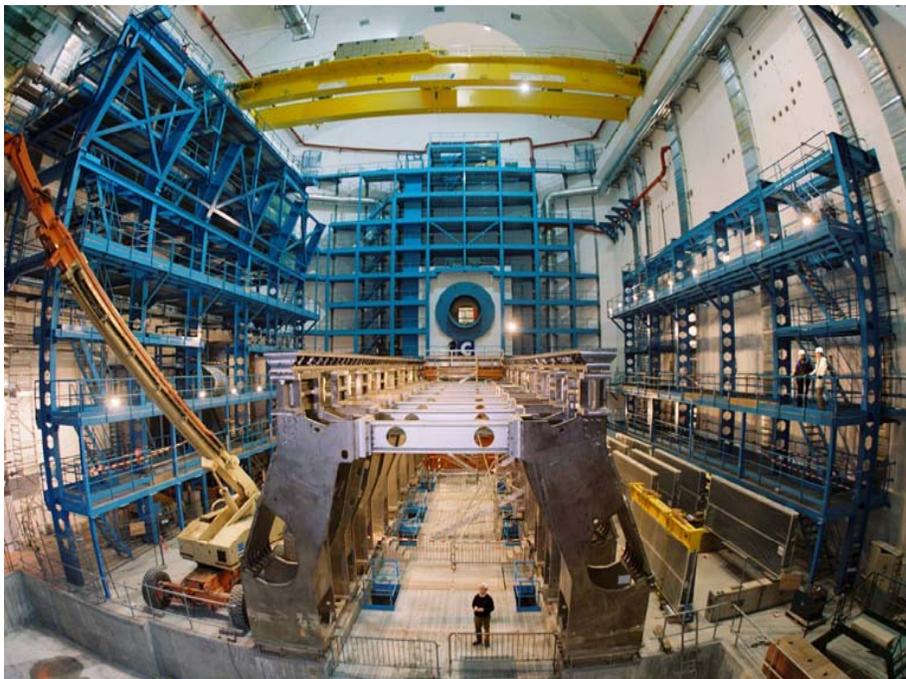
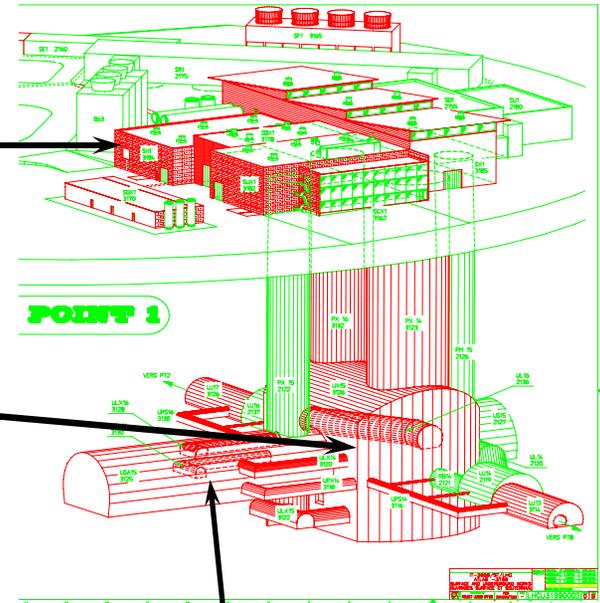
Kapton Schaltkreis

Pitch adapter⁷⁸ (glass)



ATLAS: Infrastruktur & Installation

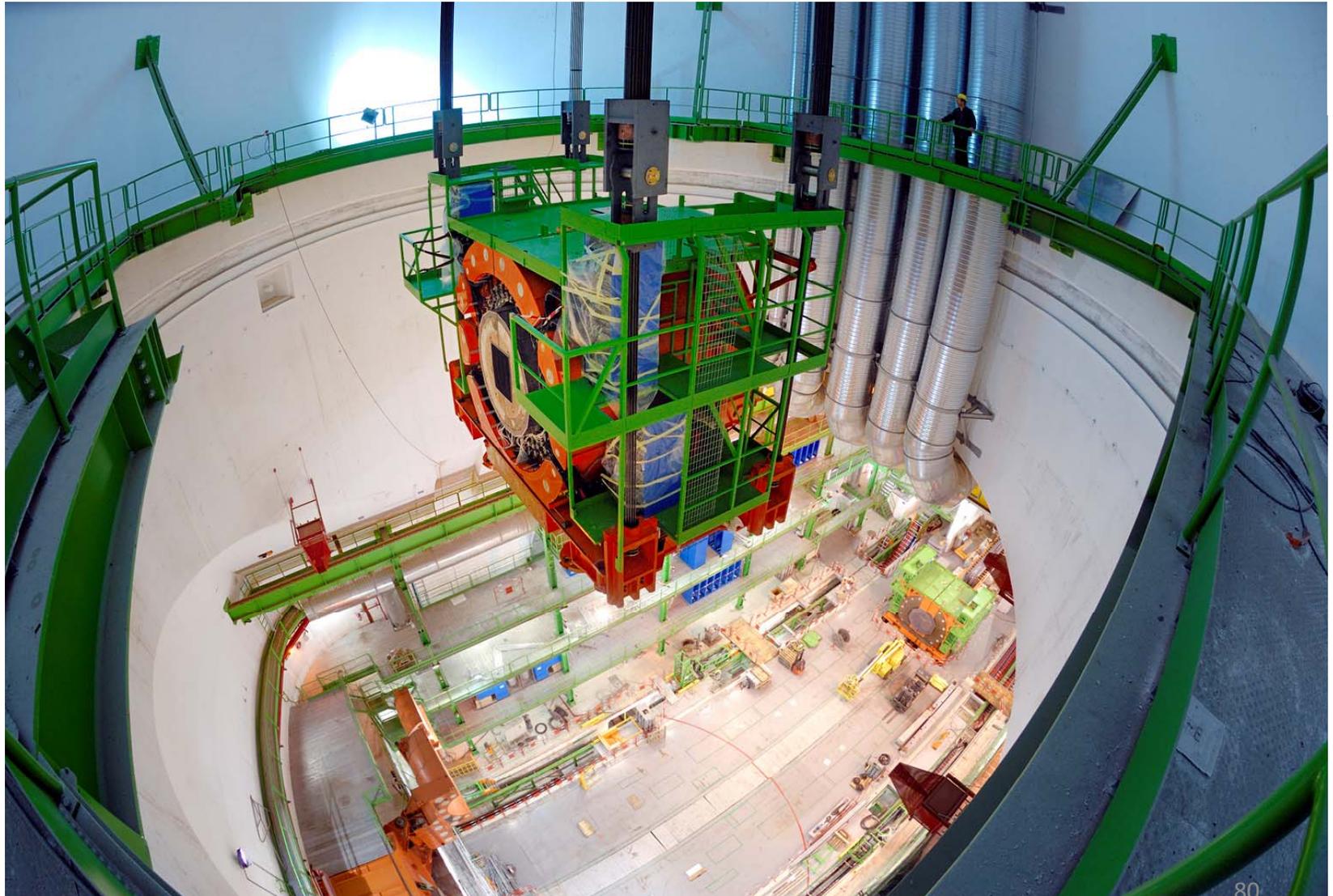
Cryogenic plant fertig und abgenommen



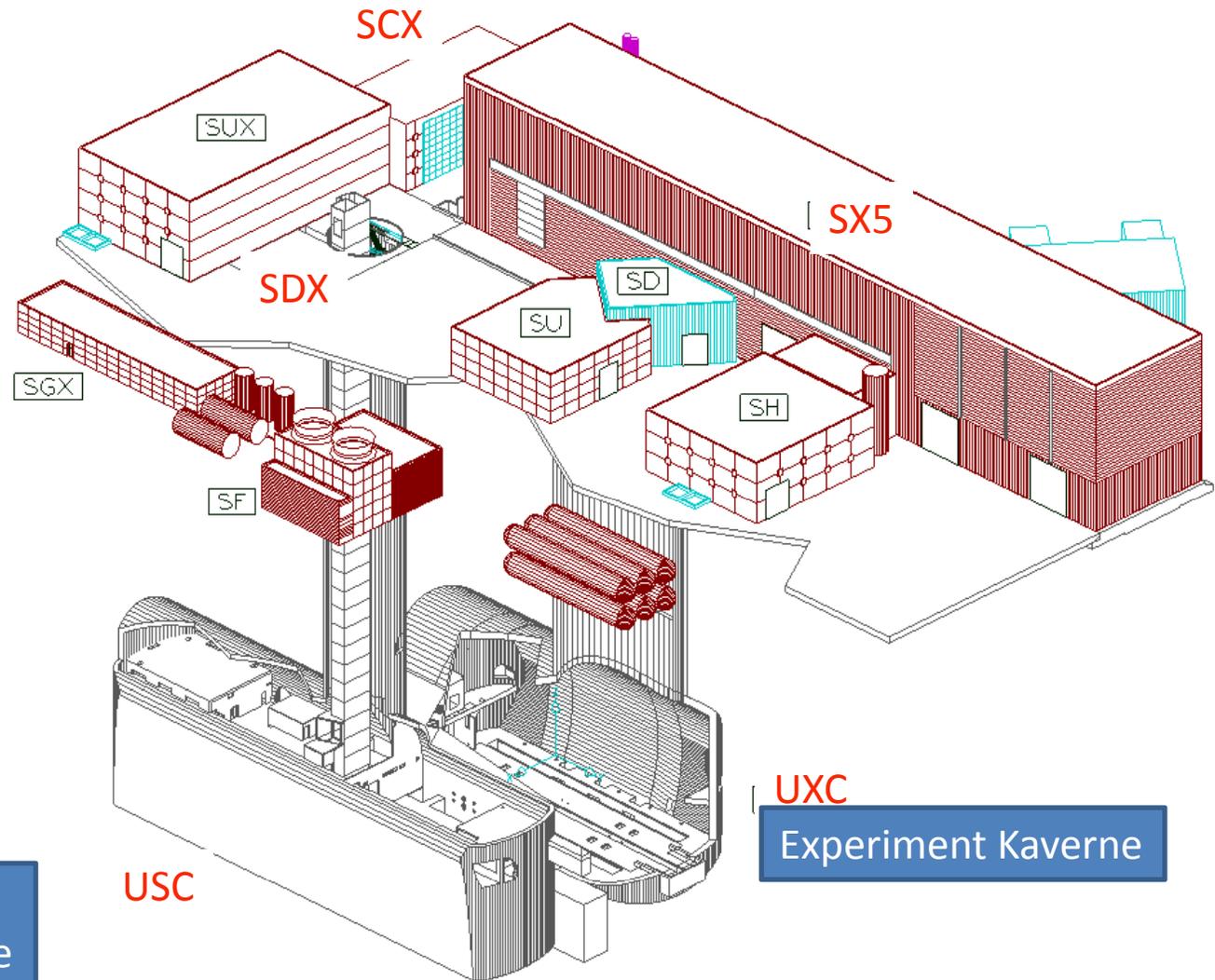
Kaverne und Basisinfrastruktur schon seit 2003



Das Endkappen Kalorimeter auf dem Weg nach unten



CMS: Kaverne und Gebäude

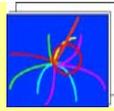


Infrastruktur:
z.B. PCs, Auslesemodule
4 stöckig

UXC
Experiment Kaverne

CMS Trigger and DAQ

Alle 25 ns



40 MHz
COLLISION RATE

100 kHz
LEVEL-1 TRIGGER

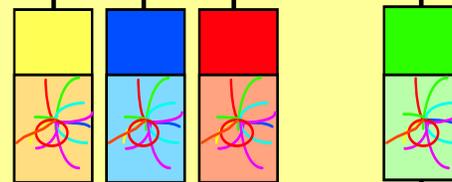
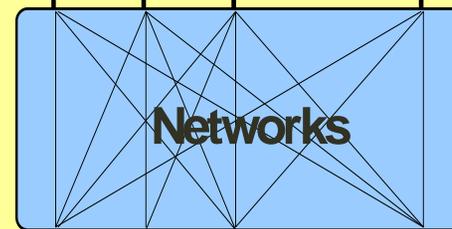
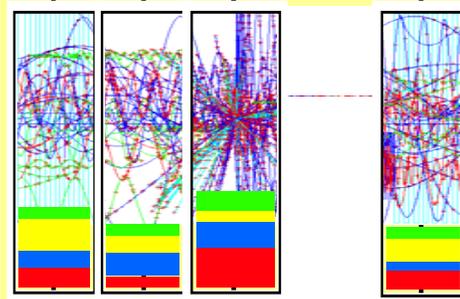
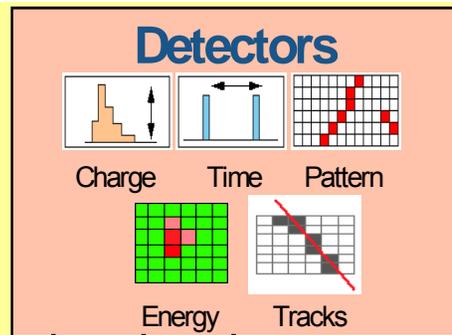
DAQ akzeptiert
Level-1 Rate of 100kHz

1 Terabit/s
(50000 DATA CHANNELS)

500 Gigabit/s

HLT (High Level Trigger)
entworfen für ca. 100Hz
- Unterdrückung Faktor 1000
~2000 CPUs

Gigabit/s SERVICE LAN



16 Million channels
3 Gigacell buffers

1 Megabyte EVENT DATA

200 Gigabyte BUFFERS
500 Readout memories

EVENT BUILDER. A large switching network (512+512 ports) with a total throughput of approximately 500 Gbit/s forms the interconnection between the sources (Readout Dual Port Memory) and the destinations (switch to Farm Interface). The Event Manager collects the status and request of event filters and distributes event building commands (read/clear) to RDPMs

5 TeraIPS

EVENT FILTER. It consists of a set of high performance commercial processors organized into many farms convenient for on-line and off-line applications. The farm architecture is such that a single CPU processes one event

Petabyte ARCHIVE

Trigger & DAQ

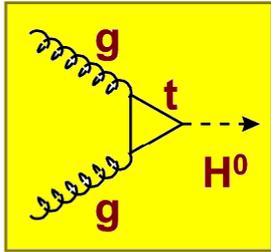


Große Anstrengungen wurden in den letzten Jahren unternommen um die Datennahme zu validieren.
Mit Hilfe von Prototypen und Emulatoren.

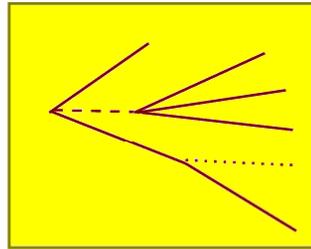
1:8 Datannahmesystem an P5 des CMS Experimentes



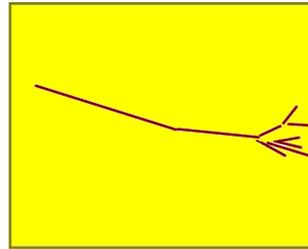
Von Physik zu Rohdaten



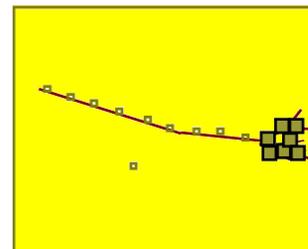
Basic physics



**Fragmentation,
Decay**



**Interaction with
detector material**
Multiple scattering,
interactions



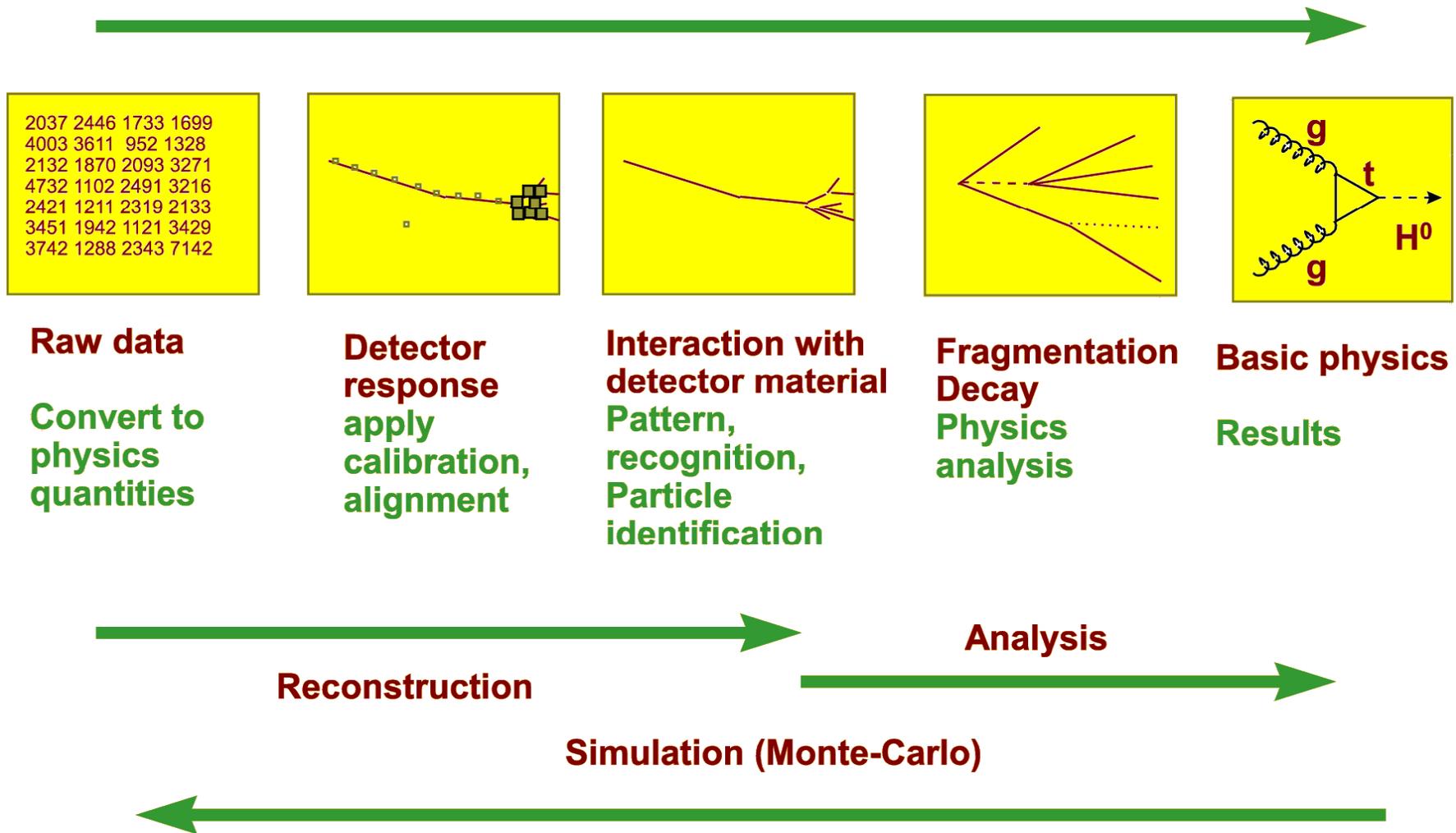
**Detector
response**
Noise, pile-up,
cross-talk,
inefficiency,
ambiguity,
resolution,
response
function,
alignment



Raw data
Read-out
addresses,
ADC, TDC
values,
Bit patterns

- Rohdatenrate in ATLAS/CMS beträgt ca. 400MB/s
 - . Z.B. Nummer eines Detektors, dessen ADC (Analog to Digital) eine Signalwert X

Von Rohdaten zur Physik



- Auch der Weg von den Rohdaten zur Physik muss verstanden sein!
 - Rekonstruktion+ Analyse der Ereignisse

Ausblick

**DIE SUCHE NACH DEN FUNDAMENTALEN BAUSTEINEN DER NATUR
IST PHILOSOPHISCHES ANLIEGEN SEIT MENSCHENGEDENKEN**

**WIE WIR DIE FRÜHEREN KULTUREN BEURTEILEN, WERDEN
AUCH WIR SPÄTER AN UNSEREN ERKENNTNISSEN
GEMESSEN WERDEN**

**UNSERE FORSCHUNG IST VERKNÜPFT
MIT DER AUSBILDUNG UND DER SUCHE
NACH ANWENDUNGEN IM
TÄGLICHEN LEBEN**

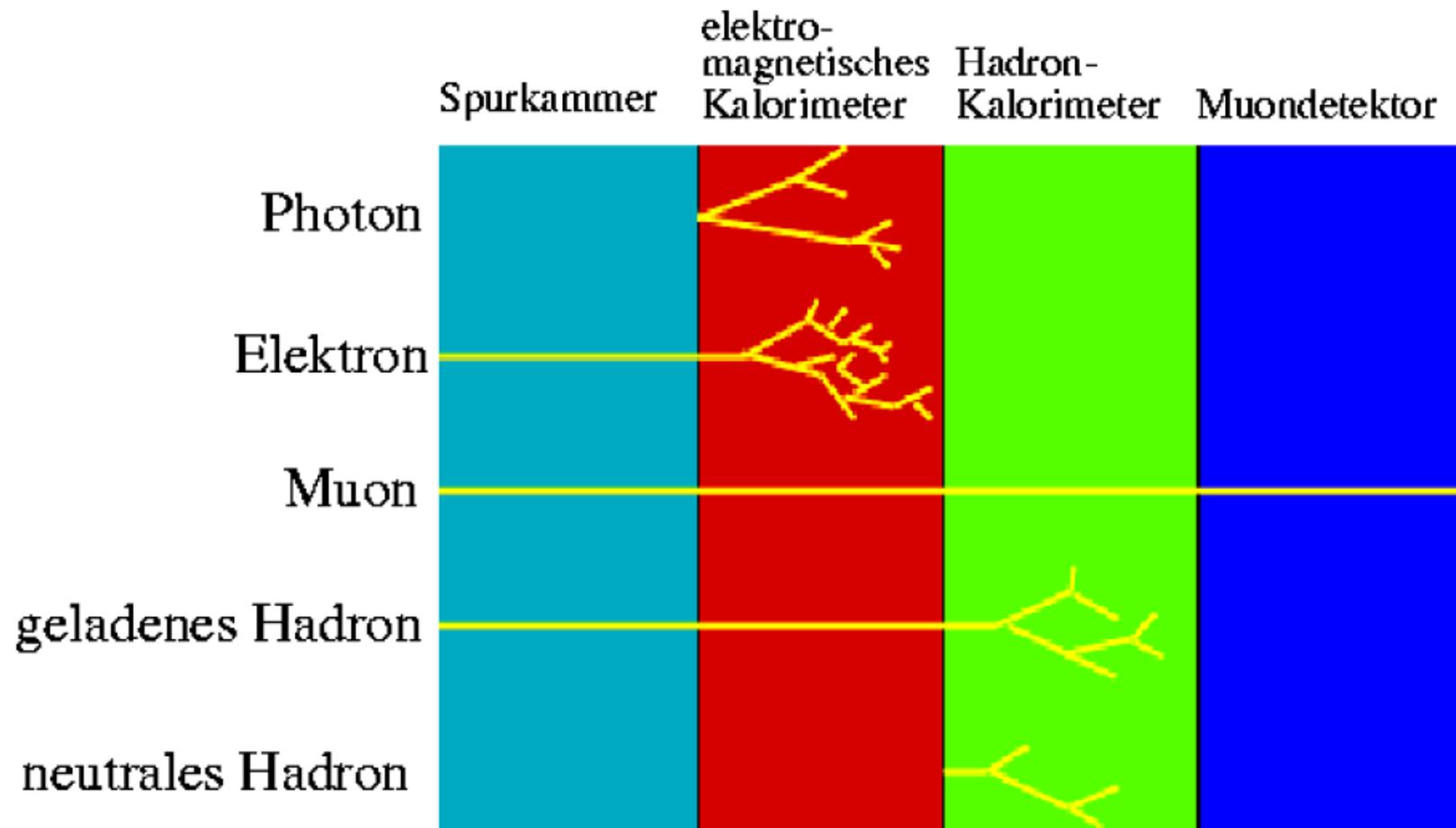


Acknowledgements

- Christian Joram Particle Detectors; Lectures for Postgraduates Students and Summer Students, CERN 1998, 2003, 2005
- Sascha Schmeling High Schools Teachers Program CERN 2003-2006
- Michael Hausschild Detectors; Doktoranden Herbstschule Maria Laach
- Thomas Müller: Teilchenphysik Vorlesung Uni Karlsruhe
- Freunde & Bekannte & Collaborators
- M. Titov (VCI 2007) : New Developments and Future Perspectives of Gaseous Detectors
- Peter Križan (VCI 2007) Detectors for Particle Identification
- http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~hartmann/CMS_Status_Seminar_Bonn1207.ppt

Backup

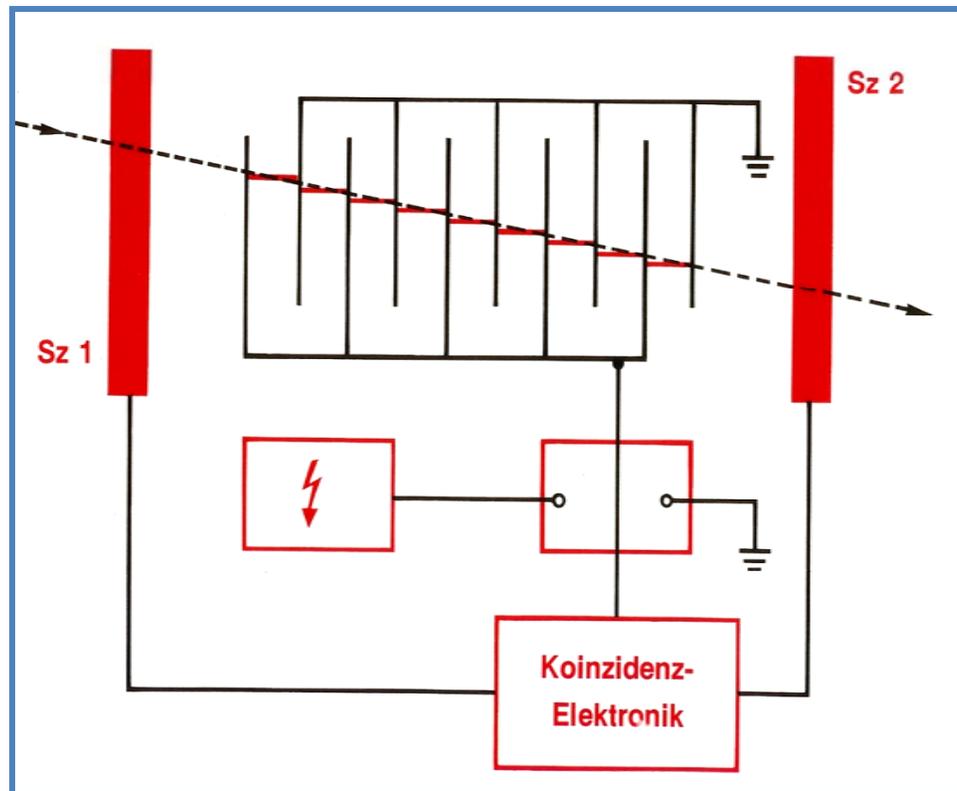
Zusammenfassung



prinzipieller Aufbau eines Detektorsystems

Funkenkammer:

- Elektronischer Detektor
- Teilchen erzeugen „**Ionisationsbrücke**“



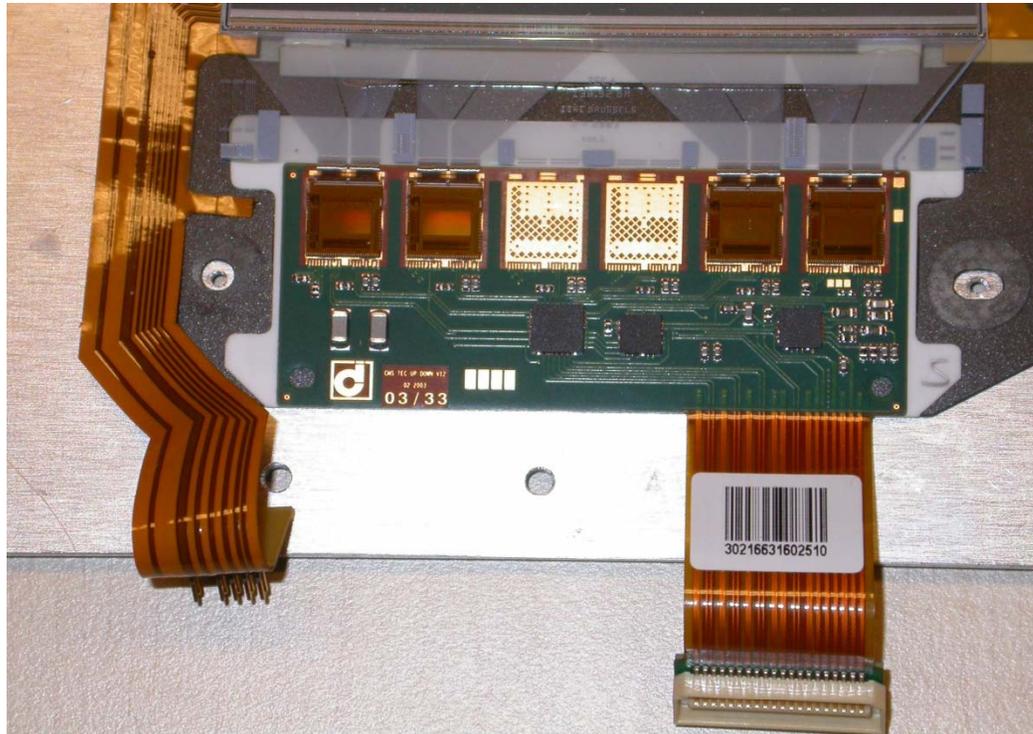
- Position dieser Durchschläge optisch oder durch **elektronische Methoden** ermittelt
- Versagen bei zu vielen gleichzeitig ankommenden Teilchen

Final front end hybrids

4-layer Kapton substrate (flex) laminated onto ceramic

4 or 6 APV25 readout chips

- radiation hard commercial 0.25 μ m CMOS technology
- 128 strips per APV, multiplexed to one analog output
- per channel: pre-amplifier, CR-RC shaper, 4.8 ns pipeline



Detector Control Unit (DCU)

- 12-bit ADC
- 8 channels:
 - hybrid and sensor temperatures
 - leakage current
 - low voltages

2:1 multiplexer

- 2 APVs multiplexed to one readout channel

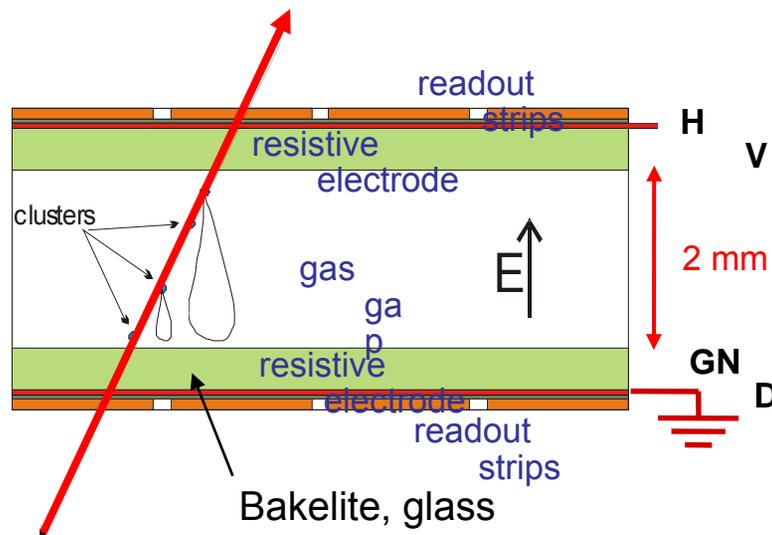
PLL chip

- decodes clock & trigger signals

Analog & optical readout!

Resistive Plate Chambers (RPC)

- There are also gaseous detectors without wires
 - two resistive plates ($\sim 10^9 \star \text{cm}$) with a small gas gap (2 mm) and large high voltage (12 kV) on outside electrodes
 - strong E-field: operation in “streamer mode”
 - gas avalanche already starting in gas gap (no wires involved)
 - developing of “streamers” (blob with lots of charge, almost like a spark)
 - signal on external read-out strips via influence (segmented for position resolution)
 - streamer/discharge is “self-quenching”: stops when near-by resistive electrodes are locally discharged (E-field breaks down)



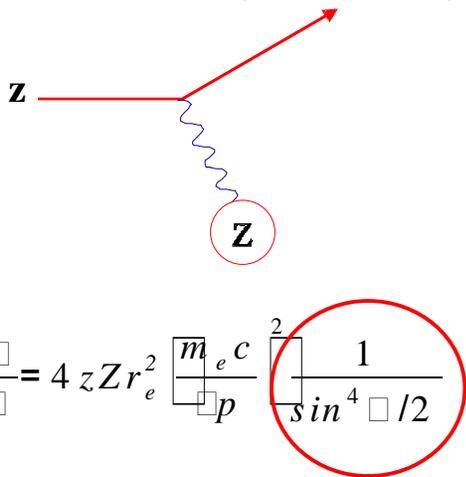
Advantages: simple device,
good to cover large areas,
VERY fast!!!

→ **used as trigger devices
in LHC experiments,
time resolution ~ 50 – 100 ps**

Disadvantages: Choice of resistive material
+ surface quality crucial,
affects “dark” trigger rate

Elastic Scattering

- Most basic interaction of a charged particle in matter
 - elastic scattering with a nucleus
Rutherford (Coulomb) scattering



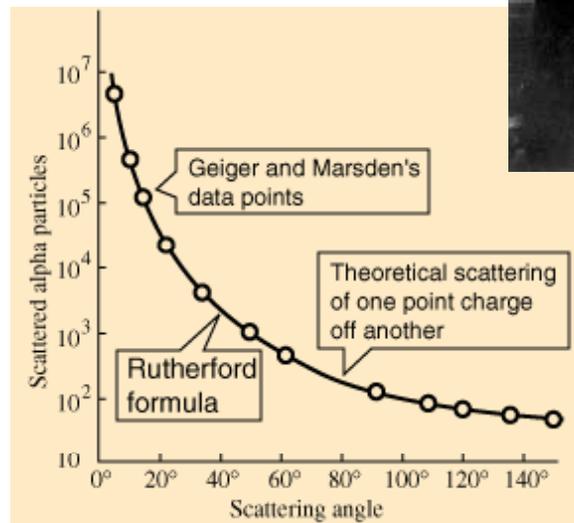
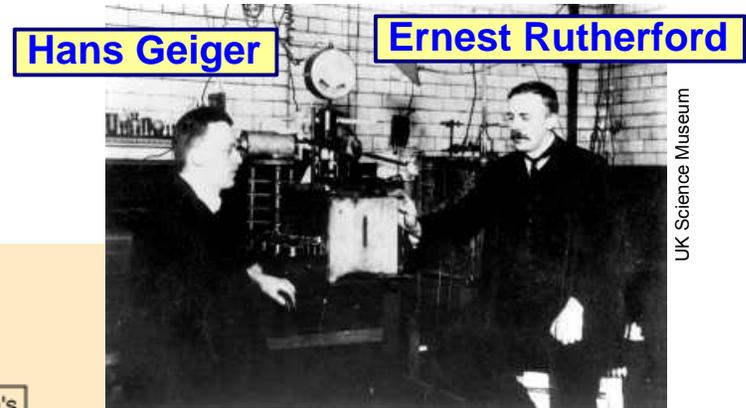
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = 4 z Z r_e^2 \frac{m_e c^2}{p^2} \frac{1}{\sin^4 \theta / 2}$$

- Approximations

- non-relativistic
- no spins

- Scattering angle and energy transfer to nucleus usually small

- No (significant) energy loss of the incoming particle
- Just change of particle direction



UK Science Museum

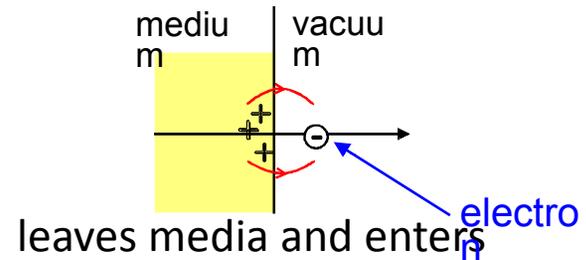
UK Science Museum

Transition Radiation

- Predicted by Ginzburg and Franck in 1946
 - emission of photons when a charged particle traverses through the boundary of two media with different refractive index

- (very) simple picture

- charged particle is polarizing medium
- polarized medium is left behind when particle leaves media and enters unpolarized vacuum
- formation of an electrical dipole with (transition) radiation

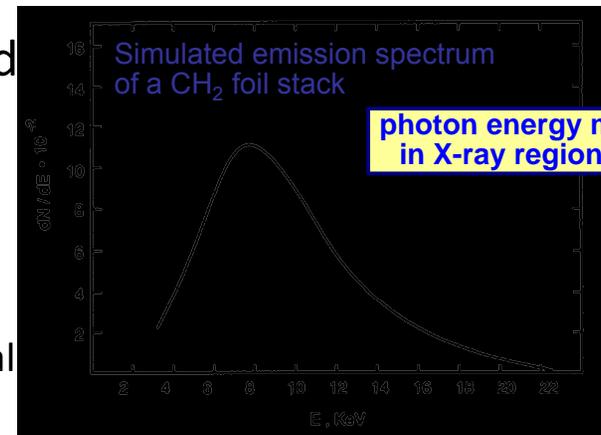


- Radiated energy per boundary

- only very high energetic particles can radiate
 - need about $\gamma > 1000$
 - in our present energy range reachable

$$N_{\text{photons radiate}} \approx \frac{1}{137}$$

need many boundaries (foils, foam) to get a few photons



Calorimeter types

Homogeneous calorimeters:

- ⇒ Detector = absorber
- ⇒ good energy resolution
- ⇒ limited spatial resolution (particularly in longitudinal direction)
- ⇒ only used for electromagnetic calorimetry

Sampling calorimeters:

- ⇒ Detectors and absorber separated → only part of the energy is sampled.
- ⇒ limited energy resolution
- ⇒ good spatial resolution
- ⇒ used both for electromagnetic and hadron calorimetry