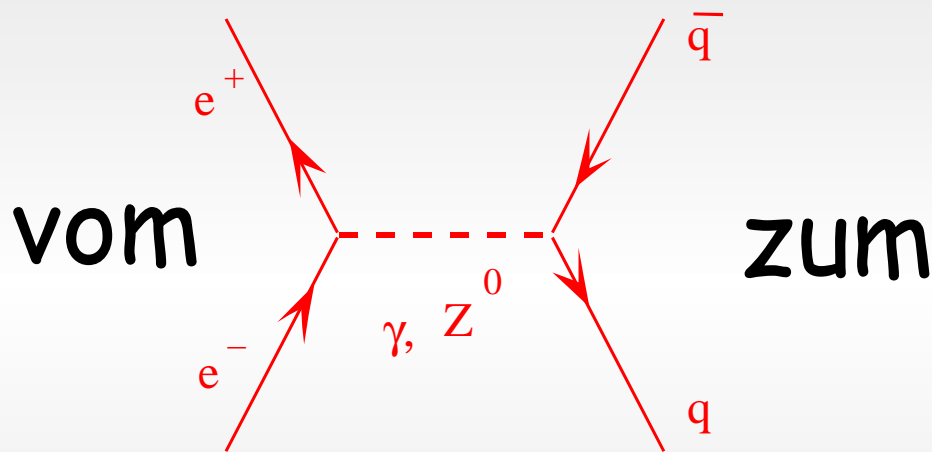
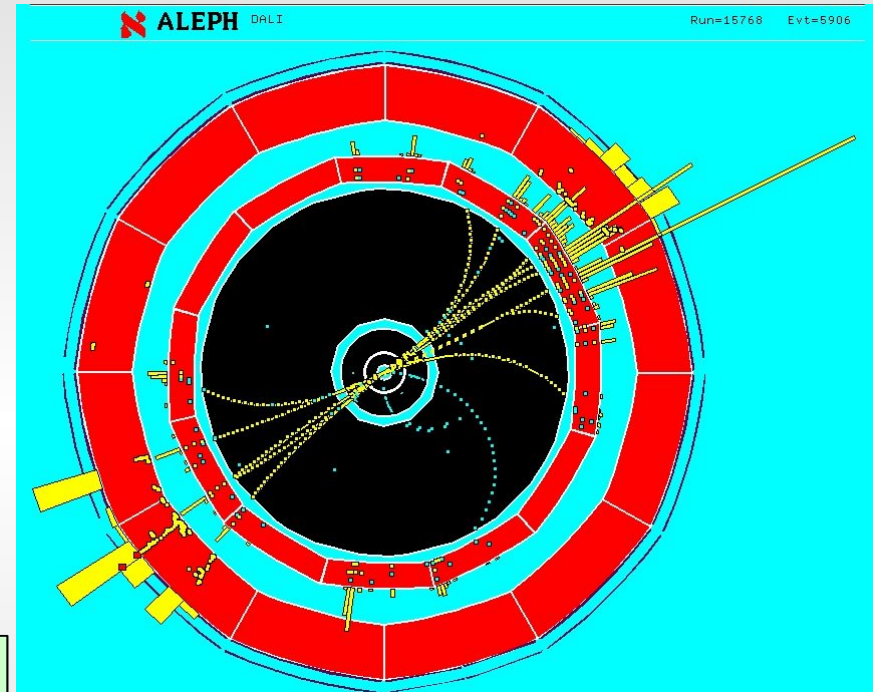


Experimentelle Methoden: Teilchendetektoren - ein Überblick

oder



Nachweismethoden von
Endzuständen aus
Teilchenreaktionen oder
der kosmischer Strahlung



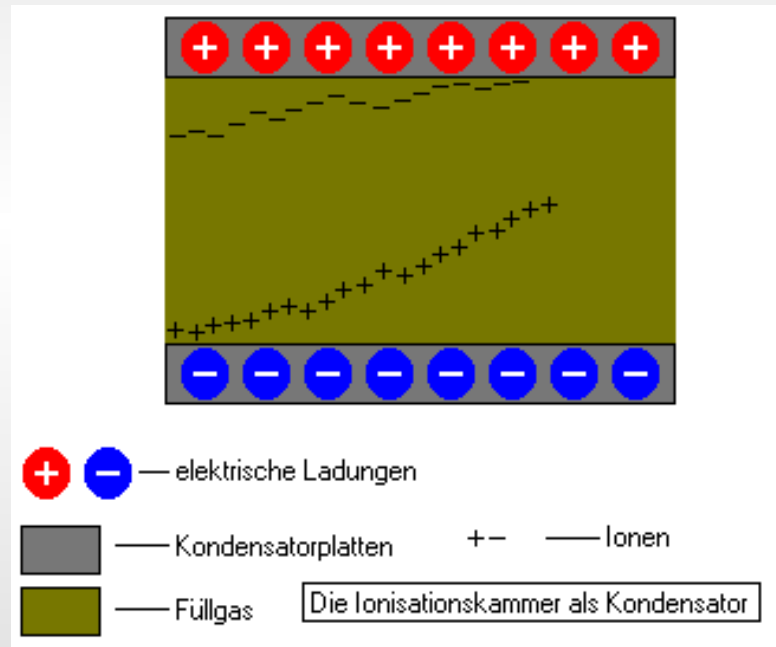
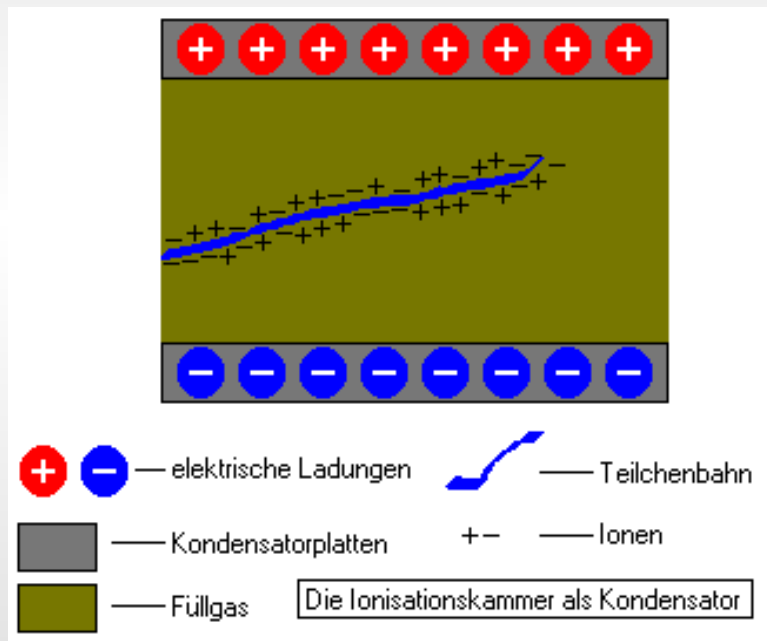
Christoph Rembser
Schule für Astroteilchenphysik
Obertrubach-Bärnfels
8/10/2004

Detektoren: Kameras für Elementarteilchen

- "How to do a particle physics experiment?"
 - Nehme stabile Elementarteilchen
 - Beobachte ihre Wechselwirkung mit anderen Elementarteilchen
 - Weise die bei der Wechselwirkung entstehenden Teilchen nach
 - Was ist ihr Impuls p , ihre Energie E , ihre Lage im Raum (x, y, z, t) und ihre Art (Masse m und Ladung q) ?
 - Analysiere und interpretiere die gemessenen Daten
 - Dazu braucht es
 - Quellen von Teilchen
 - Detektoren
 - Leistungsfähige Computer
 - Viele gute Physiker
 - Eine ganze Menge Geld

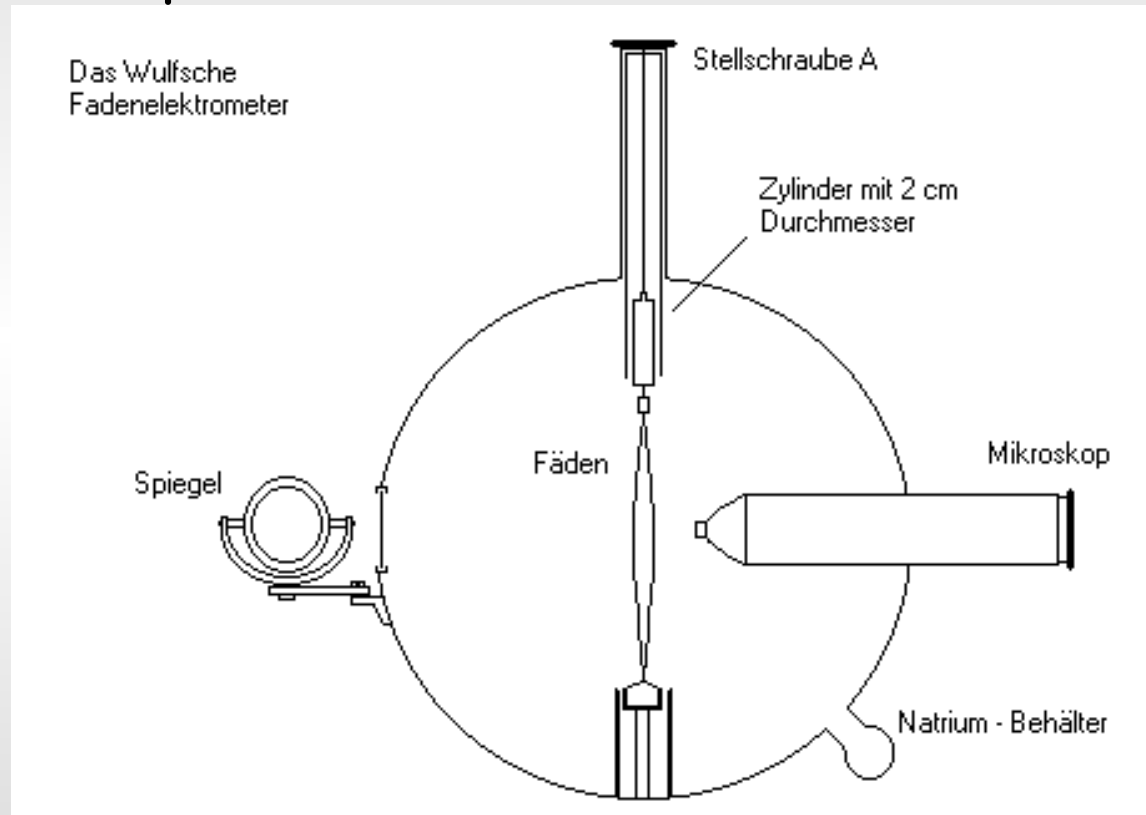
Werkzeuge der Pioniere

- Wulf, Hess ~1910: nur Nachweis der Existenz von Teilchen
 - Ionisationskammer



Eine Verbesserte Version

- Der Wulf'scher Strahlenapparat, ein Zweifadenspektrometer:

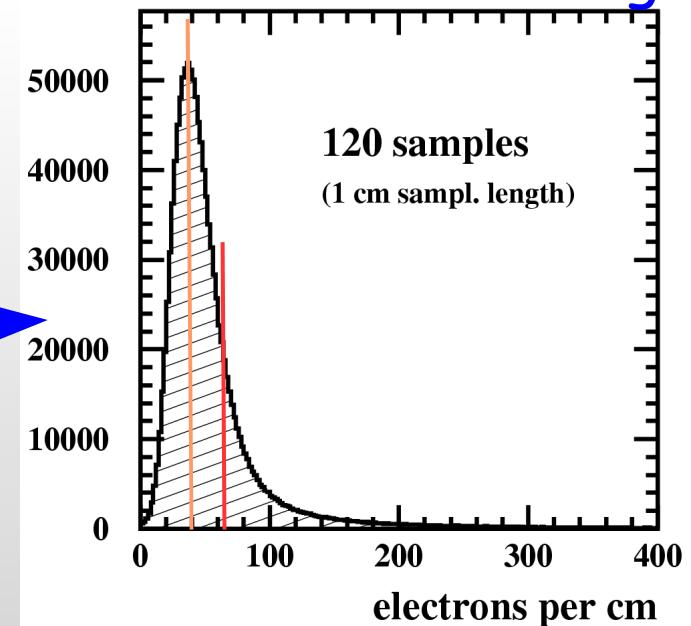
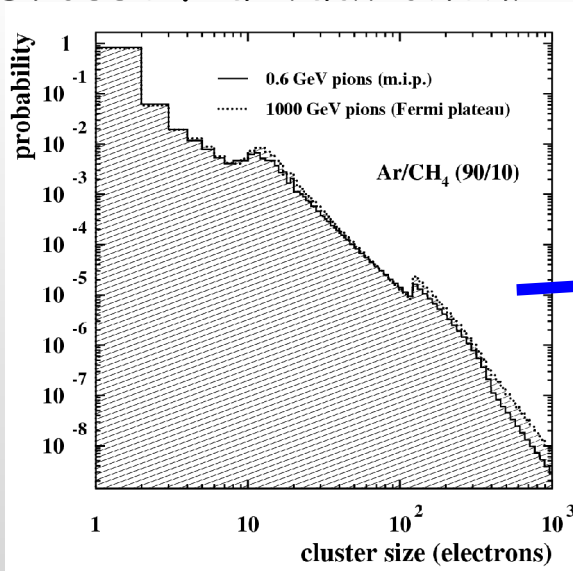


- Viktor Hess entdeckt hiermit die kosmische Strahlung

Geladene Teilchen: Energieverlust durch Ionisation

- Ionisation von Atomen im Material durch elektromagn. Wechselwirkung
- Energieverlust setzt sich zusammen aus
 - Anzahl der Wechselwirkungen, Ionisationen pro Strecke
 - Poisson-verteilt!
 - Anzahl der erzeugten Elektronen/Ionen
 - Grosse Fluktuationen!

Landau-Verteilung



Mittlerer Energieverlust eines Teilchens

- Beschrieben durch Bethe-Bloch Formel als Funktion von Q , $\beta\gamma$

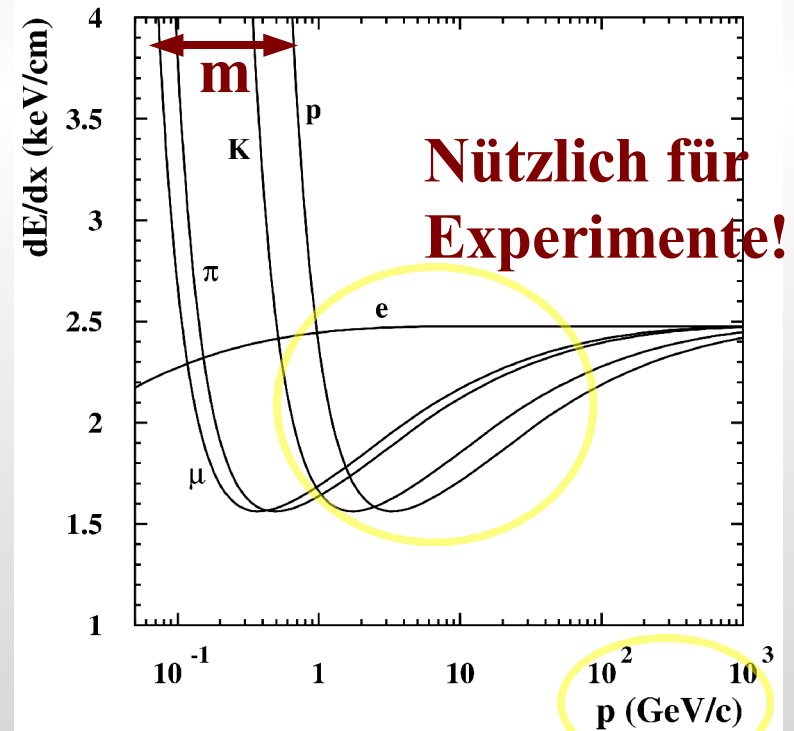
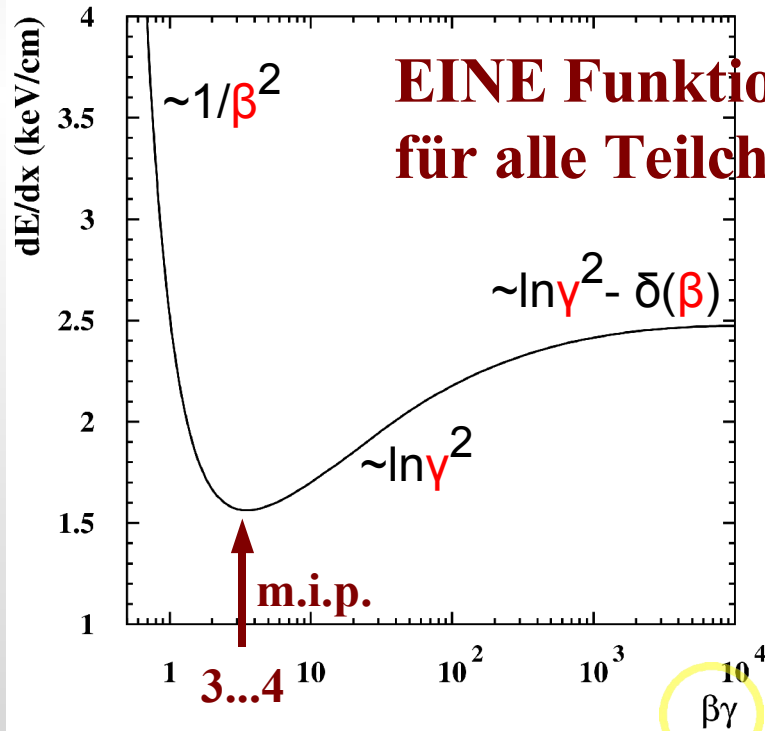
$$\langle dE/dx \rangle = \xi * 1/\beta^2 * Q^2 * [K + \ln Q^2 + \ln \gamma^2 - \beta^2 - \delta(\beta)]$$

Elektron-Dichte

Klassische Rutherford Streuung

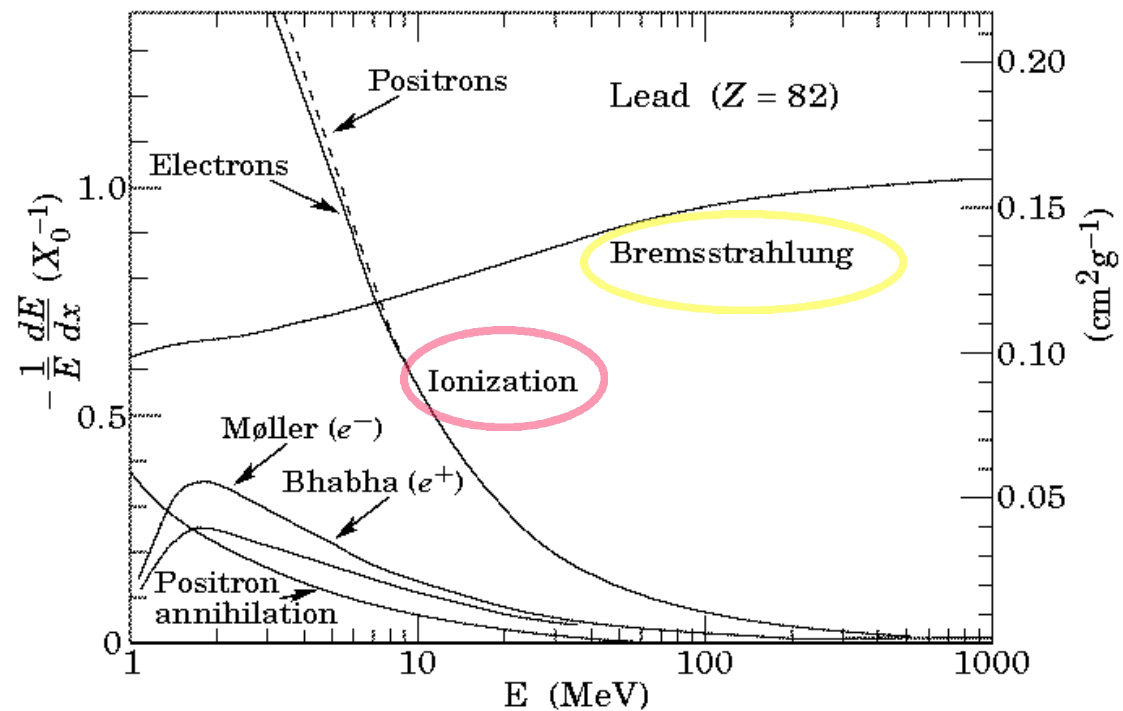
Relativistischer Anstieg "Lorentz boost"

Dichte Effekte, verantwortlich für "Plateau"



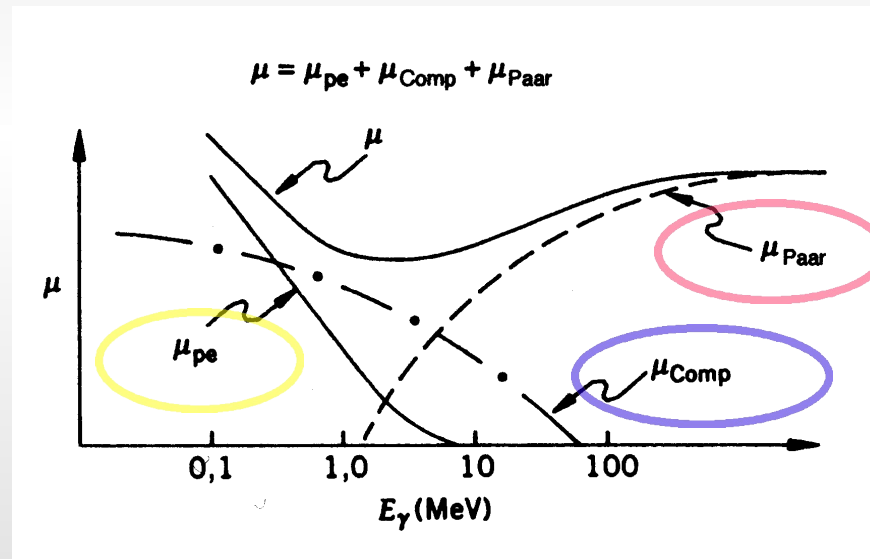
Wechselwirkung von Teilchen in Materie

- Elektronen: Bremsstrahlung
 - Energieverlust durch Streuung an Atomkernen, Richtungsänderung \rightarrow elektromagnetische Strahlung (Photonen)
 - Dominiert bei hohen Teilchenenergien gegenüber dE/dx
 - Strahlungslänge X_0 : Materialdicke nach der die Energie des Elektrons auf $1/e$ -tel abgefallen ist



Wechselwirkung von Teilchen in Materie

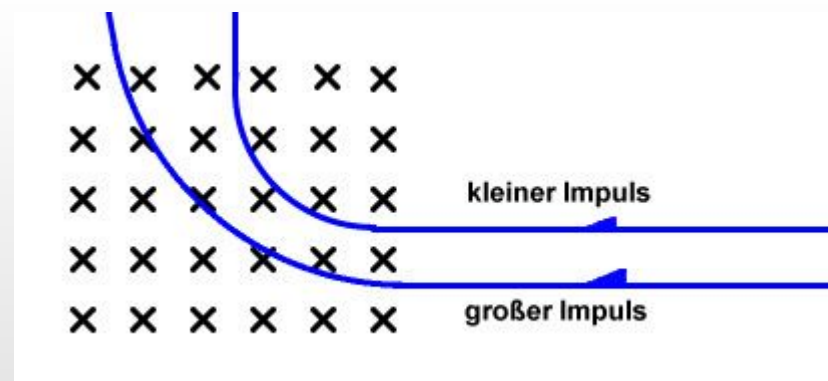
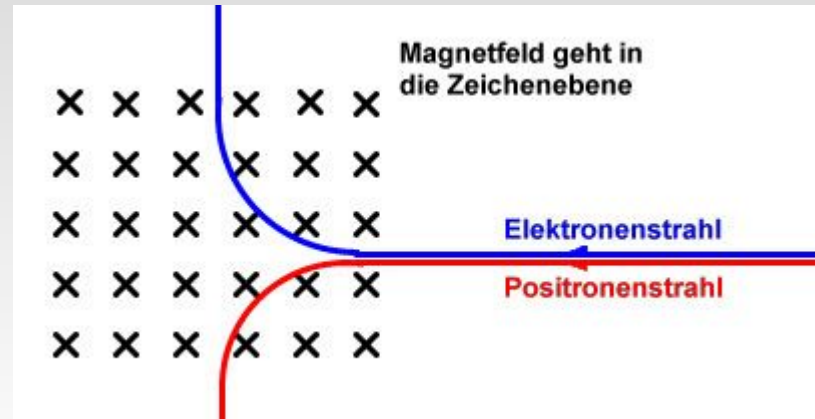
- Photonen: Absorption
 - Photo-Effekt (dominiert bei kleinen Energien)
 - Compton-Streuung
 - Paar-Erzeugung, dominiert bei hohen Energien



- Strahlungslänge X_0 : Materialdicke nach der die Energie des Elektrons auf 1/e-tel abgefallen ist

Wichtig für Detektoren: Magnetfeld!

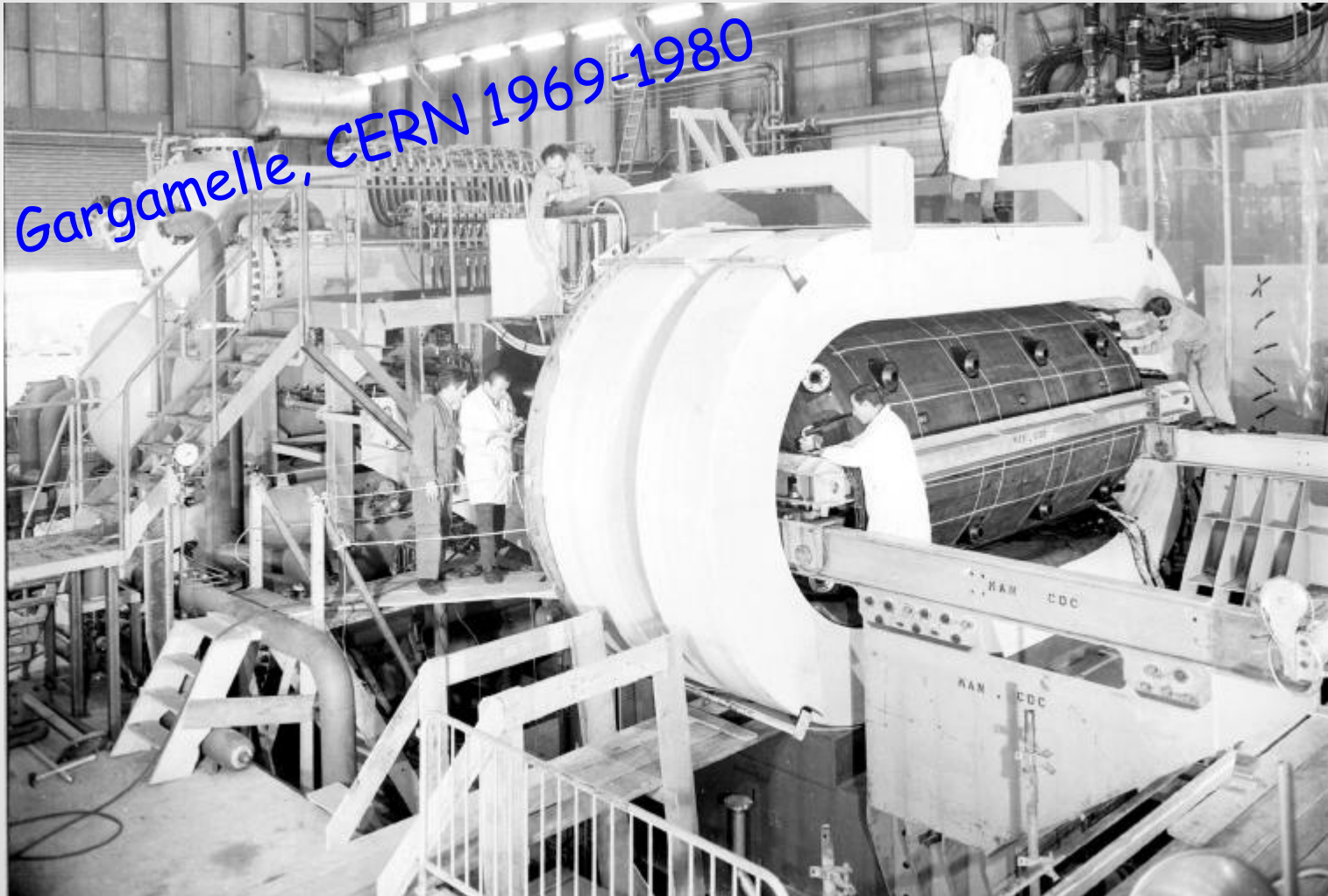
- Lorentz-Kraft hilft ...



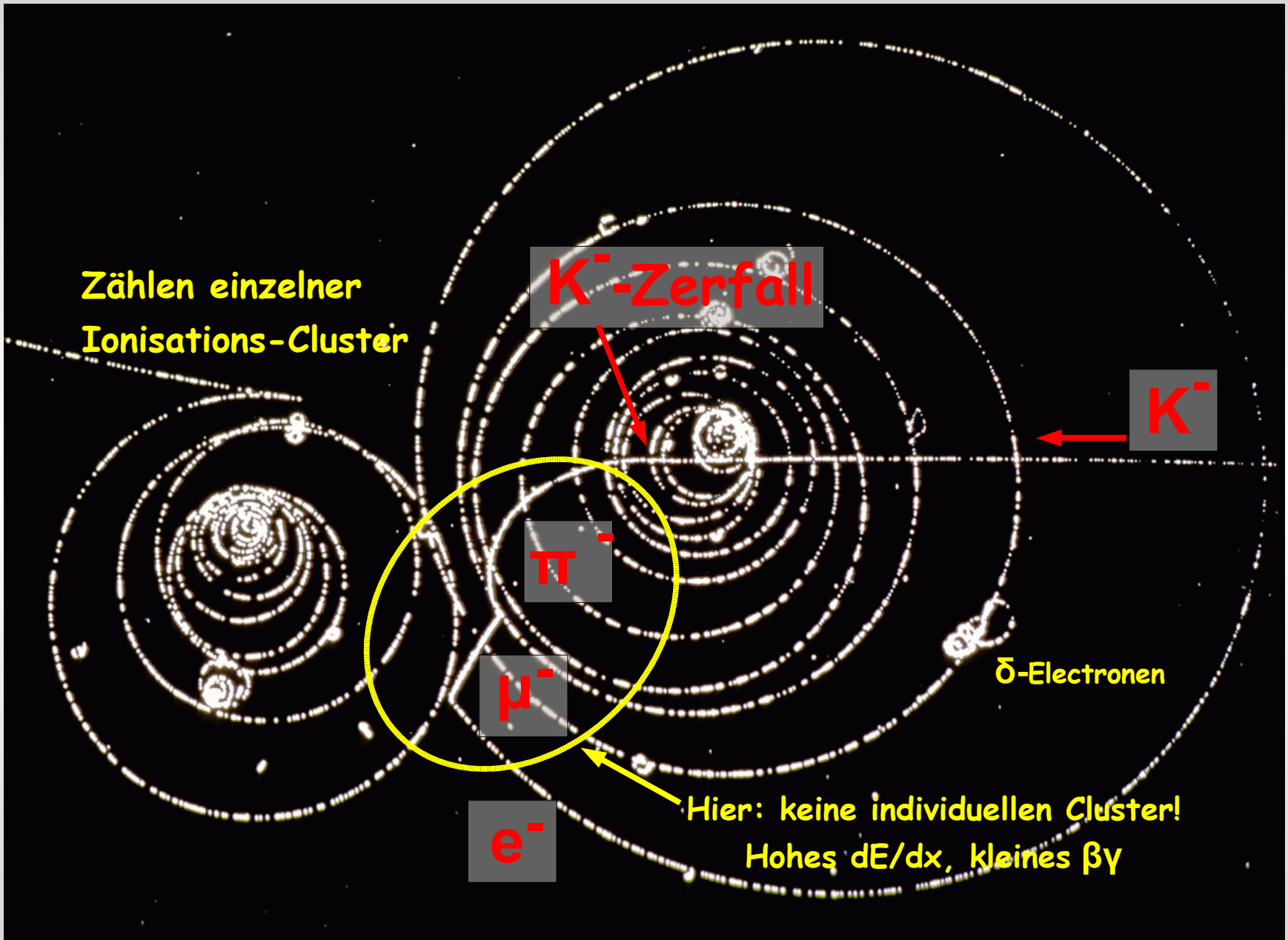
... aber kann auch schaden, dazu später mehr...

Blasenkammer

- Ionisationskerne entlang Teilchenspur in überhitzter Flüssigkeit verursachen Blasenbildung

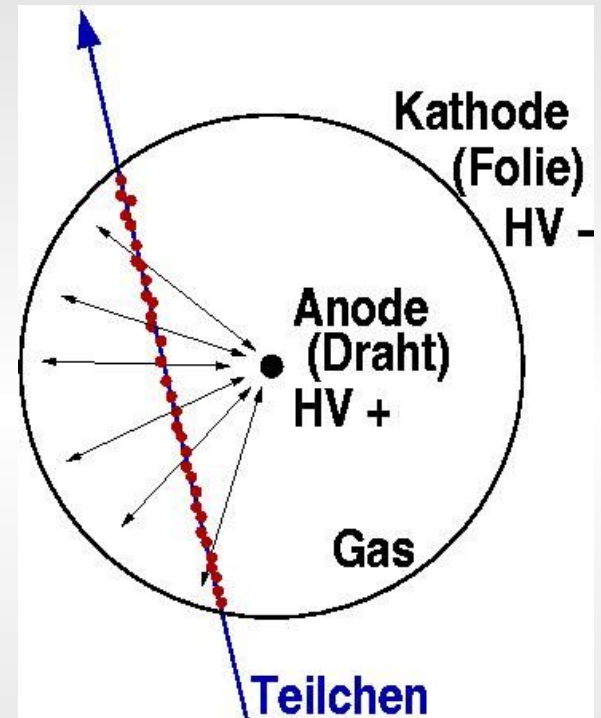


Zusammenfassung: dE/dx und Teilchenidentifikation

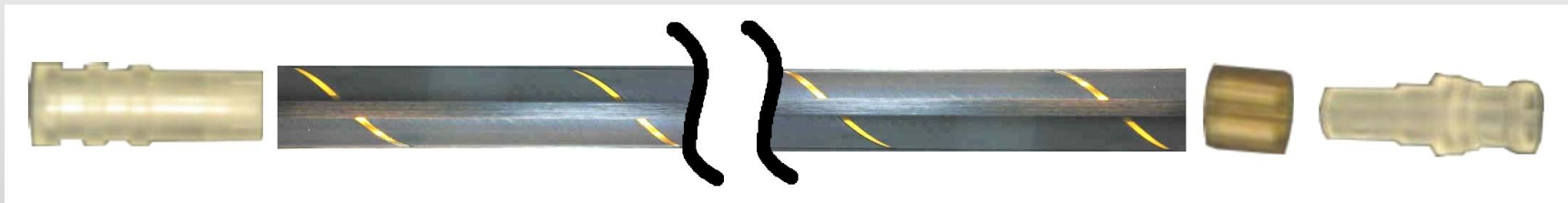


Drahtkammern

- Geladenes Teilchen erzeugt Elektron-Ion Paare im Gasvolumen
 - Hochspannung zwischen Kathode und Anode
 - Elektronen driften im E-Feld zum Anodendraht
 - nahe dem Draht - hohes Feld - erzeugen Elektronen Sekundärelektronen
 - Ladungs"lawine", Gasverstärkung $\sim 10^4 - 10^5$
 - Messbarer Strompuls am Draht



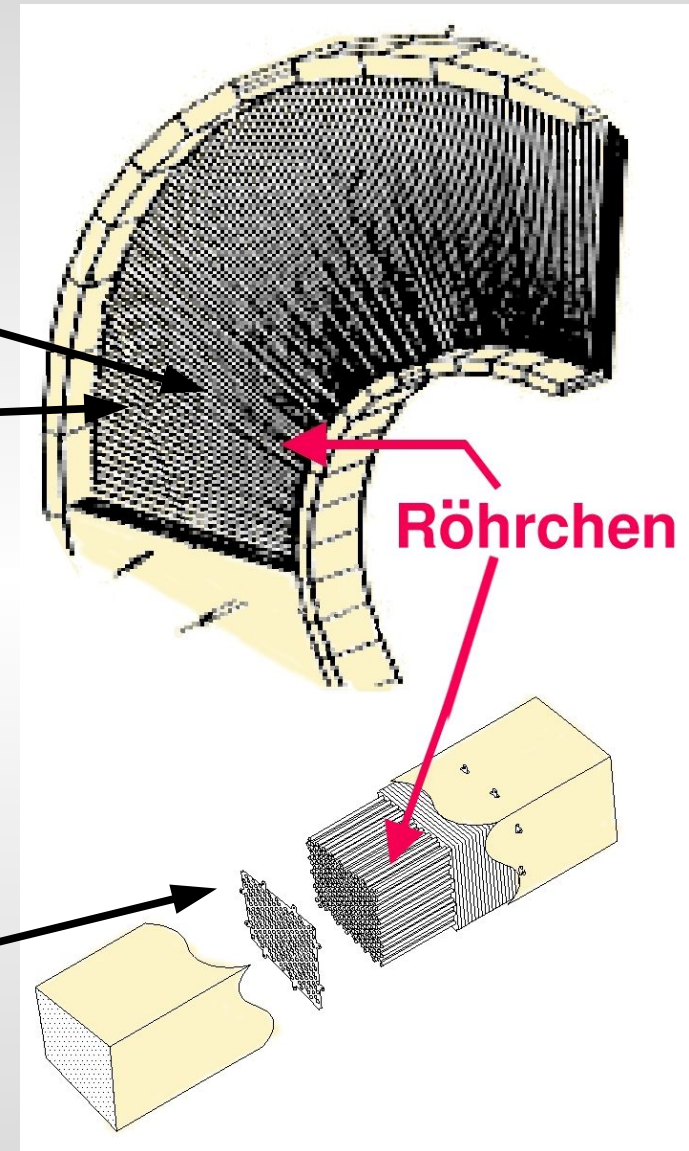
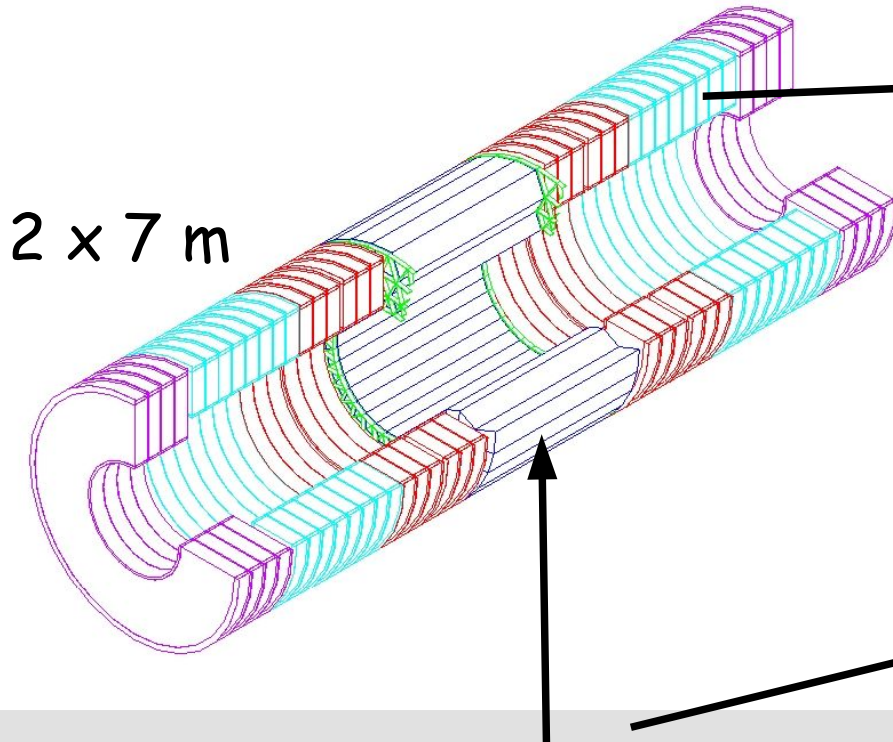
So sehen solche Röhrchen aus (straw tubes, Durchm. 4mm):



Ein Detektor mit Röhrrchen

- Der ATLAS (LHC) Spurdetektor besteht u.a. aus

- **Endkappen** ("Räder" mit radialen Röhrrchen) ~320000 Röhrrchen

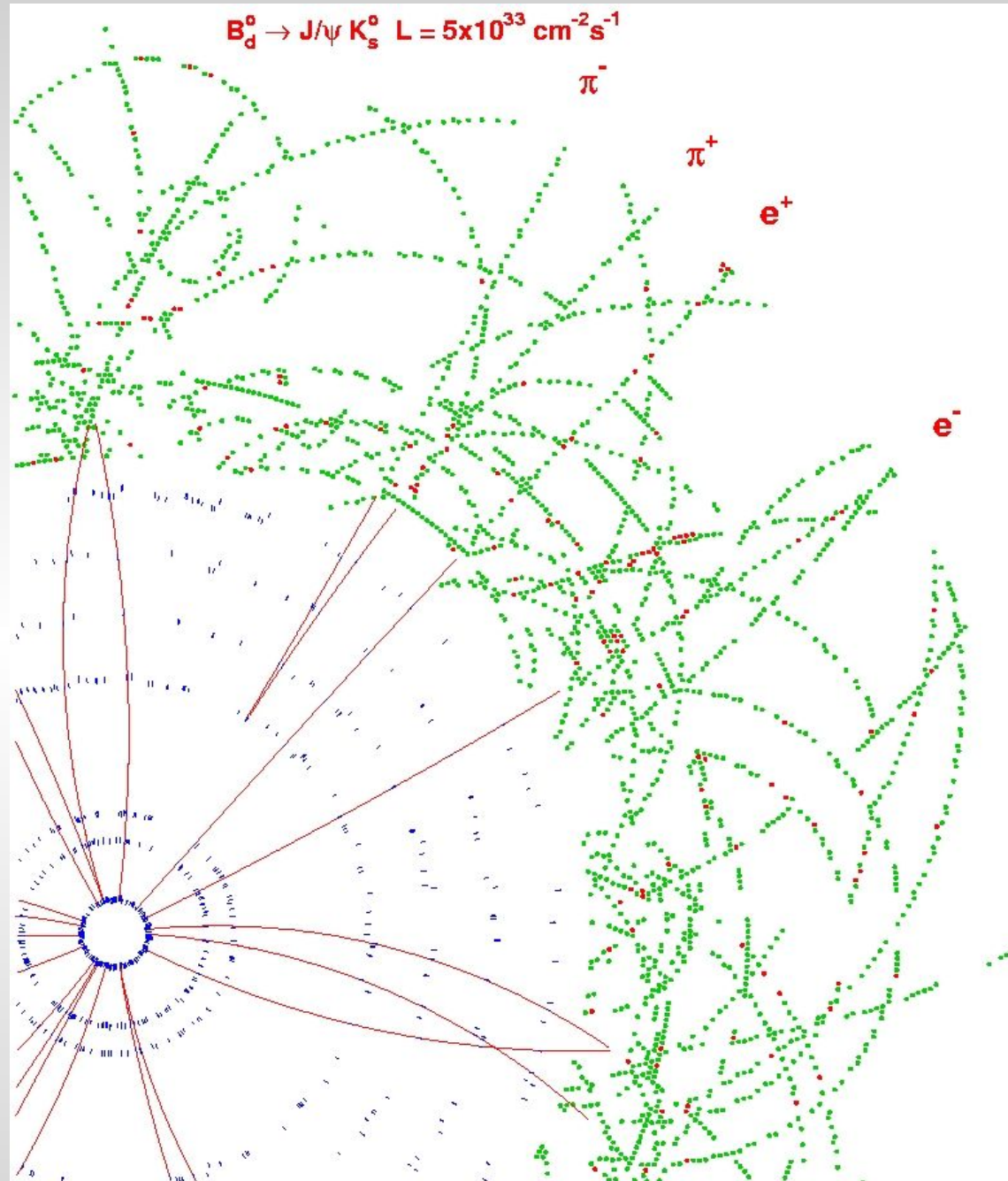


- **Zentraldetektor** mit Röhrrchen entlang der Strahlachse (~100000)

Ein Rad, ~3200 Röhrrchen



Teilchen in einem Röhrchen- detektor (Simulation)



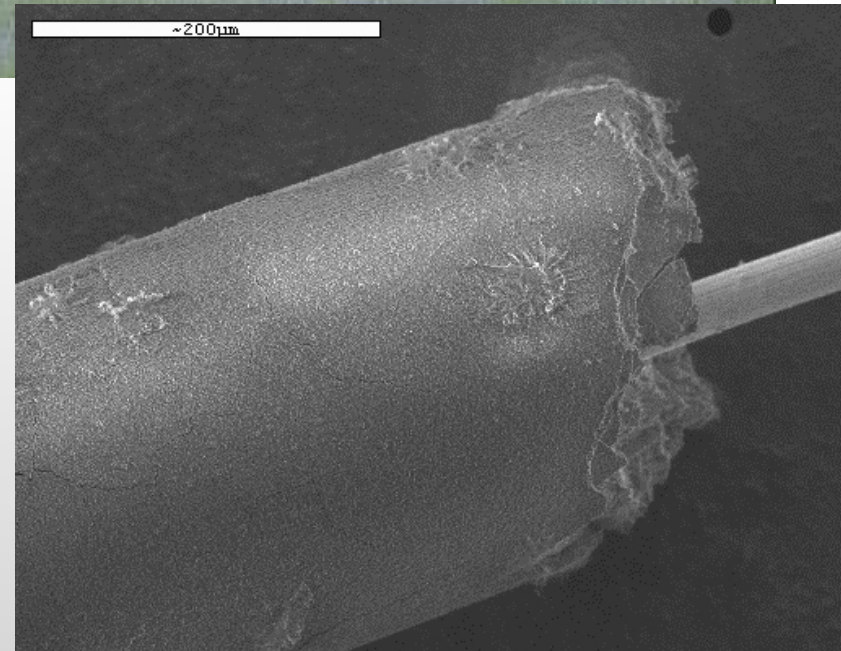
Unerwartete(?) Probleme (ATLAS Röhrrchen)

- Gasmischung: 70% Xe + 20% CF_4 + 10% CO_2

...aber im Zentraldetektor: Zerstörung des Verbindungsstücks aus Glas zwischen den Drähten...



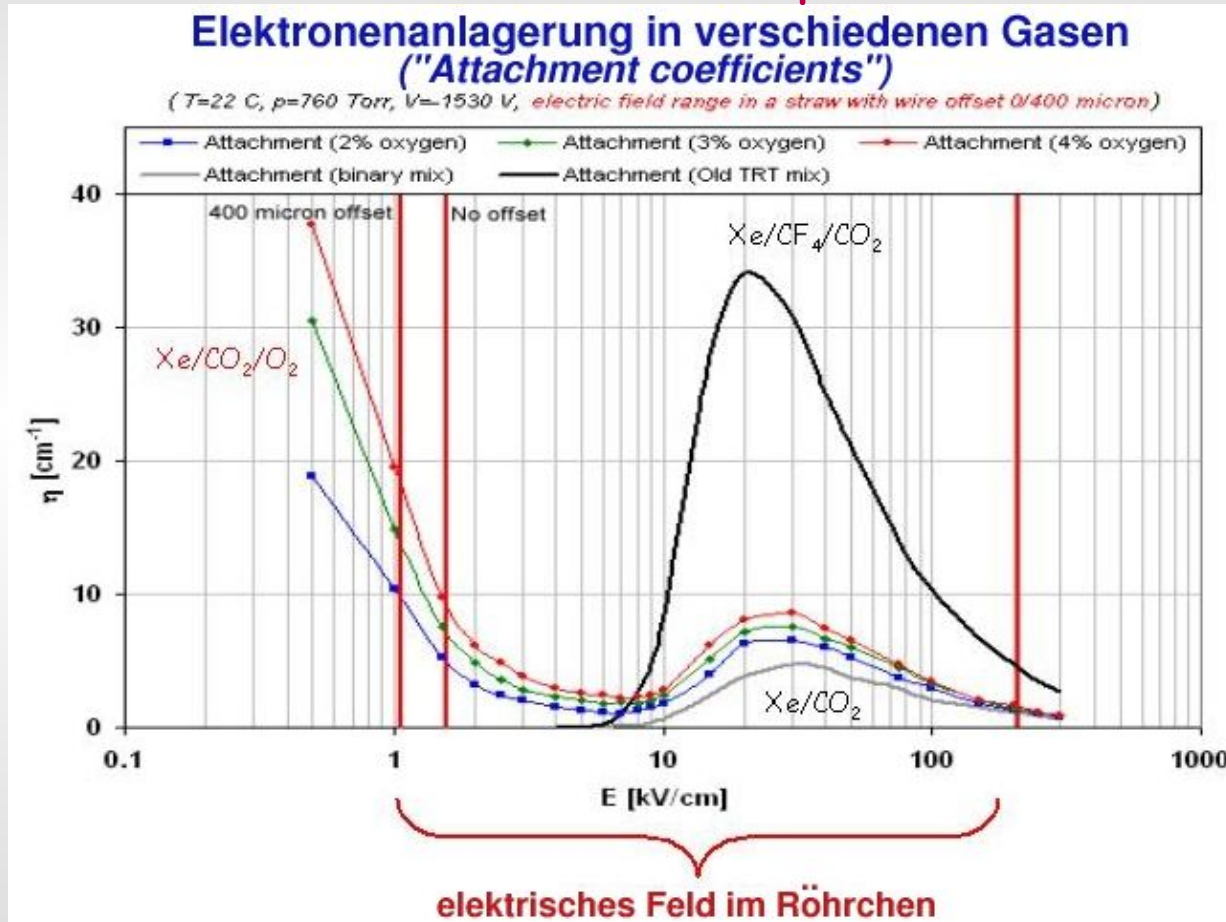
...durch HF (Flusssäure)
nach 0.3-0.4 C/cm
integrierter Ladung!!!



Neue Gasmischung mit Sauerstoff

Sauerstoff ist elektro-negatives Gas:

hohe "Absorption" der Primär-Elektronen

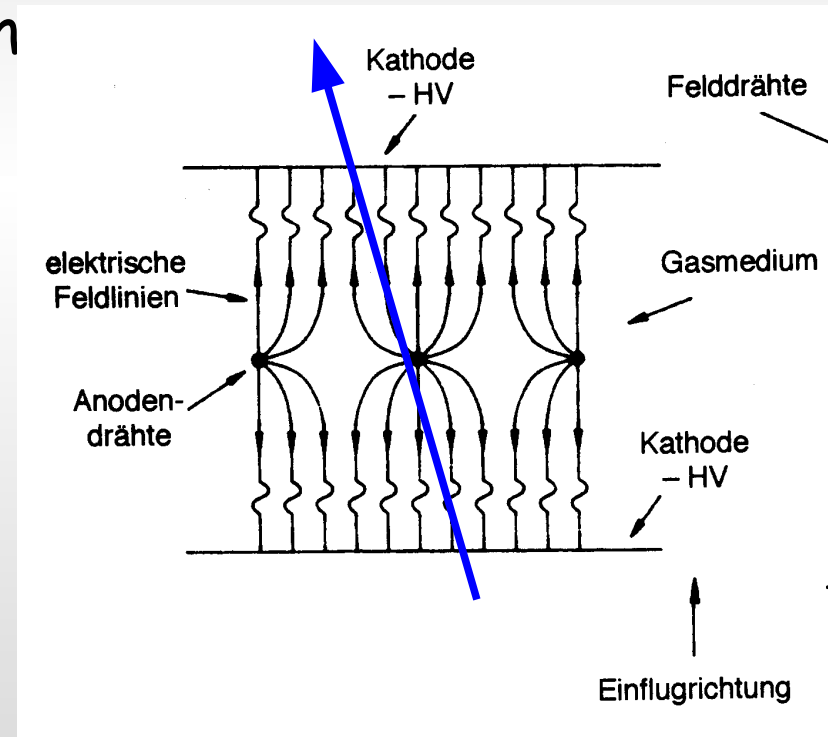


=> dünne Röhren sind sicher!!!

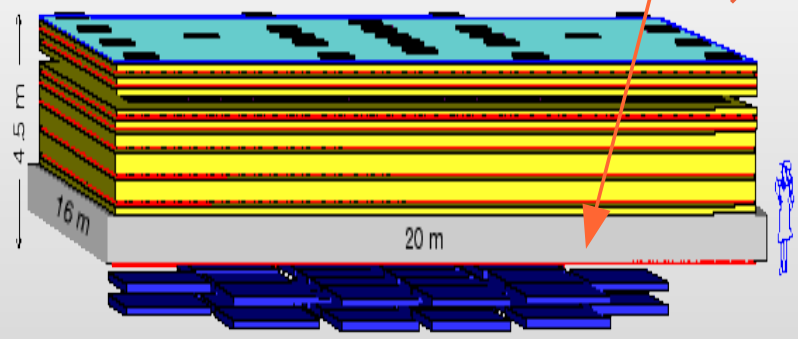
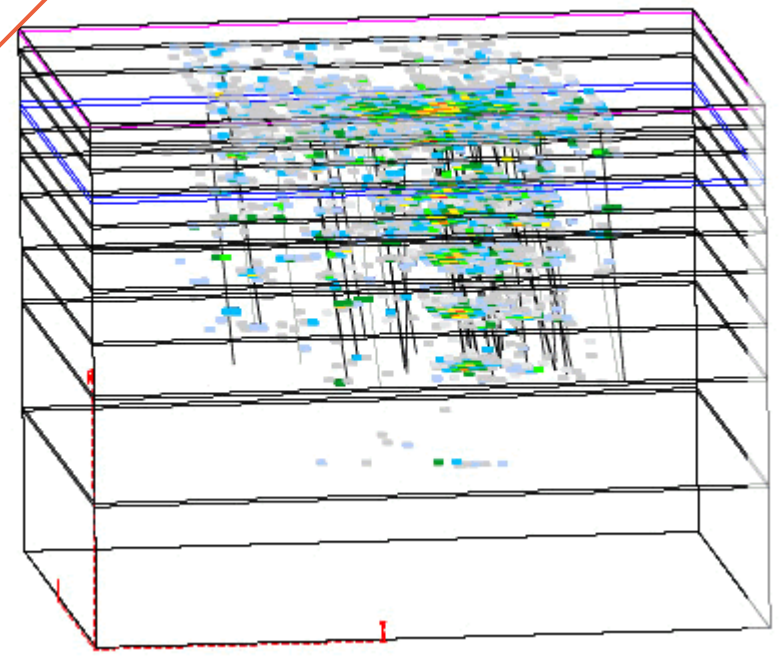
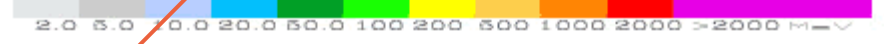
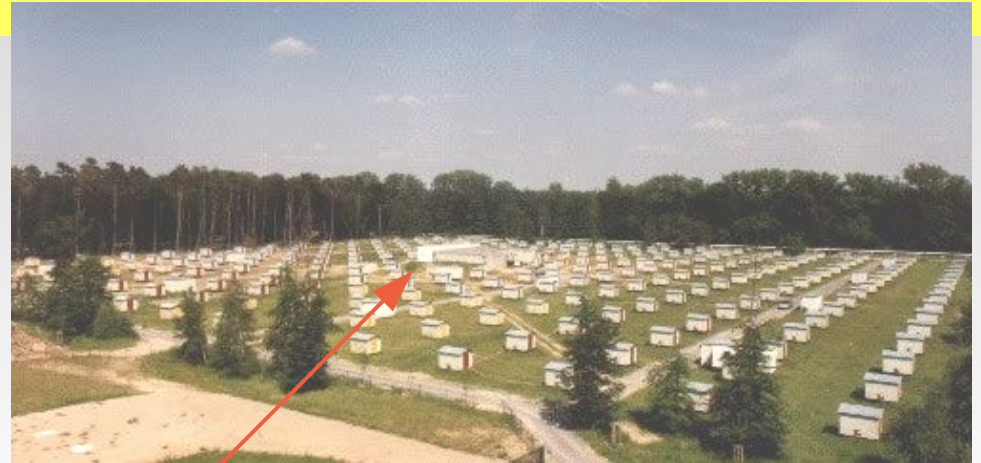
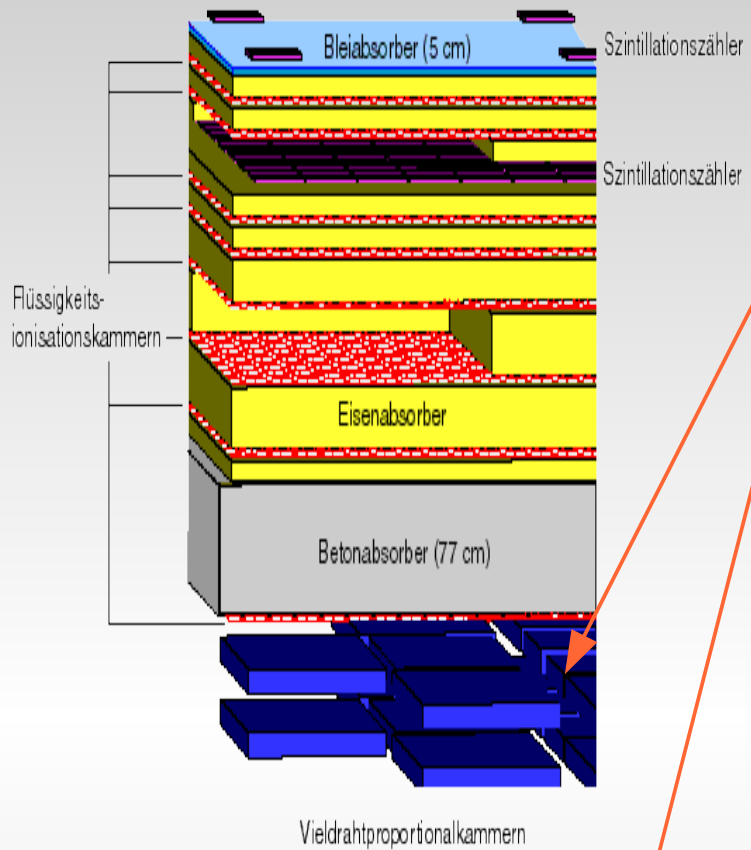
Vieldrahtproportionalkammern (MWPC)

- Drahtebene mit vielen Anodendrähten
- Jeder Draht ist unabhängiger Detektor
- Drahtabstand d typischerweise einige mm
- Ortsinformation aus Position des getroffenen Drahtes
- Ortsauflösung $d/\sqrt{12}$
- 1968 G.Charpak

- Preisgünstig!
- Einsatz grossflächiger Detektoren

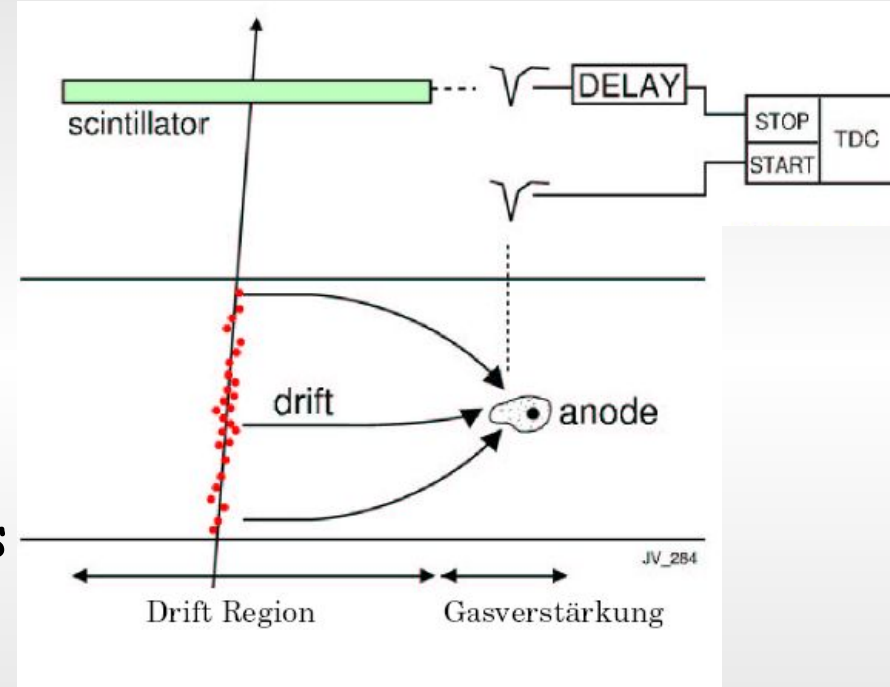


MWPCs bei Kascade



Driftkammern

- Messe Zeitdifferenz zwischen Teilchendurchgang (von externem Detektor!) und Signalerzeugung auf dem Draht
 - Messung Driftzeit
- Aus bekannter Driftgeschwindigkeit:
 - Position x des Teilchendurchgangs
- Typischer Drahtabstand: einige cm
- Ortsauflösung $\sim 100\text{-}200\ \mu\text{m}$
- Auslese an beiden Seiten des Drahtes gibt zusätzliche Positionsinformation



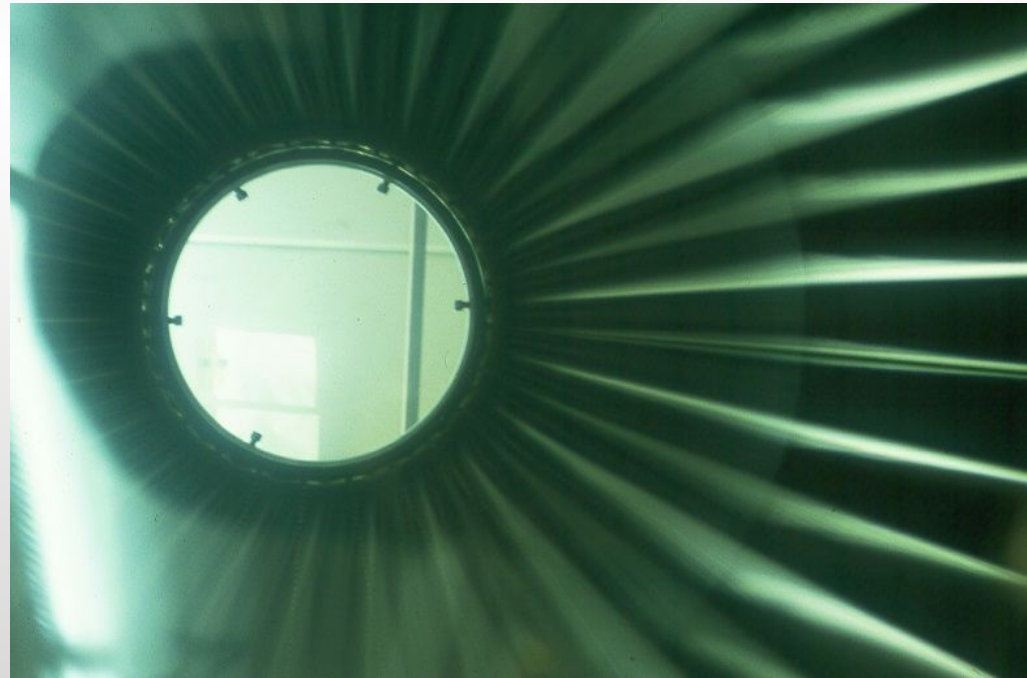
Wie bei MWPC: Kombination mehrerer Drahtebenen ermöglicht Spurrekonstruktion

OPAL Driftkammer



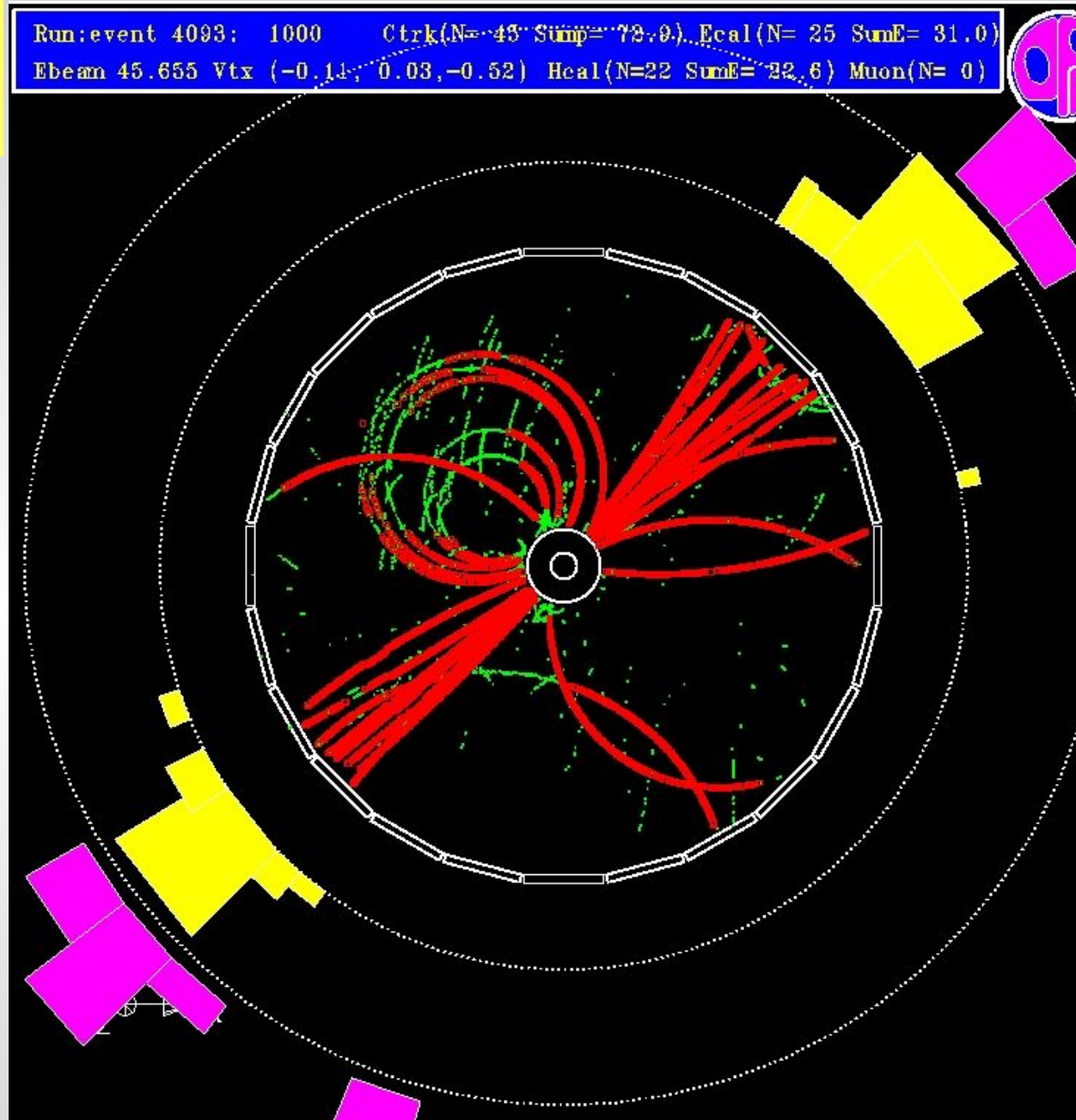
Grösse $\sim 2 \times 4 \text{m}$

24 Anoden und 24 Kathodendraht-ebenen, maximal 159 Spurpunkte



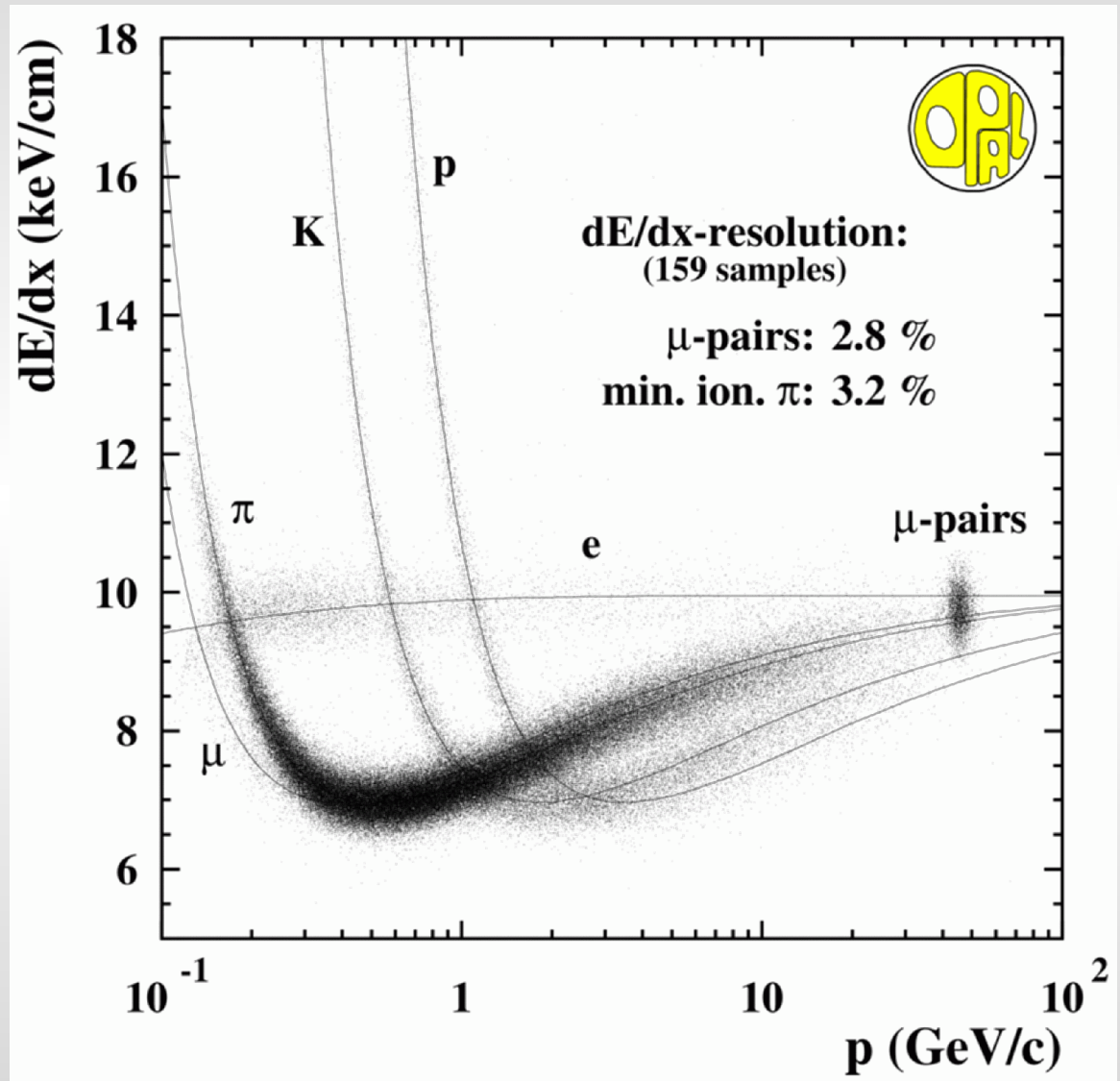
OPAL Driftkammer - eine Messung:

Run:event 4093: 1000 Ctrk(N=43 SumP=73.0) Ecal(N=25 SumE=31.0)
Ebeam 45.655 Vtx (-0.14, 0.03, -0.52) Hcal(N=22 SumE=22.6) Muon(N=0)



Produktion und
Zerfall eines
 Z^0 Teilchens

dE/dx : Identifikation von Teilchen!



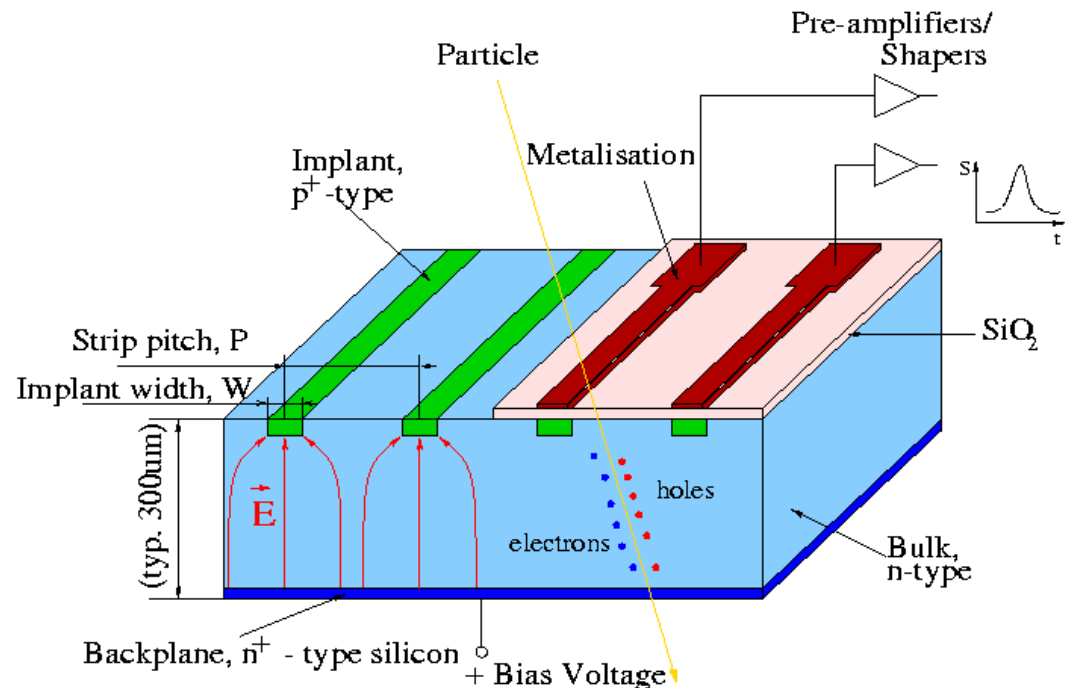
Anwendung:
OPAL Detektor

Silizium-Streifenzähler

- In Sperrrichtung betriebene p-n Diode
 - Ionisierendes Teilchen erzeugt e^- -Loch Paare in dotiertem Silizium
 - Ladungsträger driften zu Elektroden
 - Mittlere Ionisationsenergie 3.6eV (Gas: ~50-100eV)
 - => ~22000 e^- -Loch Paare in 300 μm Silizium
 - => messbares Stromsignal

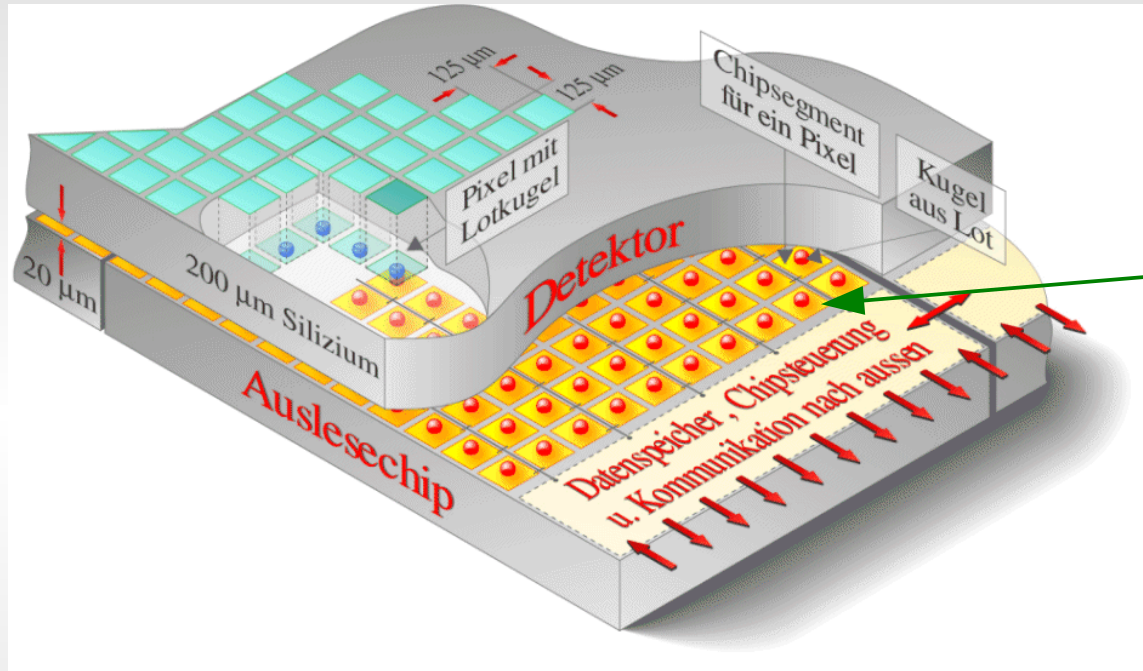
- Ortsmessung durch segmentierte Elektroden (Streifen)
- Streifenabstand ~25-250 μm , Ortsauflösung besser als 10 μm möglich
- Nur 1 Koordinate => zwei orthogonale Streifenlagen
- Oder ...

Principles of operation

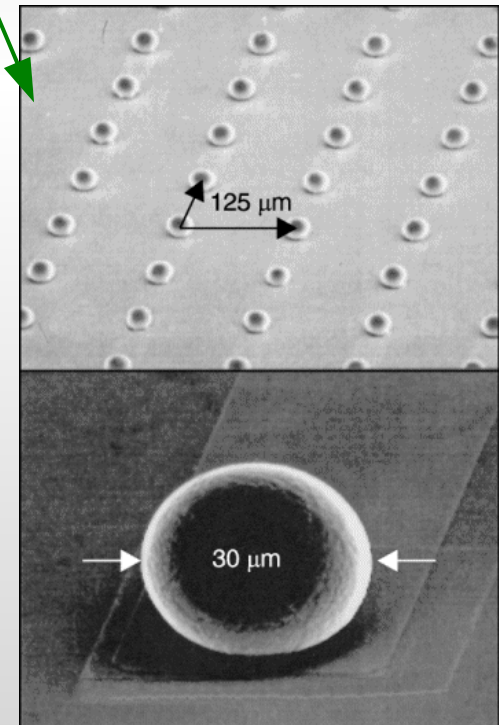


Pixel Detektor

- Jeder Pixel ein Auslesekanal!

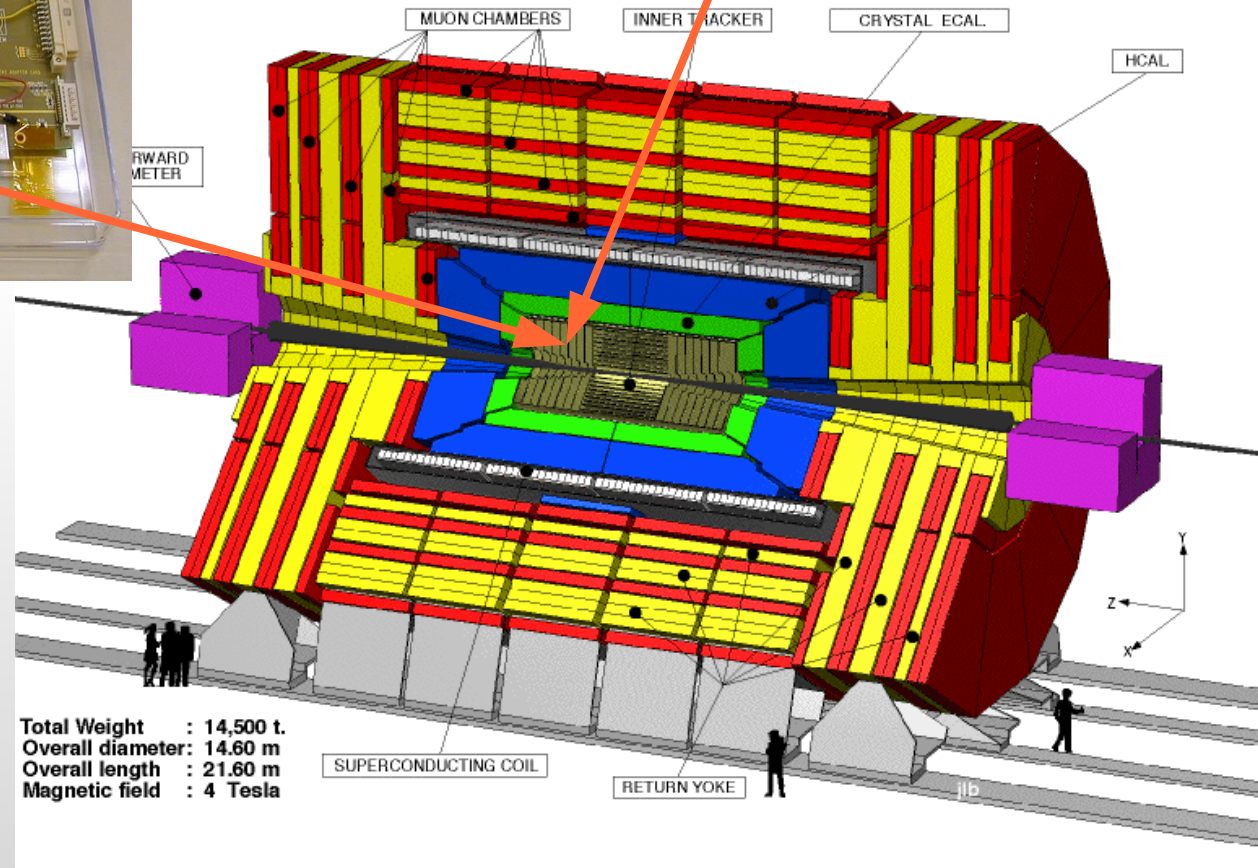
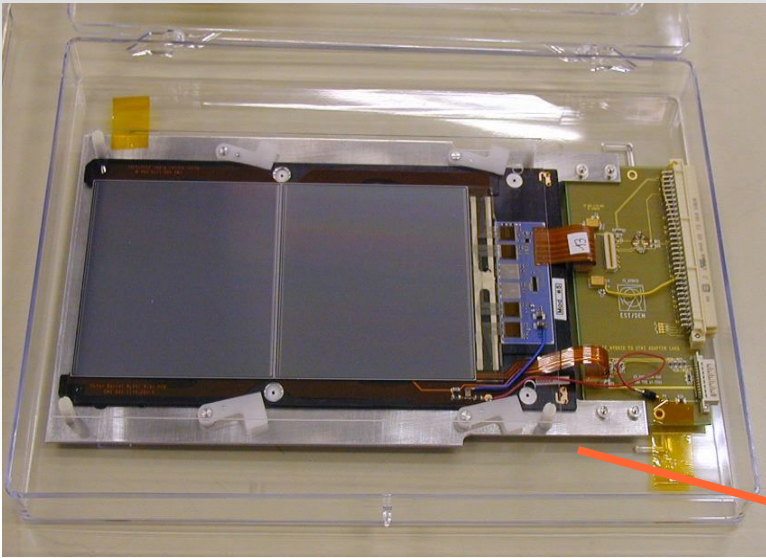


Verbindung zwischen Detektor und Chip: Lotkugeln ("bump bonding")



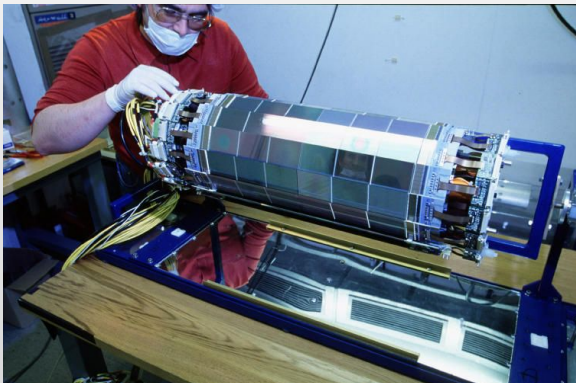
Viiiieel Silizium: CMS (LHC)

CMS: 223 m² Silizium
ATLAS: 60 m²



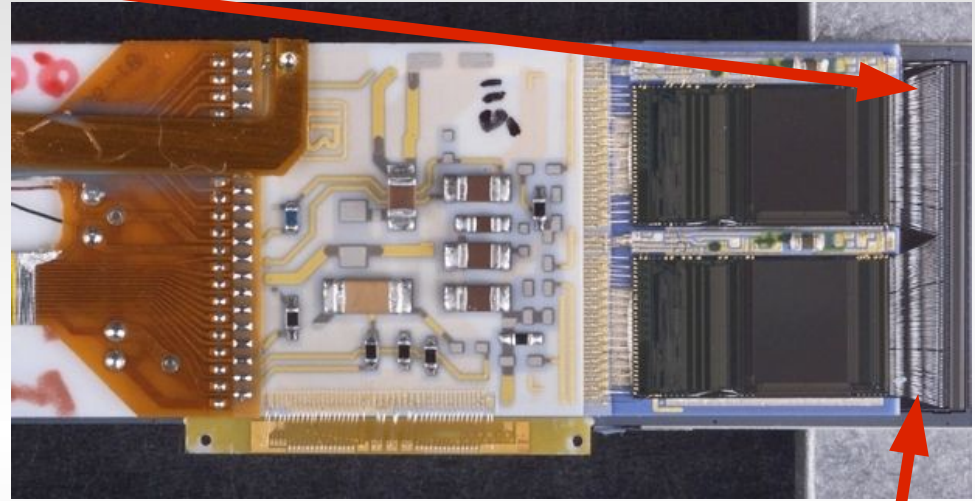
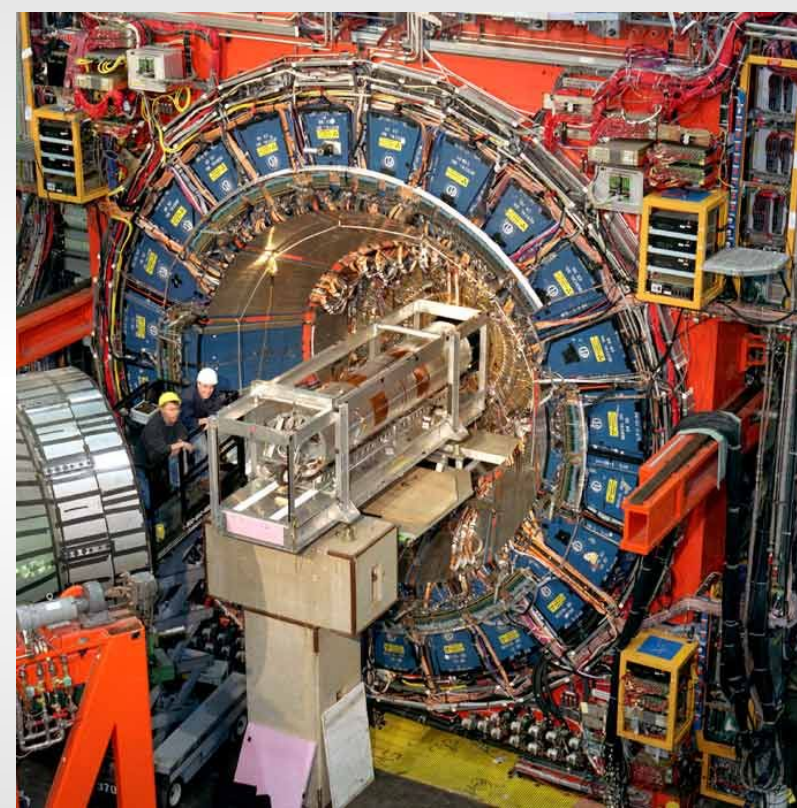
Total Weight : 14,500 t.
Overall diameter: 14.60 m
Overall length : 21.60 m
Magnetic field : 4 Tesla

ALEPH: 0.49 m²

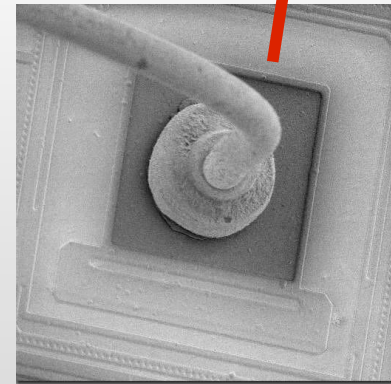


... und wieder eine Überraschung (CDF, NA60):

- Lorentzkraft auf Drähte, welche senkrecht zum Magnetfeld liegen ...

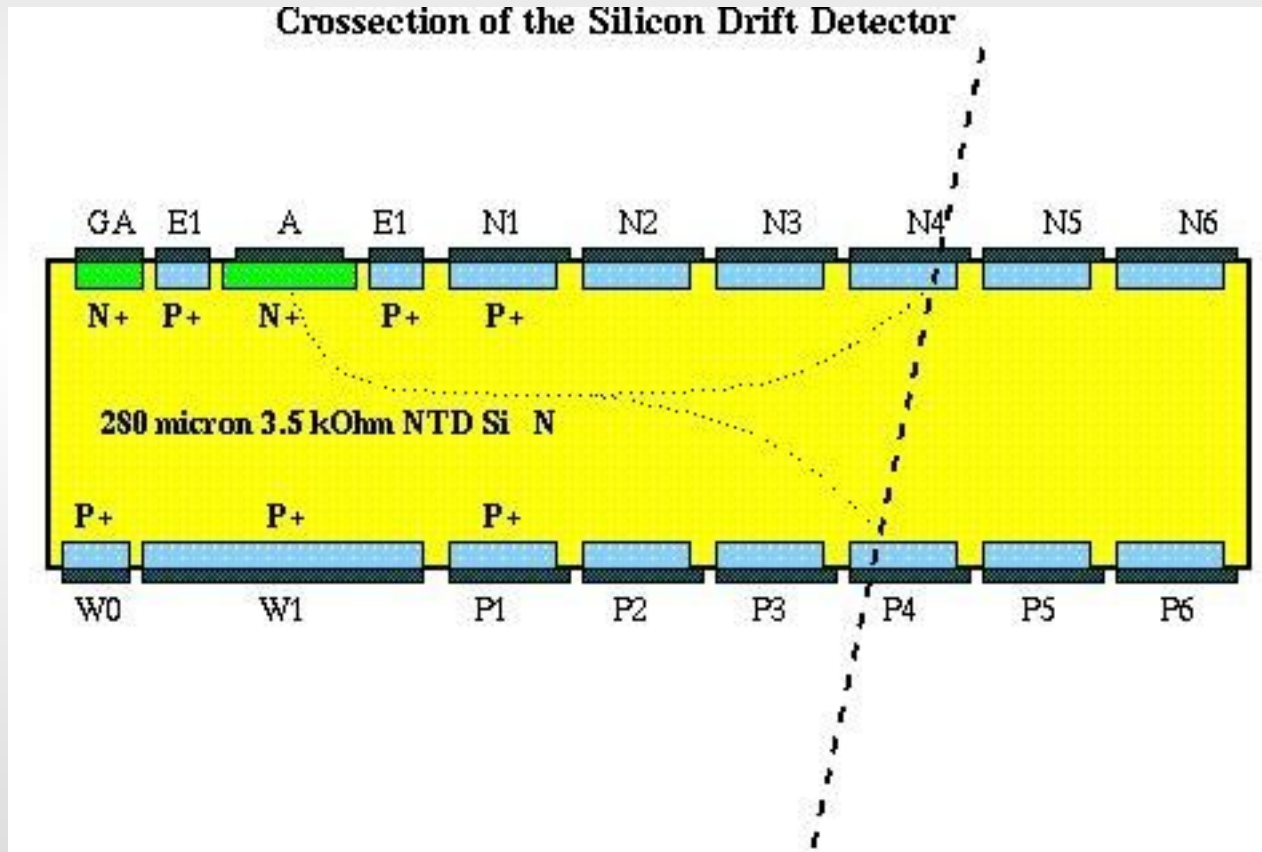


... lässt diese bei Datennahme, Testpulsen abreißen...



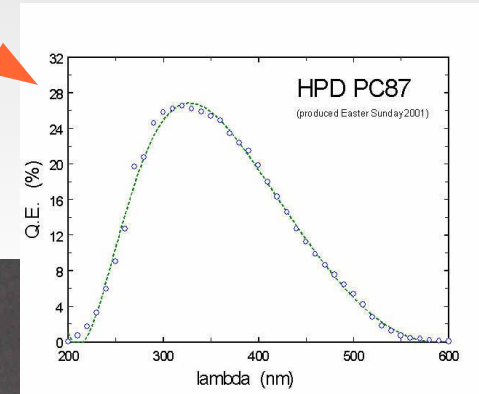
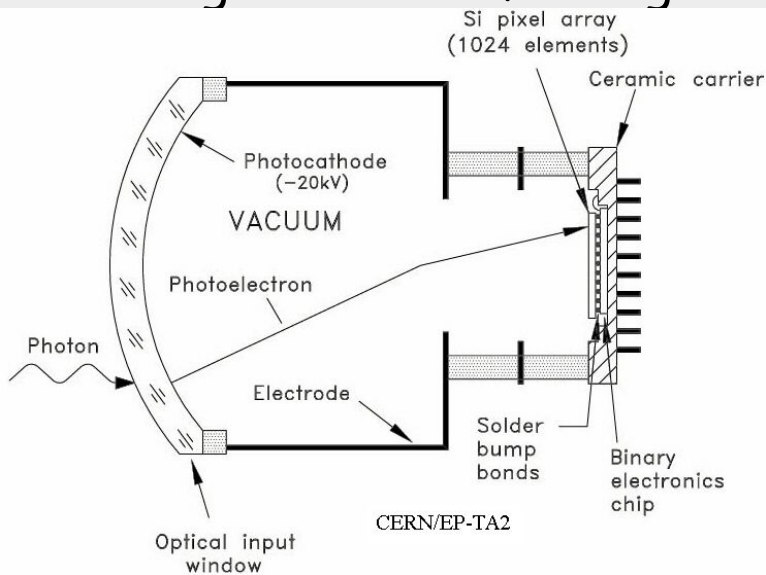
Neue Entwicklungen:

- Anstelle eines aufwendigen, teureren Pixel-Detektors
=> Silizium Driftkammer (ALICE, LHC):



Silizium-Detektoren für Photonen:

- Hybrid Photo Diode (HPD)
- Sensitiv auf einzelne Photonen, hohe Quanteneffizienz plus gute Ortsauflösung

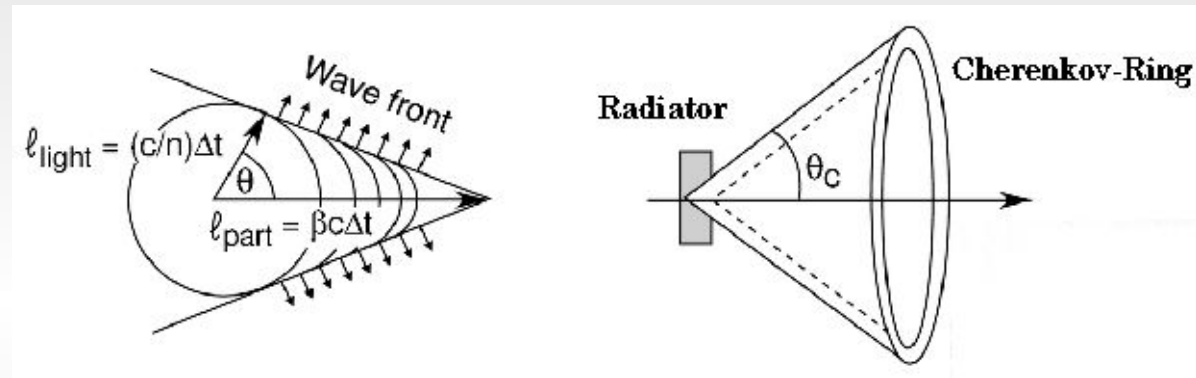


... Anwendung in
Cherenkov-Detektoren
(LHC-B) ...



Cherenkov-Detektoren

- Cherenkov-Strahlung wird von geladenen Teilchen bei Durchgang durch Medium mit Brechungsindex n erzeugt, wenn Geschwindigkeit grösser als Lichtgeschwindigkeit in Medium



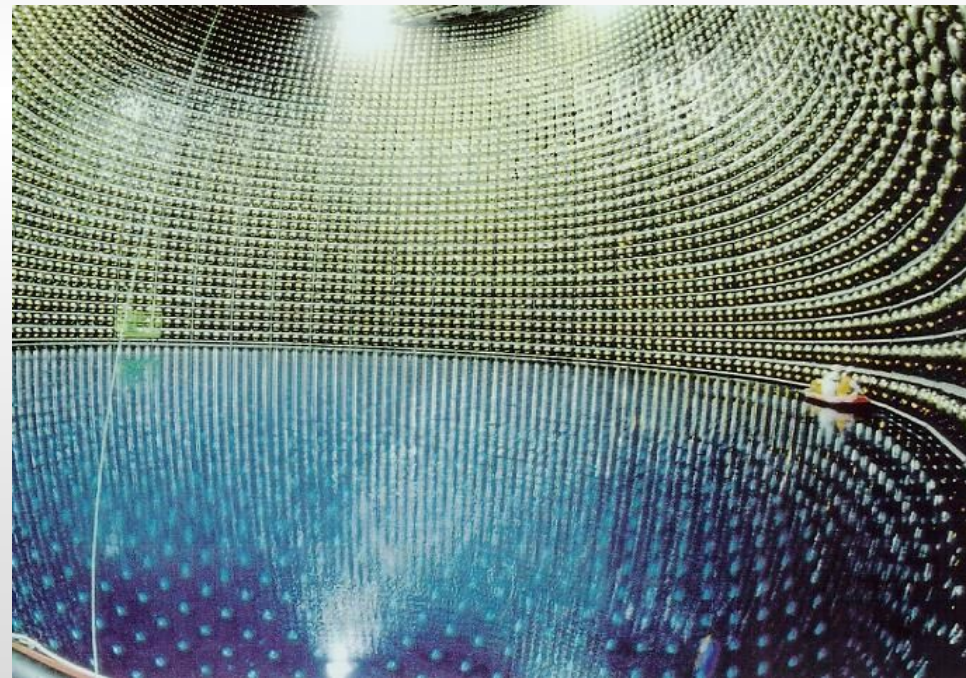
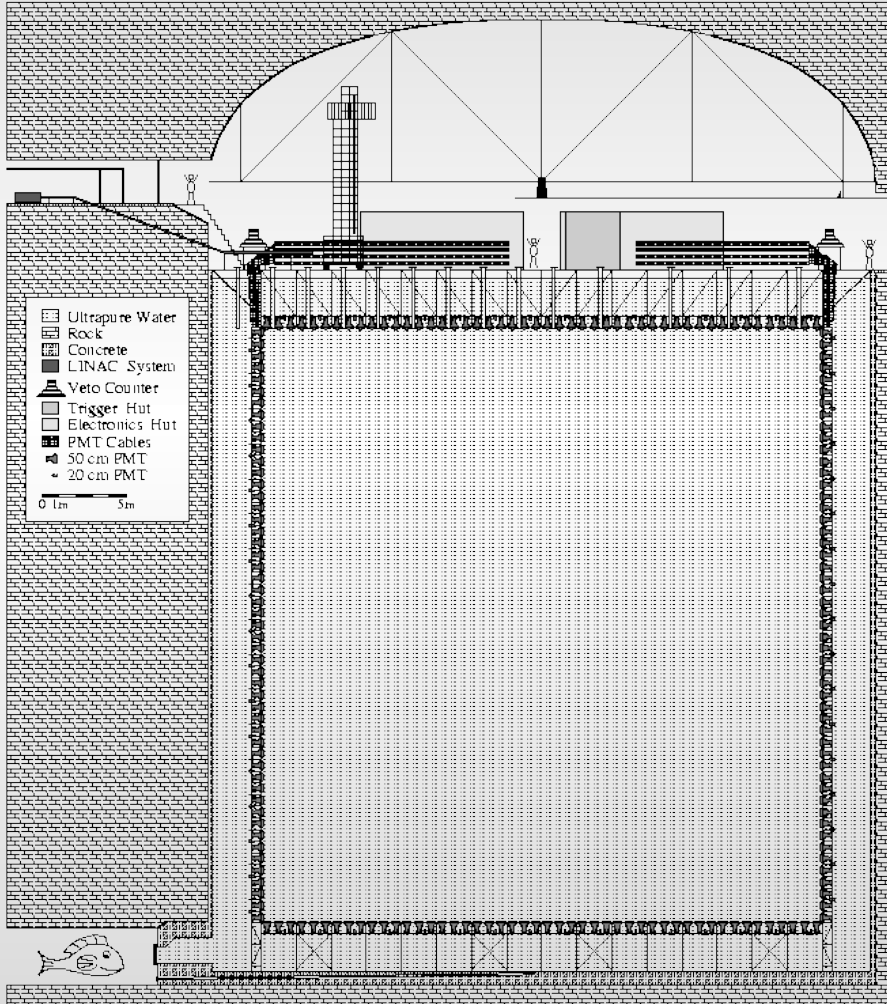
$$\cos(\theta) = 1/(\beta n) \text{ wenn } \beta > 1/n$$

- Messung des Winkels θ des einfallenden Teilchens mit Impuls p : Bestimmung seiner Masse ($\beta = p/E$)
 \Rightarrow Teilchenidentifikation

Super-Kamiokande

- Messung von atmosphärischen Neutrinos:

40 x 40 m tank,
11146 Photomultiplier
zum Nachweis von e , μ aus
Wechselwirkungen von Neutrinos mit 22.5
kT Wasser

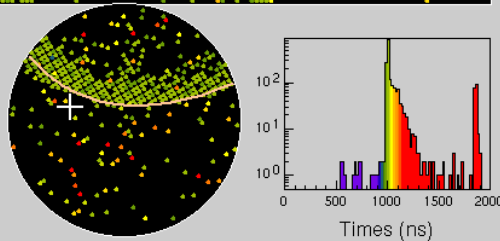
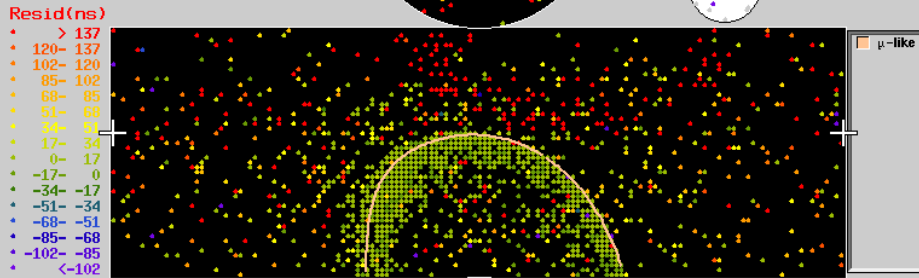
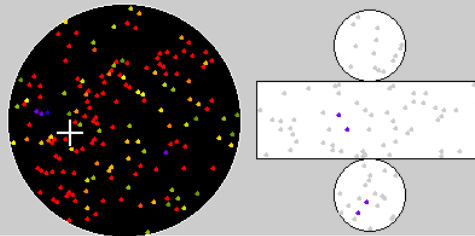


Cherenkov-Strahlung: Teilchenidentifikation



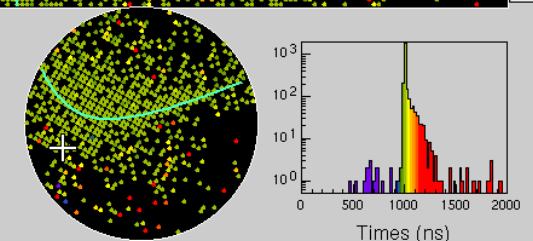
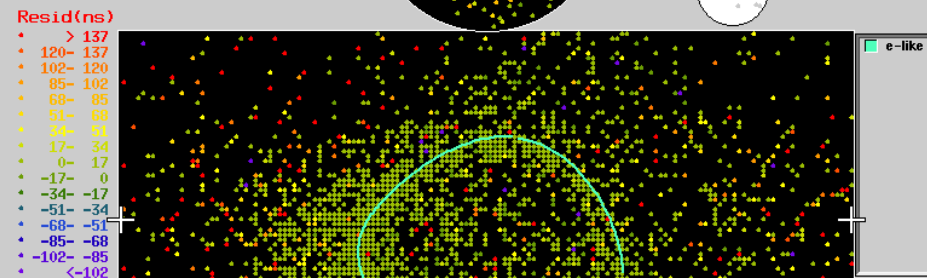
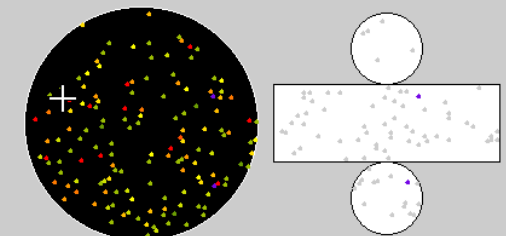
Super-Kamiokande

Run 4234 Event 367257
 97-06-16:23:32:58
 Inner: 1904 hits, 5179 pE
 Outer: 5 hits, 6 pE (in-time)
 Trigger ID: 0x07
 D wall: 885.0 cm
 FC mu-like, $p = 766.0 \text{ MeV}/c$



Super-Kamiokande

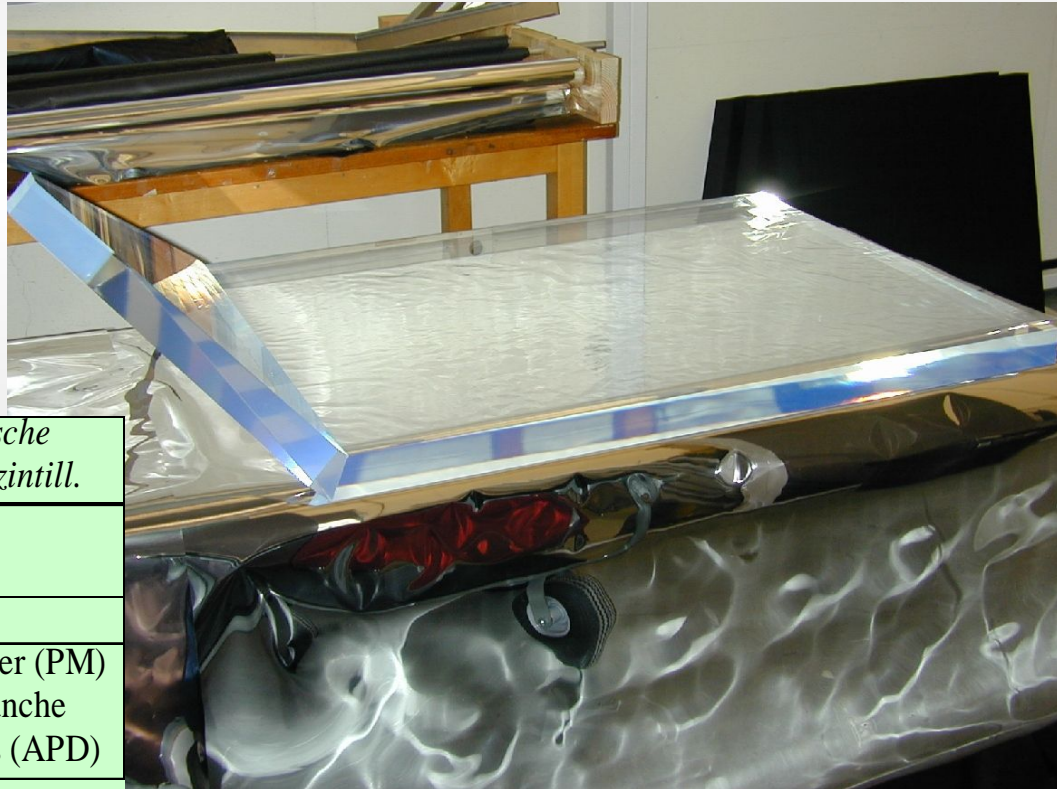
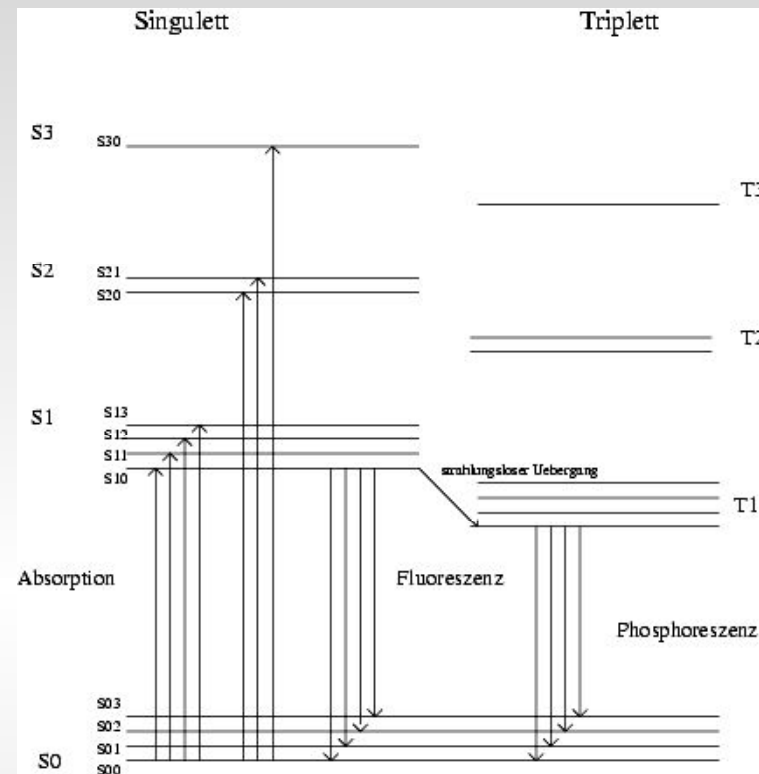
Run 4268 Event 7899421
 97-06-23:03:15:57
 Inner: 2652 hits, 5741 pE
 Outer: 3 hits, 2 pE (in-time)
 Trigger ID: 0x07
 D wall: 506.0 cm
 FC e-like, $p = 621.9 \text{ MeV}/c$



- Resultate: u.a. Neutrino-Oszillation...

Szintillatoren

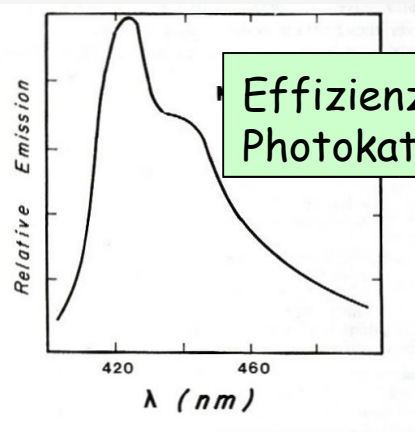
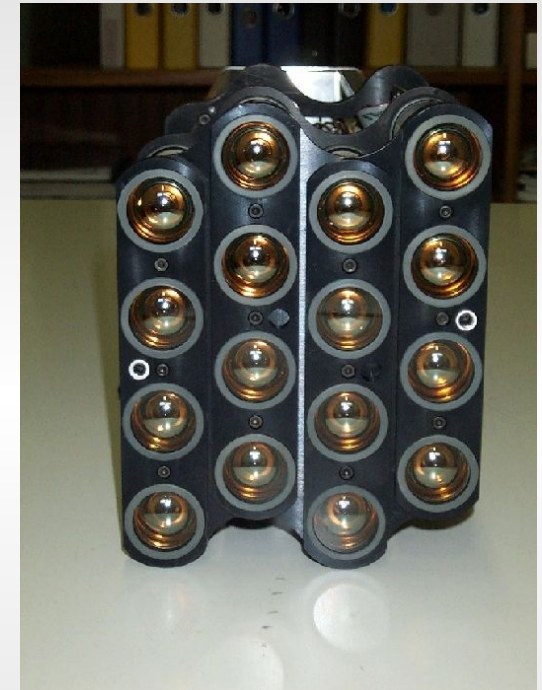
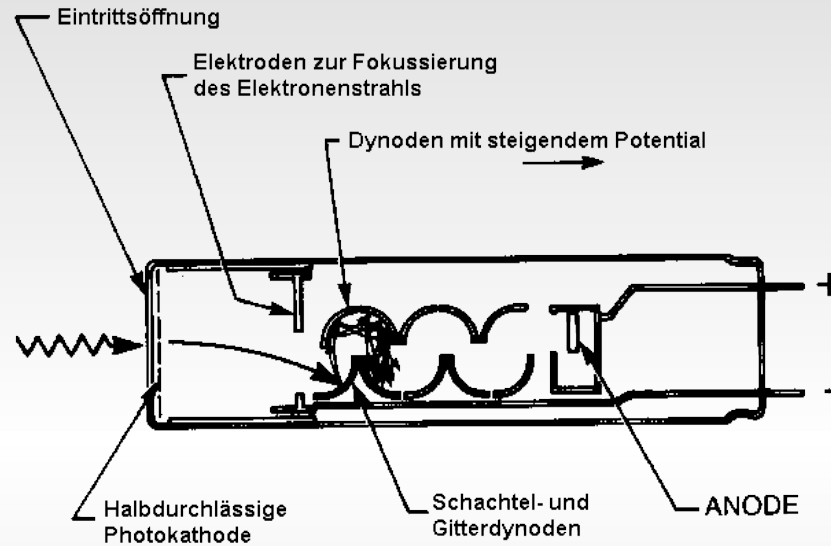
- Elektrisch geladene Teilchen regen Atome und Moleküle an
- Rückfall auf Grundzustand
→ Emission von Licht



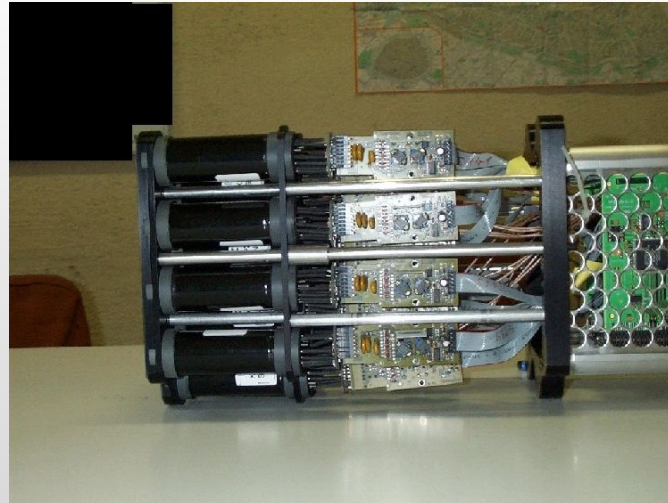
	Organische (Kunststoff) Szintillatoren	Anorganische (Kristall-) Szintill.
Beispiele	Naphtalin, Anthracen	NaI, CsI
typ. Zerfallszeit:	10^{-8} s	10^{-6} s
Lichtnachweis	Wellenlängenschieber + PM oder APD	Photomultiplier (PM) oder Avalanche Photo-Diodes (APD)

Photomultiplier

- Wie verwandelt man das Licht in ein elektrisches Signal?



Effizienz der Photokathode



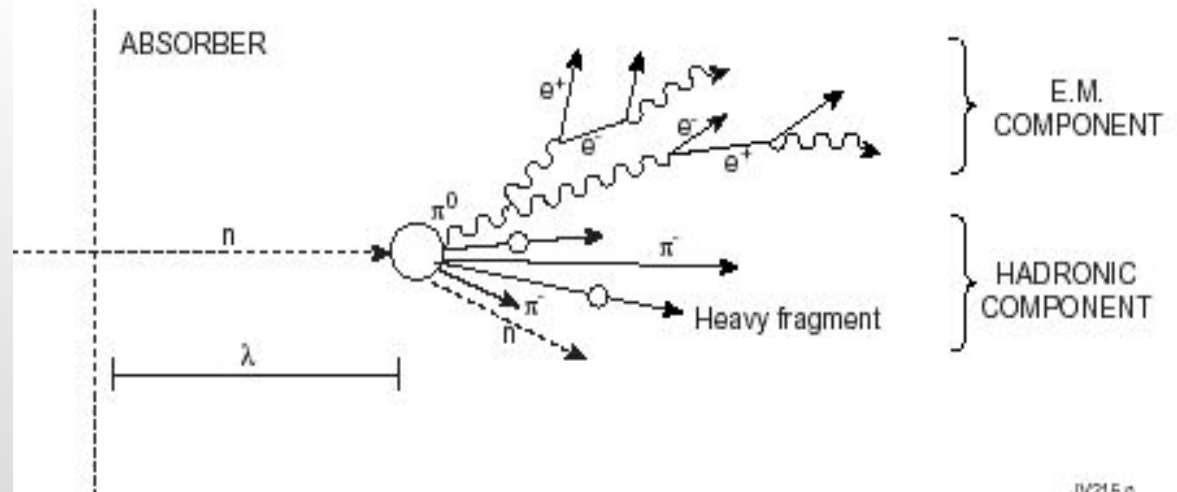
Szitillatoren, Photomultiplier: Ideal für jeden Teststand



Energiemessung: Kalorimeter

- Vollständige Absorption des Teilchens in einem Medium
- Nachweis der absorbierten Energie z.B. durch Ionisation, Cherenkov-Licht ...
- Elektronen, Photonen:
 - "Aufschauern" durch elektromagn. Wechselwirkung, Bremsstrahlung ($e^- \rightarrow e^- \gamma$) oder Paarproduktion ($\gamma \rightarrow e^+ e^-$)
- Protonen, Neutronen, Pionen ...:
 - "Aufschauern" durch starke Wechselwirkung im Absorber

Unterschiedliches Ansprechen von Kalorimetern auf hadronische und elektromagnetische Signale

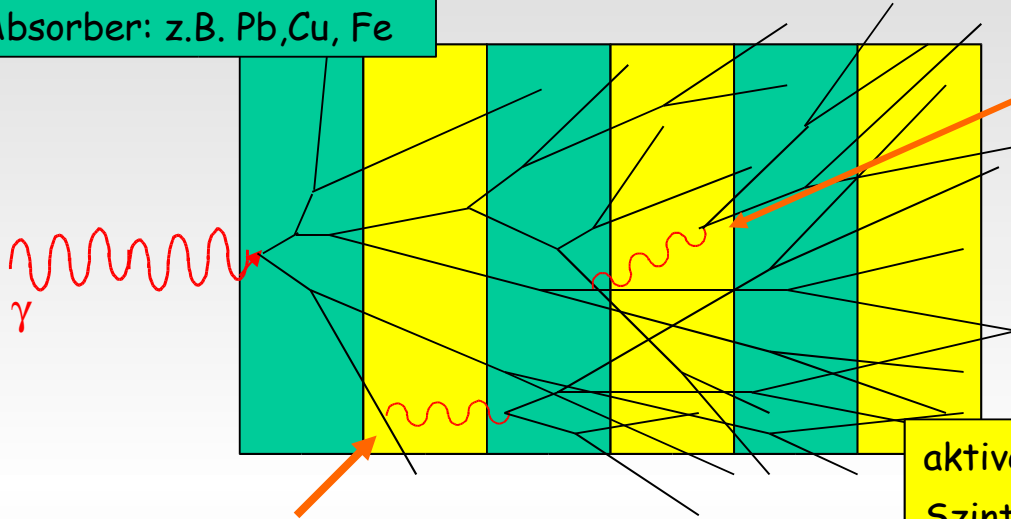


Sampling-Kalorimeter

- Abwechselnde Lagen von Absorber (z.B. Blei) und aktivem Material (Szintillator)

Absorber: z.B. Pb, Cu, Fe

Paarproduktion: $\gamma \rightarrow e^+e^-$



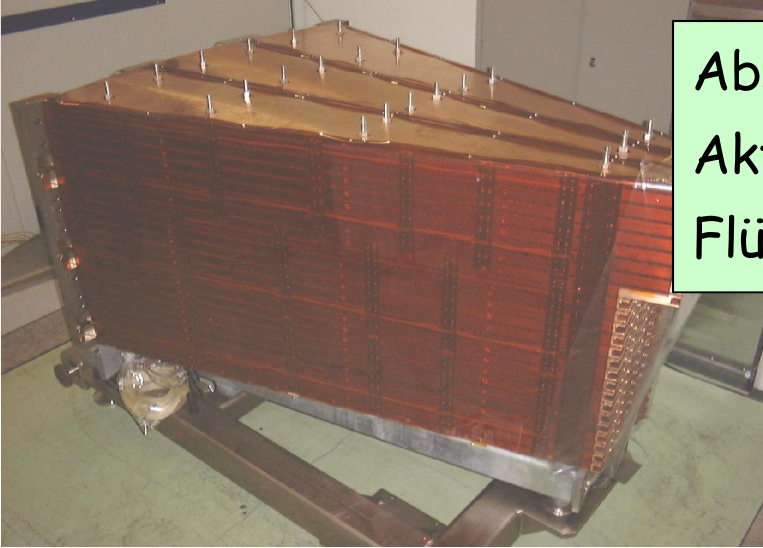
aktives Material: z.B. Szintillator, MWPC,...

Bremsstrahlung: $e^- \rightarrow e^- + \gamma$

- Vorteil: räumliche Auflösung des Schauers
- Nachteil: Schauerteilchen gehen im Absorber verloren



Hadronkalorimeter für das ATLAS Experiment



Absorber: Kupfer
Aktives Material:
Flüssiges Argon

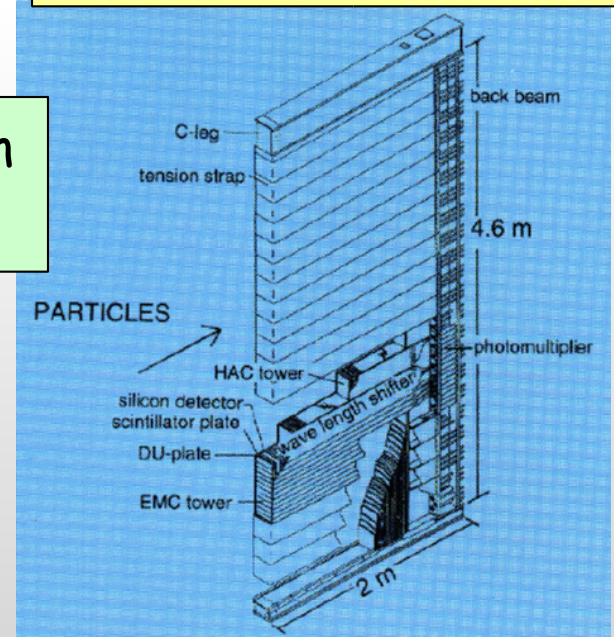
Absorber: abgereichertes Uran
Aktives Material: Szintillator

Günstige Wahl des Verhältnisses von Absorber
zu Nachweisschicht:

kompensierendes Kalorimeter:

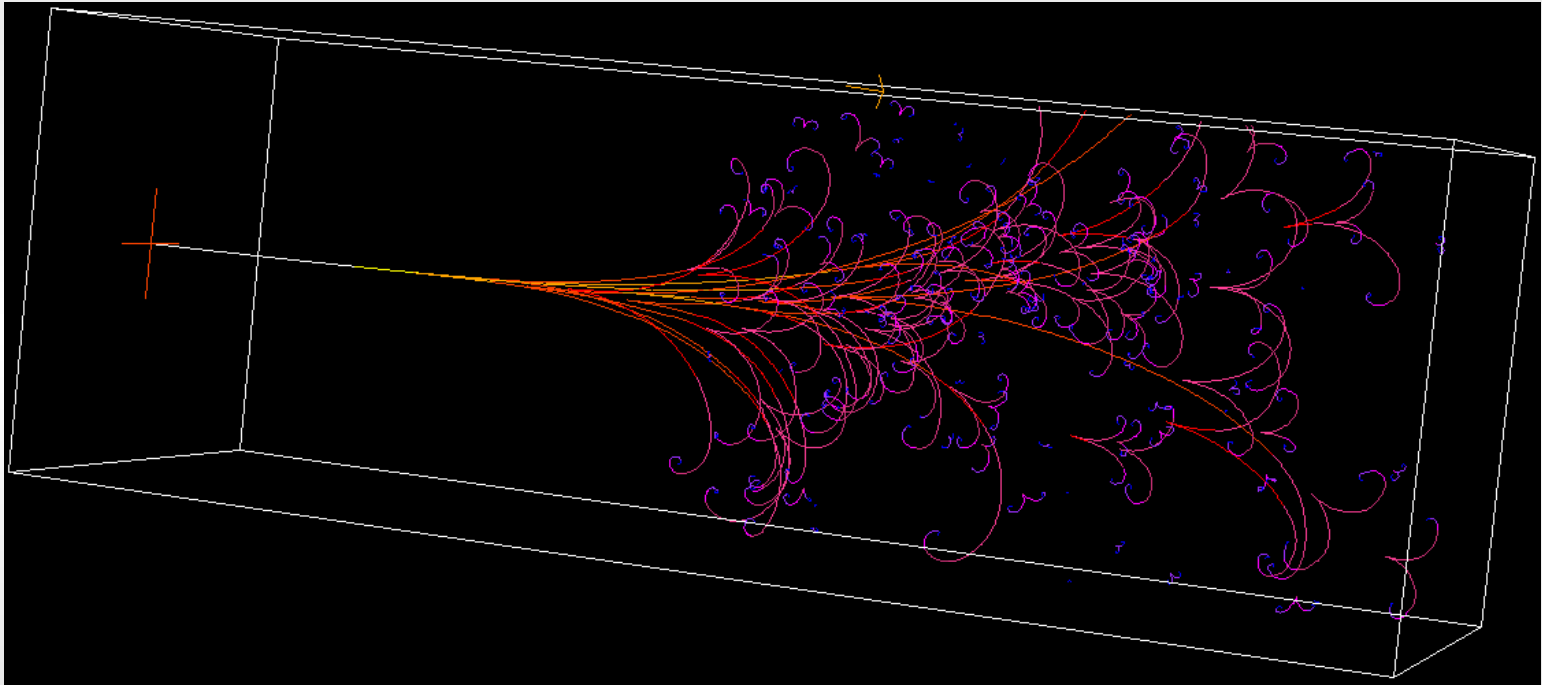
- gleiche Energieausbeute für EM und Hadronisches Signal ($e/h=1$)

EM+Hadron Kalorimeter für ZEUS

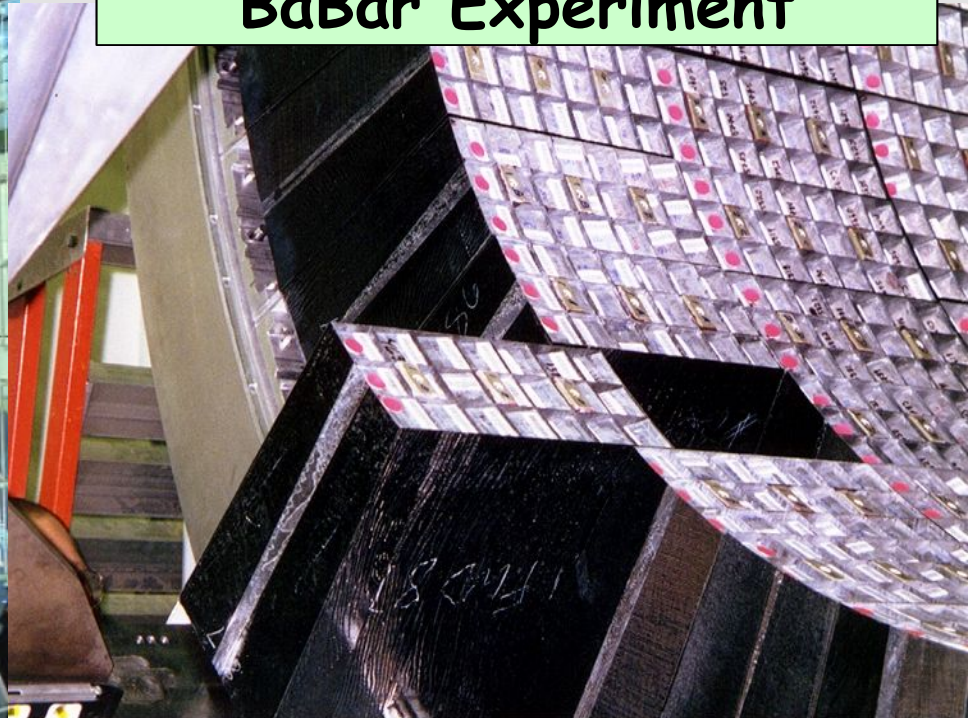


Homogene Kalorimeter

- Absorber ist gleichzeitig Nachweis-Material (z.B. Bleiglas, oder Kristalle)
- Vorteil: gesamte Energie des Teilchens wird nachgewiesen
- Nachteil: sehr teuer, räumliche Auflösung des Schauers



CsI EM Kalorimeter am BaBar Experiment



RS_023

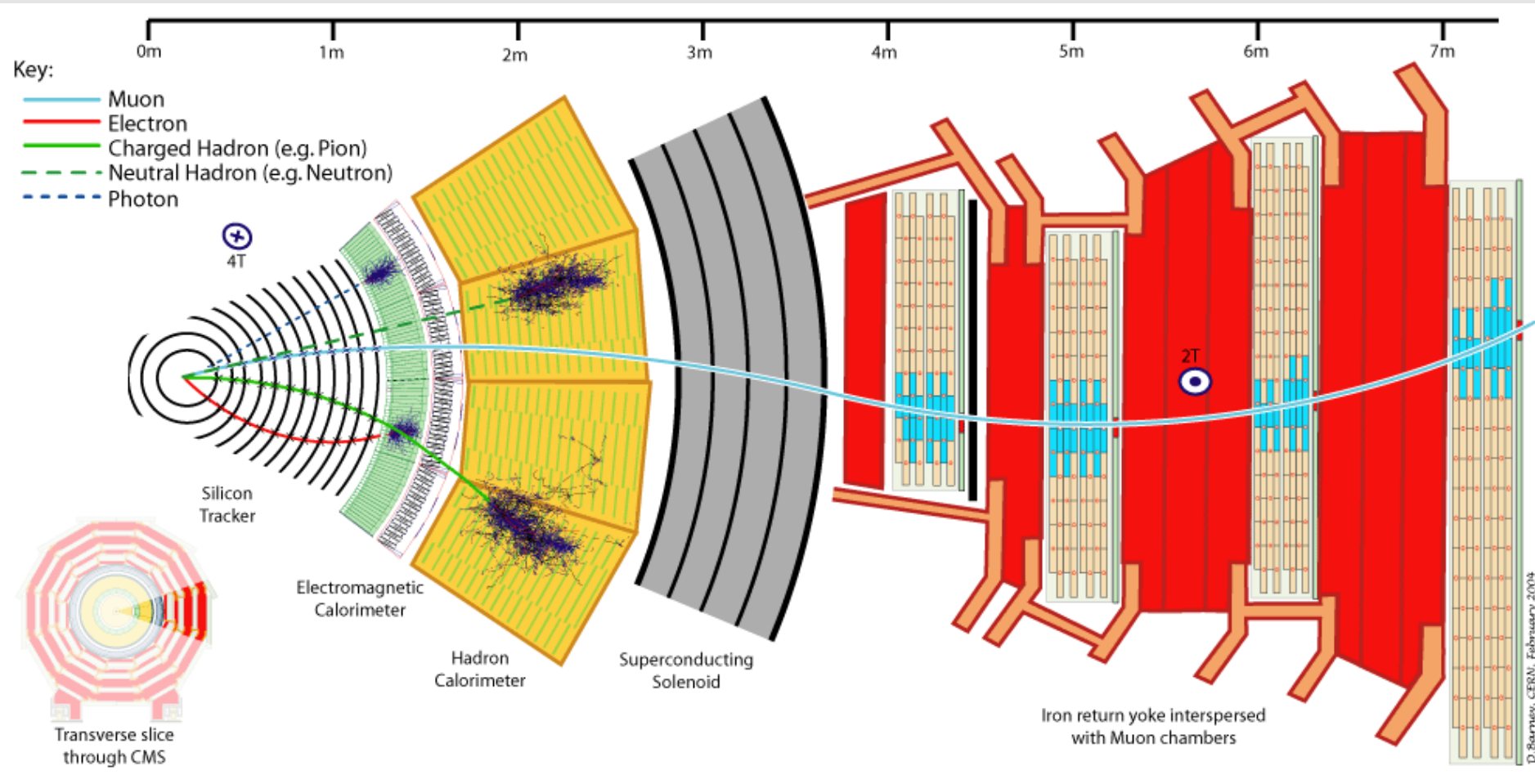
Calorimeter - Insertion of last Module

04/13/98

Bleiglas EM Kalorimeter von OPAL

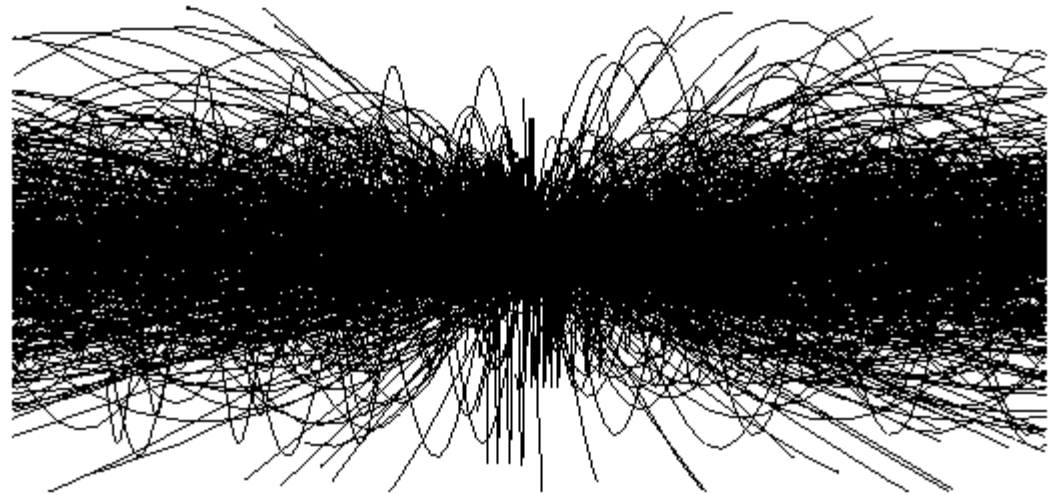
Moderne Teilchenphysik-Detektoren

- Verschiedene Detektorkomponenten mit speziellen Aufgaben ...

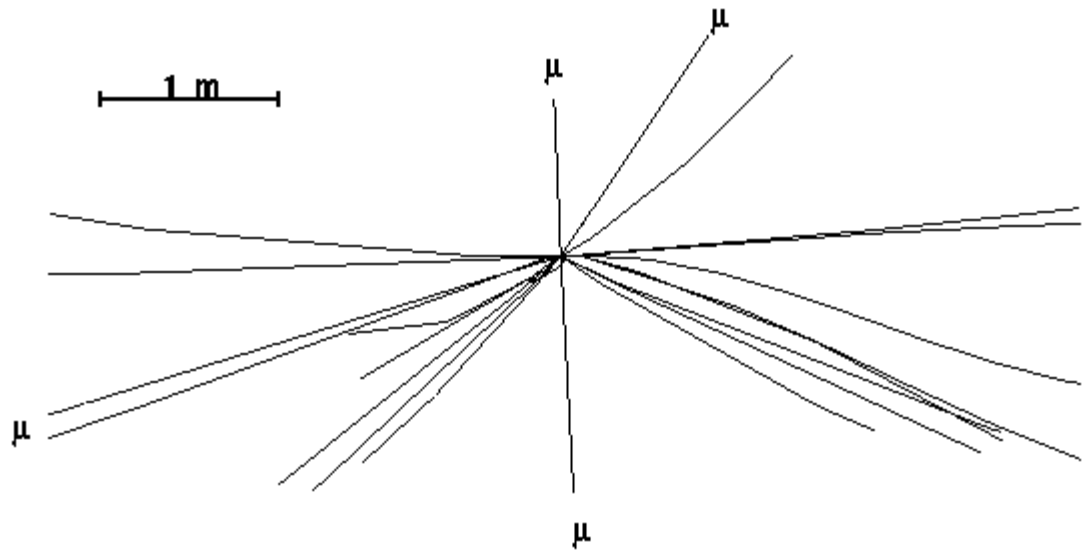


...um neue
Physik zu
entdecken!

30 minimum bias events + $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$



all charged particles with $|\eta| < 2.5$

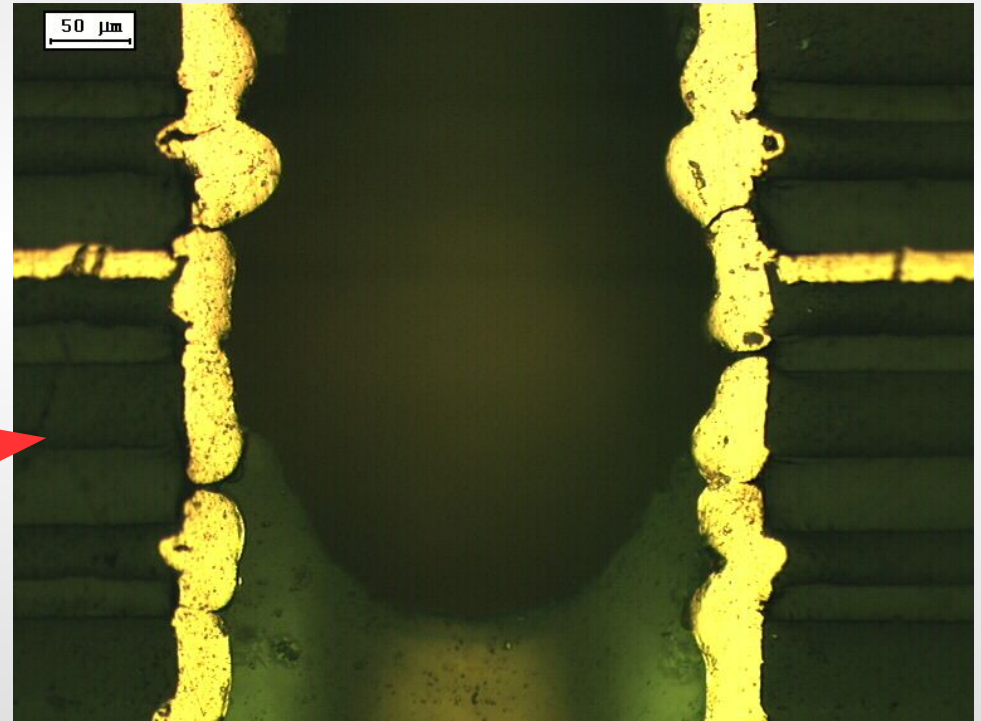
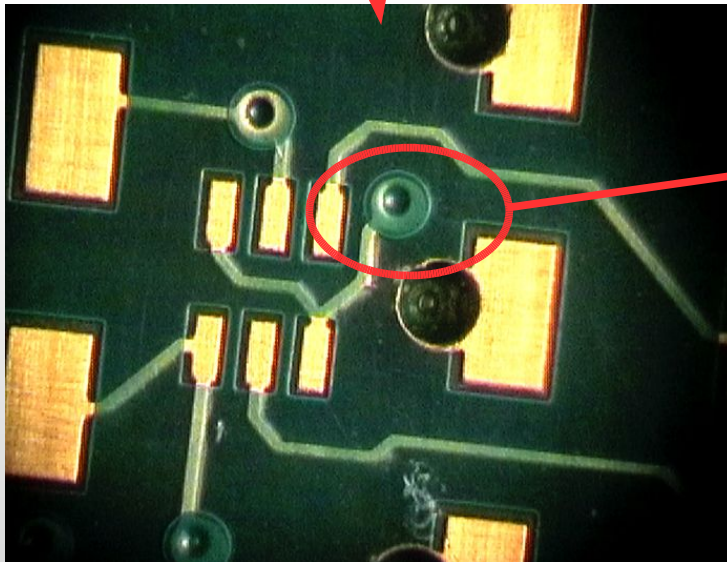
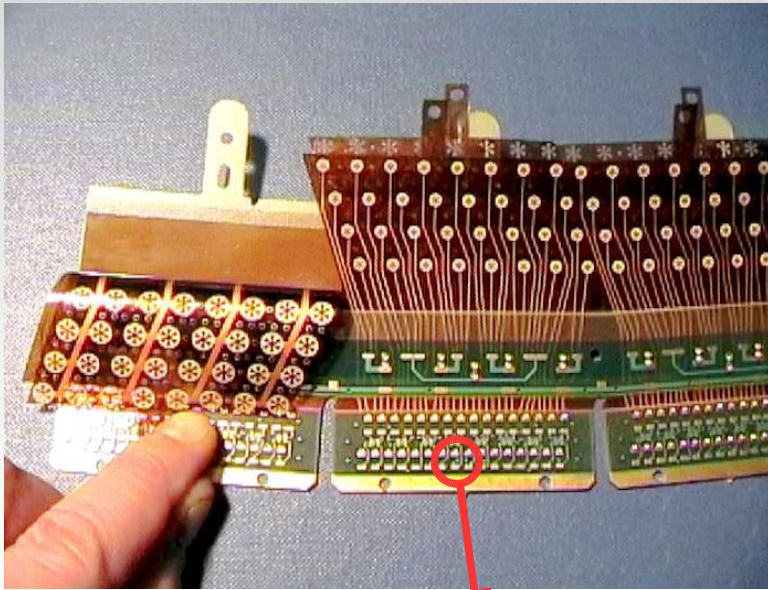


reconstructed tracks with $p_t > 2.0 \text{ GeV}$

Ein (simuliertes) Ereignis mit
einem Higgs Teilchen
 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \mu\mu\mu\mu$

Detektorbau und Massenproduktion...

... Qualitätskontrollen und -sicherung sind lebenswichtig!!!



Daher: gute Planung!

