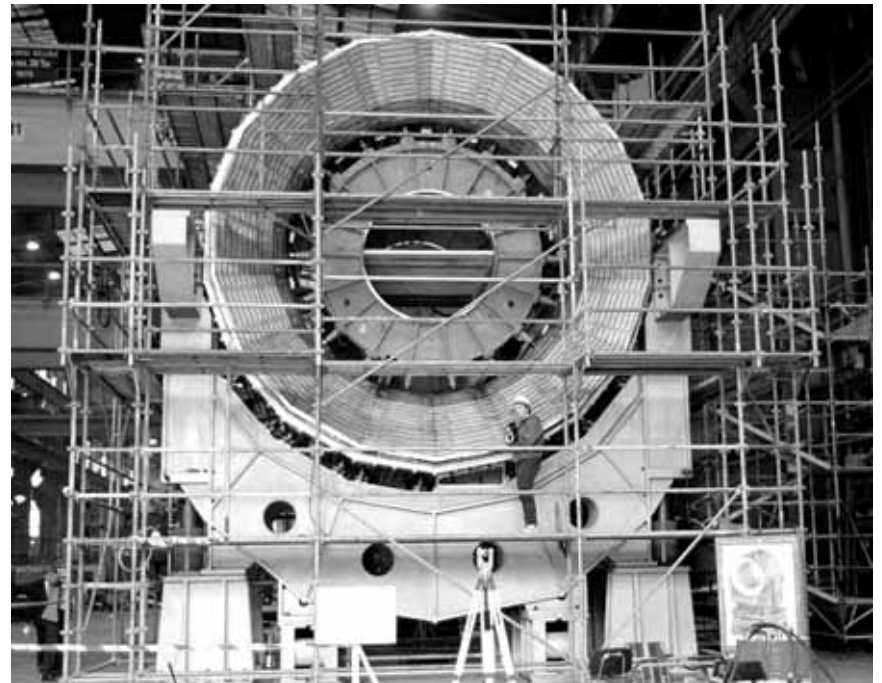


Hadronische Kalorimetrie

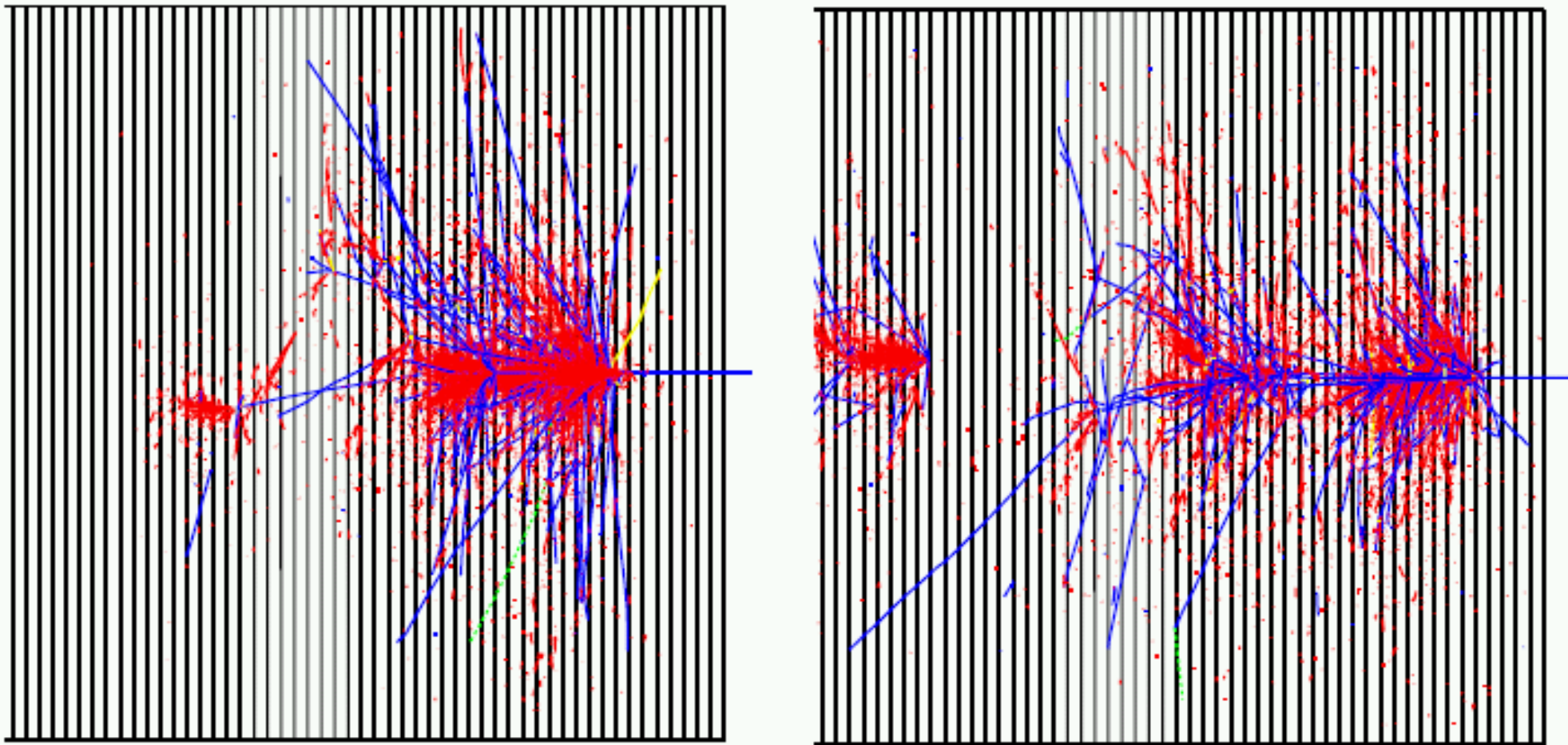
Urs Langenegger
(ETH Zürich)

2006/12/14

- Hadronische Schauer
- Kompensation
- Detektoreffekte
- Neutronennachweis



Hadronischer Schauer



red - e.m. component
blue - charged hadrons

E.m. Komponente in Hadronschauer

- Hadronschauer enthält elektromagnetische Komponente

- ▷ $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma, e^+e^-\gamma$

- ▷ $\eta \rightarrow \gamma\gamma$

- Grosse Fluktuationen

- ▷ E.m. Komponente i.w. bestimmt durch erste Wechselwirkung

- ▷ Erste Wechselwirkung: ca. 1/3 der Mesonen sind π^0

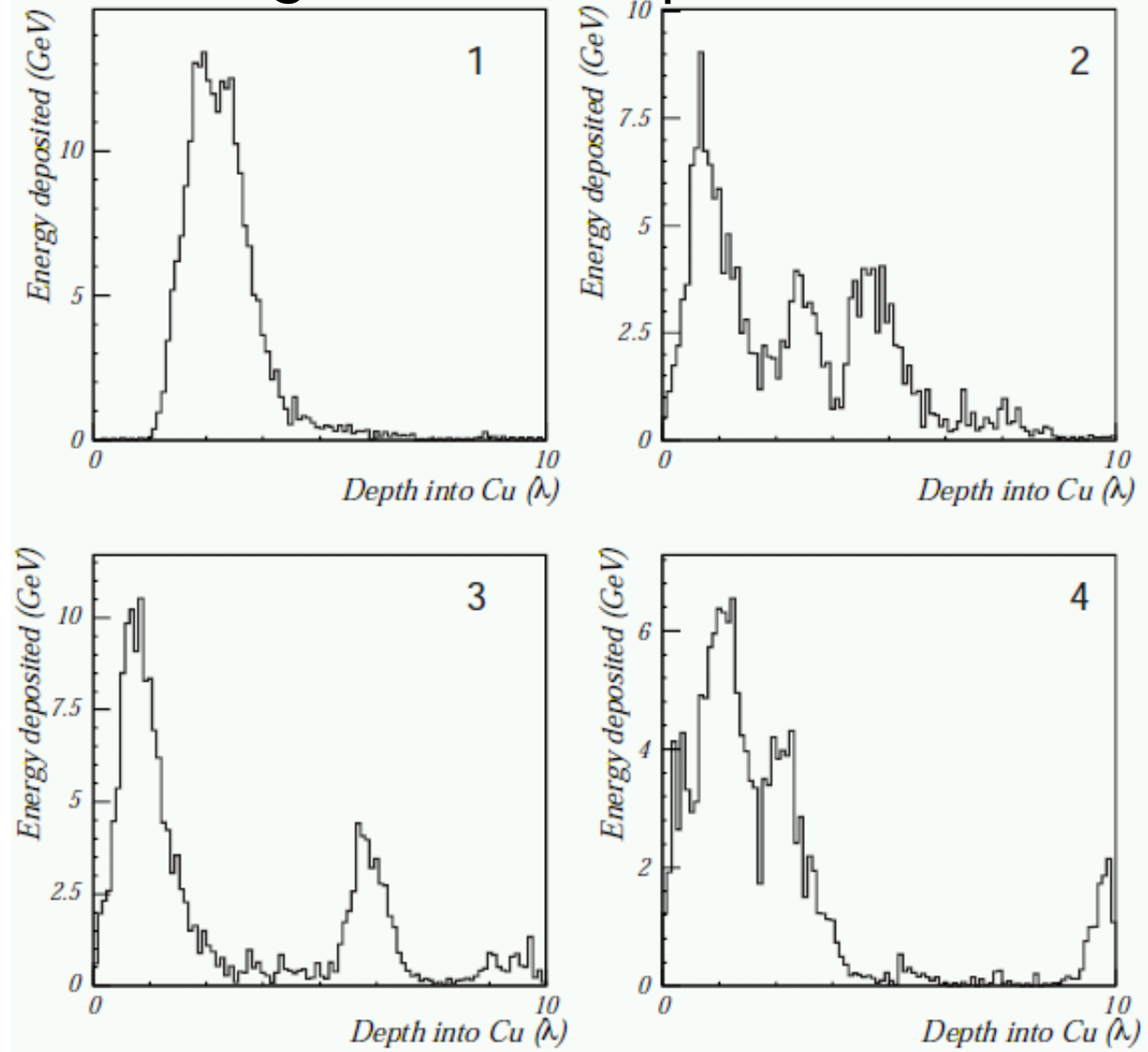
- Je nach Energie weitere e.m. Anteile

- Ausserdem:

- ▷ K_L

- ▷ Muonen

- ▷ Neutrinos



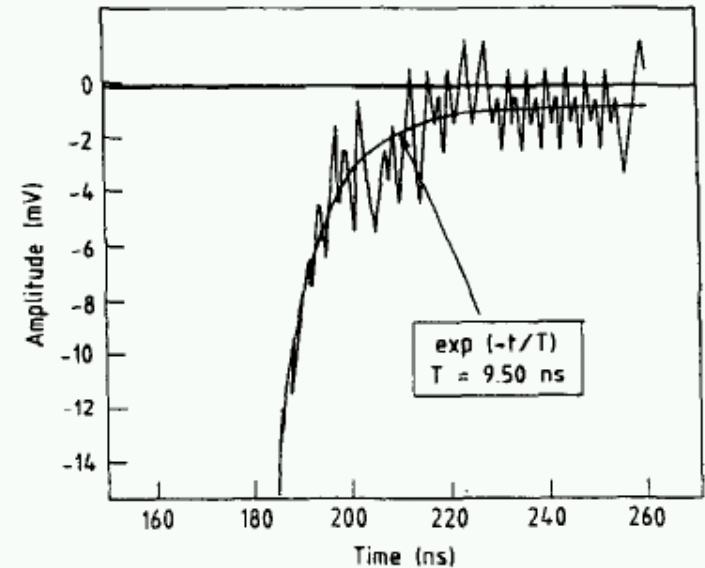
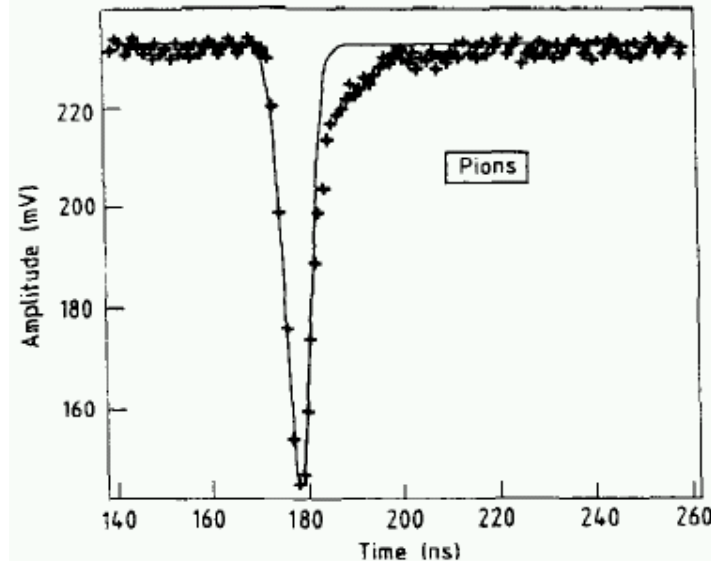
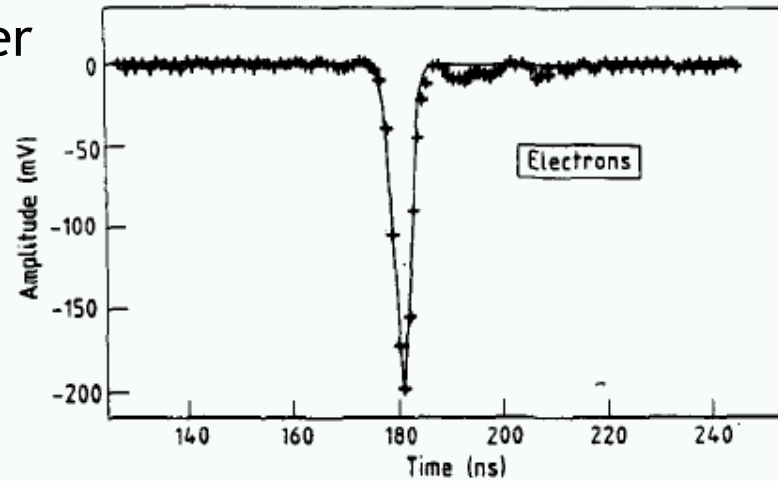
⇒ 'unsichtbarer' Energieverlust

Messung eines hadronischen Schauers

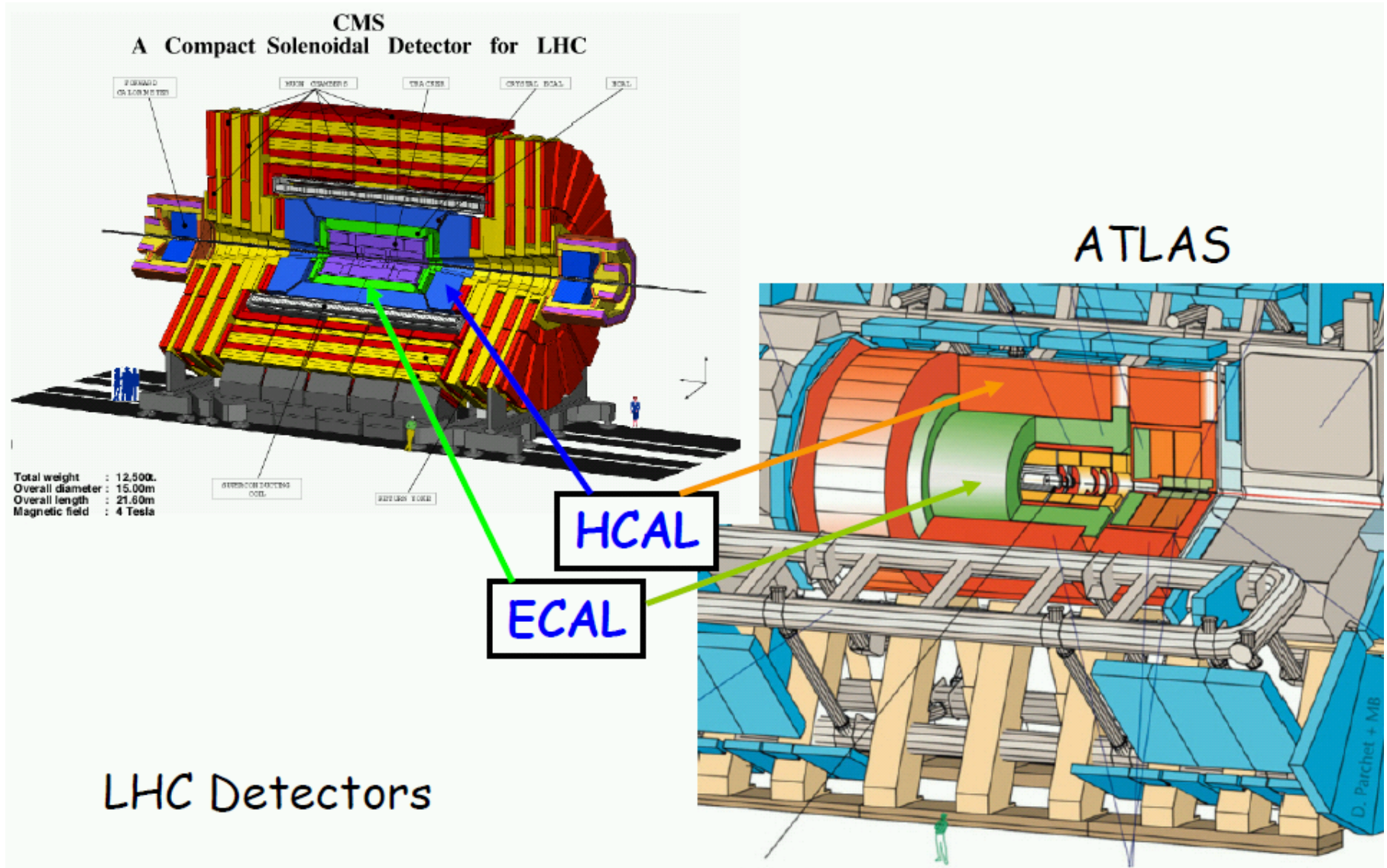
- Nukleare Wechselwirkungslänge \gg e.m. Strahlungslänge
- \Rightarrow Hadronische Kalorimeter sind massiver und grösser als e.m. Kalorimeter
- Hadronische Kalorimeter sind sampling ($\sim 10\lambda$ für vollständige Messung)
- Hadronisches Kalorimeter:
 - ▷ $E = E_{ch} + E_{em} + E_n + E_{nucl} + E_{lost}$
 - ▷ E_{ch} geladene Pionen, Kaonen, Protonen
 - ▷ E_{em} elektromagnetische Komponente (π^0, η)
 - ▷ E_n tiefenergetische Neutronen
 - ▷ E_{nucl} Energieverlust durch Kerndissoziation
 - ▷ E_{lost} Energieverlust durch Neutrinos, Muonen
- Jede Komponente mit eigener sampling fraction:
 - ▷ hadr. sampling: $E_{vis} = hE_{ch} + eE_{em} + nE_n + NE_{nucl}$
 - ▷ N i.a. klein, aber E_{nucl} z.T. gross (Pb)

Schauer Zeitstruktur

- Messung mit SPACAL
 - ▷ Em und hadronische Schauer
 - Elektronen
 - ▷ Keine Ausläufer
 - Hadronen
 - ▷ Exponentieller Ausläufer
 - ▷ Zeitkonstante ~ 10 ns
- Neutronen

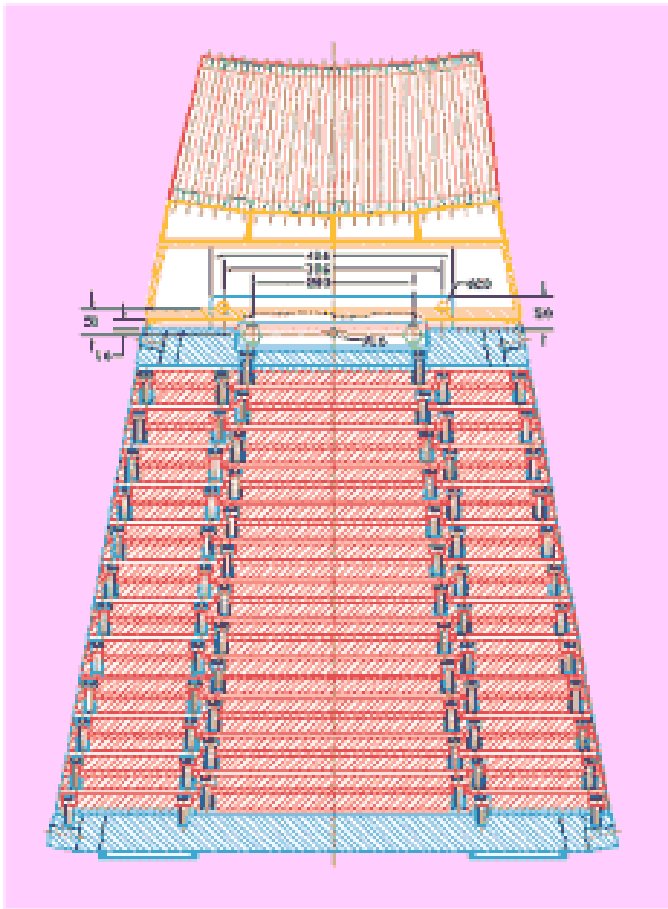


ECAL vs. HCAL am LHC

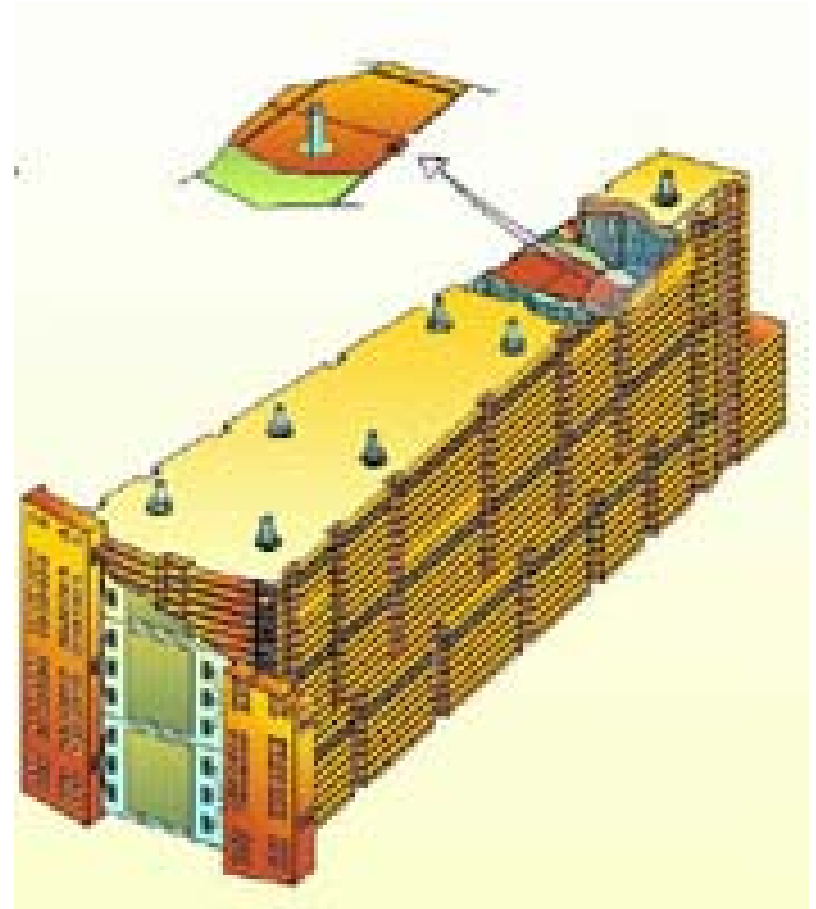


CMS und ATLAS

- CMS: Kupfer (50 mm) und Szintillator (4 mm),
 $\sim 11\lambda_i$

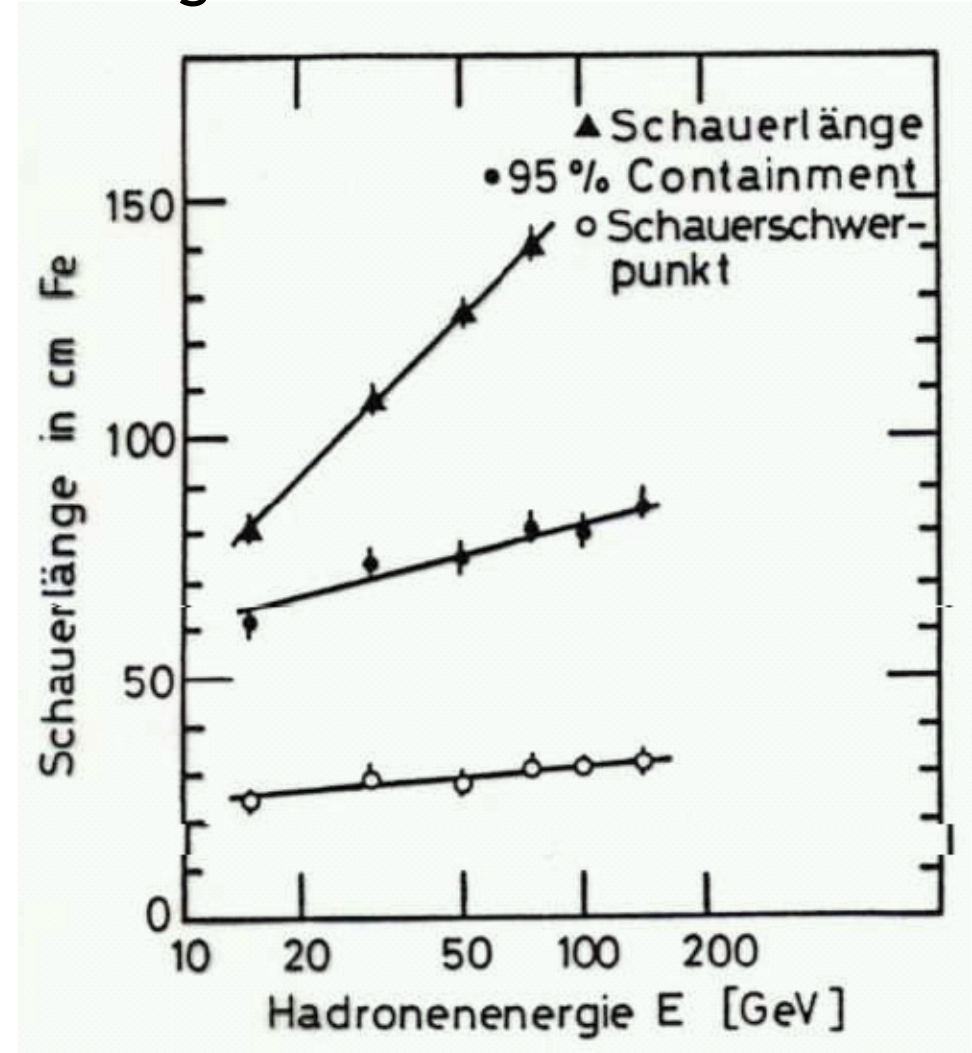
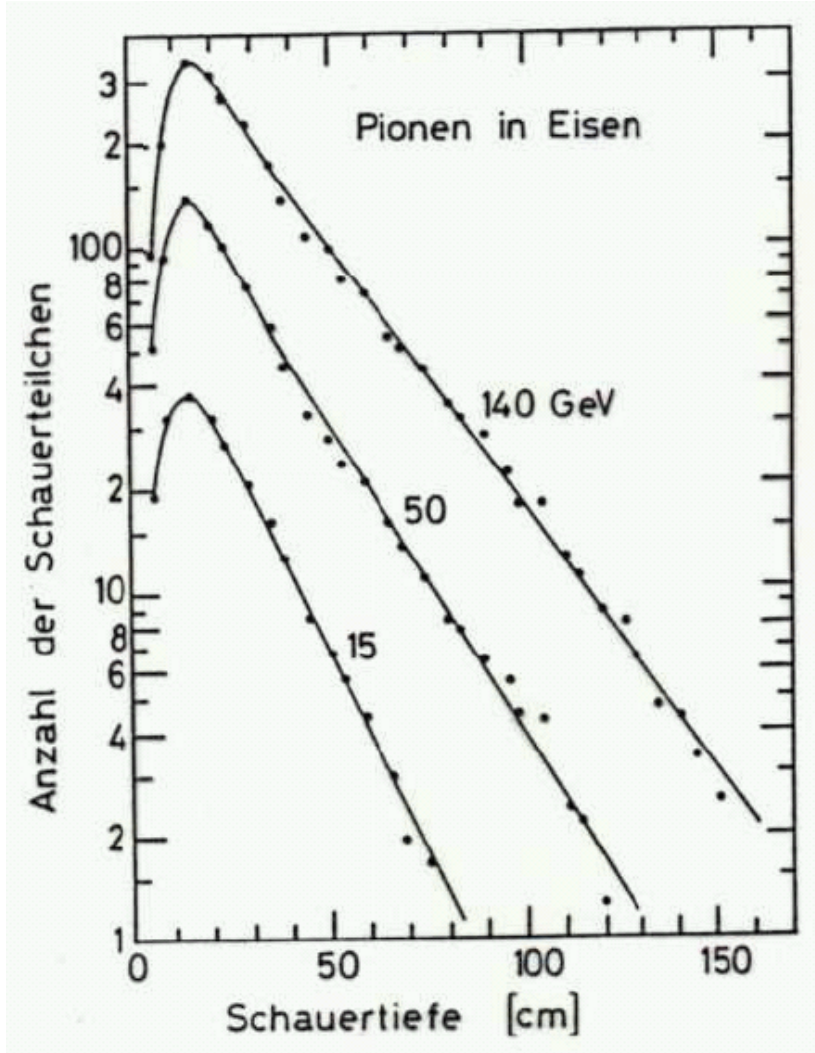


- ATLAS: 'tile calorimeter'
Stahl mit Szintillatorfibern
 $\sim 10\lambda_i$



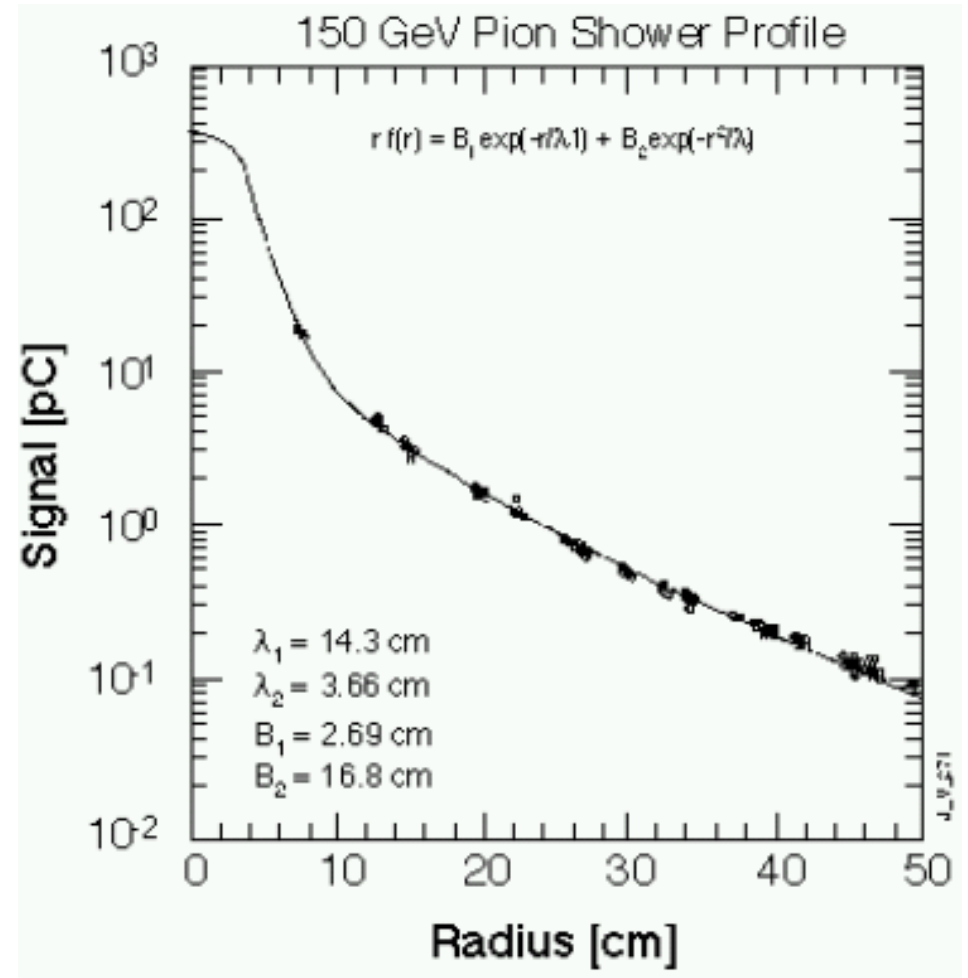
Hadronischer Schauer: Longitudinal

- Longitudinale Form für verschiedene Absorber in etwa gleich
- 95% des Schauers innerhalb einer Länge von 5λ



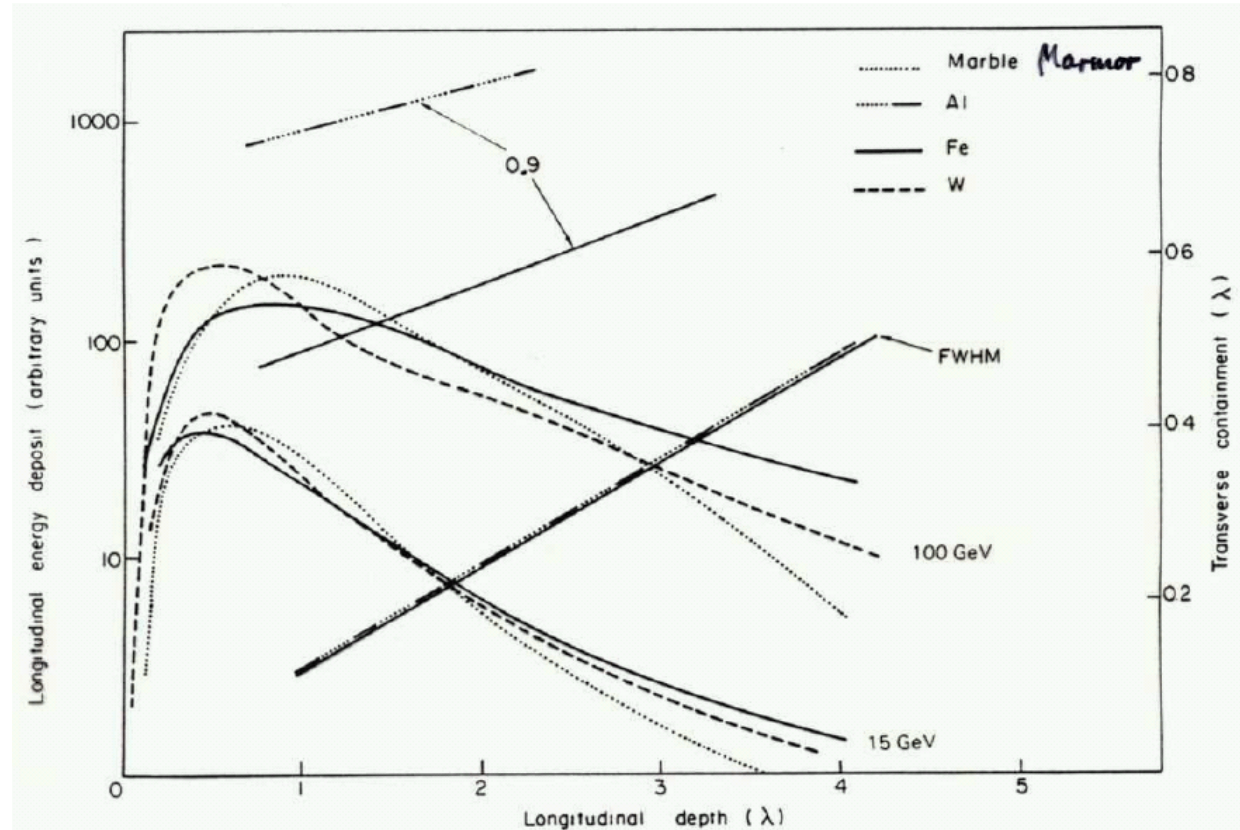
Hadronischer Schauer: Transversal

- Transversale hadronische Skala: $\Lambda_{QCD} \sim 300 \text{ MeV}$
- 2 Komponenten:
 - ▷ $\sim r_M$ von π^0
 - ▷ $\sim \lambda_i$ von hadronischen Ww
- Feine Granularität (SPACAL)
 - ▷ Präzise Messung des Kerns
 - ▷ Verbesserte Ortsauflösung



Hadronische Schauer

- Longitudinaler Schauer
 - ▷ \sim materialunabhängig
- Transversaler Schauer
 - ▷ Kern und Halo
 - ▷ Halo: viel breiter als Kern
 - ▷ Kern: 95% mit $r < \lambda_i$



Hadronische vs. em. Komponente

- Unterschiede des Kalorimetersignals in den Schauer Komponenten
 - ▷ elektromagnetisch e
 - ▷ hadronischen h

$$R_h = hE_h + eE_e$$

- h hängt ab von

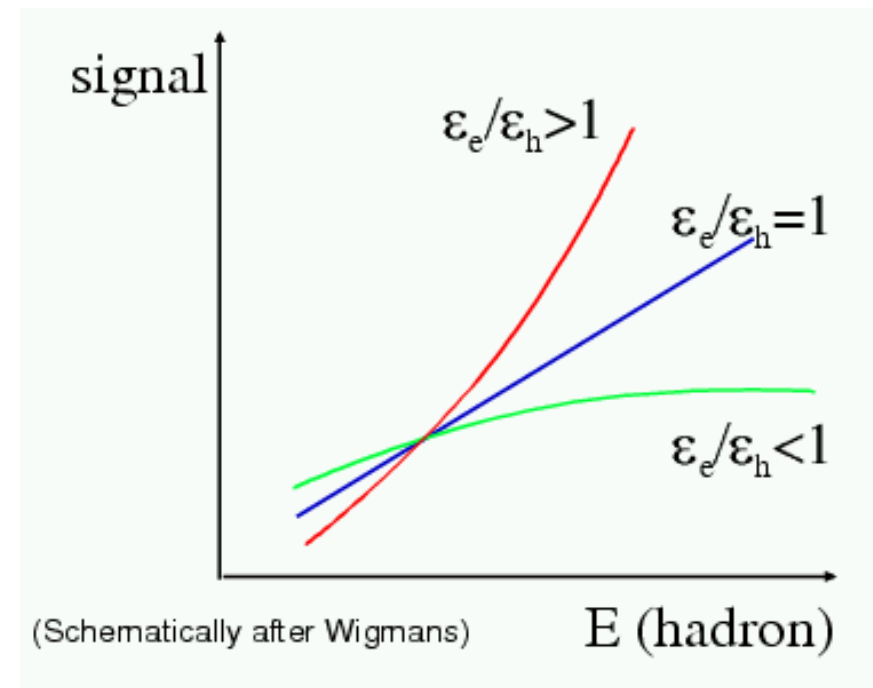
$$\frac{E_h}{E} = 1 - f_{\pi^0} = 1 - k \log E[\text{GeV}], \quad k \approx 0.1$$

⇒ Normalerweise $e/h > 1$

- Energieauflösung

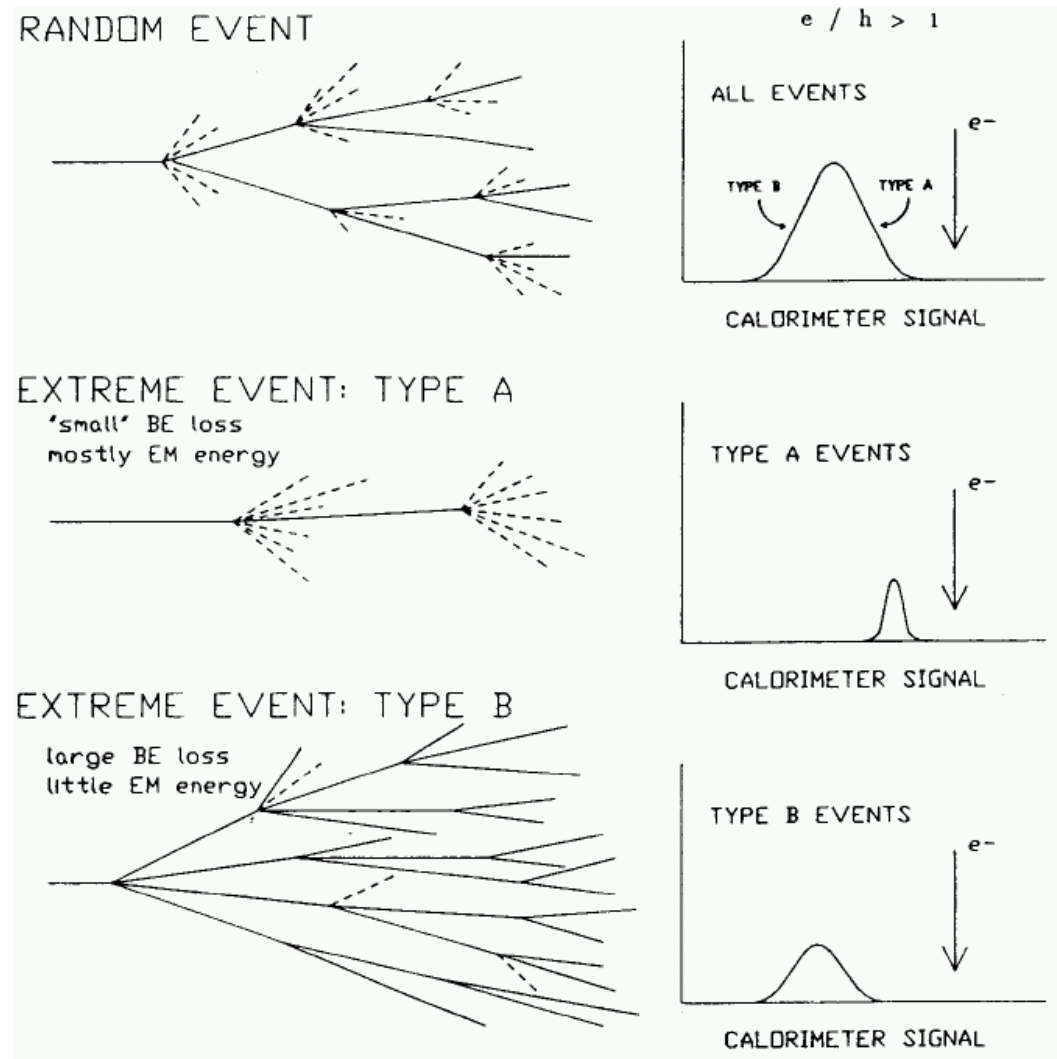
$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} + b \left| \frac{e}{h} - 1 \right|$$

- Kalorimetersignal ist
 - ▷ nicht linear zu Hadronenergie
 - ▷ für e/h energieabhängig



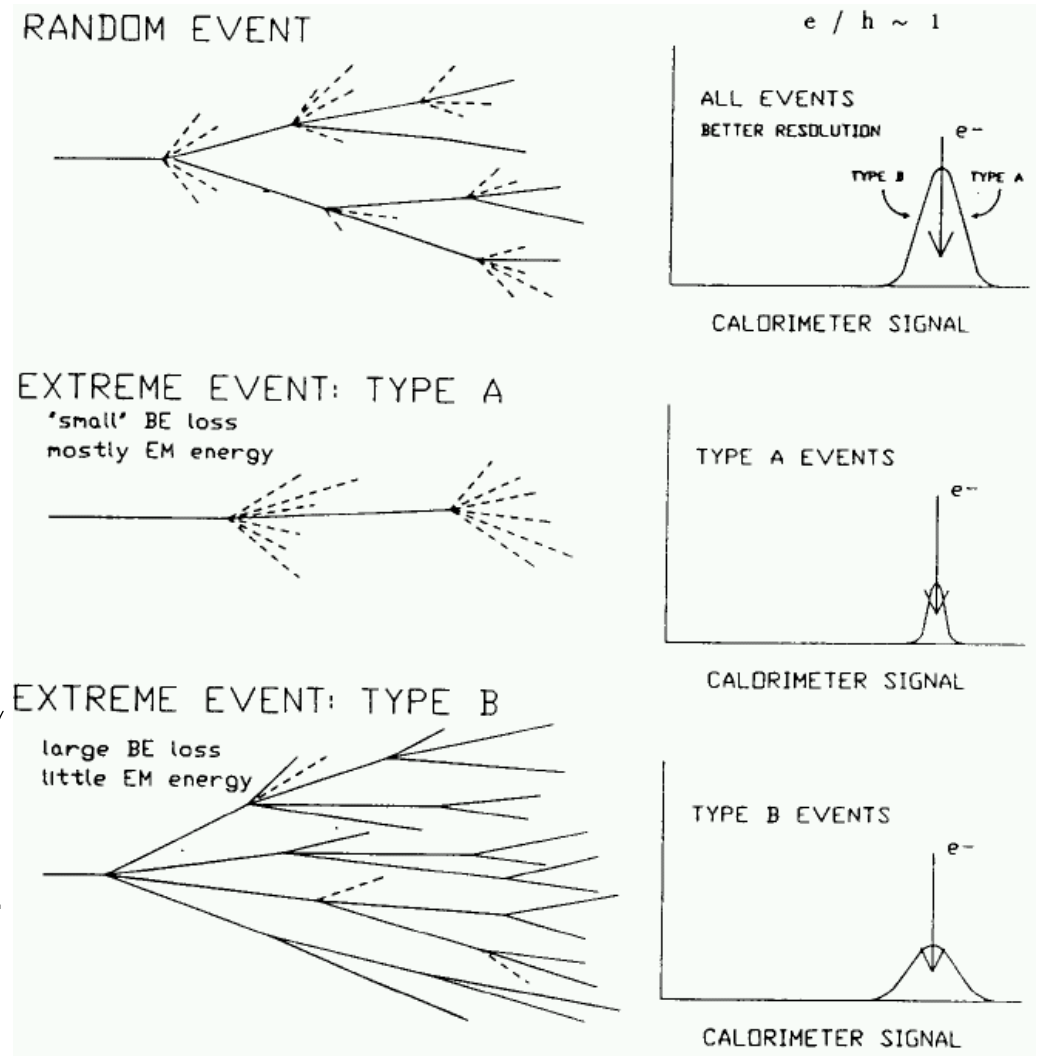
Kompensation?

- Variable Detektoransprechen auf hadronische Schauer
 - ▷ Hängt stark von em Komponente ab
- Typ A
 - ▷ Nur Photonen (π^0)
 - ▷ Keine Neutronen/Hadronen
- Typ B
 - ▷ Hadronen und Neutronen
 - ▷ Fast keine Photonen
- Für beste Auflösung
 - ▷ Gleiches Ansprechen auf Ereignisse A und B
 - 'Kompensation'



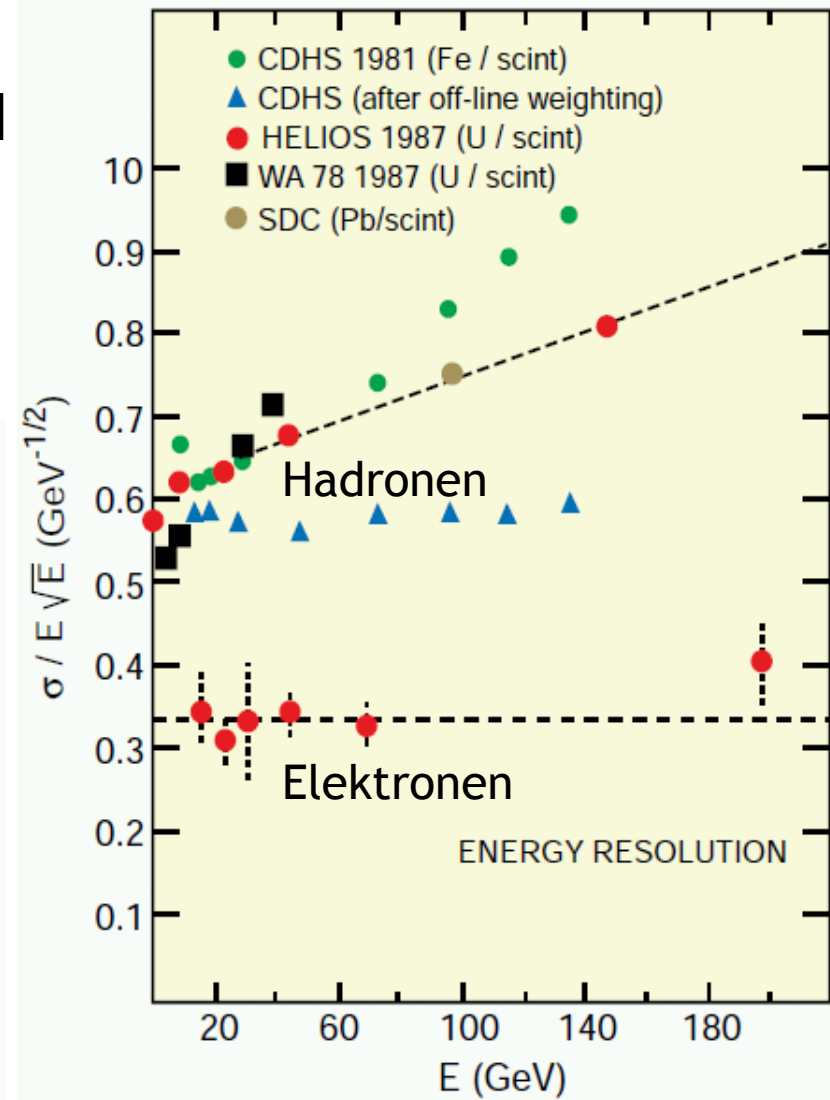
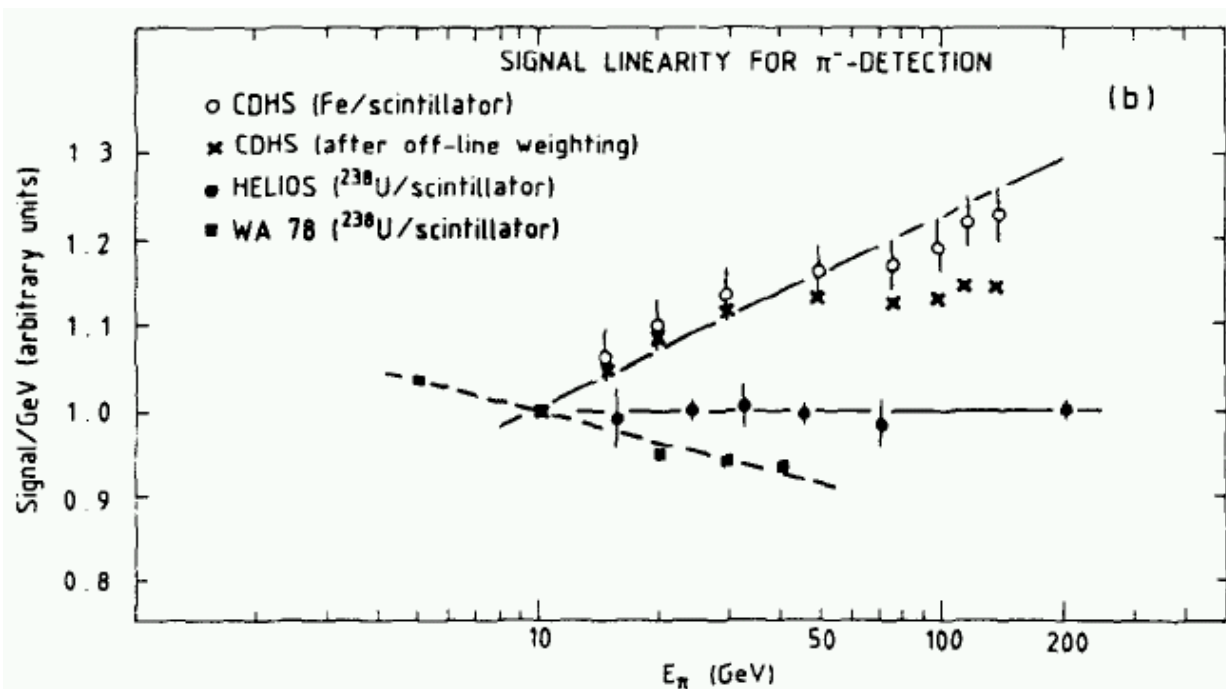
Kompensation!

- Bei einem kompensierenden Kalorimeter ist $e/h \sim 1$
- Erhöhung h
 - ▷ Uran Absorber
 - ▷ n, γ Anteil erhöht durch (induzierte) Spaltung
 - Benötigt hohe n Effizienz (Szintillator!)
- Absenkung e
 - ▷ Kombination von Absorber mit grossem Z Detector mit kleinem Z
 - Ineffizienz für tiefenerget. γ
- Schauer Gewichtung in s/w
 - ▷ E.m. Schauer im vorderen Teil
 - Skalierung dieser Energie



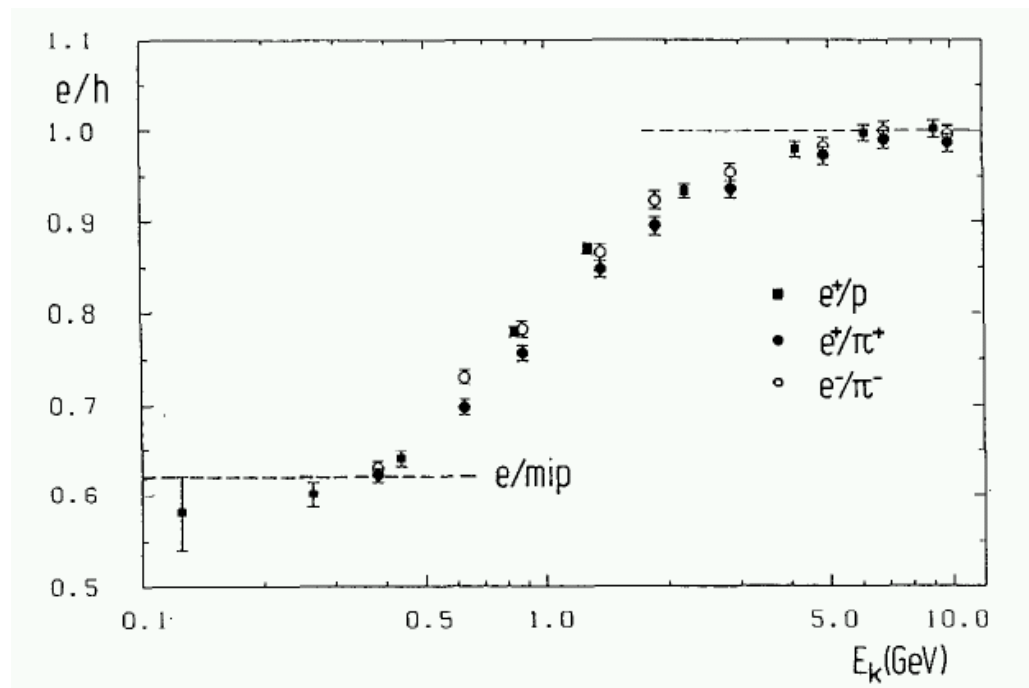
Kompensierende Kalorimeter

- U/Szint. nicht 'automatisch' kompensierend
 - ▷ Mischung Uran/Szintillator muss stimmen
- Fe/Szint. ist i.a. nicht kompensierend
 - ▷ Software Gewichtung
 - Gute Auflösung möglich



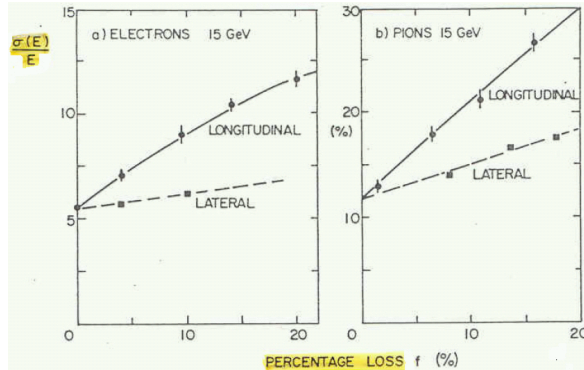
Kompensation bei tiefen Energien

- Kalorimeter nicht über ganzen Energiebereich kompensierend
 - Bei tiefen Energien
 - ▷ $E < 3 \text{ GeV}$
 - ▷ h^\pm Energieverlust ohne starke Ww, nur durch Ionisation
 - ▷ Verbesserte Energiemessung für Hadronen
- e/h sinkt gegen tiefere Energien



Entweichverluste ('Leakage')

- Alle Kalorimeter sind endliche Grösse
 - ▷ (Had) Schauerverluste hinten



→ Verschlechterung der Auflösung!

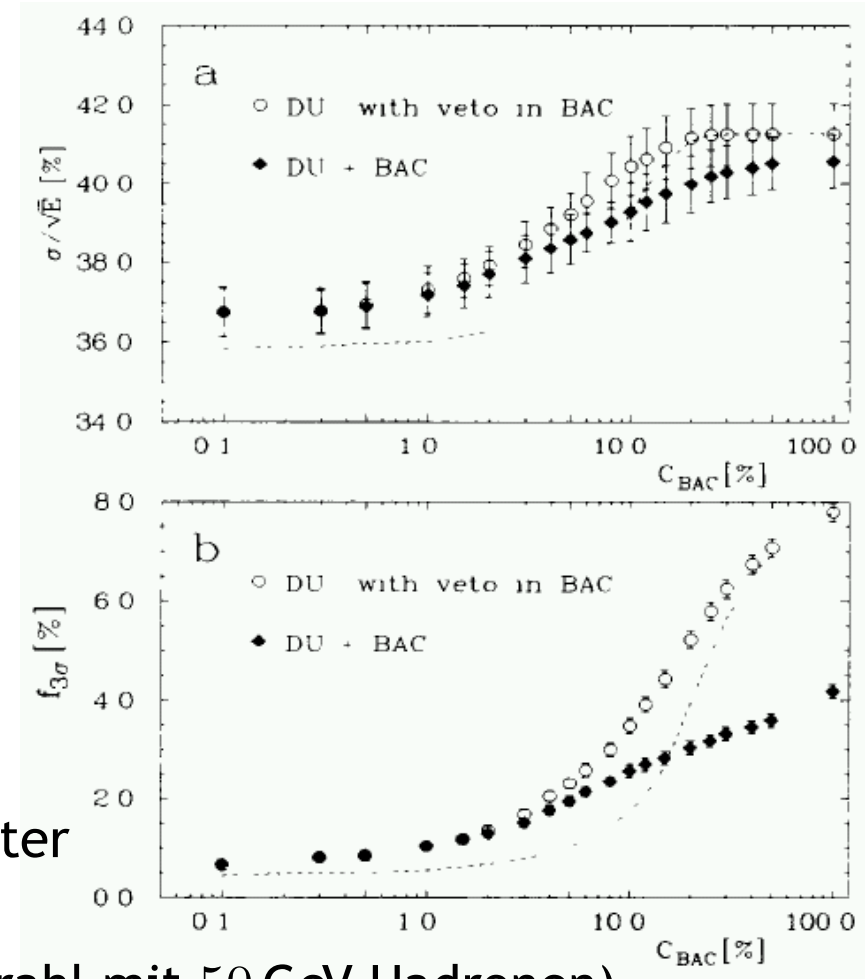
$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{\sigma(E)}{E} \Big|_0 \left(1 + f(E) + 50f^2(E) \right)$$

$f(E)$ Bruchteil der verlorenen Energie

- Lösung: 'Tail catcher'

- ▷ (Billiger) Detektor hinter had. Kalorimeter
- ▷ Veto oder Kalorimeter
- ▷ Beispiele vom ZEUS tail catcher (Teststrahl mit 50 GeV Hadronen)

Dashed line: Veto mode w/o dead material



Kalorimeter verschiedener Experimente

- Beim gleichen Beschleuniger Mischung von
 - ▷ Sampling
 - ▷ Homogene

Experiment	E.m. Kalorimeter	Had. Kalorimeter
CMS ATLAS	PbWO ₄ Kristalle Pb/lAr	Cu/Szintillator Pb/Szintillator
BABAR (und Belle)	CsI(Tl) Kristalle	-
H1 ZEUS	Pb/lAr U/Szintillator	Pb/lAr U/Szintillator
SLD ALEPH DELPHI L3 OPAL	Pb/lAr Pb/Al Röhren Pb/TPC BGO Kristalle Pb Glass	Pb/lAr + Fe/Gas Pb/Plastik Röhren Fe/Plastik Röhren U/Messing Röhren Fe/Proportionalkammern

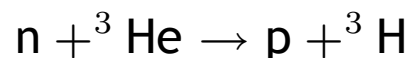
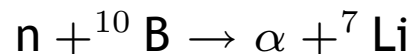
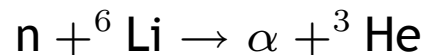
Nachweis von Neutronen

- Wechselwirkungen von Neutronen

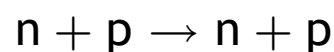
- ▷ keine elektrische Ladung
- ▷ nur starke Kernkraft

- Wechselwirkungen von Neutronen

- ▷ $E_n < 20 \text{ MeV}$



- ▷ $E_n < 1 \text{ GeV}$

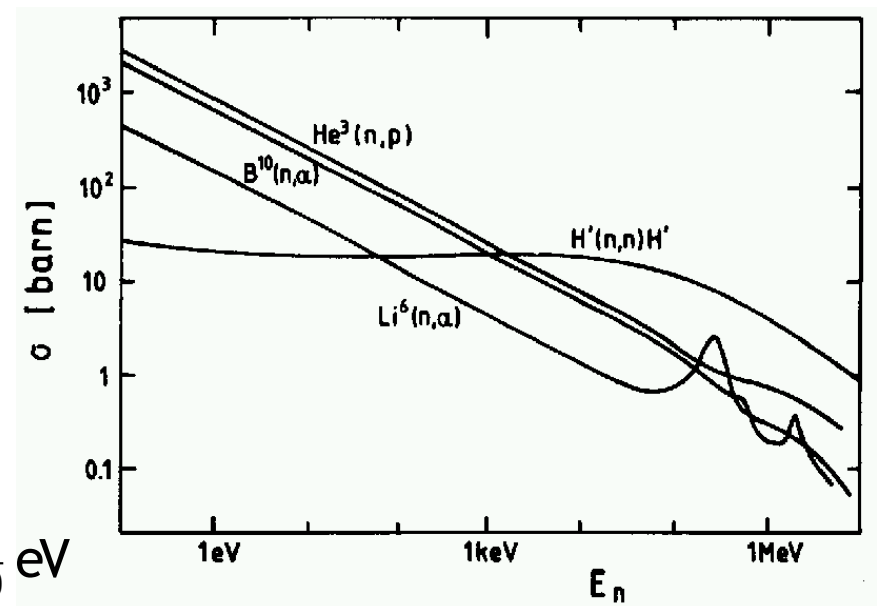


- ▷ Neutron-induzierte Spaltung $E_n \approx \frac{1}{40} \text{ eV}$

- ▷ Hadronische Kaskaden $E_n > 1 \text{ GeV}$

⇒ Nachweis dieser sekundären geladenen Teilchen

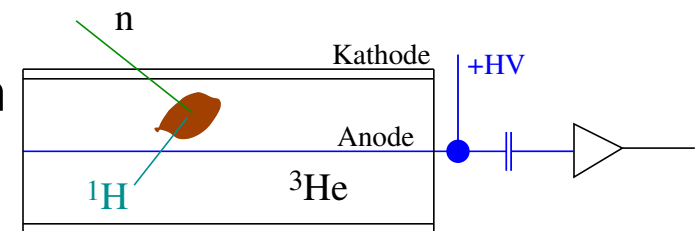
- ▷ Gasetektoren
- ▷ Szintillatoren
- ▷ Halbleiterdetektoren



Neutronendetektoren

• Gasdetektoren

- ▷ Grosses dE/dx durch langsame Protonen
- ▷ Gasdruck 8-10 bar, Rohrdurchmesser 2-5 cm
- ▷ Relativ schlechte Orts-, und Zeitauflösung
- ▷ Raten beschränkt auf $\sim 10 \text{ kHz/cm}^2$

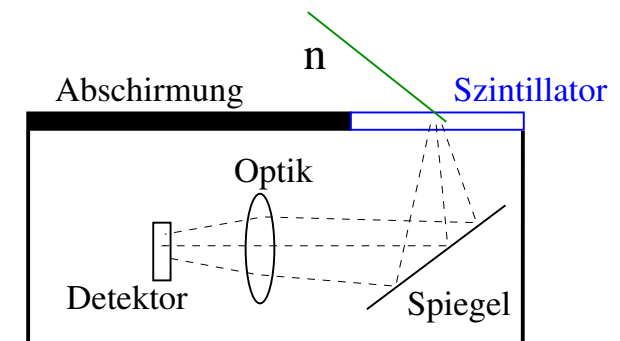


⇒ Verbesserungen

- ▷ MWPC (multi-wire proportional chamber)
- ▷ MSGC (micro-strip gas chamber)

• Szintillatordetektoren

- ▷ Leichtes Szintillatormaterial mit n-Konverter
- ▷ Photodetektor z.b. CCD oder MCP
- ▷ Ratenlimitiert



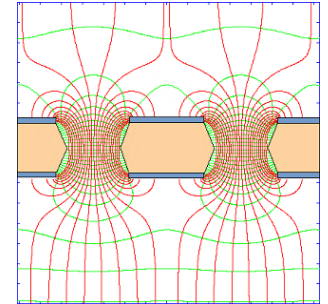
• Halbleiterdetektoren

- ▷ Halbleiterdetektor mit aufgebrachtem n-Konverter: ^6Li oder ^{156}Gd
- ▷ Sehr gute Ortsauflösung

CASCADE

- Entwicklung an der Uni Heidelberg

- ▷ Fester n-Konverter (Bor)
- ▷ Kaskade von n-Konvertern
- ▷ 'Ladungstransparenz' durch GEM (gas electron multiplier)



- Detektorschema

