4. Kalorimeter

4.1. Einleitung

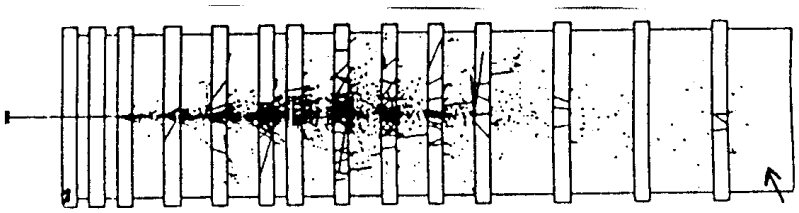
- Aufgabe der Kalorimeter: Energiemessung
  Materieblock (Absorber + sensitives Medium) in dem ein Teilchen wechselwirkt und seine gesamte Energie deponiert.

- Die Energie wird primär auf neu erzeugte niederenergetische Sekundärteilchen übertragen
  $\Rightarrow$ Teilchenkaskade, Schauer

- Ein Bruchteil der ursprünglichen Teilchenenergie geht in ein meßbares Signal über
  (z.B. Szintillationslicht, Ionisationsladung).

- Dieser Bruchteil sollte proportional zur ursprünglichen Energie sein.

- Fluktuationen im Schauerprozeß und im meßbaren Signal bestimmen die erreichbare Auflösung.



Wichtige Kenngrößen von Kalorimetern:

- Linearität der Energiemessung

- Genauigkeit der Energiemessung, Energieauflösung

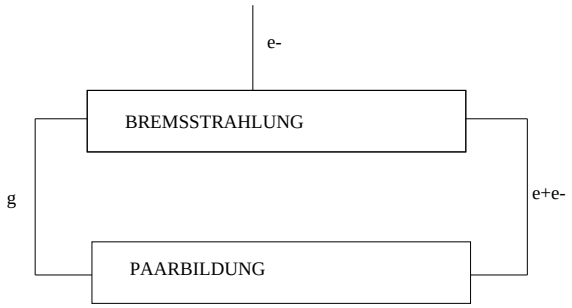
- Energieantwort für verschiedene Teilchen

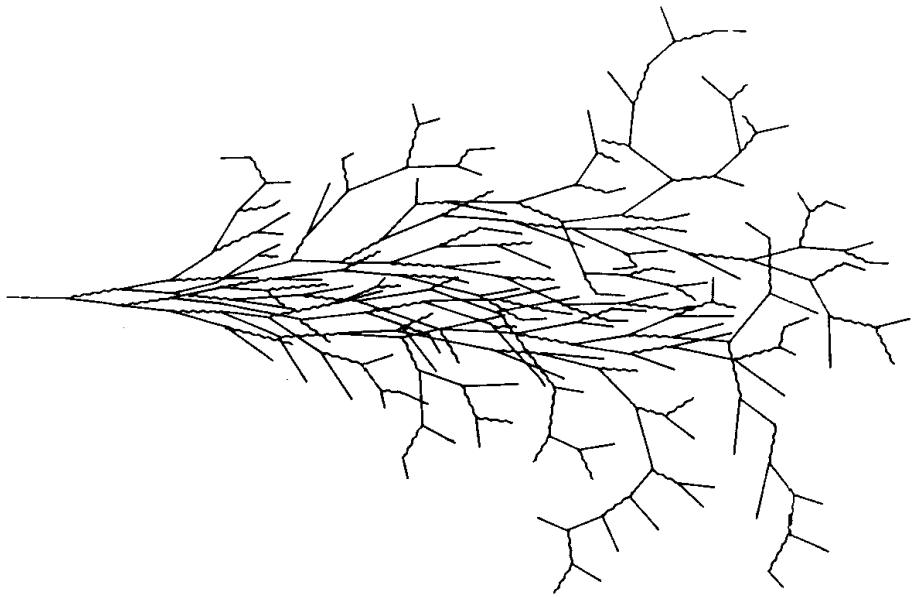
4.2. Elektromagnetische Schauer

Schauer, die durch Elektronen/Positronen oder Photonen ausgelöst werden werden als elektromagnetische Schauer bezeichnet. Beteiligt ist ausschließlich die elektromagnetische Wechselwirkung.

- Zugrundeliegende Prozesse:
  Bremsstrahlung und Paarbildung

  hohe Energien: Elektron $\Rightarrow$ Bremsstrahlung
  Photon $\Rightarrow$ Paarbildung





- charakeristische Wechselwirkungslänge: Strahlungslänge X_0

- Zahl der Teilchen im Schauer steigt an, bis die kritische Energie für die Elektronen erreicht wird, danach überwiegt der Energieverlust durch Ionisation und Anregung.
  $\Rightarrow$ Zahl der Teilchen im Schauer reduziert sich langsam.

Longitudinales Schauerprofil:

- Energieverlust als Funktion der Schauertiefe t in Einheiten der Strahlungslänge ($t = x/X_0$) kann parametrisiert werden durch:

$$\frac{dE}{dt} = const \cdot t^a \cdot e^{-bt}$$

  (für Modellrechnungen: s. z.B. Buch von C.Grupen)

  kleine Schauertiefen: Zahl der Sekundärteilchen steigt an, durchläuft ein Maximum (Schauermaximum), fällt exponentiell ab.

- Lage des Schauermaximums
  hängt logarithmisch von der ursprünglichen Energie E_0 ab:

$$t_{max}(e) = ln\frac{E_0}{E_C} - 0.5$$

$$t_{max}(\gamma) = ln\frac{E_0}{E_C} + 0.5$$

- longitudinale Schauerentwicklung (in Einheiten der Strahlungslänge) zeigt eine Z-Abhängigkeit

  (kritische Energie ist Z-abhängig, bei leichteren Elementen stoppt die Teilchenmultiplikation früher)

$$t_{max} \sim \ln\left(\frac{E_0}{E_c}\right)$$

Abhängigkeit von E_c (unterschiedliche Materialien)

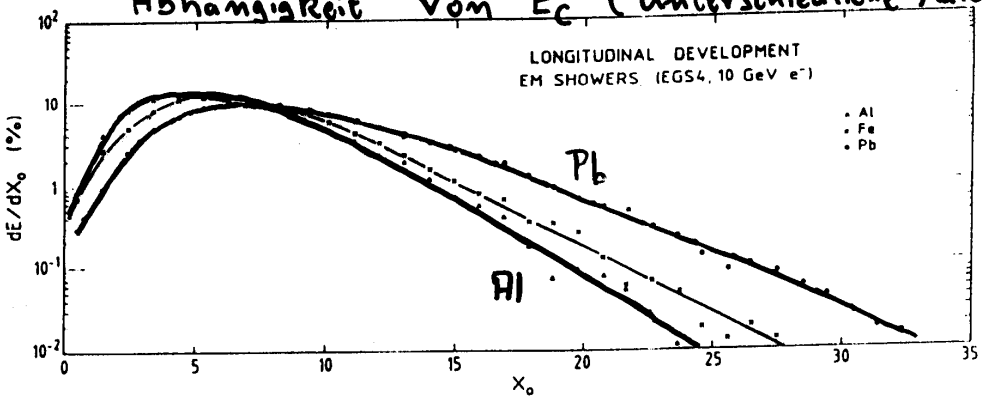
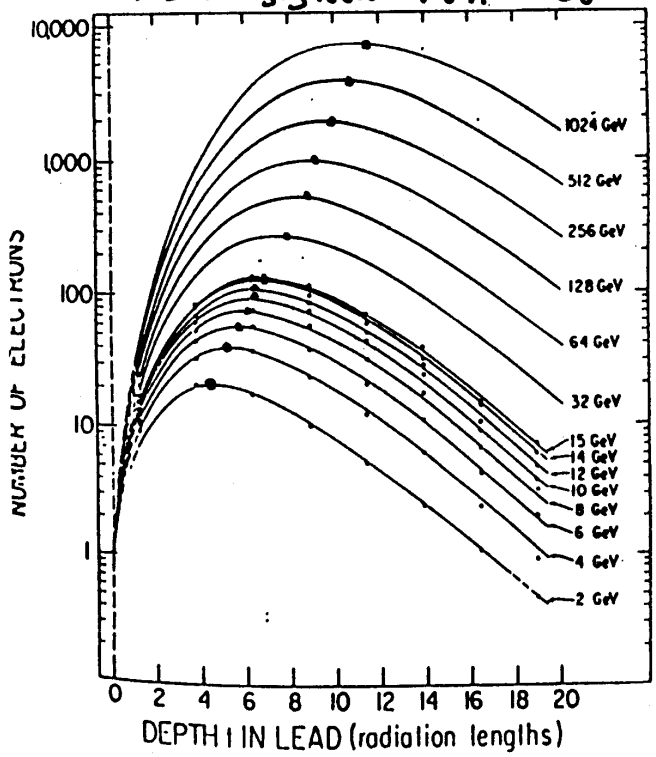


Figure 2.2: *The longitudinal development of a 10 GeV electron shower in aluminum, iron, and lead. Results of EGS4 calculations [7].*

$$E_c \approx \frac{550\ \text{MeV}}{Z}$$

Abhängigkeit von E_0



logarithmischer Anstieg mit E_0.

Laterales Schauerprofil:

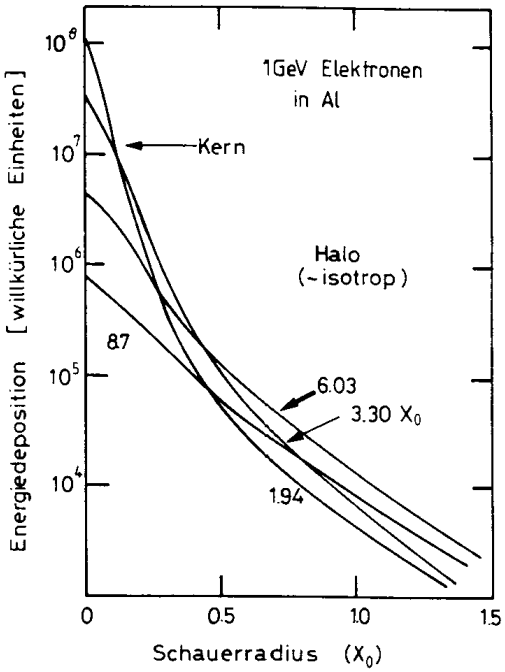
- Das laterale Schauerprofil ist durch zwei Effekte dominiert:
  - Vielfachstreuung der Elektronen
  - rel. lange mittlere freie Weglänge niederenergetischer Photonen (Endphase des Schauers)

- Die radiale Ausdehnung ist durch den Moliere Radius ρ_M charkterisiert:

$$\rho_M = \frac{21\text{MeV}}{E_C} X_0 \approx 7 \frac{A}{Z} \left[\frac{g}{cm^2}\right]$$

- Etwa 95% der Energie sind in einem Zylinder mit einem Radius von $R = 2\rho_M$ enthalten

- El.magn. Schauer sind i.allg. gut kollimiert,
  $\Rightarrow$ gute Ortsauflösung (bzw. Richtungsmessung) möglich

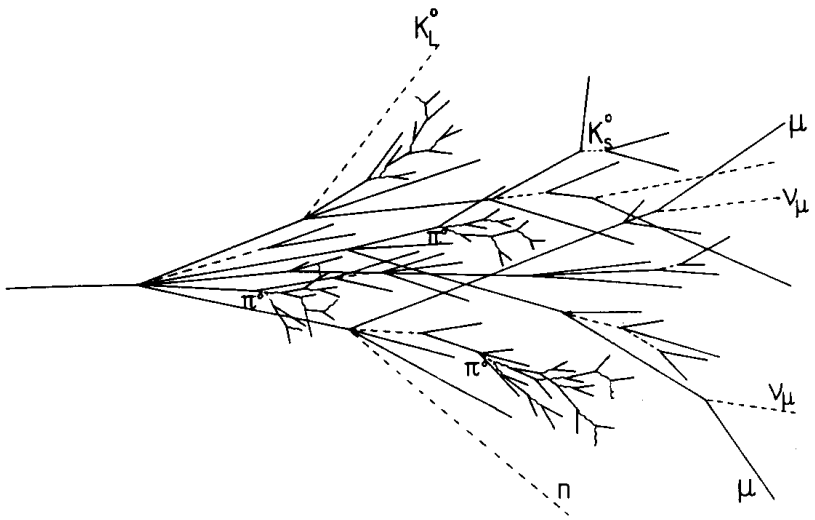


Material	Z	X_0 (cm)	ρ_M (cm)	E_C (MeV)	λ_{abs} (cm)
Polystyrene	-	42.4	8.25	109	79.5
Argon	18	14.0	6.51	45.6	83.7
Eisen	26	1.76	1.36	27.4	16.8
Blei	82	0.56	1.25	9.5	17.1
Uran	92	0.32	0.81	8.4	10.5

4.3. Hadronische Schauer

- Schauer, die von Hadronen (aufgrund der starken Wechselwirkung) initiiert werden, werden als hadronische Schauer bezeichnet.

- hadronische Schauer sind wesentlich komplexer als el.magn. Schauer; grundlegende WW: inelastische hadronische Wechselwirkung



  - ⇒ mehrere Sekundärteilchen (Meson-Produktion)
    Multiplizität $\sim$ ln E

  - π^0 Komponenten, $\pi^0 \to \gamma\gamma$ ⇒ el.magn. Subschauer
    Der el.magn. Anteil f_{em} nimmt mit wachsender Energie zu (Bremsstrahlung): $f_{em} = 0.1 \cdot lnE$ (E in GeV, 10 GeV $<$ E $<$ 100 GeV)

  - Atomkerne werden teilweise aufgebrochen oder verbleiben in angeregten Zuständen

    Kernbindungsenergie muß vom Primär- oder Sekundärteilchen aufgebracht werden

    ⇒ kein Beitrag zur sichtbaren Energie

    Angeregte Kerne geben Energie ab ⇒ γ-Strahlung ⇒ el.magn. Subschauer

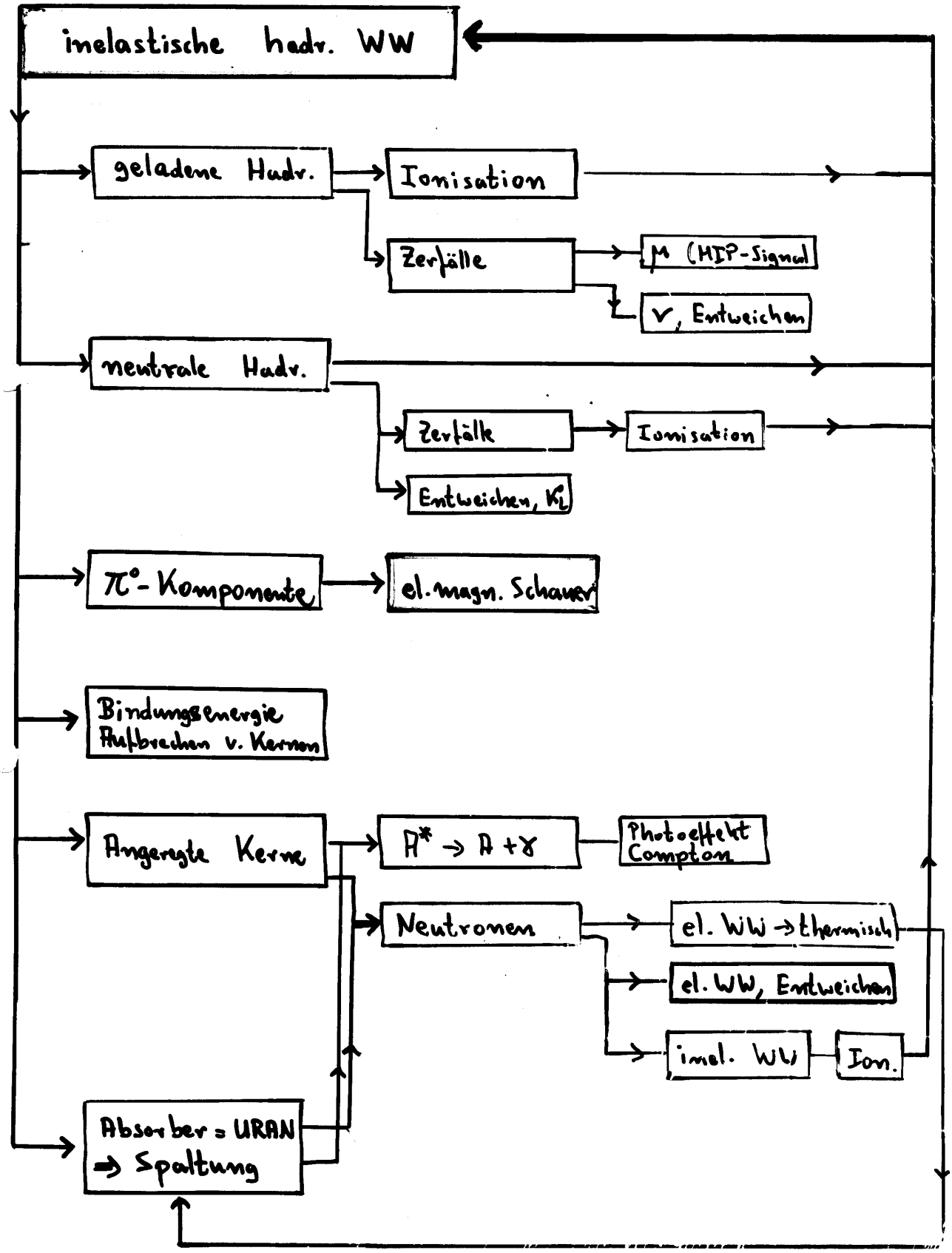
  - Neutronen:
    Wechselwirkung ist stark abhängig von der Energie der Neutronen, Extremfälle:

    * Kernreaktionen, z.B. Kernspaltung

    * Austritt aus Kalorimeter (elastische Streuung) ohne inel. WW

  - Zerfälle von Teilchen (langsame Teilchen am Schauerende), z.B.: $\pi \to \mu\nu_\mu$

Hadronisches Schauermodell



Hadronisches Schauerprofil

- Schauerprofil wird durch die hadronische Wechselwirkungslänge λ_{had} bestimmt.

  λ_{had} ist definiert über die Abschwächungslänge aufgrund von inelastischen hadronischen Wechselwirkungen:

  Schwächung eines Hadronstrahls: $I(x) = I_0 \; e^{-x/\lambda_{had}}$

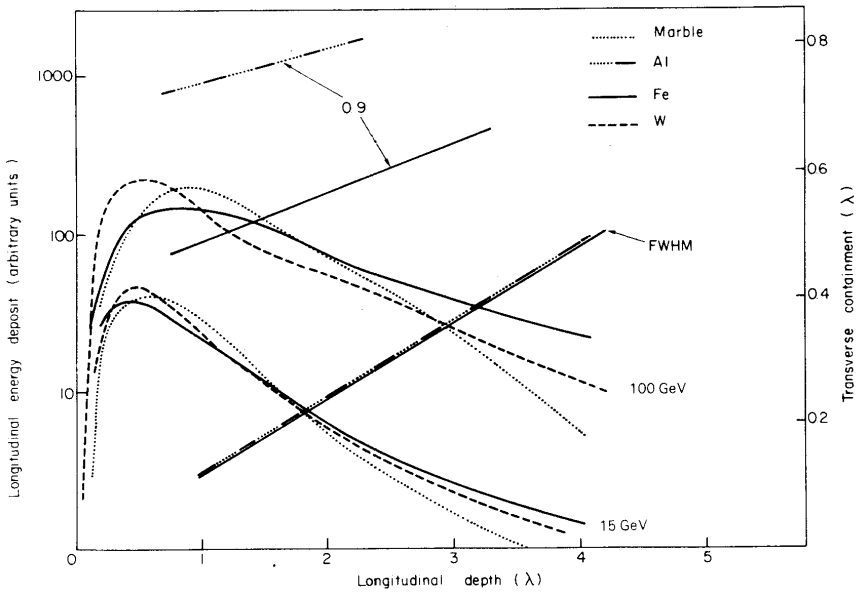
  Zusammenhang mit dem inelastischen Wirkungsquerschnitt σ_i: $\frac{1}{\lambda_{had}} = \sigma_i \frac{N_L \rho}{A}$

  Näherungsformel: $\lambda_{had} \approx 35 \; A^{1/3}$ (cm)

- Schauergrößen: experimentelle Daten sind konsistent mit der folgenden Parametrisierung:

maximum	$t_{max} = x_{max}/\lambda_{had} \approx 0.2 \cdot lnE_0 + 0.7$
lateral:	95% der Energie enthalten in $R \approx \lambda_{had}$
longitudinal:	95% der Energie enthalten in $t_{95} = x_{95}/\lambda_{had} \approx 0.6 \cdot lnE_0 - 0.2 + 4 \cdot E^{0.15}$ (E in GeV)

hadronische Schauerentwicklungen in unterschiedlichen Materialien



skaliert mit λ; zentraler Schaueranteil ist unabhängig vom Absorbermaterial;
gemessen vom Ursprung des Schauers

4.4. Aufbau und Auslese von Kalorimetern

Prinzipiell unterscheidet man zwischen sog. homogenen Kalorimetern und Sampling-Kalorimetern

homogene Kalorimeter: Absorbermaterial = aktives (sensitives) Medium

Beispiele:

- NaJ oder andere Kristalle (Szintillationslicht)
- Bleiglas (Cherenkovlicht)
- Flüssig-Argon oder Flüssig-Krypton Kalorimeter (Ionisationsladung)

Sampling-Kalorimeter: Absorption und hadr. Wechselwirkungen finden hauptsächlich in eingebrachten Materialien mit hohem Z statt (passives Medium, Absorber)

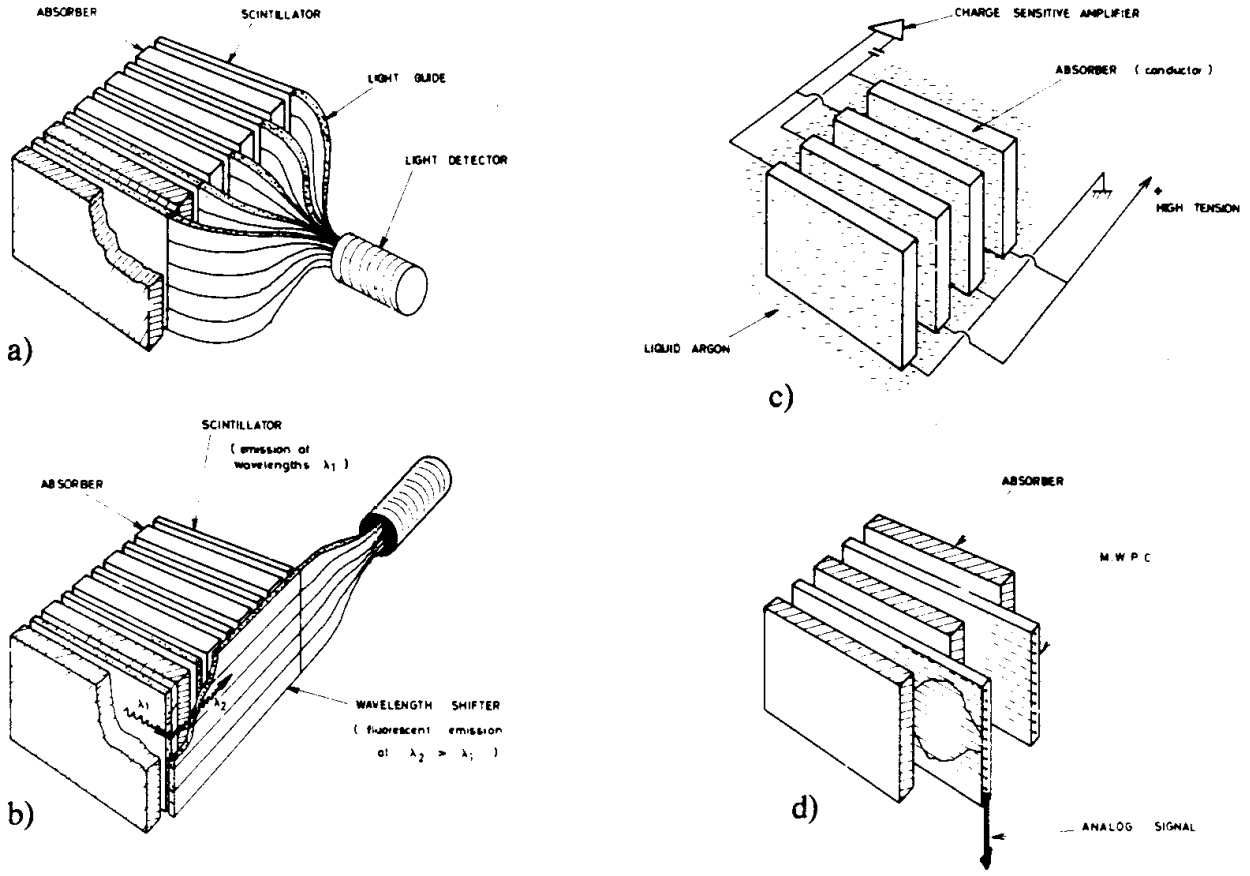
Signal wird im sog. aktiven Medium erzeugt; nur ein Teil der Energie trägt zum meßbaren Signal bei.

Stichproben (samples) werden benutzt.

Beispiele:

Kalorimeter	Absorber-material	Aktives Material
el.magn.	Blei	Szintillator
	Blei	Vieldrahtprop.kammern
	Blei	Flüssig-Argon
	Blei	Flüssig-Krypton
had	Eisen	Szintillator
	Uran	Szintillator
	Eisen	Vieldrahtprop.kammern
	Eisen	Flüssig Argon
	Kupfer	Flüssig Argon
	Uran	Flüssig Argon

Beispiele für Aufbau und Auslese von Sampling-Kalorimetern



a) Szintillatoren, optisch an Photomultiplier gekoppelt
b) Szintillatoren, Wellenlängenschieber-Auslese
c) Ionisationsladung in Flüssigkeiten
d) Ionisationsladung in Vieldrahtproportionalkammern

Homogene Kalorimeter

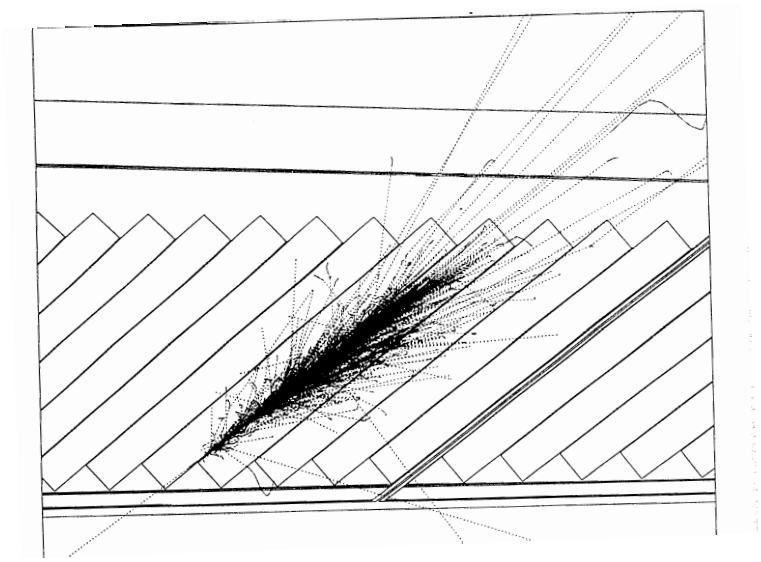
1. Kristallkalorimeter

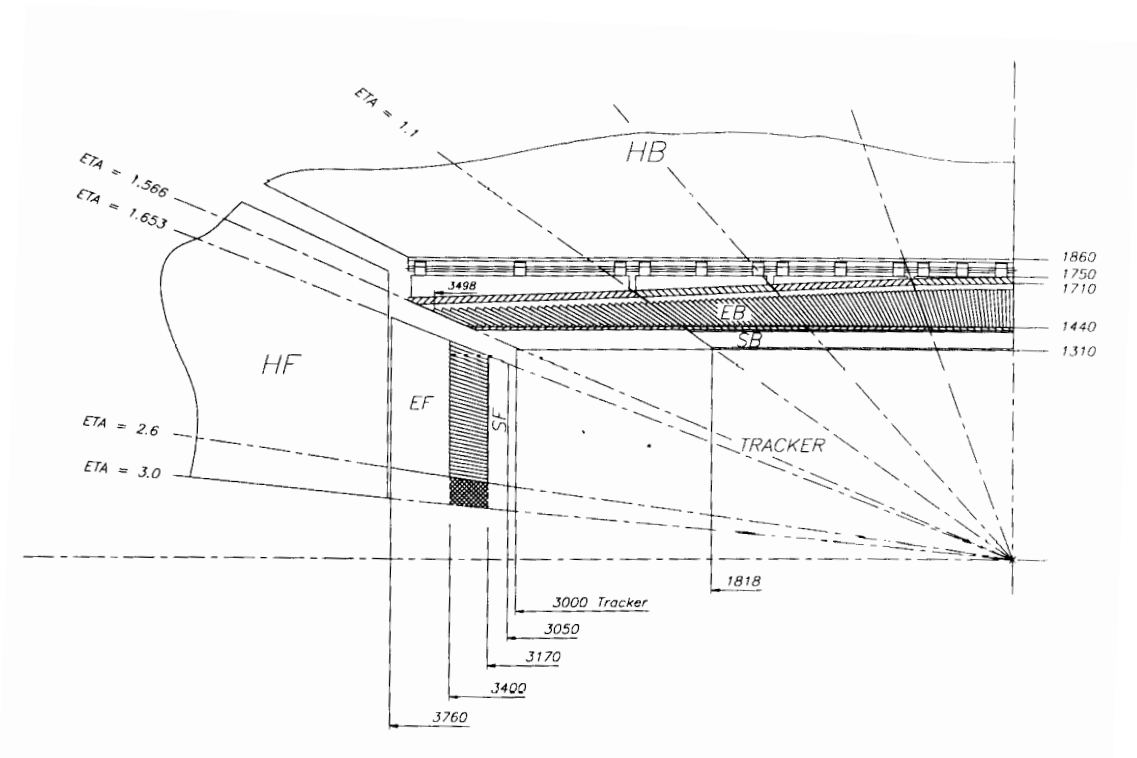
- $NaI\ (Tl)$ (bereits vielfach in der Kernphysik verwendet)
- $CsI\ (Tl)$ (BaBar und Belle Experimente)
- $Bi_4Ge_3O_{16}$ (sog. BGO) (L3 Experiment)
- $PbWO_4$ (CMS Experiment)

Nachweis von Licht, das durch Szintillation erzeugt wird.

Aufbau eines Kristallkalorimeters:

Beispiel CMS





Eigenschaften der wichtigsten benutzten Kristalle

Table 2: Properties of crystals used of proposed for certain crystal detectors. X_0 is the radiation length, ρ the density, τ the principal decay time constant, λ the principal emission peak wavelength, *n* the index of refraction, and *LY* the light yield as a percentage of NaI(Tl).

	NaI(Tl)	BaF_2	CsI(Tl)	CeF_3	BGO $Bi_4Ge_3O_{12}$	$PbWO_4$	
X_0	2.59	2.03	1.86	1.66	1.12	0.92	cm
ρ	3.67	4.89	4.53	6.16	7.13	8.2	g/cm^3
τ	230	0.6/620	1050	30	340	~10	ns
λ	415	230/310	550	380	480	~500	nm
n	1.85	1.56	1.80	1.68	2.15	~2.3	
LY	100%	5%/16%	85%	5%	10%	0.2% [23 cm]	%NaI

- (+) hohe Dichte, kurze Strahlungslänge ⇒ kompakte Kalorimeter
- (-) longitudinale Segmentierung ist schwierig
- (+) Abfallzeiten des Lichtpulses in Bereich von 10 bis 1000 ns (d.h.: je nach Wahl der Kristalle ist eine schnelle Kalorimeterantwort möglich)
- (+) große Lichtausbeute ⇒ gute Energieauflösung (Lichtausbeute variiert jedoch stark zwischen verschiedenen Kristalltypen)
- (-) Lichtausbeute ist temperaturabhängig; $PbW0_4$ und BGO zeigen bei Zimmertemperatur einen Gradienten von -1.5% pro Grad ⇒ präzise Kalibration und Überwachung notwendig
- (-) Kristalle sind strahlungsempfindlich

Auslese mit Hilfe von $p-i-n$ Photodioden oder Avalanche-Photodioden

Avalanche-Photodioden werden zur zusätzlichen Verstärkung bei geringer Lichtausbeute (z.B. $PbW0_4$ eingesetzt).

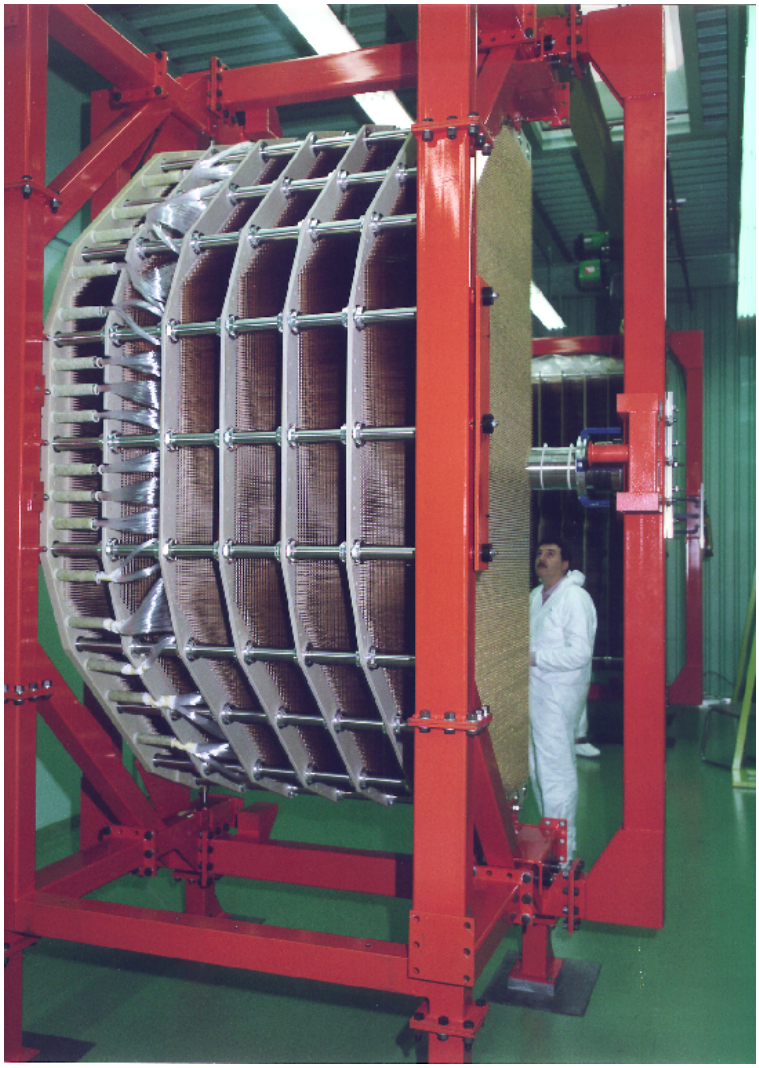
2. Flüssig-Edelgas Kalorimeter

Große Mengen von flüssigem Argon, Krypton oder Xenon werden als Absorber und aktives Medium benutzt.
(Totalabsorption des Schauers in der Flüssigkeit)

Auslese-Elektrodenstruktur wird in die Flüssigkeit eingebracht
(relativ wenig Material)

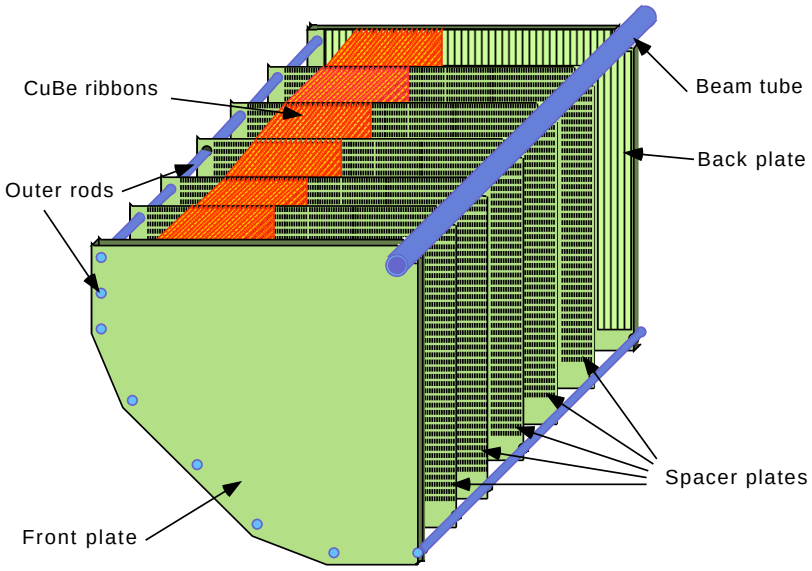
$\Rightarrow$ Nachweis der Ionisationsladung

Beispiel: NA48 Kollaboration, Flüssig-Krypton Kalorimeter
(9 m^3 fl. Krypton)

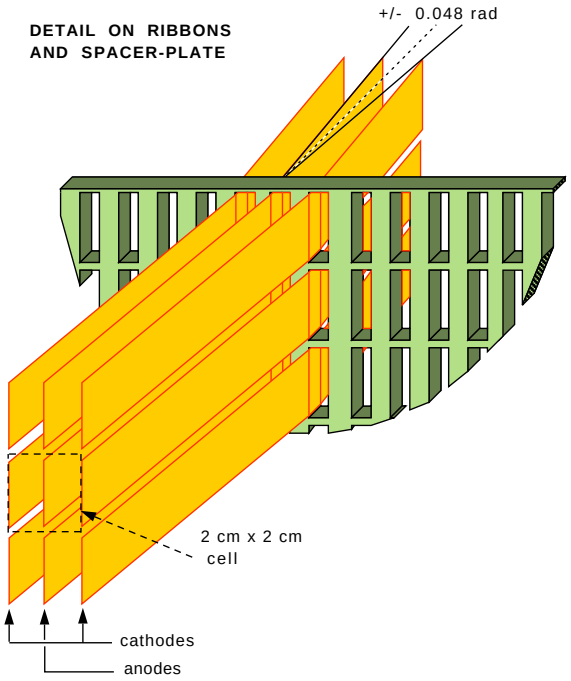


Auslesestruktur

LKr CALORIMETER ELECTRODE STRUCTURE



DETAIL ON RIBBONS AND SPACER-PLATE



Auslese von Samplingkalorimetern

Wahl der Auslesetechnik hängt von vielen Faktoren ab:

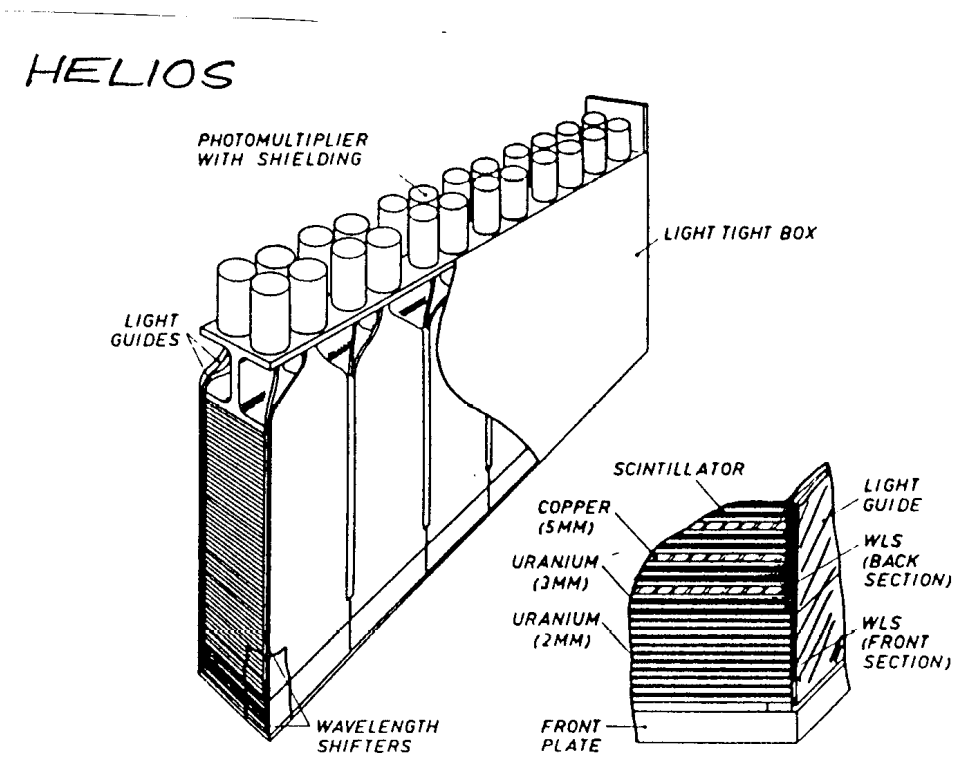
- Energieauflösung
- Granularität
- Hermetizität
- Strahlungshärte

Plastik-Szintillatoren sind in verschiedenen HEP-Experimenten benutzt worden (UA2, CDF, ZEUS, ...)

Lichtauslese geschieht entweder direkt durch Kopplung an Photomultiplier (Typ a) oder durch Kopplung mit Hilfe von Wellenlängenschiebern (WLS) (Typ b, Standard-Technik)

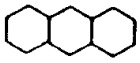
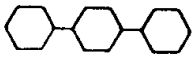
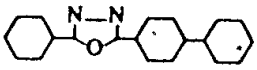
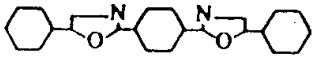
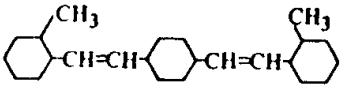
Nachteil der direkten PM Kopplung: toter Raum

typisches Beispiel eines Kalorimetermoduls mit WLS-Auslese:



Eigenschaften von Plastik Szintillatoren und WLS-Materialien:

Table 15. *Organic fluorescent materials and wavelength shifters*

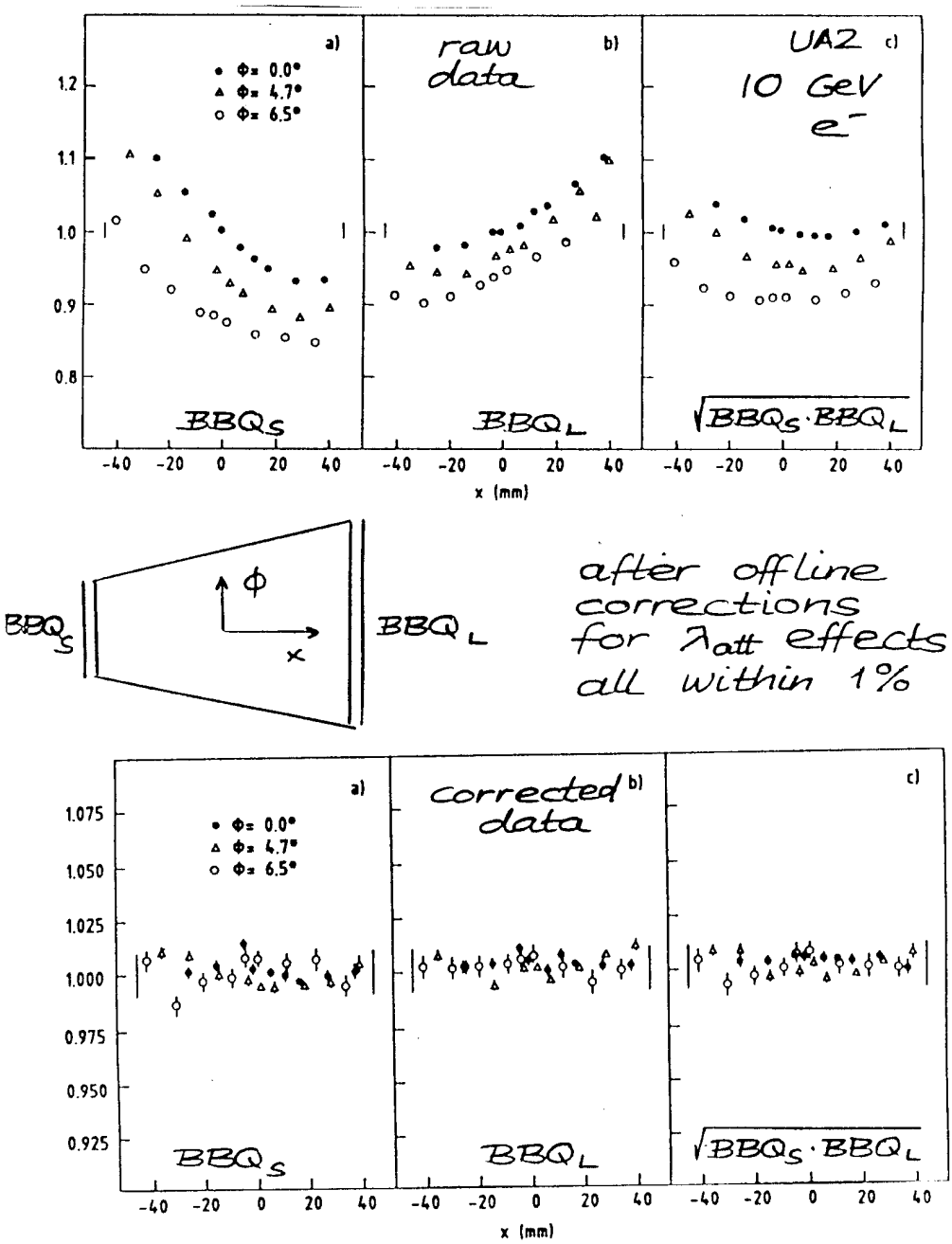
Structure		λ_{max} emission (nm)	Decay time (ns)	Yield/ yield (NaI)
Primary fluorescent material				
Naphthalene		348	96	0.12
Anthracene		440	30	0.5
p-Terphenyl		440	5	0.25
PBD		360	1.2	
Wavelength shifter				
POPOP		420	1.6	
bis-MSB		420	1.2	

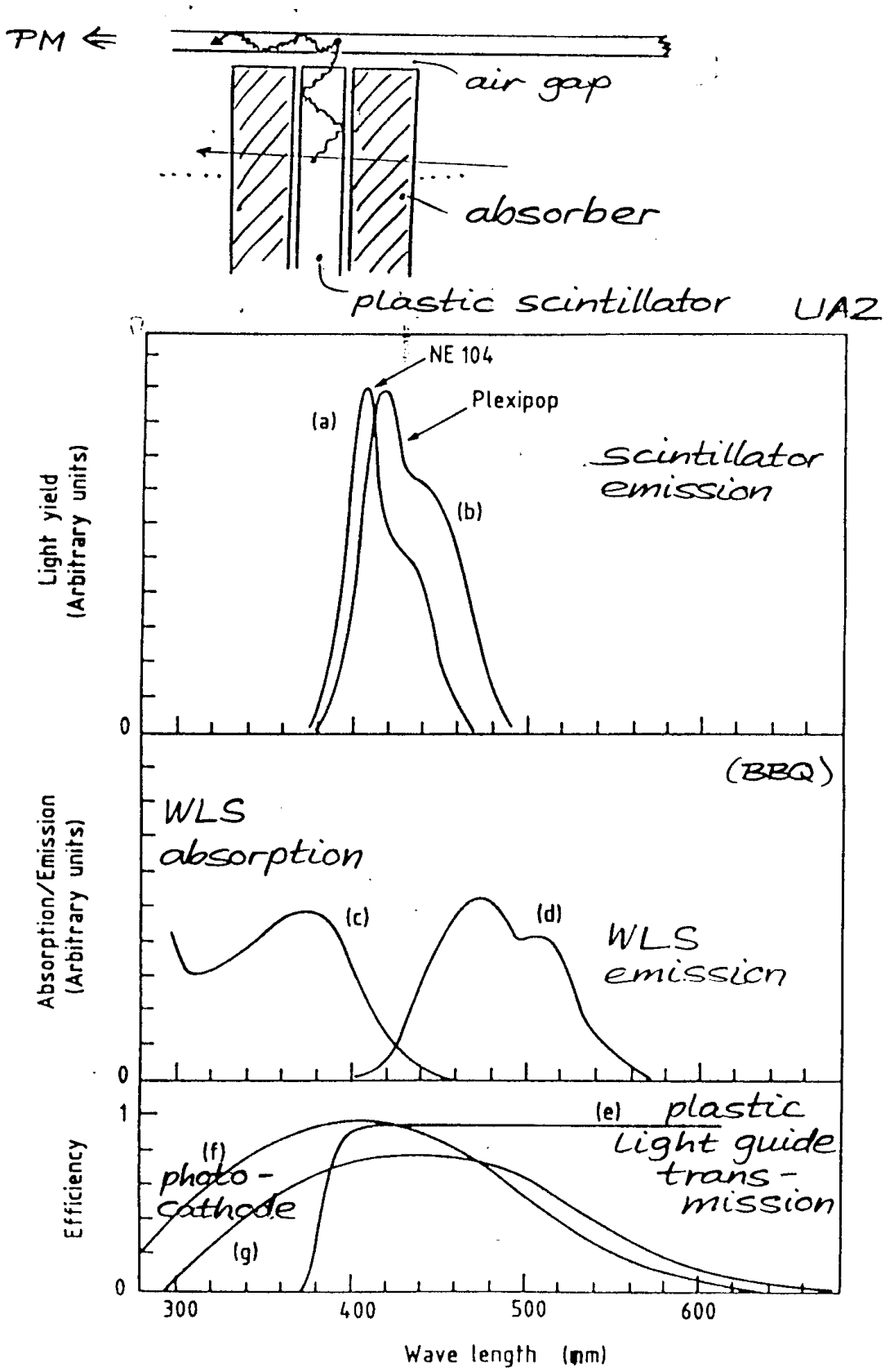
Problem: Lichttransport über längere Strecken

$\Rightarrow$ Lichtabschwächung (Abschwächungslänge λ_{att})

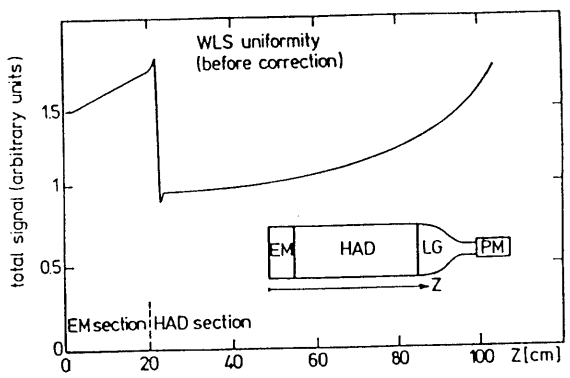
Ungleichförmige Energieantwort innerhalb einer Kalorimeterzelle

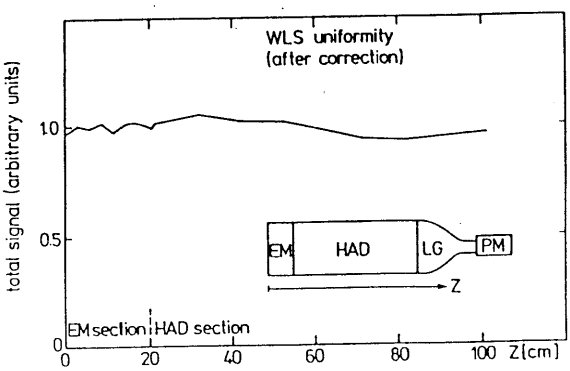
Beispiel: UA2-Kalorimeter




PM
air gap
absorber
plastic scintillator
UA2
NE 104
Plexipop
(a)
(b)
scintillator emission
Light yield (Arbitrary units)
0
(BBQ)
WLS absorption
(c)
(d)
WLS emission
Absorption/Emission (Arbitrary units)
0
1
(e) plastic light guide trans-mission
(f) photo-cathode
(g)
Efficiency
0
300
400
500
600
Wave length (nm)

ZEUS Prototyp Studien:



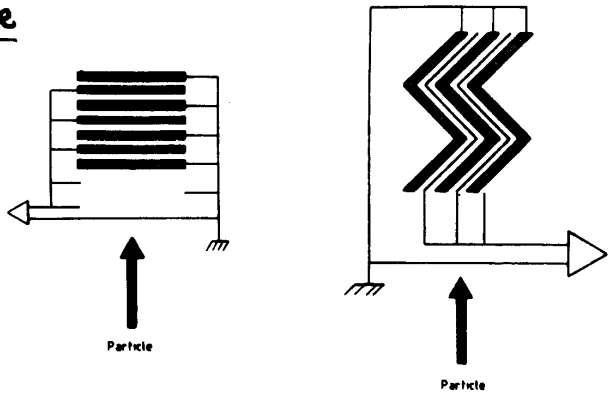


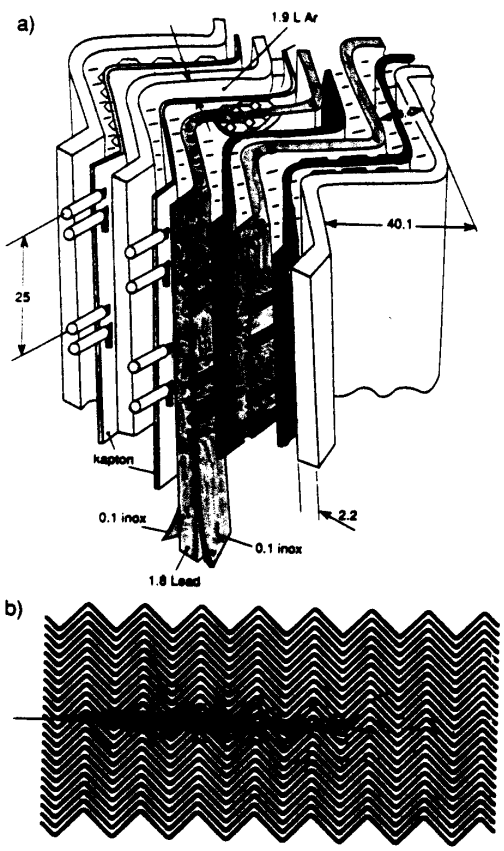
- Diese Nicht-Linearitäten beeinflußen die Auflösung der Kalorimeter
- Minimierung der Effekte wird angestrebt;
  Beispiel ZEUS:
  - benutze Materialien mit möglichst großer Abschwächungslänge.
  - Masken zur Lichtabsorption

Neuartige Kalorimeterkonzepte

① 'Akkordeon' Geometrie

(Orsay)
RD 3 Kollaboration





Vorteile:

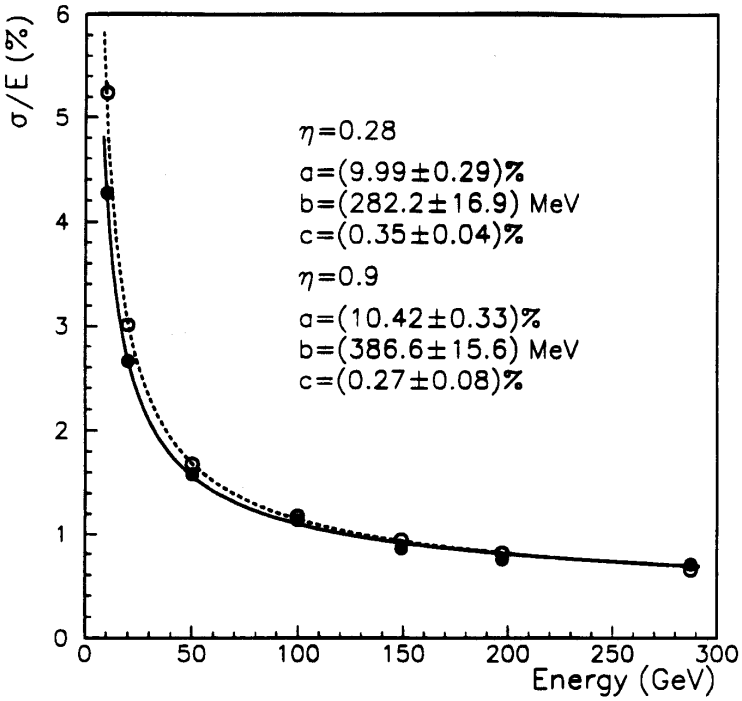
- keine 'toten' Zonen
- Elektronik ist direkt gekoppelt an die Auslese elektrode

  ⟹ keine langen Kabelverbindungen (keine zusätzl. Kapazitäten, Induktivitäten)

  ⟹ geringeres Rauschen
  schnellere elekt. Auslese
  $\tau = \tau(C_D, PA, \cancel{Kabel})$
  keine Laufzeitunterschiede

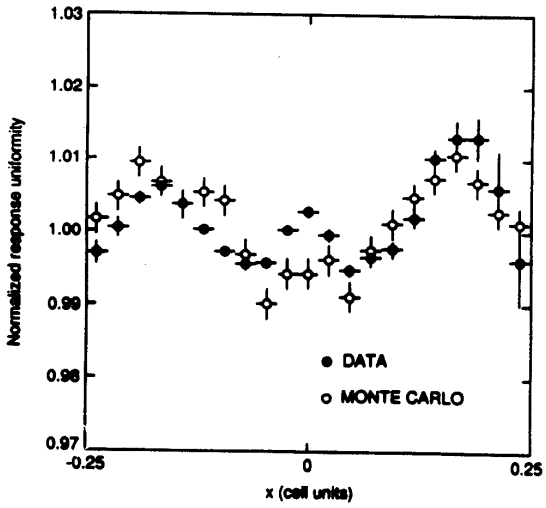
Ergebnisse von Teststrahlmessungen

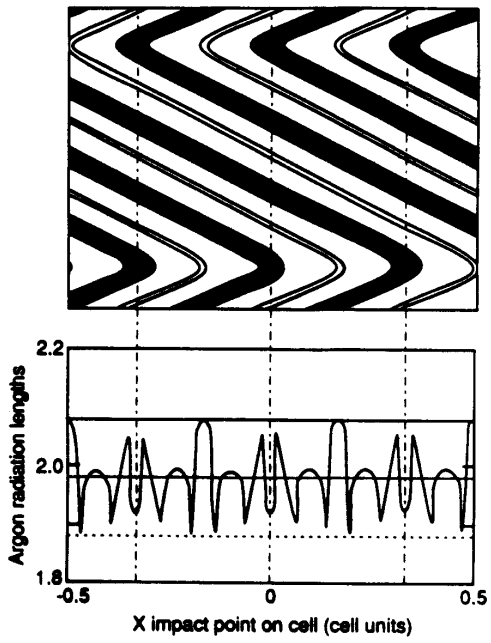
'Akkordeon'



Energieauflösung

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus c \oplus \frac{b}{E}$$





Hadronisches Eisen-Szintillator Kalorimeter

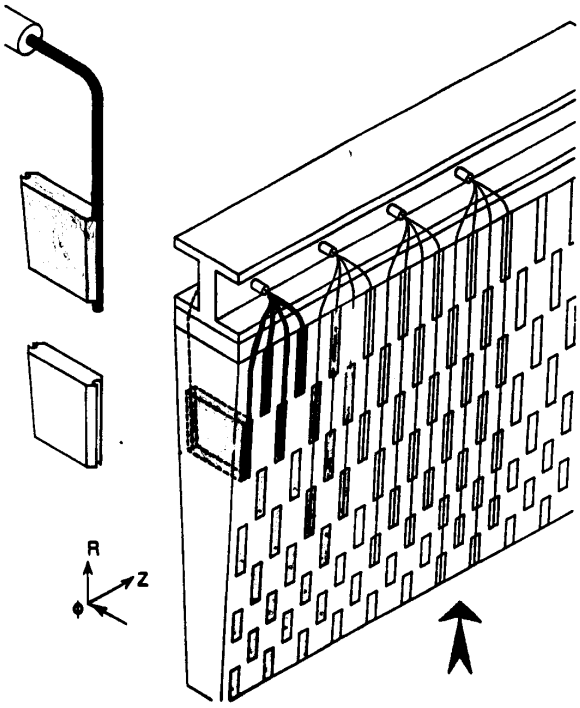
Eisen Absorber

WLS Fiber Auslese

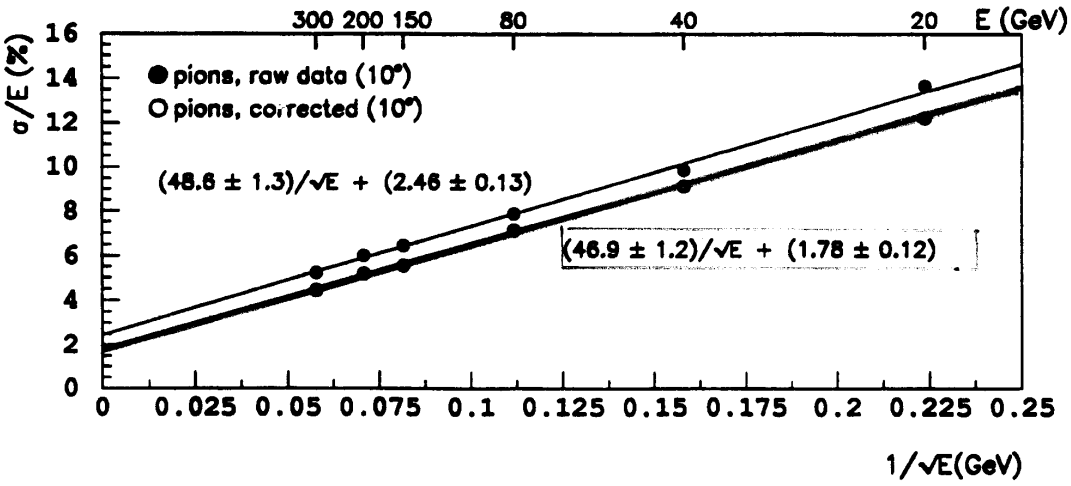
→ Photomultiplier

Dicke: 7.5 λ_{abs} (η=0.)

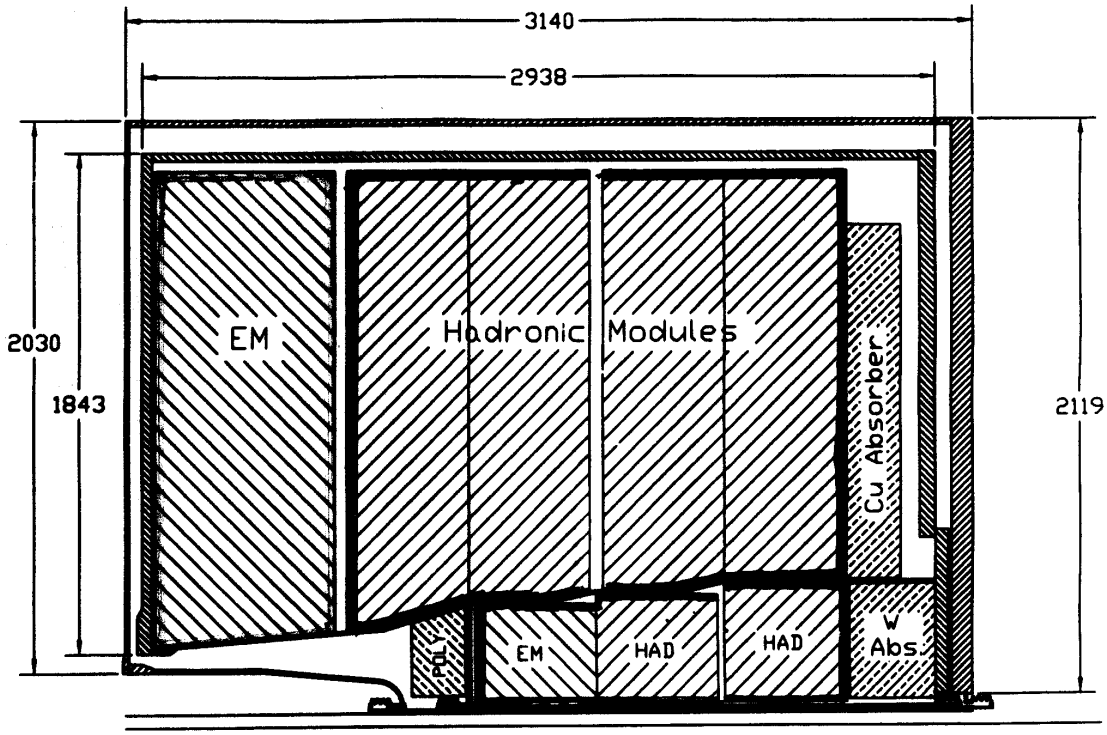
3 long. Segmente



Auflösung (Pionen, Teststrahl)



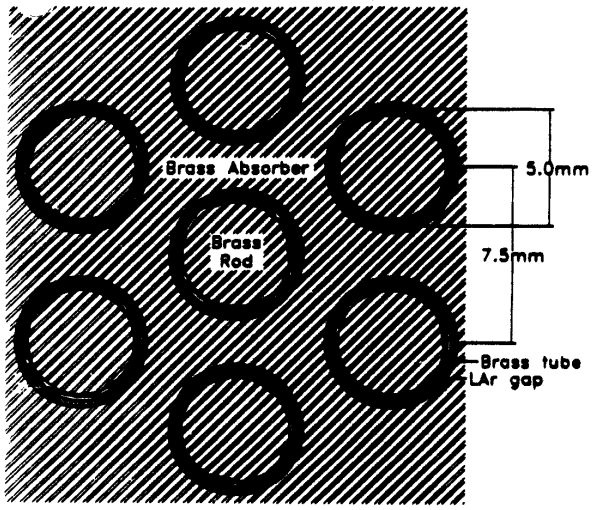
Liquid Argon Calorimeters in End-caps



had. end-caps: 25 mm Cu + 8 mm LAr

13 $\lambda_{abs.}$, 4 long. samplings

$\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$



Forward Calorimeters:

- withstand extreme particle and energy flux
- new electrode structure: metallic tube and rod
- LAr gap: 250 μm

Vergleich verschiedener Auslesetechniken von Sampling-Kalorimetern

(Kommentare notwendig !!!)

	Szintillator	Flüssig-Ar/Kr	Gas (MWPC)
Sampling Anteil	1-10%	1-10%	10^{-4}
Hermetizität	0	+	+
Granularität	-	+	+
Uniformität des Signals	0	+	0
Stabilität	-	+	0
Signal / Rauschen	+	-	-
Strahlungshärte	-	+	+
Schnelligkeit	+	-	-

4.5. Energieauflösung

Effekte, die zur Energieauflösung in Kalorimetern beitragen:

1. Intrinsische Auflösung, Schauerfluktuationen

   Meßbares Signal hängt ab von der totalen Spurlänge geladener Teilchen im aktiven Medium

   Beispiel: Flüssig-Argon (homogenes Kalorimeter)

$$Q \sim < N_{part} > \cdot < T_0 >$$

   wobei:
   N_{part} = Zahl der im Mittel im Schauer produzierten geladenen Teilchen (Elektronen für el.magn. Schauer)
   T_0 = mittlere Spurlänge (Reichweite) der Teilchen im aktiven Medium

   intrinsische Fluktuationen ⇒ Intrinsische Auflösung

   - Zahl der im Schauer produzierten Elektronen
   - Energiespektrum der Elektronen ⇒ dE/dx Beiträge

   Für die intrinsische Auflösung gilt:

$$\frac{\Delta E}{E} \sim \frac{\Delta N}{N} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$$

   Statistischer Term: $\boxed{\frac{\Delta E}{E}|_{stat} = \frac{\alpha}{\sqrt{E}}}$

   Falls es eine Produktions- oder Nachweisschwelle gibt (z.B. für Cherenkovlicht in Bleiglas, (Cherenkovschwelle für Elektronen liegt bei 0.7 MeV) reduziert sich die meßbare Spurlänge

2. Longitudinale und laterale Leckverluste

- Die Energieauflösung verschlechtert sich, wenn der Schauer nicht komplett im Kalorimeter absorbiert wird.

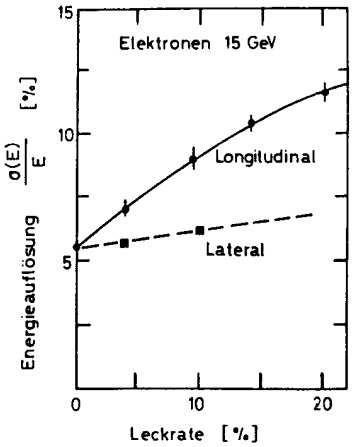
- Schauerfluktuationen in long. Richtung sind größer als Fluktuationen in lateraler Richtung.

transversal: Vielfachstreuung (große Zahl von Streuungen)

longitudinal: hängt z.B. von der Tiefe ab in der die erste WW stattfindet (wichtig bei hadronischen Kalorimetern !!!)

$\Rightarrow$ beeinflußt vor allem die Energieauflösung bei hohen Energien

$\Rightarrow$ Beitrag zu einem konstanter Term in der Energieauflösung



3. Sampling Fluktuationen (sampling calorimetern)

Zusätzliche Fluktuationen wegen der *stichprobenartigen* Sammlung des Signals in den aktiven Lagen

Energieverlust in Absorbern und Detektorlagen variiert von Ereignis zu Ereignis.

- Sampling Fluktuationen $\sim \sqrt{t_{abs}}$

- Sampling Fluktuationen $\sim 1/\sqrt{t_{akt}}$

wobei: t_{abs}, t_{akt} = Dicke der Absorber bzw. aktiven Lagen
(in Einheiten der Strahlungslänge für el.magn. Schauer)

4. e/h Verhältnis (hadronische Energieauflösung)

   Kalorimeter liefern i.allg. unterschiedliche Signale für die gleiche Energiedeposition von Elektronen und Hadronen (s.unten)

5. Instrumentelle Effekte, Auslese
   Szintillatoren: Lichtsammlung und Effizienz der Photokathode
   i.allg.: ~ 1000 Photo-Elektronen pro GeV

   $\Rightarrow$ Beitrag der Photostatistik zum stat. Term: $3\%/\sqrt{E}$

   Prop.Kammern: Weglängenfluktuationen in den Kammern, stark sensitiv auf Austrittswinkel aus Absorbermaterial

   totaler Fehler (el.magn.): $\sigma_{tot} = \sigma_{intr}^2 + \sigma_{samp}^2 + \sigma_{det}^2$

6. Sonstiges

   - Imperfekte Kalibration der Kalorimeter (bzw. Auslesekette), (Abgleich der Verstärkung der verschiedenen Kanäle (PM Verstärkung, Lichtabsorption, el. Kalibration bei Fl.-Argon)

   - Mechanische Toleranzen (Variationen in der Dicke der Absorberplatten bzw. Ausleses-platten)

   - Temperatur der Kristalle, Luftfeuchtigkeit, etc....

Auflösung von Kalorimetern kann beschrieben werden durch:

$$\boxed{\frac{\Delta E}{E} = \frac{\alpha}{\sqrt{E}} \oplus \beta \oplus \frac{\gamma}{E}}$$

α statistischer Term
β konstanter Term
γ Rausch-Term

Beispiele für erreichte el. magn. Energieauflösungen bei großen Detektorsystemen:

Experiment	Kalorimeter	α	β	γ
L3	BGO	$< 2.0\%$	0.3 %	
BaBar (*)	CsI (Tl)	(*)1.3%	2.1 %	0.4 MeV
OPAL	Bleiglas	(**) 5% (++) 3%		
NA48	Flüssig Krypton	3.2%	0.5%	125 MeV
UA2	Pb/Szintillator	15%	1.0%	-
ALEPH	Pb/Prop.kammern	18%	0.9%	-
ZEUS	U/Szintillator	18%	1.0%	-
H1	Pb/Flüssig - Argon	11.0%	0.6%	154 MeV
D0	U/Flüssig - Argon	15.7%	0.3%	140 MeV

(*) Skalierung entsprechend $E^{-1/4}$ anstatt $E^{-1/2}$
vorläufiger Wert, Daten vom Jahr 2000
(**) at 10 GeV
(++) at 45 GeV

hadronische Energieauflösungen:

Experiment	Kalorimeter	α	β	γ
ALEPH	Fe/Streamer Rohre	85%		-
ZEUS (*)	U/Szintillator	35%	2.0%	-
H1 (+)	Fe/Flüssig - Argon	51%	1.6%	900 MeV
D0	U/Flüssig - Argon	41%	3.2%	1380 MeV

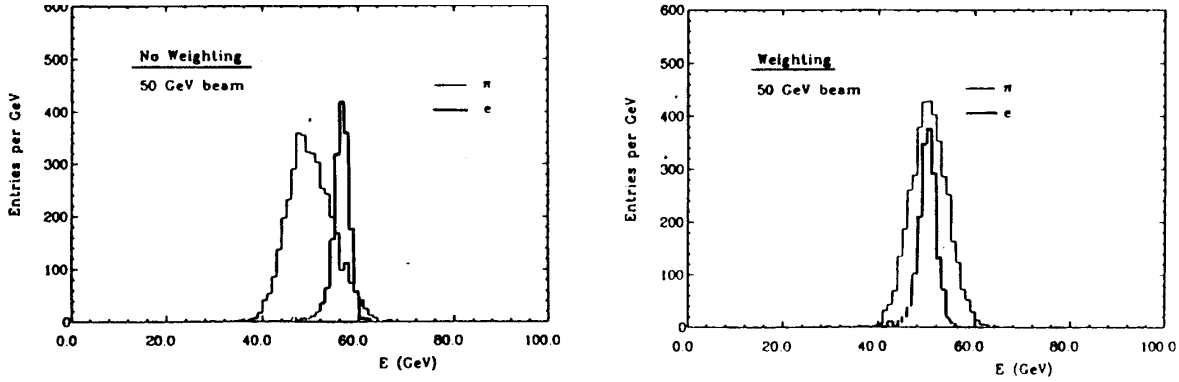
(*) compensating calorimeter
(+) weighting technique

4.5. e/h Verhältnis

- Für die gleiche Primärenergie E_0 des einlaufenden Teilchens liefern el.magn. wechselwirkende und hadronisch wechselwirkende Teilchen i.allg. unterschiedliche sichtbare Energien im Kalorimeter.

  Das Verhältnis der Energieantwort wird als e/h Verhältnis bezeichnet.

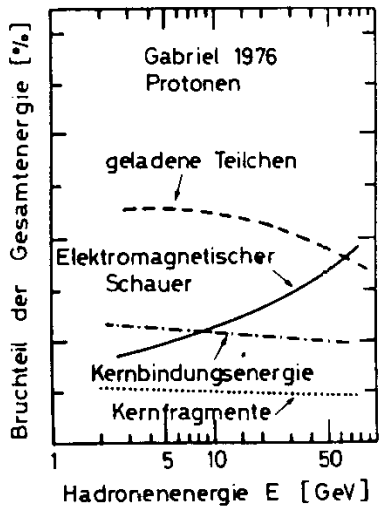
  Beispiel: H1 Pb/Flüssig-Argon Kalorimeter



- Wichtigste Grund: Verluste in hadronischen Schauern;
  je nach Kalorimetertyp tragen 20-30 % der deponierten Energie nicht zum meßbaren Signal bei.
  (Kernbindungsenergie, Neutronen, Neutrinos, Myonen,....)

- $e/h \neq 1$ verschlechtert die Energieauflösung der Kalorimeter, z.B. durch Fluktuationen der el.magn. und hadronischen Schaueranteile.

- $e/h \neq 1$ führt zu Nichtlinearitäten in der Energieantwort, z.B. durch den ansteigenden el.magn. Anteil im Schauer.



Kann e/h = 1 erreicht werden ?

Energiebilanz für ein Hadron: $E_0 = E_{em} + E_{had} + E_{loss}$
normiert auf E_0: $1 = f_{em} + f_{had} + f_{loss}$

Beiträge zum meßbares hadronischen Signal:

- Ionisation
- γ-Komponente
  (enthält insbesondere weiche Photonen ($E \sim 2$ MeV) aus nuklearen Prozessen
- weiche Neutronen

d.h.: $f_{had} = f_{ion} + f_n + f_\gamma \Rightarrow$ (normiert auf Signal eines minimal ionisierenden Teilchens)

$$\frac{e}{h} = \frac{\frac{e}{mip}}{f_{ion}\left(\frac{ion}{mip}\right) + f_n\left(\frac{n}{mip}\right) + f_\gamma\left(\frac{\gamma}{mip}\right)}$$

Gamma - Komponente:

γ's aus nuklearen Prozessen (γ-Zerfall, Spaltung, n-Einfang) (MeV Energiebereich)

γs werden hauptsächlich im Absorbermaterial (hohes Z) absorbiert
$\left(\frac{\gamma}{mip}\right) \approx 0.3 \qquad << 1$

Ionisations-Komponente:

$\left(\frac{ion}{mip}\right) \approx 1.0$
(Mit Ausnahme der niederenergetischen Protonen; hier kürzere Reichweite, jedoch höhere Ionisation, Sättigungseffekte)

Neutronen-Komponente:

Beitrag hängt sehr stark vom aktiven Medium ab;
wasserstoffreich $\Rightarrow$ Rückstoßproton (Stoßpartner mit gleicher Masse, $\Rightarrow$ maximaler Energieübertrag) $\Rightarrow$ Ionisation

LArg:	$(n/mip) \approx 0$ (keine Protonen)
Szintillatoren (wasserstoffhaltig)	$0.5 < (n/mip) < 2$

Kompensation kann erreicht werden durch:

1. Dämpfung der el.magn. Energie-Antwort
   - Absorber mit hohem Z
   - aktives Medium mit kleinem Z
     ($\Rightarrow$ verringerte γ-Absorption durch Photoeffekt im aktiven Material)

2. Erhöhung der hadronischen Energie-Antwort
   - Verwendung von spaltbarem Absorbermaterial, z.B. Uran
     $\Rightarrow$ Anstieg der n und γ-Antwort.
   - Verwendung von wasserstoffreichem Absorbermaterial, z.B. Szintillator
     $\Rightarrow$ Anstieg der n-Antwort

3. Identifikation el.magn. Schauerkomponenten im hadronischen Schauer
   Gewichtsmethode, offline Korrektur

Gegen Ende der 80er Jahre gab es umfangreiche experimentelle Studien (CERN, DESY (ZEUS-Kollaboration))

Kompensation konnte erreicht werden durch:

- Uran - Kalorimeter
- Blei-Szintillator Kalorimeter, bei geeigneter Wahl des Verhältnisses von Absorberdicke zur Dicke des aktiven Mediums.

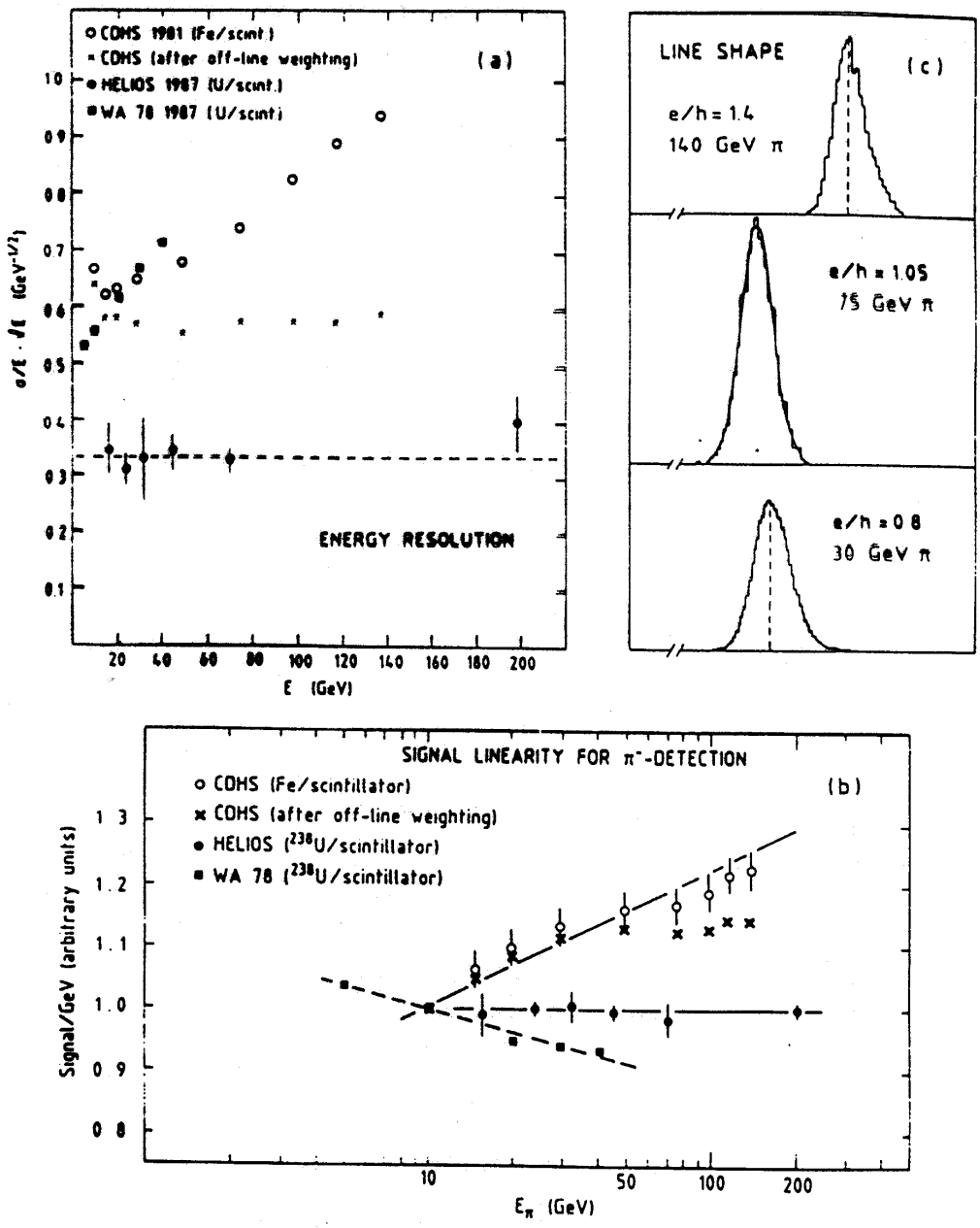
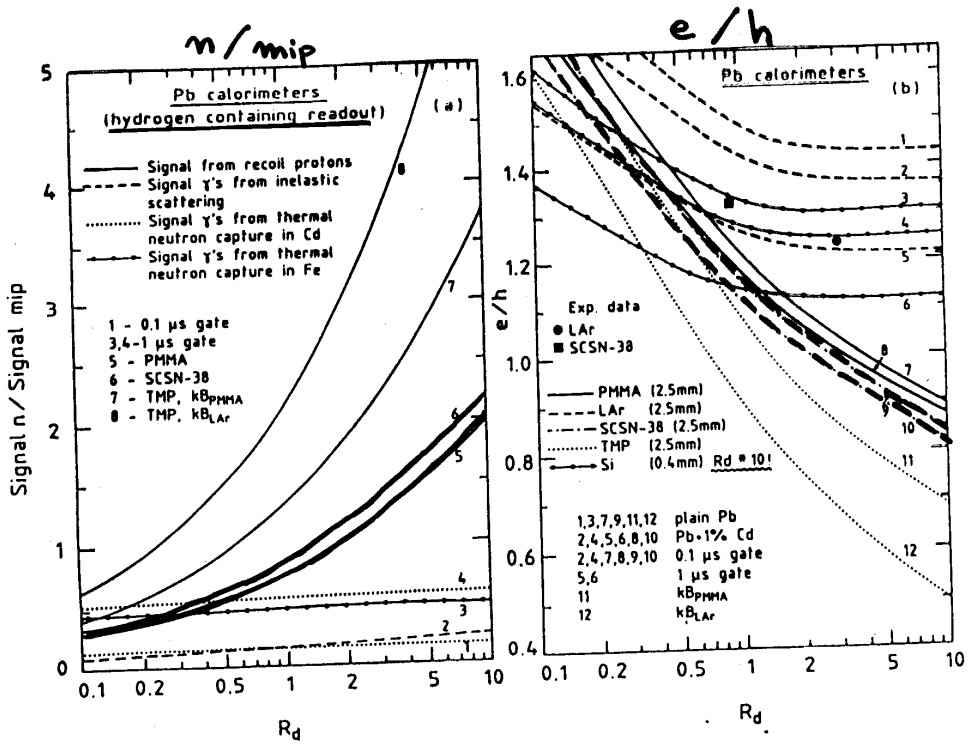

COHS 1981 (Fe/scint.)
COHS (after off-line weighting)
HELIOS 1987 (U/scint.)
WA 78 1987 (U/scint.)
(a)
ENERGY RESOLUTION
E (GeV)
LINE SHAPE
(c)
e/h = 1.4
140 GeV π
e/h = 1.05
75 GeV π
e/h = 0.8
30 GeV π
SIGNAL LINEARITY FOR π⁻-DETECTION
COHS (Fe/scintillator)
COHS (after off-line weighting)
HELIOS (238U/scintillator)
WA 78 (238U/scintillator)
(b)
Signal/GeV (arbitrary units)
Eπ (GeV)

Fig. 5

Blei-Kalorimeter



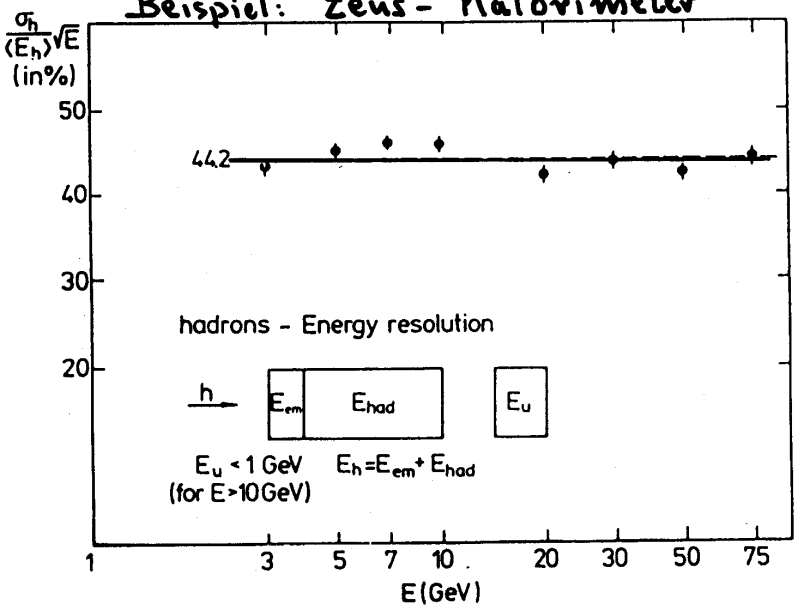
LAr

-- Szintillator

Figure 2.9: *(a) The normalized neutron sampling fraction n/mip as a function of the ratio R_d of the thicknesses of the passive and active layers, in lead calorimeter. The solid lines give the contribution from recoil protons for calorimeters using plastic scintillator (5, 6) and warm liquids (7, 8). The other lines give the other contributions for SCSN-38. (b) The e/h ratio as a function of R_d for lead calorimeters with various readout materials. Lines are the results of simulations; points are experimental results [11].*

$$R_d = \frac{t_{abs.}}{t_{akt.}}$$

Beispiel: Zeus - Kalorimeter



$$\frac{e}{h} = 1.05 \pm 0.04$$

$$\left.\frac{\Delta E}{E}\right|_{had} = \frac{44\%}{\sqrt{E}}$$

Figure 2.12: *The energy resolution for hadrons vs. the beam energy in a compensating lead/scintillator sandwich calorimeter [32].*