



- 
1. Einführung
  2. Beschleuniger
  3. **Detektoren**
  4. Bewegungsgleichungen und Symmetrien
  5. Das Quark-Modell und die CKM-Matrix
  6. CP-Verletzung im Standardmodell
  7. Proton- und Photonstruktur
  8. Elektroschwache Präzisionsmessungen
  9. Das Higgs-Boson
  10. Neutrino-Massen und Neutrino-Oszillationen



## Was wollen wir messen

---

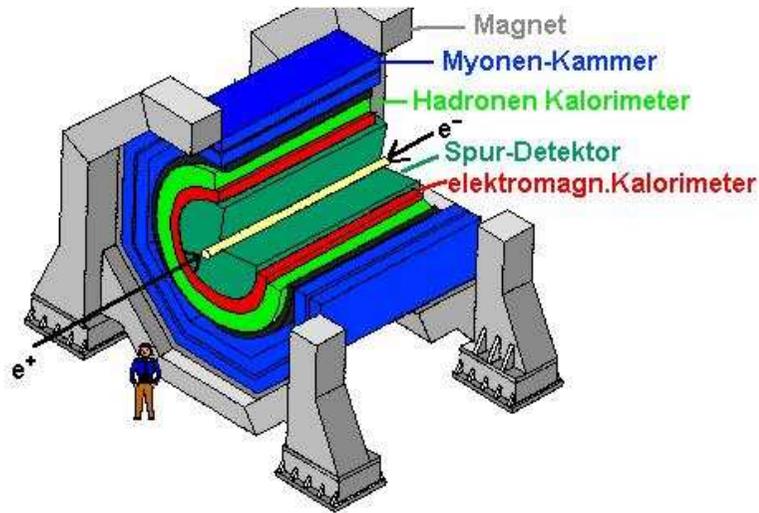
---

- In Teilchenkollisionen werden viele verschiedene, meist kurzlebige, Teilchen erzeugt.
- In den Detektoren werden die stabilen Teilchen  $e^-$ ,  $p$ ,  $\gamma$  und eine Reihe langlebiger Teilchen z.B.  $\mu^\pm$ ,  $\pi^\pm$ ,  $\pi^0$ ,  $n$ ,  $K_S$ ,  $K_L$  nachgewiesen.
- Die wichtigen Messgrößen sind  $\vec{x}$ ,  $t$ ,  $E$ ,  $\vec{p}$ ,  $\vec{v}$  und  $m$ .
- Zum Teilchennachweis sind prinzipiell alle Arten von Wechselwirkungen der Teilchen mit dem Material der Nachweiselemente geeignet. Die Wichtigste ist die elektro-magnetische Wechselwirkung, gefolgt von der starken Wechselwirkung.
- Für geladene Teilchen benutzt man hauptsächlich den Energieverlust, hervorgerufen durch **Ionisation, (dE/dx)**, und durch Photon-**Bremsstrahlung**.
- Für Photonen werden **Photoeffekt**, **Compton-Streuung** und **Paar-Erzeugung** benutzt.
- Andere neutrale Teilchen, z.B. Neutronen, übertragen erst in **Kernreaktionen** ihre Energie auf geladene Teilchen, die dann detektiert werden.
- In modernen Collider-Experimenten werden nahe am Wechselwirkungspunkt hochauflösende Halbleiterdetektoren zur Orts- und Impulsmessung verwandt, gefolgt von Kalorimetern zum Nachweis elektromagnetischer und hadronischer Energie.
- Der Teilchennachweis ist immer ein Kompromiss zwischen viel Materie zur Erreichung großer Signale, aber auch starker Beeinflussung, und wenig Materie zur exakten Vermessung der Trajektorien.

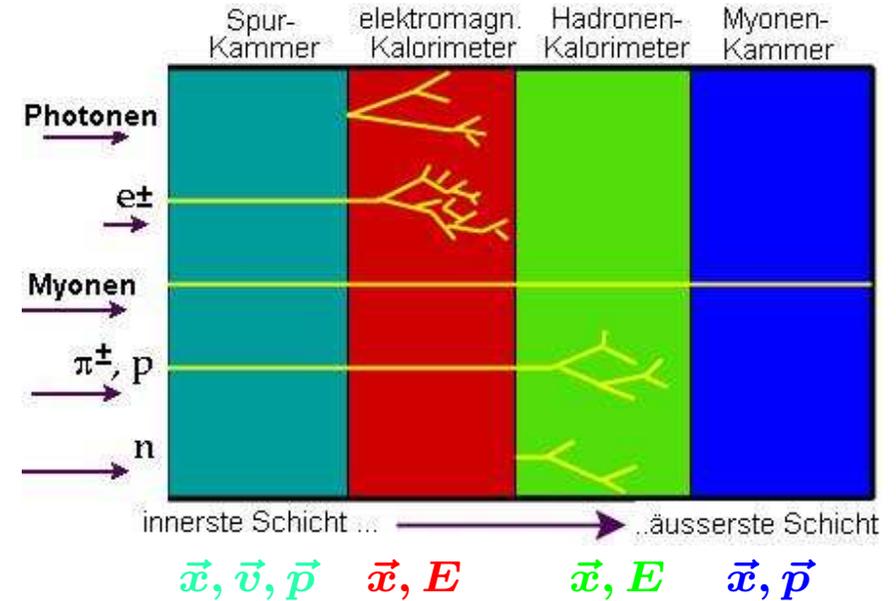


# Das Bauprinzip von Teilchen-Detektoren und ein Beispiel

Mit dem Zwiebelschalenprinzip ...



... kriegen wir euch (fast) alle



Elektromagnetisches Kalorimeter ( $e, \gamma$ )

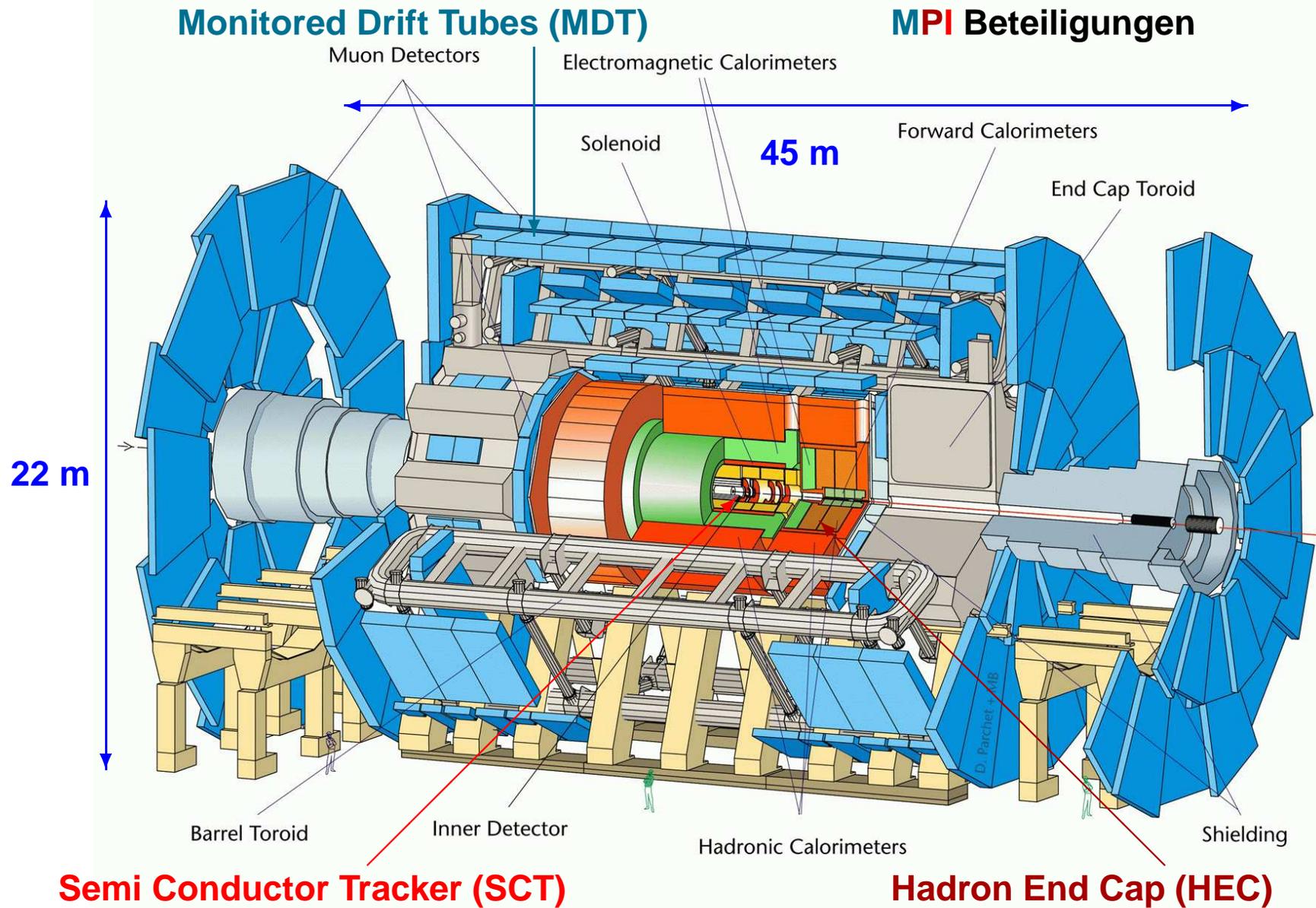
- Aufschauern im Absorber (z.B. Bleiplatten).
- Messen im sensitiven Material (z.B. Licht in einem Szintillator).
- Die Lichtmenge gibt dann Aufschluß über die Teilchenenergie.





# Der ATLAS Detektor

0712/mb-26/06/97





## Nützliche Konstanten

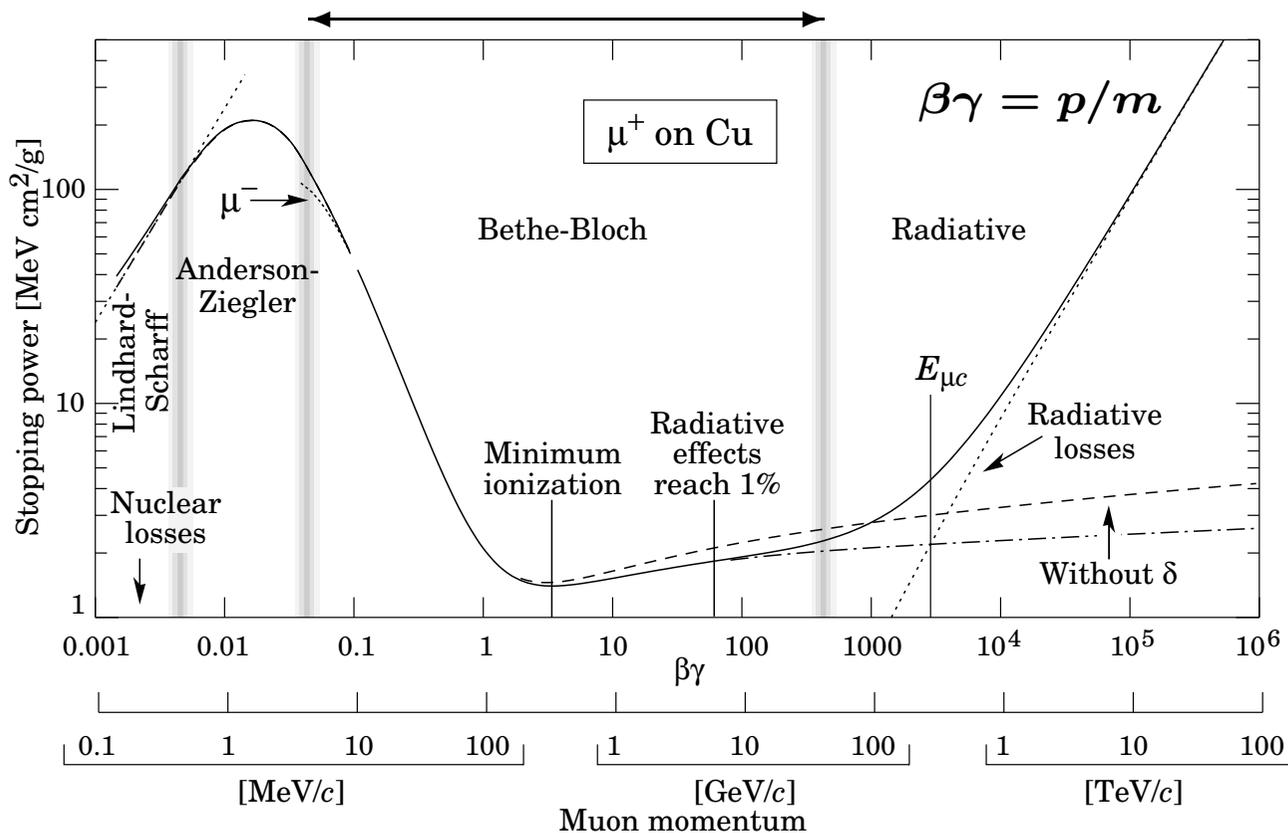
Symbol	Definition	Wert und/oder Dimension
$\alpha$	Feinstrukturkonstante	1/137.03599976(50)
$m$	Masse des einfallenden Teilchens	MeV/c <sup>2</sup>
$E$	Energie des einfallenden Teilchens	MeV
$T$	kinetische Energie des einfallenden Teilchens	MeV
$z \cdot e$	Ladung des einfallenden Teilchens	$z \cdot 1.6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
$r_e$	klassischer Elektronenradius	2.817940285(31) fm
$N_A$	Avogadro-Zahl	$6.02214199(47) \cdot 10^{-23} / \text{mol}$
$Z; A$	Atomzahl; Atomgewicht des Absorbers	–; g/mol
$K$	$4\pi N_A r_e m_e c^2$	0.307075 MeV cm <sup>2</sup>
$\delta$	Dichtekorrektur zur Ionisation	
$E_p$	Plasmaenergie	$28.816 \sqrt{\rho \langle Z/A \rangle} \text{ eV}$ , $\rho$ in g/cm <sup>3</sup>
$X_0$	Strahlungslänge	g/cm <sup>2</sup>
$\lambda$	Absorptionslänge	g/cm <sup>2</sup>
$T_{\max}$	Maximal übertragbare kinetische Energie	MeV
$I$	Mittlere Ionisationsenergie	eV
$E_c; E_{\mu c}$	Kritische Energie für Elektronen; Myonen	MeV; GeV



# Ionisationsverlust geladener Teilchen

## Die Bethe-Bloch Formel

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$



**Die wichtigste Formel zum Teilchennachweis.**

- Die Bethe Bloch Formel beschreibt die Ionisation und ist nur im mittleren Impulsbereich gültig.
- Atomare Effekte bei niedrigsten Impulsen und die Bremsstrahlung bei sehr hohen Impulsen werden separat beschrieben.
- Die Haupteigenschaften sind:
  - 1)  $\frac{Z}{A}$  Abhängigkeit, favorisiert  $H$ .
  - 2)  $1/\beta^2$  bei niedrigen Impulsen, favorisiert schwere Teilchen.
  - 3) Minimum bei  $p/m \approx 3 - 4$ ,  $\Leftrightarrow$  Minimum Ionising Particle (MIP).
  - 4) Logarithmischer Anstieg bei hohen Impulsen.
  - 5) Dichteeffekt durch Polarisierung des Absorbers.



## Berechnung des maximalen Energieübertrags

– Streuung: 
$$\begin{pmatrix} E \\ \vec{p} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m_e \\ \vec{0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E' \\ \vec{p}' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_e \\ \vec{p}_e \end{pmatrix}$$

– Impulserhaltung:  $p'^2 = p^2 + p_e^2 - 2pp_e c_s$ , mit  $c_s \equiv \cos \theta_{p,p_e}$

– Energieerhaltung:  $(E + m_e - E_e)^2 = E'^2 = p^2 + p_e^2 - 2pp_e c_s + m^2$

$$0 = (E + m_e)^2 - 2E_e(E + m_e) + E_e^2 - p^2 - p_e^2 + 2pp_e c_s - m^2$$

$$0 = E^2 + 2m_e E + m_e^2 - 2E_e(E + m_e) + m_e^2 - p^2 + 2pp_e c_s - m^2$$

$$0 = m_e E + m_e^2 - E_e(E + m_e) + pp_e c_s = -(E_e - m_e)(E + m_e) + pc_s \sqrt{E_e^2 - m_e^2}$$

– mit  $E_{\text{kin},e} = E_e - m_e$  folgt  $E_{\text{kin},e}^2 (E + m_e)^2 = p^2 c_s^2 E_{\text{kin},e} (E_{\text{kin},e} + 2m_e)$

$$E_{\text{kin},e} = 2m_e \frac{p^2 c_s^2}{(E + m_e)^2 - p^2 c_s^2} \Rightarrow$$

$$T_{\text{max}} = 2m_e \frac{p^2}{(E + m_e)^2 - p^2} = \frac{2m_e \gamma^2 \beta^2}{1 + 2\gamma \frac{m_e}{m} + \frac{m_e^2}{m^2}}$$

– Beispiele: 1)  $2\gamma \frac{m_e}{m} \ll 1$  und  $\frac{m_e}{m} \ll 1 \Rightarrow T_{\text{max}} = 2m_e \gamma^2 \beta^2 = 2m_e \frac{p^2}{m^2}$

2)  $\gamma \gg 1 \Rightarrow E_{\text{kin},e} \approx E \approx p \Rightarrow T_{\text{max}} = \frac{E^2}{E + \frac{m^2}{2m_e}}$

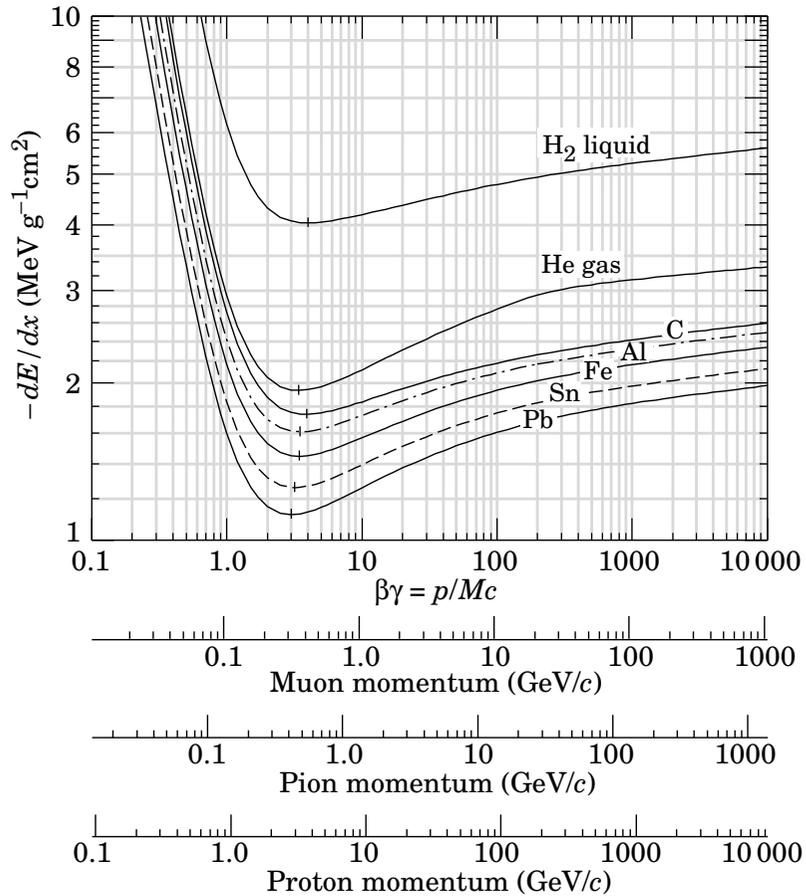
3)  $m = m_e \Rightarrow T_{\text{max}} = E - m = E_{\text{kin}}$

**Elektronen können ihre ganze kinetische Energie auf Elektronen des Materials übertragen.**

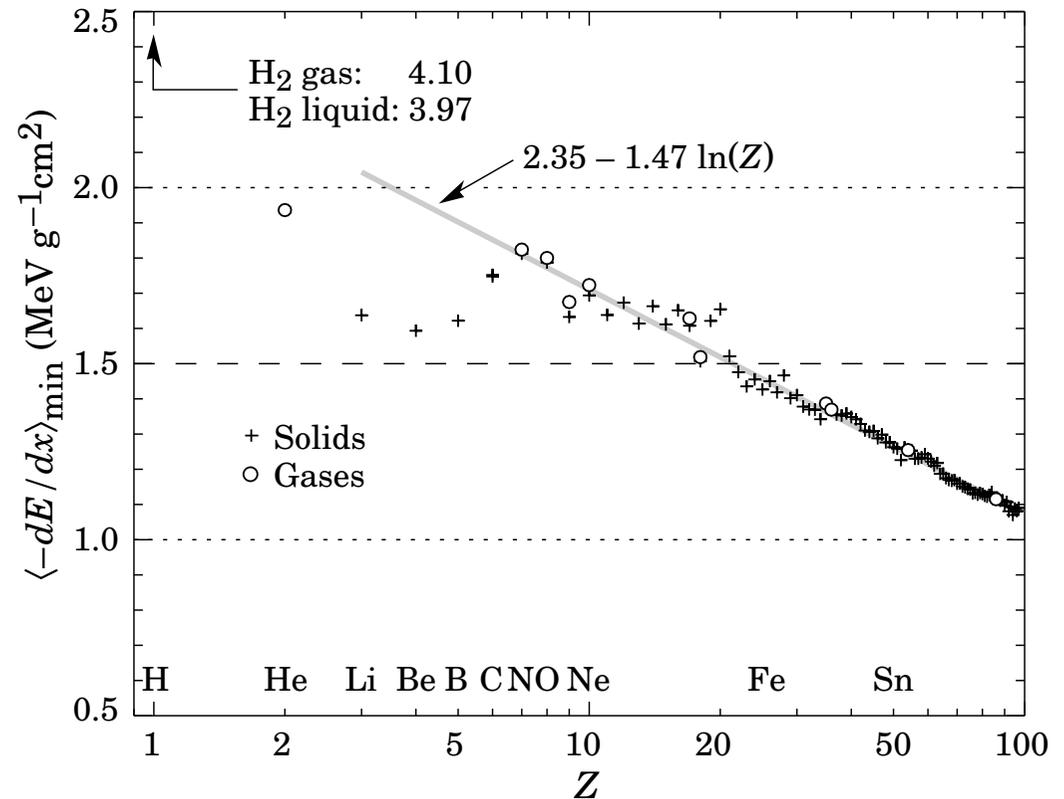


# Verschiedene Teilchen und Materialien

## Verschiedene Materialien



## Die Z-Abhängigkeit

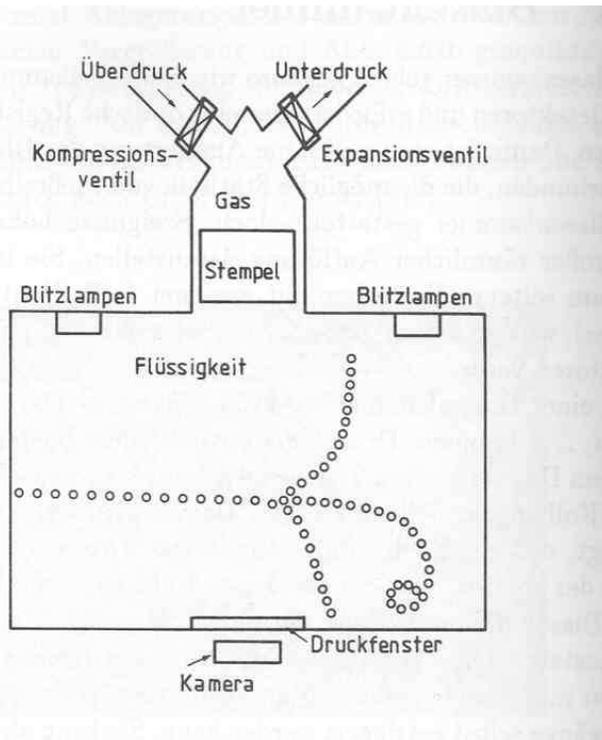


**Faustformel:  $(dE/dx)_{\min} = 1 - 2 \text{ MeV cm}^2/g$  bei  $p \approx 3$  Ruhemassen.**



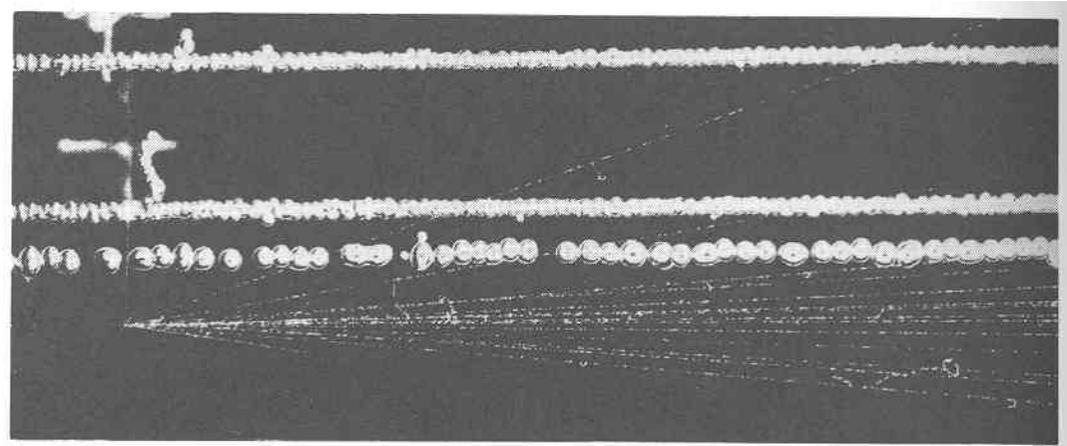
# Blasenkammer - das Prinzip

## Prinzipskizze



## Eigenschaften

- Benutzte Materialien sind  $H_2$ , Ne,  $C_3$ , Freon.
- Die Flüssigkeit wird nahe des Siedepunkts gehalten, was mehrere bar Druck erfordert.
- **Vor** dem Teilchendurchgang wird der Druck erniedrigt.
- Die Teilchen erzeugen dann Siedekeime.
- Lebensdauer der Keime  $\Delta t_{Blase} = 10^{-11} - 10^{-10}$  s.  
⇒ Externer Trigger ist nötig!

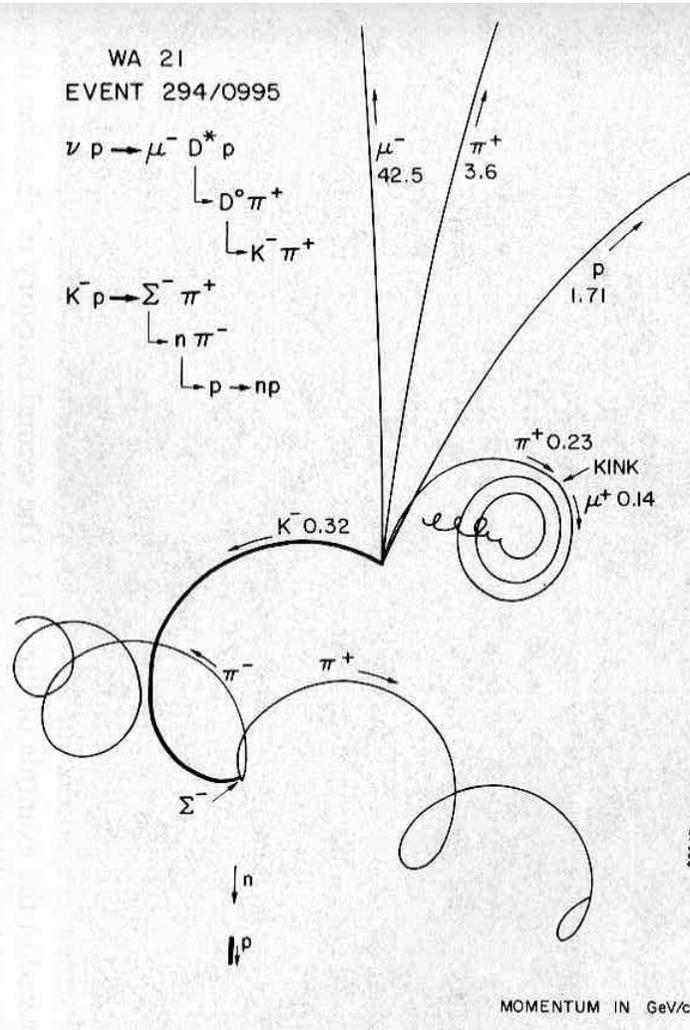
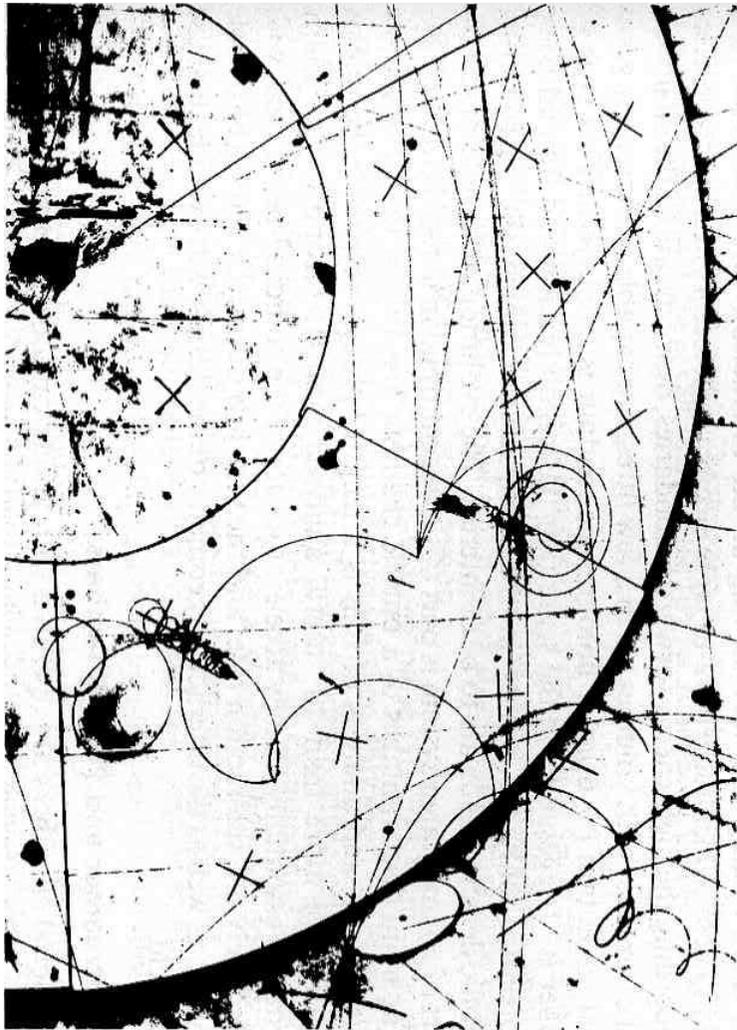


- Kammer-Zyklus ca. 100 ms, schlechte  $\pi/\mu$  Trennung.

**Blasenkammern sind für die meisten heutigen Anwendungen ungeeignet.**



# Blasenkammer - ein Beispiel zum Genießen



- $\vec{B} \perp \vec{p}$ ,  $|\vec{B}| = \text{einige Tesla}$ .
- **Sehr gute Auflösung:**  
 $\sigma_x = 6 \mu m \Rightarrow$   
 $\sigma_\tau = \frac{\sigma_x}{c} = 2 \cdot 10^{-14} s$
- **Blasendichte**  $\propto \frac{dE}{dx} \rightarrow \frac{1}{\beta^2}$
- **Impuls:**  $p = qBr$
- **Masse:**  $m = \frac{p}{\gamma\beta c}$
- **Wegen der dicken Eintrittsfenster an Beschleunigern nicht einsetzbar.**
- **Wegen zeitintensiver Scanarbeit sind hohe Ereignisraten nicht zu bewältigen.**

**An fixed-target Exp. werden Blasenkammern wegen der guten Auflösung weiter benutzt.**



# OPAL Jetkammer

Ein Sektor in Azimuth



Die gespannten Drähte



Der fertige Detektor



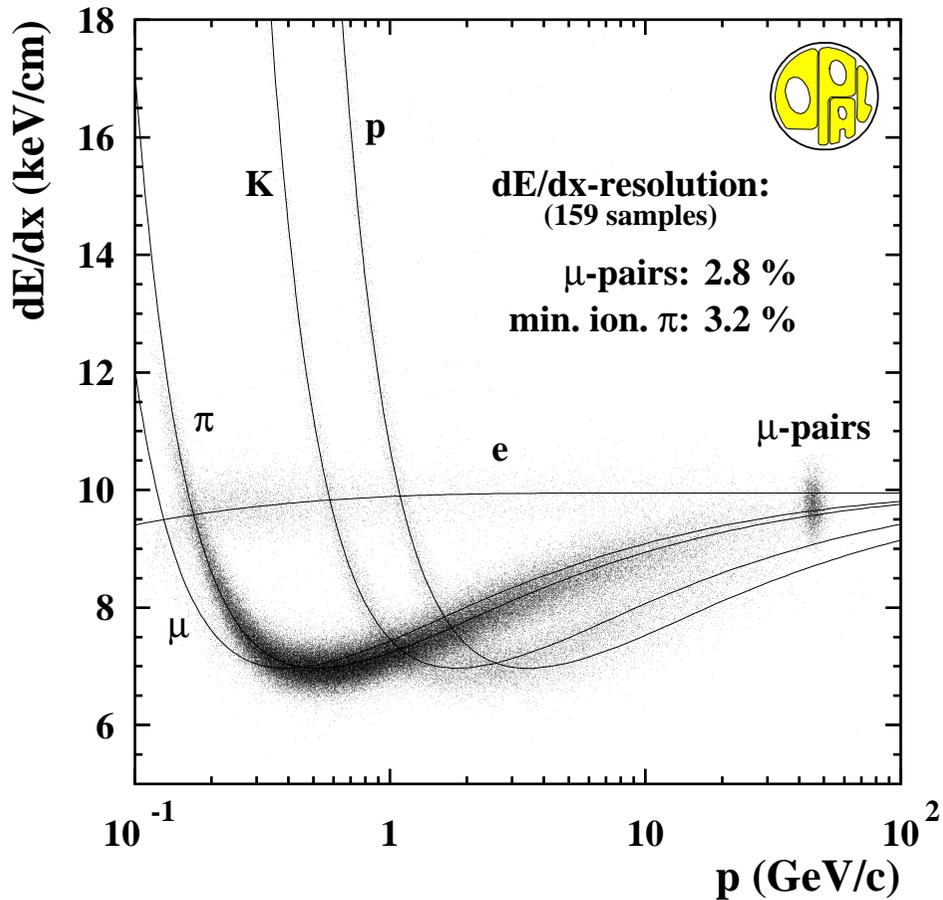
- $0.25 < R < 1.85$  m
- $L = 4$  m
- 24 Sektoren in Azimuth
- 159 Drähte / Sektor
- $E = 890$  V/cm
- Ar / CH<sub>4</sub> / C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> =  
(88.2 / 9.8 / 2.0)%  
+ 500 ppm Wasser
- $p = 4$  bar

Die OPAL Jetkammer arbeitete von 1989 - 2000.

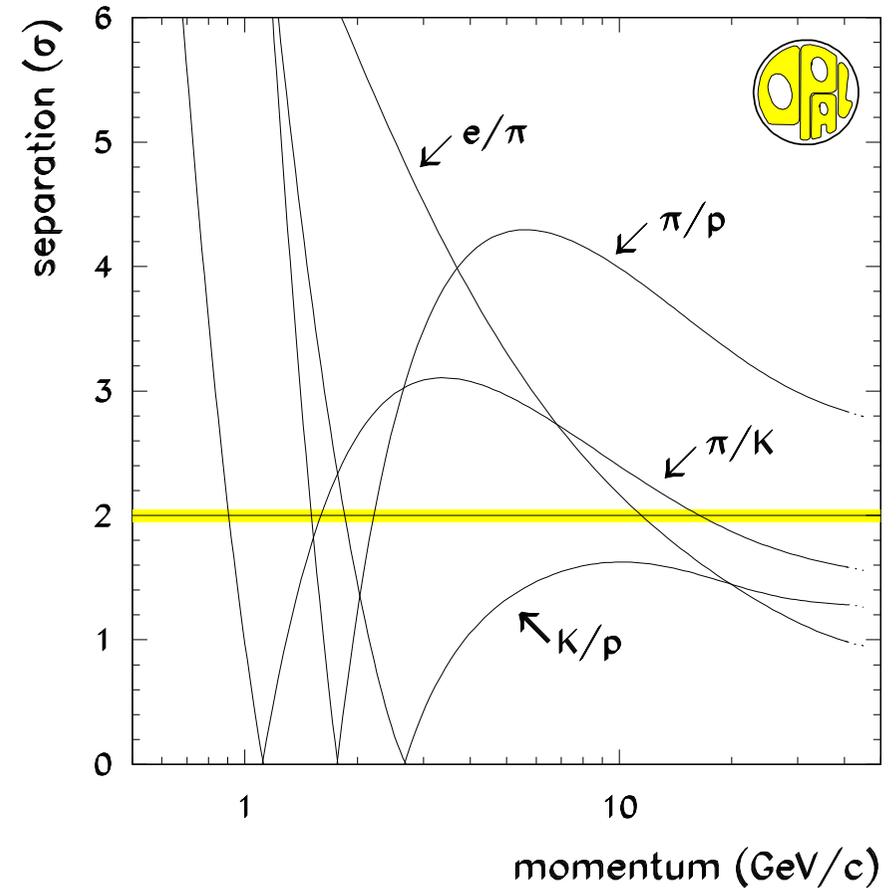


# Energieverlustmessung mit der OPAL Jetkammer

## Die Messung



## Die Teilchen-Separation



**Für niedrige Impulse ist die Teilchentrennung mittels  $dE/dx$  sehr effizient.**



# Driftkammern

- Die Elektronen und Ionen driften im Gasvolumen, z.B. in Ar/CO<sub>2</sub>.

Bewegungsgleichung:  $m \frac{d\vec{v}}{dt} = q \left( \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right) + \frac{m\vec{v}}{\tau}$

Mittlere Zeit zwischen zwei Stößen:  $\tau = \frac{\mu m}{q}$  mit  $\mu = \text{Beweglichkeit}$ .

Zyklotronfrequenz:  $\omega = \frac{qB}{m}$

- Die asymptotische Driftgeschwindigkeit,  $\frac{d\vec{v}}{dt} \equiv 0$ , ergibt sich für  $\vec{E} \perp \vec{B}$

zu:  $v = \frac{\mu E}{\sqrt{1 + \omega\tau}} = \frac{E}{\sqrt{B^2 + 1/\mu^2}} = \frac{\mu E}{\sqrt{1 + (\mu B)^2}}$ .

- Typische Driftgeschwindigkeit ist  $v = 5 \frac{cm}{\mu s}$ . Mit  $\sigma_t = 1 \text{ ns}$  folgt dann

für die Ortsauflösung:  $\sigma_x = v \cdot \sigma_t = 50 \mu m$ .

- Der Winkel  $\alpha$  zwischen  $\vec{E}$  und  $\vec{v}$  ist der Lorentzwinkel,  $\tan \alpha = \omega\tau = \mu B$ .

- Beispiel:  $E = 500 \frac{V}{cm}$ ,  $v(B = 0) = 3.5 \frac{cm}{\mu s}$  und  $\tan \alpha = 0^\circ$ ,

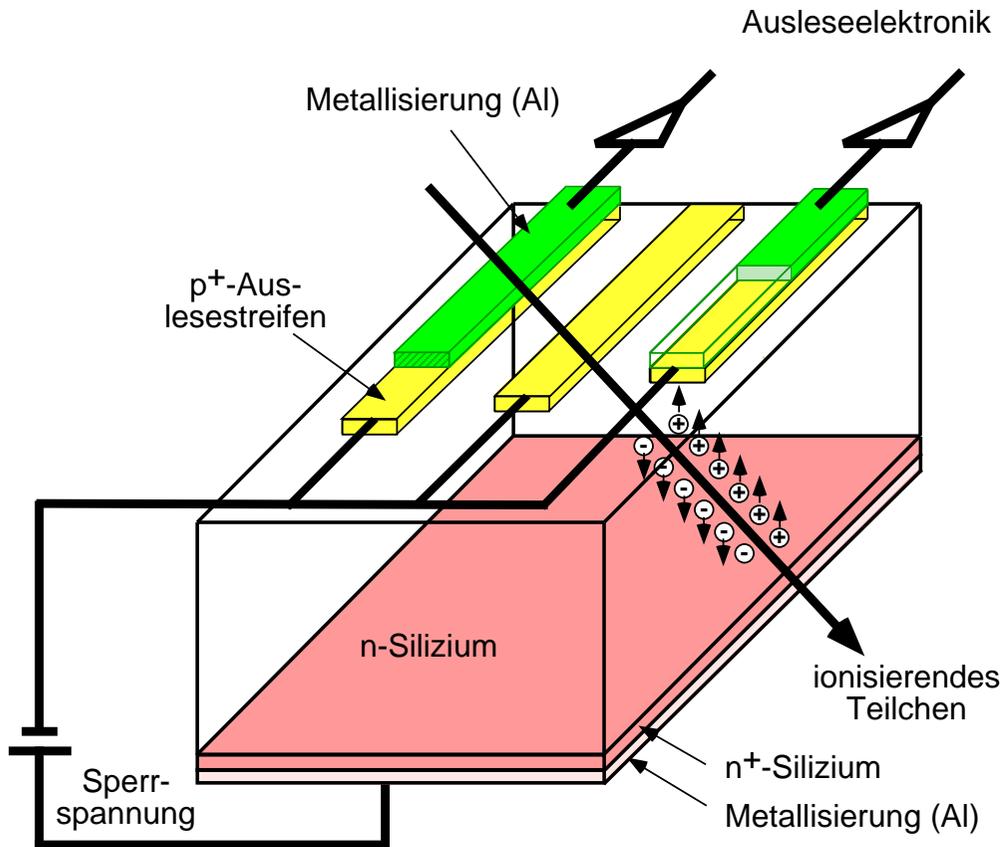
$\Rightarrow v(B = 1.5) = 2.4 \frac{cm}{\mu s}$  und  $\tan \alpha = 46^\circ$ .

**Große Driftkammern werden in vielen Detektoren zur Impulsmessung benutzt.**

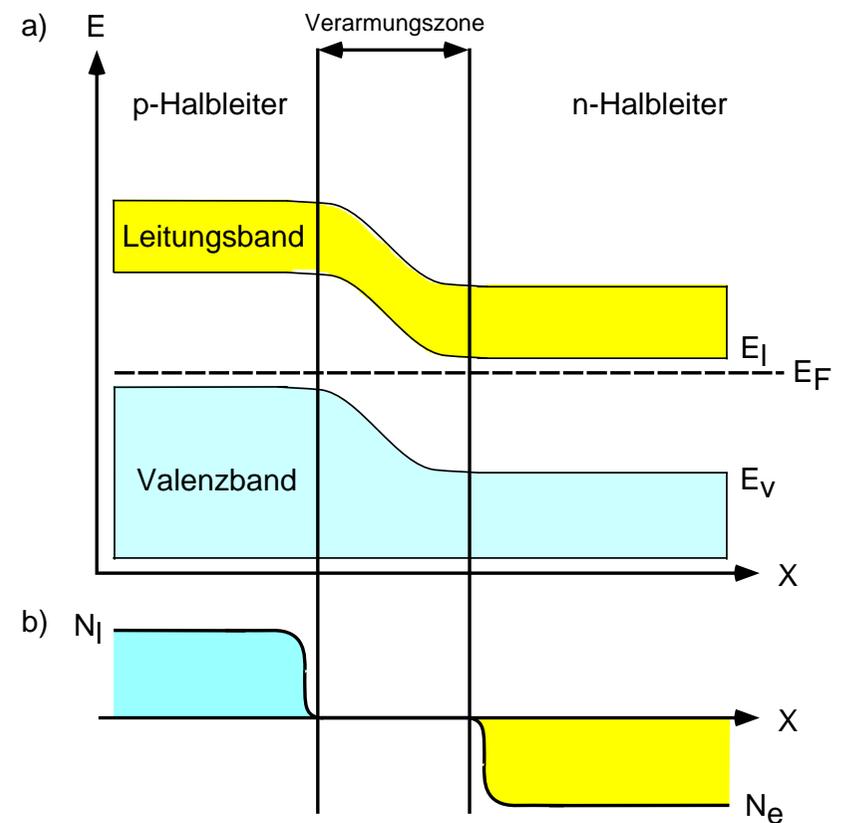


# Halbleiterdetektoren

## Die Prinzipskizze



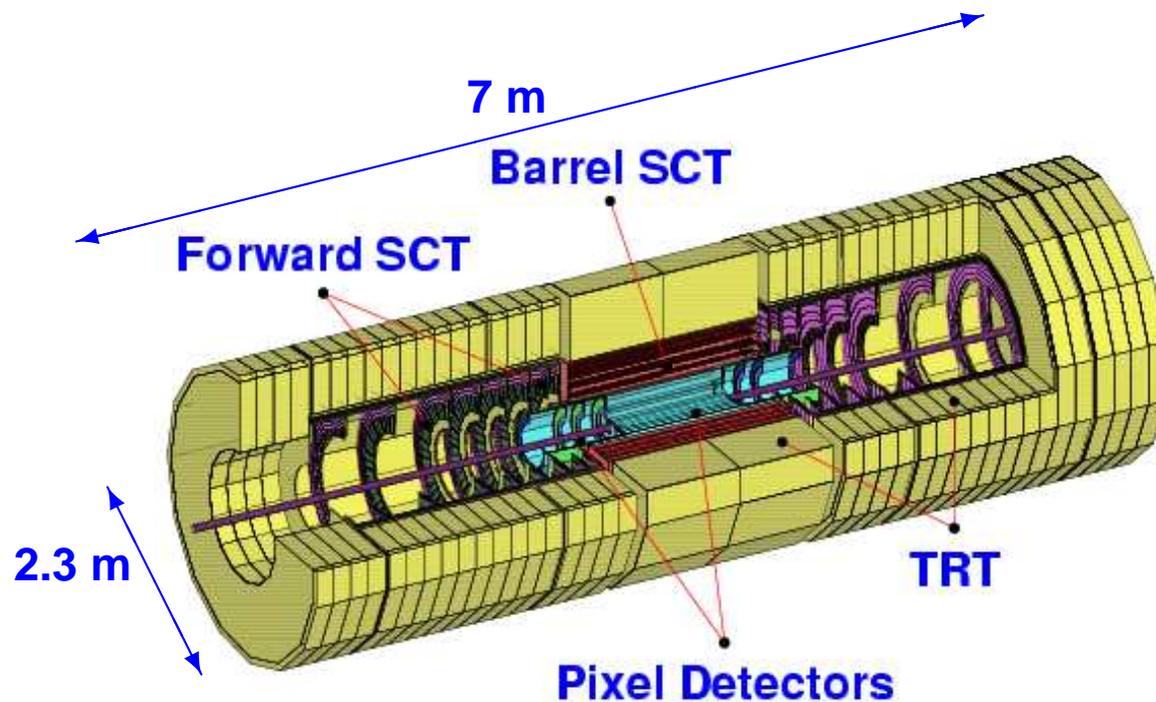
## Die Bandstruktur



**Die Halbleiterdetektoren werden als Vertex- und Spurdetektoren eingesetzt.**



# Der innere Spurdetektor von ATLAS



## Die Silizium Detektoren

### Der Pixel Detektor

- Radius 4.8 – 16 cm
- 3 Lagen, 6 Scheiben
- $8 \cdot 10^7$  Auslesekanäle

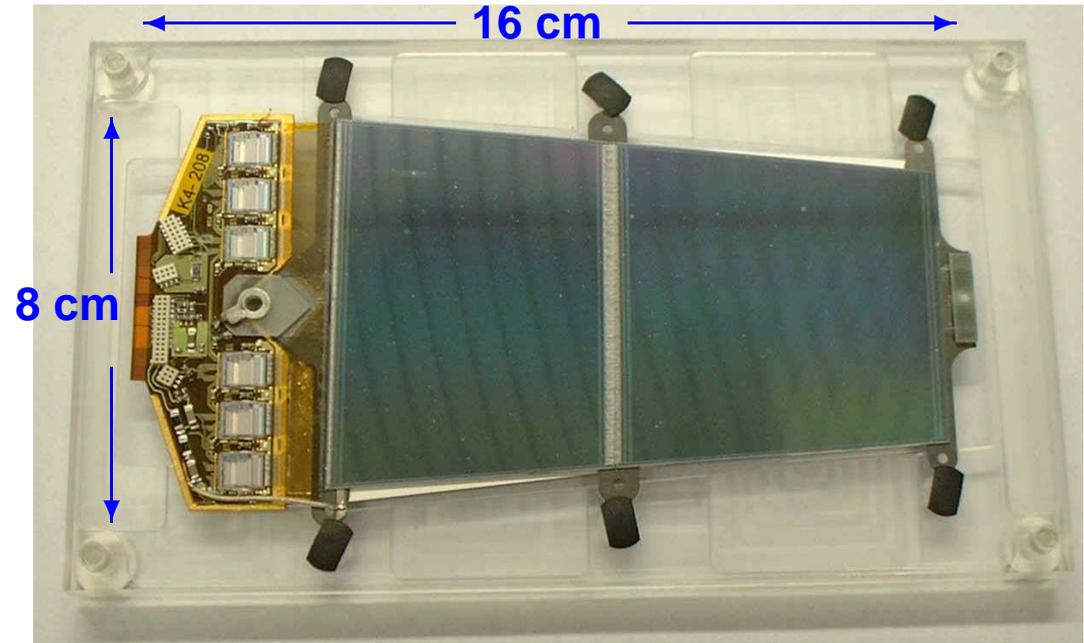
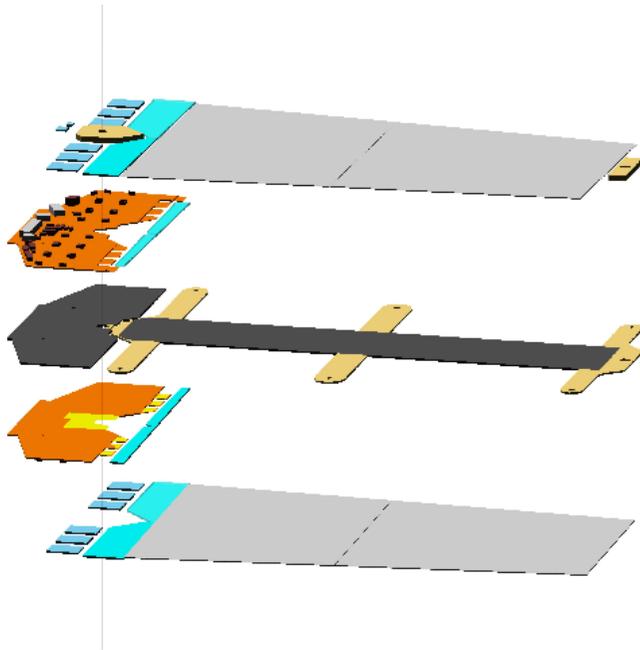
### Der SemiConductor Tracker

- Radius 27 – 52 cm
- 4 Lagen, 18 Scheiben
- $6.3 \cdot 10^6$  Auslesekanäle
- 4088 Module, 61 m<sup>2</sup> Silizium

**Am MPI bauen wir 400 Module des SCT Vorwärtsbereichs.**

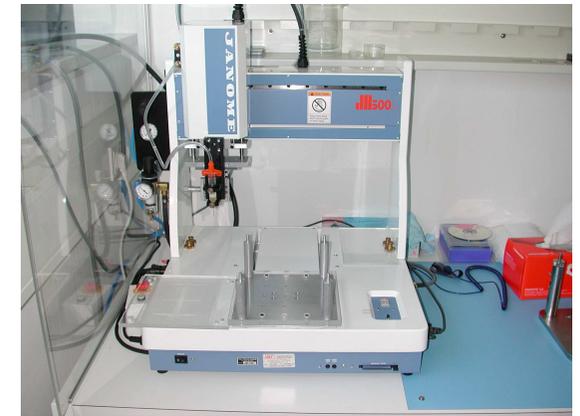


# Vom Modell zum Modul ist ein langer Weg



## Die wichtigsten Dinge sind

- ein Roboter zum Ausrichten der Detektoren mit einer Genauigkeit von besser als  $5 \mu m$ ,
- ein Kleberoboter,
- und viel Ruhe und Geduld, Bauzeit: 1 Tag/Modul.





# Die Modultypen

## Hybrid

6-lagige Kupfer-Polyimid  
Flex auf Carbon-Substrat

Befestigungspunkte  
Genauigkeit  $20 \mu m$

Detektoren  
ca.  $6 \times 6 \times 0.285 \text{ cm}^3$   
768 einseitige p Streifen  
auf n Substrat mit  $50-90 \mu m$   
Streifenabstand

## Auslesechips

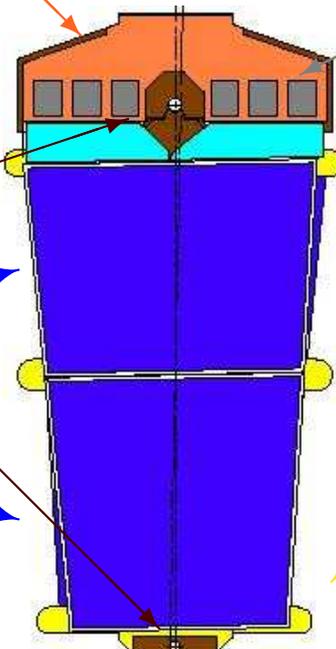
6 ABCD3T Chips pro Seite,  
binäre Auslese

## Fan-ins

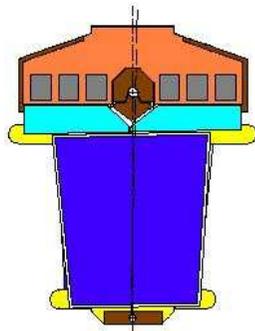
4/Modul, Glas mit Al-Streifen  
 $300 \mu m$  dick

## Trägerstruktur (Spine)

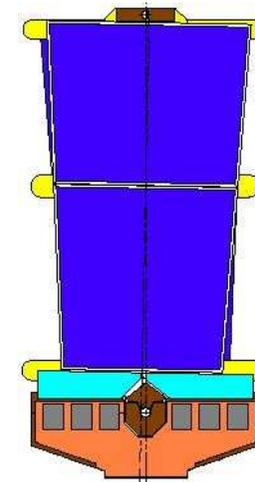
Thermal Pyrolytic Graphite  
 $500 \mu m$  dick,  $1700 \text{ W/m/K}$



Mittleres Modul



Inneres Modul

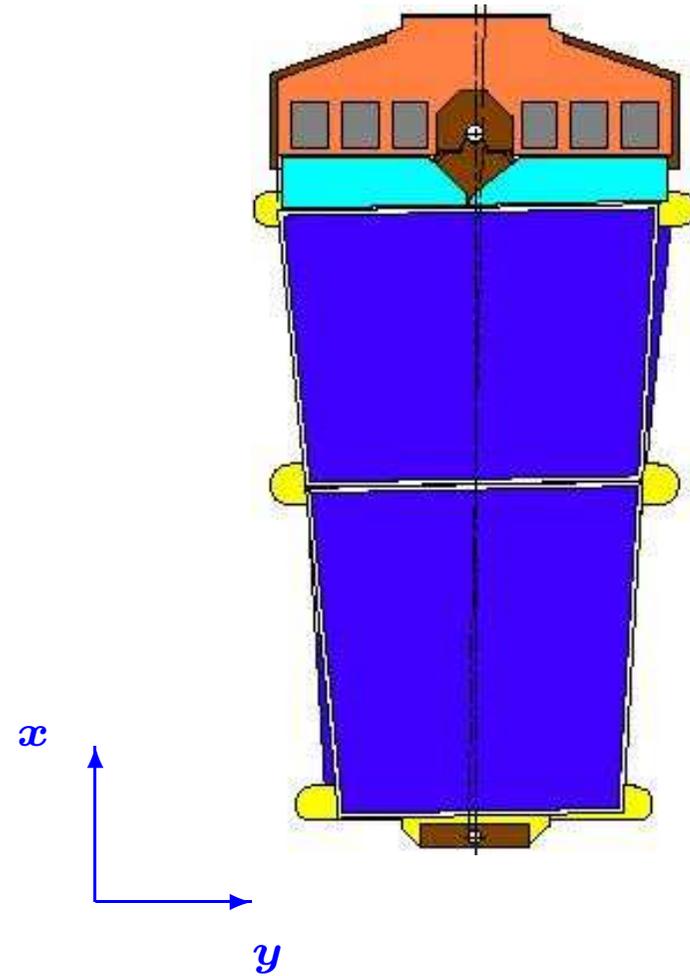
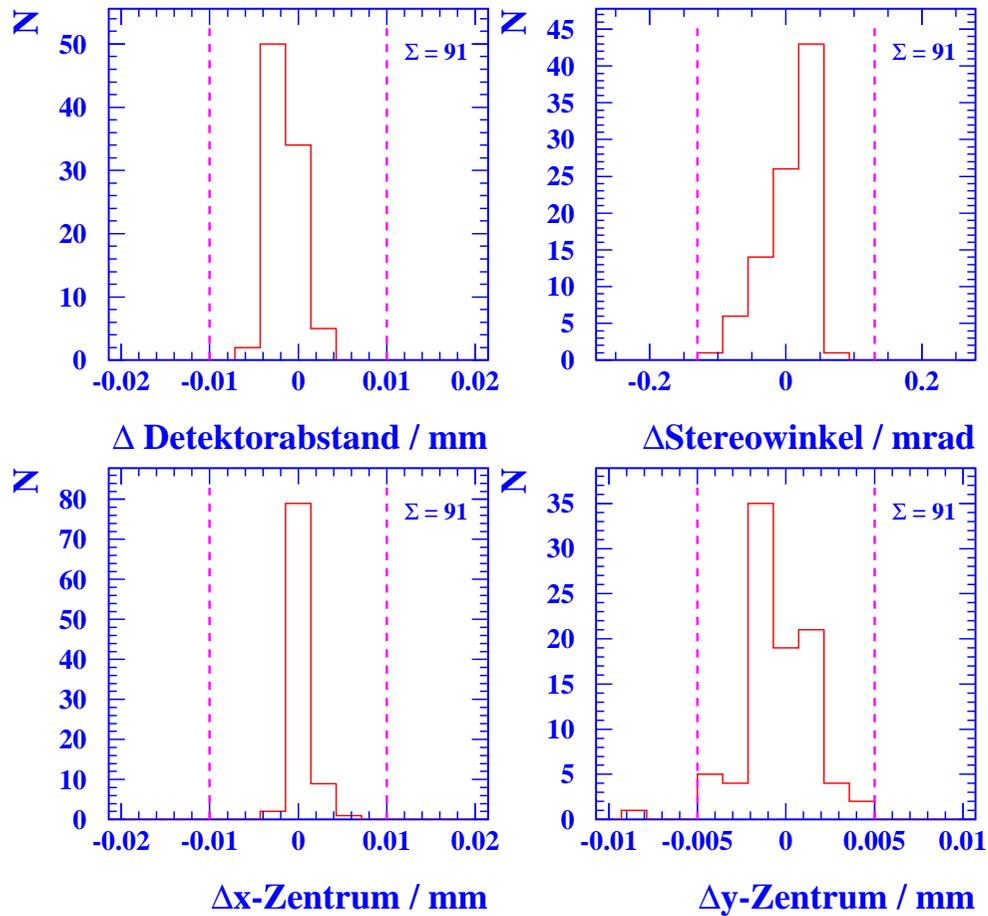


Äußeres Modul



# Die Reproduzierbarkeit beim Modulbau

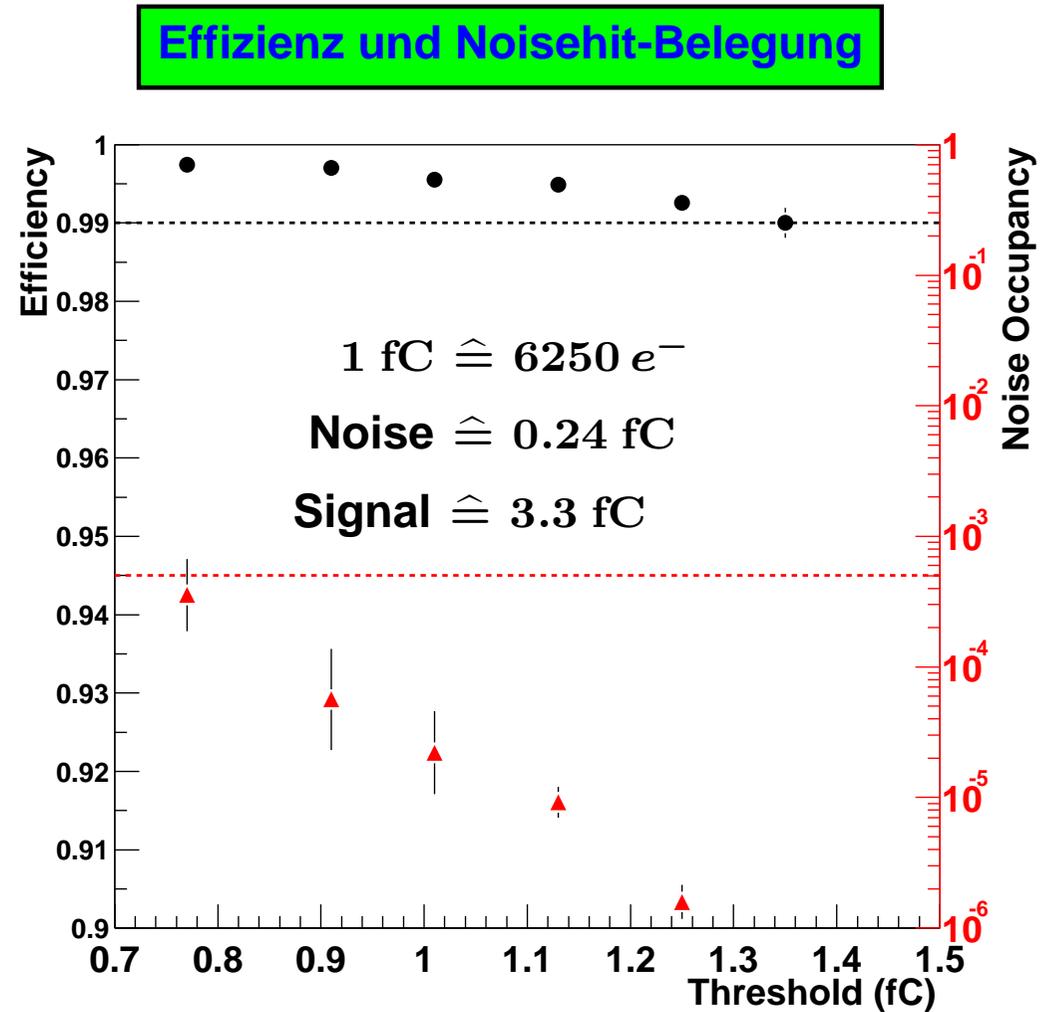
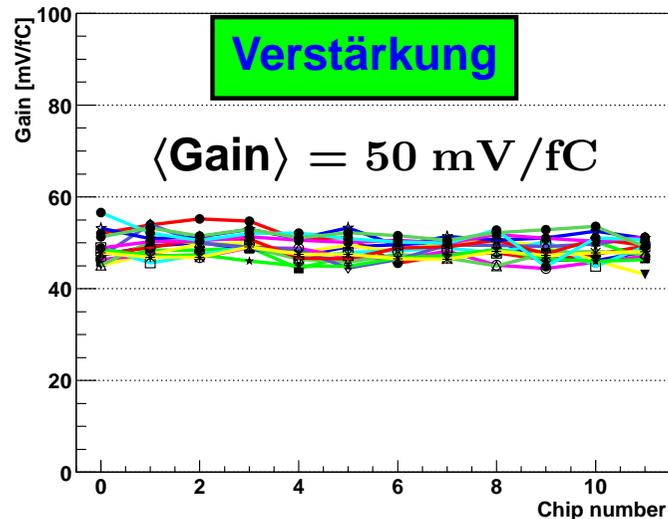
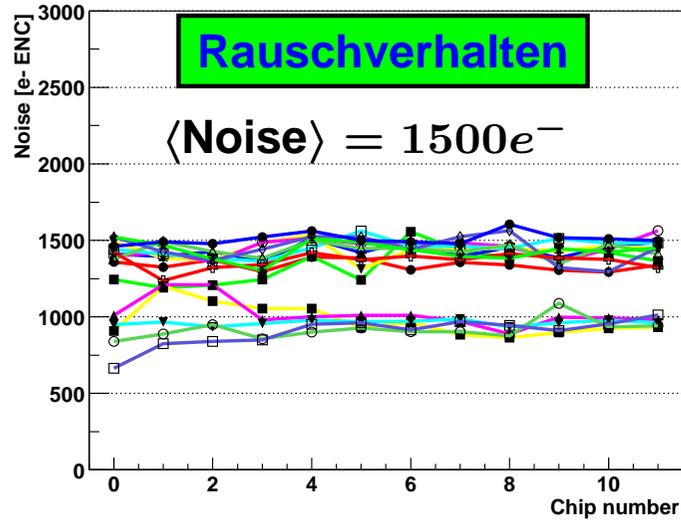
## Mechanische Parameter



**Die Module werden mit hoher Ausbeute innerhalb der Spezifikationen gebaut.**



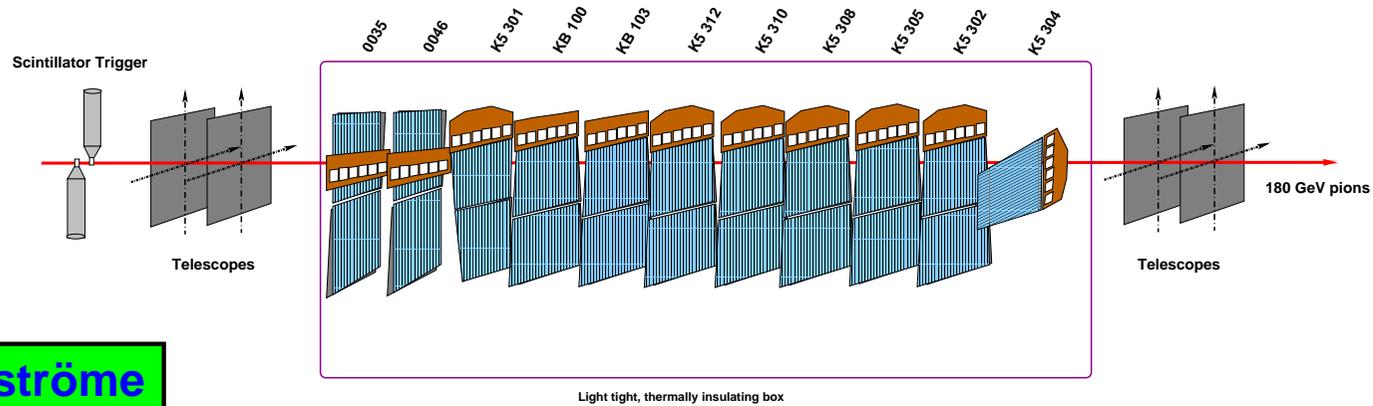
# Eigenschaften unbestrahlter Module



**Die unbestrahlten Module erfüllen die Designanforderungen.**

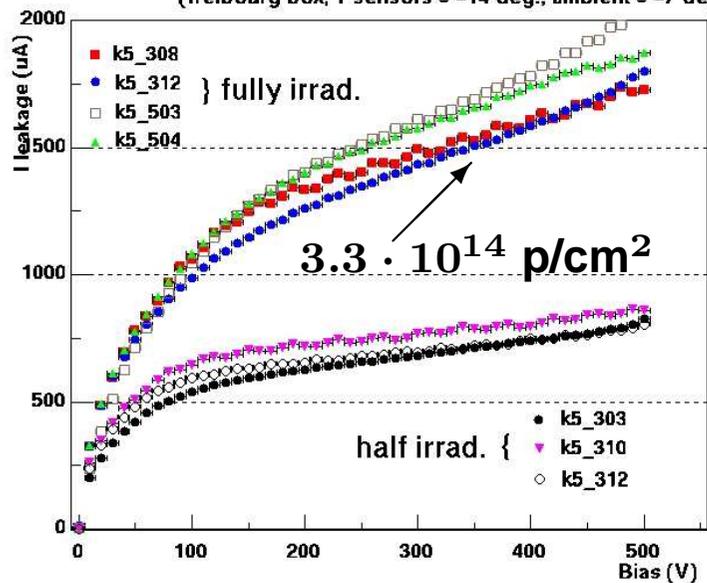


# Messungen bestrahlter Module an einem Pion-Teststrahl

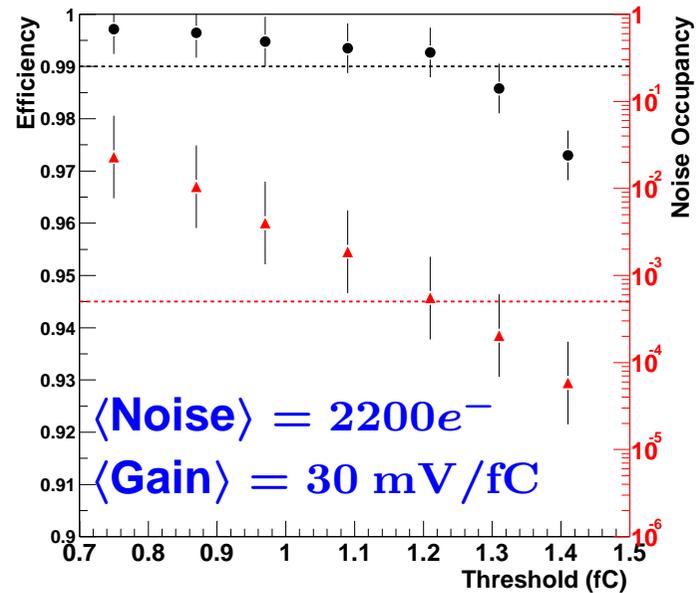


**Dunkelströme**

IV scan (LVOFF) T therm = -14 deg.  
(freibourg box, T sensors = -14 deg., ambient = -7 deg.)



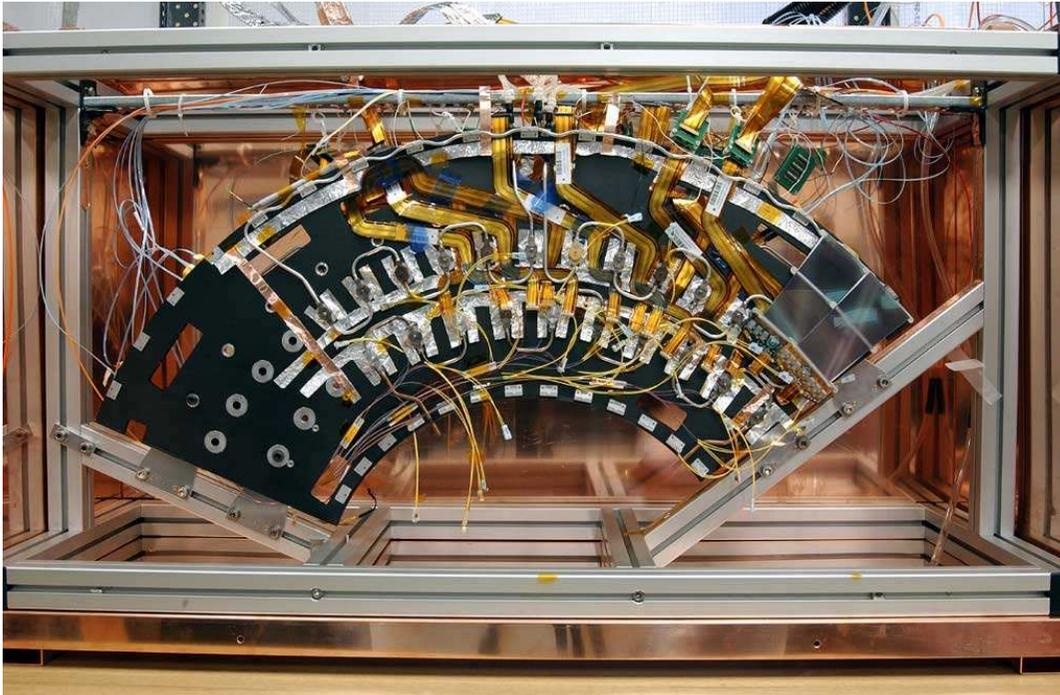
## Maximaldosis



**Mit geänderten Betriebsparametern werden die Anforderungen knapp erreicht.**

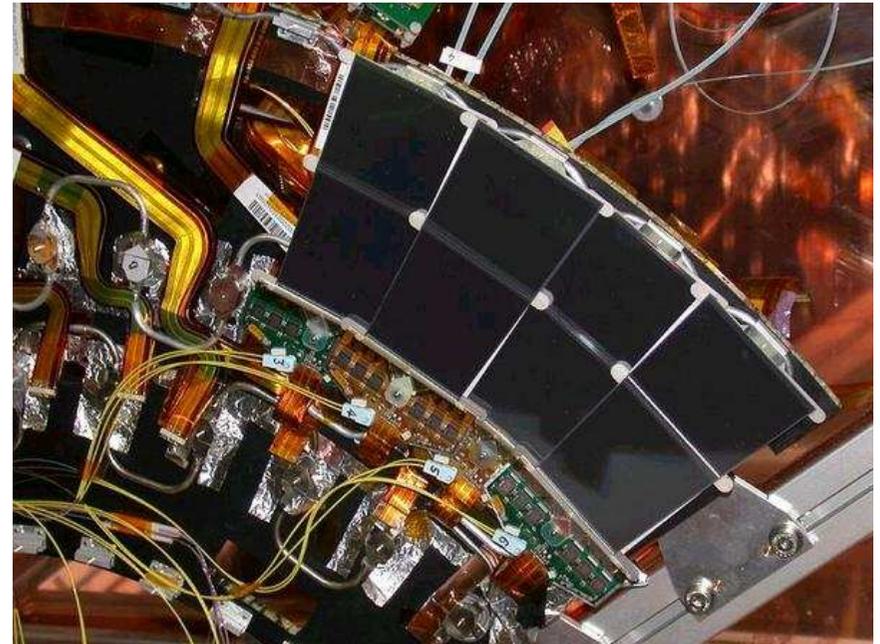


# Der Test eines Teilsystems



**Die Integration der Module ist schwierig**

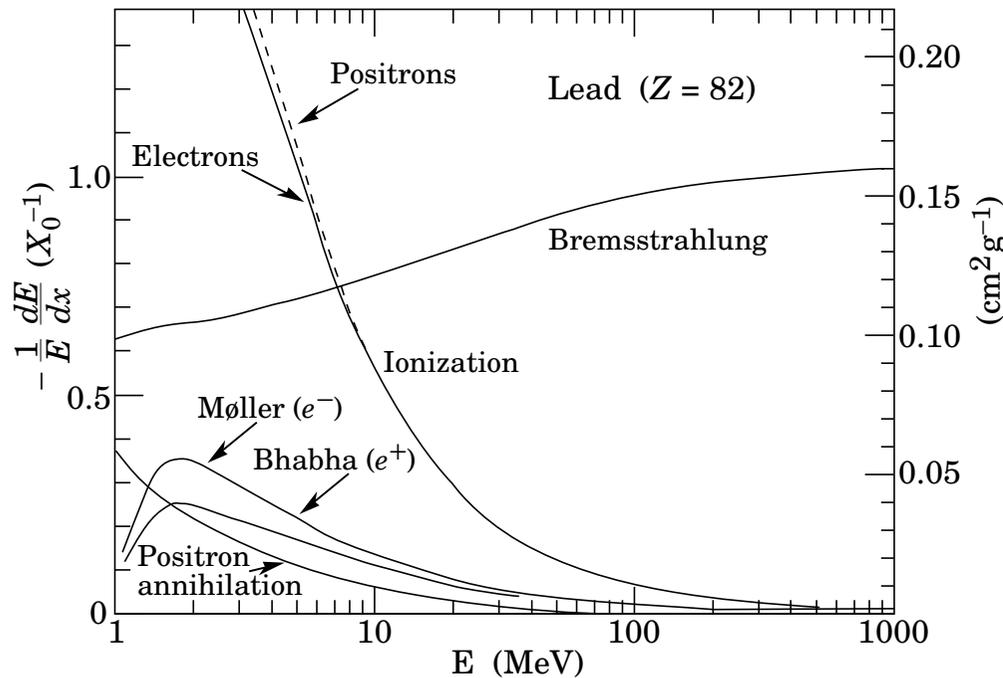
- Die Module sind sehr empfindlich.
- Eine präzise Vermessung ist nötig (X-Ray).
- Elektronisches Rauschen ist zu vermeiden.
- Es ist nicht viel Platz, die Module überlappen.



**Beim Zusammenspiel aller Kräfte ist sehr viel Abstimmung nötig.**



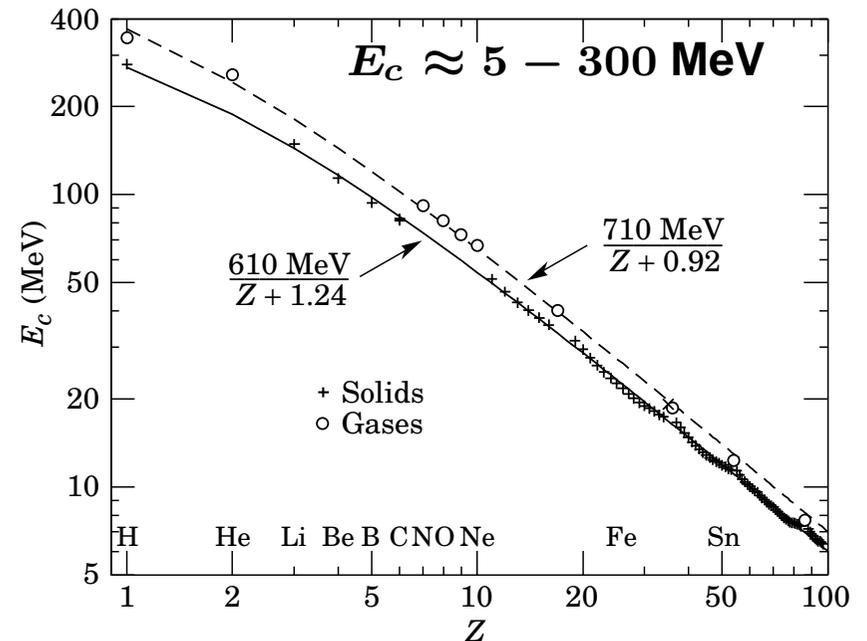
# Elektronen in Materie



- Zusätzlich zu Ionisation und Bremsstrahlung gibt es noch Streuung an den  $e^-$  des Materials, Møller und Bhabha Streuung für  $e^-$  und  $e^+$ .
- Die Abschwächung:  $E = E_0 e^{-\frac{x}{X_0}}$  wird durch die Strahlungslänge  $X_0$  parametrisiert, empirisch:  $X_0 = \frac{716.4 A}{Z(1+Z) \ln(287/\sqrt{Z})} \frac{g}{cm^2} \propto \frac{A}{Z^2}$

## Die Kritische Energie

$$E_c \equiv \left( \frac{dE}{dx} \right)_{\text{ion}} = \left( \frac{dE}{dx} \right)_{\text{brems}}$$



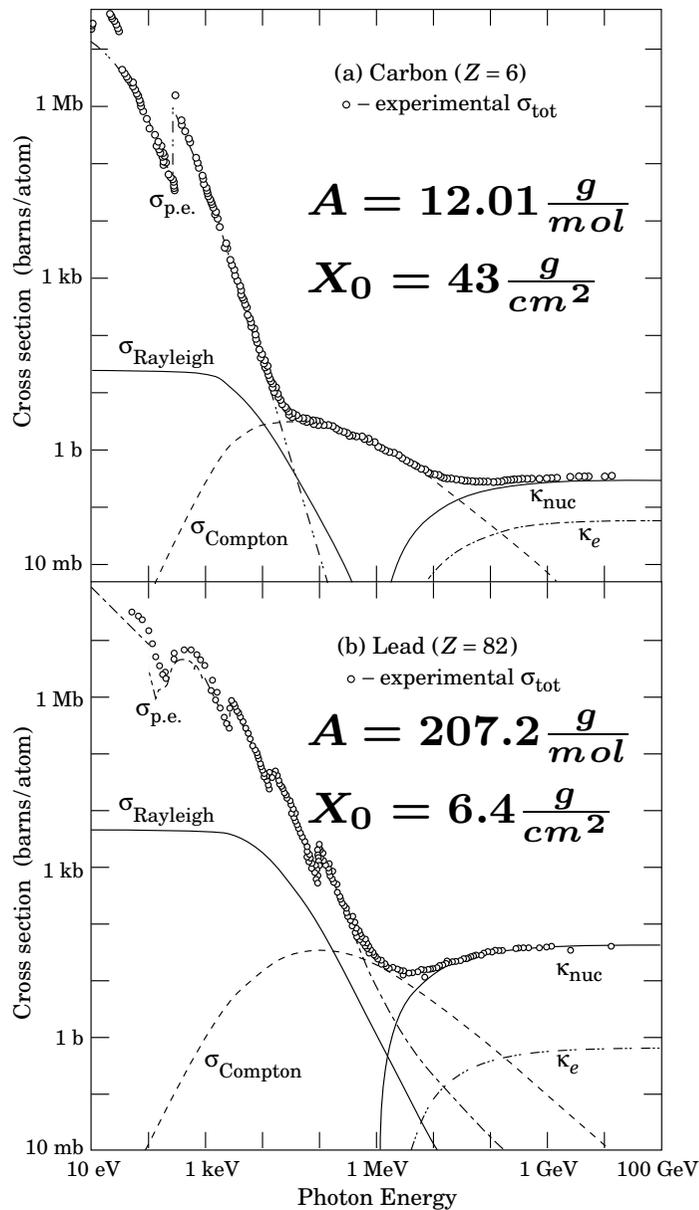
Pb :

$$Z = 82, A = 207.2 \frac{g}{mol}, \rho = 11.3 \frac{g}{cm^3} \\ \Rightarrow X_0 \hat{=} 0.56 \text{ cm für Blei}$$

**Die Wechselwirkungen der Elektronen resultieren in elektromagnetischen Schauern.**



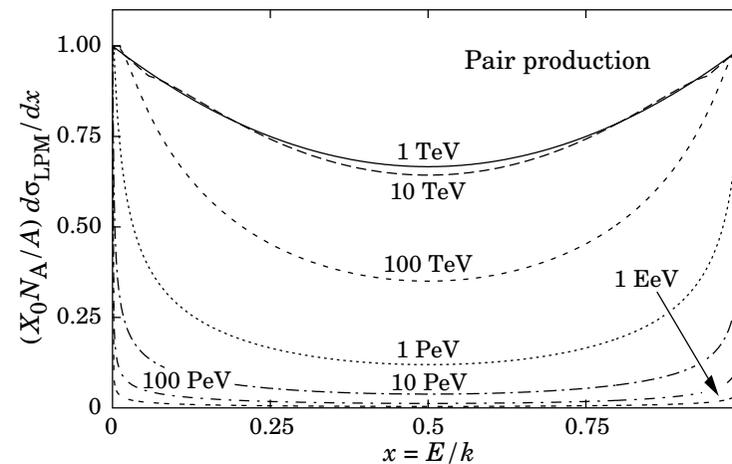
# Photonen in Materie



## Die Haupteffekte

- Der Photoelektrische Effekt,  $\sigma_{\text{p.e.}}$
- Die kohärente Streuung,  $\sigma_{\text{Rayleigh}}$
- Die Compton Streuung,  $\gamma e^- \rightarrow \gamma e^-$ ,  $\sigma_{\text{Compton}}$
- Die Paarproduktion,  $\gamma \rightarrow e^+ e^-$ , im Feld der Nukleonen / Elektronen,  $\kappa_{\text{nuc}}/e$

## Die Paar-Produktion



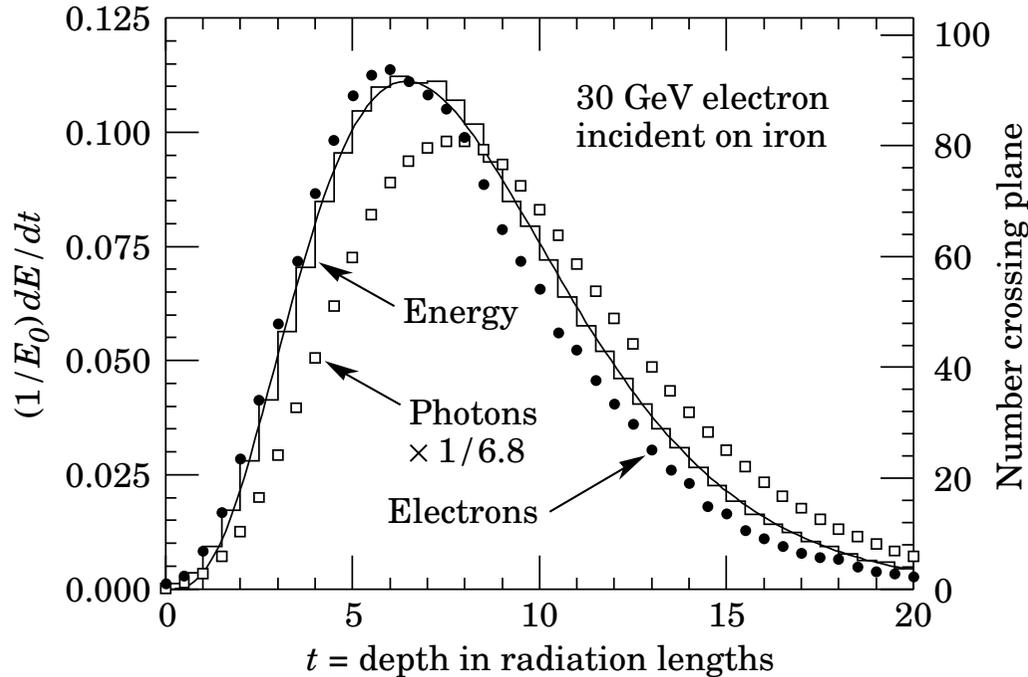
$$\frac{d\sigma}{dE} = \frac{A}{X_0 N_A} \left[ 1 - \frac{4}{3} x (1 - x) \right]$$

$$\Rightarrow \sigma = \frac{7}{9} \frac{A}{X_0 N_A} \begin{cases} 0.36 \text{ b} & \text{für C} \\ 41.8 \text{ b} & \text{für Pb} \end{cases}$$



# Elektromagnetische Kalorimeter - die Grundlagen

– EGS4 Simulation,  $E_{\text{cut}} = 1.5 \text{ MeV}$ .



## Die Schauerentwicklung

- Ansteigen der Teilchendichte solange Energie größer  $E_c$ , danach Abfallen durch Absorption.
- Schauertiefe:
 
$$t_{\text{max}} = \frac{x_{\text{max}}}{X_0} = \ln \frac{E}{E_c} \pm 0.5 \begin{cases} + & \text{für } \gamma \\ - & \text{für } e \end{cases}$$
- 98% der Energie ist in  $x < 2.5x_{\text{max}}$ .
- Die Schauerbreite entsteht durch Vielfachstreuung.
- Molière Radius:  $R_M = \frac{21 \text{ MeV}}{E_c} X_0 \left[ \frac{g}{\text{cm}^2} \right]$
- 95% der Energie wird in  $R < 2R_M$  deponiert.

Beispiel: SiW Kalorimeter,  $E_0 = 100 \text{ GeV}$

	$X_0 \text{ (g/cm}^2\text{)}$	$X_0/\rho \text{ (cm)}$	$E_c \text{ (MeV)}$
<b>W</b>	<b>6.8</b>	<b>0.35</b>	<b>8.0</b>
<b>Si</b>	<b>22</b>	<b>9.4</b>	<b>39</b>
<b>1:1</b>	<b>14.4</b>	<b>4.9</b>	<b>23.5</b>

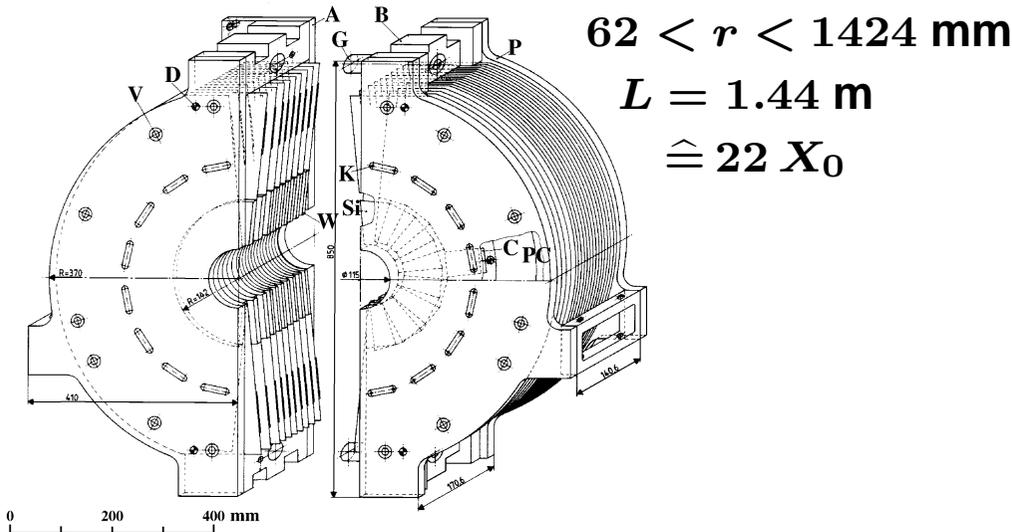
- $E_0/E_c = 4 \cdot 10^3$
- $x_{\text{max}} = 7.8X_0 \Rightarrow L \approx 100 \text{ cm}$
- $R_M \approx 5 \text{ cm} \Rightarrow BxH \approx 10x10 \text{ cm}^2$

**Ein sehr kompaktes Kalorimeter.**

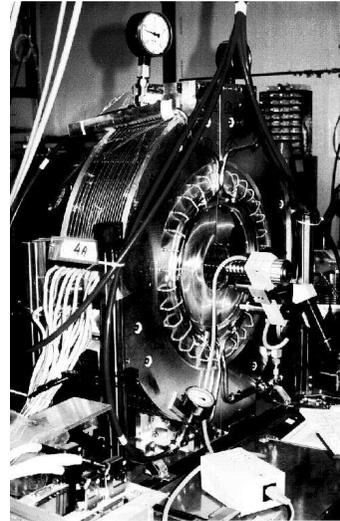


# Elektromagnetische Kalorimeter - OPAL SiW

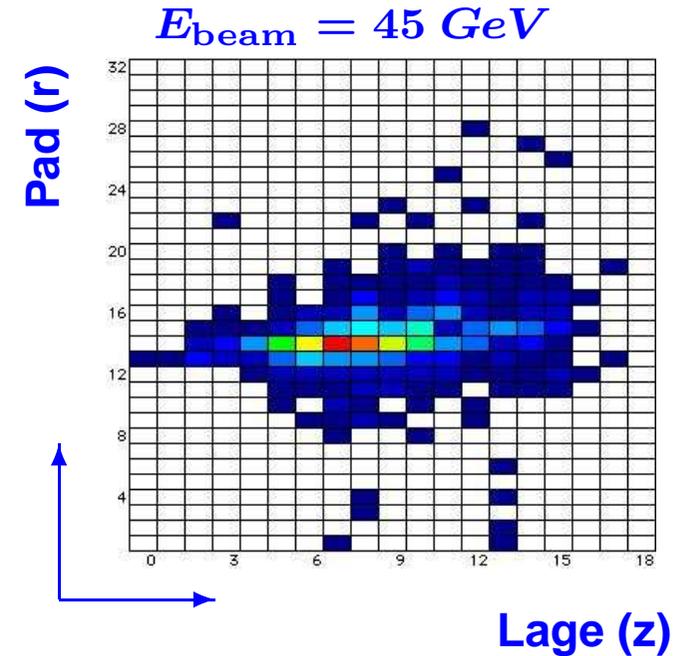
## Die Prinzipskizze



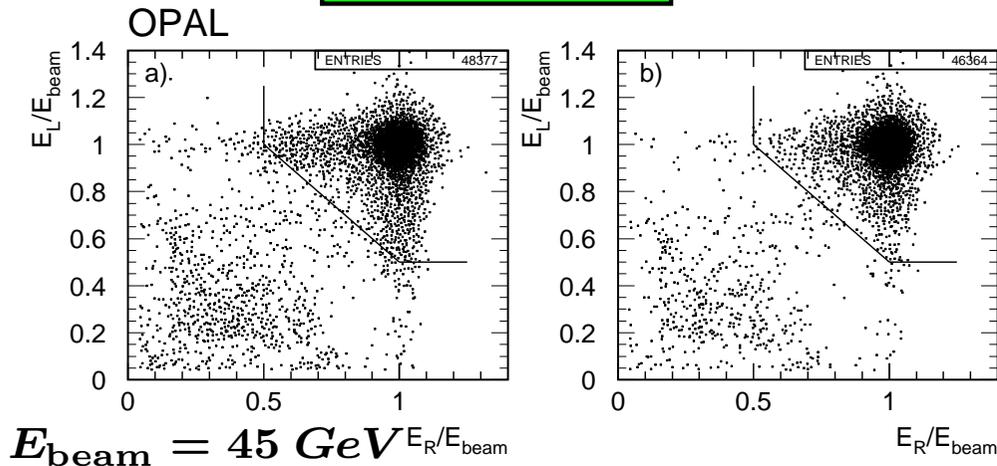
## Der Detektor



## Die Schauerentwicklung



## Die Auflösung

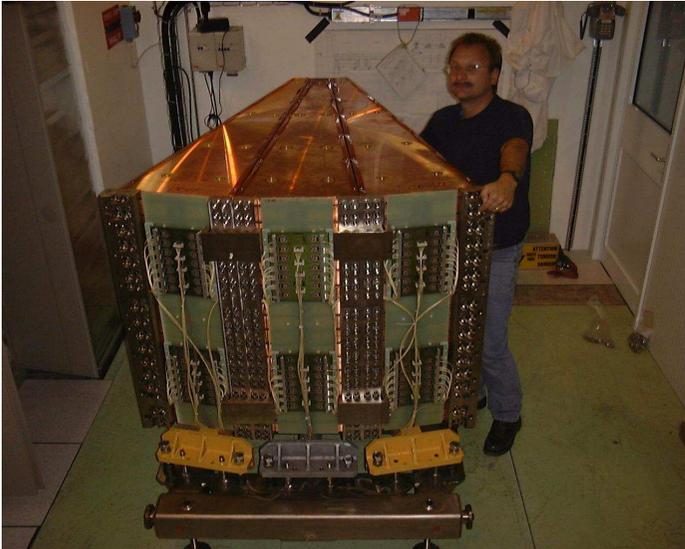


- Die Auflösung ist  $\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{a}{\sqrt{E/\text{GeV}}} \oplus b$ , wobei  $a$  der stochastische Term ist und  $b$  von der Elektronik kommt,  $b = \mathcal{O}(1\%)$ .
- Bsp.: OPAL SiW  $a = 25\%$ , L3 BGO  $a = 2\%$ .

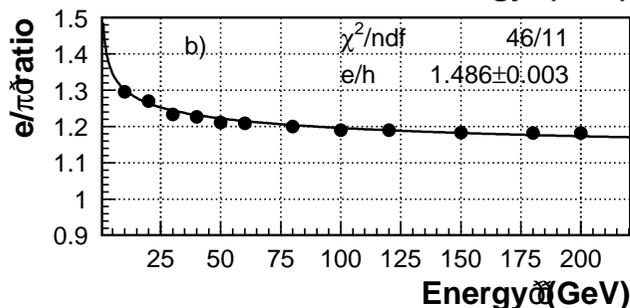
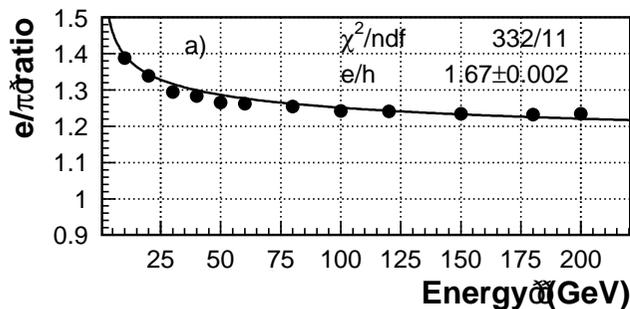
**Gute Auflösung  $\Leftrightarrow$  Totalabsorbierende K.**



# Hadronische Kalorimeter - das ATLAS HEC



- Die Abschwächung wird durch die Absortionslänge,  $\lambda$ , parametrisiert.
- Hadronische Schauer,  $\pi$ , haben einen hadronischen,  $h$ , und einen elektromagnetischen,  $e$ , Anteil,  $f$ , der aus  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  kommt, also:  $\pi = h(1 - f) + ef$ .
- Im hadronischen Anteil bleibt etwa 20% der Energie unsichtbar (Kernanregungen etc.). Deswegen haben hadronische Schauer größere Fluktuationen.
- Ein Ausweg sind kompensierende Kalorimeter aus Uran bei denen ein Teil des Verlustes durch die Energiefreisetzung in Kernreaktionen kompensiert wird,  $e/\pi \rightarrow 1$ .



## Das ATLAS Hadronic End Cap

- Das sensitive Material ist flüssiges Argon.
- Der Absorber sind 25 mm dicke Kupferplatten, insg.  $10\lambda$ .
- $\frac{\sigma(E_e/E_\pi)}{E} = \frac{22/70\%}{\sqrt{E/GeV}} \oplus 0.3/6\%$ .

**Die Auflösung für hadronische Schauer ist viel schlechter.**



# Bau einer MDT Kammer



**Beim Bau gibt es einiges zu tun**

- 432 Rohre a 3.8 m Länge montieren.
- Die Präzision: 20  $\mu\text{m}$  (Haardicke).
- 1728 (dichte!) Gasverbindungen.
- Eine Kammer wiegt ca. 350 kg.

**Sehr präzise Werkzeuge werden benötigt.**





# Massenproduktion der Kammern



## Es gibt jede Menge Kammern

- Für ATLAS werden 1200 MDT Kammern an 13 Instituten produziert.
- Das MPI baut davon 88 Stück.
- Das macht für uns 38016 Rohre und 152064 Gasverbindungen.

## Eine komplexe Logistik ist nötig

- Die Kammern werden mit kosmischen Myonen getestet.
- Sie werden mehrere Jahre gelagert.
- Der Transport muß sicher sein.

**Die Produktion dauert ca. 6 Jahre.**





# Zusammenfassung

---

---

- In den Detektoren werden die stabilen Teilchen  $e^-$ ,  $p$ ,  $\gamma$  und eine Reihe langlebiger Teilchen z.B.  $\mu^\pm$ ,  $\pi^\pm$ ,  $\pi^0$ ,  $n$ ,  $K_S$ ,  $K_L$  nachgewiesen. Die wichtigsten Messgrößen sind,  $\vec{x}$ ,  $t$ ,  $E$ ,  $\vec{p}$ ,  $\vec{v}$  und  $m$ .
- Der Ionisationsverlust geladener Teilchen wird durch die Bethe-Bloch Formel:

$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

beschrieben. Dies ist die wichtigste Formel für den Teilchennachweis.

- In den Spurkammern werden die Impulse geladener Teilchen vermessen.
- Beim Teilchendurchgang in dichter Materie entstehen viele sekundäre Teilchen hauptsächlich durch Bremsstrahlung, Paarerzeugung und, für Hadronen, durch Kernreaktionen. Diese Kaskade führt zur Entwicklung eines Schauers.
- Kalorimeter dienen zur Energiemessung von Elektronen und Photonen (elektromagnetische Kalorimeter) und von Hadronen (hadronische Kalorimeter). Wegen der höheren Fluktuationen im Schauer ist die Energie-Auflösung für Hadronen wesentlich schlechter.