

# Detektoren und Beschleuniger

- Literatur

- K. Wille, Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, Teubner
- Hinterberger, Physik der Teilchenbeschleuniger, Springer
- S.Humphries Jr., Principles of Charged Particle Acceleration,  
pdf-Buch <http://www.fieldp.com/cpa/cpa.html>
- K. Kleinknecht, Detektoren für Teilchenstrahlung, Teubner bzw. Detectors for Particle  
Radiation, Cambridge Univ. Press
- C. Grupen, Teilchendetektoren, BI
- R. Fernow, Introduction to experimental particle physics, Cambridge Univ. Press
- W. R. Leo, Techniques for Nucl. and Part. Phys. Exp., Springer
- H.K. Schmidt, Meßelektronik in der Kernphysik, Teubner
- R. N. Cahn & G. Goldhaber, The Experimental Foundations of Particle Physics, Cambridge  
University Press

# Detektoren

Basierend auf Ionisation !

- Photographischer Film
- Emulsion
- Nebelkammer
- Blaskammer
- Geiger-Müller-Zähler
- Proportionalzähler
- Vieldrahtproportionalkammer (MWPC)
  - Mikrostreifenzähler
- Driftkammer (DCH)
- Zeitprojektionskammer (TPC)

Spurbilder

Ionisation, Zählung

Spurpunkte

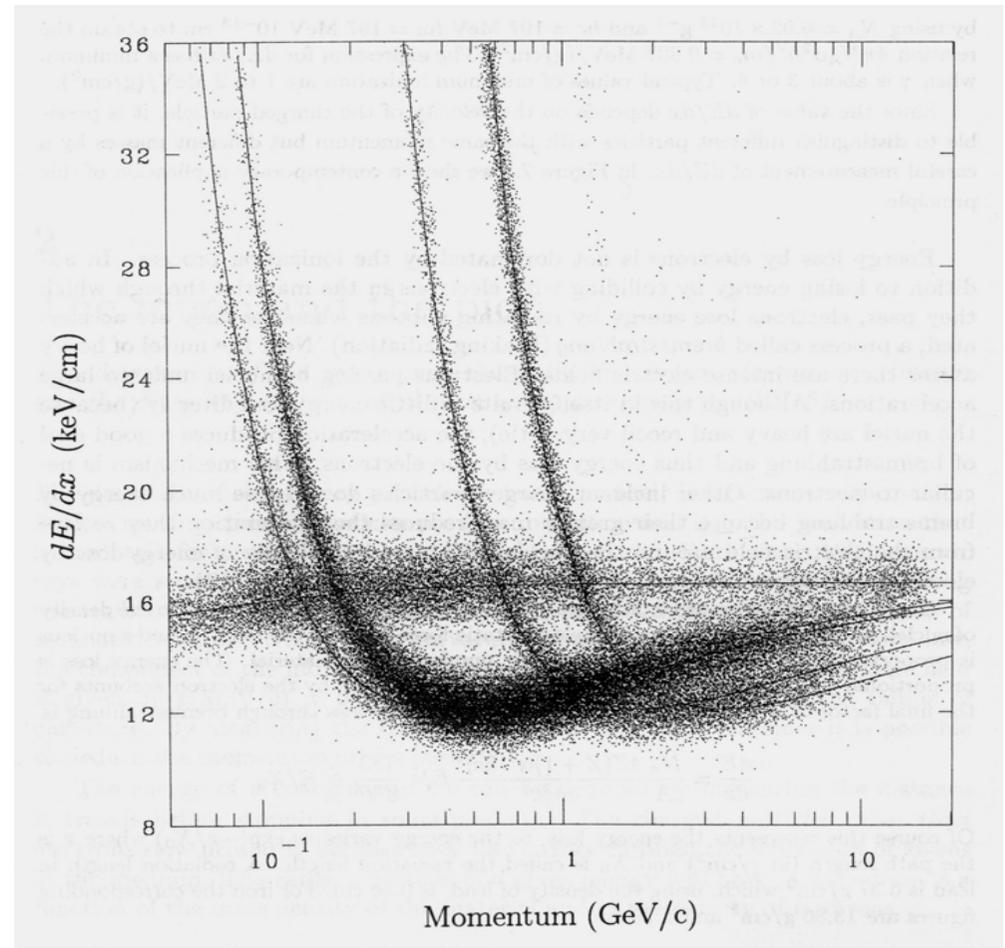
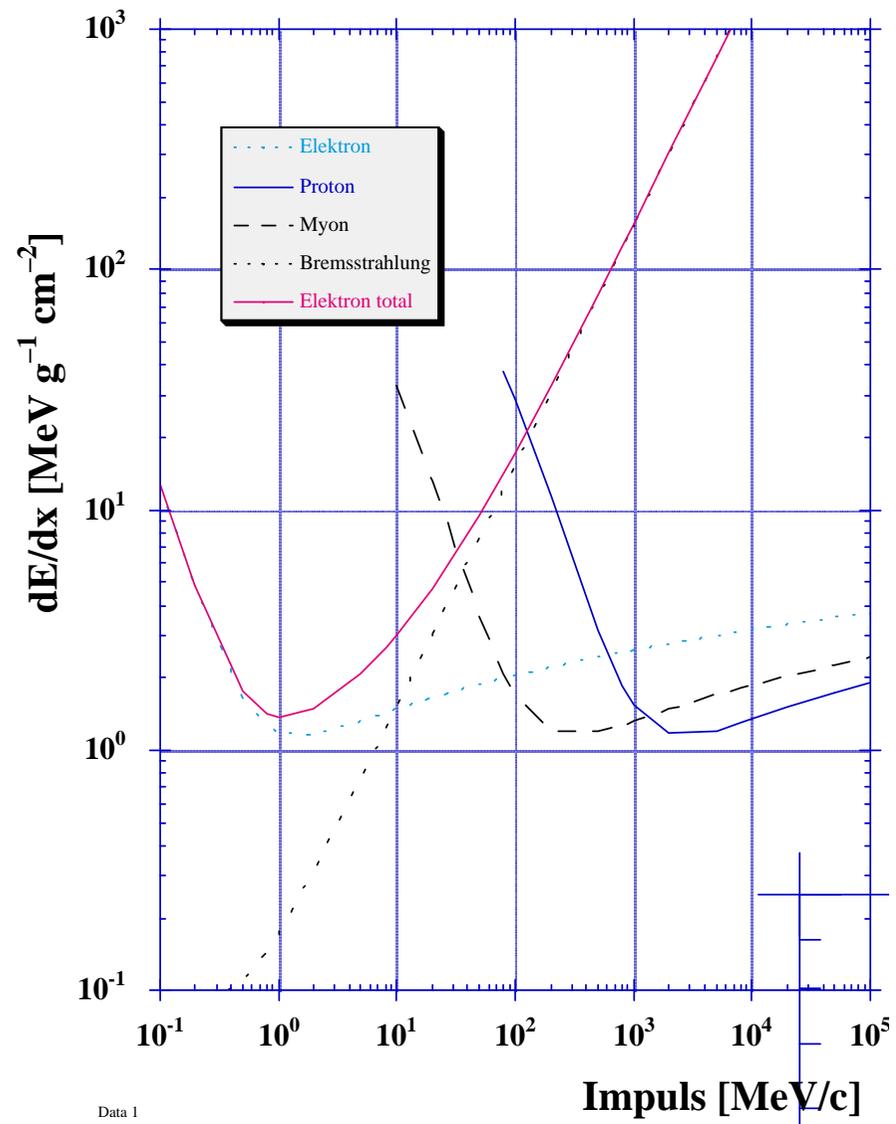
Elektr. Spurbilder

- Magnetspektrometer
  - Spurdetektoren & Magnetfeld

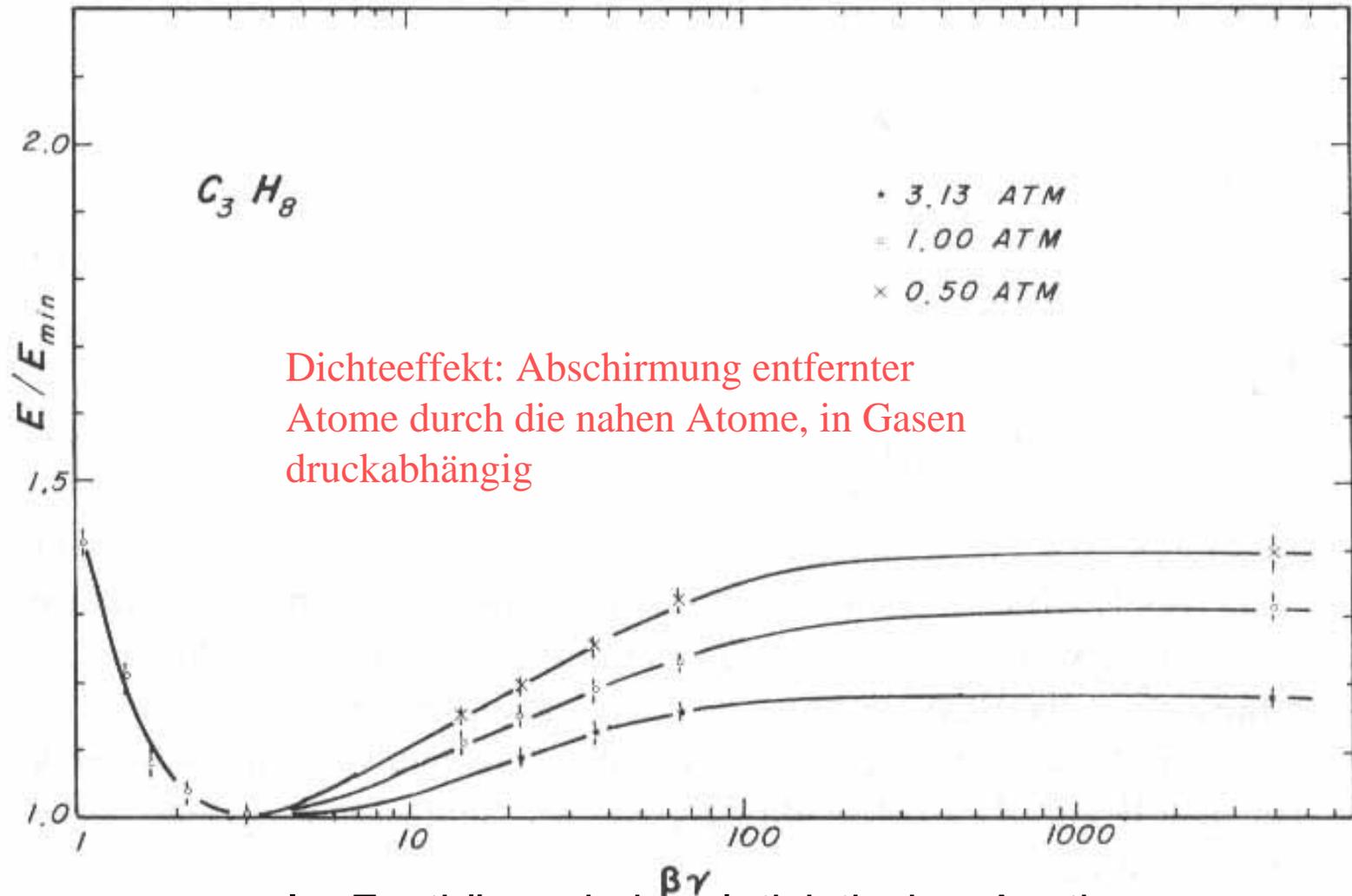
Totalabsorption der T.energie durch Bildung von Sekundärkaskaden

- Kalorimeter
  - Elektromagnetische ~
  - Hadronkalorimeter
  - Sampling- oder homogene K.
- Ionisationskammer Auch Strom-Modus
- Halbleiterdetektor
  - Massiv: Energiemessung
  - Dünn, segmentiert: Spurpunkte
- Szintillator Ionis.->Licht->q(t), U(t)
  - Massiv, segmentiert, Fibern
  - Zeitmessung
- Cherenkovzähler Lichtemission <-  $\beta$
- Übergangsstrahlung-Detektoren Röntgenlichtemission <-  $\gamma$

# $dE/dx$ in Pt (+Bremsstrahlung für Elektronen)



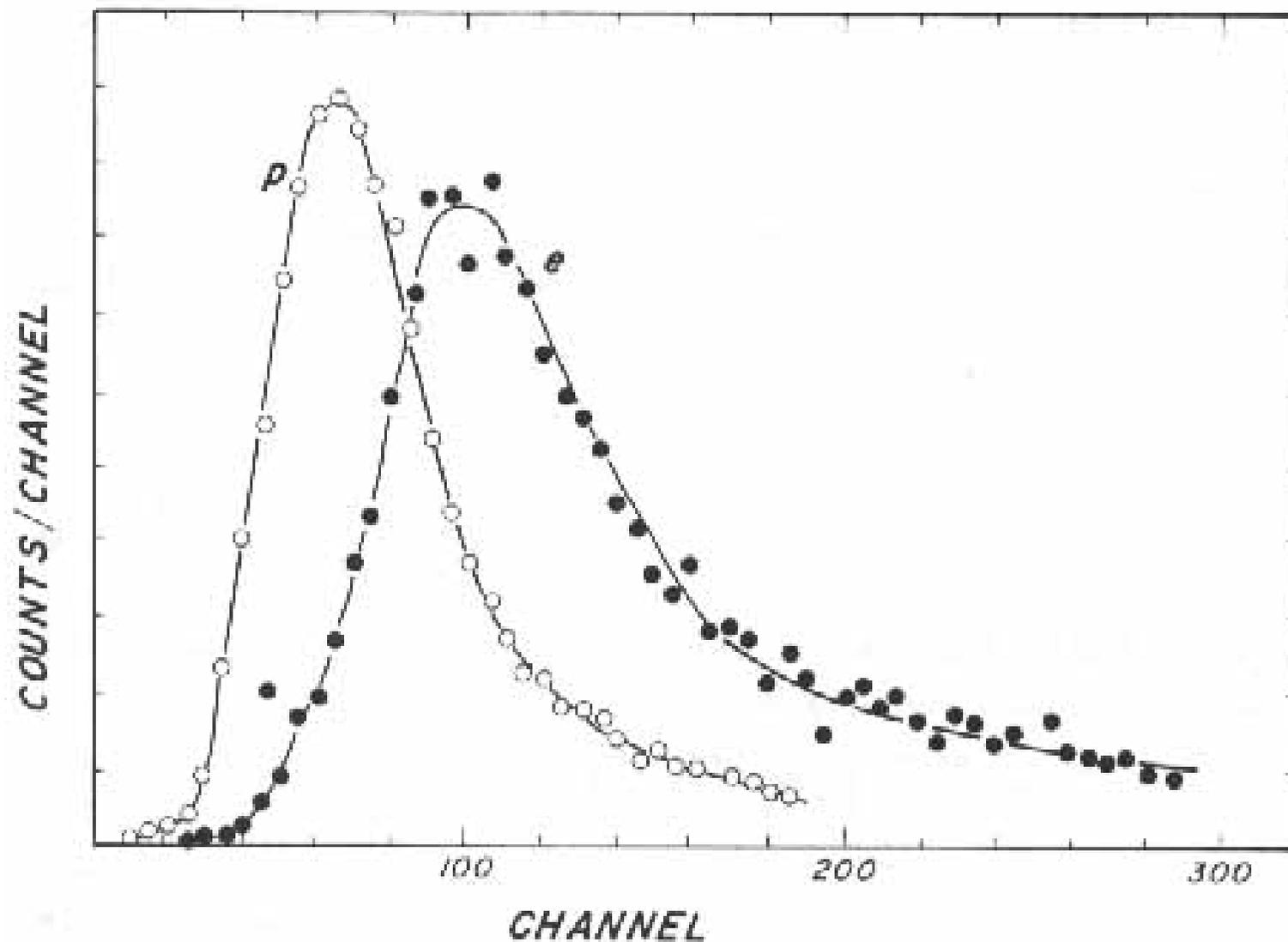
[Fernow] **Figure 2.6** Measured mean energy losses in propane as a function of pressure and  $\beta\gamma$ . The energy losses are normalized to those for 3-GeV/c protons. (After A. Walenta, J. Fischer, H. Okuno, and C. Wang, Nuc. Instr. Meth. 161: 45, 1979.)



Dichteeffekt: Abschirmung entfernter Atome durch die nahen Atome, in Gasen druckabhängig

Im Festkörper kein relativistischer Anstieg

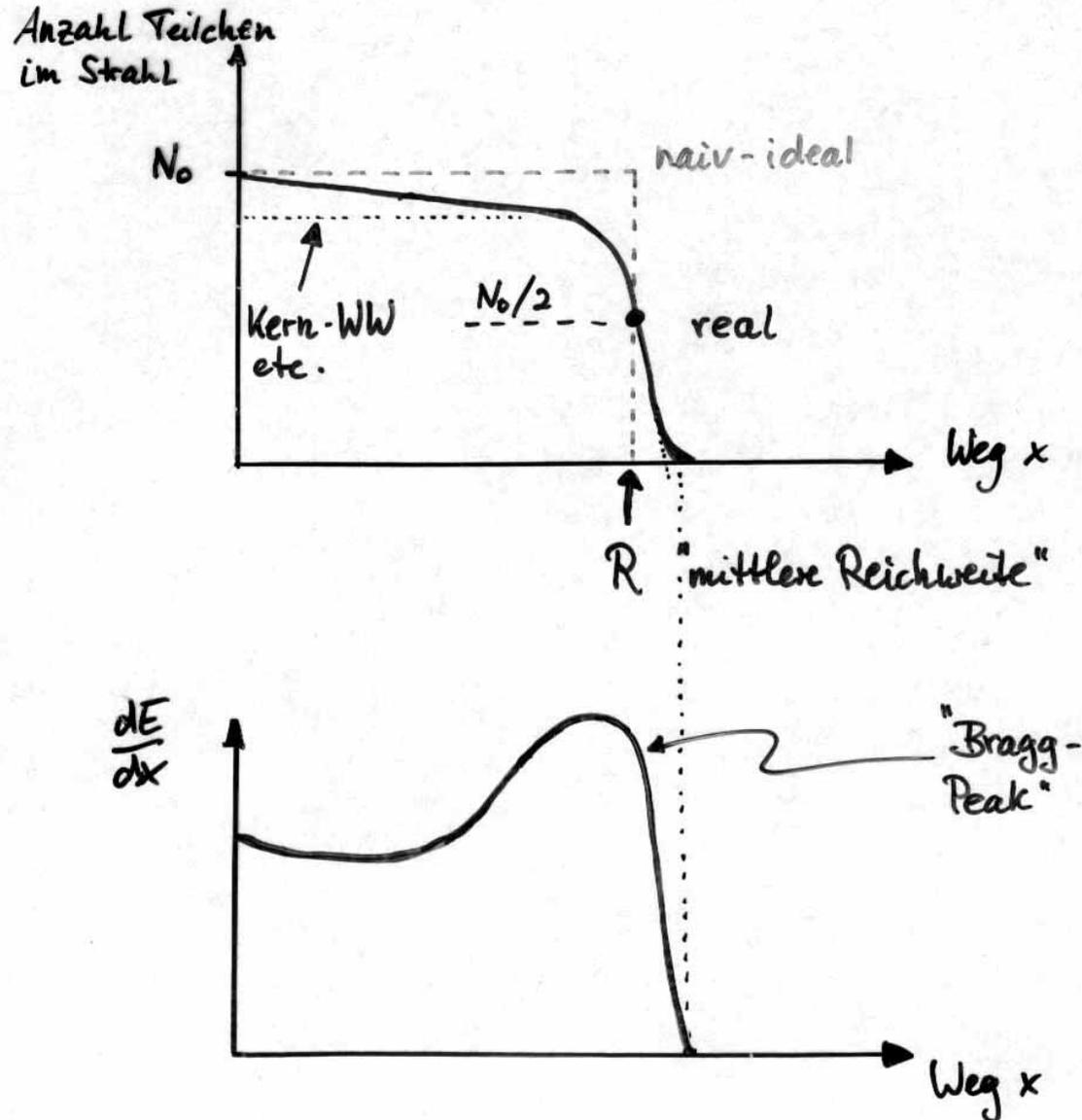
Figure 2.7 Measured pulse height distributions for 3-GeV/c protons and 2-GeV/c electrons in a 90% Ar + 10% CH<sub>4</sub> gas mixture. (After A. Walenta, J. Fischer, H. Okuno, and C. Wang, Nuc. Instr. Meth. 161: 45, 1979.)



# Reichweite geladener (schwerer) Teilchen

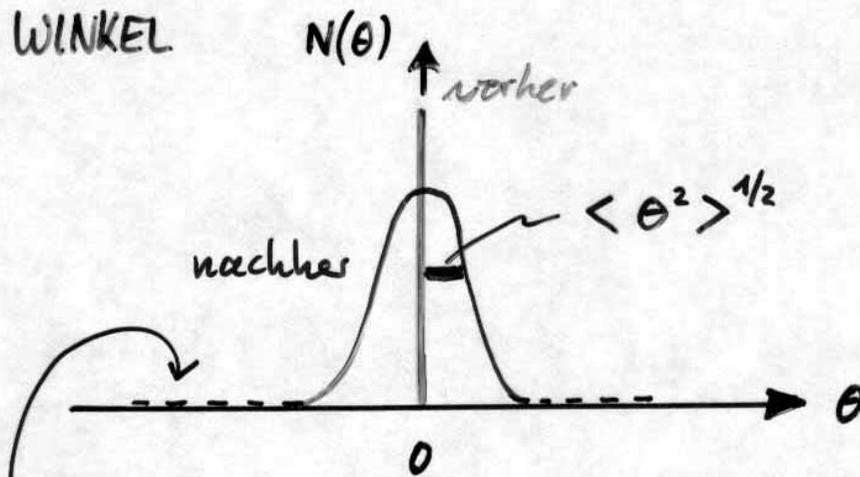
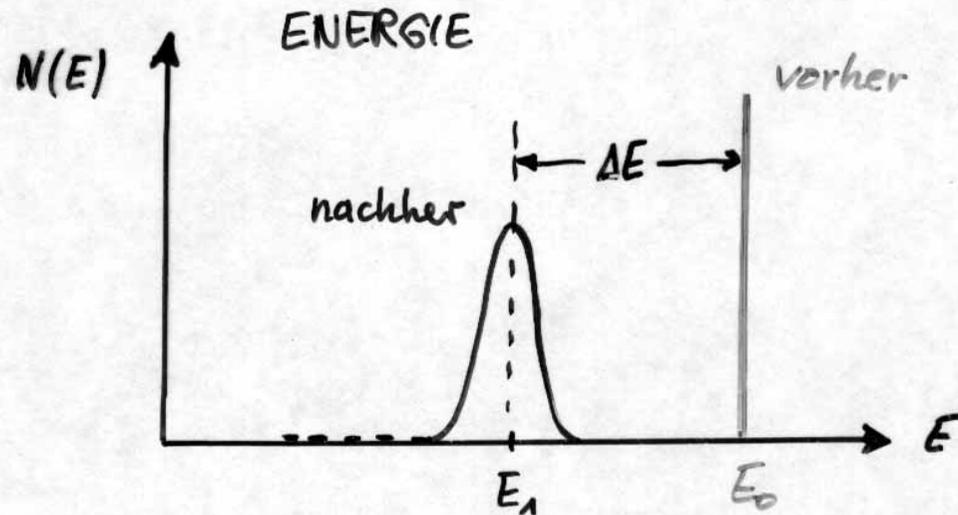
in Materie

$m \gg m_e$   
monoenergetisch,  $E$



Anwendung in der Medizin:  
3-D Tumorbestrahlung  
TERA-Projekt

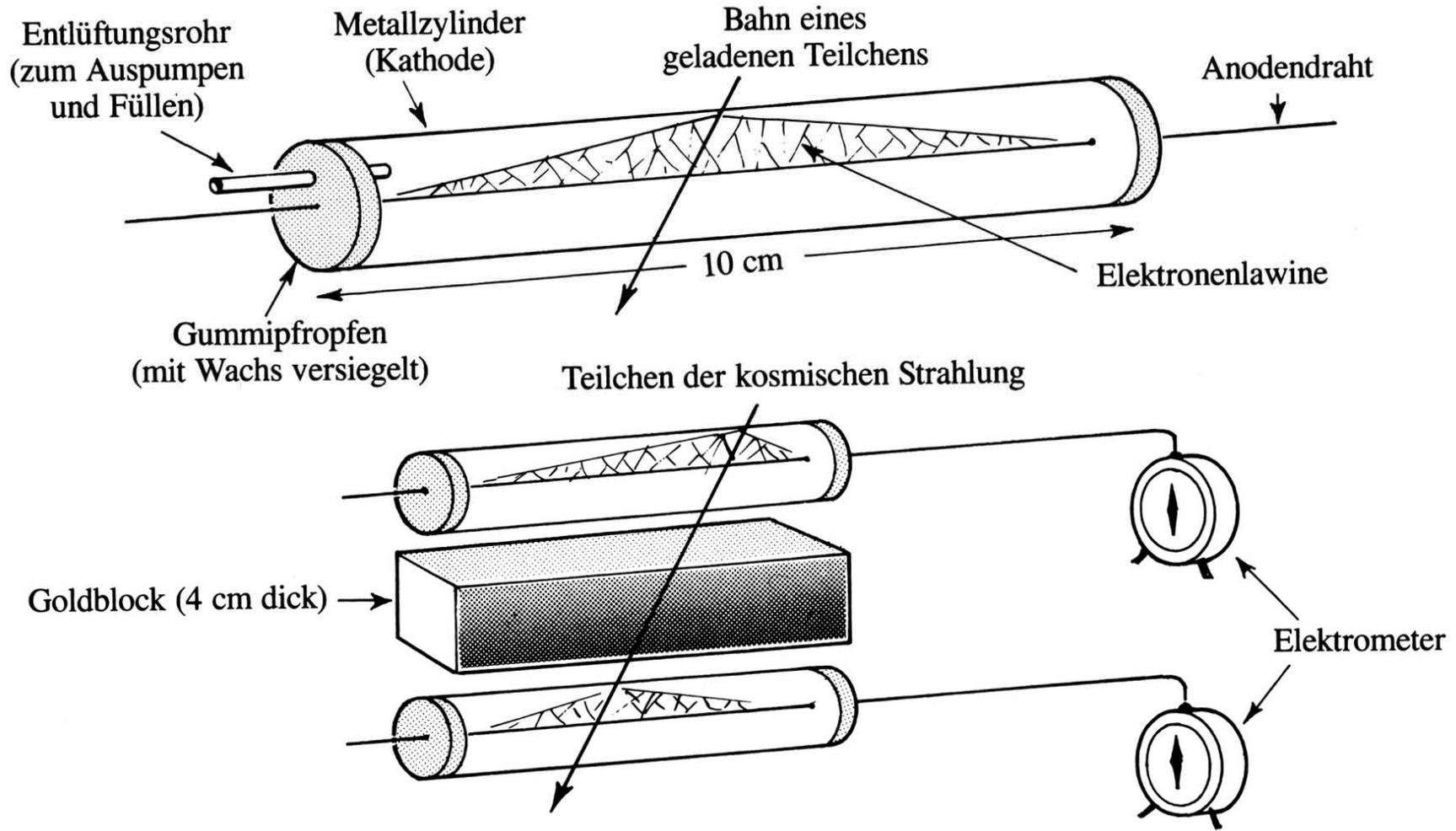
Absorbereinfluß auf einen parallelen, mono-energetischen Teilchenstrahl :



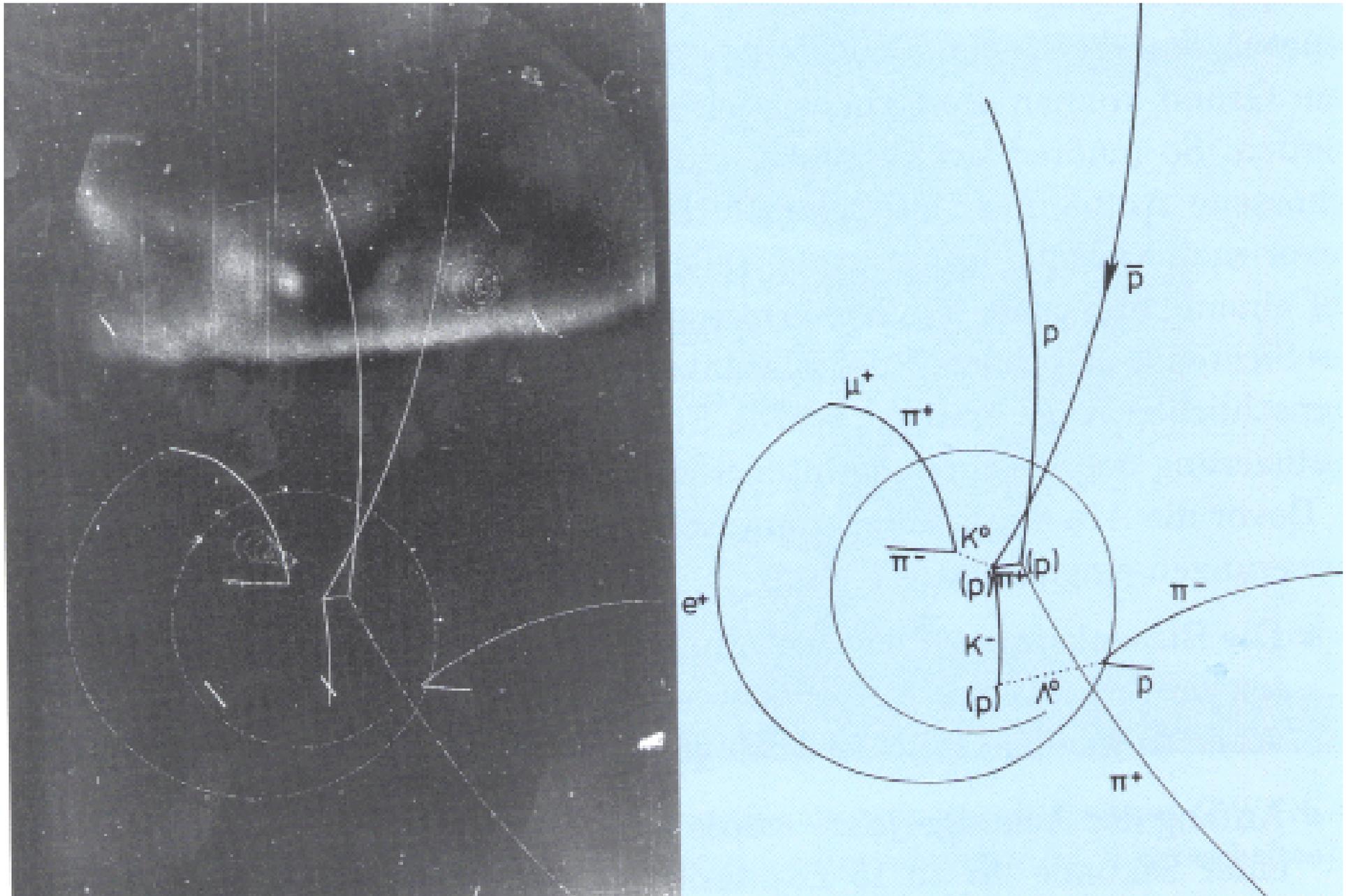
↙ nicht-gaussförmige Ausläufer

# Klassische Detektoranordnung... Zählrohre mit Koinzidenz

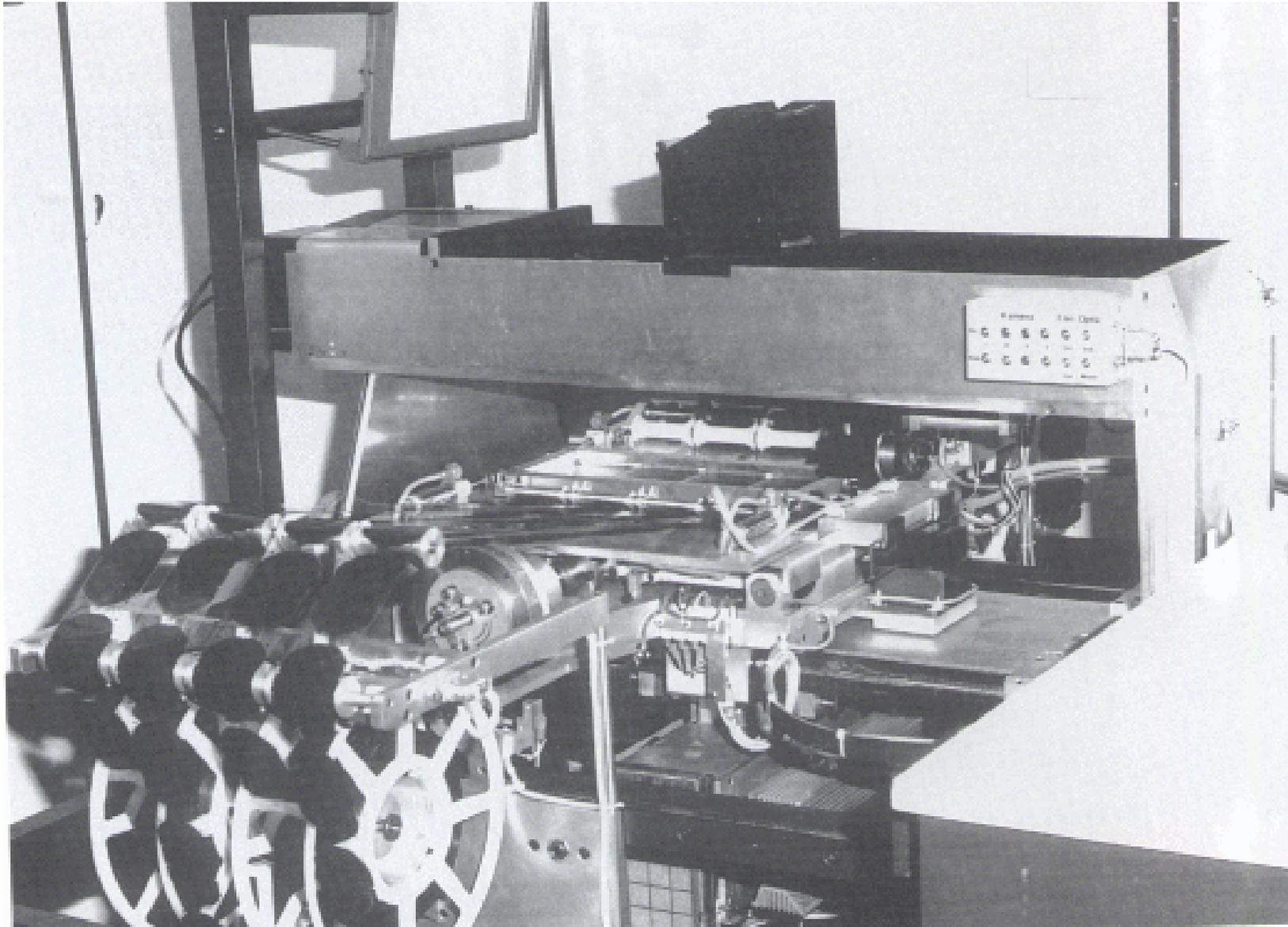
[„Spurensuche im Teilchenzoo“]



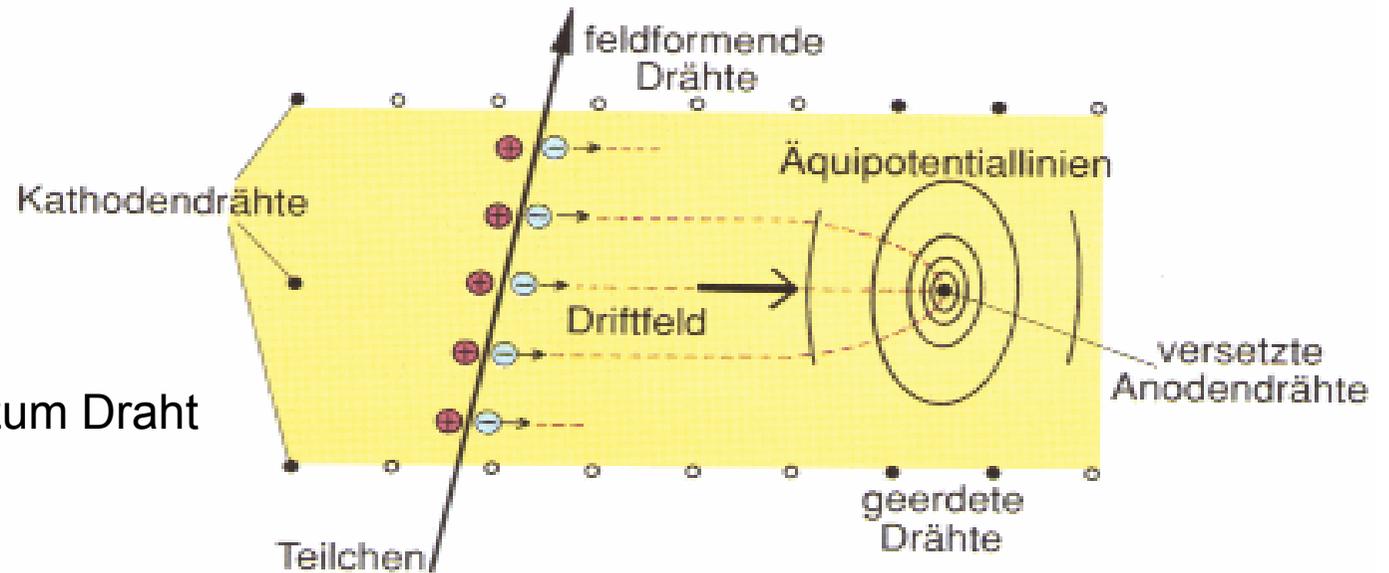
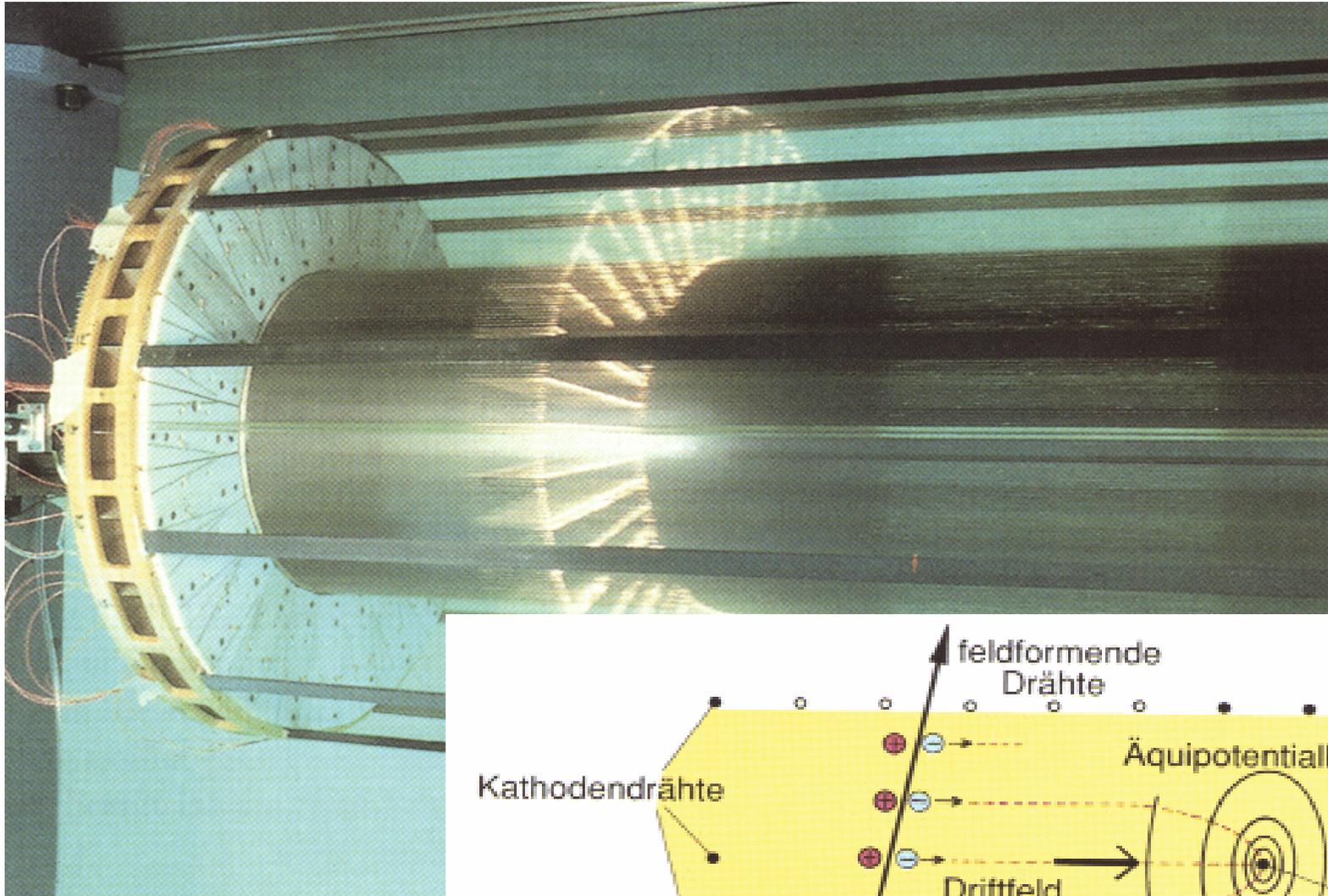
# Blasenkammer-Aufnahme



# Blasenkammer-Auswertungsmaschine

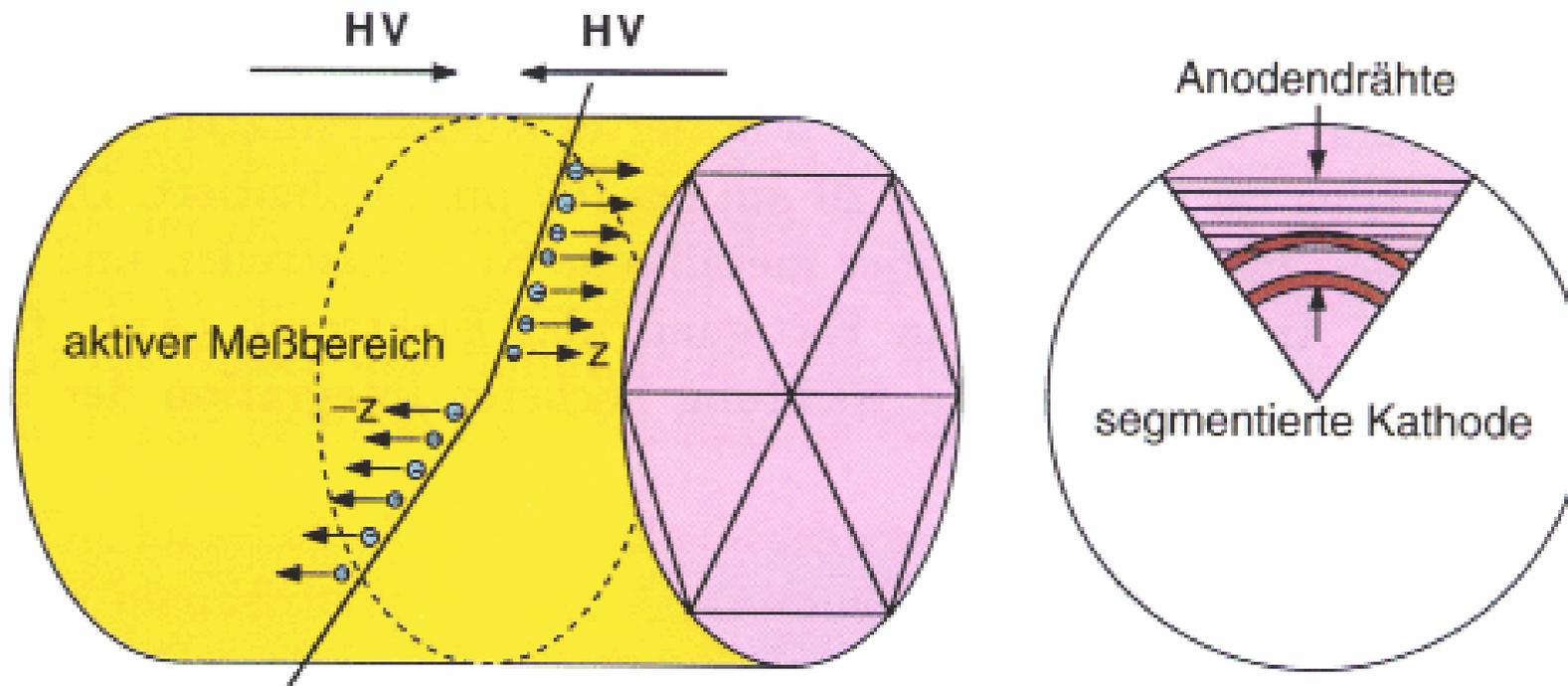


# Driftkammer



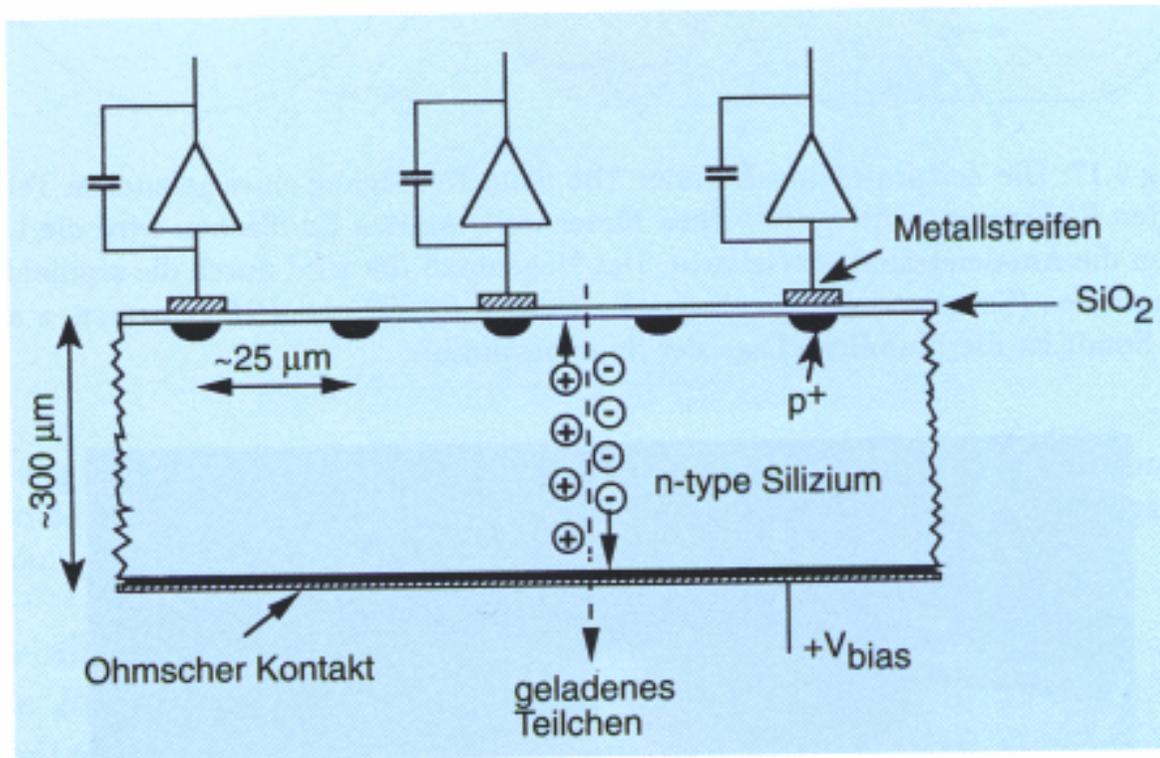
Driftzeit -> Distanz zum Draht

# TPC (Time Projection Chamber)



Driftdistanz bis zu Metern  
3-dimensionale Messpunkte, z aus Driftzeit  
B Feld parallel zu E-Feld minimiert Dispersion

# Silizium-Halbleiterdetektoren

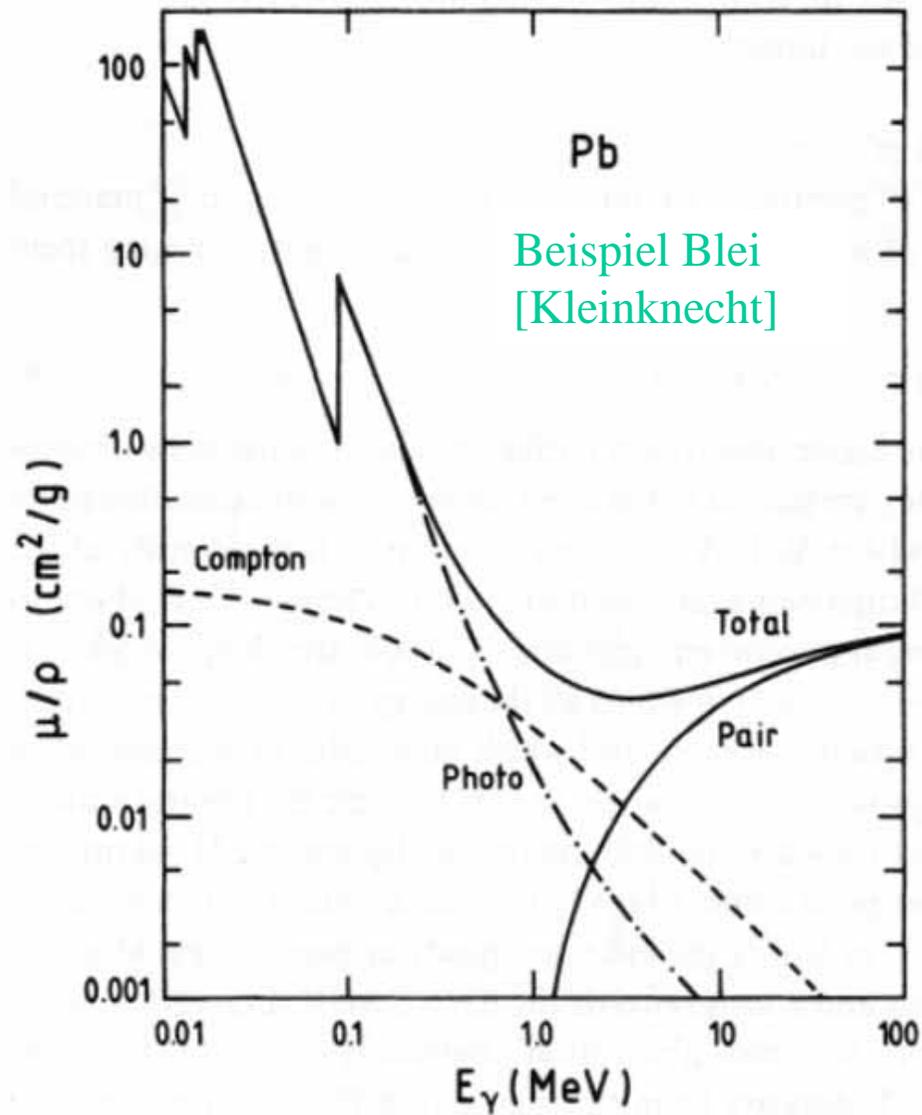


In Sperrrichtung  
Geschaltete Diode:

Elektron-Loch-Paare  
entlang der Spur liefern  
messbare Signale

# WW von Photonen mit Materie

Fig. 1.3. Mass absorption coefficient  $\mu/\rho$  for photons in lead.



# Kritische Energie und Strahlungslängen [Frauenfelder-Henley]

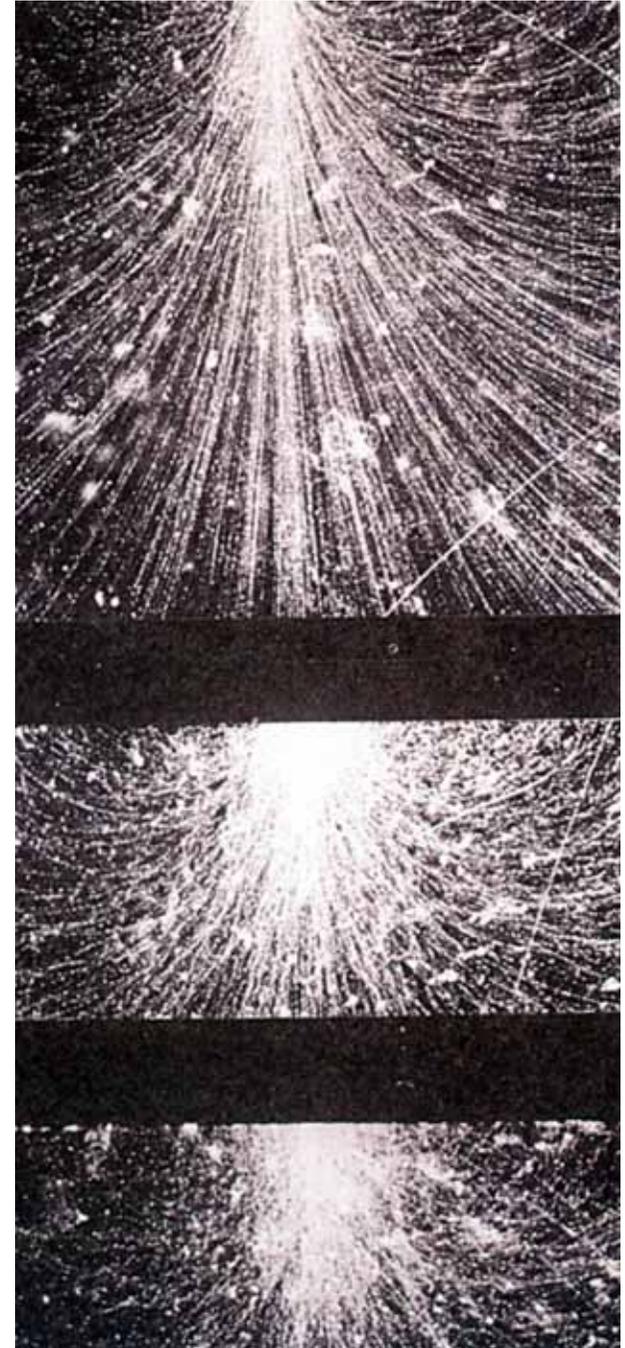
Tabelle 3.1 Werte für die kritische Energie  $E_c$  und die Strahlungslänge  $X_0$  für verschiedene Substanzen

Material	$Z$	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Kritische Energie (MeV)	Strahlungslänge	
				g/cm <sup>2</sup>	cm
H <sub>2</sub> (flüssig)	1	0,071	340	62,8	887
He (flüssig)	2	0,125	220	93,1	745
C	6	1,5	103	43,3	28
Al	13	2,70	47	24,3	9,00
Fe	26	7,87	24	13,9	1,77
Pb	82	11,35	6,9	6,4	0,56
Luft		0,0012	83	37,2	30 870
Wasser		1	93	36,4	36,4

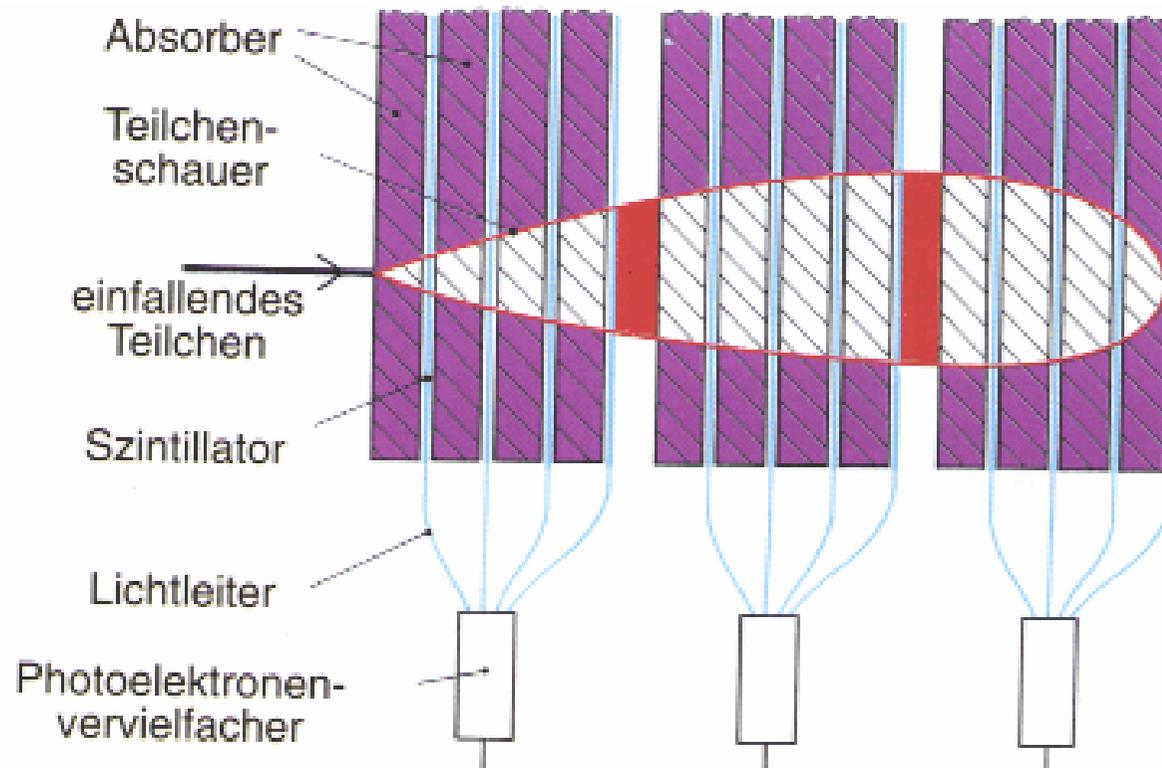
# Sekundärteilchenkaskaden

[„Spurensuche im Teilchenzoo“]

**7.3** Pi-null-Teilchen, die in hochenergetischen Wechselwirkungen der kosmischen Strahlung in der oberen Atmosphäre entstehen, zerfallen schnell in Gammastrahlung und können Schauer von Elektronen und Positronen erzeugen. Hier wurde ein solcher Schauer in einer Nebelkammer produziert, an die ein Magnetfeld angelegt war. Ein hochenergetischer Gammastrahl erzeugte im oberen Teil der Kammer eine Kaskade von Elektron-Positron-Paaren, die durch das Magnetfeld in entgegengesetzte Richtungen abgelenkt wurden. Durch gegenseitige Vernichtung und Zerstrahlung erzeugten die Elektronen und Positronen weitere Gammastrahlen; dort, wo diese Strahlen auf die zwei hintereinander angeordneten Bleiplatten trafen, wiederholte sich dieser Prozeß, wodurch sich der Teilchenschauer jedesmal erneuerte.



# Elektromagnetisches Kalorimeter



Photon  $\rightarrow$  Paarbildung

Elektron, Positron  $\rightarrow$  Bremsstrahlung

$\rightarrow$  Schauerbildung (Elektron-Photon-Kaskade)

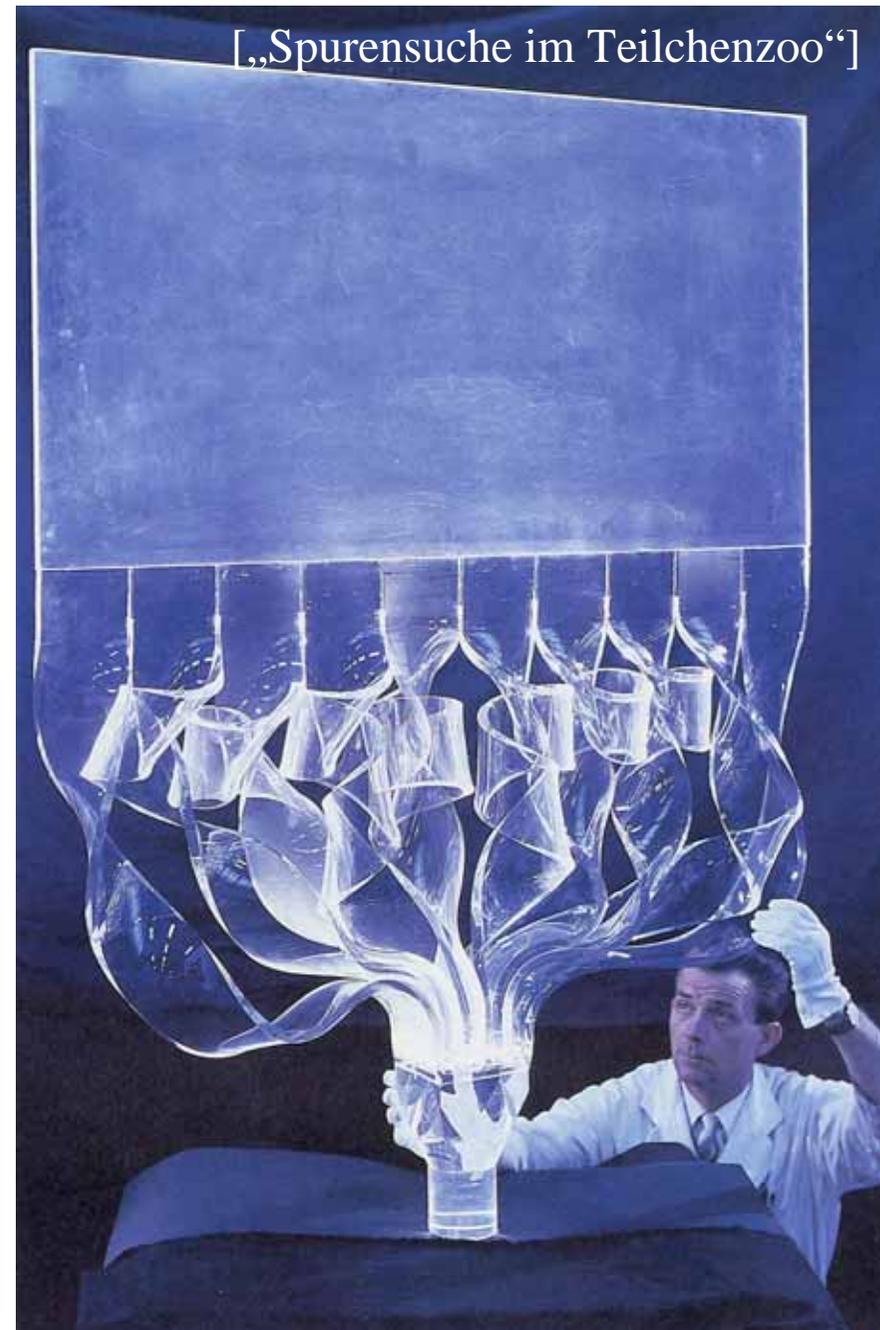
Zur Messung der Gesamtenergie

E.M. Kalorimeter: Kurze Strahlungslänge, z.B. Blei

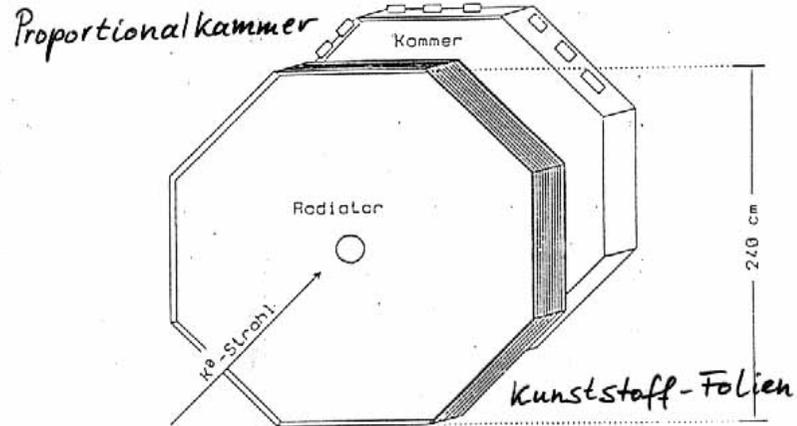
Hadronische Kalorimeter: kurze Wechselwirkungslänge, bezahlbar, z.B. Eisen

## Szintillatorzähler mit Lichtleiter

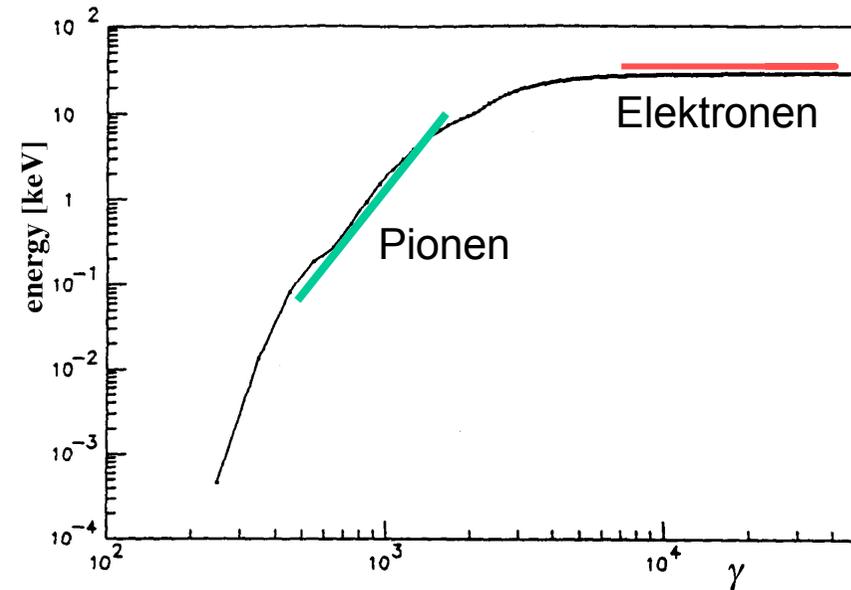
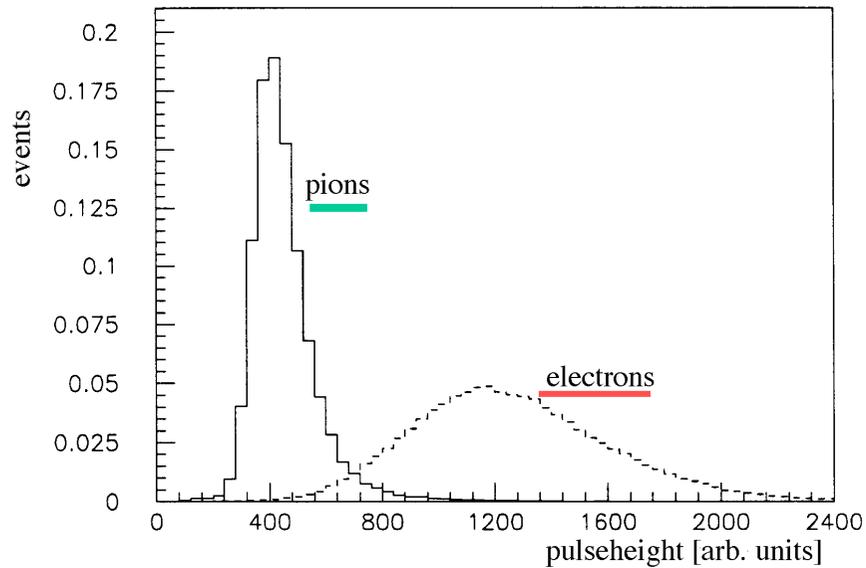
**6.15** Hier wird eine große rechteckige Platte eines Plastikszintillators für ein Experiment am CERN vorbereitet. Die geschwungenen Streifen sind Lichtleiter aus Acrylglas, die das im Szintillator emittierte Licht sammeln und es in das Rohrstück unten im Bild leiten. Das Rohrende wird direkt auf einen Photomultiplier aufgesetzt. Die ganze Anordnung wird sorgfältig in eine reflektierende Folie eingepackt und anschließend mit schwarzem Papier umwickelt, um sie vollständig gegen Licht abzuschirmen. Beachten Sie, daß alle Lichtleiter gleich lang sind, so daß gleichzeitig emittiertes Licht auch zur selben Zeit im Photomultiplier eintrifft, egal aus welchen Teilen des Szintillators es jeweils stammt.



# Übergangsstrahlung



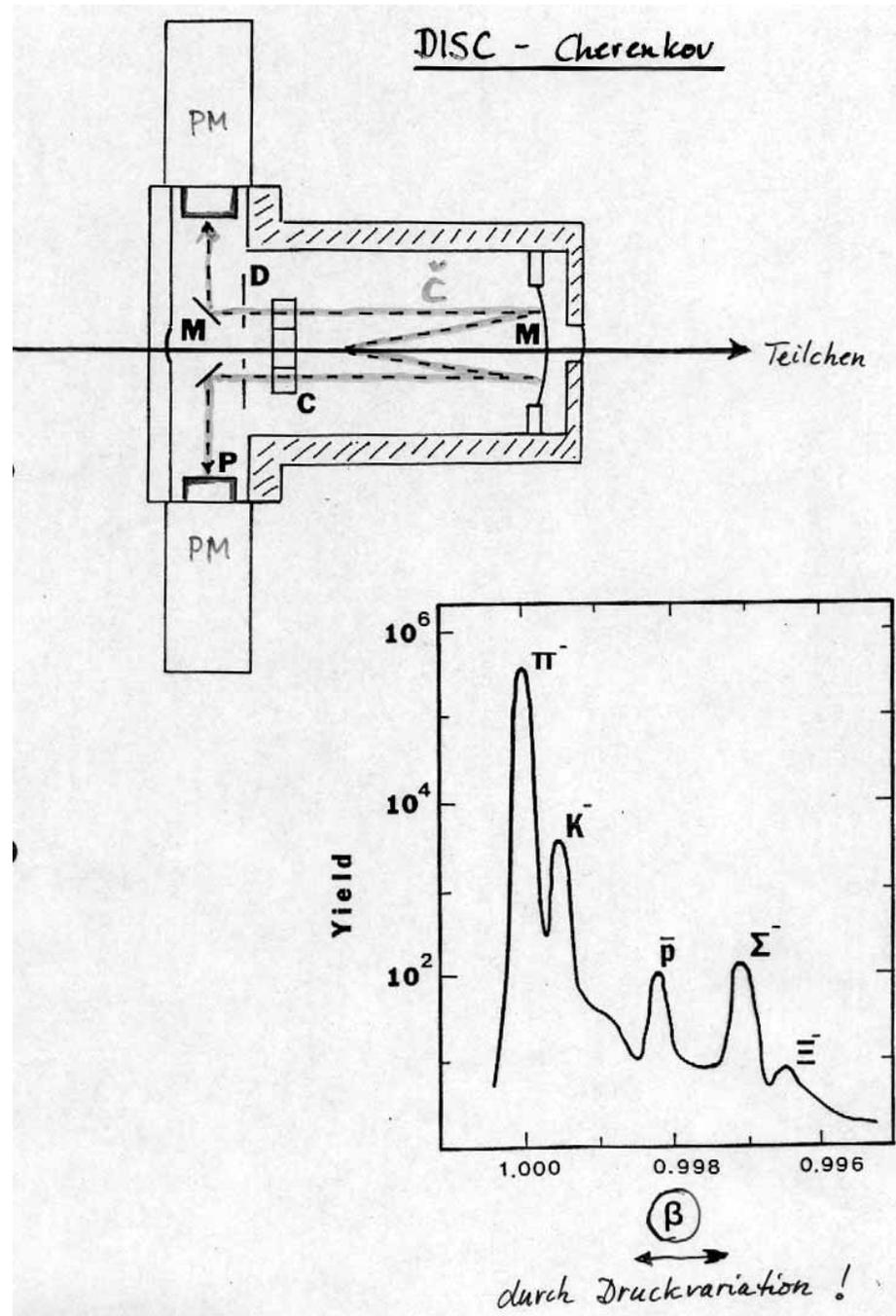
Emission von Röntgenstrahlung an Grenzflächen, wenn eine Änderung des Brechungsindex auftritt ==> Stapel dünner Folien + Proportionalkammer mit schwerem Zählgas. Abhängig vom Lorentzfaktor -> Teilchenidentifizierung



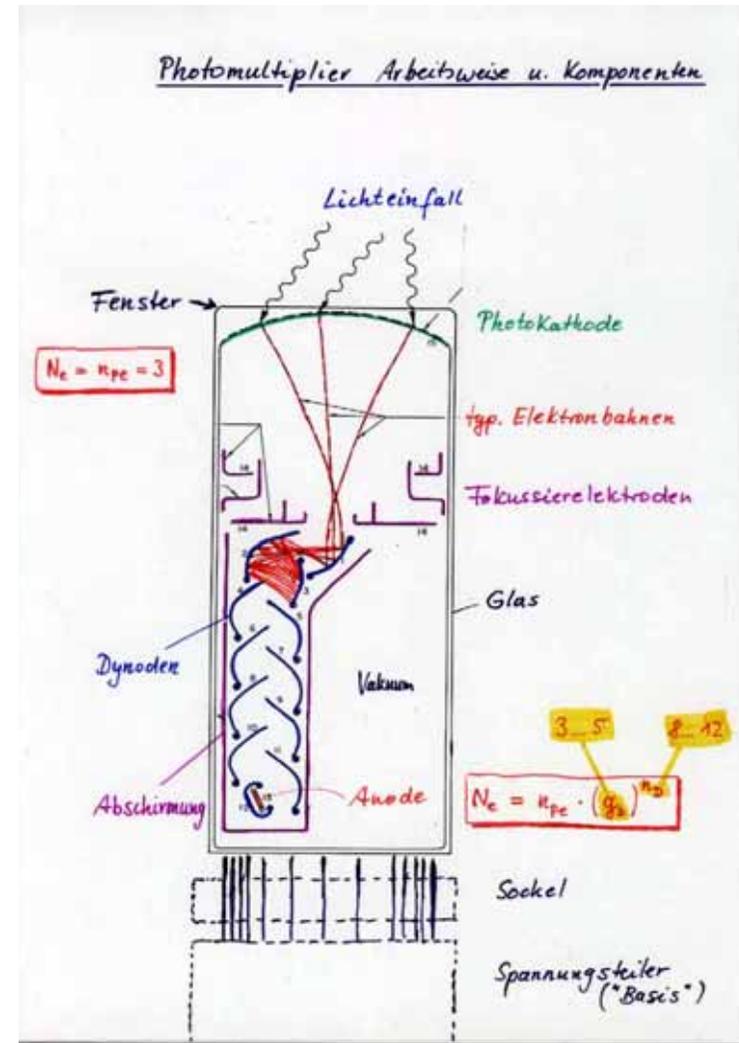
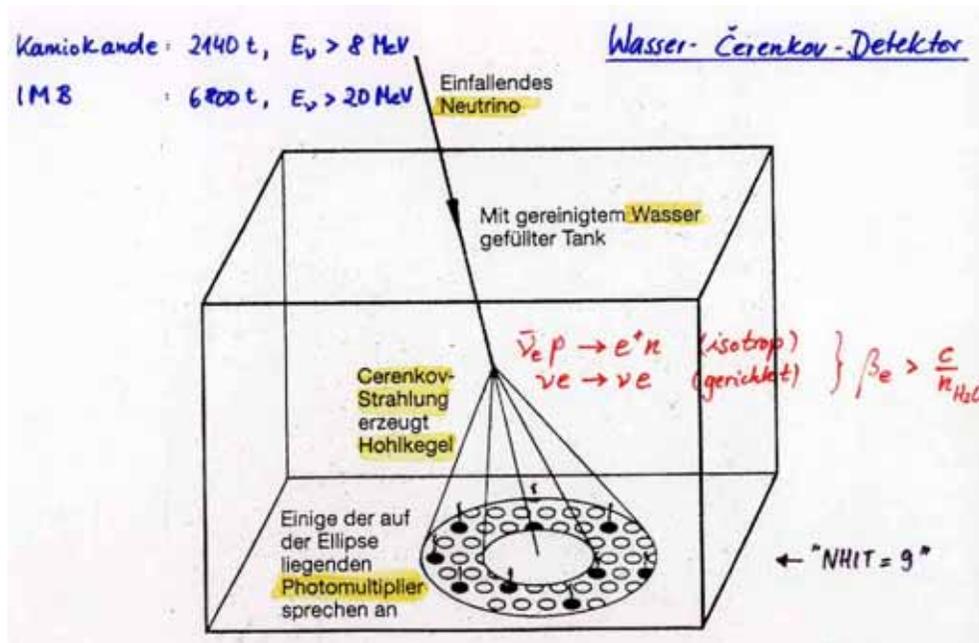
# Cherenkoveffekt

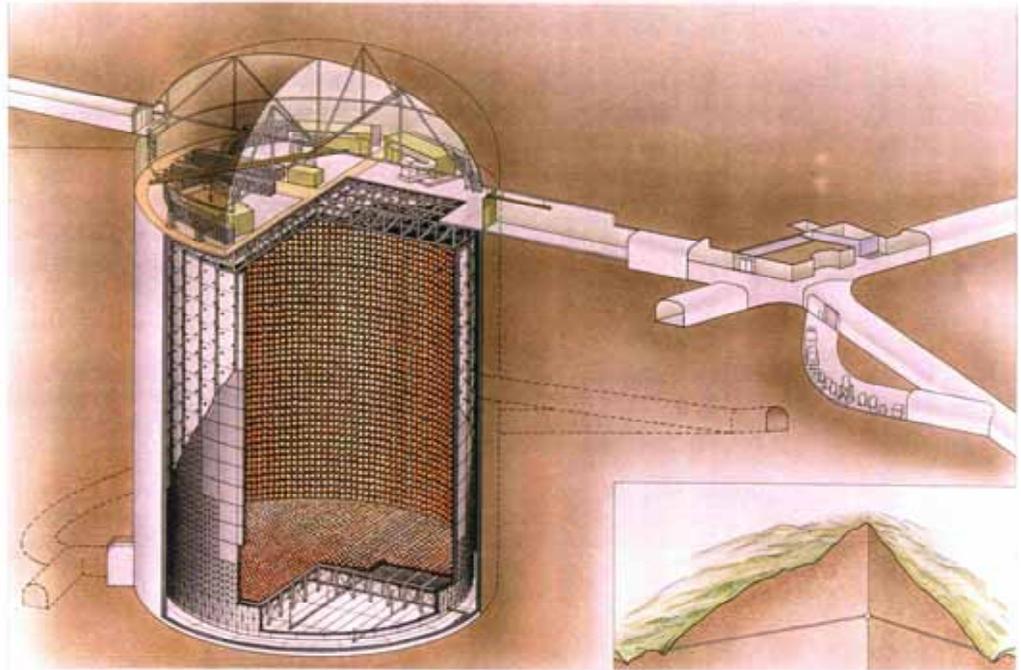
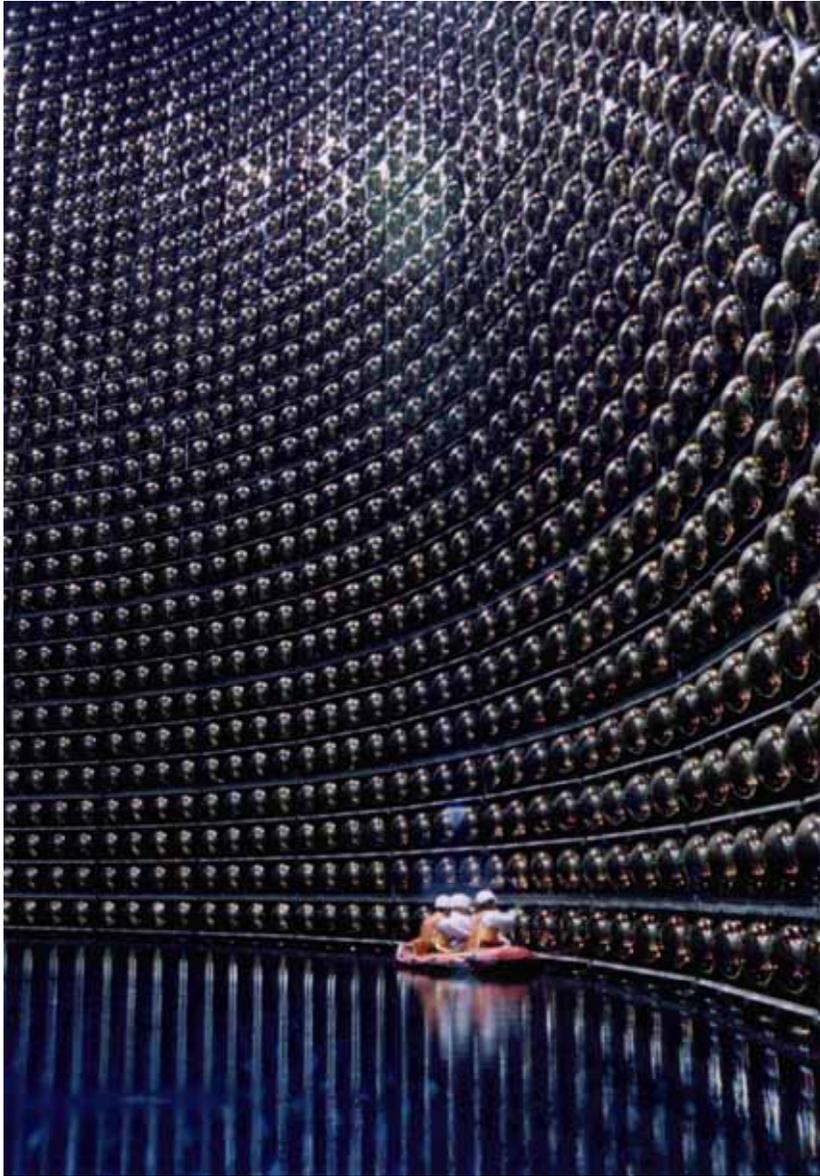
$$v > c/n$$

$$\cos \theta_c = 1/n\beta$$



# Cherenkovdetektor und Photomultiplier

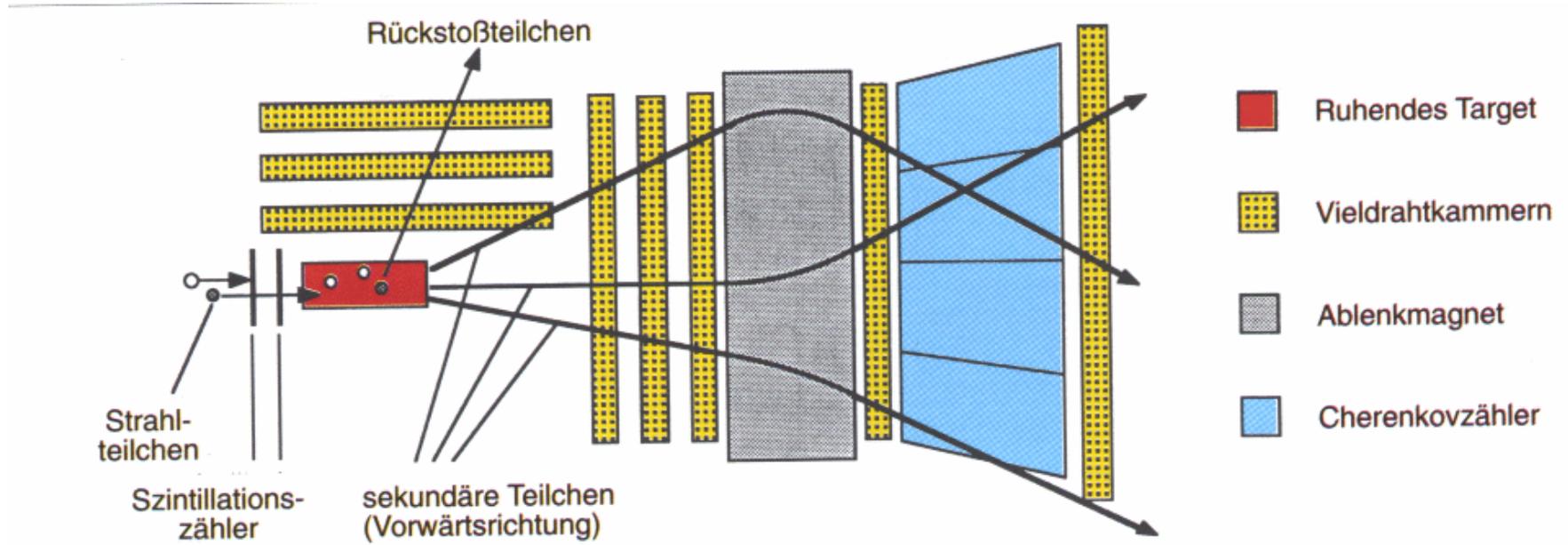




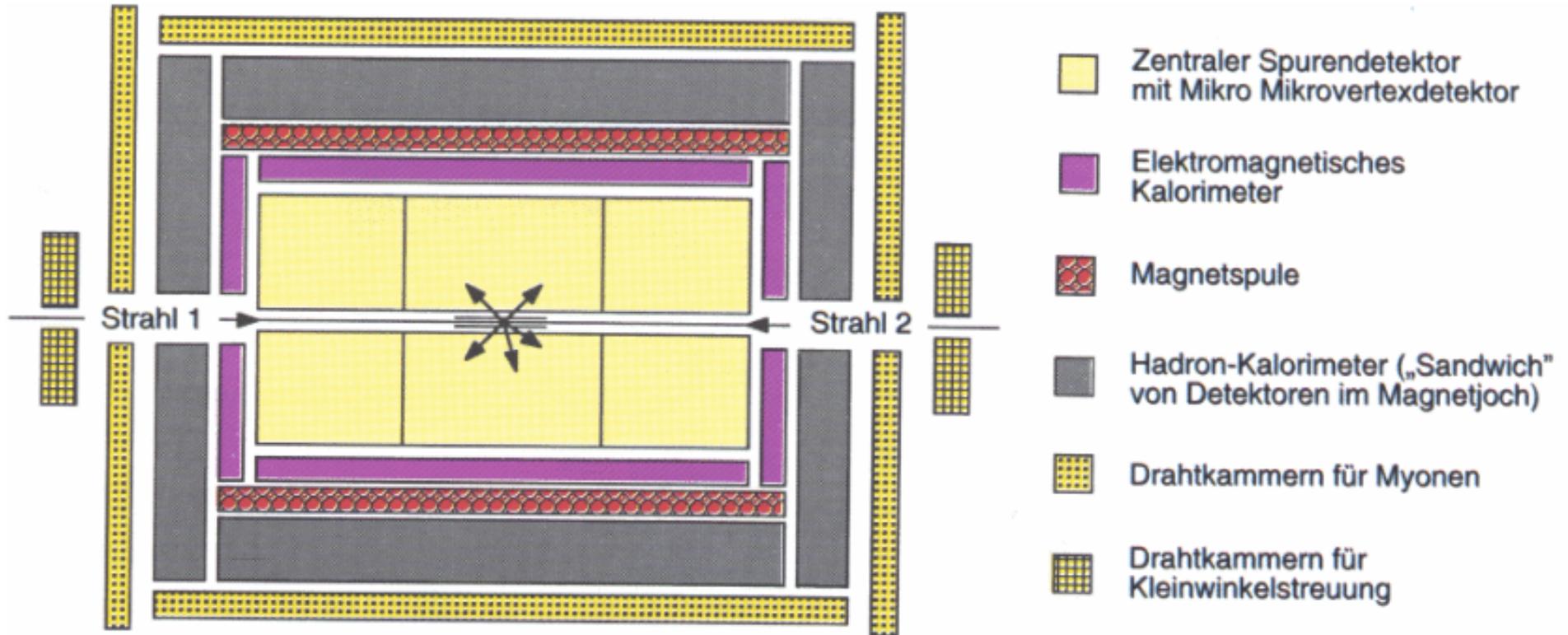
SUPERKAMIOKANDE INSTITUTE FOR COSMIC RAY RESEARCH UNIVERSITY OF TOKYO

Naoki Sawai

# Typisches Fixed-Target-Experiment

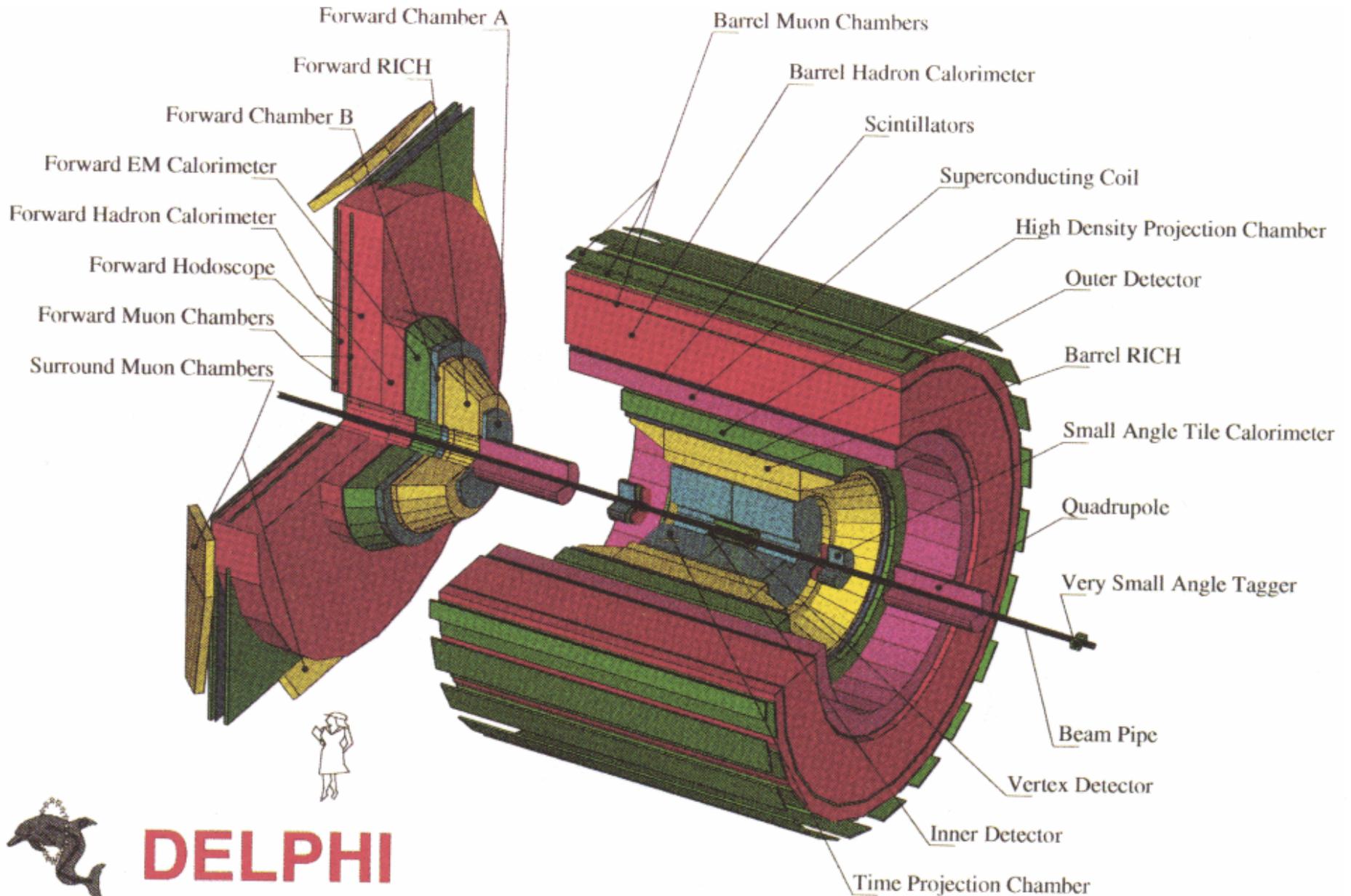


# Typisches Speicherring-Experiment

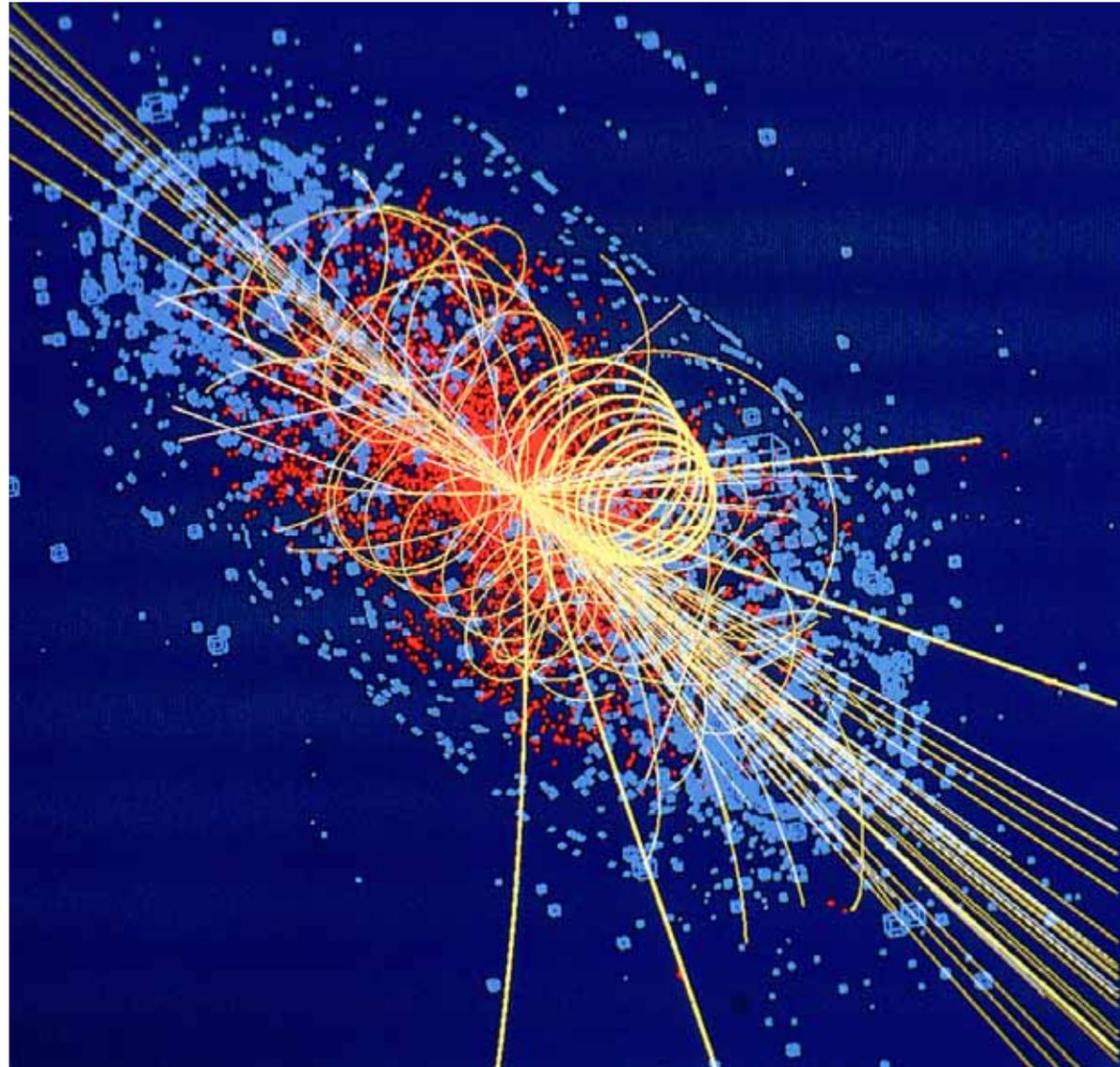


Innen nach außen: wenig Materie, Spurkammern im Magnetfeld  
→ viel Materie, e.m., hadronisches Kalorimeter,  
Eisenabsorber, Myonkammern

# Typisches Speicherring-Experiment



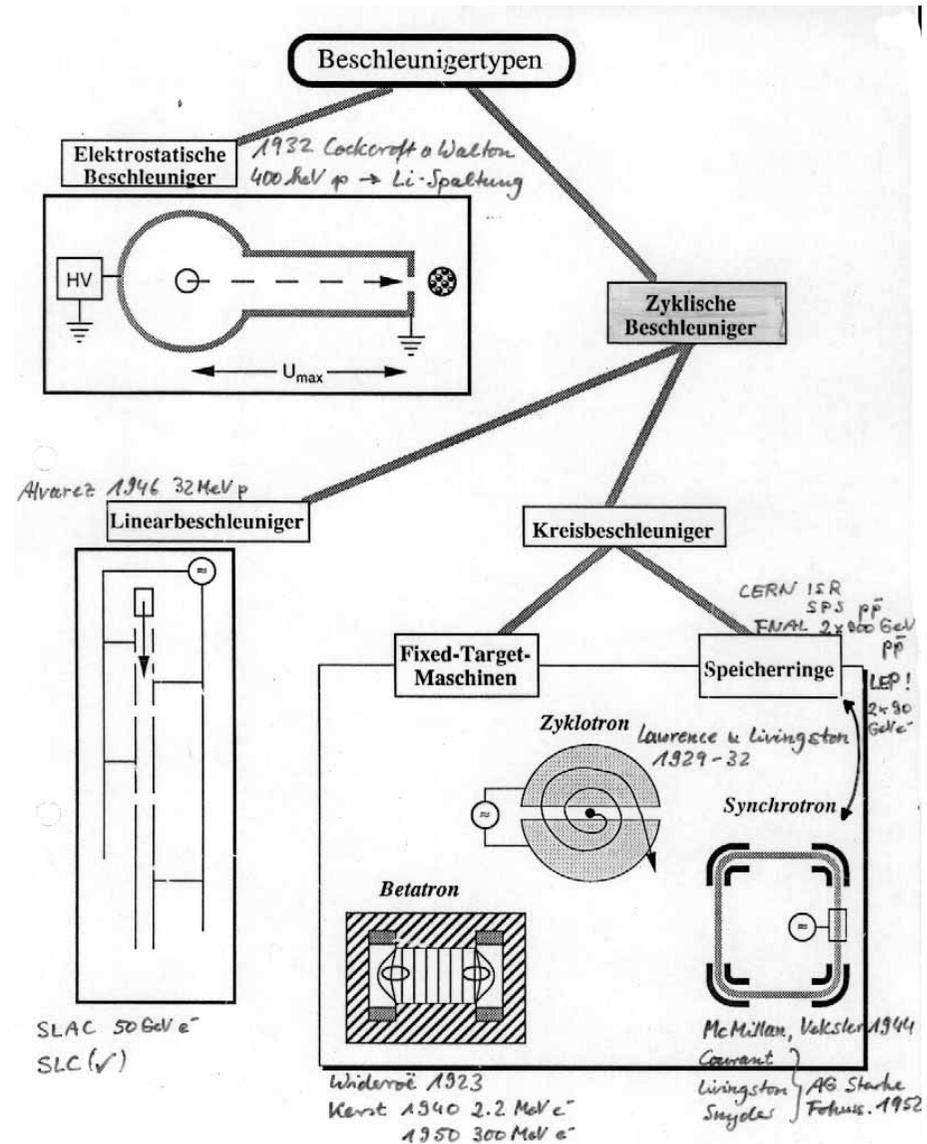
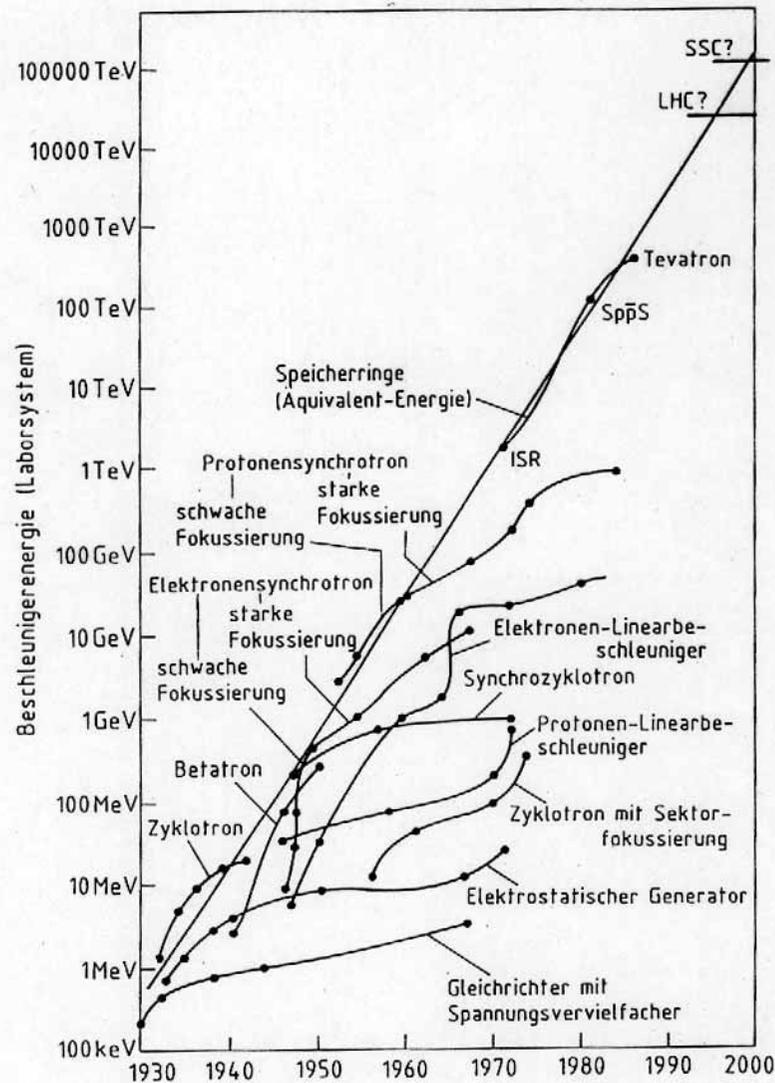
**DELPHI**



# ATLAS am LHC



# Beschleuniger: äquiv. Schwerpunktsenergie und Typenübersicht



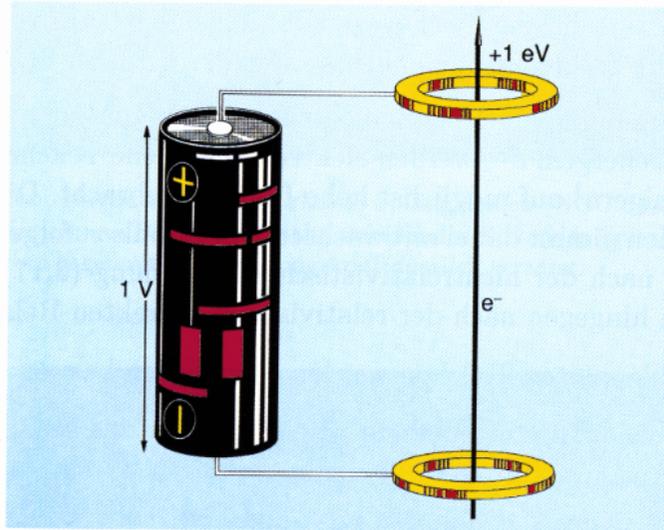


Abbildung 4.1: Die Energieeinheit „Elektronvolt“. Ein Elektronvolt (eV) ist genau diejenige (kinetische) Energie, die ein elektrisch geladenes Teilchen mit der Elementarladung  $e$ , also z. B. ein Elektron, beim Durchlaufen einer Potentialdifferenz von einem Volt aufnimmt.

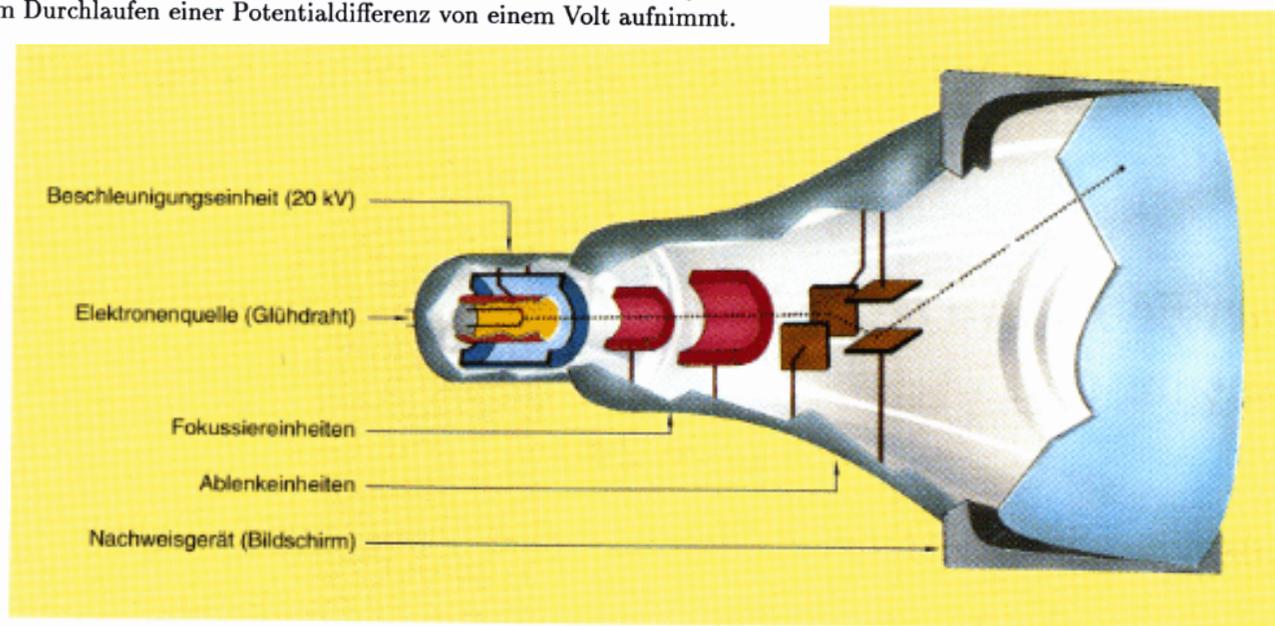


Abbildung 4.2: Die Fernschröhre. Sie enthält alle Grundbausteine eines Beschleunigers.

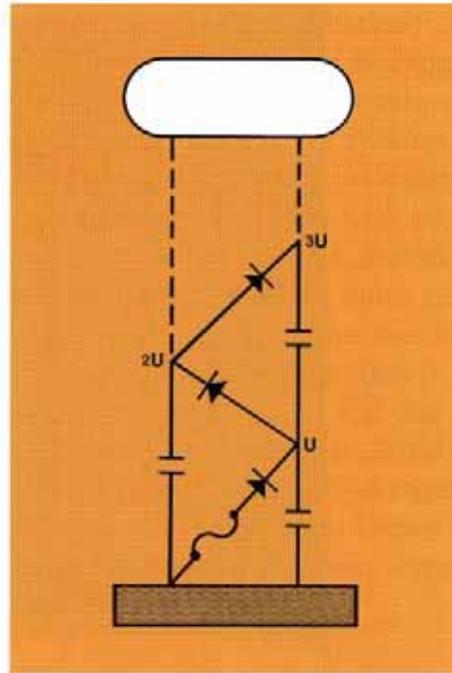


Abbildung 4.3: Kaskadengenerator (COCKCROFT und WALTON, 1932). Gleichrichter (also elektronische Schaltelemente, die den Strom ausschließlich in einer einzigen Richtung durchlassen) und Kondensatoren bringen, wie im Schaltkreis angedeutet, die obere Elektrode auf Hochspannung. Die Kondensatoren sind bei Aufladung auf Grund der Durchlaßrichtung der Gleichrichter de facto parallel geschaltet; bei Entladung addieren sich die Spannungen an den Kondensatoren „kaskadenartig“. Die solcherart erzielte Hochspannung kann in einer Kathoden-Anoden-Anordnung zur Teilchenbeschleunigung im Hochvakuum verwendet werden.

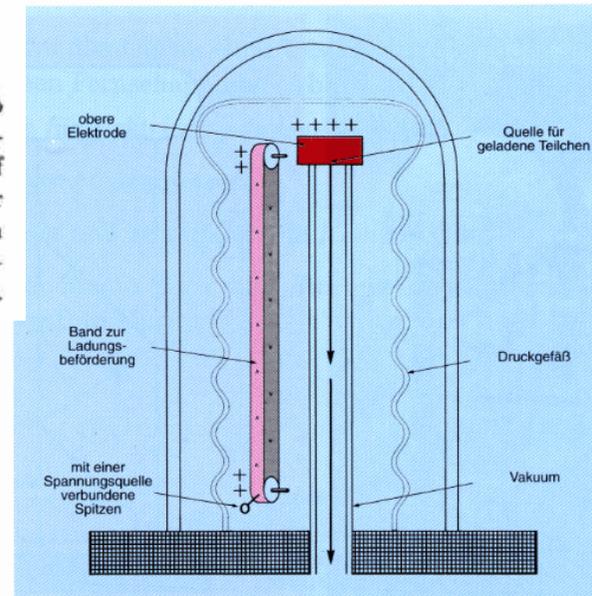


Abbildung 4.4: Elektrostatisher oder Band-Generator (VAN DE GRAAFF, 1934). Auf niedriger Spannung wird elektrische Ladung auf ein bewegtes, nichtleitendes Band gesprüht, welches diese elektrische Ladung an die obere Elektrode abgibt. Der Einschluß der Komponenten in Edelgas unter hohem Druck ermöglicht es, die obere Elektrode, wo sich auch die Teilchenquelle befindet, auf einer Spannung von mehreren MV zu halten. Elektrostatische Teilchenbeschleuniger dienen auch heute noch als Vorbeschleuniger für moderne Linearbeschleuniger.

# Teilchenoptik

Quadrupol fokussiert in einer Ebene,  
Defokussiert in der anderen

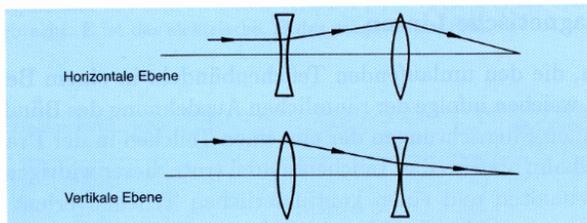
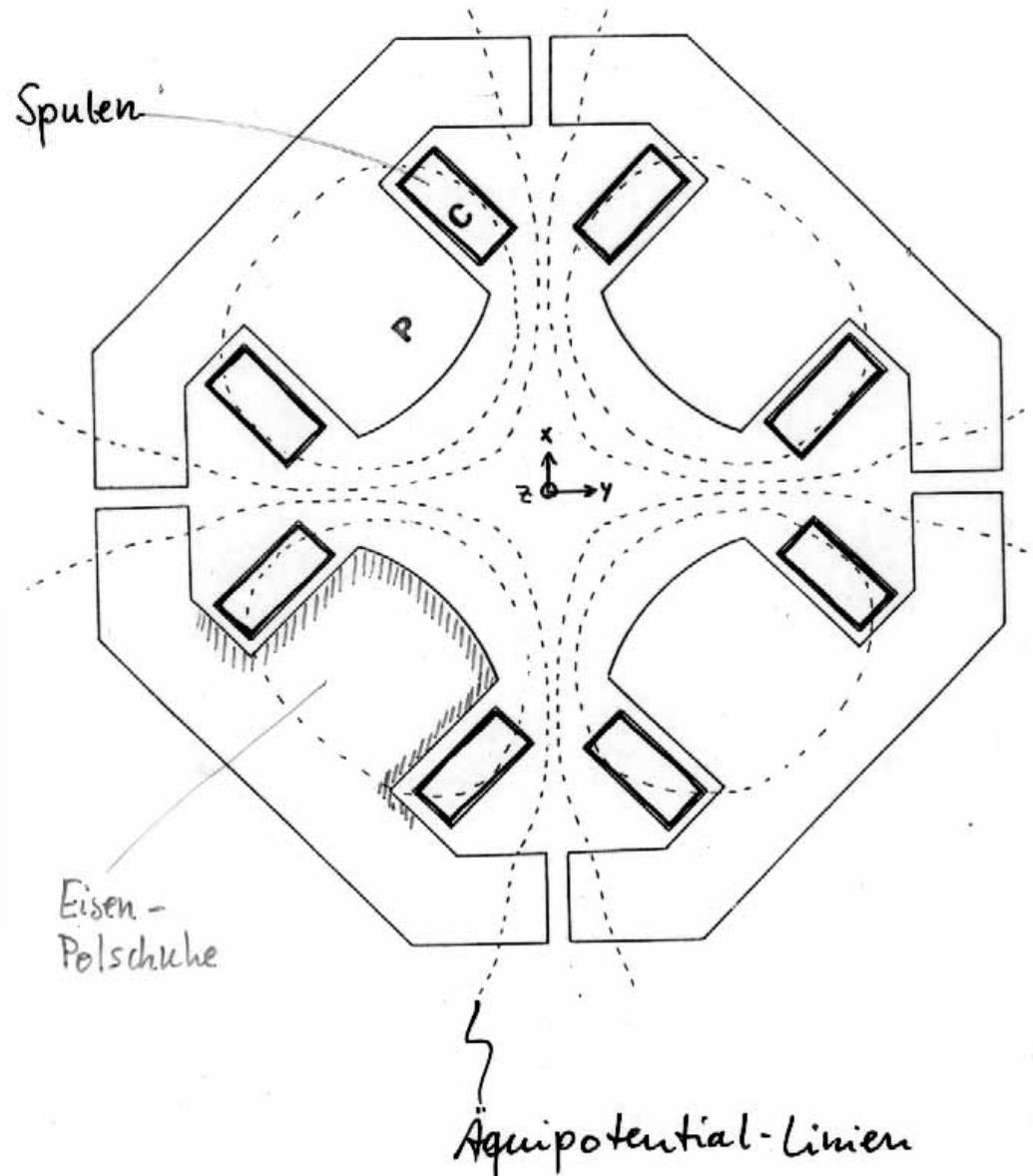


Abbildung 4.10: Dublette von Quadrupolen. Mit mindestens zwei Quadrupolen lässt sich eine in beiden Transversalrichtungen fokussierend wirkende Linse erzeugen.

**STARKE FOKUSSIERUNG:**  
Abwechselnd fokussierend/defokussierend:  
Effektiv: fokussierend

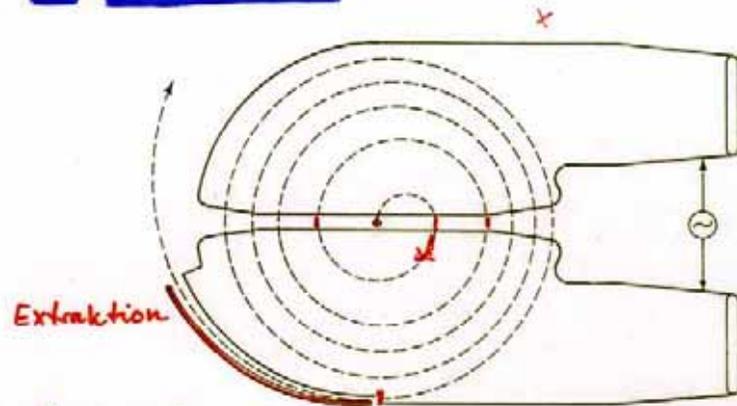
## Quadrupolmagnet

[Fe Figure 4.7] Quadrupole magnetic field. The field vanishes on the axis. (C) one of the coils and (P) one of the iron pole faces. Dotted lines show equipotentials. (Assisted by Rutherford Appleton Laboratory.)

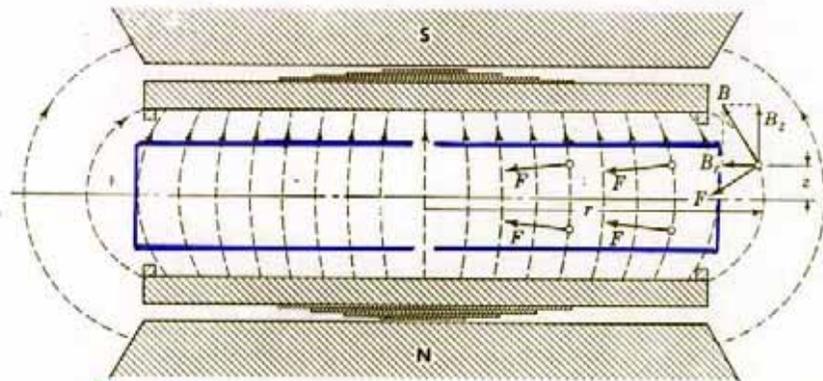


# Klassische Beispiele für Kreis- und Linearbeschleuniger

## Zyklotron

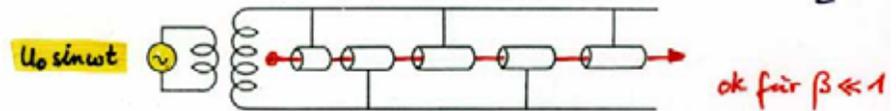


[LB Fig. 6-1] Schematic diagram of cyclotron electrodes showing ion paths. "D"



[LB Fig. 6-7] Radially decreasing magnetic field between poles of a cyclotron magnet, showing shims for field correction.

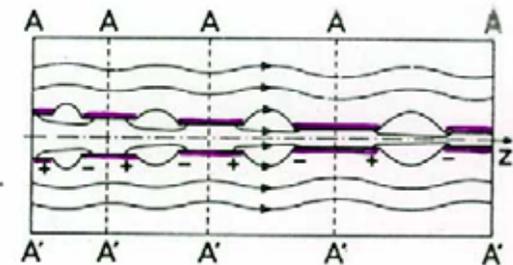
Wideröe-Linac : Driftröhren = Elektroden  
 $L$  Länge  $l_i = \frac{\beta \lambda_w}{2}$



[Sep. FIG. 1.] The Sloan-Lawrence accelerator, which is typical of all linear accelerators with drift tubes.

[Daniel]

Alvarez-Struktur,  
 "Momentaufnahme",  
 Feld zwischen zwei  
 Driftröhren für  
 positive Teilchen in  
 z-Richtung beschleunigend.  
 Die Linien A-A' deuten die mögliche Unterteilung in einzelne Hohlräume an.



Eine einzige stehende Welle  
 $TM_{010}$ , Abschirmung durch  
 Driftröhren der Länge  $\beta \lambda$  oder  
 $\beta \lambda / 2$   
 ok für  $\beta \lesssim 0.4$

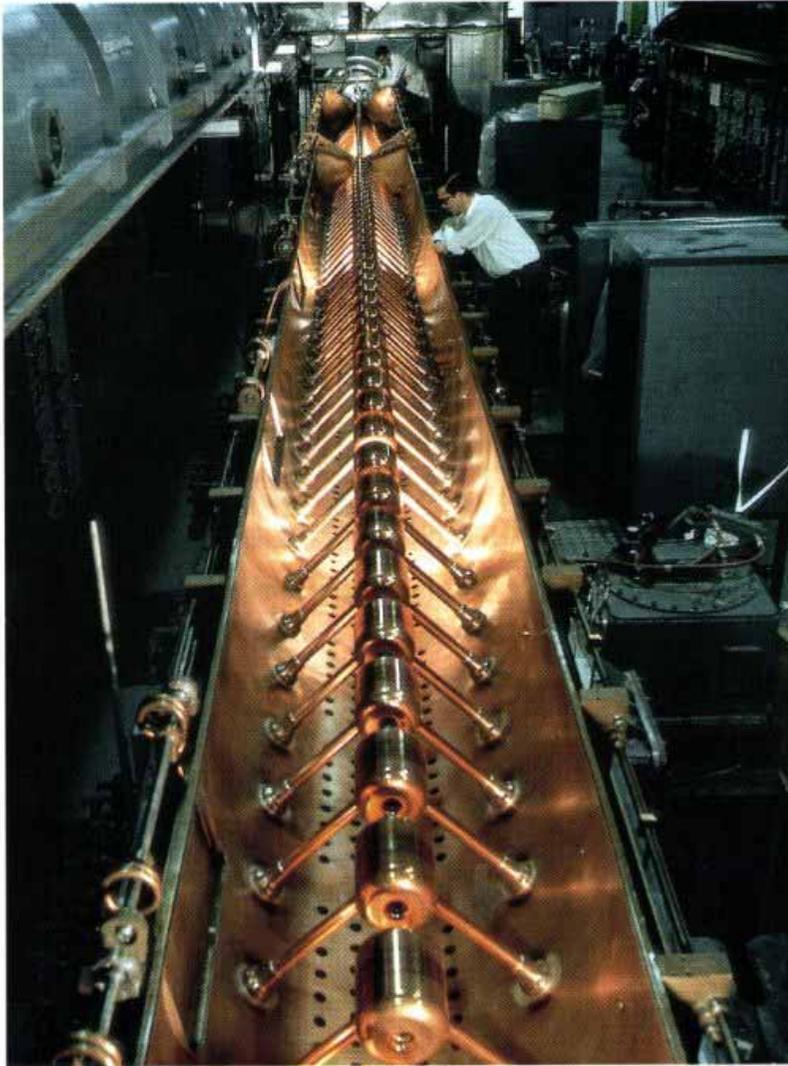


Abbildung 4.14: Ein geöffneter Topfkreis

Linearbeschleuniger

Dipolmagnete: halten Teilchen auf Kreisbahn  
 Quadrupolmagnete: Fokussieren des Strahls

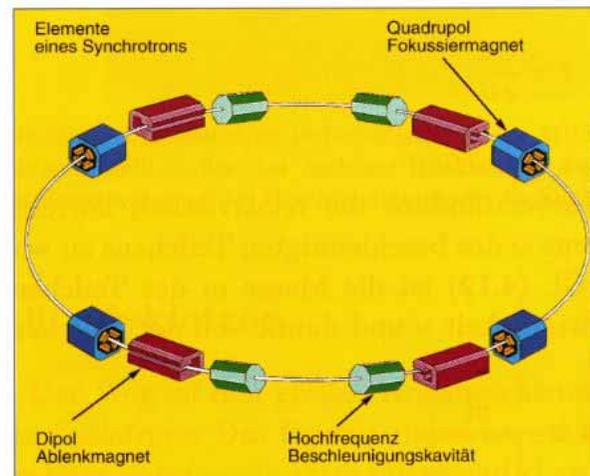


Abbildung 4.17: Links: Synchrotron (schematisch). Beschleunigungseinheiten, Dipolmagnete (Biegemagnete) und Quadrupole folgen aufeinander. Rechts: Das Super-Proton-Synchrotron (SPS) des CERN.

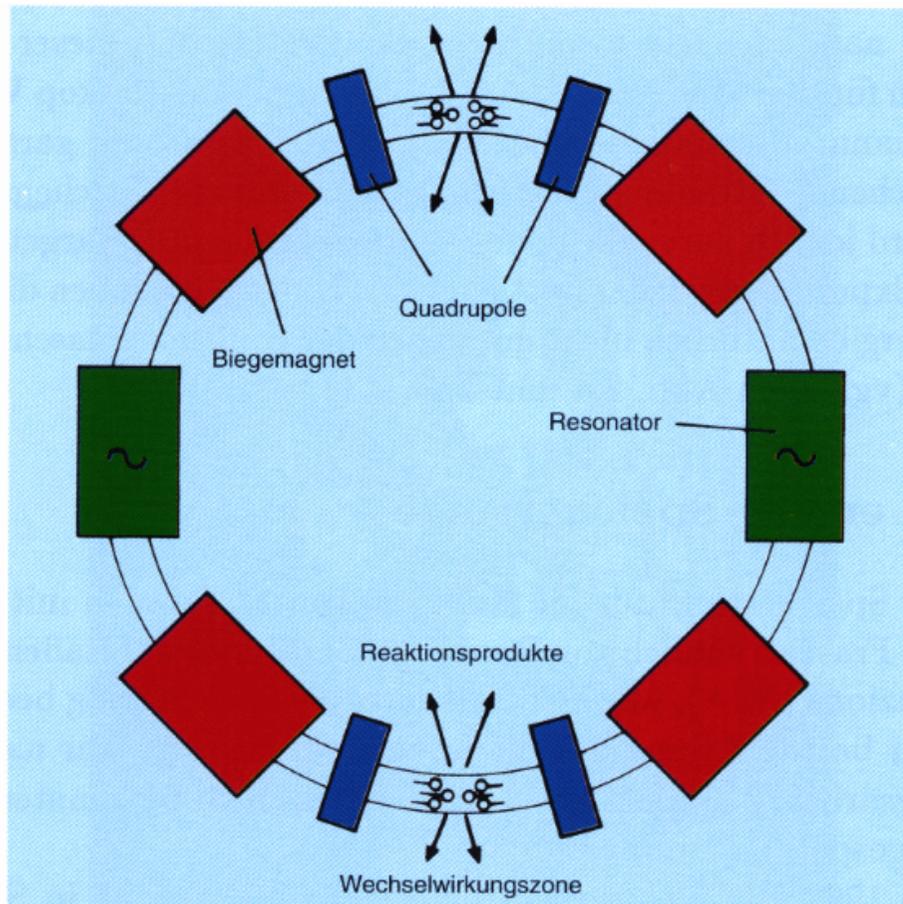


Abbildung 5.1: Schema einer ringförmigen Kollisionsmaschine

## Stochastische Kühlung (LEAR) $\frac{1}{2}$ Nobelpreis 1983, Simon v.d..Meer



Abbildung 4.5: Stochastisches Kühlen der Antiprotonen. Um eine ausreichende Anzahl von Antiprotonen weiterbeschleunigen zu können, müssen die Antiprotonen „gekühlt“ werden. Mittels einer Sonde wird der Gesamtschwerpunkt in jedem Teilchenpaket des Strahls fortlaufend gemessen. Das Signal wird durch eine radiale Leitung auf die andere Seite des Kühlrings übertragen, wo Korrekturfelder den Schwerpunkt jedes Teilchenpakets auf die Sollbahn bringen. Dieses statistische Verfahren komprimiert nach und nach den Strahl von Antiprotonen und ermöglicht so die Ansammlung von Strahlen hoher Intensität.

# Beschleunigerkomplex des CERN

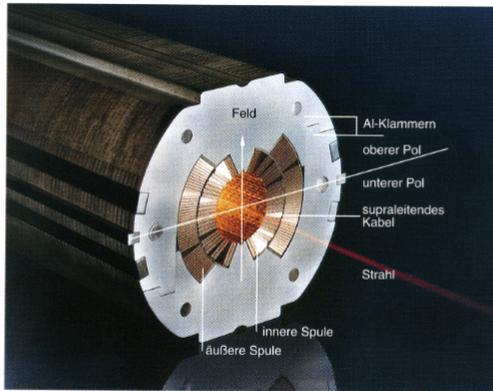
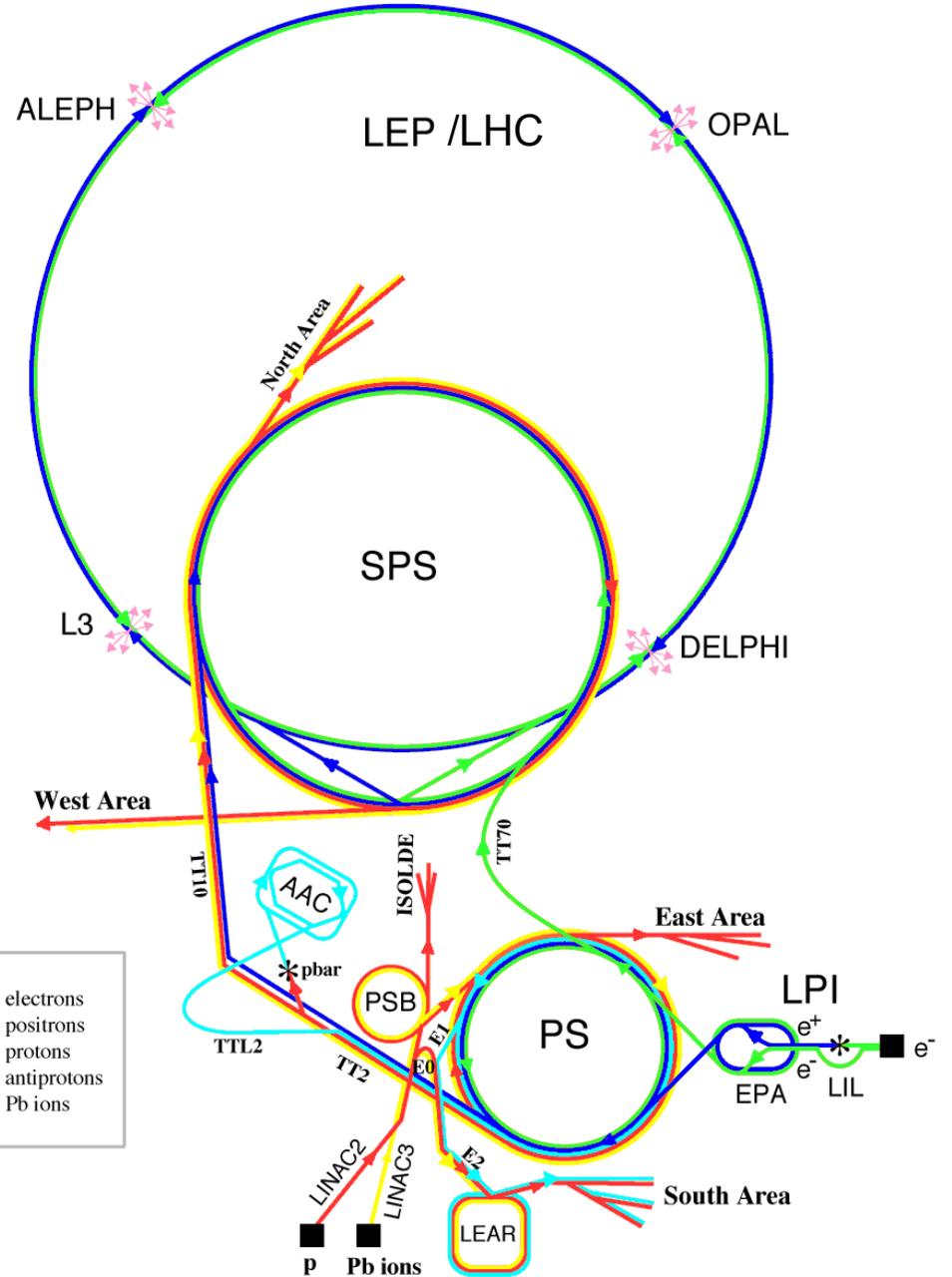


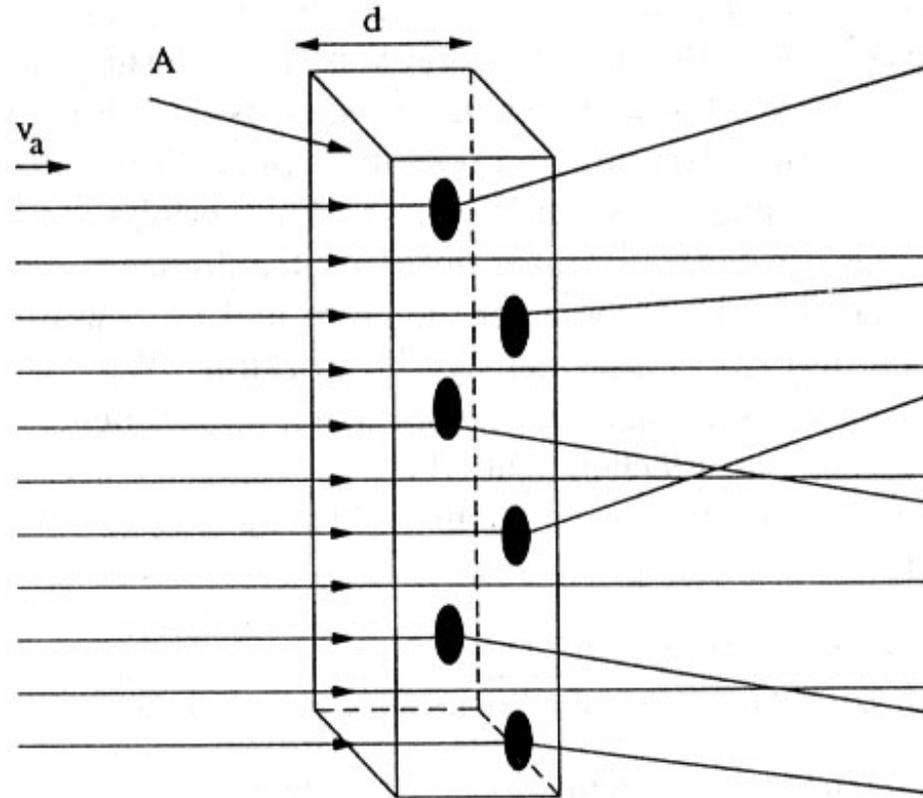
Abbildung 5.8: Prototyp eines supraleitenden Biegemagneten, der für den LHC entwickelt wurde (Foto: ELIN)



Abbildung 5.9: Der Large Hadron Collider (LHC). Den Large Electron Positron Collider (LEP) wird man dafür entfernen müssen.



# Wirkungsquerschnitt



$$\Phi_a = n_a v_a$$

$$N_b = n_b A d$$

**Abb. 4.3.** Messung des geometrischen Reaktionsquerschnitts. Der von links mit der Geschwindigkeit  $v_a$  einfallende Teilchenstrahl  $a$  mit der Dichte  $n_a$  entspricht einem Teilchenfluß  $\Phi_a = n_a v_a$ . Er trifft auf ein (makroskopisches) Target mit der Dicke  $d$  und der Querschnittsfläche  $A$ . Manche der Strahlteilchen werden durch die Streuzentren im Target gestreut, d. h. aus ihrer ursprünglichen Bahn abgelenkt. Die Häufigkeit dieses Prozesses ist ein Maß für die Querschnittsfläche der Streuteilchen.