

(d) Betrieb: Bias-Spannung, Signalverstärkung, Temperatureffekte, Strahlungsschäden

6. Prinzipien von Szintillations-Detektoren:

(a) Szintillationsmechanismus

(b) Organische, anorganische Szintillatoren: Lichtausbeute, Wellenlängenschieber

(c) Nachweiseffizienz für Strahlung: schwere Ionen, Elektronen, Gammastrahlung, Neutronen

(d) Photomultiplier, Avalanche-Photodioden: Konstruktionsprinzipien, Einsatzgebiete, Limitierungen

7. Ionisationmessung:

(a) Gasdetektoren: Ionisationskammern, Proportionalzähler, Auslösezähler

(b) Flüssigkeitszähler

(c) Halbleiterzähler

(d) Alterung von Detektoren: Strahlungsschäden, chemische Reaktionen durch Bestrahlung

8. elektr. Signale und Signalverarbeitung: (Intermezzo)

(a) typ. Signalform

(b) Pulsformung

(c) Pulsdiskriminierung und Zeitmessung: Zeit-Digital-Wandler (TDC)

(d) Pulsformanalyse und Ladungsmessung: Single-/Multi-Channel-Analyzer (SCA/MCA). Analog-Digital-Wandler (ADC)

(e) "Walk" und "Jitter" bei Zeitmessung: Constant-Fraction-Trigging (CFT), Amplituden&Anstiegszeit kompensiertes Trigging (ARC)

9. Ortsmessung:

(a) historisch: Blaskammer, Funkenkammer

(b) Vieldrahtproportionalkammern: ebene, zylindrische Geometrie

(c) Driftkammern: Jet-Kammer, Zeit-Projektionskammer (TPC), Zeit-Expansionskammer (TEC)

(d) Streamerkammern

(e) Kernspuremulsion (DONUT, CHORUS)

(f) Silizium-Streifen und -Pixel-Dektoren und CCDs

(g) Mikrostreifengasdetektoren (MSGC), Gas-Elektron-Multiplikation (GEM)

(h) Szintillierende Fibern

Ortsmessung von Teilchen

... ist möglich mit einer Vielzahl von Methoden. Allen gemeinsam ist, die vom Teilchen erzeugte Ionisation nachzuweisen und dabei den Ort der Ionisation messbar zu machen. Prinzipiell unterscheiden kann man zwischen Detektoren, die die Ortsinformation optisch sichtbar oder elektronisch rekonstruierbar machen.

Eine unvollständige Liste solcher Detektoren ist:

- Blasen-, Funkenkammern iA. optisch
- Vielrohrproportionalkammern elektronisch
- Driftkammern u. abbildende Kammer elektronisch
- Streamerkammern optisch
- Kernspuremulsionen optisch
- Siliziumstreifen, -pixel, CCD elektronisch
- Mikrostreifendetektoren u. GEM-Detektoren elektronisch
Gas-Elektron-Multiplikation
- Szintillierende Fasern optisch

...

Ortsmessung von Teilchen

Erfolgt die Auslese optisch, sind weitere Schritte notwendig, um ein elektronisch (und damit computer-taugliches) Signal zu erhalten. Dies erhöht den Aufwand (und damit die Kosten + Verarbeitungszeit).

Daneben sind folgende Eigenschaften von Ortsmessdetektoren von Bedeutung:

- **Ortsauflösung**, d.i. Messgenauigkeit des Orts
- **empfindliche Zeit**, d.i. Zeitintervall, während dessen der Detektor Teilchenorte messen kann
- **Totzeit**, d.i. Zeitintervall bis Detektor nach einer Messung wieder für nachfolgende Messung bereit ist
- **Auslesezeit**, d.i. Zeitdauer bis Signal mit Ortsinformation messbar vorliegt
- **Nachweiswahrscheinlichkeit** mit der ein Teilchendurchgang registriert und der Ort gemessen werden kann.
- **Okkupanz**, d.i. Maß für die Fähigkeit, mehr als ein Teilchen pro Auslesezeit und sensitiver Fläche zu vermessen:
geringe Okkupanz \rightarrow viele Teilchen messbar

Ortsmessung von Teilchen

Tabelle 11
Eigenschaften von Ortsdetektoren

Kammertyp	Ortsauflösung (μm) normal speziell	Empfindliche Zeit (ns)	Totzeit (ms)	Direkte elektronische Auslese	Auslese zeit (μs)	Nachweis- wahrschein- lichkeit(%)	Vorteile
Proportionalkammer	700 100	50	--	ja	10-10 ²	100	Zeitauflösung
Driftkammer	200 50	500	--	ja	10-10 ²	100	Ortsauflösung
Blasenkammer	100 8	10 ⁶	10 ²	nein	--	100	Analyse komplizierter Ereignisse
Streamer-Kammer	300 30	10 ³	0.03-0.1	nein	--	100	Analyse von Ereignissen mit vielen Spuren
Flash-Kammer	4000 2000	10 ⁴	10 ²	ja	10 ³	80	Preis
Funkenkammer	200 100	10 ³	0.01-1	ja	10 ⁴	95	einfacher Aufbau
Emulsion	5 2	--	--	nein	--	100	Ortsauflösung
Silizium-Streifen- detektoren	7 3	10 ³	--	ja	10	100	Ortsauflösung

Scintillations=
fasern

35

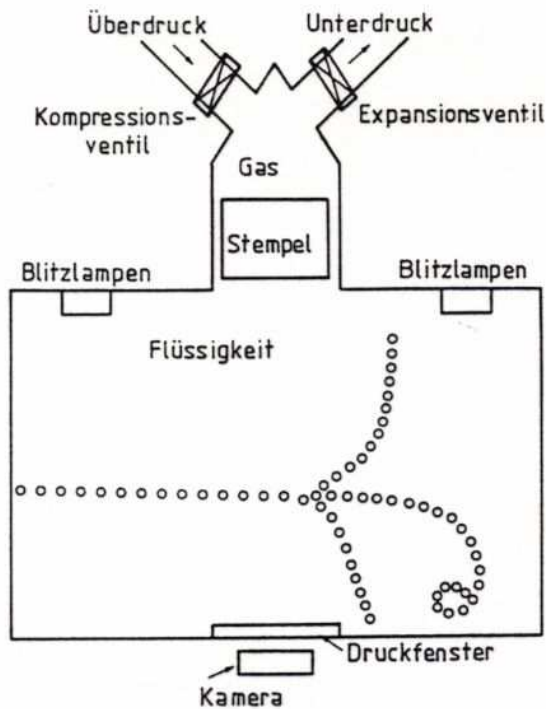
20

< 10⁻⁵

1

hochrest =
verträglich

Ortsmessung: Blasenkammer



Prinzipieller Aufbau einer Blasenkammer [48].

Prinzip:

- Flüssiggas (z.B. H_2 , Ne , Freon C_2F_3Br , ...) nahe Siedepunkt
- vor Teilchendurchgang schnelle Druckreduktion → Siedeverzug
- Teilchendurchgang löst Siedeprozess aus → Blasenbildung
- opt. Aufzeichnung der Blasen
- Kompression → Verflüssigung der Blasen

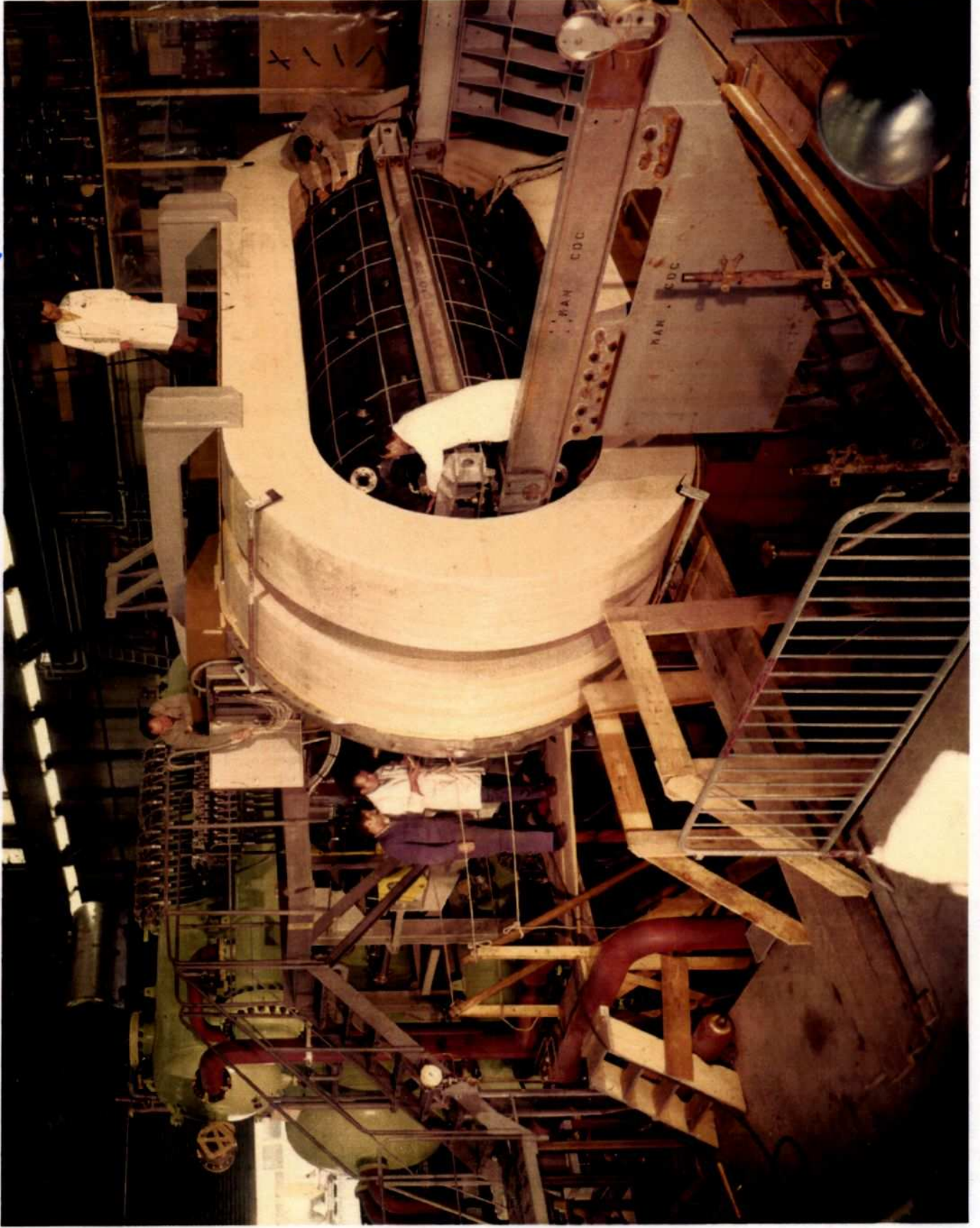
Vorteile:

gute Ortsauflösung, Bläschenzahl ↔ Energieverlust

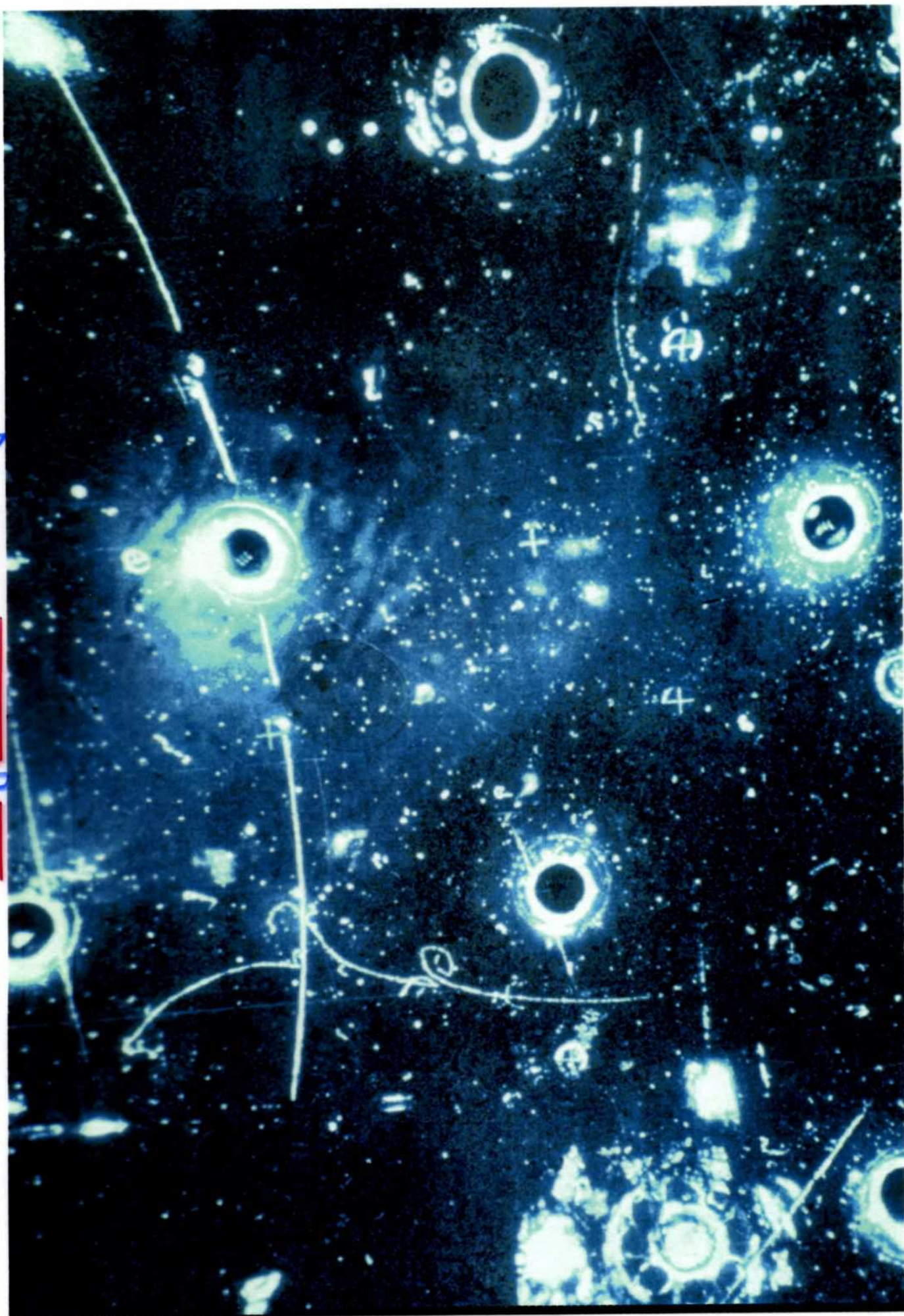
Nachteile:

Messprozess muss vor Teilchendurchgang gestartet werden, Auswertung der Fotos sehr aufwändig, lange Totzeit, geringe Wiederholrate ($< 10 Hz$)

Gargamelle: Isoopropan gefüllt



Gargamelle: Entdeckung des neutralen Strons



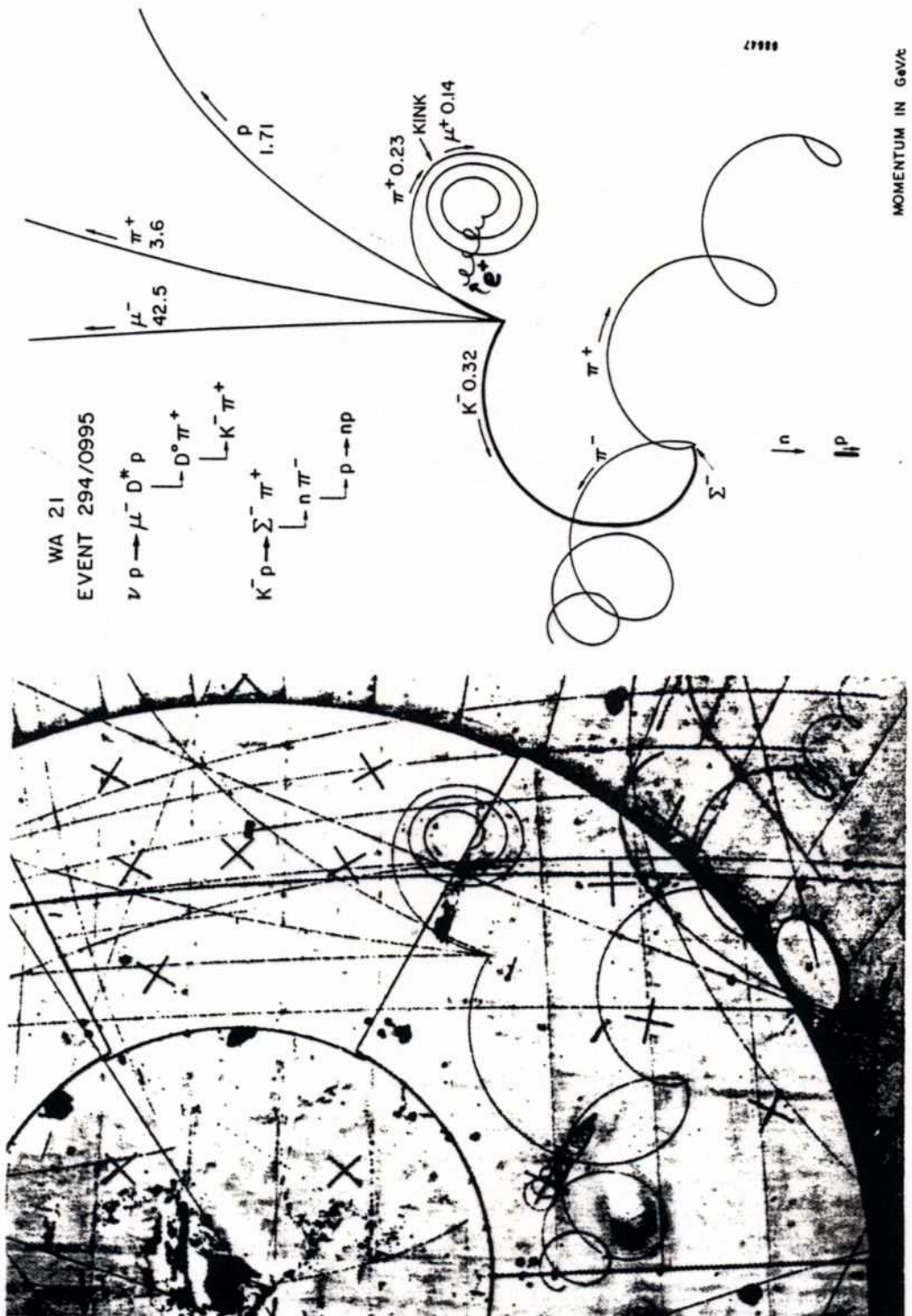


Fig.3.24: Neutrino-Wechselwirkung in der H₂-Blasen-kammer BEBC [WA 21].

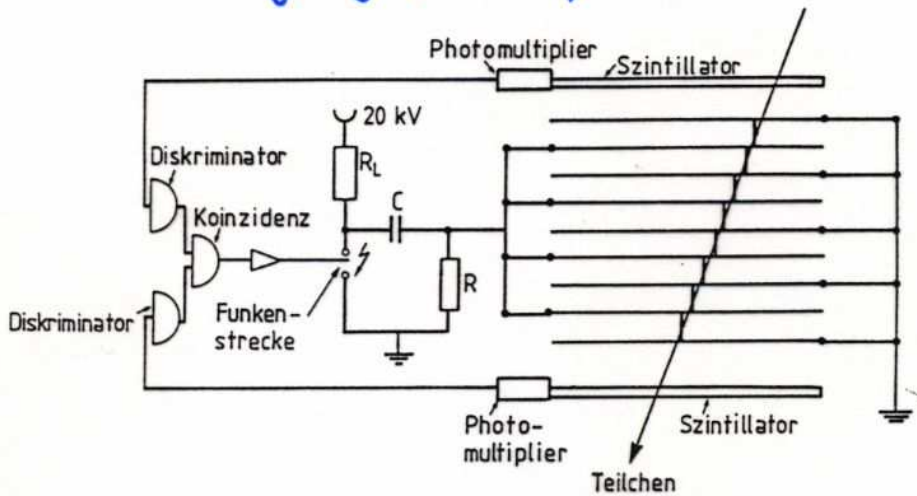
BEBC: fl. Wasserstoff



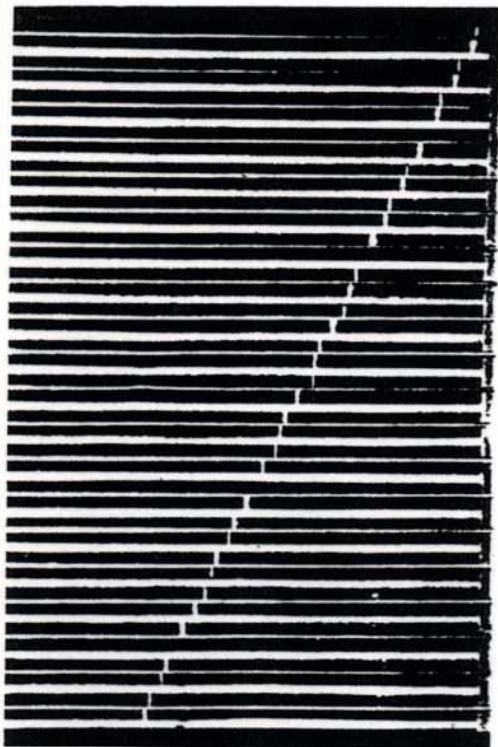
Ortsmessung: Funkenkammer

Prinzip:

- hohe Gasverstärkung \rightarrow Funkenüberschlag an Ionisationsorte
- Hochspannungspuls nach Teilchendurchgang
- empfindliche Zeit (Gedächtniszeit): $\approx 1 \mu\text{s}$
- "Reinigungsfeld" für Ionen aus Ionisation



Prinzipieller Aufbau einer Vielplattenfunkenkammer.



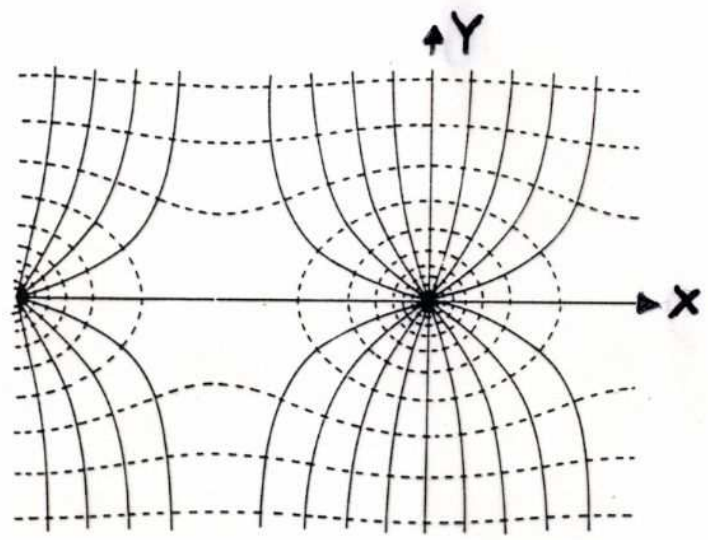
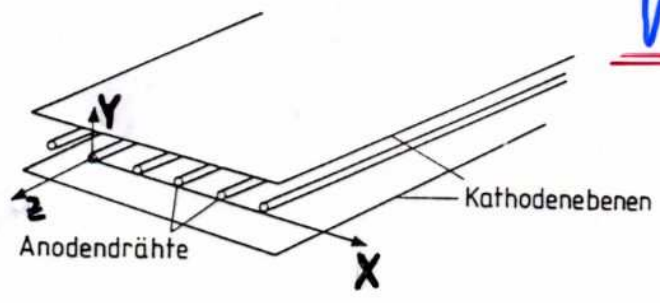
Spur eines Höhenstrahlmyons in einer Vielplattenfunkenkammer [304].

Ortsmessung: Vieldrahtproportionalkammer

Aufbau/Funktion:

- i.W. ebene Lage von Proportionalzählrohren ohne trennende Zwischenwände (s. nachfolgende Abb.)
- Form des elektr. Feldes gegenüber kein zylindr. Anordnung etwas modifiziert
- Lawinenbildung wie bei Proportionalzählrohr in Anodendrahtnähe
- Signal überwiegend von abdriftenden Ionen erzeugt
- Feldstärke in Anodendrahtnähe $\sim 1/\text{Abstand}$
→ ggf. Variation der Driftgeschwindigkeit
- Feldstärke zwischen Anodendrähten & Kathodenoberen $\approx \text{konst}$
→ $\approx \text{konst. Driftgeschwindigkeit}$
- variable Feldstärke zwischen Anodendrähten
- 2dim. Ortsmessung durch Segmentierung und Auslese der Kathoden (z.B. gekreuzte Kathodenstreifen \leadsto 2dim. Ortsinfo ohne Auslese der Anodendrähte)

Violdrahtproportionalkammer



Violdraht-Proportionalkammer; oben: schematischer Aufbau; unten: Äquipotentiallinien (gestrichelt) und elektrische Feldlinien in der Umgebung zweier Anodendrähte in der Ebene senkrecht zur Drahtrichtung [ER 72].

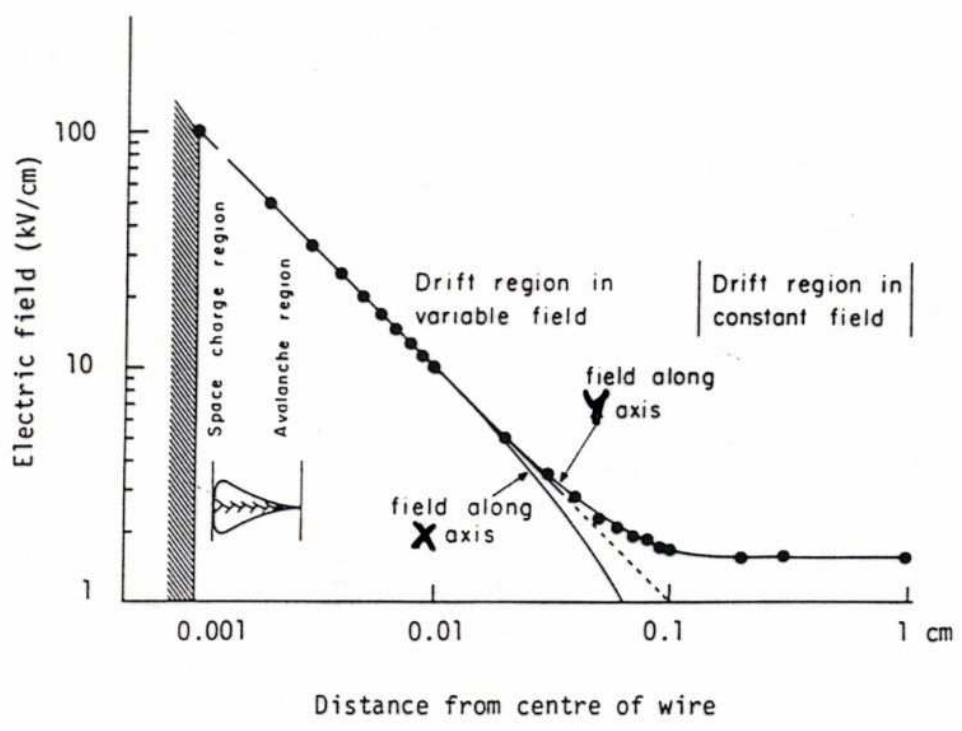


Fig. 58 Variation of the electric field along the axis perpendicular to the wire plane and centred on one wire in a multiwire proportional chamber (Y), and along the direction parallel to the wire plane (X) ³⁸⁾

Vieldrahtproportionalkammern

gekrenzte Kathoden-segmentierung

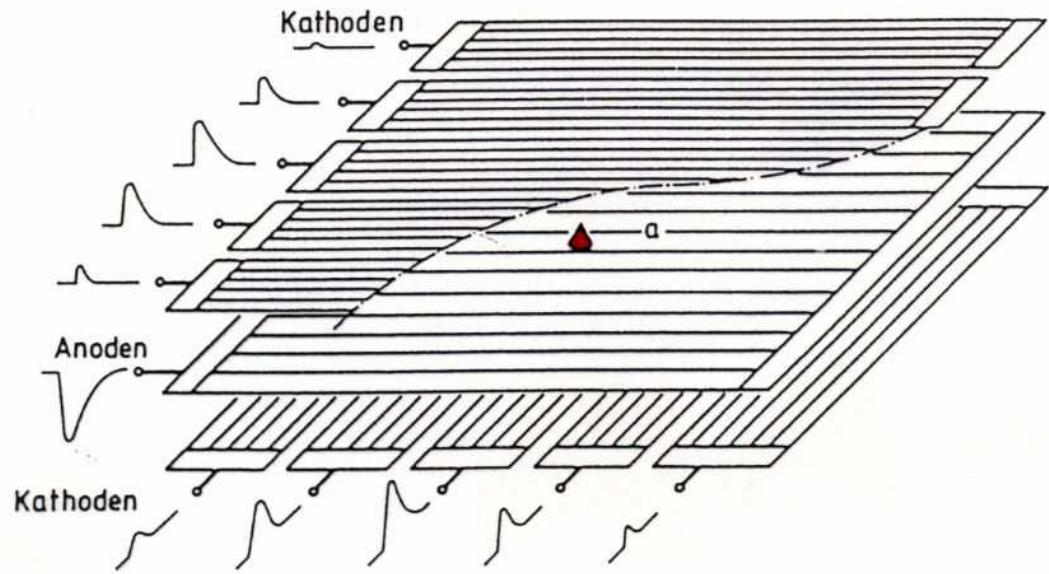
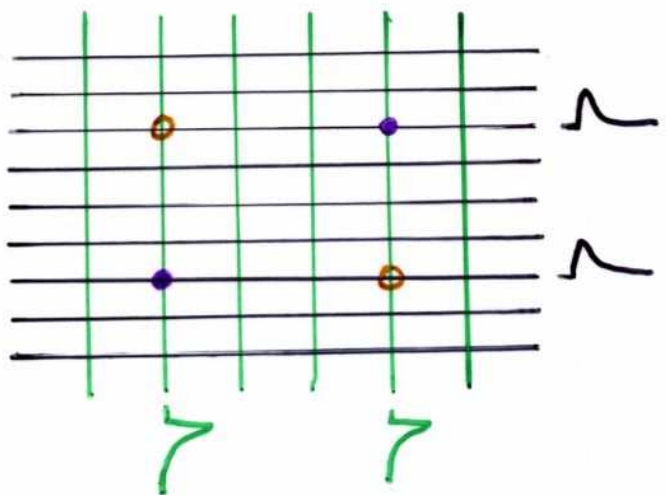


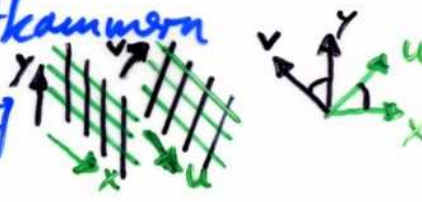
Fig.3.5: Prinzip der Kathodenauslese für Proportionalkammern. Der Schwerpunkt der Ladungen auf den Kathodenstreifen senkrecht zur Richtung der Anodendrähte bestimmt den Ort der Lawine (a) [CH 78a].

Ambiguität bei Mehrfachspuren:



→ zusätzliche Auslese der Anodendrähte

→ sukzessive Anordnung von Vieldrahtkammern in x-y- und u-v-Segmentierung



Ortsmessung: Ebene Driftkammern

Wird der Bereich des homogenen und konstanten elektrischen Feldes zwischen Anodendraht und Kathode (oder besondere Feld formende Drähte) vergrößert, kann eine Ortsmessung über einen größeren Bereich vorgenommen werden unter Voraussetzung der Konstanz der Driftgeschwindigkeit:

$$x = v_D \cdot \Delta t$$

(im Falle der Nicht-Konstanz der Elektronendriftgeschwindigkeit gilt: $x = \int v_D(t) dt$)

Ein homogenes, konst. elektr. Feld kann durch Einsatz vieler zusätzlicher (Feld formender) Drähte mit korrekt eingestelltem Potential erreicht werden.

Solche Ortsdetektoren werden Driftkammern genannt.

NB: Die Vielzahl von gespannten Drähten, die auf unterschiedlich hohen elektr. Potentialen liegen, macht eine sorgfältige Betrachtung der elektrost. Kräfte notwendig! So ergibt sich, dass die mech. Drahtspannung proportional zum Quadrat der elektr. Spannung ^{und der Drahtlänge} anwachsen muss, um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten. Grenzen setzt die endliche mech. Drahtspannung bei dünnen Drähten. Hier werden Drahtabstützungen entlang des Drahtes notw.

Driftkammern

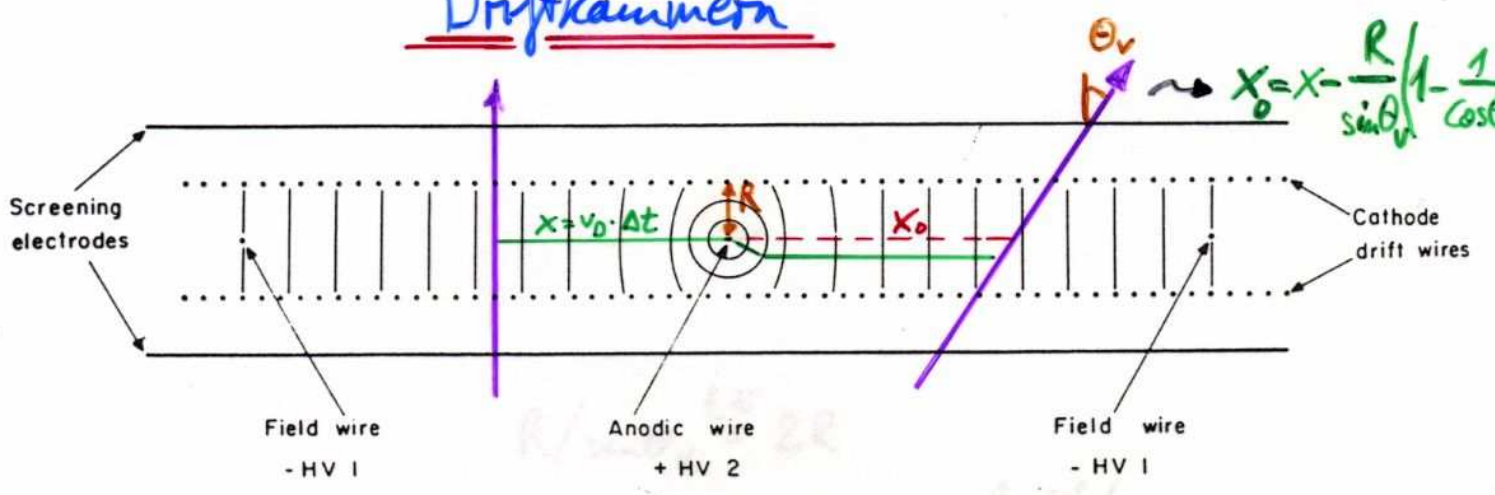


Fig. 88 Principle of construction of the adjustable field multiwire drift chambers⁹⁾. Cathode wires are connected to uniformly decreasing potentials, starting from ground in front of the anode. Field wires reinforce the field in the transition region to the next cell.

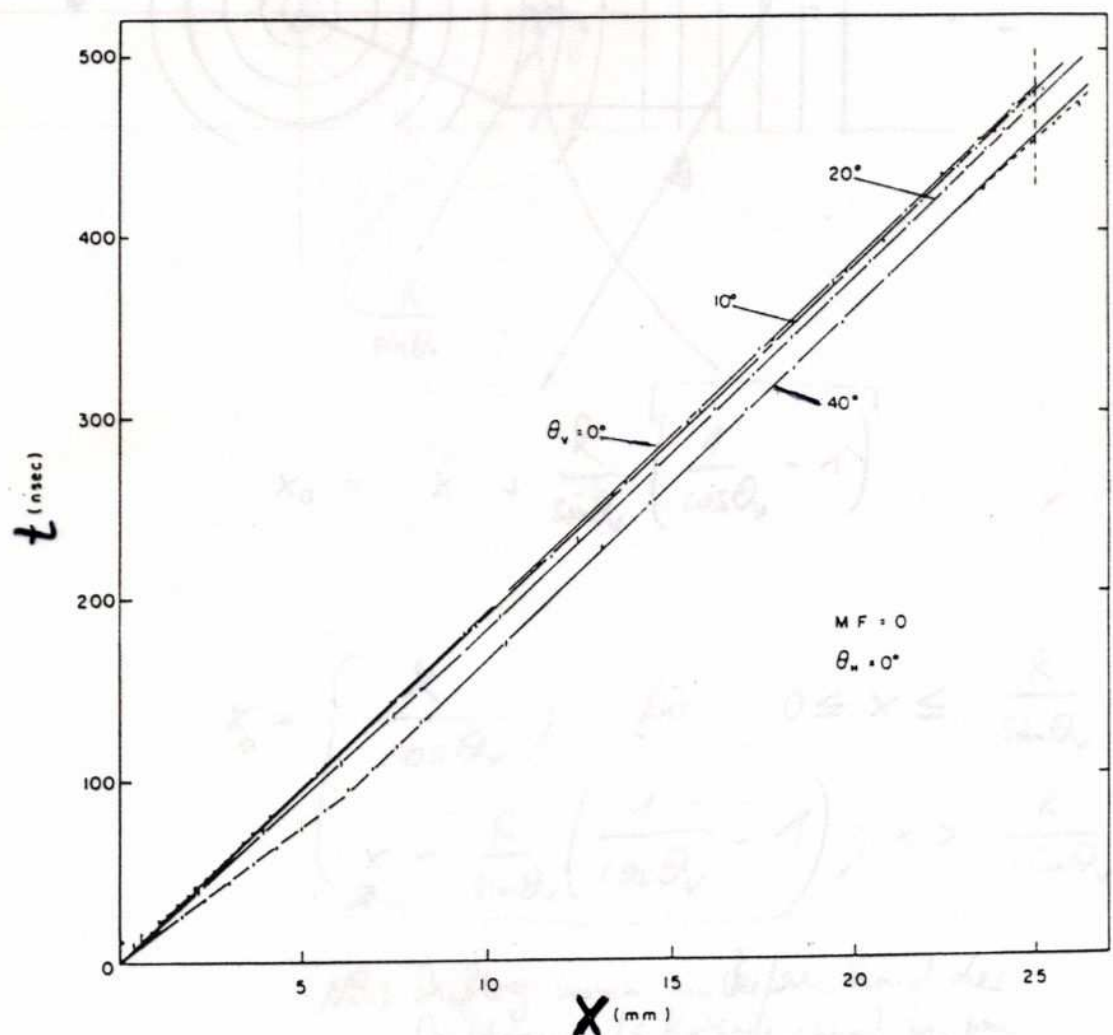


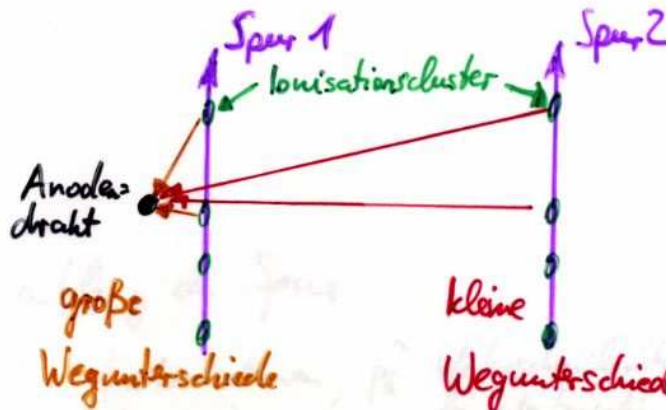
Fig. 92 Measured and computed space-time relationship for the chamber in Fig. 88, as a function of the minimum ionizing beam angle of incidence⁹⁾

Ortsauflösung von Driftkammern

... hat 3 Komponenten

- Statistik der Primärisionisation

$$\sigma_p \sim e^{-x}$$



- Diffusion

$$\sigma_D \sim \sqrt{t} \sim \sqrt{x}$$

- Elektronik

$$\sigma_E \sim \text{const.} \quad \text{endliche Zeitauflösung}$$

$$\Rightarrow \text{Gesamtauflösung: } \sigma^2 = \sigma_p^2 + \sigma_D^2 + \sigma_E^2$$

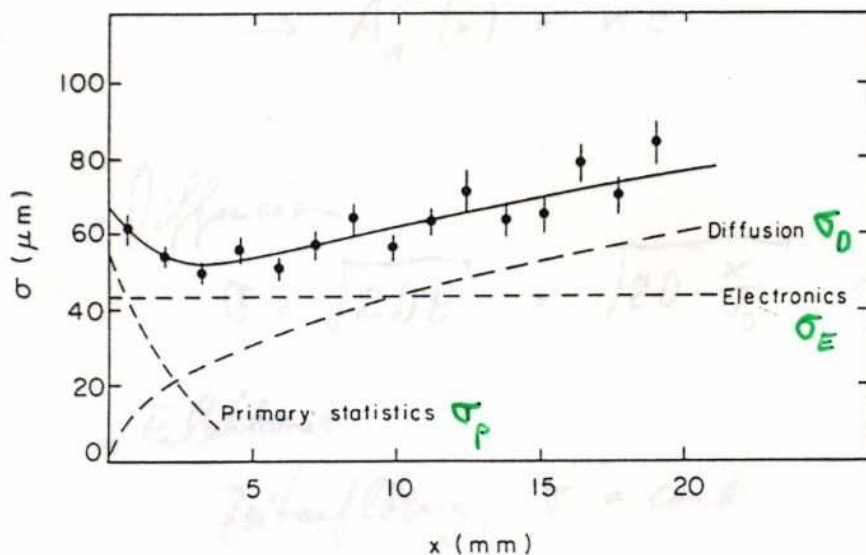


Fig. 94 Measured intrinsic accuracy in the drift chamber of Fig. 88, as a function of drift space¹⁰⁾. The experimental results have been decomposed into three contributions: a constant electronics dispersion, a physical diffusion term function of the square root of the drift space, and a contribution of the primary ion pair statistics.

Ultrakammern im Magnetfeld

Lorentzwinkelkompensation:

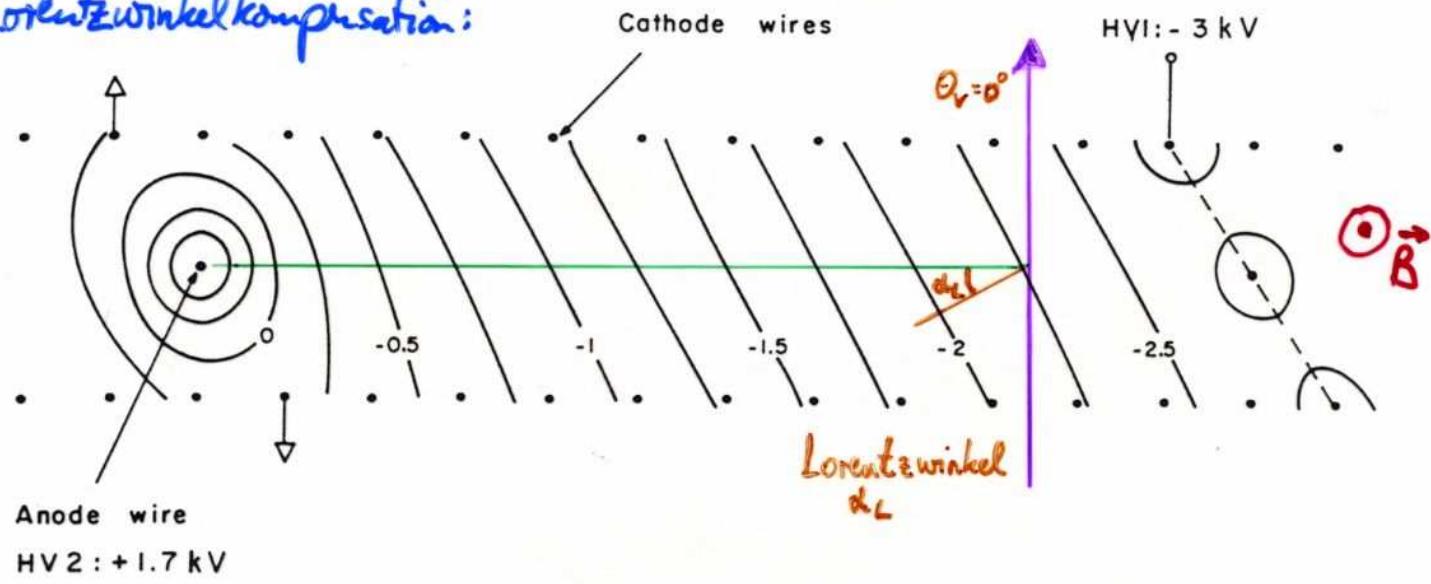


Fig. 98 Modification of the electric field equipotentials in the structure of Fig. 88, to allow operation in strong magnetic fields (parallel to the wires)⁷⁷⁾

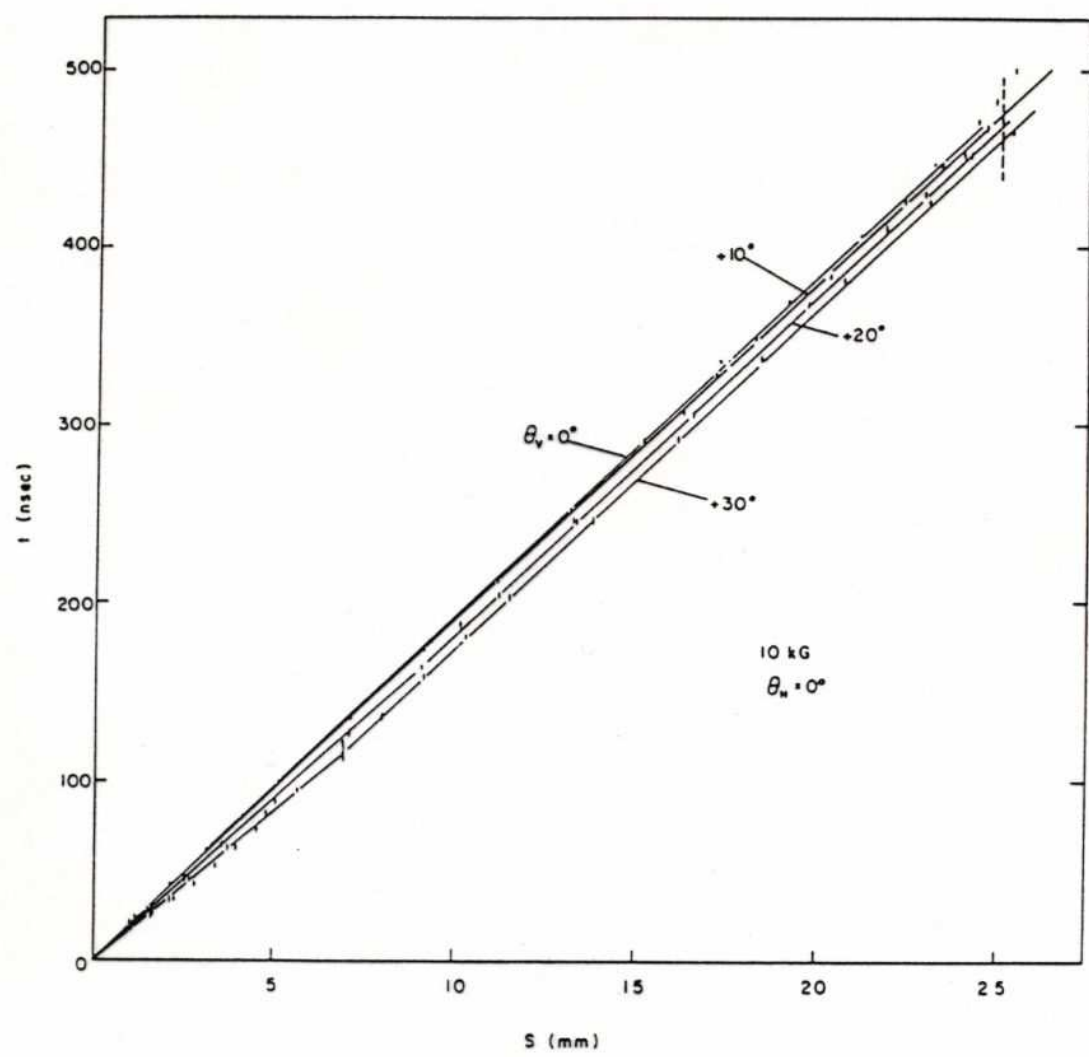
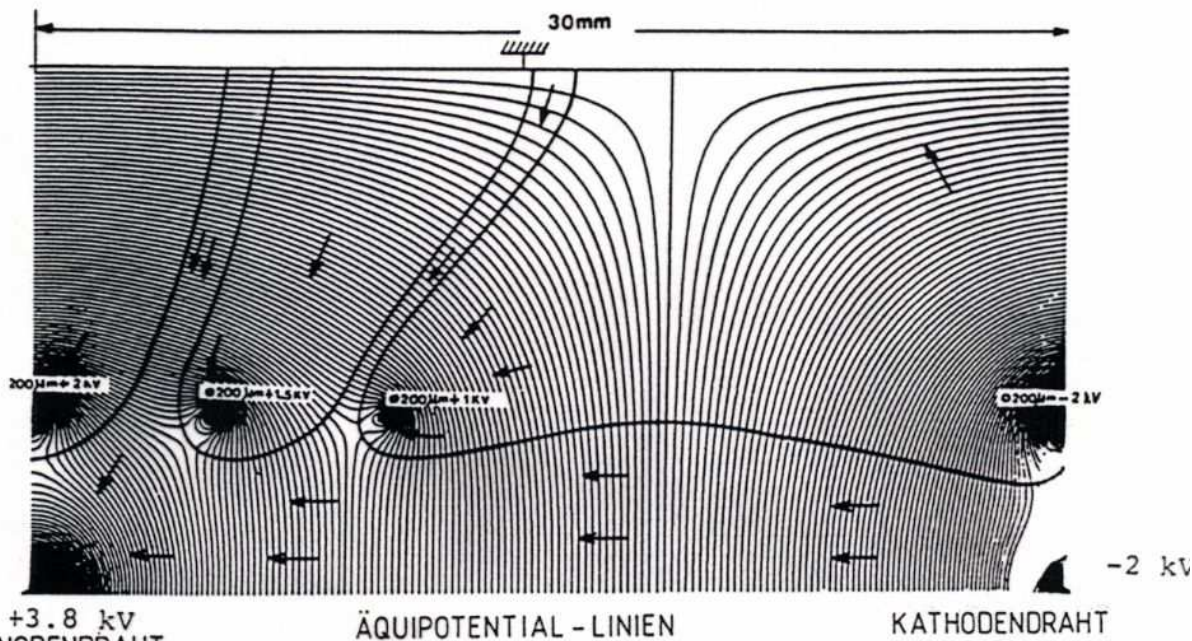
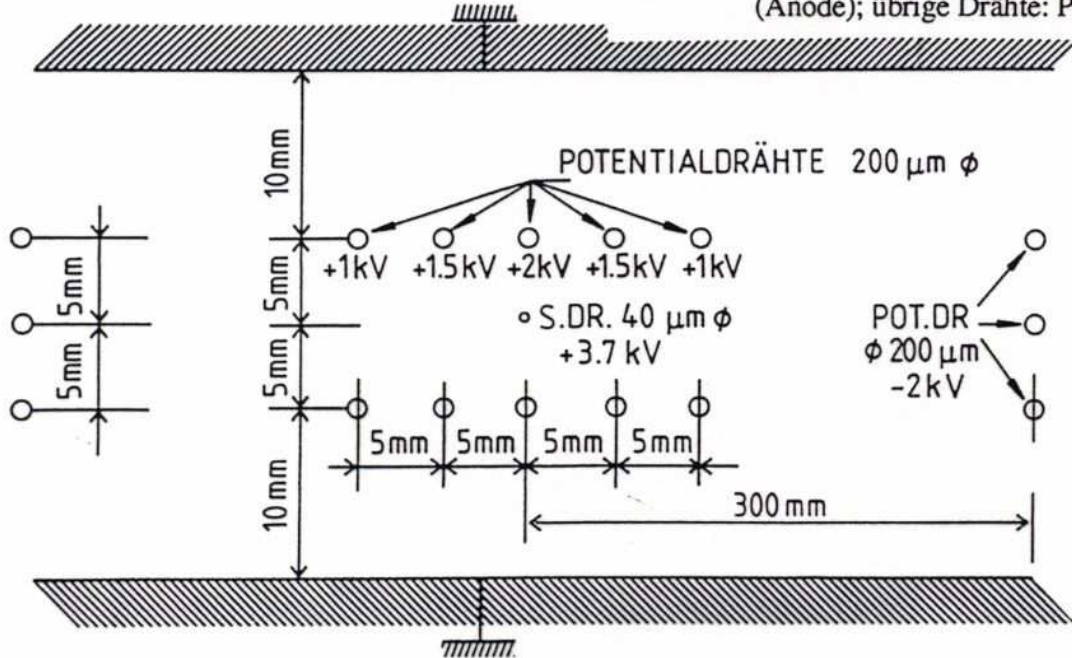
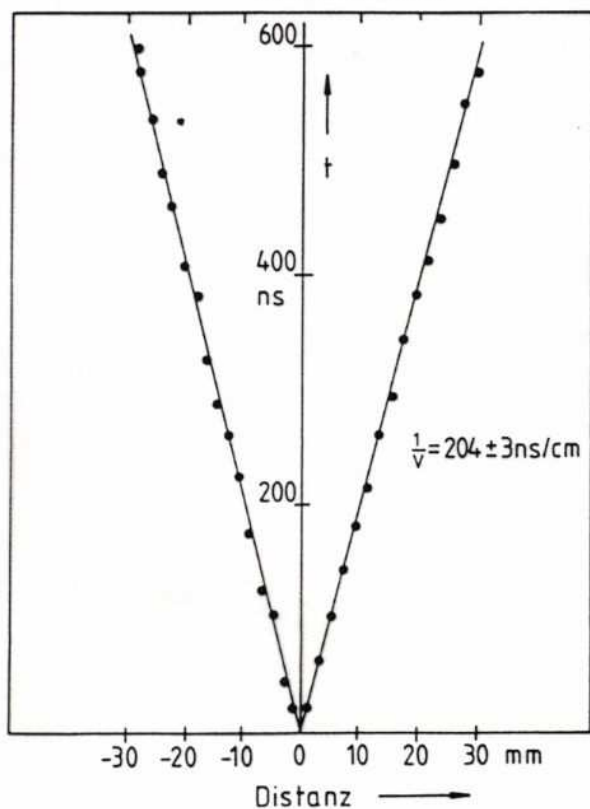


Fig. 99 Space-time relationship measured, for several angles of incidence, in the chamber of Fig. 98 at 10 kG⁹⁾. The similarity with the results of Fig. 92 is apparent.

Fig. 3.6. Zellenstruktur einer großen Driftkammer, S.D.R. Signaldraht (Anode); übrige Drähte: Potentialdrähte [MA 77].



Äquipotential-Linien in einem Quadranten der in Fig. 3 abgebildeten Driftkammer-Zelle [MA 77]. Die Pfeile zeigen die Richtung der Elektronendrift an.



Beziehung zwischen der Driftzeit t und der Driftstrecke (Distanz) [MA 77].

Zylindrische Detektoren

Planare Detektoren eignen sich gut für Experimente am feststehenden Target, d.h. weit von der eigentlichen Wechselwirkungszone entfernt.
Bei Collidern, d.h. direkt an der Ww.-zone, sind zylindrische Bauformen besser geeignet.

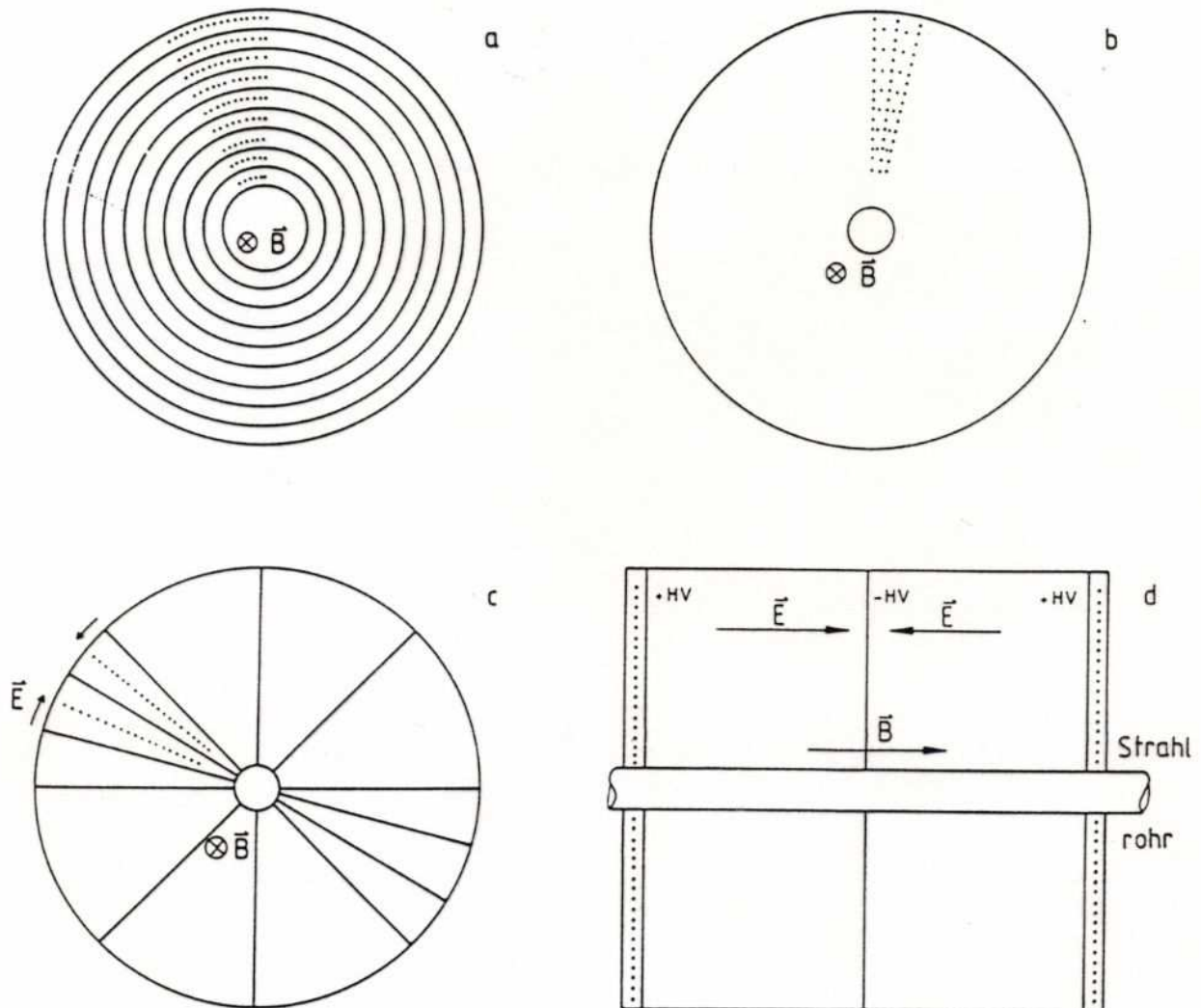
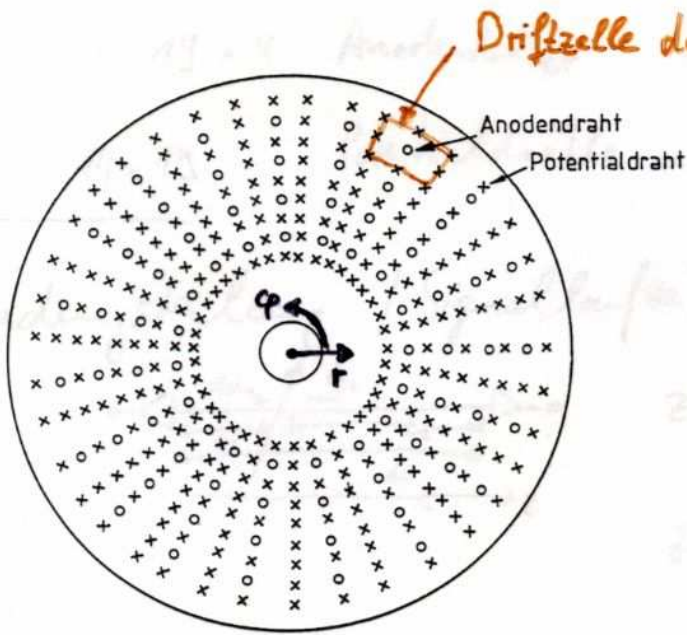


Fig.3.11: Vier verschiedene Typen von zylindrischen Drahtkammern: a) Proportionalkammer, b) zylindrische Driftkammer, c) Jet-Driftkammer, d) Zeitprojektionskammer (TPC).

- NB:
- a) Wandmaterial der Kathodenflächen
 - b) viele Drähte \rightarrow elektrostat. Stabilität
 - c) lange Driftwege, kaum Ortsauflösung entlang des Drahtes
 - d) sehr lange Driftwege, Diffusion entlang der \vec{B} -Feldachse

Zylindrische Drahtdriftkammer



Driftzelle durch Potentialdrähte definiert

- Drähte axial (parallel gespannt (i.A. $\parallel \vec{B}$))
- gute Ortsauflösung in r -
- kaum Ortsauflösung in axialer Richtung (z.B. Ladungsteilung entlang Anodendraht)

Abb. 4.41 Prinzipieller Aufbau einer zylindrischen Driftkammer. Die Abbildung zeigt einen Schnitt durch die Kammer senkrecht zu den Drähten.

+ **Stereodrähte** zur Ortsauflösung entlang axialer Richtung

projektiver Blick auf 3 Lagen von Anodendrähten mit/ohne Stereodrähte Winkel

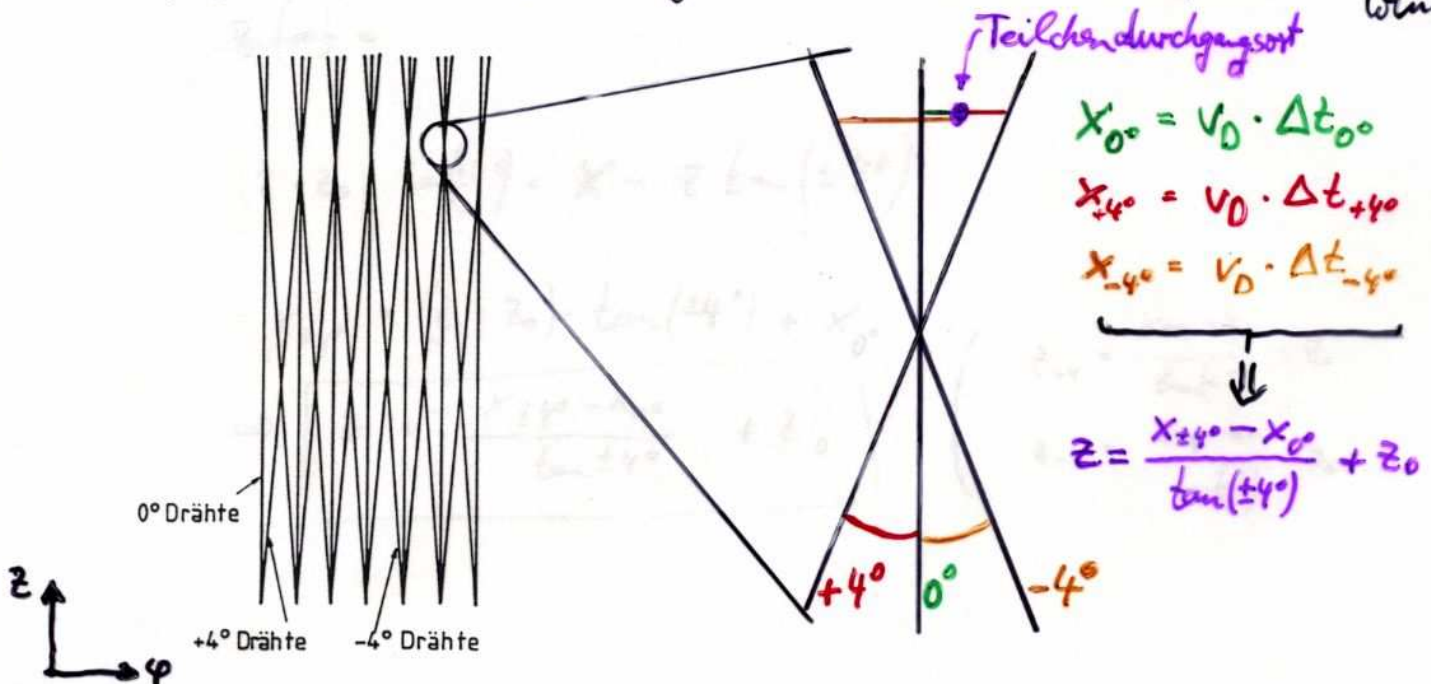
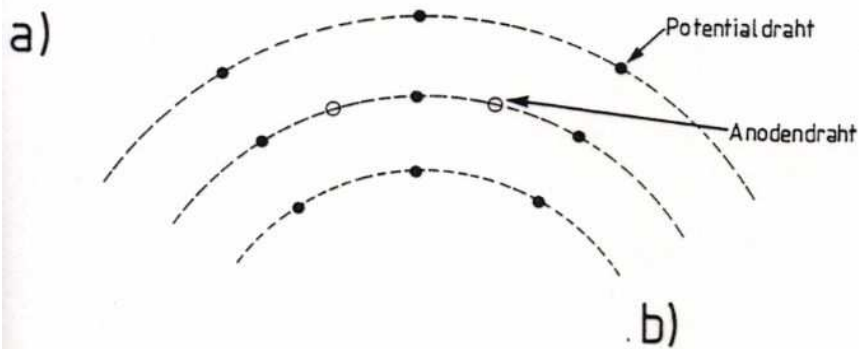


Illustration der Bestimmung der Koordinate entlang der Anodendrähte durch Verwendung von Stereodrähten.

Zellgeometrien von Zyl. Drahtkammern



Vorteil: wenige Potentialdrähte

Nachteil: inhomogene Feldgeometrie entlang Anodenachse

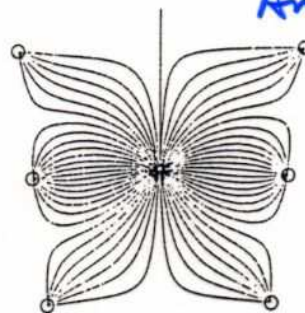


Abb. 4.42 a) Illustration einer offenen Driftzellengeometrie.
b) Feldlinienverlauf in einer offenen Driftzelle [337].



Abb. 4.43a) Illustration einer geschlossenen Driftzellengeometrie.

Vorteil: homogene Feldlinienverlauf (fast wie bei Zyl. Kathodengeometrie)

Nachteil: viele Potentialdrähte erforderlich

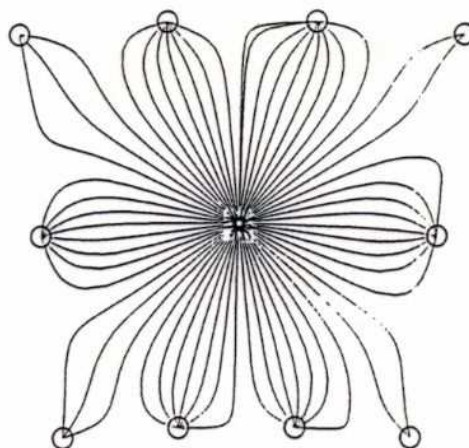
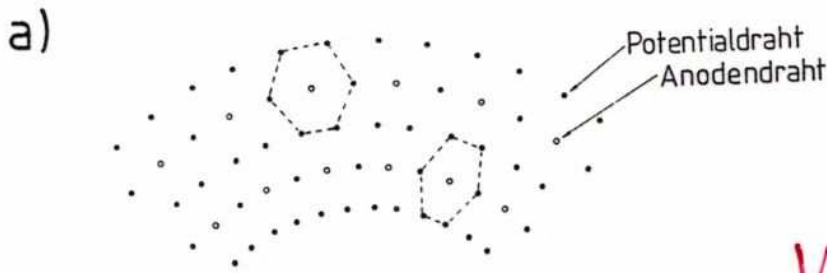


Abb. 4.43b) Feldlinienverlauf in einer geschlossenen Driftzelle

Zellgeometrie von Zyl. Drahtkammern



Vorteile: homogenes Feld
mit geringer Anzahl
von Potentialdrähten

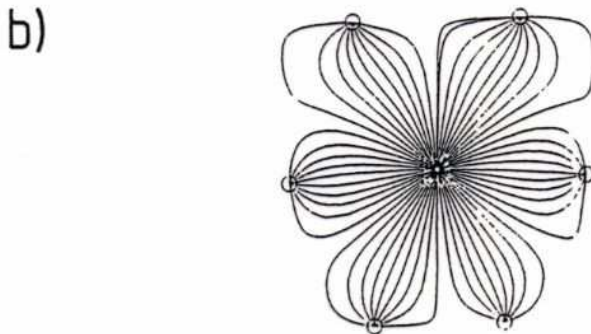


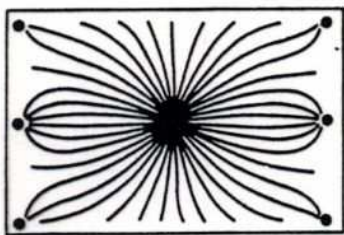
Abb. 4.44 a) Hexagonale Driftzellegeometrie. b) Feldlinienverlauf in einer hexagonalen Driftzelle [337].

Driftzellen und axiale Magnetfelder

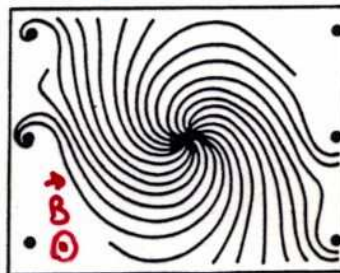
starke Magnetfelder verzerren die Drifttrajektorien sehr

→ Orts-Driftzeit-Relation geändert

→ Korrektur durch Veränderung der Potentiale auf Potentialdrähten nicht möglich (Nachbarzelle)



(a)



(b)

Abb. 4.46 Drifttrajektorien von Elektronen in einer offenen Rechteckdriftzelle a) ohne und b) mit Magnetfeld [33, 34].

Orts-Driftzeitrelation einer Jetkammer

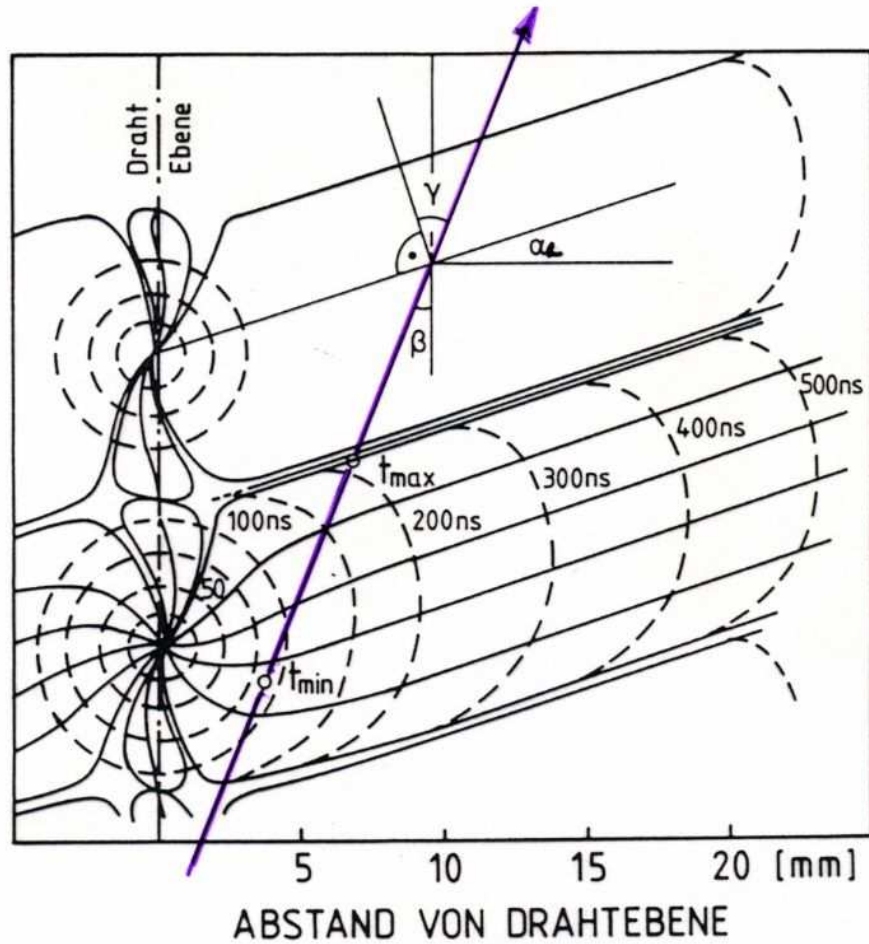
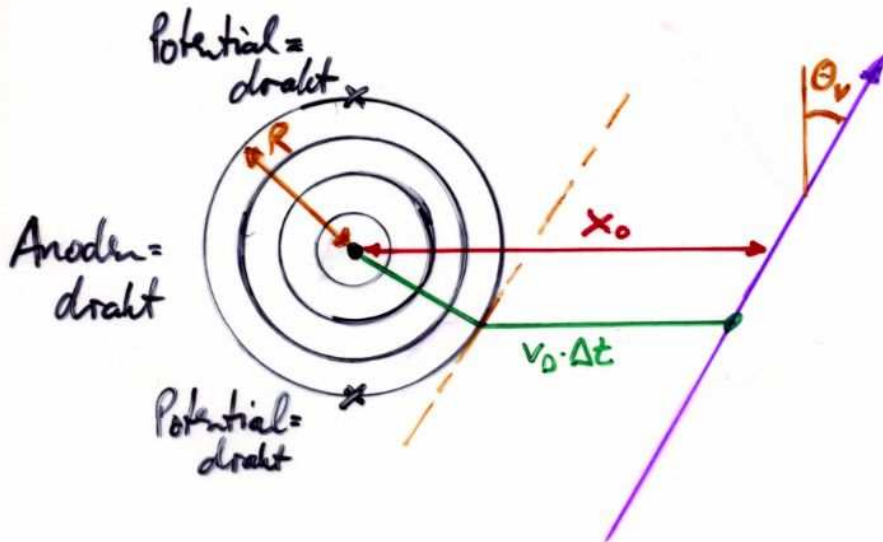


Fig.3.16: Driftwege der Elektronen (durchgezogene Linien) und Flächen gleicher Driftzeit (gestrichelt) in der Nähe des Anodendrahtes der Jet-Kammer [DR 80, WA 81b].

Approximation der Orts-Driftzeitrelation (so gen. JADE-Approx.)



$$x_0 = v_0 \cdot \Delta t - R \cdot \left(1 - \frac{1}{\cos \theta_v}\right)$$

Jetkammer / TPC

Die große Anzahl von Signal- und Potentialdrähten in zyl. Proportional- & (Drift-)Kammern machen diese Strukturen ungeeignet für Anwendungen mit großvolumigen Nachweisbereichen. Hierfür werden andere Kamertypen eingesetzt, bei denen die Elektronen aus der Ionisation zunächst längere Strecken driftend zurücklegen, bevor sie an einem Anodendraht über Gasverstärkung im Proportionalbereich gemessen werden. Diese Kamertypen sind:

- **Driftkammer** oder **Jetkammer**

- ▷ \vec{E} -Feld verläuft in azimuthaler Richtung, $\vec{B} \perp \vec{E}$

- ▷ Unterteilung des Azimut in gleich große Sektoren

- ▷ axiale Messung des Ortes: Ladungsteilung / Signallaufzeit / Stereodrähte

- **Zeit-Projektionskammer TPC**

- ▷ \vec{E} -Feld in axialer Richtung, $\vec{B} \parallel \vec{E}$

- ▷ axiale Unterteilung der Kammer in zwei Hälften

- ▷ Projektion der Spur auf Stirnseite \rightarrow r- φ -Messung

- ▷ Driftzeit der Ladungen \rightarrow z-Messung (axiale Position)

Ausschnitt der JADE-Jetkammer

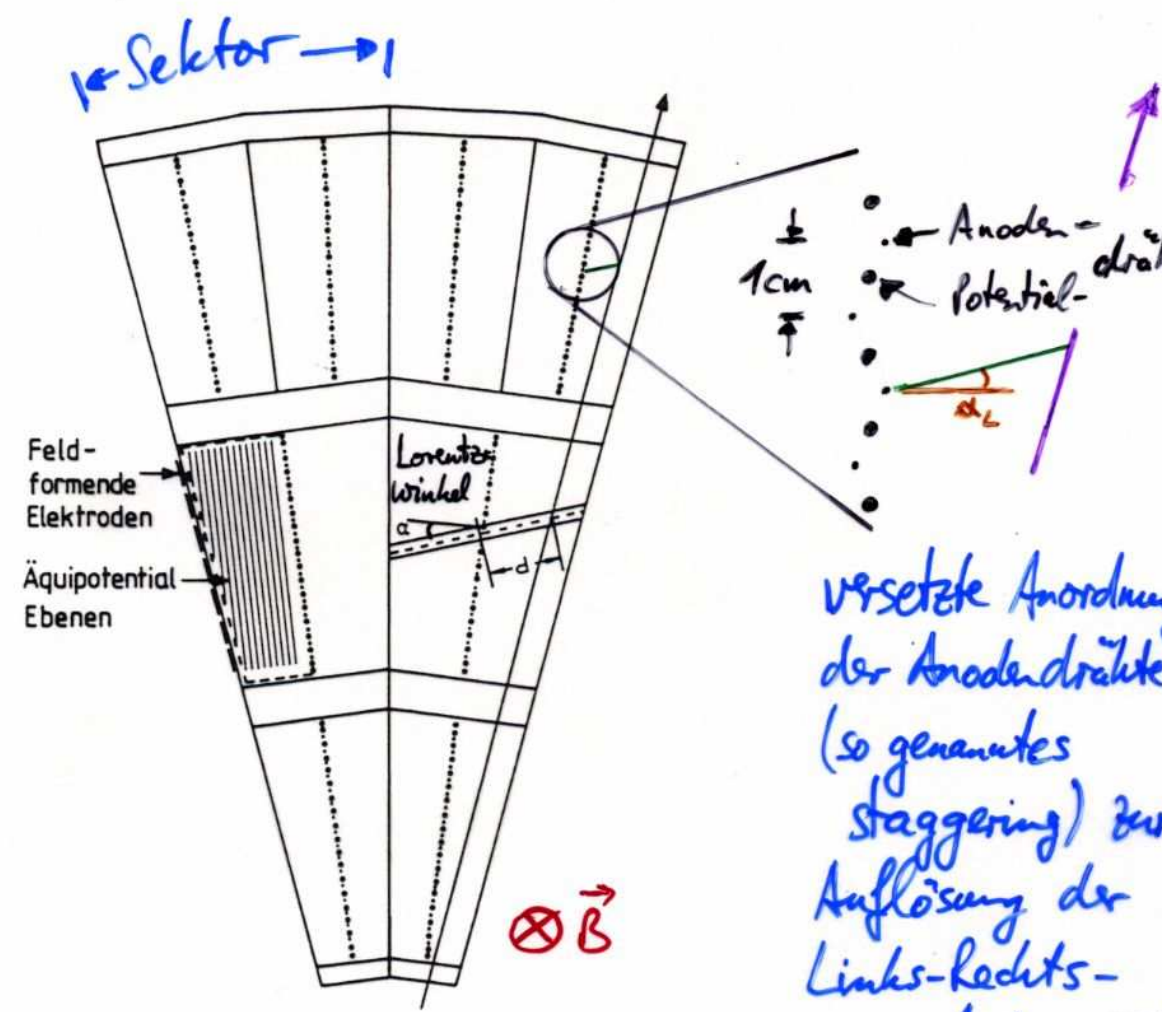


Fig.3.15: Schnitt durch zwei radiale Segmente der Jet-Kammer des JADE-Detektors. Länge der Driftstrecke d , Lorentzwinkel α [DR 80, WA 81b]. Die radiale Länge der drei Schichten ist 57 cm.

versetzte Anordnung der Anodendrähte (so genanntes Staggering) zur Auflösung der Links-Rechts-Ambiguität einer Spur

- Daten:
- $\varnothing \approx 1,2 \text{ m}$
 - Länge $\approx 2 \text{ m}$
 - B-Feld $\approx 0,43 \text{ T}$
 - 24 Sektoren à 48 Anodendrähte
 - Ortsauflösung $\approx 130 \mu\text{m}$ (r- φ), $\approx 1,5 \text{ cm}$ (z)
 - im JADE-Experiment 1979-86
 - am PETRA- e^+e^- -Beschleuniger, DESY, Hamburg

DSM F22ELS.TPMH230
 1344 2154 J4
 ID=113 704
 LGTOT 12059
 MUMTIS 0
 LGCYL 12059
 LGCAPS 0 0
 FUCAPS 0 0

JADE

R-FI SECTION

BEAM 15.000 GEV

MAG.FIELD -4.532 KG
 TRIGGER 0201

DATE 30/03/80
 TIME 12.28.16

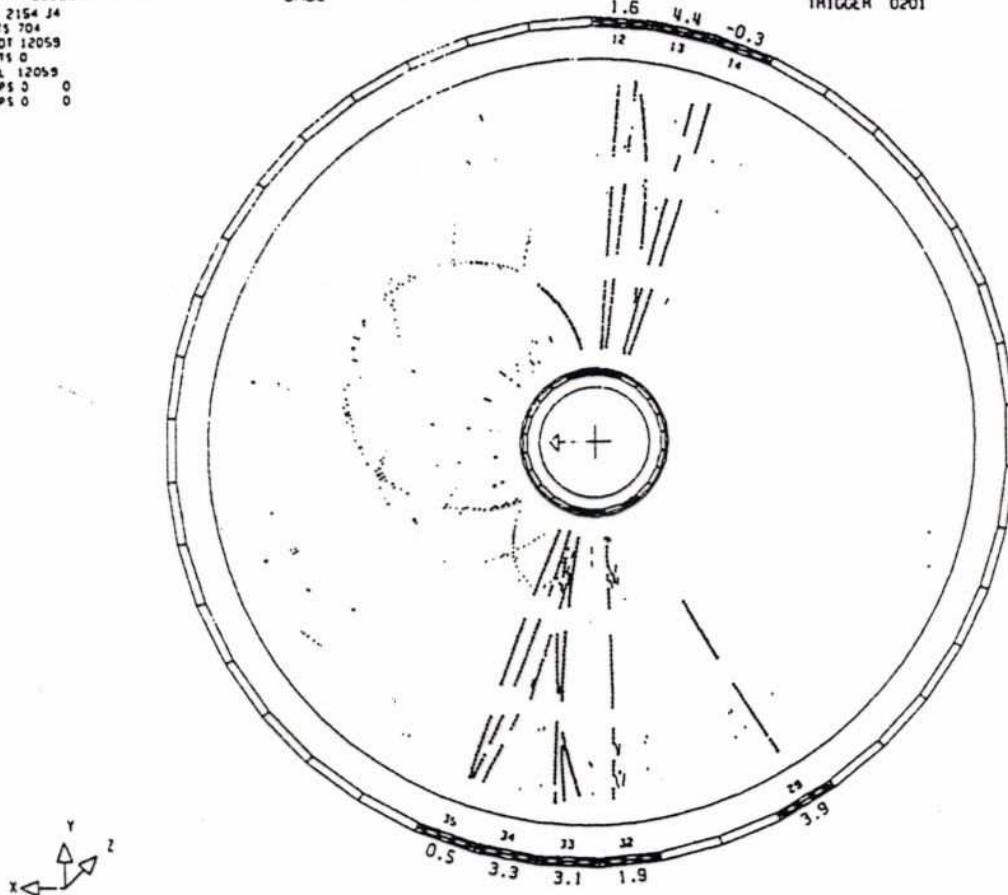
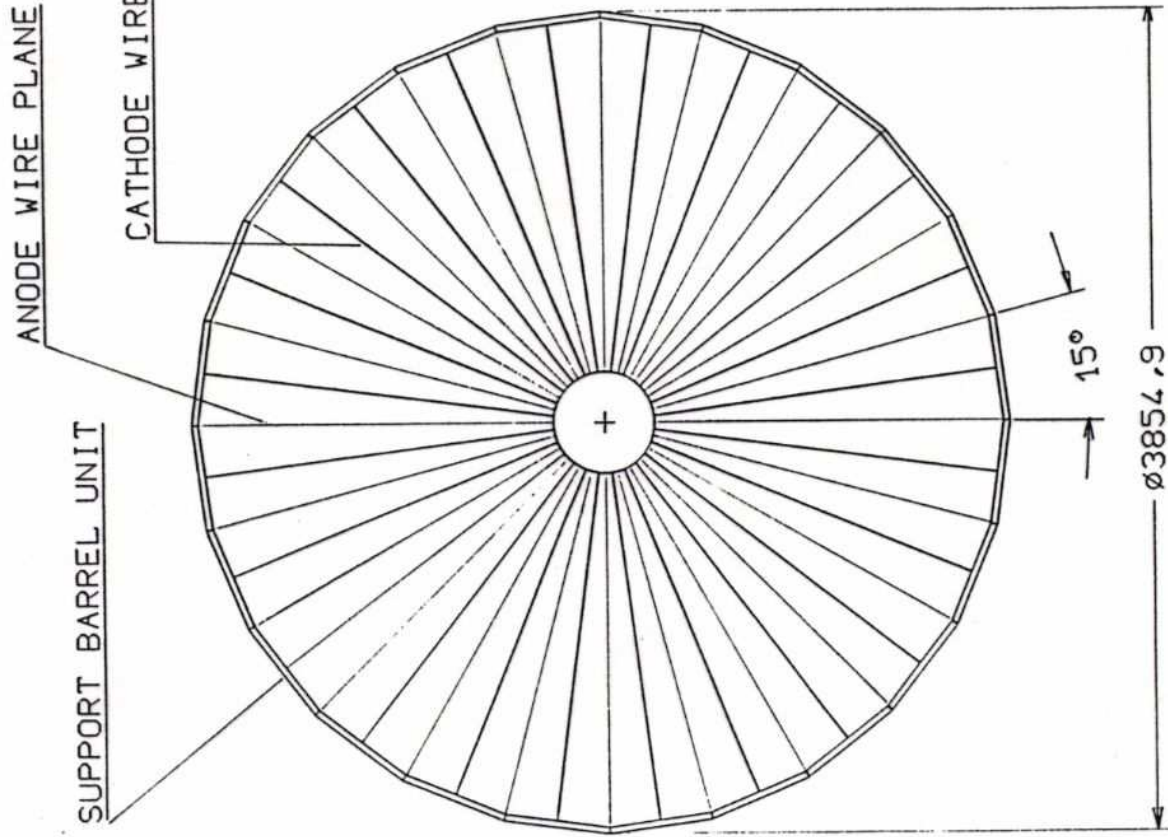


Fig.3.17: Axiale Projektion eines e^+e^- -Ereignisses bei 35 GeV Schwerpunktsenergie in der Jet-Kammer des JADE-Detektors. Den Spuren zugeordnete Treffer in der Kammer sind mit (+) gekennzeichnet, übrige Treffer mit (/).

Jetkammer des OPAL-Experiments



Daten: $D \approx 3.8 \text{ m}$

Länge $\approx 4 \text{ m}$

B-Feld $\approx 0.4 \text{ T}$

24 Sektoren à 153 Anodendrähte

Ortsauflösung $\approx 130 \mu\text{m} (r-\phi)$, $\approx 6 \text{ cm} (z)$
 im OPAL-Experiment (1989-2000) des LEP-
 Beschleuniger

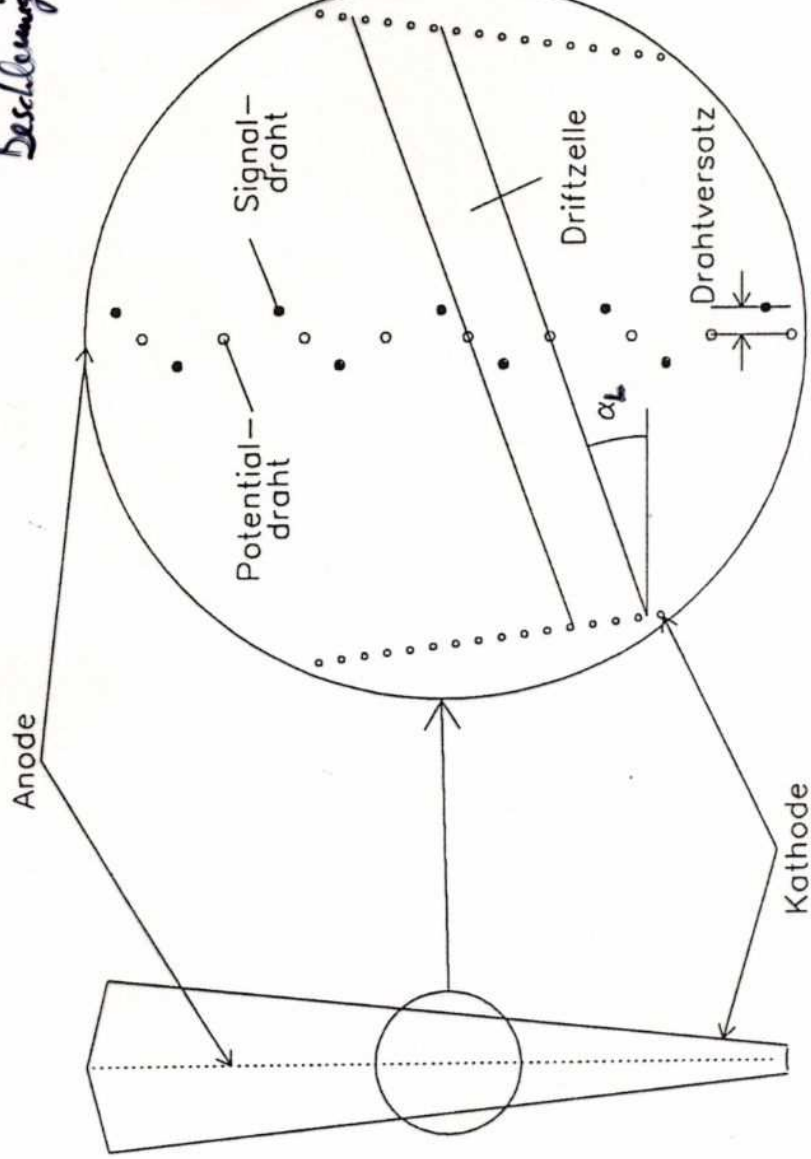
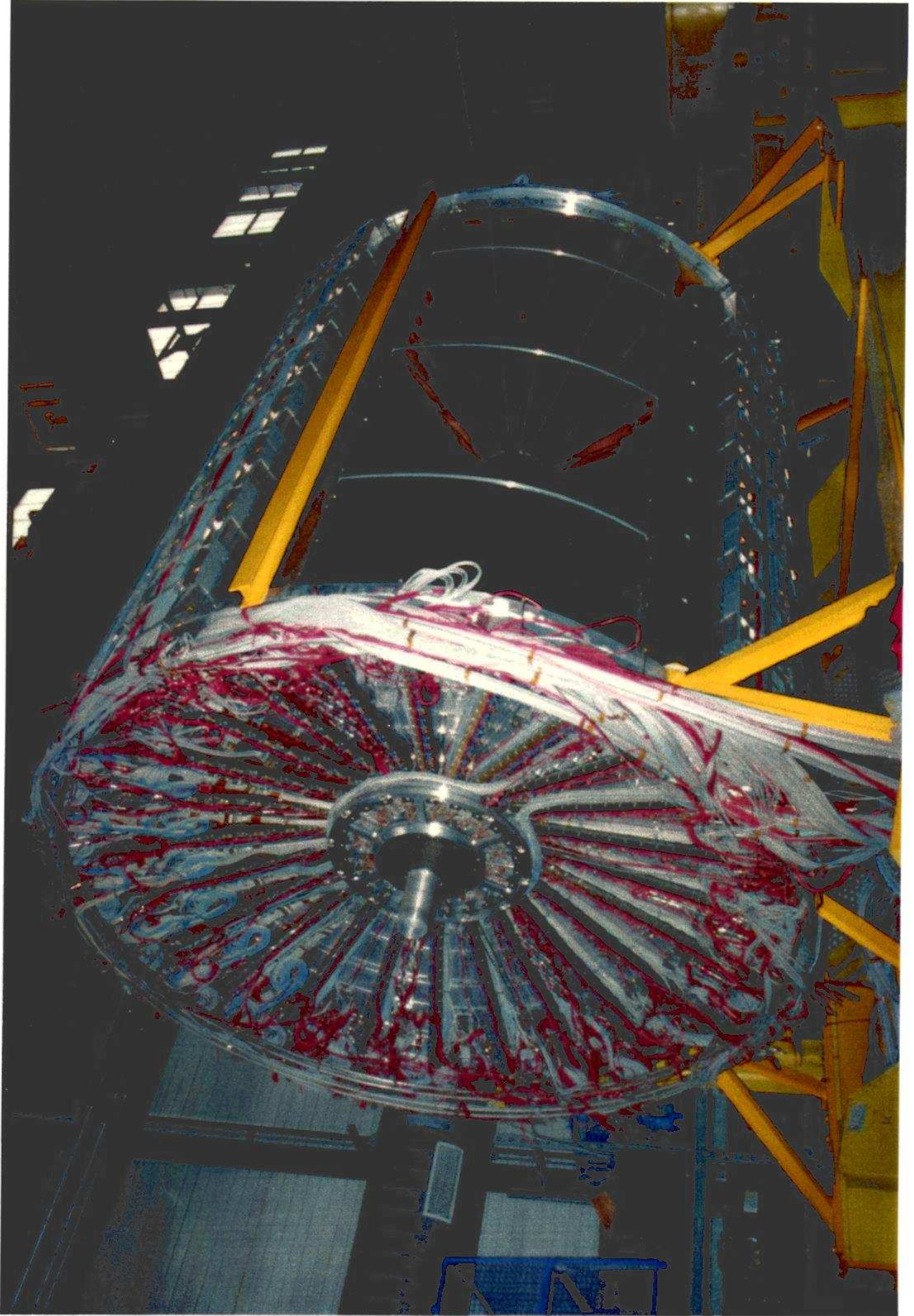
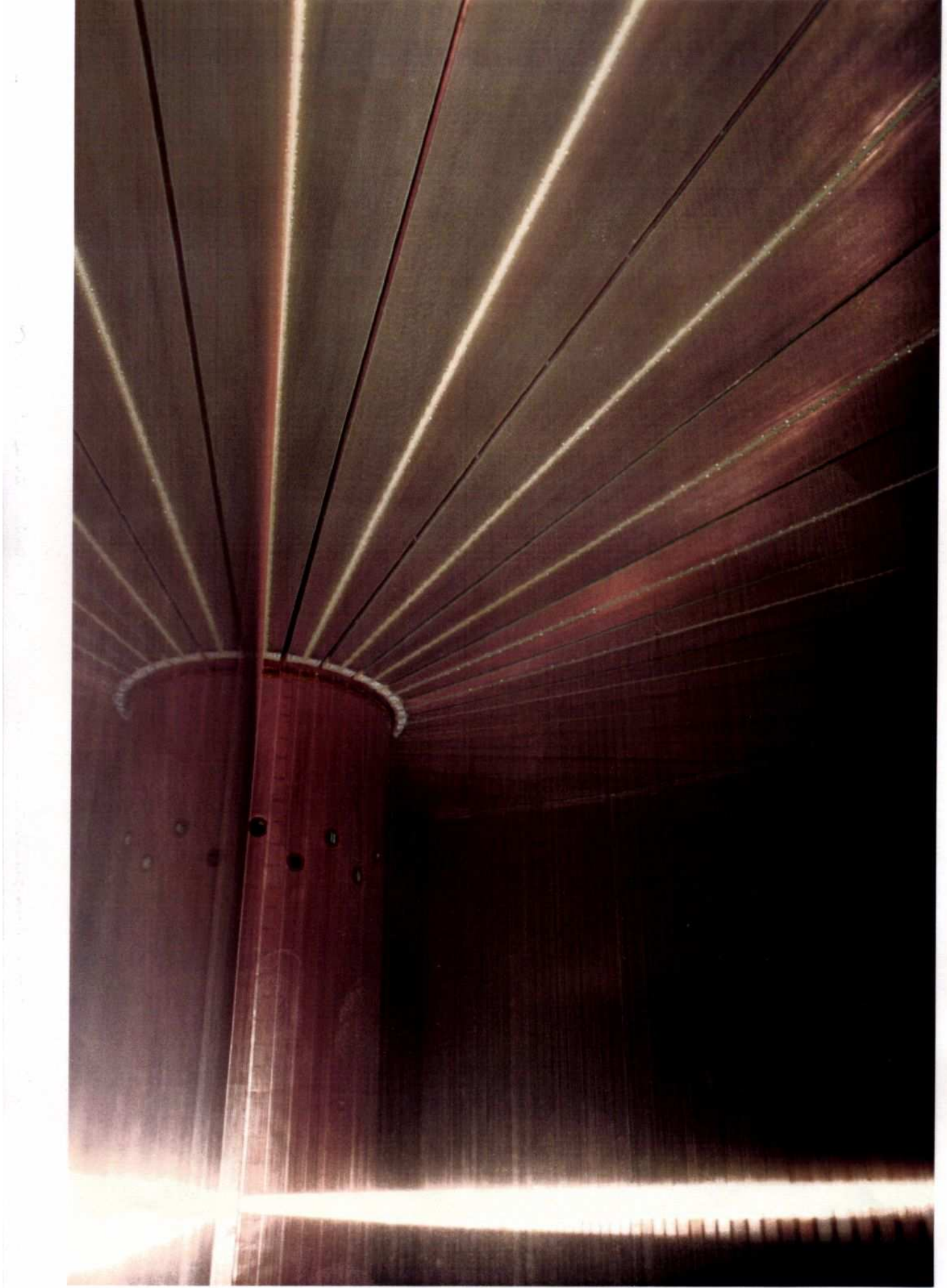
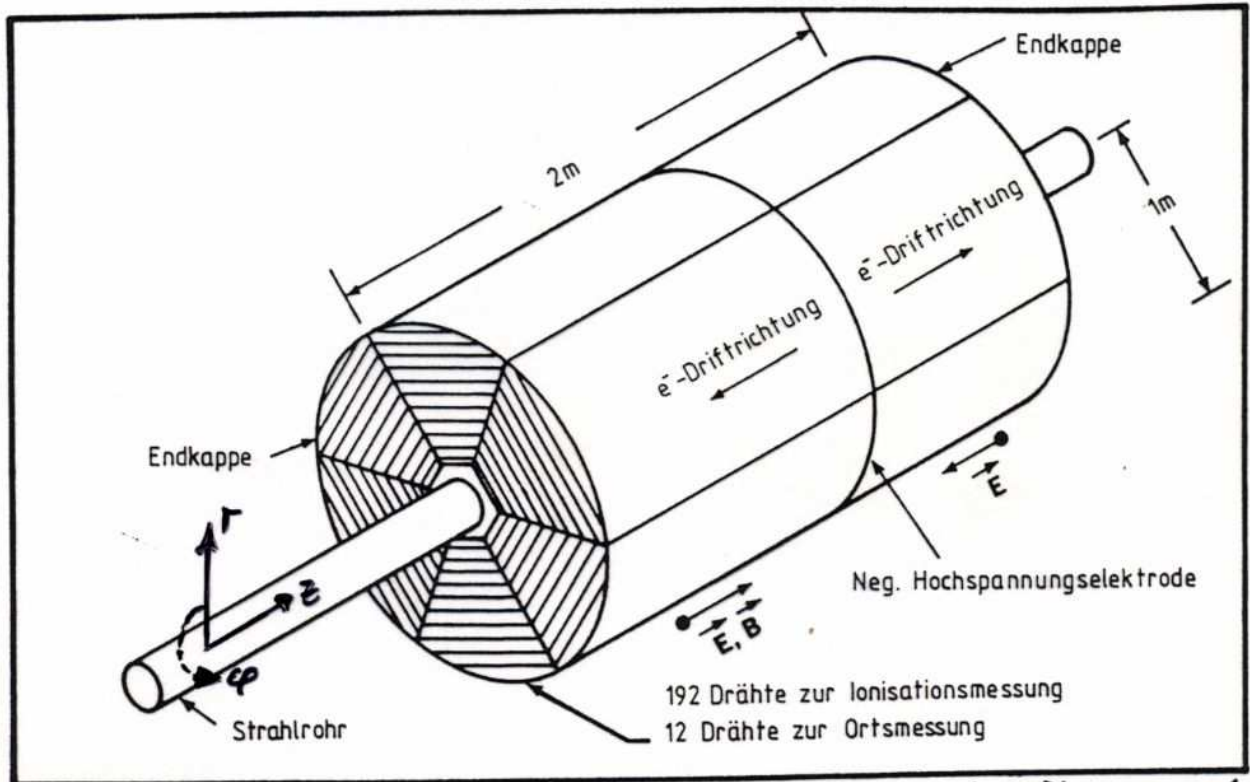


Abb. 2.3: Ein Sektor der Jetkammer in der $r\phi$ - Ansicht.





Zeitprojektionskammer TPC



z.B. $|\vec{E}| = 150 \text{ V/cm}$
 $|\vec{B}| = 1.5 \text{ T}$

Fig.3.18: Zeitprojektionskammer (TPC) des PEP4-Experimentes [MA 78].

- $\vec{E} \parallel \vec{B} \rightarrow$ kein Lorentzwinkel
- $\vec{v}_0 \parallel \vec{B} \rightarrow$ Reduktion der transversalen Diffusion
 um Faktor $1 / (1 + \omega^2 \tau^2)$ ($\omega = \frac{eB}{m}$, τ : mittlere zw. Stoß
- Auslese der Kathoden an Endkappen
 \rightarrow radiale & azimutale Koordinaten
 mit ca. 180 μm Auflösung
- Ankunftszeit/Driftzeit der Elektronen
 \rightarrow z-Koordinate
 mit ca. 200 μm Auflösung

Prinzip der Kathodenauslese bei TPC

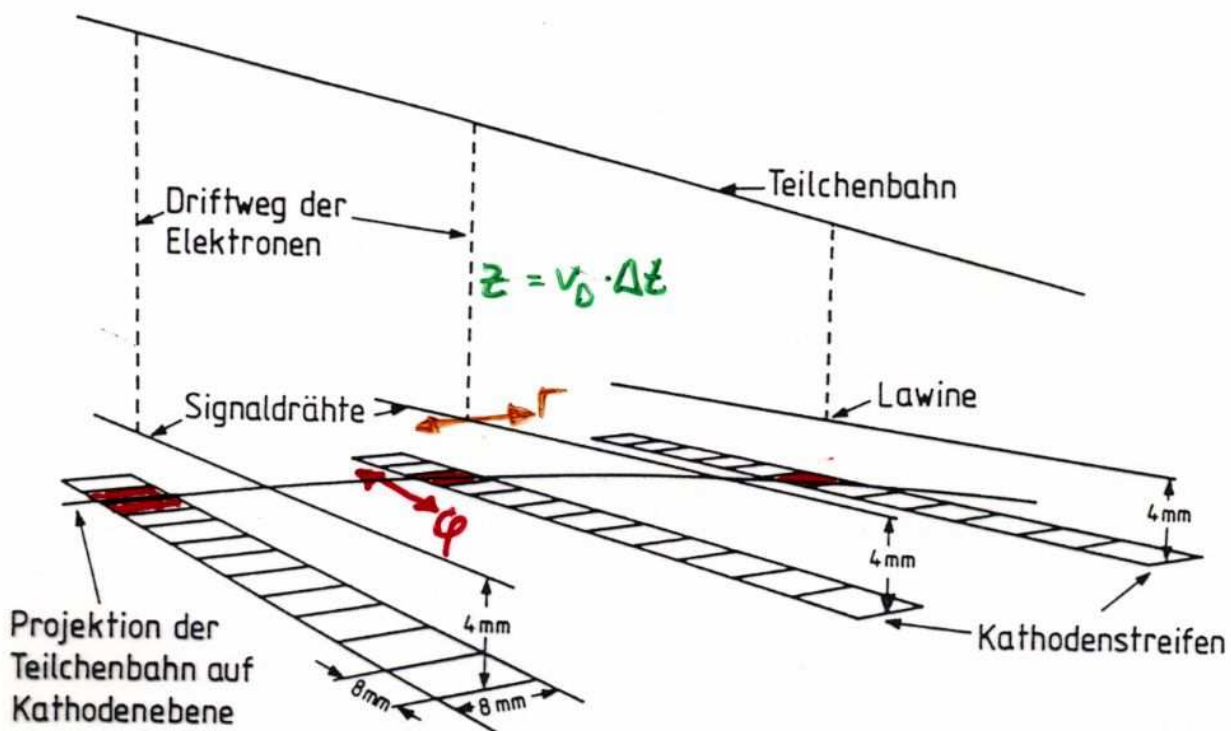


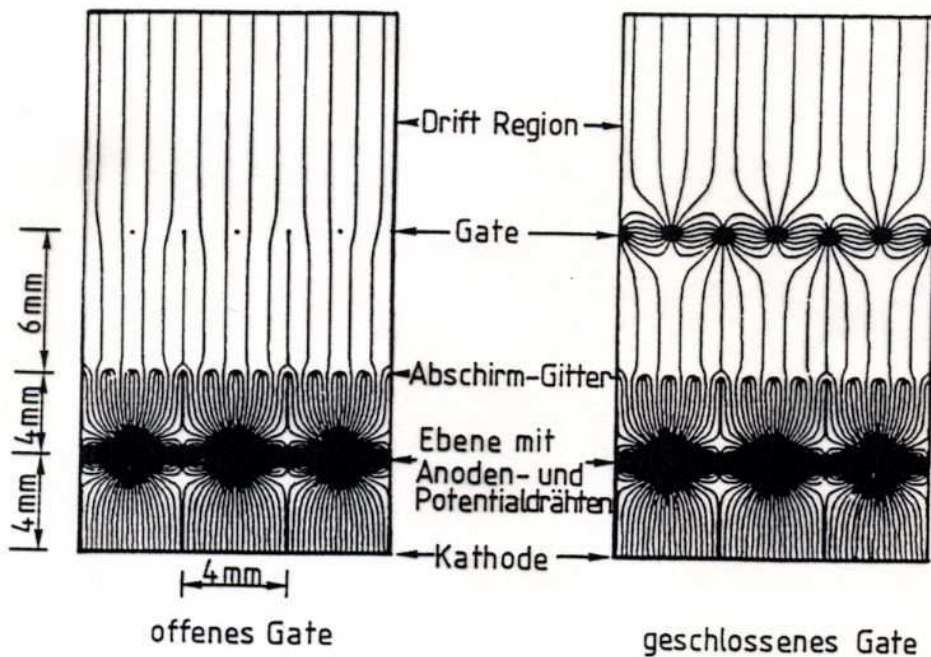
Fig.3.19: Prinzip der Spurauslese durch segmentierte Kathoden (Pads) im TPC [FA 79].

- radiale Position durch Anodendraktposition
- azimutale Position durch Kathodensegmente
- z durch Driftzeit

- ▷ Ionen aus Gasverstärkungslawine driften (langsam) in Kammer zurück → Feldverzerrungen
→ Auflösungsver schlechterung insbesondere bei hohen Zählraten
- ⇒ Gate-Elektrode zwischen Kammer Volumen und Anodendrähten + Kathodensegmenten

Gate-Elektrode bei TPC

- normalerweise geschlossen
- kurzzeitig aufgrund externen Auslösesignals (Trigger) geöffnet
- verhindert Rückdrift der pos. Ionen in Kameravolumen
- hindert Elektronen (z.B. aus zufälligen Ionisationsprozessen wie kosmischer Strahlung etc.) am Eindringen in Gasverstärkungsbereich
- keine Beeinträchtigung der \vec{E} -Feldqualität im Kameravolumen



Die Wirkungsweise des Gates in der ALEPH-TPC [44]. Bei offenem Gate können die Ionisationselektronen ungehindert in den Gasverstärkungsraum eindringen. Das geschlossene Gate hindert die durch Gasverstärkung erzeugten Ionen an der Rückdrift in den Driftraum. Ebenso können bei geschlossenem Gate Elektronen aus dem Drift-raum den Gasverstärkungsbereich nicht erreichen.

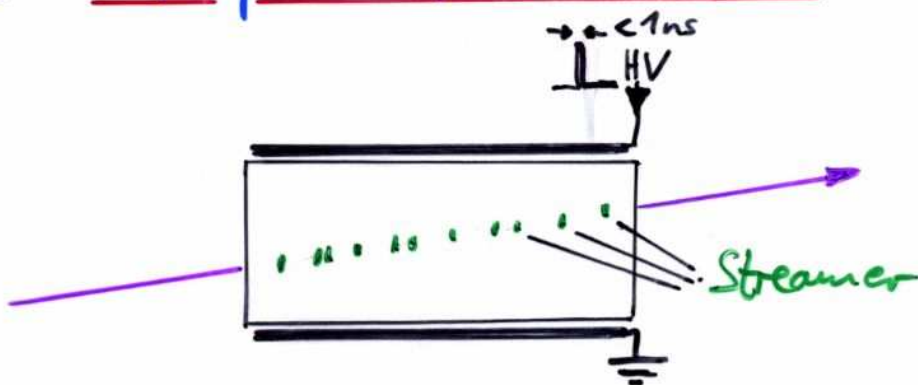
Streamer-Kammern

Zur Erinnerung: Streamer werden bei Betrieb oberhalb des proportionalbereiches erreicht, wenn das Gasgemisch einen hohen L sdgas-Anteil aufweist, der eine Ausbreitung der Entladung durch UV-Photonen aus Gasion-Rekombinationen unterdrückt.

Diese Ausbreitung der Entladung kann aber auch erreicht werden, falls die Hochspannung nur sehr kurz anliegt.

Zwar treten dann UV-Photonen auf, doch deren Ionisation wird nichtverst rkt. Ist die Hochspannung zudem so hoch, dass lokal ^{>30kV/cm} am Ort der Ionisation Gasverstärkung auftritt, so kann die Ionisation aus dem Licht angeregter Atome sichtbar werden.

Dies ist das Prinzip der Streamer-Kammern:



Prinzip der Streamer-Entstehung

- t_1 geladnes Teilchen erzeugt Cluster aus Elektron-Ion-Paaren
- t_2 im Hochspannungsfeld bildet sich aus der Primärisation eine Gasverstärkungslawine aus
- t_3 Ladungswolke nimmt tropfenförmige Gestalt an aufgrund der unterschiedl. Beweglichkeiten von Elektronen & Ionen
Raumladungsfeld \vec{E}_r addiert sich zu externem Feld \vec{E}
- t_4 UV-Photonen aus der Lawine erzeugen sekundäre Lawinen

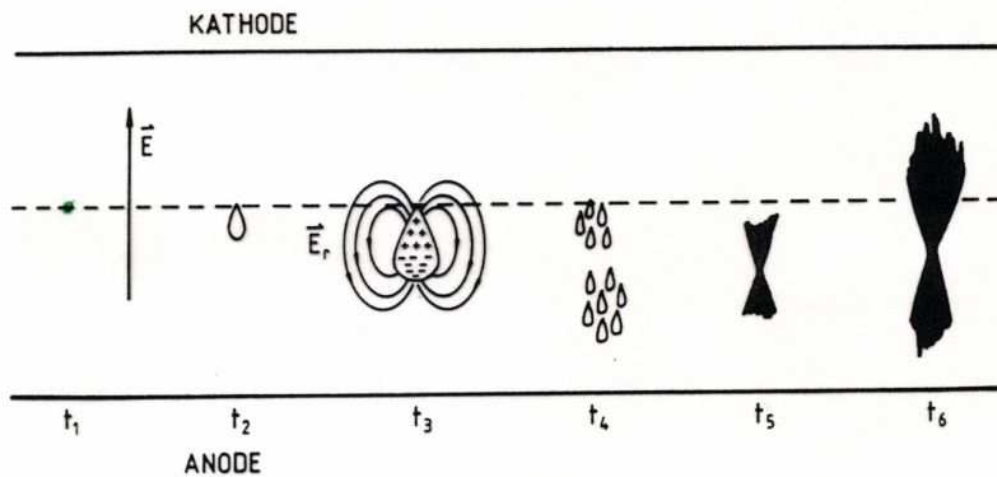


Fig.3.29: Zeitliche und räumliche Entwicklung eines Streamers. Die zeitliche Abfolge verläuft von links (t_1) nach rechts (t_6) [AL69].

- t_5 Sekundäre und primäre Lawinen bilden ~~einen~~ ^{zwei} Plasma-kanäle, die in Richtung der Elektroden wachsen
- t_6 Diese Streamer wachsen zusammen mit Geschwindigkeit von $\sim 10^8$ cm/s
Liegt die Hochspannung solange an, erreichen die Streamer die Elektroden und ein Funke/Überschlag entsteht

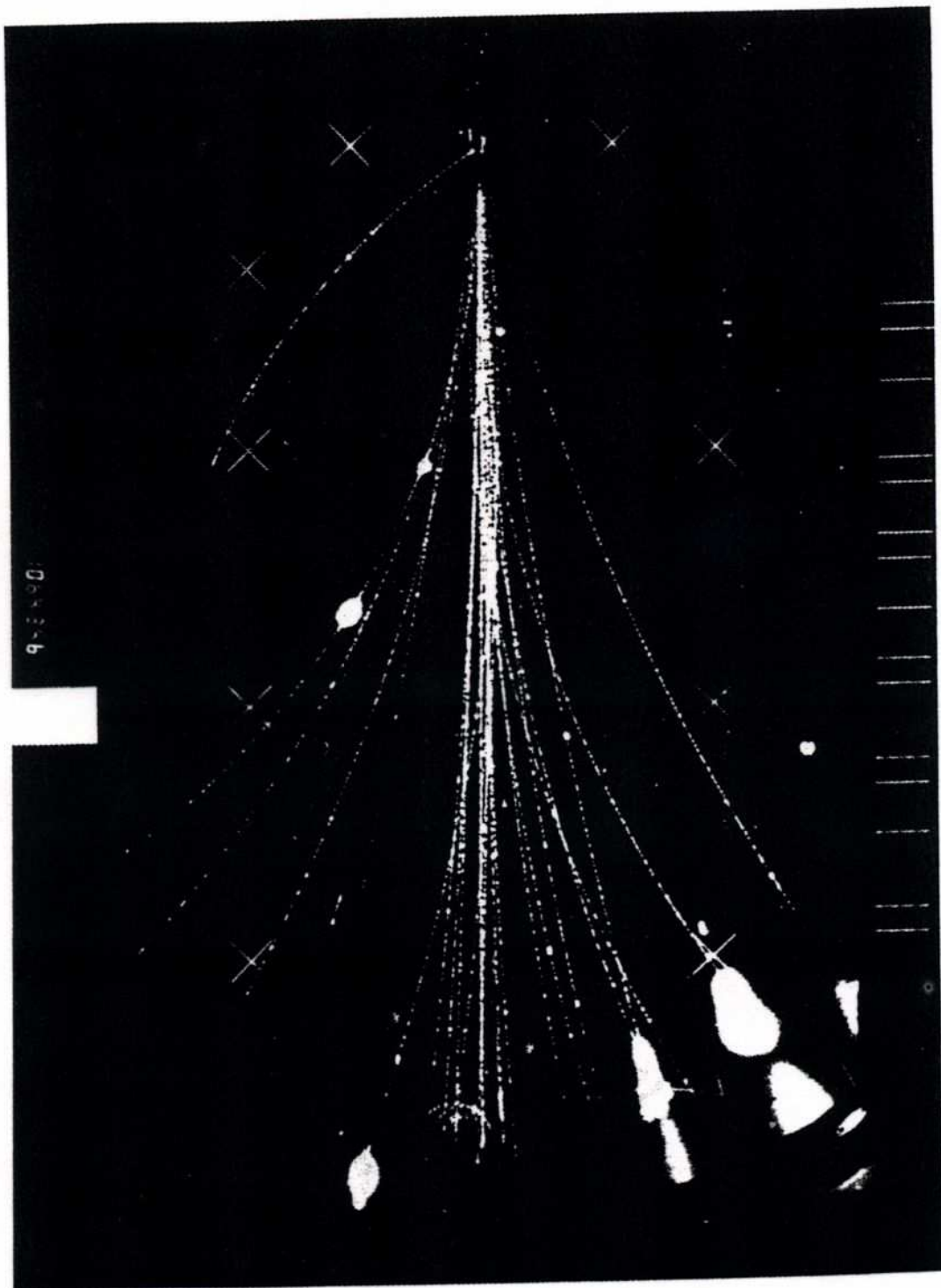


Fig.3.30: Wechselwirkung eines π^- bei 300 GeV in einem H_2 -Target. Die Spuren der Reaktionsprodukte sind in einer Streamerkammer mit den Abmessungen $200 \times 120 \times 72 \text{ cm}^3$ registriert [EC 80].

Kernspuremulsion

... entspricht einer photographischen Sichtbarmachung geladener Teilchen. Kernspuremulsionen bestehen aus feinkörnigen AgBr- und/oder AgCl-Kristallen in einem Gelatine-Substrat. Die Ionisationsprozesse eines geladenen Teilchens reduzieren einige AgBr/AgCl zu metallischem Silber \leadsto latentes Bild.

Diese metallischen Silberkeime werden beim Entwicklungsprozess vergrößert. Beim abschließenden Fixieren werden zurückgebliebene AgBr/AgCl aus dem Gelatine-Substrat entfernt. Es bleibt das Bild der Teilchenspur als schwarze Spur von Silber, die mit optischen Mitteln (Mikroskop, Projektion, ...) ausgewertet und vermessen werden müssen. Die typ. Korngröße von 0,1-0,2 μm (zum Vgl. Filme haben 25-1000 μm) sind der Grund für die enorme Ortsmessgenauigkeit von $\sim 1 \mu\text{m}$.

Für längere Spuren müssen Emulsionen gestapelt werden. Die anschließende Auswertung erfordert genaue Ausrichtung der einzelnen Emulsionsplatten zueinander

Kernspuremulsion



- kurze Strahlungslänge
($X_0 \approx 2.9 \text{ cm}$)
 - 100%iges Ansprechvermögen
 - permanent sensitiv
(\sim nicht triggerbar)
 - Schwärzungsgrad $\hat{=}$ spezifischer Ionisationsgrad
($dE/dx \sim (ze)^2$, z : Ladungszahl des Teilchens)
- \rightarrow Teilchenidentifikation

Ein Kohlenstoffkern der kosmischen Strahlung kollidiert mit einem Proton in einer Kernemulsion. Der Kohlenstoffkern desintegriert dabei in drei α -Teilchen. Das Proton erhält einen Rückstoß und bewegt sich nach links [66].

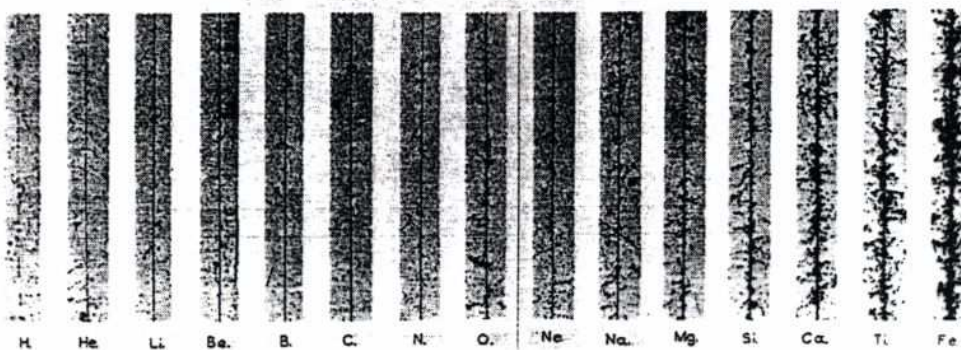


Abb. 4.94 Spuren von Kernen in Kernemulsionen. Die Ionisationsdichte der Spuren wächst im Quadrat mit der Kernladung [66]. Die "Ausfaserung" der Spuren wird durch δ -Elektronen verursacht.

Halbleiter-Detektoren zur Ortsmessung

Typische Ortsmessgenauigkeiten von Vieldrahtkammern liegen im Bereich von $\sim 100 \mu\text{m}$ und können nur mit erheblichem Aufwand (z.B. sehr viele Drähte, besonders homogene Felder) verbessert werden. Kernspuremulsionen liefern zwar Genauigkeit von $\sim 1 \mu\text{m}$, können aber nicht getriggert oder online ausgewertet werden. Halbleiterdetektoren können diesen Zwischenbereich abdecken:

- Mikrostrukturierung \rightarrow Auflösung im $10 \mu\text{m}$ -Bereich
- elektrische Auslese \rightarrow online Signalanswertung

Zur Ortsmessung werden verschiedene Halbleiter-Detektorsysteme benutzt, z.B.

- (Silizium-)Streifendetektoren für 1- oder 2-dim Ortsmessung
- CCD-Detektoren für 2-dim Ortsmessung im $< 10 \mu\text{m}$ Bereich
- Pixeldetektoren für 2-dim Ortsmessung im $10 \mu\text{m}$ Bereich mit hoher Ausleserate und geringer Objektpanz.

Silizium-Streifendetektoren

- Streifenstruktur im 50 bis 500 μm Abstandsmaß
 (meist feinere Strukturierung als für Auslese, d.h. Streifenpitch $<$ Readout-pitch, da kapazitive Kopplung zw. benachbarten Streifen)
 \leadsto Ortsgenauigkeit typ. 10 μm (in einer Dimension)

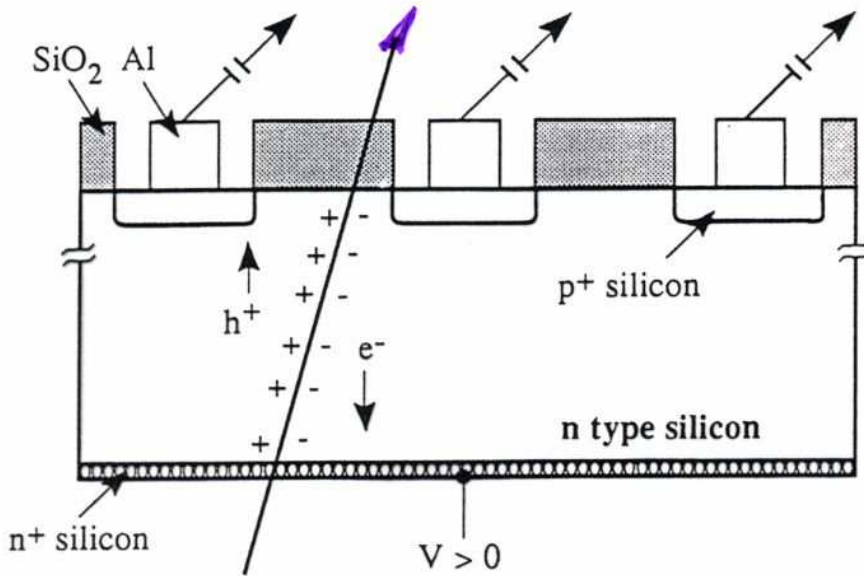


Figure 5: Schematic of a silicon particle detector.

- zusätzliche gekrenzte Strukturierung der Rückseite
 \leadsto 2-dim Ortsinformation (NB. Ambiguitäten bei Mehrfachtreffern)

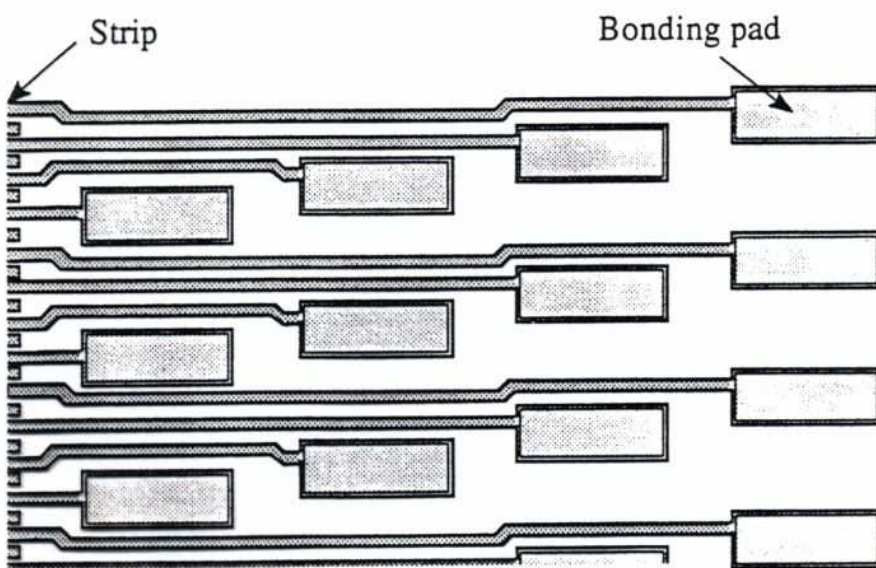
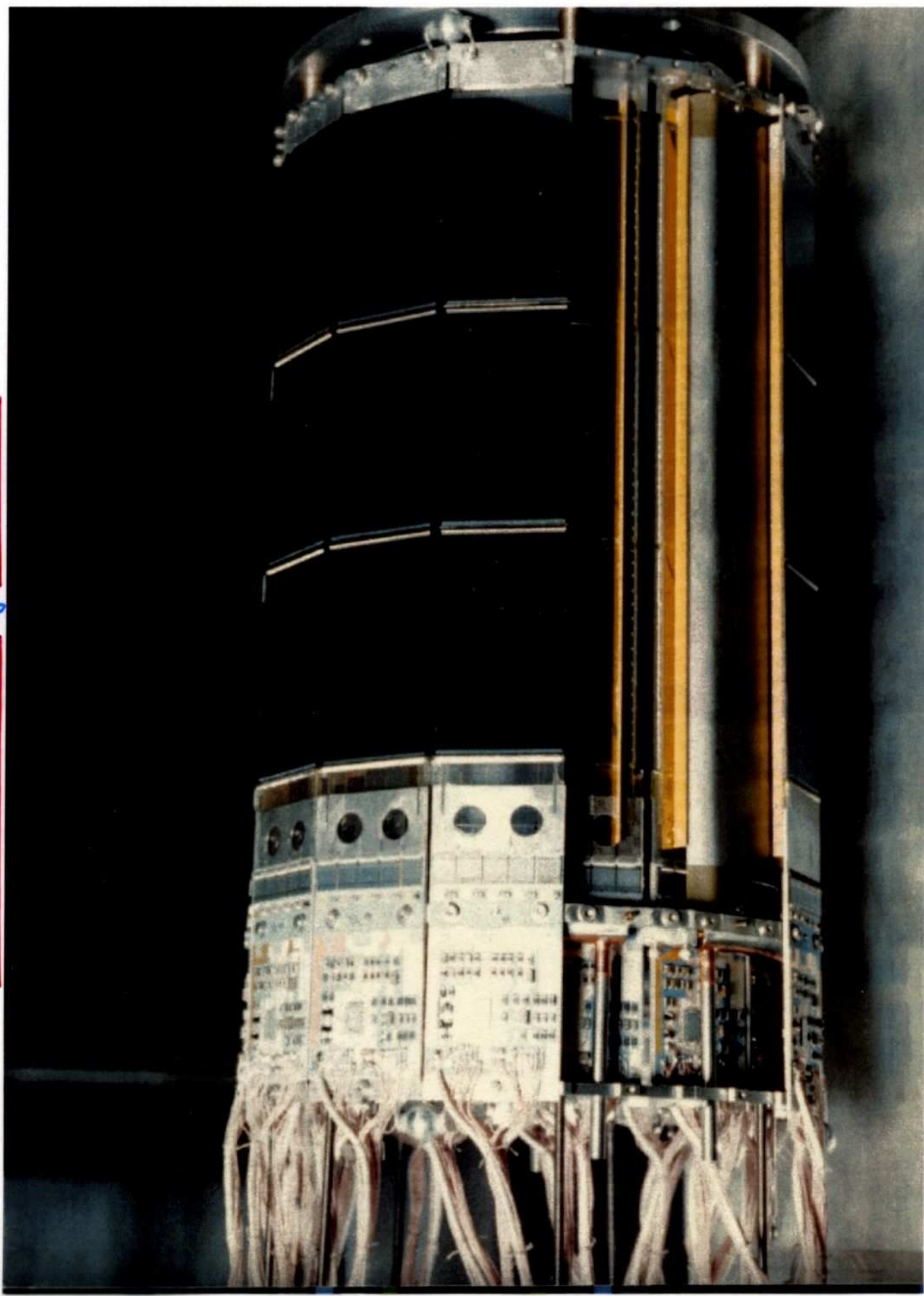


Figure 6: Layout of a silicon microstrip detector.

- Beispiel für Strippitch = 2 · Readout Pitch
 nur jeder zweite Streifen wird elektronisch ausgelesen

OPALS Silizium-Streifen-detektor

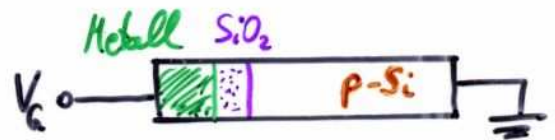


2 konzentrische Layer, je Layer 3 Si-Walzer à $6 \times 3 \text{ cm}^2$ in Serie geschaltet. Auslese-Elektronik

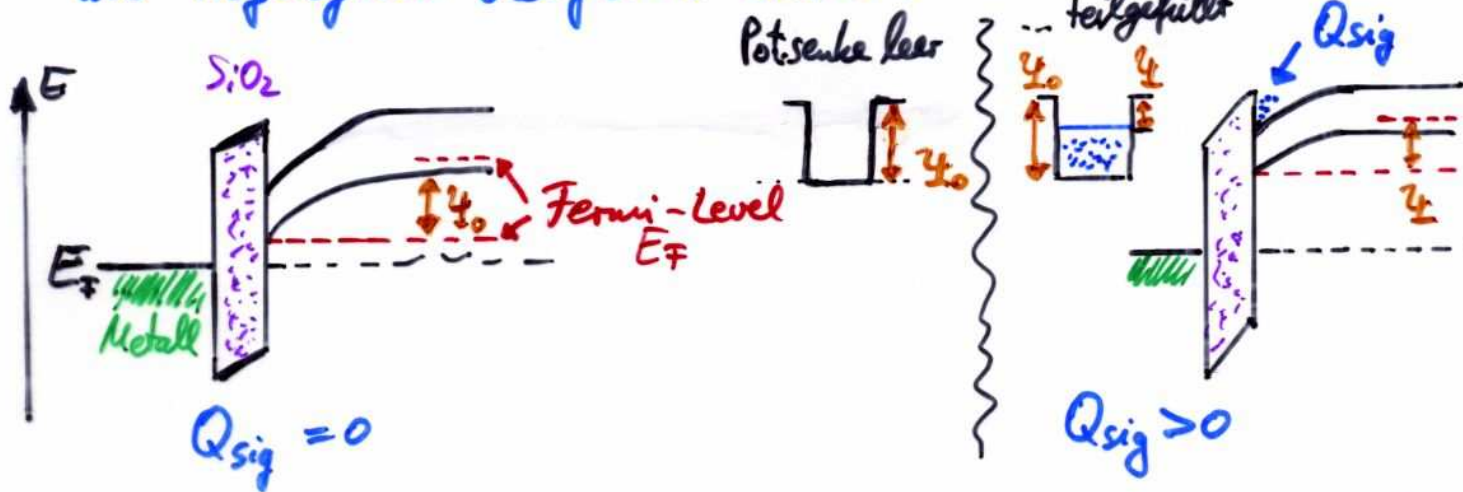
CCD-Detektor

... eine Anordnung dichtbenachbarter MOS-Dioden:

(Metall-Oxide-Semiconductor)



Vorspannung V_G so gewählt, dass Ladungsträgerverarmung an tiefliegender Oberfläche besteht:

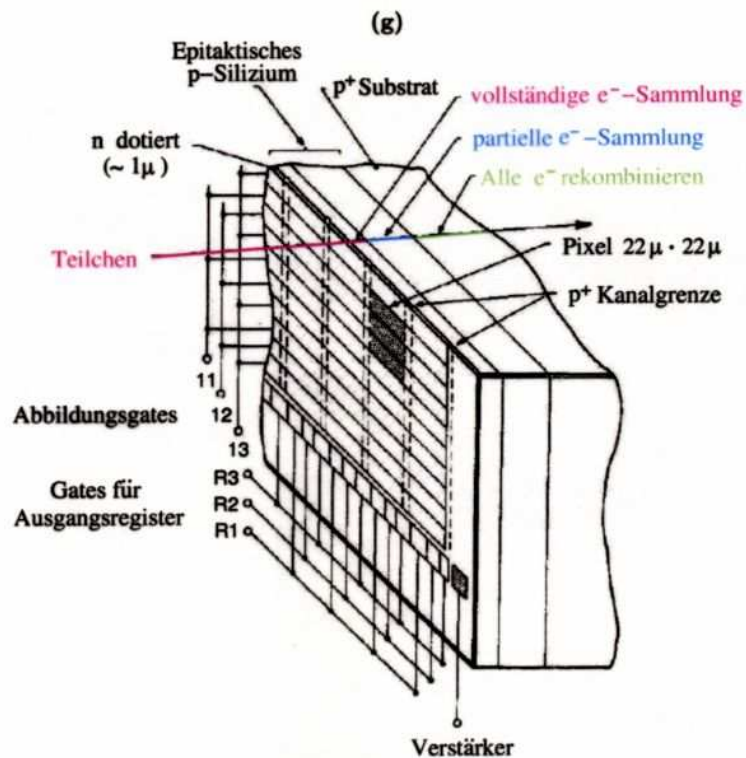
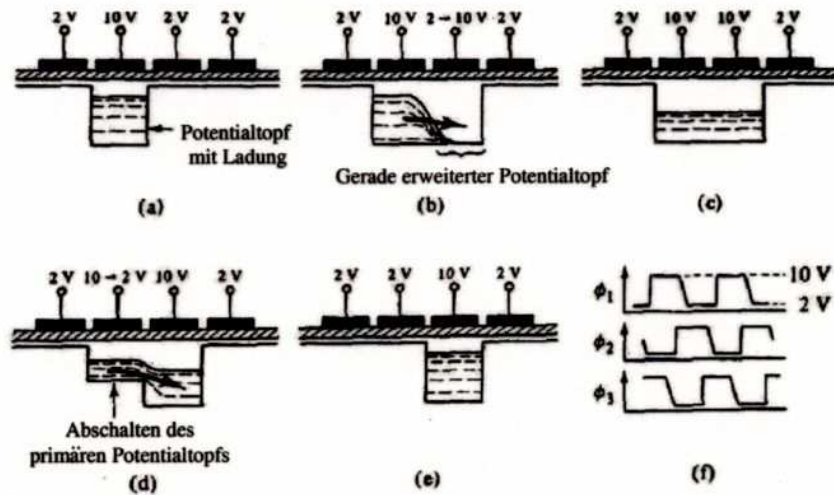


Die in einer Potentialsenke gesammelte Ladung ist dabei aus Ionisationsprozessen (Elektron-Loch-Paarerzeugung) hervorgegangen. Diese Ladung kann nun durch geschickte Erhöhung und Verringerung von V_G zwischen zwei ~~benachbarten~~ benachbarten MOS-Dioden weitergereicht werden (Prinzip der Einerkette).

CCD-Detektoren bieten sehr hohe Auflösung (typ. $\ll 10 \mu\text{m}$ durch Größe der MOS-Dioden $\hat{=}$ Pixel), benötigen aber sehr viel Zeit für die Signalauslese (Einerkette).

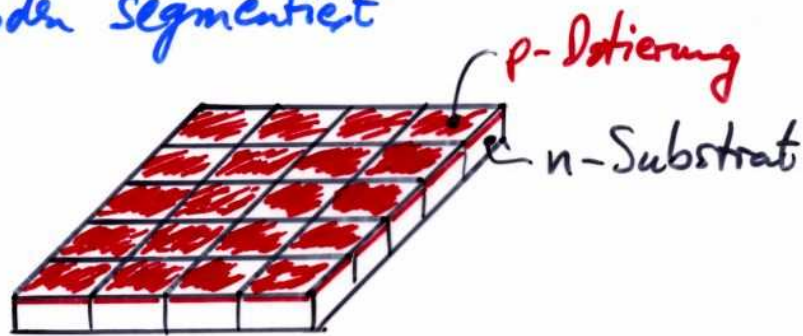
Der CCD-Pixel-Detektor

Schema eines CCD-Detektors und Schritte des Ausleseverfahrens:



Pixel-Detektoren

Hierzu wird ein Si-Wafer komplett in voneinander isolierte Dioden segmentiert



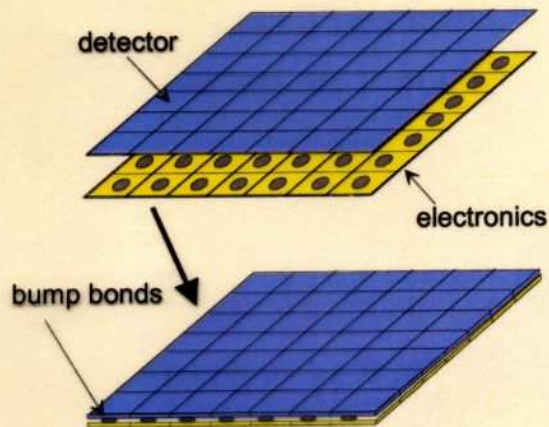
Jedes Pixel erhält/benötigt eine eigene Anschlüsse-Elektronik. Diese wird durch Lötperlen auf der Unterseite des Chips kontaktiert (Bump-Bonding)

→ Elektronik darf nicht mehr Platz einnehmen als Pixelgröße!

Pixeldetektoren liefern Ortsauflösung im Bereich 10-100µm je nach Pixelgröße. Sie sind sehr schnell aufgrund der direkten Anschlüsse jedes Pixels (→ kein Multiplexen erforderlich). Dies geht aber auf Kosten einer enormen Anzahl von Signalkanälen (1 Pixel $\hat{=}$ 1 Kanal).

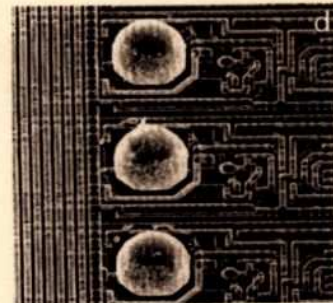
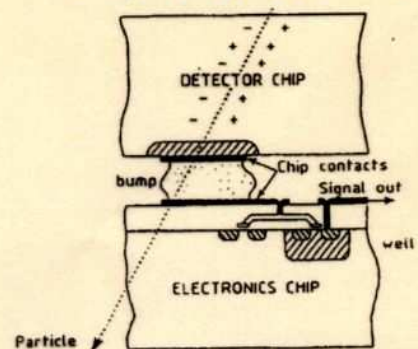
◆ Silicon pixel detectors

- Segment silicon to diode matrix
- also readout electronic with same geometry
- connection by bump bonding techniques



RD 19, E. Heijne et al., NIM A 384 (1994) 399

Flip-chip technique



- Requires sophisticated readout architecture
- First experiment WA94 (1991), WA97
- OMEGA 3 / LHC1 chip (2048 pixels, $50 \times 500 \mu\text{m}^2$) (CERN ECP/96-03)
- Pixel detectors will be used also in LHC experiments (ATLAS, ALICE, CMS)

Mikrostreifen-Gasdetektoren (MSGC)

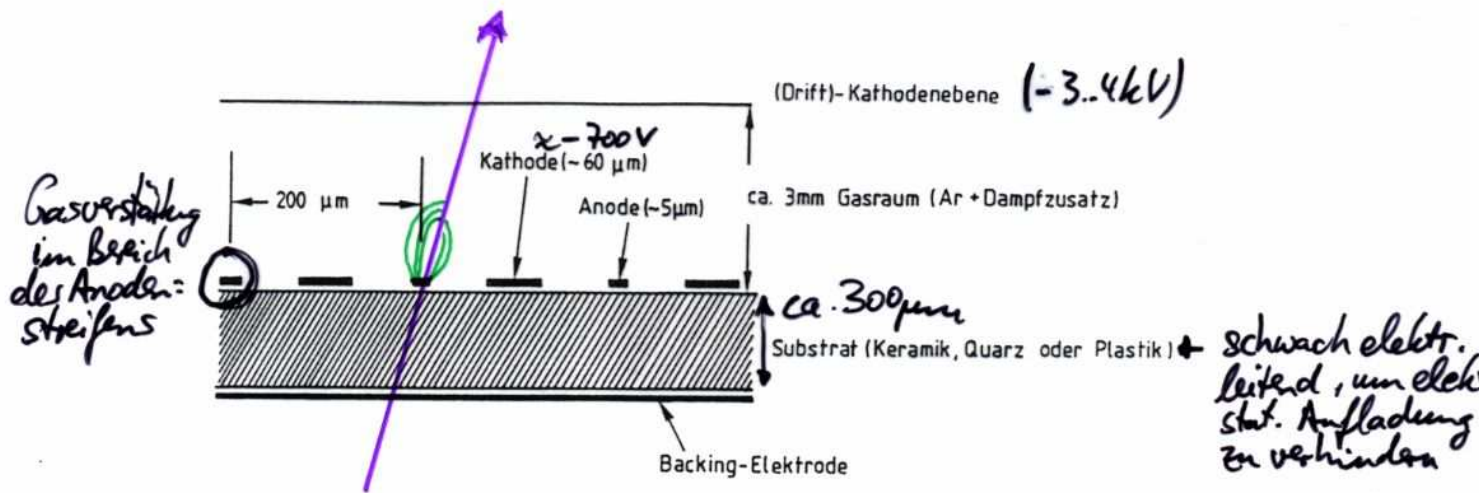


Abb. 4.30 Prinzipieller Aufbau eines Mikrostreifen-Gasdetektors.

... stellen eine Entwicklung dar, die sowohl bessere Ortsauflösung ($< 50 - 100 \mu\text{m}$) und schnelle Signalregistrierung ($\hat{=}$ kurze Driftwege) vereint mit der Möglichkeit, kostengünstig großflächige Detektoren realisieren zu können.

Als problematisch stellten sich stark ionisierende Teilchen z.B. α Kernfragmente, etc. heraus, da diese soviel pos. Ionen in der Nähe der Anodenstreifen erzeugten, dass es zu Entladungen an benachbarten Kathodenstreifen (NB: hohe \vec{E} -Feldstärke an Kanten) kam, die die dünne Anodenstreifen unterbrechen konnten (wachsende Ineffizienz bei zunehmender Bestrahlungsdauer)

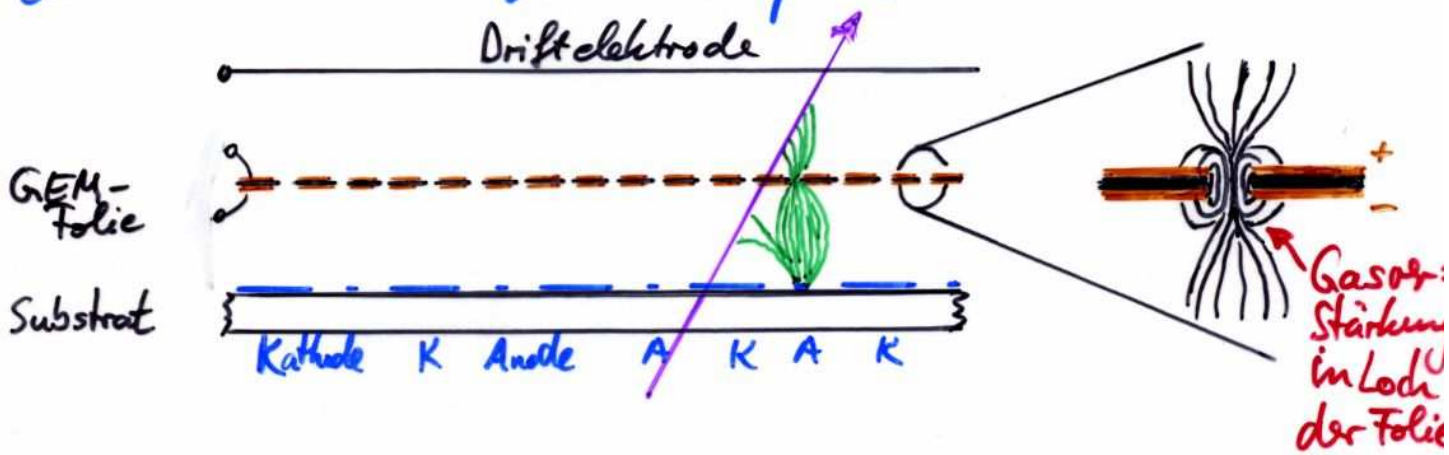
(Beschädigung wird "Mäusefraß" genannt)

Gas-Elektron-Multiplikation (GEM)

Gegen die Wirkung der pos. Ionen nahe der Kathodenstreifen wurden isolierende Schichten auf die Kanten der Streifen aufgebracht ("advanced passivation"):



Alternativ wurde das \vec{E} -Feld zw. Anoden- & Kathodenstreifen verringert, um den Effekt der pos. Ionen auszuschalten. Die erforderliche Gasverstärkung wurde durch GEM-Folien zwischen A-K-Substrat und Driftelektrode erreicht:



Solche GEM-Folien können mehrfach hintereinander eingesetzt (gestapelt) werden, um die \vec{E} -Felder zw. A und K auf ein ungefährliches Maß zu reduzieren (d.h. Double- oder Triple-GEM).

Nachteilig ist, dass Signale mit verschiedenen Pulshöhen überlagert gemessen werden (je nachdem wie viele GEM-Folien die Elektronen durchlaufen haben: 0, 1, 2, ...) \rightarrow Ionisationsmessung schwierig

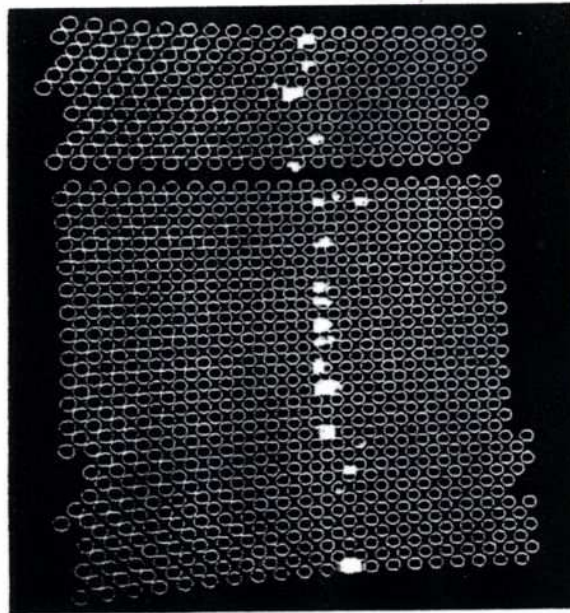
Szintillierende Fasern

Bündelt man viele dünne Fasern aus Szintillatormaterial, so kann der Durchgangsort /-spur eines geladenen Teilchens leicht optisch registriert werden, da die Fasern entlang des Teilchenweges mit hoher Wahrscheinlichkeit Szintillationslicht abstrahlen und damit die Spur markieren.

Szintillierende Fasern haben gewisse Vorteile:

- hohe Flexibilität der geom. Anordnung
- feine Granularität (Faser- \varnothing z.B. einige $10\ \mu\text{m}$)
- geringe Strahlungslänge
- schnelle (ps) Signalantwortzeit (\leadsto Trigger)

Von Nachteil ist die vielkanalige optische Auslese aller Fasern



und die geringe Lichtmenge am Ende der Faser (z.B. in $\varnothing 500\ \mu\text{m}$ Faser werden ≈ 1000 Photonen erzeugt, von denen nur 15 am Ende einer 1m langen Faser ankommen bzw. 8 nach 2m)

Teilchenspur in einem Stapel szintillierender Fasern; Faserdurchmesser $\phi = 1\ \text{mm}$ [243].

Fazit zur Ortsmessung

Eine fast unüberschaubare Vielzahl an Konzepten existiert, welches jedes für sich einen Kompromiss sucht zw.:

- Ortsauflösung
- Detektorfläche
- Antwortzeit
- Okkupanz

wobei der Kostenrahmen meist die Grenzen vorgibt (z.B. sind 2000 m^2 Halbleiterpixel-Detektoren mit $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ Pixelgröße technisch machbar, jedoch beträgt die Kanalanzahl $800 \cdot 10^9$, d.h. 100 GB für jedes vermessene Event falls nur 1 = getroffen, 0 = Pixel nicht getroffen; ...)

Hier vorgestellt wurde nur eine Auswahl von Ortsdetektoren. Es gibt noch viele weitere, die auf ähnlichen (vergleichbaren) Technologien basieren, jedoch unterschiedliche Materialien verwenden (z.B. Alu-Rohre mit zentralem Anodendraht vs. Strohhalme mit zentralem Anodendraht [$\hat{=}$ Straw-Kammern]).