

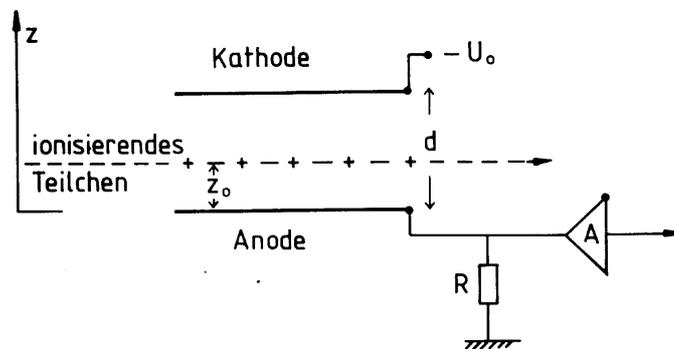
## 3. Orts- und Impulsmessung

### 3.1. Ionisationskammern

**Meßziel:** Messung der durch den Teilchendurchgang verursachten primären Ionisation

elektrischer Ausgangsimpuls ist prop. zur erzeugten Ionisation

**Meßprinzip:**



- Teilchen ionisiert ein Gas (Flüssigkeit oder Festkörper) entlang seiner Bahn  $\rightarrow e^-, A^+$
- Elektronen u. pos. Ionen driften zu den jeweiligen Elektroden (Driftgeschwindigkeiten  $v_D$  sehr unterschiedlich:  $v_D^- \gg v_D^+$ )  
 $\rightarrow$  Ströme  $I^-(t), I^+(t)$

typische Werte für Argon-Gas, Normaldruck, E-Feld = 500 V/cm:

$$v_D^- \approx 5 \text{ cm}/\mu\text{s}, \quad v_D^+ \approx 10^{-3} v_D^-$$

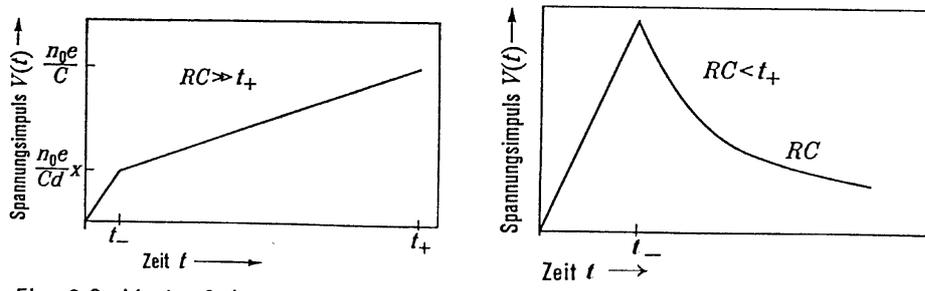
Für eine max. Driftstrecke von 5 cm ergeben sich **Ladungssammelzeiten von:**  $t^- \sim 1 \mu\text{s}, t^+ \sim 1 \text{ ms}$  (zu lang!)

- Influenzierte Ladungen auf den Kondensatorplatten  
 $\rightarrow$  Stromfluß durch einen Arbeitswiderstand R,  $\rightarrow$  Spannungspuls:

$$V(t) = \frac{N \cdot e}{C} \left( \frac{1}{t^-} + \frac{1}{t^+} \right) RC \left( 1 - e^{-t/RC} \right)$$

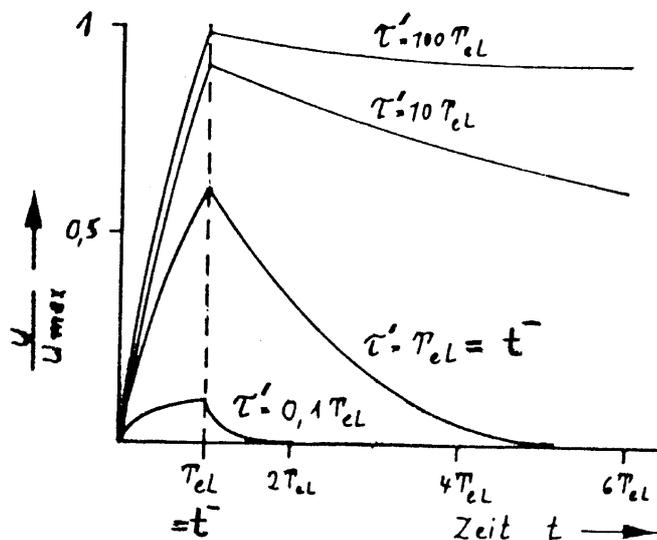
(C = Detektorkapazität, N = Zahl der produzierten e-Ionen Paare)

Form des Signals hängt von den Zeitkonstanten ( $t^+$ ,  $t^-$  und  $RC$ ) ab:



für  $RC \gg t^+$  trägt die gesamte Ionisationsladung (Elektronen und pos. Ionen) zum Signal bei

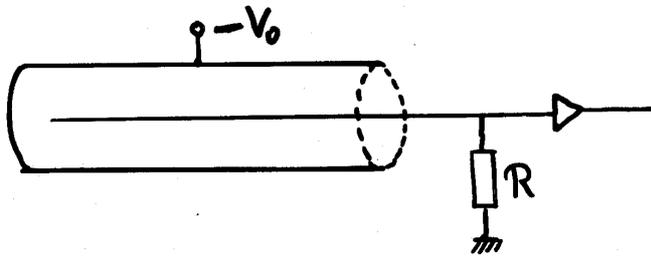
- Elektronische Pulslänge kann durch sog. **Differenzieren des Signals** (Hochpaß,  $(RC)'$ -Glied mit der Zeitkonstanten  $\tau'$ ) verkürzt werden



**Nachteile:**

- kleinere Signalamplitude (nur ein Teil des Elektronenstroms wird zur Signalbildung ausgenutzt)
- Pulshöhe wird abhängig vom Ort des Teilchendurchgangs  $V(t^-) \sim z_0$

## Zylindrische Geometrie:



Anode:  $r = a$

Kathode:  $r = b$

$r' = \text{Ort der Ionisation}$

$$E(r) = \frac{U_0}{\ln(b/a)} \cdot \frac{1}{r}$$

$$\Delta V^- = -\frac{q}{C} \frac{\ln\left(\frac{a+r'}{a}\right)}{\ln(b/a)}$$

$$\Delta V^+ = -\frac{q}{C} \frac{\ln\left(\frac{b}{a+r'}\right)}{\ln(b/a)}$$

i.allg.:  $b \gg a$       $b/a \sim 10^3$      ( $a = 10 \mu\text{m}$ ,  $b = 10 \text{cm}$ )

für  $r' = b/2 \rightarrow \frac{\Delta V^-}{\Delta V^+} = \frac{\ln(500)}{\ln(2)} \approx 9.0$

$\Rightarrow$  In den meisten Fällen dominiert die Elektronenkomponente

$\Rightarrow$  • schnelles Signal  
• nur logarithmische Abhängigkeit vom Ort der Ionisation.

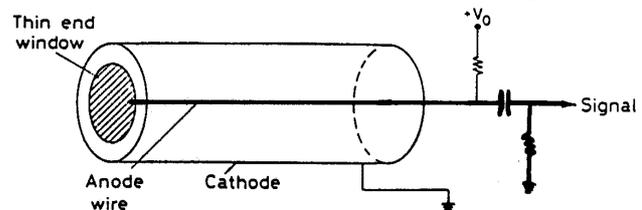
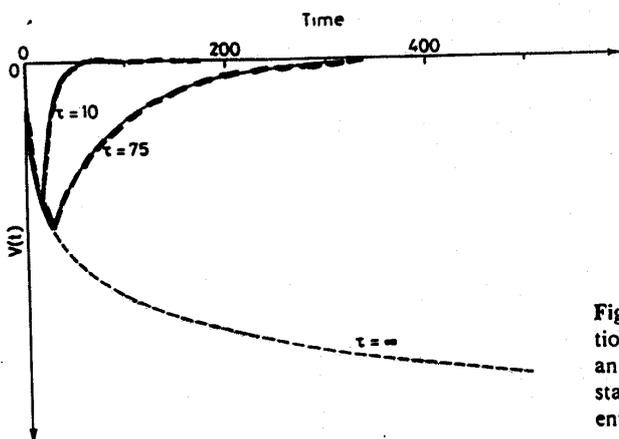
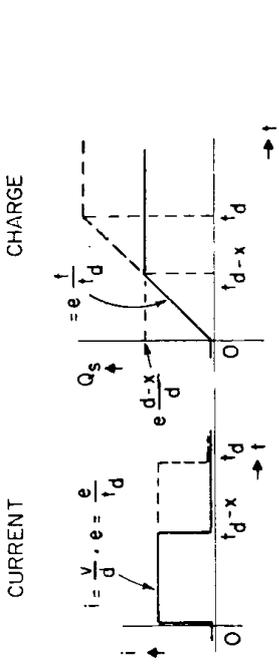
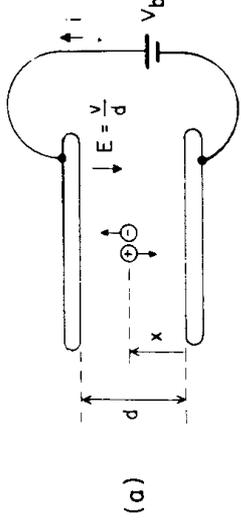


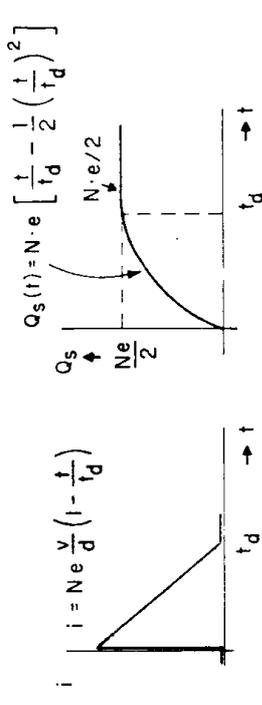
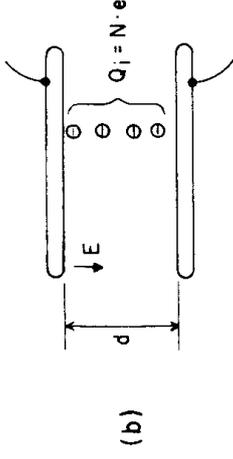
Fig. 6.6. Pulse signal from a cylindrical proportional counter. The pulse is usually cut short by an RC differentiating circuit with a time constant  $\tau$ . The figure shows the effect of two different constants

# Ionisationssignal in flüssigem Argon

a) Punktförmige Ionisation



b) senkrechter Teilchendurchgang



Nachteile:

- Anlagerung von Elektronen an Verunreinigungen im flüssigen Argon (elektronegative Elemente, wie z.B. Sauerstoff)
- geforderte Reinheit für Flüssig-Argon Kalorimeter:  $< \sim$  ppm Bereich  
 $\Rightarrow$  Reinigungs- und Kontrollsysteme
- Kryogenik, Edelgase sind erst bei tiefen Temperaturen flüssig (Siedepunkte: 85 K (Ar), 117 K (Kr), 163 K (Xe))

## 3.2. Ionisationsausbeute

Energieverlust durch **Ionisation und Anregung**

**primäre Ionisation:** direkt vom Teilchen gebildete e-Ionen Paare  
**total Ionisation:** zusätzliche e-Ionen Paare können gebildet werden durch:

- $\delta$  Elektronen (besitzen selbst soviel Energie, daß sie ionisieren können)
- Energieabgabe von angeregten metastabilen Atomen durch Stöße

Ionisation ist ein **statistischer Prozeß**

**W-Wert:** mittlerer Energieverlust zur Erzeugung eines e-Ionen-Paares

W-Werte und Zahl der gebildeten e-Ionen Paare pro cm (Normaldruck, minimal ionisierende Teilchen):

	Dichte ( $g/cm^3$ )	W-Wert (eV)	$n_{prim.}$ $cm^{-1}$	$n_{tot.}$ $cm^{-1}$
$H_2$	$8.99 \cdot 10^{-5}$	37	5.2	9.2
He	$1.78 \cdot 10^{-4}$	41	5.9	7.8
Ne	$9.00 \cdot 10^{-4}$	36	12	39
Ar	$1.78 \cdot 10^{-3}$	26	29	94
Kr	$3.74 \cdot 10^{-3}$	24	22	192
Xe	$5.89 \cdot 10^{-3}$	22	44	307
CO <sub>2</sub>	$1.98 \cdot 10^{-3}$	33	34	91
Ar-fl	1.40	23.6		89000
Kr-fl	2.45	20.5		143000
Xe-fl	3.06	15.6		245000
Si	2.33	3.6		$\sim 10^6$

## Abhängigkeit der Ionisationsausbeute von der elektrischen Feldstärke

Für ausreichend hohe Feldstärken ( $10^4 - 10^5$  V/cm) gewinnen die in der Primärionisation entstandenen Elektronen soviel Energie, daß sie selbst ionisieren

⇒ Sekundärionisation

⇒ Lawinenbildung

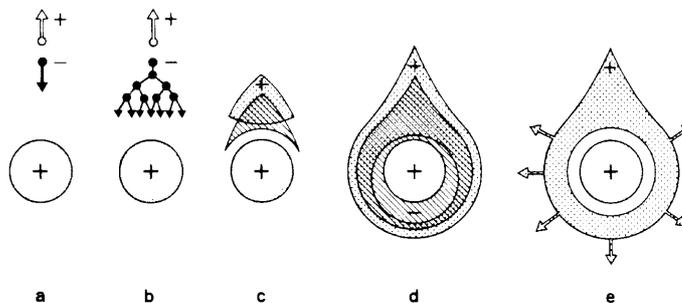
⇒ Der gemessene Spannungspuls wird geg. Ionisationskammer um Faktor A (Gasverstärkung) verstärkt

$$\Delta V_{max} = A \frac{Ne}{C} = A \frac{Q_{prim}}{C}$$

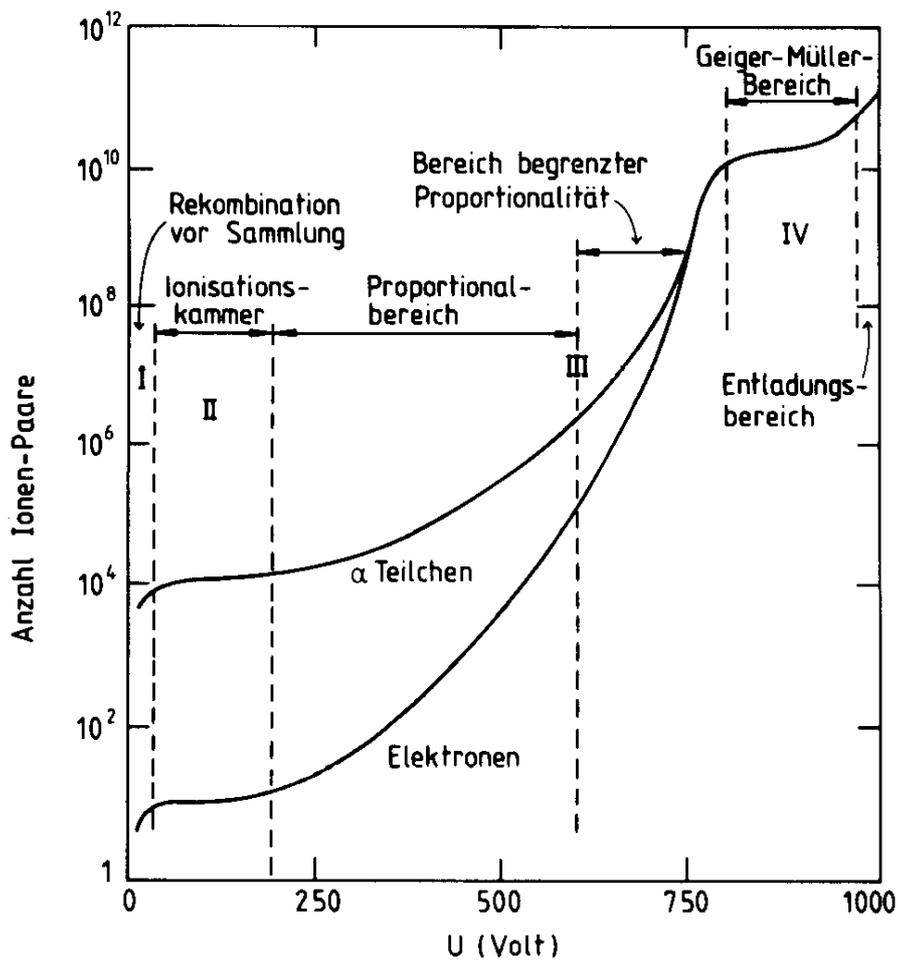
Proportionalbereich: Bereich von Feldstärke  $E$  und Druck  $p$ , in dem A konstant ist, d.h.:  $\Delta V_{max} \sim Q_{prim}$

technische Realisierung: zylindrisches Zählrohr, Anode als dünner Draht ( $r_i = 10 - 50 \mu m$ ) Energiegewinn von  $r_1$  nach  $r_2$ :

$$\Delta E_{kin} = -e \int_{r_1}^{r_2} \vec{E}(r) \cdot d\vec{r} = \frac{eU_0}{\ln r_a/r_i} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}$$



# Arbeitsbereiche von zylindrischen Gasdetektoren



zusätzlich: Anregung der Gasmoleküle

→ UV Photonen

→ Photon-Absorption (Photoeffekt) = zusätzliche Sekundärelektronen

(Photoabsorption geschieht im Gas und/oder im Zählmaterial;

i.allg. haben Photonen im Gas eine rel. große Reichweite;

Mittlere freie Weglänge der UV-Photonen kann durch Beimischung von sog. **Quench-Gasen** reduziert werden

Absorption von UV-Quanten in organischen Molekülen ( $C_2H_5OH$ ,  $CH_4$ ,  $C_4H_{10}$ , ...)

$\alpha$  = Zahl der Sekundärelektronen pro cm  
(erster Townsend Koeffizient)

$\gamma$  = Zahl der Sekundärelektronen pro cm aus UV-Absorption  
(zweiter Townsend Koeffizient)

Gasverstärkung einschließlich der Photon-Beiträge:

$$N_p \cdot A_\gamma = N_p \cdot A + (N_p A \gamma) \cdot A + (N_p A^2 \gamma^2) \cdot A + \dots = N_p \cdot A \sum_{k=0}^{\infty} (A \gamma)^k = \frac{A}{1 - A \gamma}$$

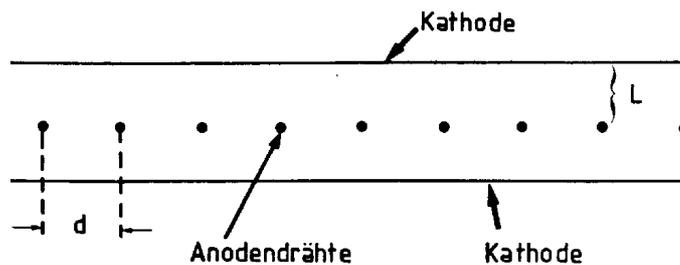
Für  $A \gamma \rightarrow 1$  ist der sog. Auslösebereich erreicht,  
Spannungsimpuls wird unabhängig von der Primärionisation.

**Geiger Müller Bereich**

### 3.3. Vieldrahtproportionalkammer

G. Charpak (1968) (Nobelpreis 1993)  
(Multi wire proportional chamber = MWPC)

Dichte Aneinanderreihung von Anodendrähten in kleinem Abstand;  
jeder Draht wirkt als unabhängiges **Proportionalzählrohr**



- typische Parameter:
  - Drahtabstand:  $d \sim 2 \text{ mm}$
  - Abstand Anode-Kathode:  $L \sim 7\text{-}8 \text{ mm}$
  - Durchmesser der Anodendrähte:  $10 - 30 \mu\text{m}$   
(meist Wolframdrähte, gold-beschichtet)
- Elektronen driften zum nächsten Anodendraht  
Ionen driften zur geg. Kathodenfläche (s.  $\vec{E}$ -Feld)
- Gasverstärkung im prop. Bereich:  $A \sim 10^5$   
typische Gase: Ar + CO<sub>2</sub>  
Ar + CH<sub>4</sub>  
Ar + Isobutan  
Xe + .....
- jeder Anodendraht wird separat ausgelesen → **Ortsinformation**

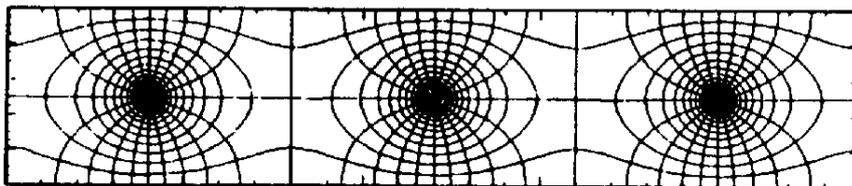
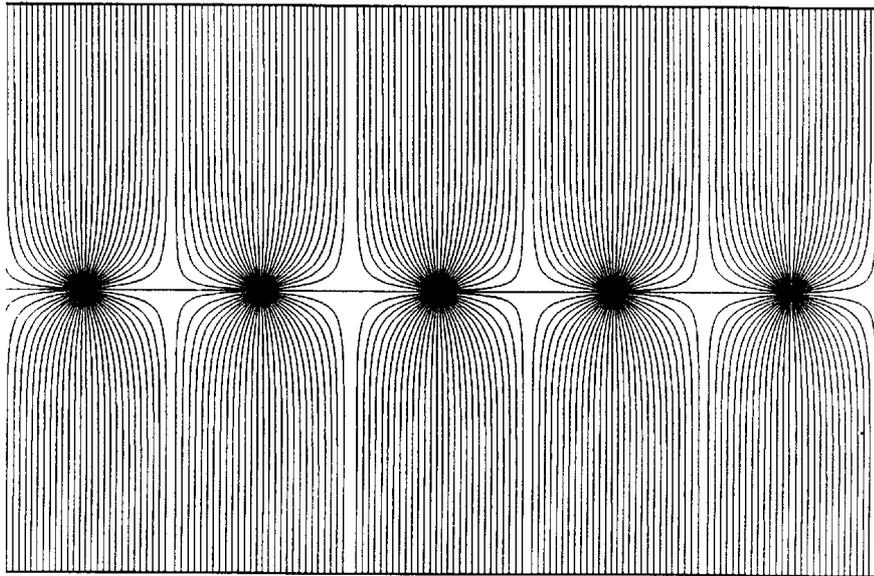
erreichbare Ortsauflösung:  $\sigma_x = \frac{d}{\sqrt{12}}$

(Varianz einer Gleichverteilung zwischen a und b:  $(b - a)^2/12$ )

für  $d=2\text{mm}$  ergibt sich:  $\sigma_x \sim 600 \mu\text{m}$

## Elektrische Feldlinien und Äquipotentiallinien

---

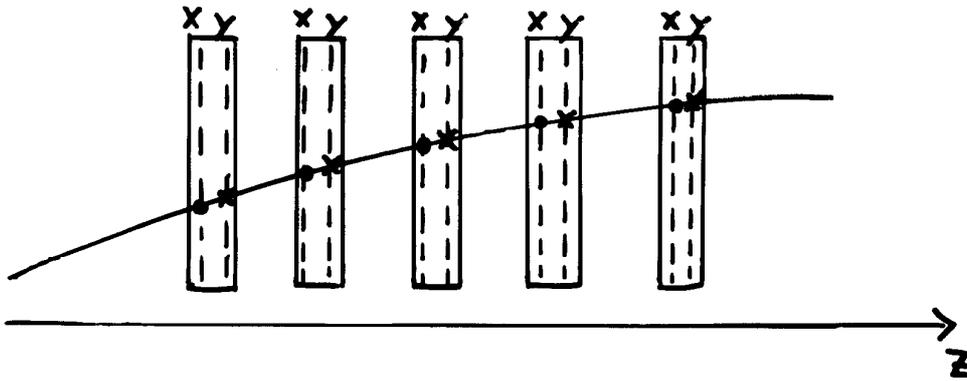


$\vec{E}$ -Feld:

- größtenteils homogen (außer im Bereich der Anode)
- im Bereich der Anode:  $1/r$  Abhängigkeit
- Äquipotentiallinien verlaufen parallel zur Kathodenfläche

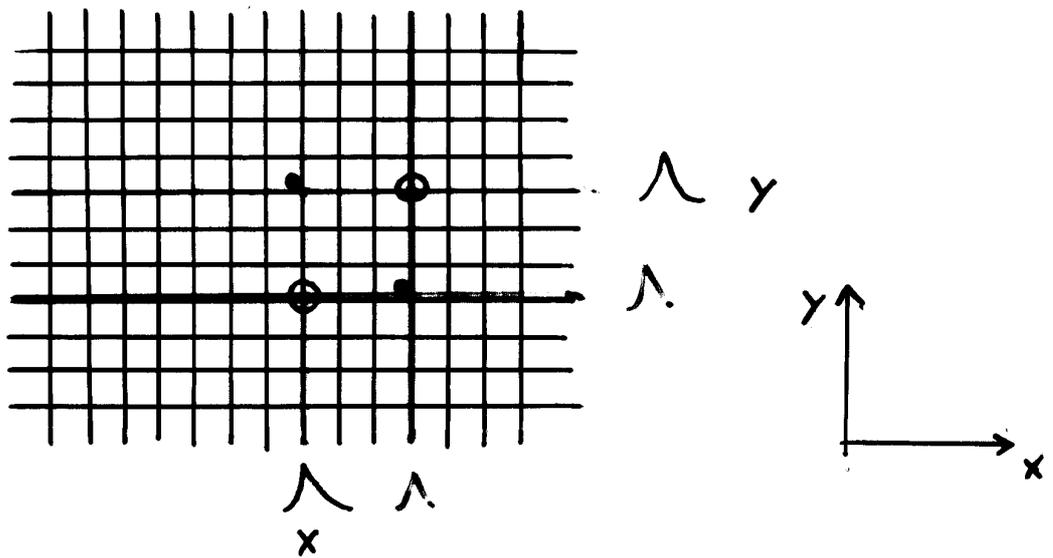
# Spurpunkte (x, y, z) ?

## ① Kombination mehrerer Kammern



z: Kammerposition, bekannt.

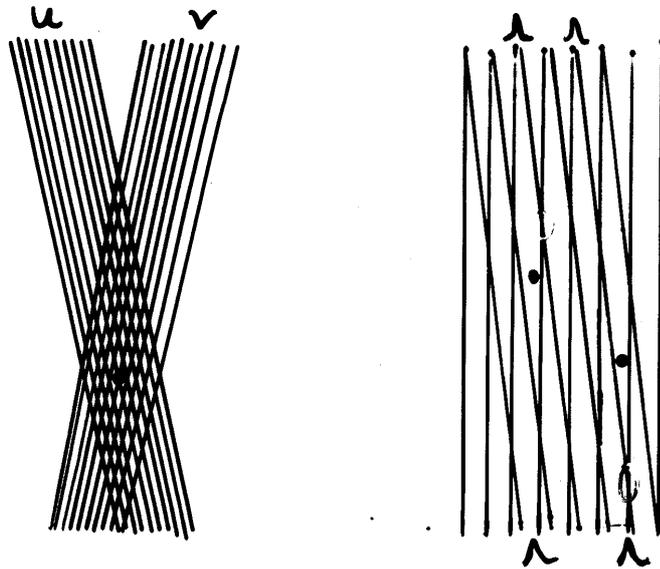
x, y: gekrenzte Vieldraht prop. Kammern (90°)



→ Ambiguitäten bei mehreren Teilchen  
→ 'Geisterpunkte'.

→ Auflösung in beiden Projektionen  $\sim 600 \mu\text{m}$

Alternative: Stereolagen (kleiner Winkel, 3-5°)



- Ambiguitäten - Problem kleiner (kleinere Überlappung!)  
sehr häufig 'TRIPLET' -Lagen (0°, -3°, +3°)
- jedoch schlechtere Auflösung in der zweiten Koordinate

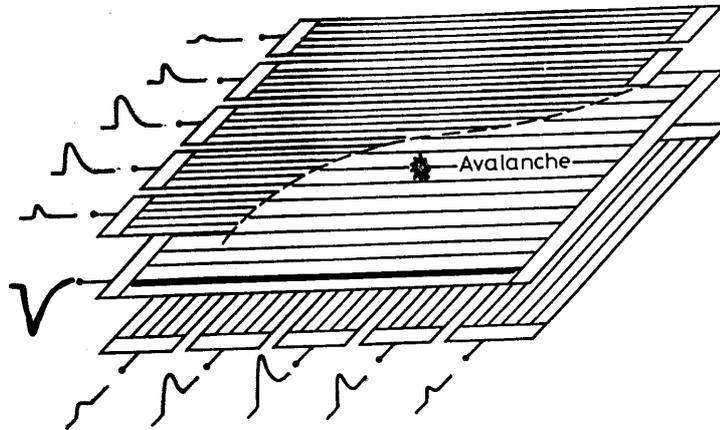


$$z_x \sim 600 \mu\text{m}$$

$$z_y = z_x / \sin \alpha = 0 (\text{cm})$$

$\alpha$  = Stereowinkel, 3-5°

zusätzl. Kathodenauslese (Kathode segmentiert, Streifen)



Verbesserung der Ortsauflösung durch Schwerpunktmethode

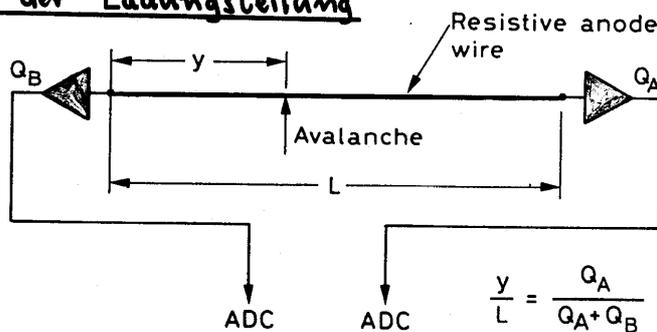
$$y = \frac{\sum Q_i \cdot y_i}{\sum Q_i}$$

$Q_i$  = Ladung auf Kathodenstreifen  $i$

$y_i$  = Streifenposition

erreichbare Auflösung:  $\delta_x \sim 50 \mu\text{m}$  !  $\oplus \frac{dE}{dx}$  - Information

Methoden der Ladungsteilung

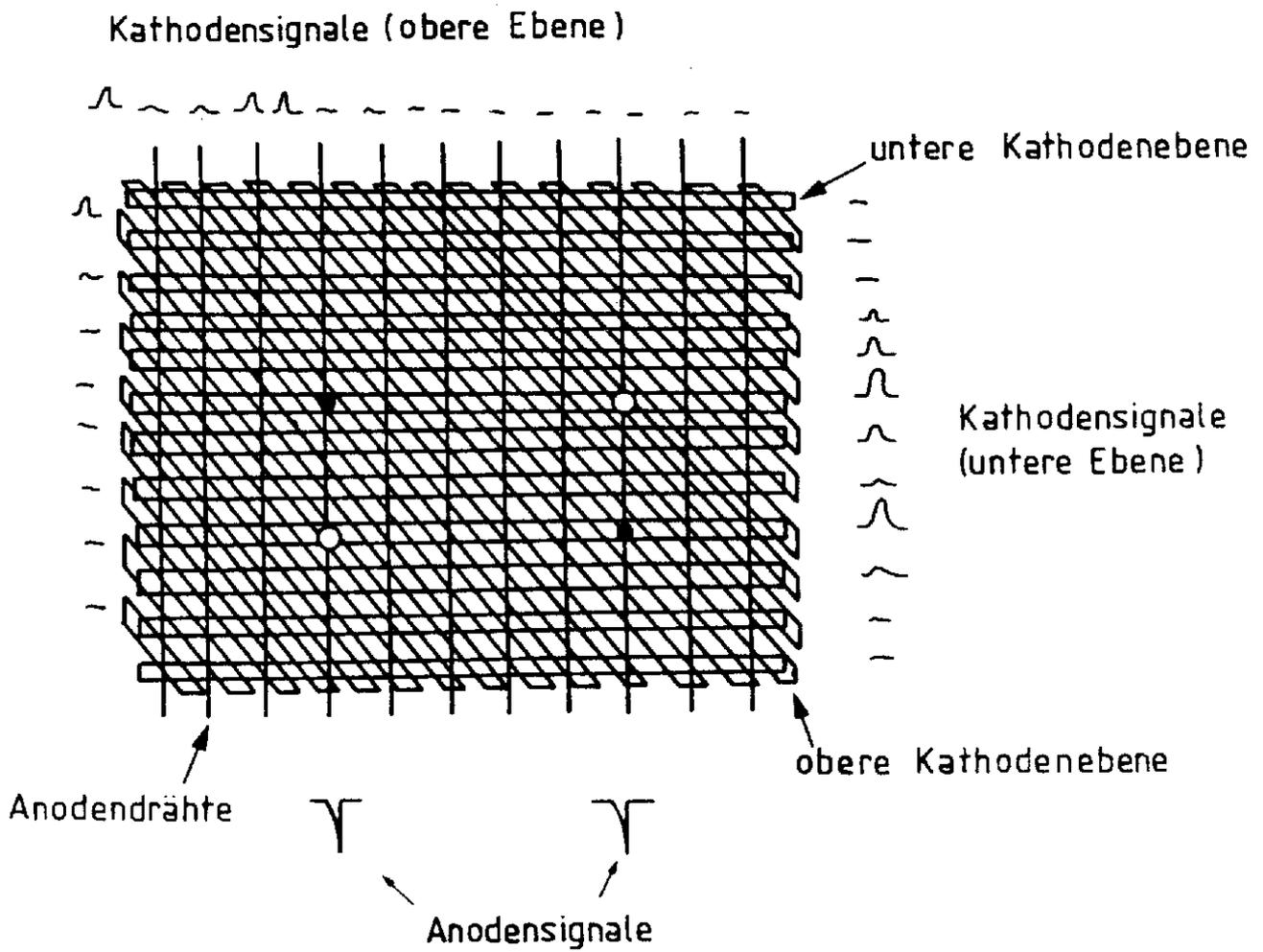


Ladung wird an beiden Enden des Anodendrahtes gemessen ( $Q_A, Q_B$ )

$$y = L \cdot \frac{Q_A}{Q_A + Q_B}$$

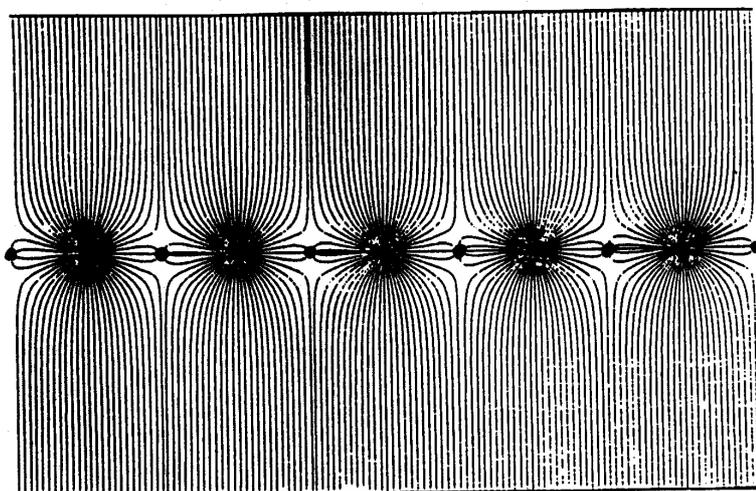
typische Auflösung:  $\sim 1\%$  der Drahtlänge  $\rightarrow \mathcal{O}(\text{cm})$

Illustration der ambiguitätsfreien Zweiteilchenregistrierung mit Hilfe der Kathodenauslese





## zusätzliche Potentialdrähte in der MWPC - Anordnung



feldformende Drähte,  
neg. Potential.

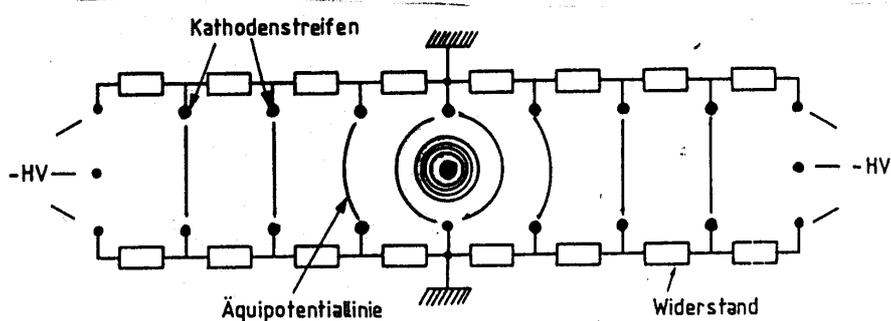
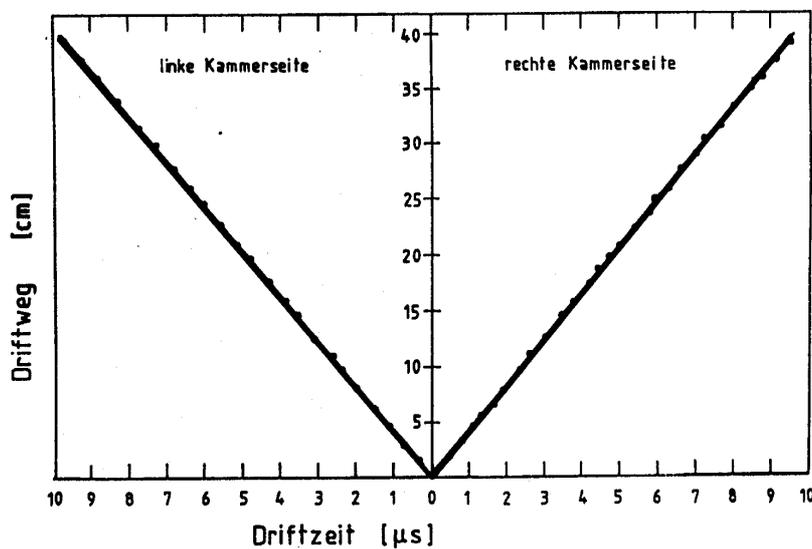


Abb. 4.36 Illustration der Feldformung in einer großflächigen Driftkammer.

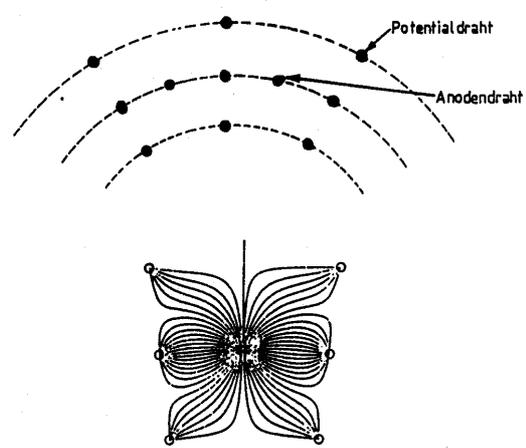


Rechts / Links  
Symmetrie

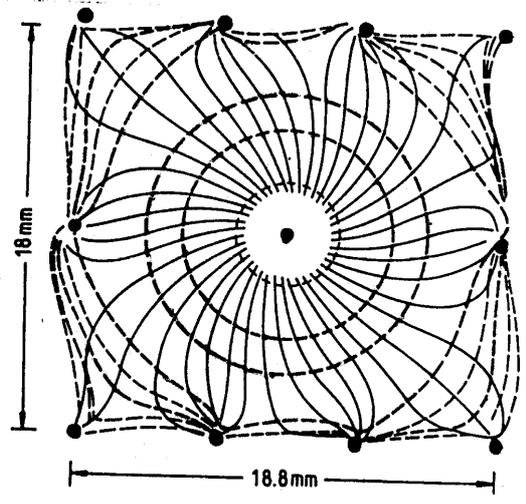
↳ Ambiguität

# Beispiele für Driftzellen-Geometrien

a) 'offene Zelle'



b) 'geschlossene Zelle' (ARGUS Detektor, Hamburg DESY)



Linien mit gleicher Driftzeit

- Signaldraht
- Potentialdraht

## Beiträge zur Ortsauflösung

### 1. Zeitauflösung der Elektronik

$$\sigma_t \sim 1 \text{ ns}, v_D = 5 \text{ cm}/\mu\text{s} \quad \Rightarrow \sigma_x = v_D \cdot \sigma_t = 50 \mu\text{m}$$

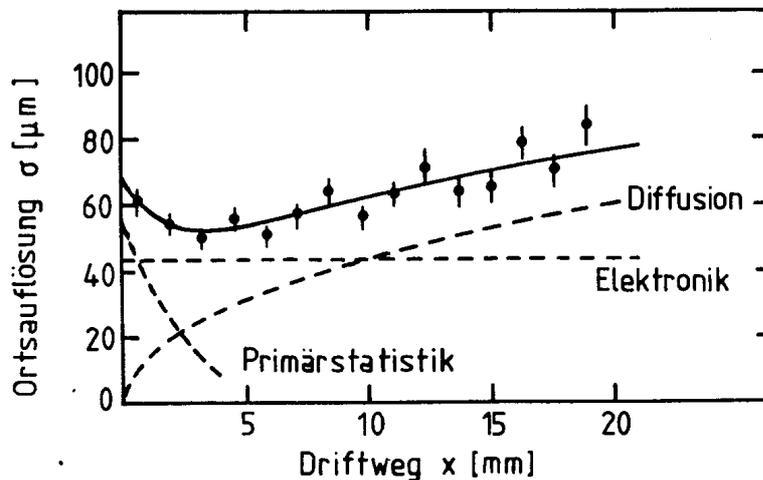
### 2. Diffusion der driftenden Elektronen (dominant bei großen Driftstrecken)

### 3. Fluktuationen in der Primärionisationsstatistik (besonders wichtig bei kleinen Abständen zum Draht)

### 4. Mechanische Toleranzen (Genauigkeit der Drahtpositionierung, Durchhängen wg. Gravitation) (hängt von der Größe der Kammer ab)

### 5. Inhomogenitäten in der elektrischen Feldstärke (die nicht korrigiert werden) oder Abhängigkeiten der Driftges. von der el. Feldstärke

Ziel: lineare Orts-Driftzeit Beziehung  
(durch Einfügen von feldformenden Potentialdrähten)



- **Koordinatenrekonstruktion:**
  - senkrecht zum Draht: Drahtposition + Driftzeit
  - parallel zum Draht: Stereolagen  
Ladungsteilung  
Kathodenstreifen
- **Rechts-Links Ambiguitäten:**  
Können beispielsweise durch versetzte Drahtpositionen (s.unten, Jet - Kammer) aufgelöst werden
- **Kammergeometrien:**
  - Experimente mit feststehendem Target  
⇒ großflächige, planare Driftkammern

Beispiele: NA48 am CERN, HERA-B am DESY

- Experimente an Speicherringen  
meistens Solenoid Magnetfeld ⇒ zylindrische Driftkammern

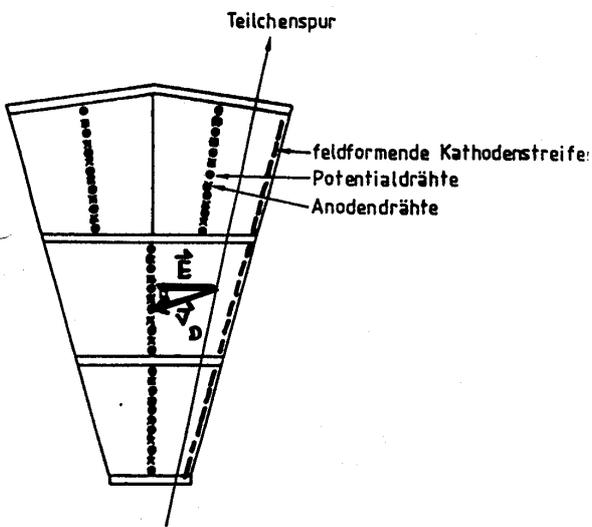
Beispiele: OPAL (LEP), H1 und ZEUS am DESY

# Jet - Driftkammer

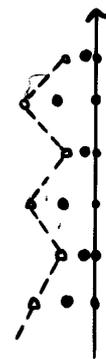
(JADE, OPAL - Detektor)

- große Anzahl von Meßpunkten entlang der Spur  
 $\rightarrow \left(\frac{dE}{dx}\right)$  mit guter Statistik  $\oplus$  Ortsinformation

- Signaldrähte in der Mitte von sektorförmigen Zellen

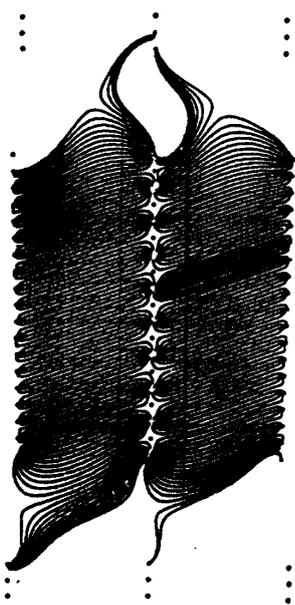


Potentialdrähte  
 + feldformende Kathodenstreifen



Versetzte  
 Anodendrähte  
 $\Downarrow$   
 Recht / Links  
 Ambiguitäten  
 werden aufgelöst

Teilchen



$$\vec{E} \perp \vec{B}$$

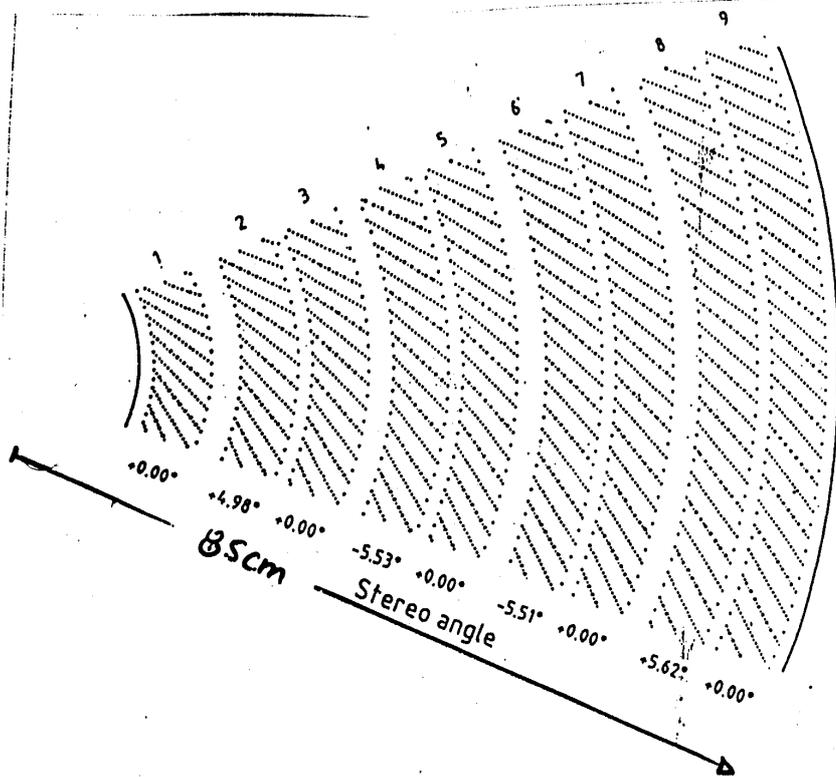
Lorentzwinkel

$$B = 0.45 \text{ T}$$

$$\alpha_L \sim 18.5^\circ$$

— Drift richtung der Elektronen

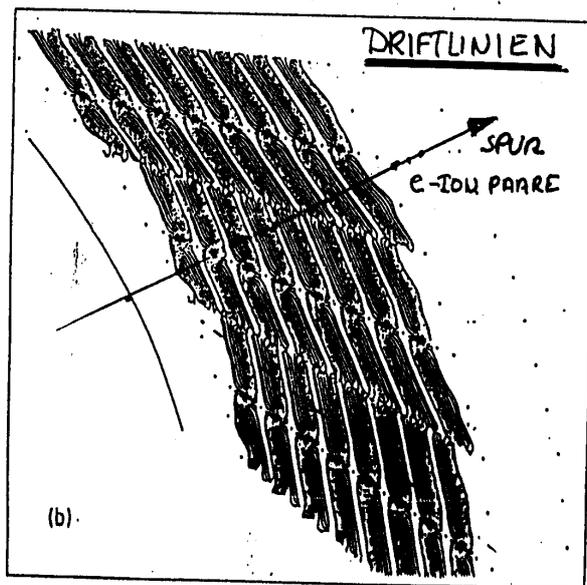
# OKTANT der ZEUS Spurkammer

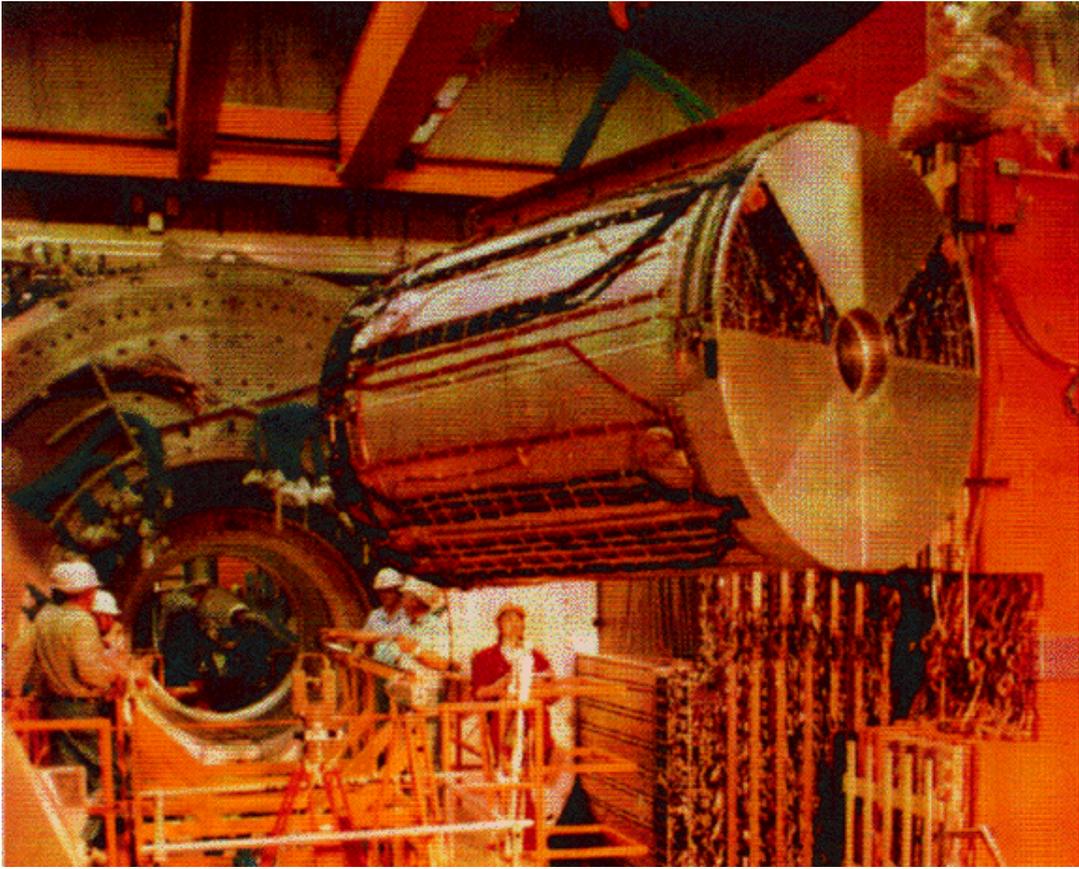


⊗ Magnetfeld  
1.6 T

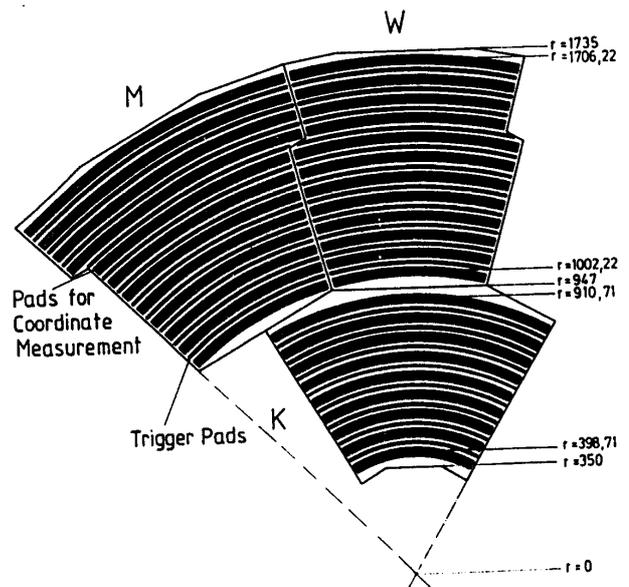
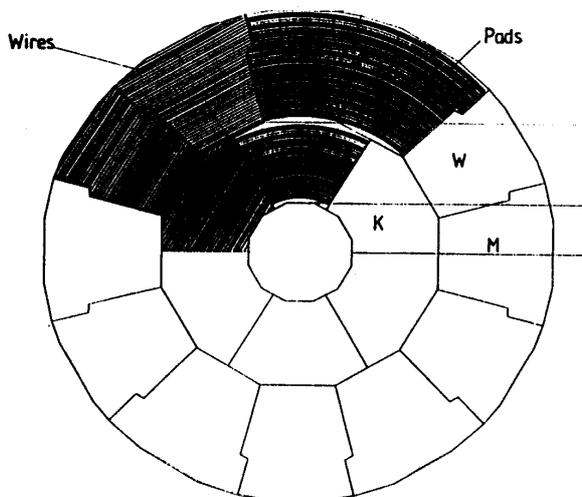
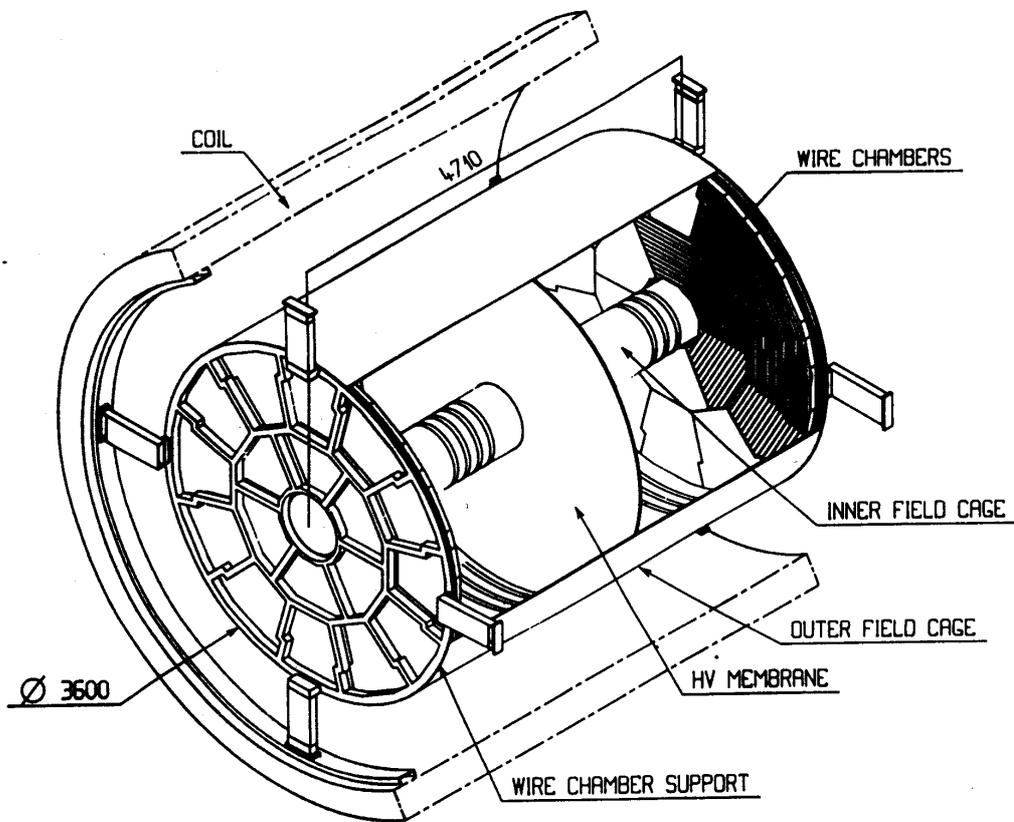
Lorentzwinkel  $45^\circ$

Signal drahtebenen  
entsprechend  
orientiert



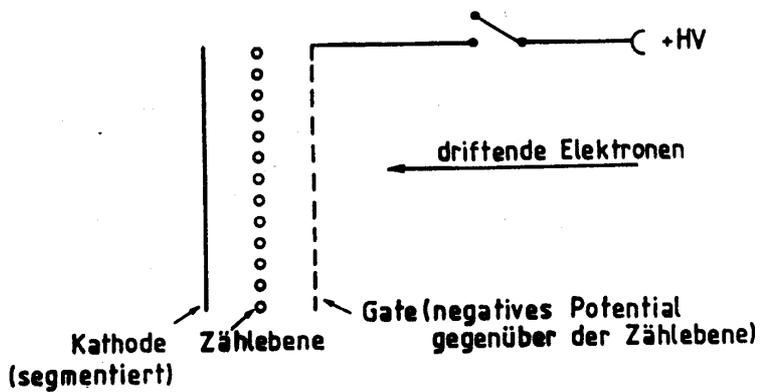


# Zeit-Projektionskammer, TPC



gute Auflösung in beiden Projektionen!

$\delta_z \sim 200 \mu\text{m}$  (Driftzeit)  
 $\delta_{r\phi} \sim 180 \mu\text{m}$  (Pads)



Gate offen:

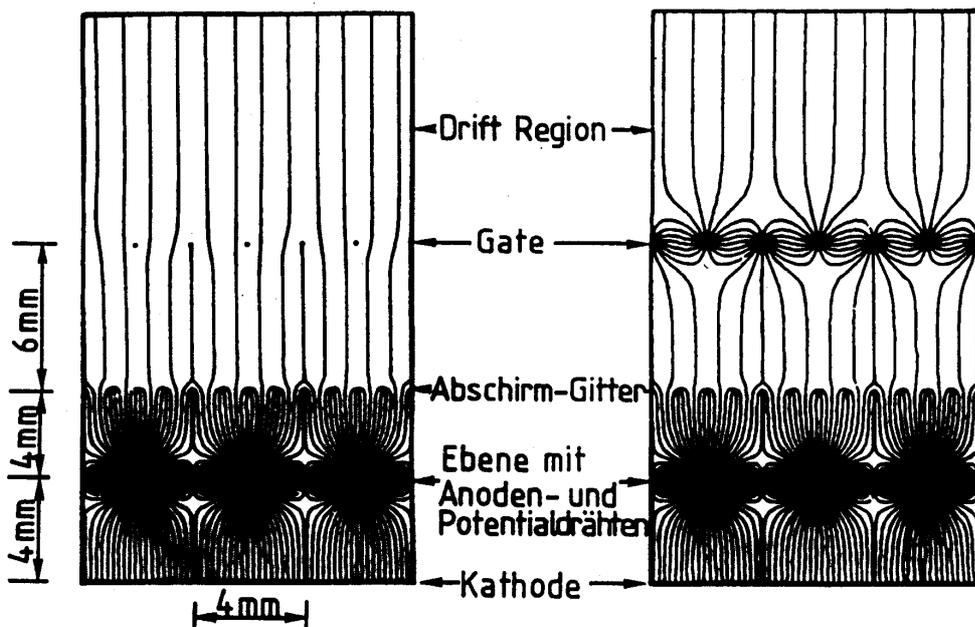
→ Elektronen → Anode

Gate geschlossen:

Elektronen → Gate

pos. Ionen → Gate

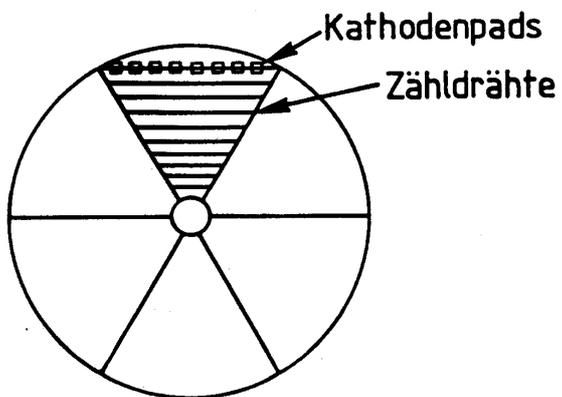
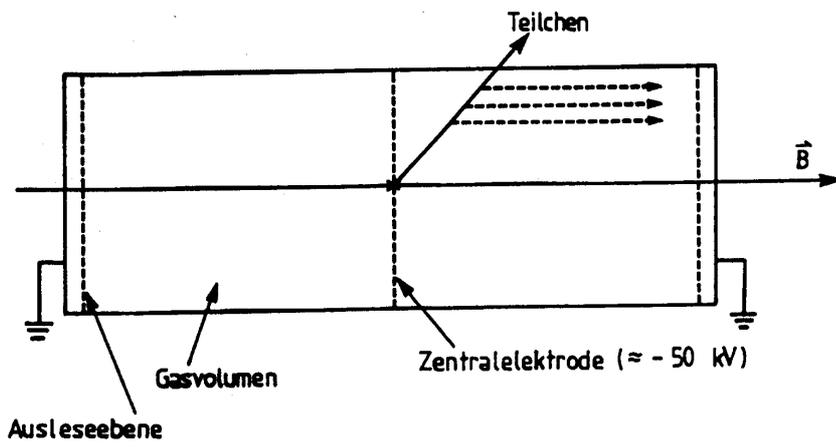
Gate wird durch einen Auslöseimpuls (Trigger) geöffnet.  
(extern)



offenes Gate

geschlossenes Gate

- ⇒ • Ionen können nicht in den Driftraum
- Elektronen nicht im Verstärkungszone



## 3.5. Halbleiterdetektoren

### historische Entwicklung

~ 1960	erste Prototypen von Halbleiterzählern in der Kernphysik; Einsatz in der $\beta$ und $\gamma$ -Spektroskopie, sehr gute Energieauflösung
~ 1983	Einsatz von Silizium-Steifenzählern als Spurdetektoren in <b>fixed-target Experimenten</b> der Hochenergiephysik; sehr gute Ortsauflösung (Hyams, Kemmer, Lutz, Weilhammer, Kötz, Klanner u.a.)
~ 1987	erste Mikrovertexdetektoren bei Collider-Experimenten, <b>VLSI - Elektronik</b> Einsatz bei LEP-Detektoren seitdem: Einsatz in allen Collider-Experimenten: <b>ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, H1, ZEUS, CDF, D0, BaBar, Belle</b>
~ 1991	Pixeldetektorentwicklung (Heijne, Nygren)
seit 1992	Entwicklungen großer Systeme (Pixel und Streifen) für die LHC - Detektoren

## Prinzip: Festkörper Ionisationskammer

Materialien: Si, Ge, GaAs, neuerdings auch Diamant

In der Elektronikentwicklung und im Bereich der Halbleiter-Spurdetektoren hat sich Si durchgesetzt;

(Verfügbarkeit in Erdkruste, niedrige Leckströme,  
*SiO<sub>2</sub> thermisch herstellbar, guter Isolator*)

### Vorteile gegenüber Gas-Detektoren:

- kleinerer Energieübertrag zur Erzeugung von Ladungsträgern notwendig

Beispiele:

W-Wert: Si: 3.6 eV  $\rightarrow \sim 300$  e/Loch Paare pro keV dep. Energie

W-Wert: Ar: 26 eV  $\rightarrow \sim 40$  e/Ion Paare pro keV dep. Energie

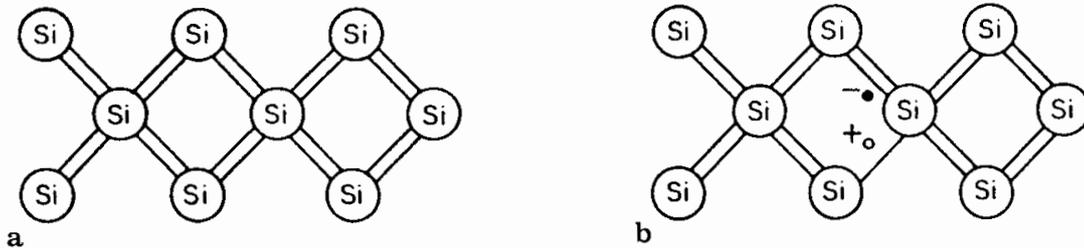
- größere Dichte:  $2.33 \text{ g/cm}^3$ ,  
 $\Rightarrow$  größerer Energieverlust pro cm  
 $\Rightarrow$  dünnere Detektoren möglich ( $300 \mu\text{m}$ )
- Mikrolithographie und planare Prozeßtechnik  
 $\Rightarrow$  Mikrostrukturierung im  $\mu\text{m}$ -Bereich  
**Grundlage für eine hohe Ortsauflösung ( $1\text{-}10 \mu\text{m}$ )**
- schnelle Detektoren  
(kurze Signalsammelzeiten,  $\sim 10 \text{ ns}$ )

### Nachteile gegenüber Gas-Detektoren:

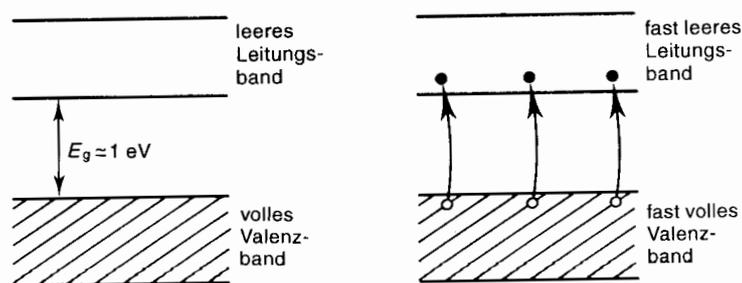
- große Strahlungslänge
- relativ hohe Kosten (werden billiger)
- Strahlungsempfindlich

## Einige wichtigste Eigenschaften von Silizium:

- $Z=14$ , Element der 4. Gruppe, jeweils 2 Elektronen in der 3s und 3p Schale  
kovalente Bindungen, Tetraeder-Struktur



- Bandlücke ist relativ klein:  $E_g = 1.12 \text{ eV}$ ,  
thermische Energien reichen aus, um Elektronen ins Leitungsband zu befördern



- Elektronen im Leitungsband und Löcher tragen zur **intrinsischen Leitfähigkeit**  $\sigma_i$  bei.

$$\sigma = e \cdot n_i (\mu_e + \mu_h)$$

wobei:  $n_i$  Dichte der Elektronen im Leitungsband =  
Dichte der Löcher im Valenzband

$$n_i \sim T^{3/2} e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

$\mu_e, \mu_h$  Beweglichkeiten der Elektronen und Löcher  
(Proportionalitätsfaktoren zwischen den Driftgeschwindigkeiten ( $v_e$  und  $v_h$ ) und der E-Feld Stärke:  $v_e = \mu_e \cdot E$ )

typische Werte:  $T=300 \text{ K}$   $n_i = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

zum Vergleich: Atomdichte:  $10^{22} \text{ Atome/cm}^3$

nur 1 aus  $10^{12}$  Silizium-Atomen ist bei Zimmertemperatur ionisiert!

⇒ intrinsische Leitfähigkeit ist stark temperaturabhängig

	Si	Ge	SiO <sub>2</sub>
Kernladungszahl	14	32	-
Dichte ( $g/cm^3$ )	2.33	5.32	2.27
W-Wert	3.62		-
Dielektrische Konstante	11.7	16	3.9
spez. Widerstand (300 K), ( $k\Omega cm$ )	230	0.045	??
Energielücke (eV)	1.1	0.7	$\sim 8$
Elektronenbeweglich- keit (300 K), ( $cm^2/Vs$ )	1350	3900	-
Löcher-Beweglichkeit (300 K), ( $cm^2/Vs$ )	480	1900	-

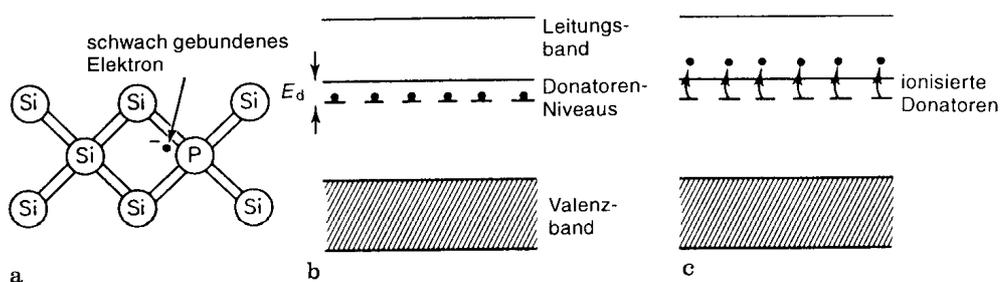
Die Leitfähigkeit eines Halbleiters kann durch die sog. **Dotierung** stark erhöht werden.

**Dotierung**: Zugabe geringer Mengen (im Bereich von ppb) geeigneter Fremdatome (drei- oder fünfwertige Elemente

3-wertig: z.B. Bor, Indium (**Akzeptoren**)

5-wertig: z.B. Arsen, Phosphor (**Donatoren**)

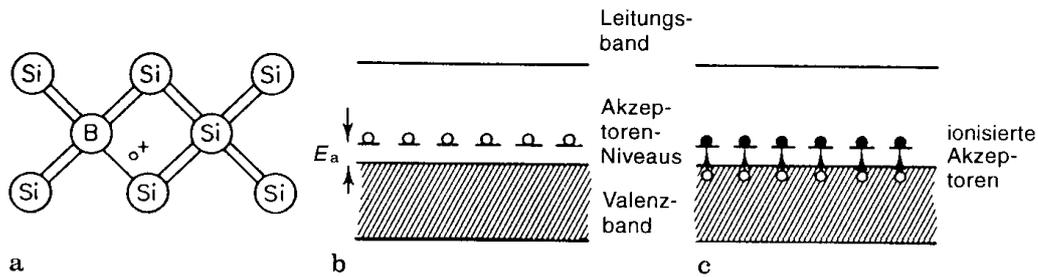
Durch die Verunreinigungen werden zusätzliche Energieniveaus im Halbleiter erzeugt



Donatorniveaus sitzen nahe unterhalb der Leitungsbandkante

$$\Delta E_d \approx 0.03 \text{ eV}$$

(zum Vergleich:  $kT$  ( $T=300 \text{ K}$ ) = 0.025 eV)



Akzeptorniveaus sitzen nahe oberhalb der Valenzbandkante  
 $\Delta E_d \approx 0.03 \text{ eV}$

mit 5-wertigen Elementen dotierte Halbleiter heißen **n-dotiert**

typische Werte:  $N_D = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

$$\Rightarrow N_D/N_{Si} \approx 10^{14}/10^{22} = 10^{-8}$$

$$n_e = n_i + n_D \approx n_D = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_h = n_i^2/n_e \approx n_D = 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

d.h.:  $n_e \gg n_h$  (Elektronen sind Majoritätladungsträger)

Leitfähigkeit (n-Typ):  $\sigma \approx eN_D\mu_e$

Dotierung kann auch wesentlich höher sein ( $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ); diese hohe Dotierung wird als  $n^+$  gekennzeichnet.

Entsprechende Verhältnisse und Notationen ergeben sich bei p-Dotierung

## Der pn-Übergang:

Abrupter Übergang zwischen p- und n-dotierten Bereichen in einem Halbleitermaterial

### Kontakt:

- Elektronen diffundieren aus dem n-Bereich (Elektronenüberschuß) in den p-Bereich (Elektronenmangel)
- Löcher diffundieren aus dem p- in den n-Bereich
- im n-Bereich bleiben pos. Donatoratome zurück  
⇒ pos. Raumladung  
(entsprechende neg. Raumladung im p-Bereich)
- Diffusionsbewegung wird durch das elektrische Feld, das sich aufgrund dieser Raumladungen aufbaut, abgebremst.

elektrisches Feld ⇒ Kontakt- oder Diffusionsspannung:

$$V_d = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

⇒ Gleichgewicht, kein Stromfluß  
(typischer Wert für  $V_d$ :  $\sim 0.7 \text{ V}$  )

- ⇒ **Verarmungsschicht**  
d.h.: Raumladungsschicht, die arm ist an freien Ladungsträgern  
Die Dicke der Verarmungsschicht hängt von den jeweiligen Dotierungen ab.  
(Ausdehnung in den n- und p-Bereich können unterschiedlich sein)

wegen Ladungserhaltung gilt:

$$e x_p A N_A = e x_n A N_D$$

$$\Rightarrow \frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

(wobei:  $x_n, x_p$  Tiefe der Ausdehnung in die n bzw. p Bereiche, A=Querschnittsfläche)

wenn  $N_A \gg N_D$ , dehnt sich die Verarmungsschicht fast ausschließlich in den n-Bereich aus.

**Breite der Verarmungsschicht:** (Herleitung, s. z.B. Leo, Kap. 10.3)

$$W_{dep} = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si}\epsilon_0}{e} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_d}$$

- Angleichen der Fermi-Niveaus über die Kontaktzone hinweg

Energie-Niveaus des p-Bereichs werden relativ zu denen des n-Bereichs angehoben.

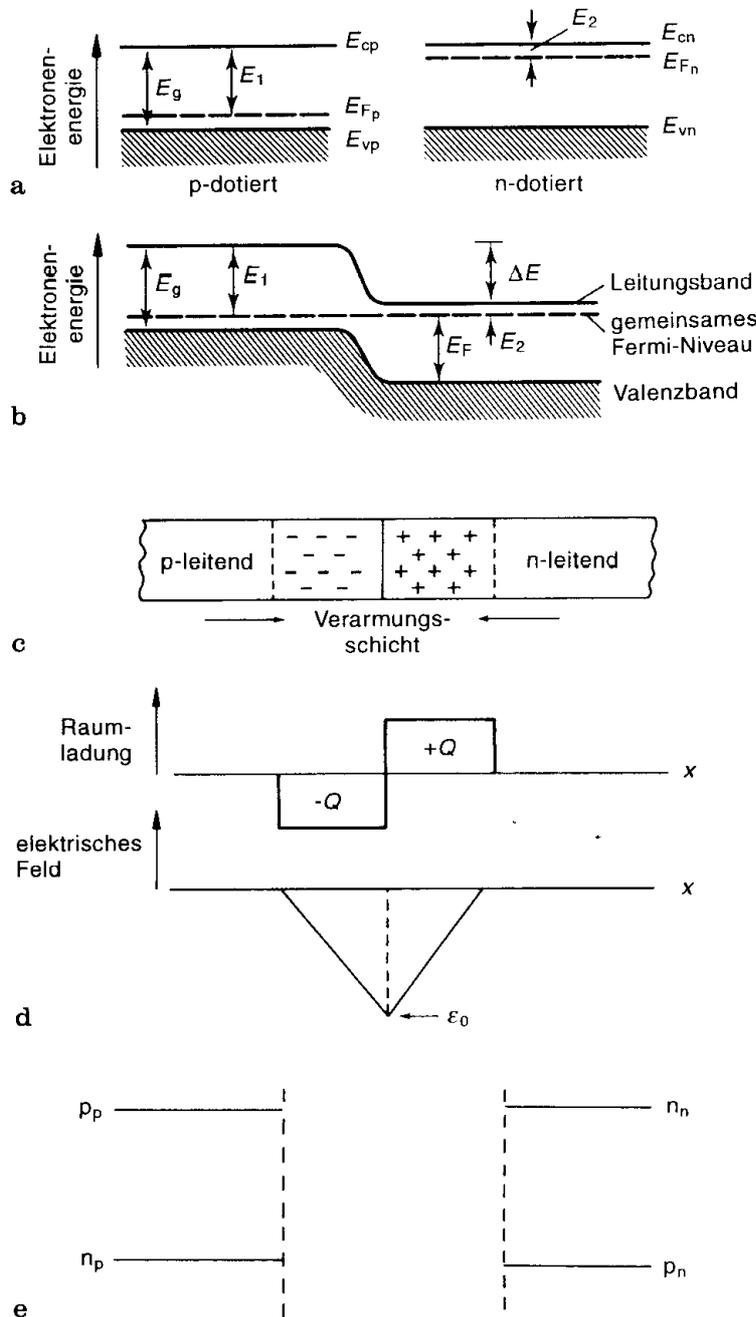
- **Breite der Verarmungsschicht vergrößert sich bei Anlegen einer äußeren Sperrspannung (bias voltage  $V_B$ ):)**

ersetze  $V_D$  durch  $(V_d + V_B) \approx V_B$

(i.allg. ist  $V_B \gg V_d \Rightarrow V_d + V_B \approx V_B$ )

Zur vollständigen Verarmung einer  $300 \mu m$  dicken Schicht wird eine Sperrspannung von  $\approx 70 V$  benötigt.

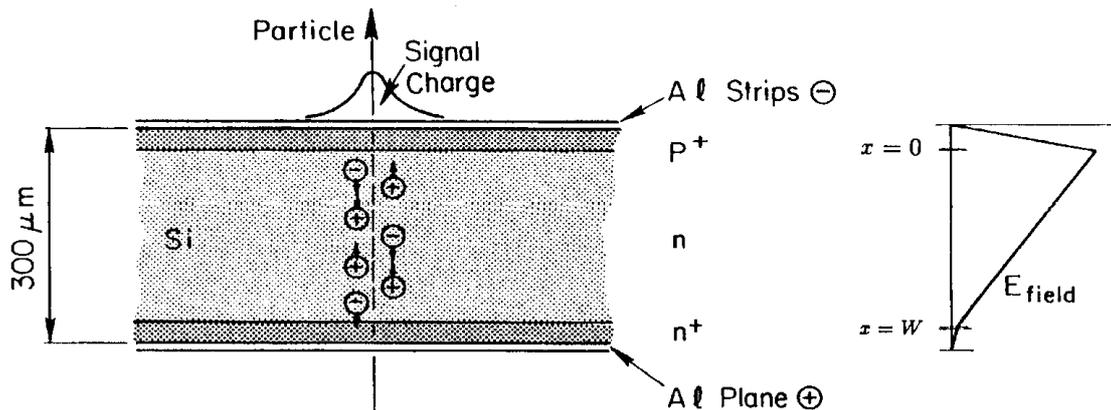
# Der pn-Übergang im thermischen Gleichgewicht



- Bandstruktur im p- und im n-Halbleiter vor dem Kontakt
- Bandstruktur im Übergangsbereich nach dem Kontakt
- Verarmungsschicht
- Raumladungen und elektrisches Feld innerhalb der Verarmungsschicht
- Ladungsdichten in den Bereichen außerhalb der Verarmungsschicht

# Aufbau und Funktionsweise von Si-Streifenzählern

- n-dotiertes Silizium-Substrat, Dicke  $\sim 300\mu\text{m}$
- Übergang zu einer  $p^+$  Schicht
- Rückseite ist  $n^+$  dotiert, Kontaktierung zur Metallelektrode



- $p^+ - n$  Übergang wird in Sperrrichtung betrieben (Bei einem typischen spez. Widerstand von  $5\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ ,  $V_B = 70\text{V}$ ,  $\Rightarrow W_{dep} = 300\mu\text{m}$ , d.h. Verarmungszone dehnt sich über den gesamten Detektor aus)

## Warum Bias-Spannung ?

- Erhöhte Feldstärke zur effizienten Ladungssammlung  
Beispiel: E-Feld ist maximal am  $P^+ - n$ -Übergang;  
Für  $V_B = 70\text{ V}$  ergibt sich:  $E_{max} = 2V_B/W \sim 4.800\text{V/cm}$
- Reduzierte Detektorkapazität,  $C \sim 1/W_{dep}$
- Ein geladenes Teilchen erzeugt Elektron-Loch Paare im Detektor,  
Ionisation entlang der Teilchenspur  
Keine Elektronenmultiplikation, Signal ist proportional zu  $dE/dx$ , d.h. zur Dicke des Si-Zählers  
 $\delta$ -Elektronen  $\Rightarrow$  weitere Ionisation  $\Rightarrow$  Landau-Verteilung

- Elektron-Loch Paare driften zu den jeweiligen Elektroden, induzierte Ladungen, Strompuls
- Während des Transports verbreitert sich die Ladungswolke aufgrund von Diffusion (typische Größenordnung:  $10\mu m$ )
- kurze Ladungssammelzeit, typischerweise 10 ns

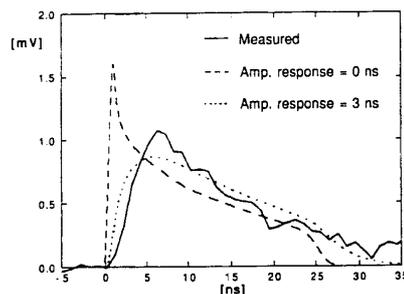
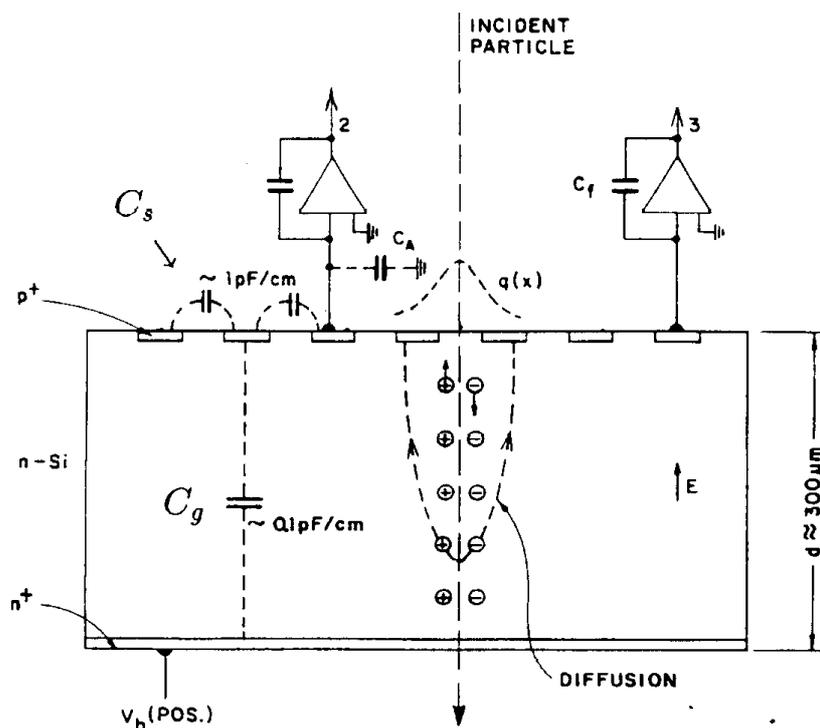


Fig. 3.4. The current pulse shape due to a minimum ionizing particle registered at the  $p^+$  side of a silicon strip detector (from ref.[49]).

- Ortsinformation durch Segmentierung der  $p^+$  Seite in Streifen  
typischer Streifenabstand:  $20\mu m$



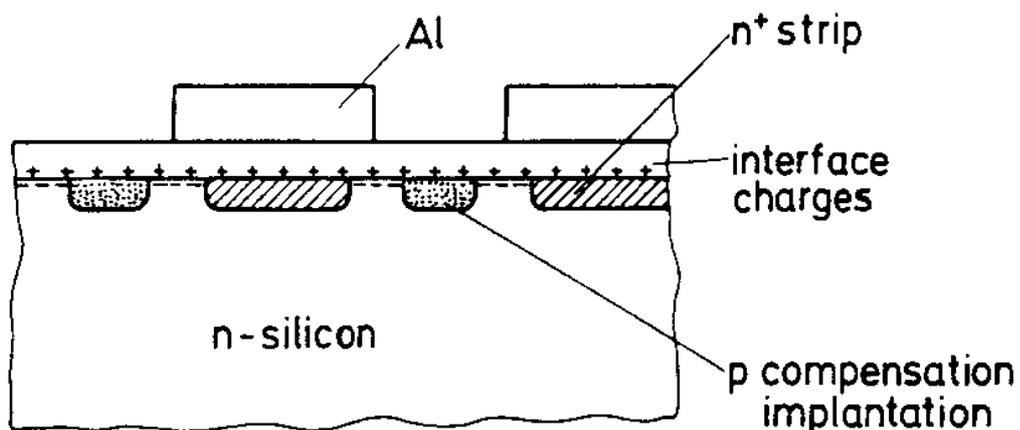
- **2-dimensionale Ortsinformation** durch zusätzliche Segmentierung der  $n^+$ -Elektrode

Komplikation: In der  $SiO_2$ -Schicht akkumulieren sich positive Raumladungen (am  $Si - SiO_2$ -Übergang);

⇒ **Elektronenanreicherung** im n-Bereich  
(accumulation layer, ähnlich wie in MOSFET Strukturen)

⇒ Kurzschluß zwischen  $n^+$ -Streifen

Abhilfe: z.B. durch **implantierte  $p^+$ -Streifen** zwischen den  $n^+$  Streifen



## Ausleseelektronik

Anforderungen an die Elektronik:

- hohe Verstärkung, geringes Rauschen

Ladungsmenge eines MIP-Signals:  $23000 \cdot e = 3.7 \text{ fC}$   
(kleines Signal, keine Elektronenmultiplikation)

- kompakt, wegen der großen Zahl der Kanäle

⇒ VLSI-Elektronik (very large scale integration)

ASIC-chips (application specific integrated circuit)

Beispiel: 128 Vorverstärker, serieller Speicher und analoges Multiplexing auf einem  $5 \times 6 \text{ mm}^2$  chip

meistens werden ladungsempfindliche Vorverstärker verwendet; (Integration der Ladung  $Q_{sig}$  auf Kapazität  $C_f$ , OPV mit gain A)

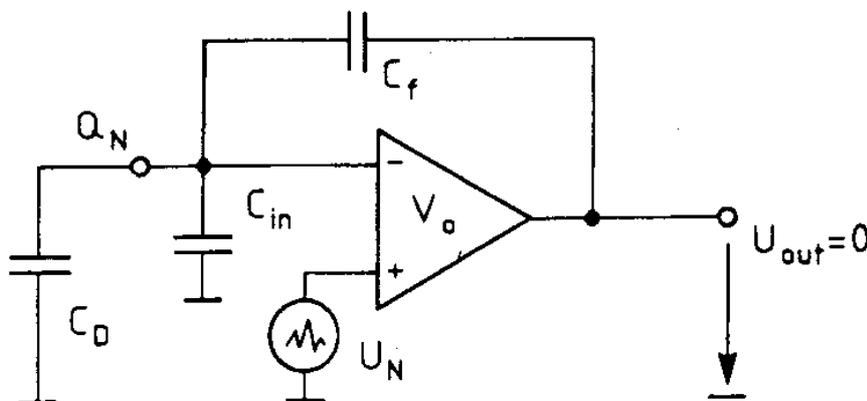


Fig. 3.9. A schematic block diagram of a charge sensitive amplifier.

Spannungspuls:

$$\Delta U_{out} = -\frac{Q_{sig}}{\frac{C_D + C_{in} + C_f}{A} + C_f} \rightarrow (A \rightarrow \infty) = -\frac{Q_{sig}}{C_f}$$

typische Werte:  $C_D \sim 0.5 - 1 \text{ pF}$  pro cm Streifenlänge  
 $C_{in} \sim 0.5 - 1 \text{ pF}$   
 $C_f \sim 0.5 - 1 \text{ pF}$   
 $A \sim 1000$

⇒ Ausgangspuls im mV-Bereich

## Beiträge zur Ortsauflösung

- **Abstand der Streifen** ( $p^+ - p^+$ ) (strip pitch  $d_p$ ) und der ausgelesenen Streifen (readout pitch)

Größenordnung: Breite der Ladungswolke aufgrund der Diffusion, Schwerpunktbildung über mehrere Streifen möglich

(Limitierung: Herstellungsprozeß, Kapazitäten zwischen Streifen  $\Rightarrow$  Rauschen)

typische Werte:  $d_p \sim 20 - 50 \mu m$

wenn  $d_p \gg$  Diffusionsbreite  $\Rightarrow$  geometrische Grenze:

$$\sigma_{pos}^{max} = \frac{d_p}{\sqrt{12}}$$

- **Effekte des Magnetfeldes**

$\vec{E} \times \vec{B}$  - Effekt

Ladungen driften unter einem Winkel  $\theta_L$  zum elektrischen Feld

Anwendung von Korrekturen oder geeignete Streifenorientierung

- **Rauschbeitrag der Elektronik** ENC (equivalent noise charge) hängt von der Gesamtkapazität ab;

$$Q_{noise} = \alpha_{ENC} + \beta_{ENC} \cdot C_{load}$$

zur gesamten kapazitiven Last tragen neben  $C_g$  auch die Kapazitäten zwischen den Streifen (insbesondere benachbarten Streifen) bei.

Diese können dadurch verkleinert werden, daß nur jeder n-te Streifen mit Ausleseelektronik verbunden wird; Ortsrekonstruktion ist immer noch möglich, kapazitive Kopplung, Ladungsschwerpunkt

Nachteil: geringeres Signal

- **Statistische Fluktuationen im Energieverlust, Detektorgeometrie** (Einfallswinkel)

$\delta$ -Elektronen, die senkrecht zur Teilchenrichtung emittiert werden, tragen wesentlich zur Verbreiterung der Ladungswolke bei.

Beiträge können durch Schnitte auf die Pulshöhe reduziert werden (auf Kosten von Effizienzverlusten)

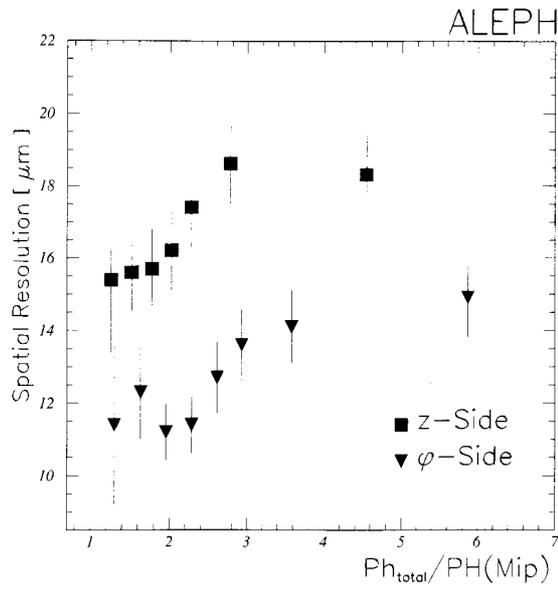


Fig. 3.14. The spatial resolution of a n-type silicon strip detector with double sided readout as a function of a cut on the total pulse height deposited in the silicon normalized to the most probable pulse height (Mip). Squares: n<sup>+</sup> side, triangles: p<sup>+</sup> side (from ref. [52]).

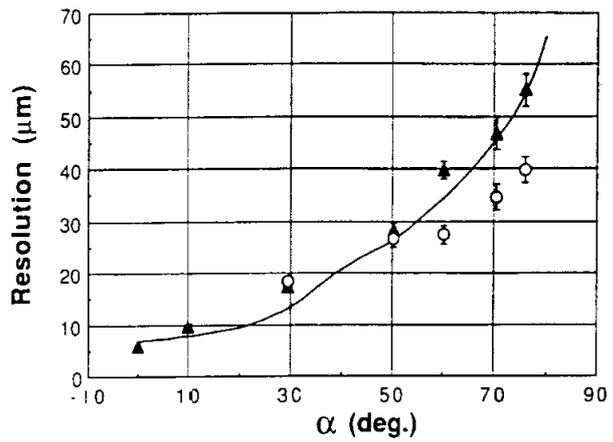
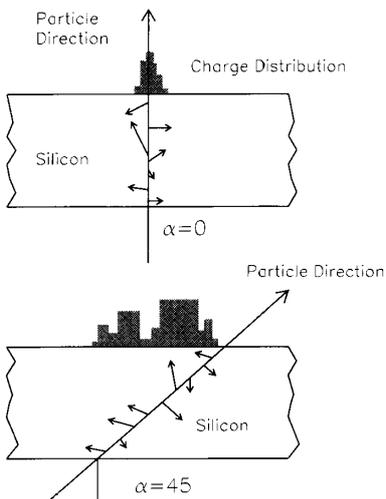


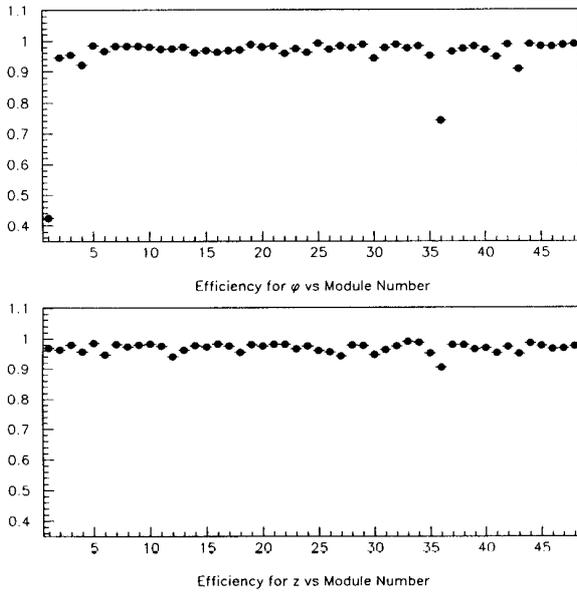
Fig. 3.13. An illustration of the effect of energy loss fluctuations on the projected charge distribution for tracks of normal incidence and tracks inclined at an angle  $\alpha$ .

## ALEPH Vertex Detector

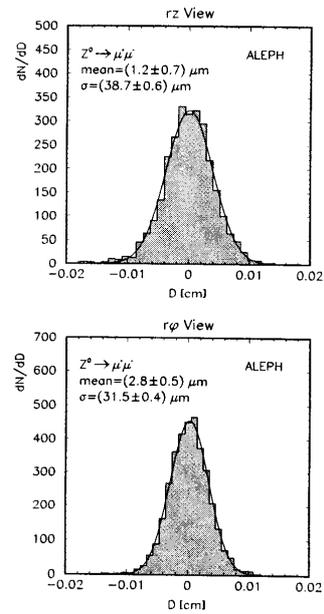


# Ergebnisse vom ALEPH Vertex Detector

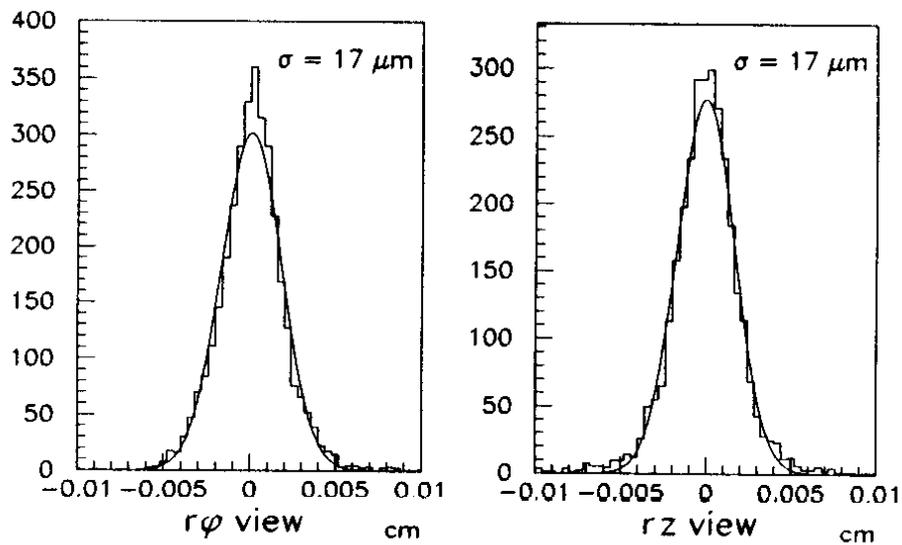
## a) Effizienzen



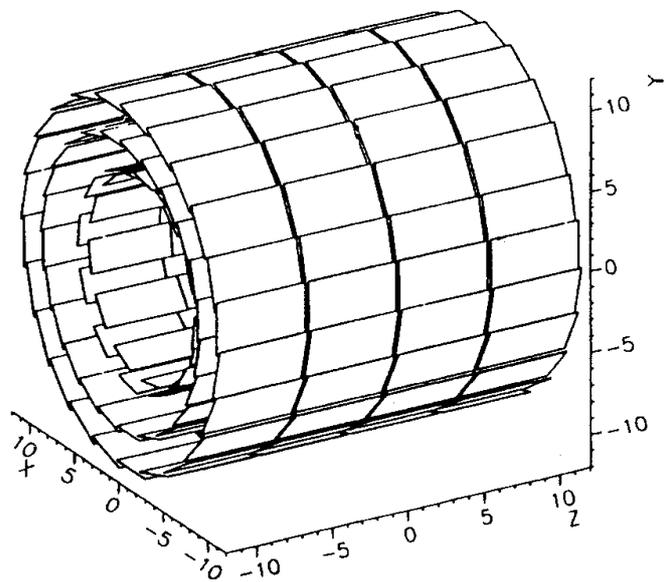
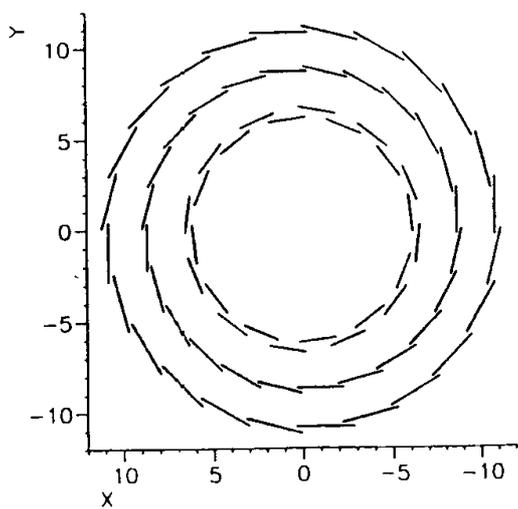
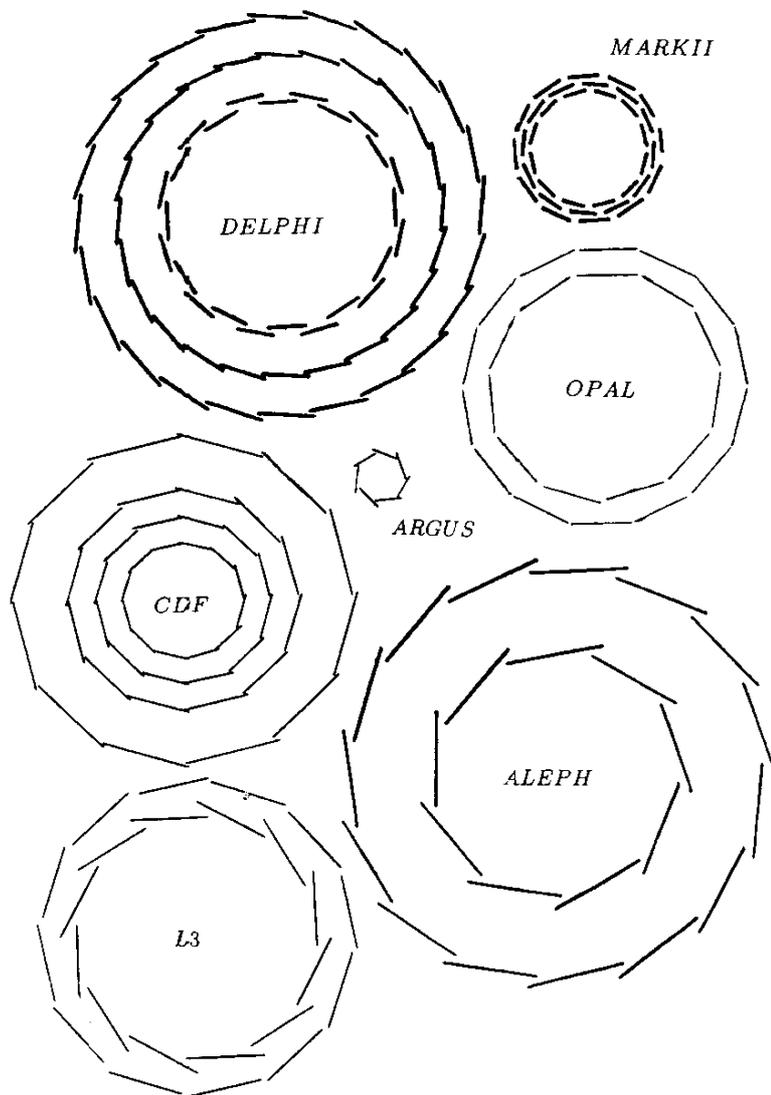
## b) Impact Parameter (Auflösung)



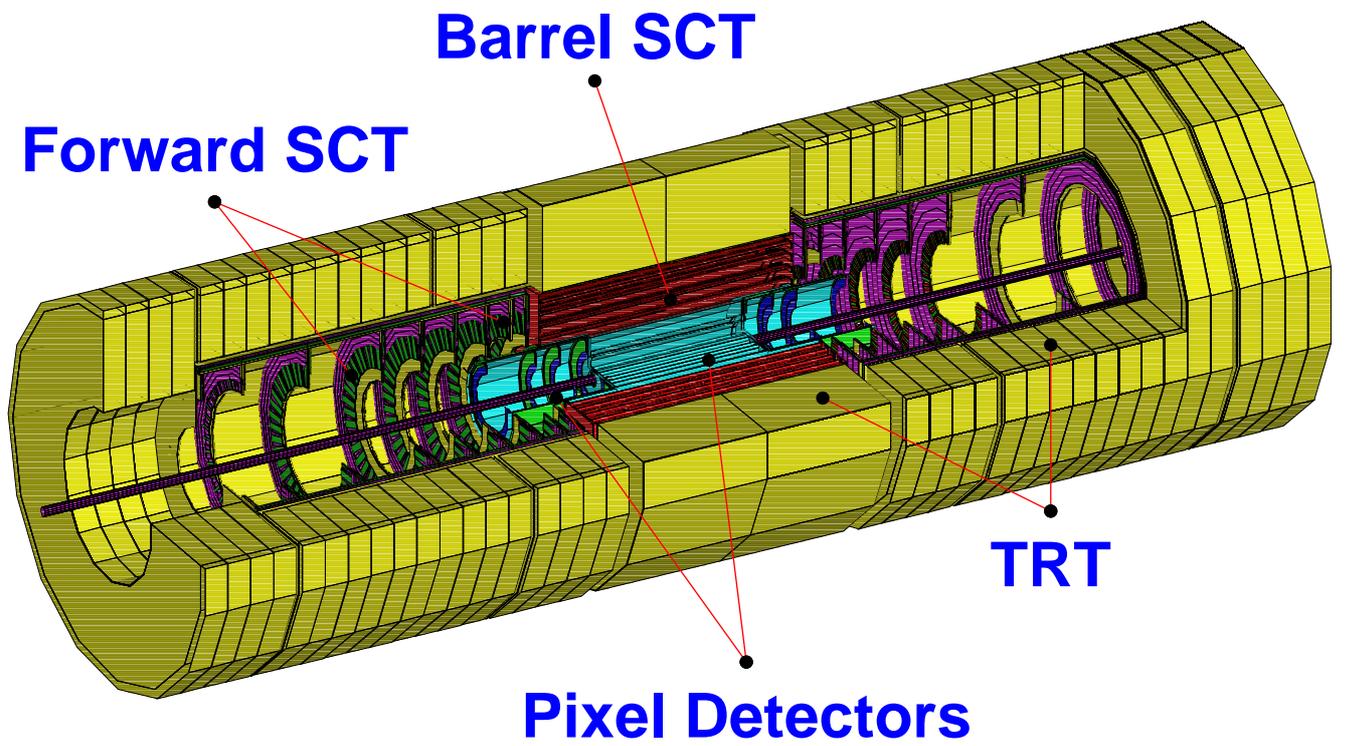
## c) Ortsauflösung



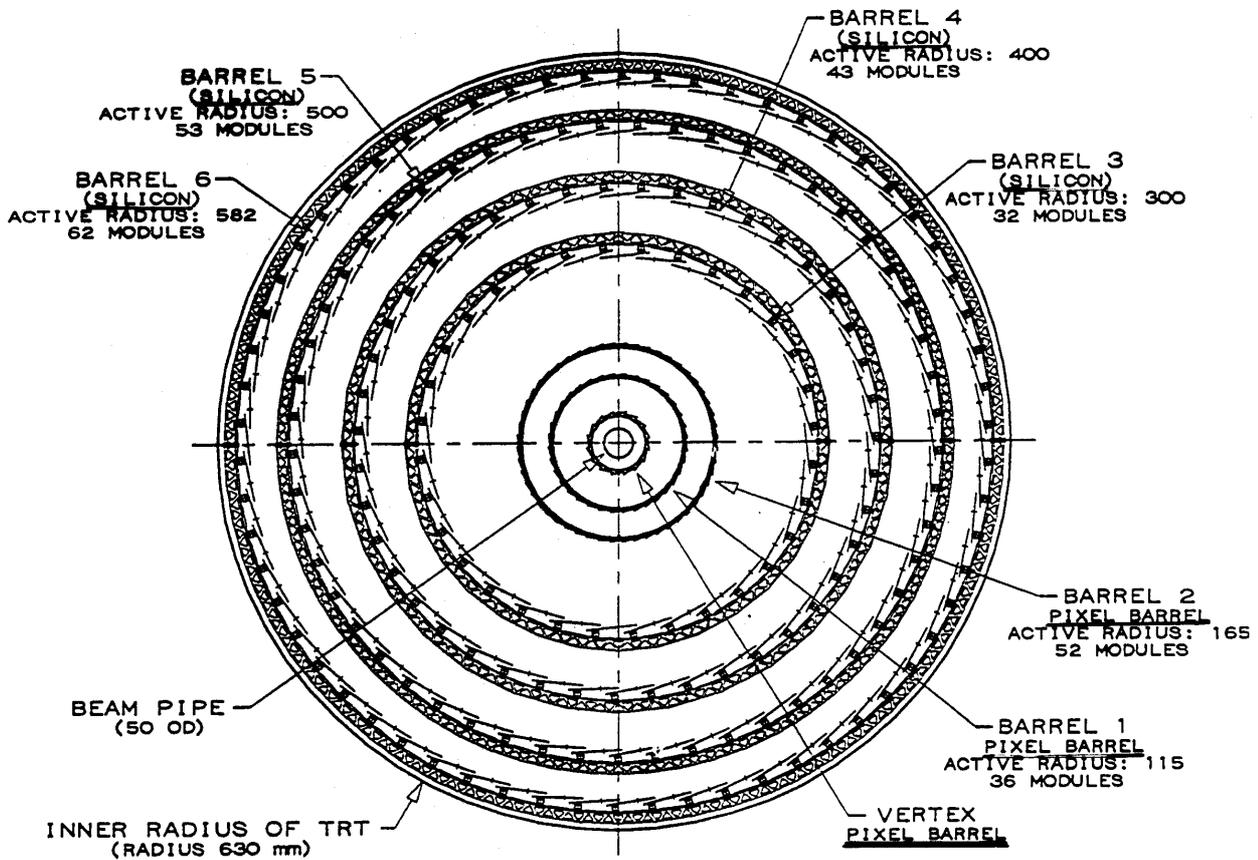
## Größenvergleich Vertexdetektoren:



ATLAS Inner Detector:



# ATLAS Silizium Streifen- und Pixelzdetektoren



System	Position	Area (m <sup>2</sup> )	Resolution $\sigma$ ( $\mu\text{m}$ )	Channels (10 <sup>6</sup> )	$\eta$ coverage
Pixels	(1 low-lum. barrel layer)	(0.2)	( $R\phi = 14, z = 87$ )	(12)	( $\pm 2.5$ )
	2 barrel layers	1.4	$R\phi = 14, z = 87$	140	$\pm 2.5$
	4 forward disks on each side	0.8	$R = 87$		
Silicon strips	(1 low-lum. barrel layer)	(0.2)	( $R\phi = 10, z = 20$ )	(0.03)	( $\pm 2.1$ )
	4 barrel layers	41	$R\phi = 15, z = 770$	2.9	$\pm 1.4$
TRT	Axial barrel straws		170 (per straw)	0.1	$\pm 2.5$
	Radial forward straws 36 straws per track			0.32	