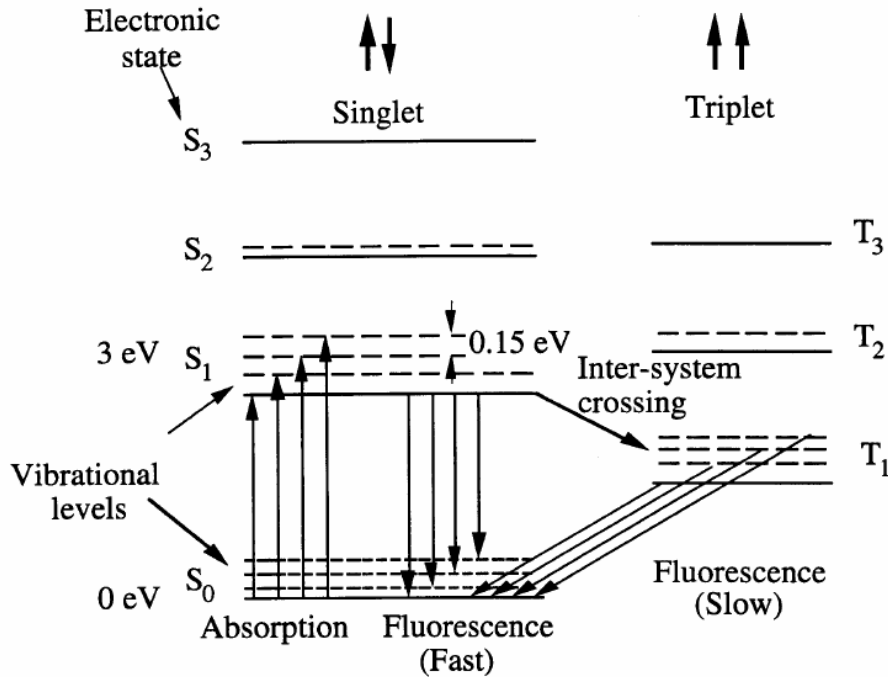


Detektoren in der Kern- und Teilchenphysik

- Szintillationsdetektoren
- Ionisationsdetektoren
- Halbleiterdetektoren

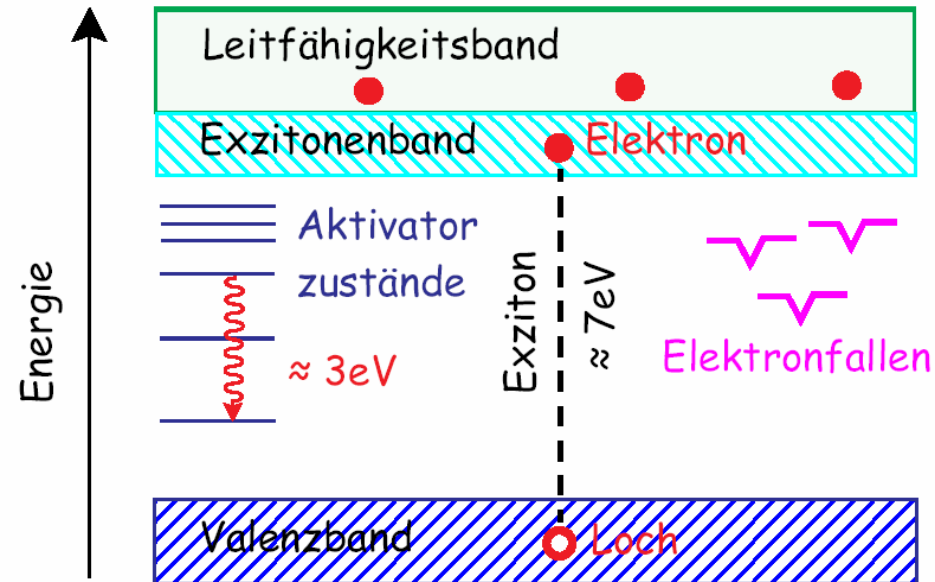
Szintillationsdetektoren

Organische Szintillatoren:



Plastik-Szintillatoren

Anorganische Szintillatoren:

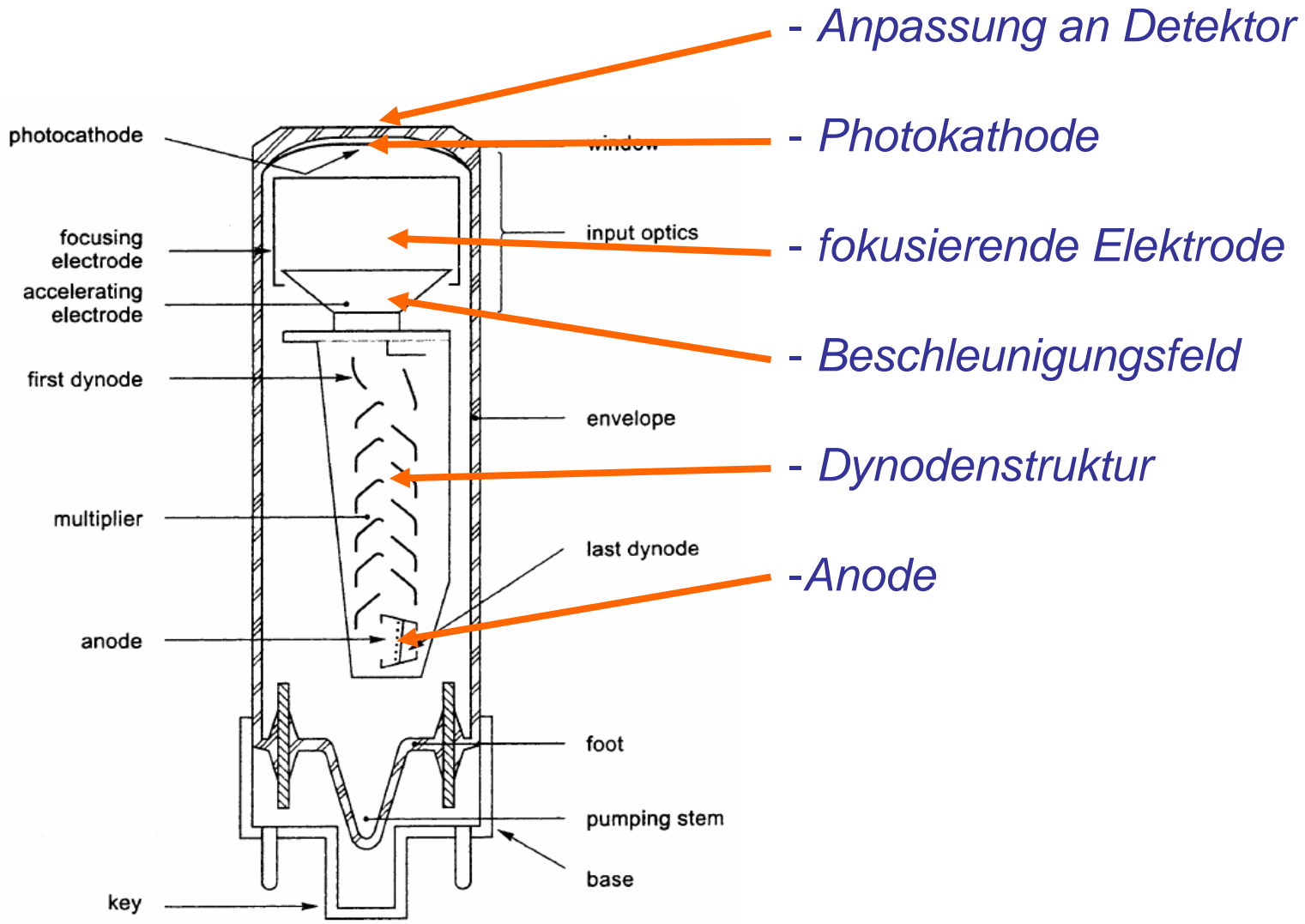


NaI, CsI, BaF₂, BGO

Photomultiplier

Photomultiplier:

Konversion Szintillationslicht in elektrisches Signal



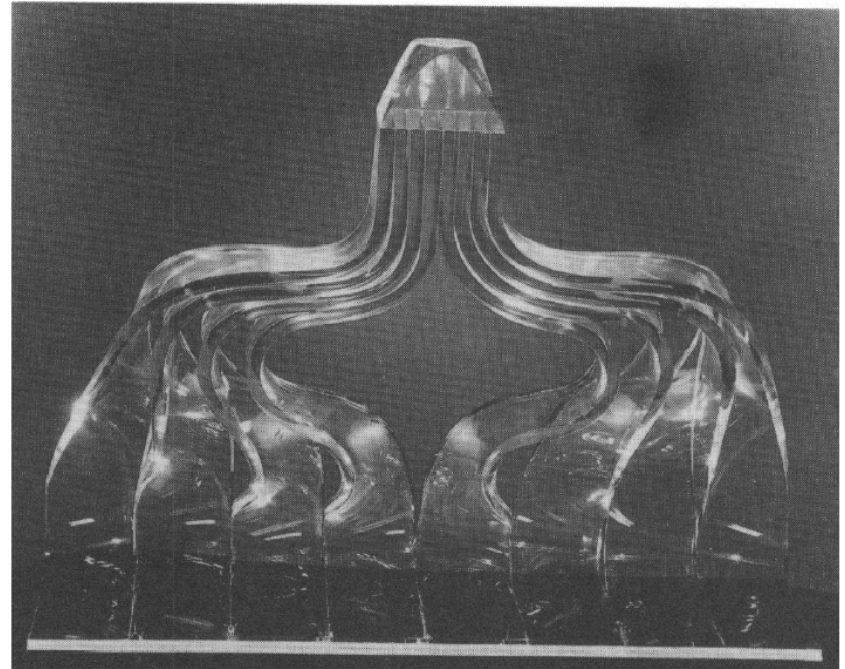
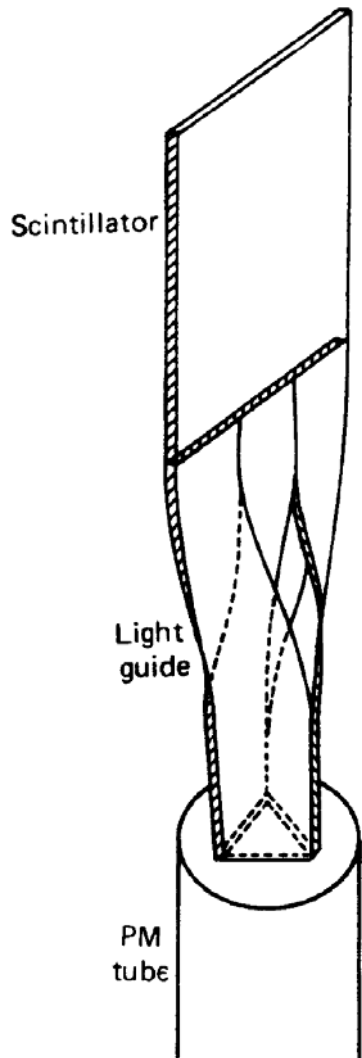
Szintillator-Lichtleiter-Photomultiplier

Lichtleiter

Photomultiplier sind oft über Lichtleiter an den Szintillator gekoppelt.

Grundprinzip: Totalreflektion an der Oberfläche des Lichtleiters

Effizienz des Lichtleiters wird limitiert durch Winkel für Totalreflektion



Energieauflösung

Signalentwicklung

1. *E-Absorption in Szintillator*
2. *Population angeregter Zustände*
Zeitkonstante
3. *Zerfall der Zustände -> Photonen*
Zeitkonstante, Absorption,
Reflektion in Kristall
4. *Absorption in Photokathode*
-> Photoelektronen
Transmission in Glas, Absorption in
Kathode, quantum efficiency
5. *Vervielfachung der Photoelektronen*

Beispiel:

511 keV in NaJ

Bestimmt Fehler!

25000 Photonen @
Kristall

15000 Photonen @
Kathode

3000 *Elektronen @*
erste Dynode

3 x 10⁹ Elektronen @
Anode (~2mA)

Gas-Ionisationsdetektoren

I Rekombinationseffekte

II Ionisationsbereich

III Gasverstärkung

e^- - Energie $>$ Ionisationsenergie

Proportionalbereich $<$ 600 V

Multiplikation ist linear

Größere Spannung $>$ 600 V

Multiplikation wird nichtlinear

Raumladung der pos. Ionen

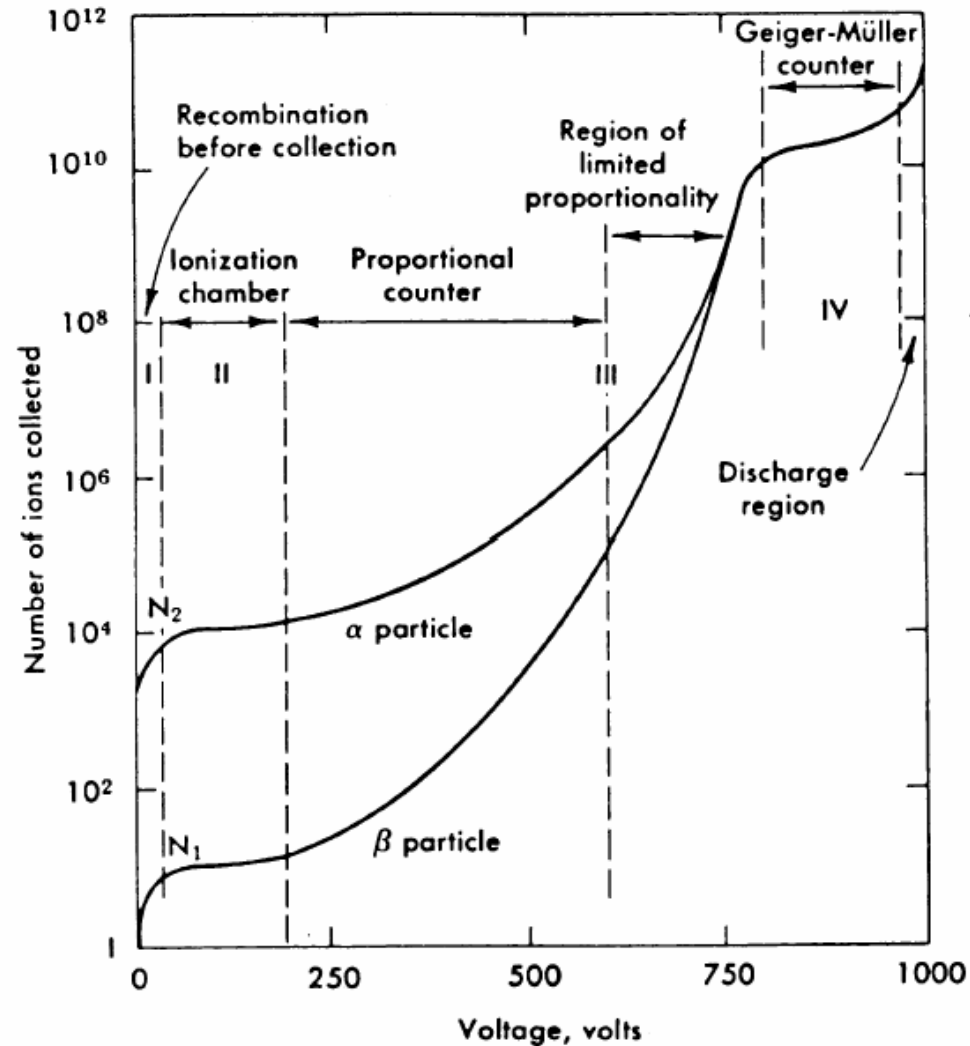
IV Geiger-Müller Bereich

Positive Raumladung begrenzt

E-Feldstärke, keine weitere

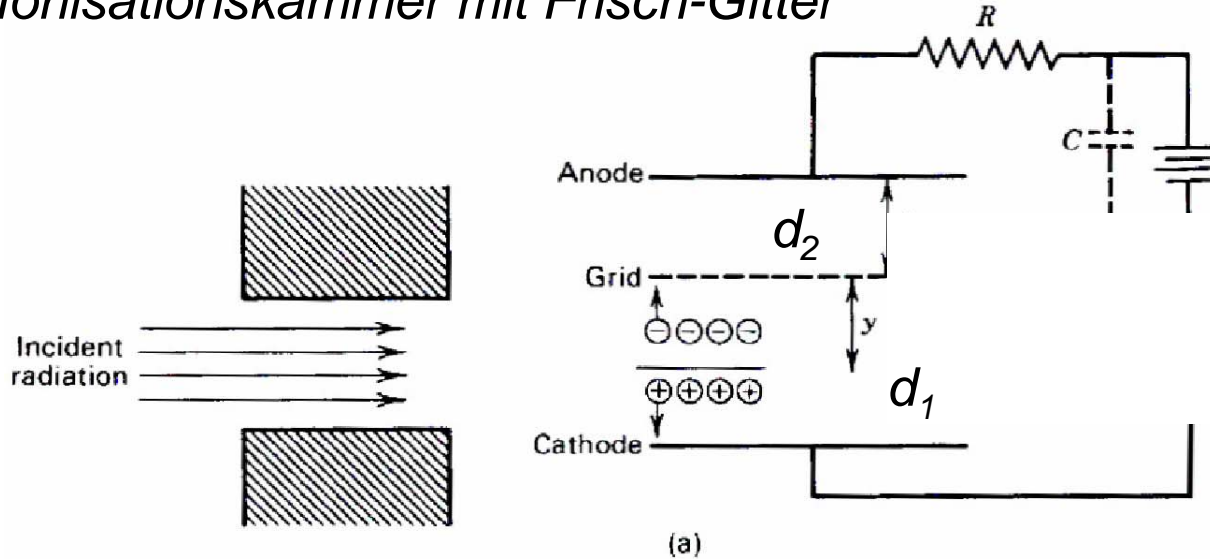
Verstärkung, gleiche Amplitude

V Entladungsbereich

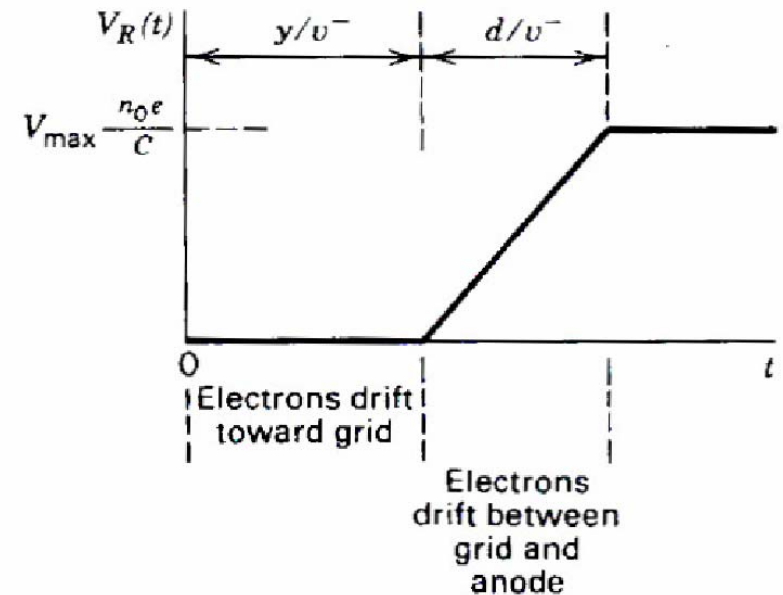
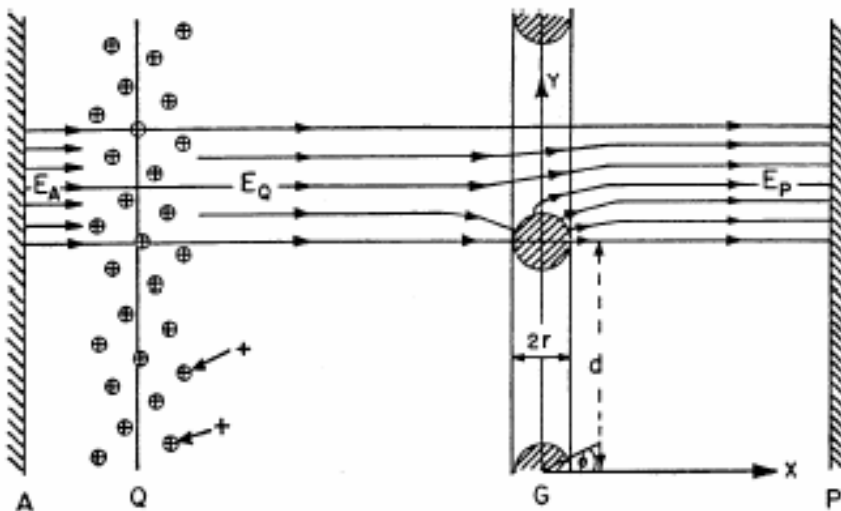


Gas-Ionisationsdetektoren

Ionisationskammer mit Frisch-Gitter



Verlauf der Signalzeit und Amplitude



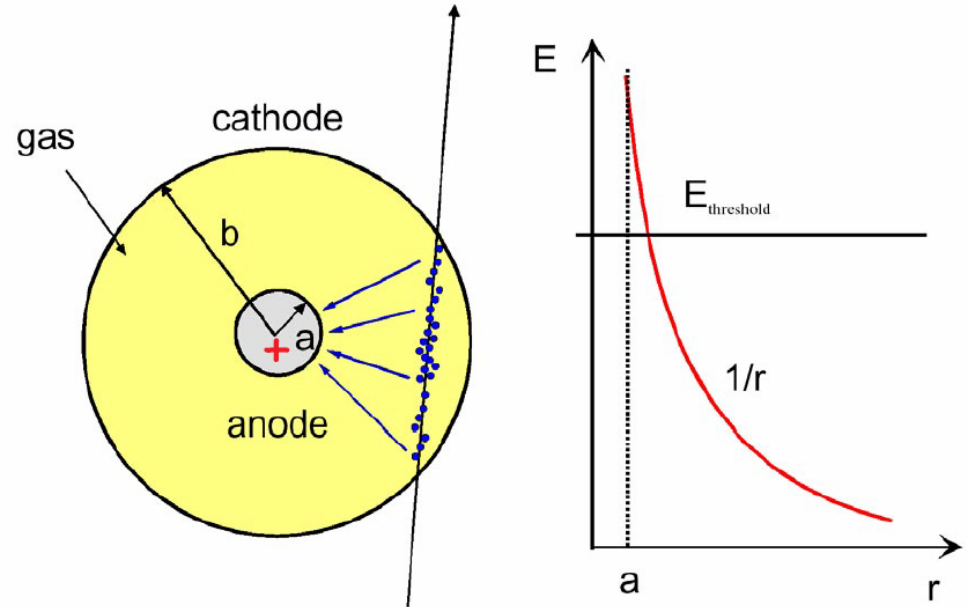
Gasverstärkung

Für eine zylindrische Geometrie gilt:

$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \quad \text{und} \quad V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{r}{a}$$

wobei C = Kapazität/Länge bezeichnet

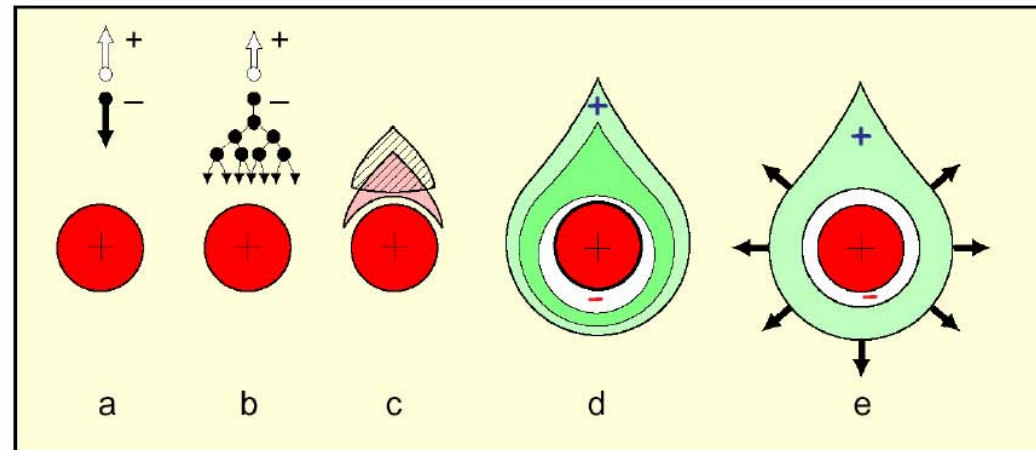
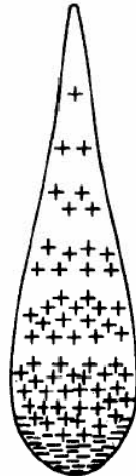
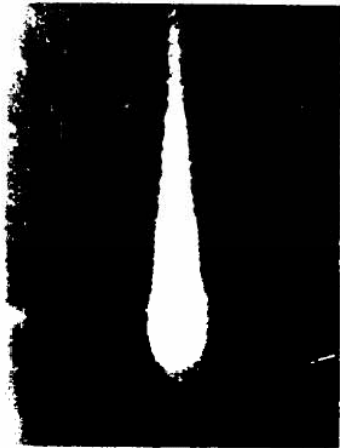
- Die erzeugten Elektronen driften in Richtung der auf positivem Potential befindlichen Anode (Details zum Driftverhalten später)
- Wegen der $1/r$ Abhängigkeit des elektrischen Feldes kommt es bei genügend dünnen Drähten in Drahtnähe zu Feldstärken $E > \text{kV/cm}$, sodass die Elektronen genügend Energie gewinnen, um selber Gasmoleküle zu ionisieren.
- Dies führt zu einem **exponentiellen** Anwachsen der Anzahl der Elektron-Ion Paare in unmittelbarer Drahtnähe (Abstand \approx wenige Drahtdurchmesser).



Gas-Ionisationsdetektoren

Entwicklung und zeitlicher Verlauf der Ladungslawine

Nebelkammeraufnahme



- Aufgrund der transversalen Diffusion breitet sich eine Tropfenförmige Lawine um den Anodendraht herum aus.
- Elektronen werden innerhalb sehr kurzer Zeit (≈ 1 ns) aufgesammelt.
- Zurück bleibt die Wolke positiver Ionen, die langsam zur Kathode driftet.

Vieldrahtproportionalkammer

Übertragung des Prinzip des Proportionalrohres auf großflächige Detektoren.

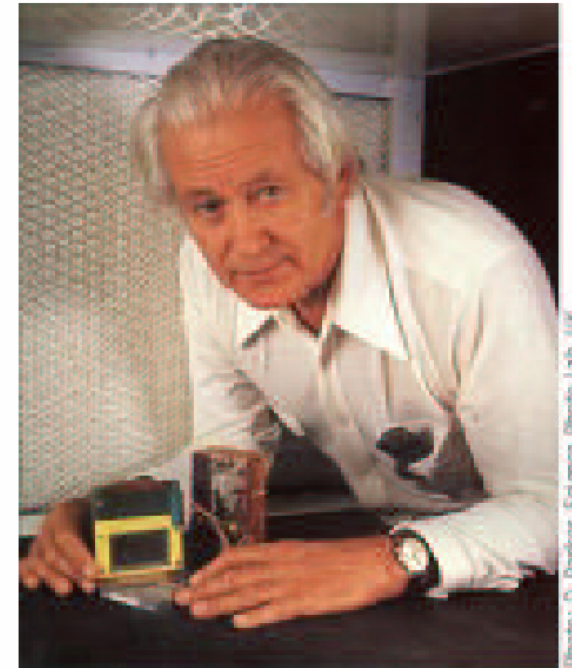
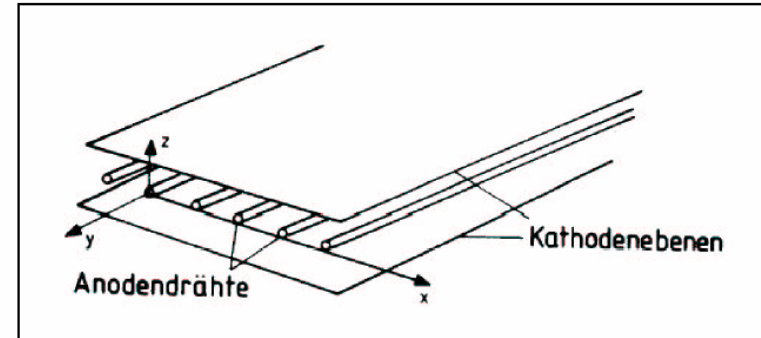
Multi Wire Proportional Chamber: MWPC

George Charpak 1968

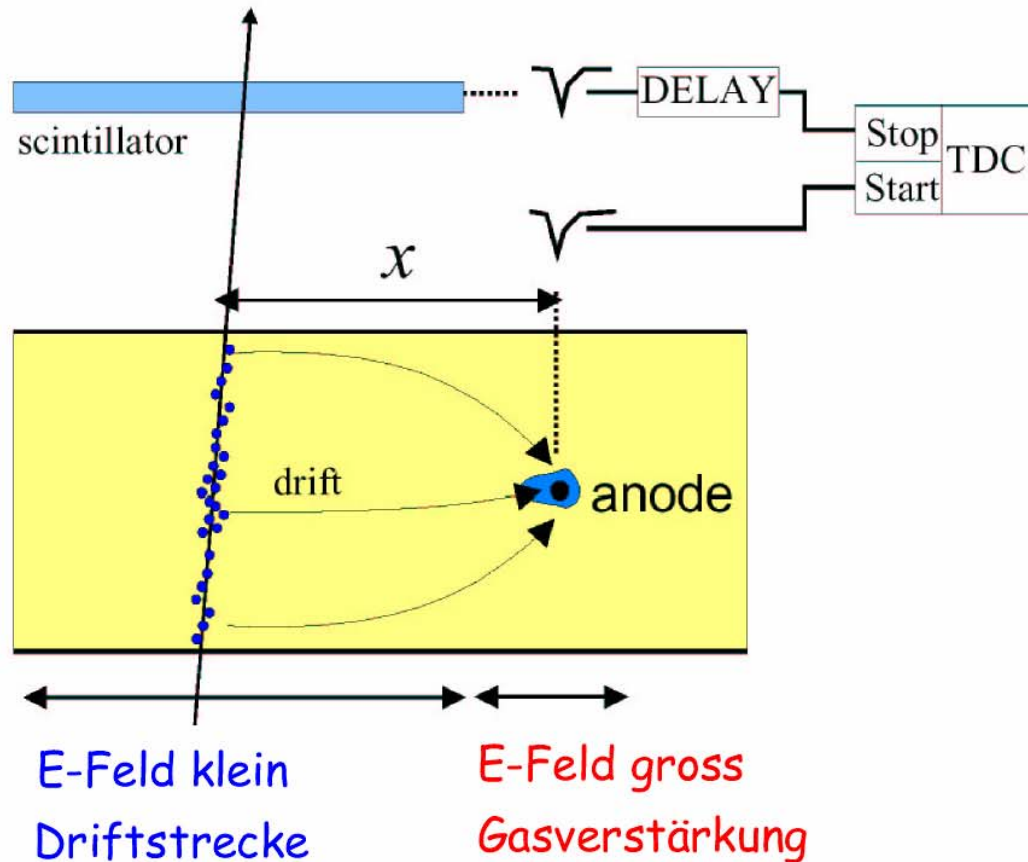
- Anodendrähte wirken als unabhängige Detektoren
- Kapazitive Kopplung der negativen Ladungsimpulse vom lawinenbildenden Anodendraht L zu den Nachbardrähten A vernachlässigbar gegenüber dem positiven Impuls, den die sich von L wegbewegenden Ionen auf A influenzieren.
- Elektronikentwicklung: Möglichkeit viele Kanäle (=Drähte) parallel auszulesen $\rightarrow 10^6$ Spuren pro Sekunde

\Rightarrow Durchbruch in der Detektorentwicklung

Nobelpreis für Physik 1992



Driftkammer



Messung der Ankunftszeit t_1 der Elektronen am Anodendraht relativ zu einem Zeitnullpunkt t_0 .

- Der Zeitnullpunkt t_0 muss extern vorgegeben werden (hier durch schnelles Signal im Szintillator)
- Die x -Koordinate ergibt sich aus:

$$x = \int_{t_0}^{t_1} v_D(t) dt$$

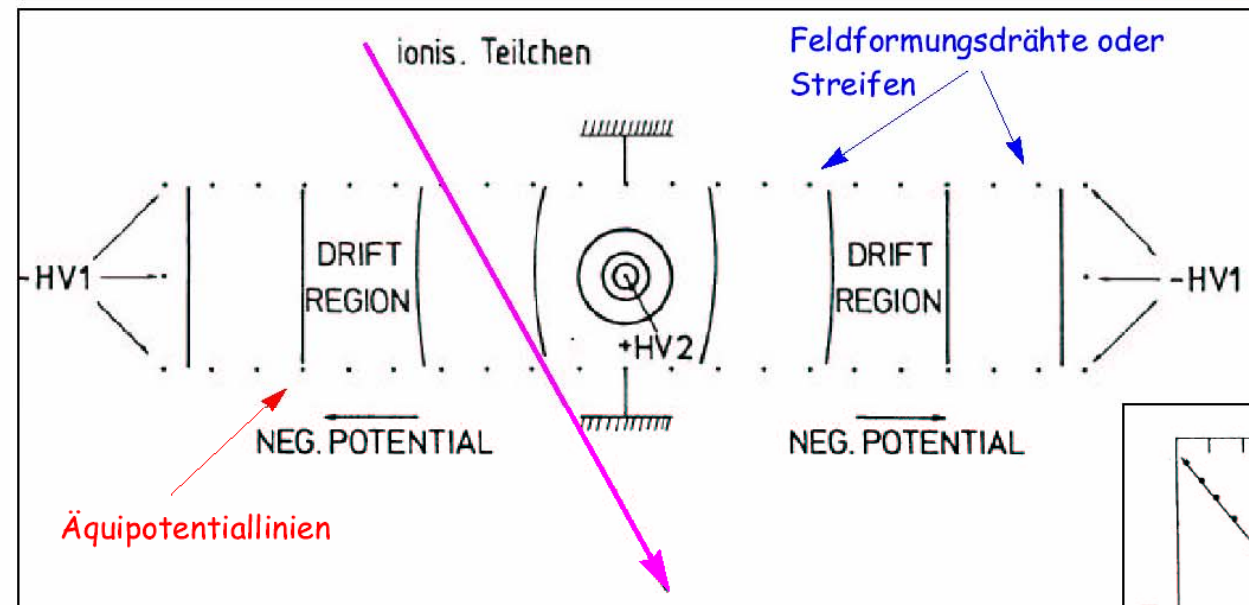
- Es ist günstig, wenn die Driftgeschwindigkeit v_D über den gesamten Bereich des Driftweges möglichst konstant ist.

Dann gilt: $x = v_D(t_1 - t_0) = v_D \Delta t$

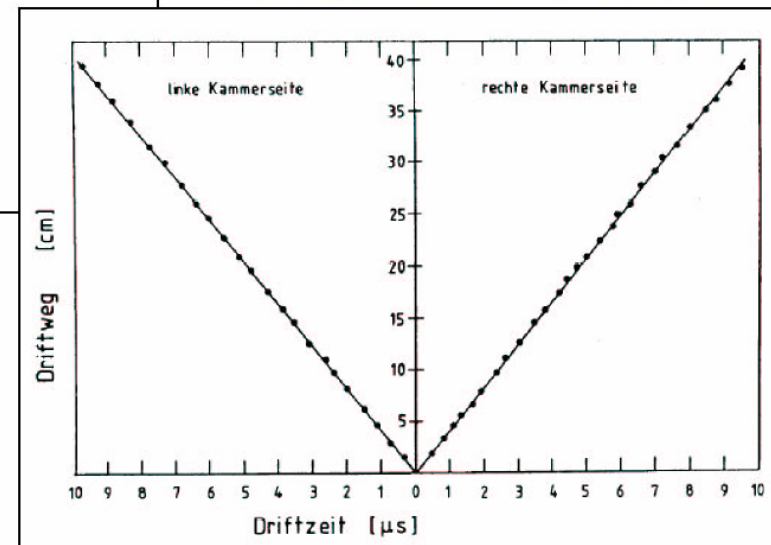
TDC: Time to Digital Converter

Driftkammer

Durch geeignete Anordnung durch Feldformungsdrähte, die über eine Widerstandskette auf vorgegebene Potentiale gebracht werden erreicht man eine möglichst konstantes E-Feld innerhalb des Driftraumes und damit auch eine **konstante Driftgeschwindigkeit**.



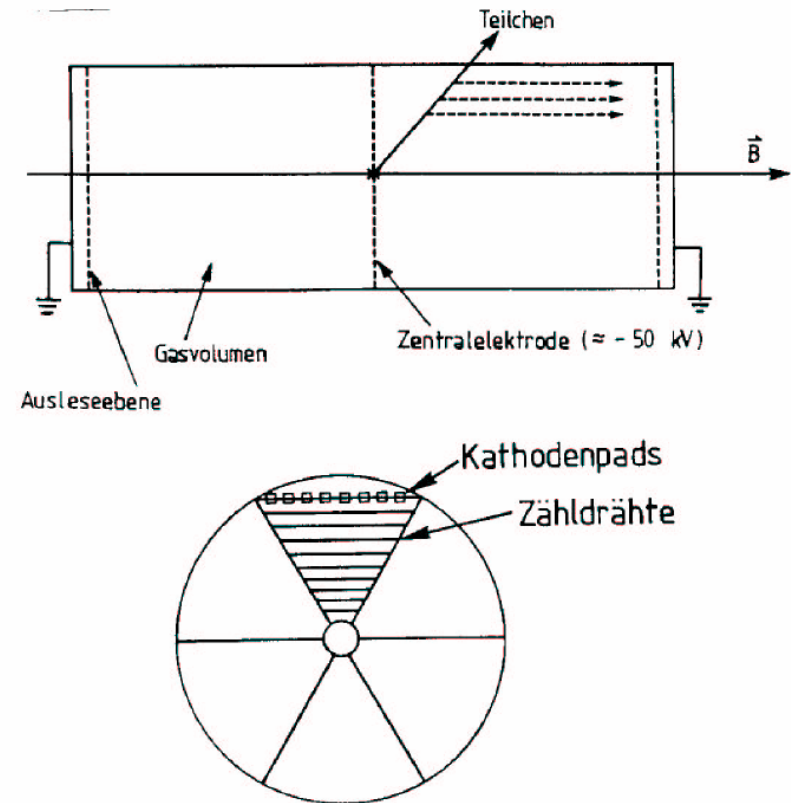
Orts-Driftzeit-Relation



Time projection chamber

Die von Nygren in den 70er Jahren entwickelte Time Projection Chamber (TPC) besteht im wesentlichen aus einem nur mit Gas gefülltem Volumen.

- Nach einem Teilchendurchgang driften die durch Ionisation entstehenden Elektronen in einem elektrischen Feld über Strecken bis zu mehreren Metern zu den Endstücken, wo sie dann mit Vieldrahtkammern registriert werden.
- Zusätzlich zu den Anodendrähten werden auch Kathodenstreifen oder Kathodenpads ausgelesen, so dass sich zusammen mit der Driftzeit eine **3-dimensionale Rekonstruktion** der Bahn ergibt.
- Diffusion stark reduziert, da $E \parallel B$
Spiralbahnen um Feldlinien: Larmorradius $< 1 \mu\text{m}$
- Laserkalibration für genaue v_D Bestimmung
- Man erreicht sehr gute Ortsauflösungen und auch genaue dE/dx -Messungen.

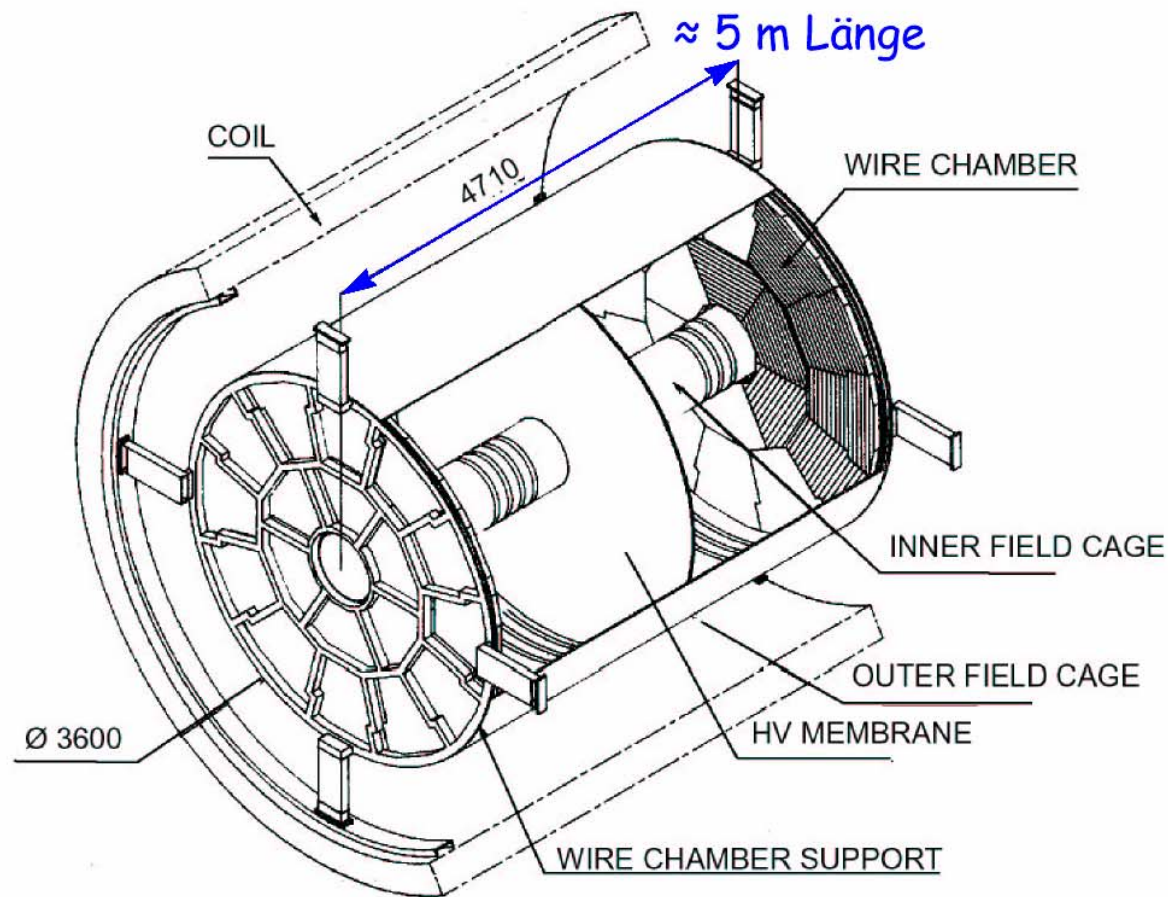


Time projection chamber

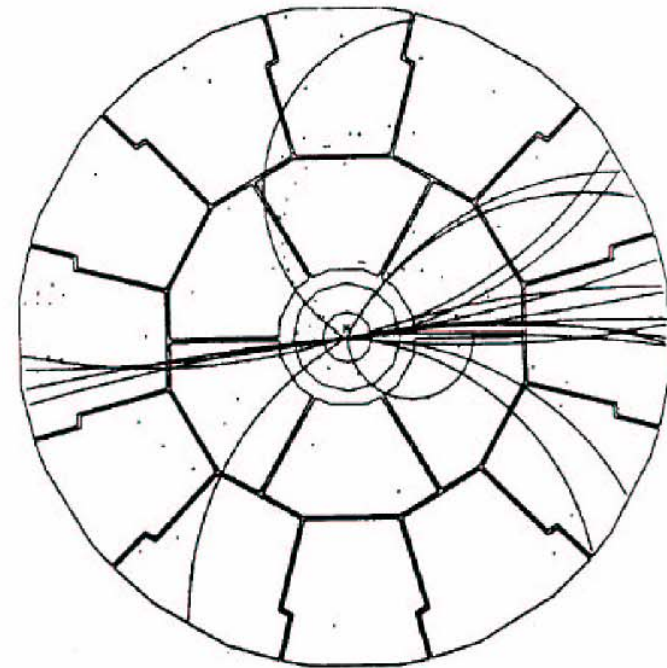
Erreichte Auflösung:

$$\sigma_{r\phi} = 173 \mu\text{m}$$

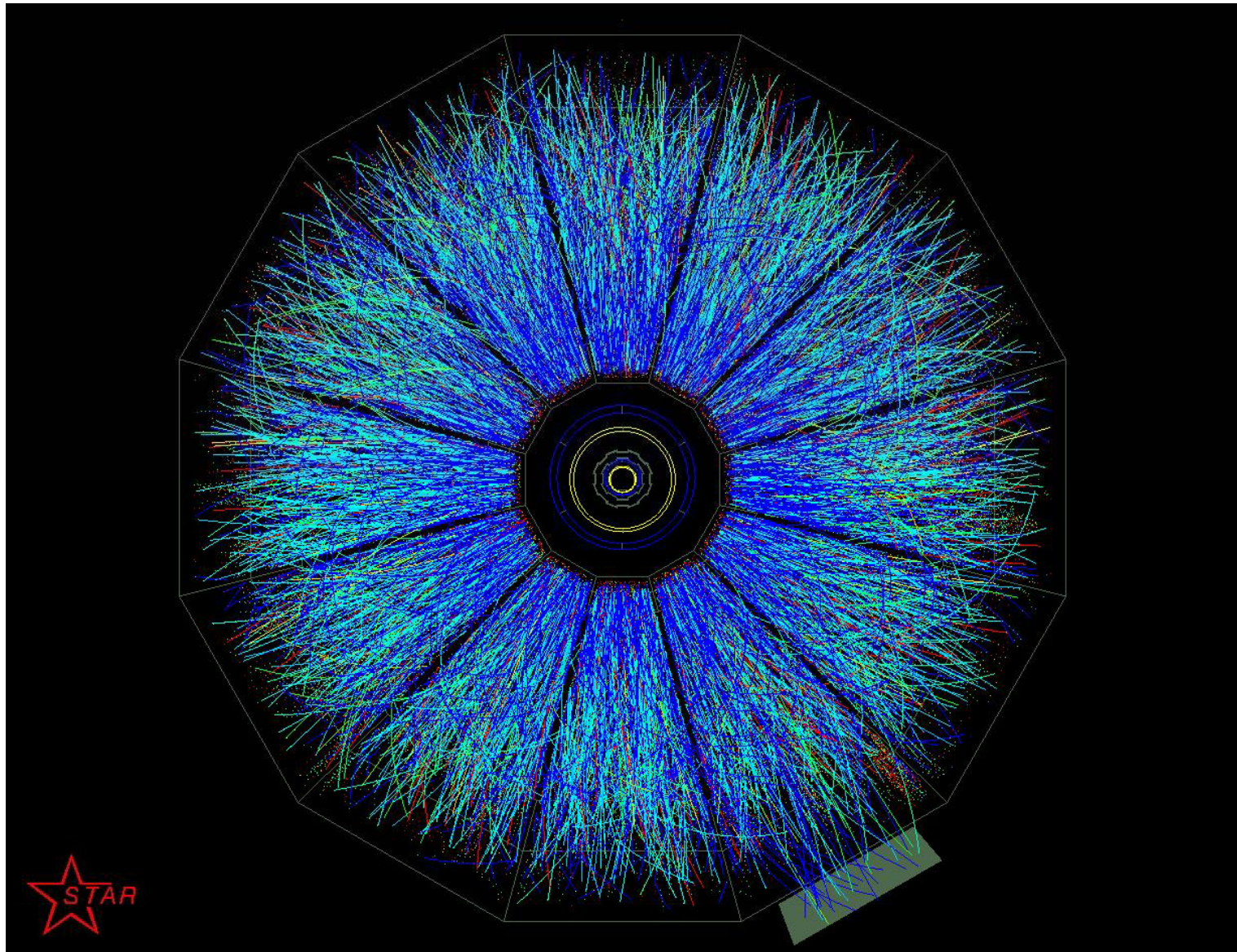
$$\sigma_z = 740 \mu\text{m}$$



$r-\phi$ Projektion



Gas-Ionisationsdetektoren

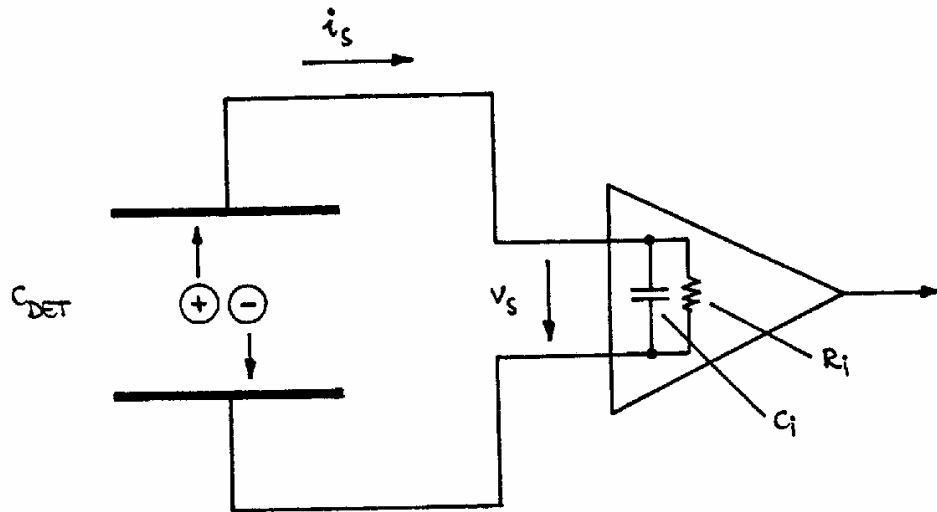


Halbleiterdetektoren

Grundprinzip:

Halbleiterdetektoren sind
'Ionisationskammern'

- Detektionsvolumen mit elektrischem Feld
- Energiedeposition erzeugt pos. und neg Ladungsträger
- Ladungen bewegen sich entlang der Feldlinien
- Strom in äußerem Kreis



Vorteile:

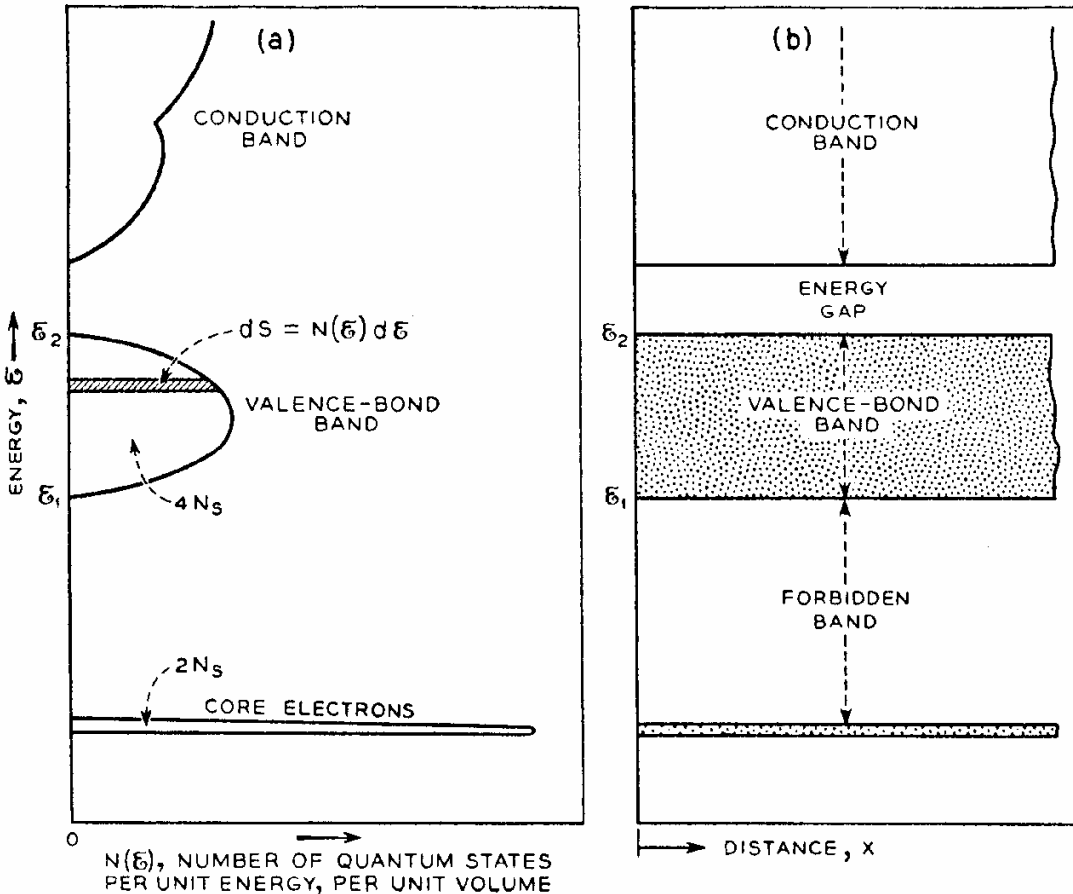
Festkörper -> Ionisationsdichte dq/dx hoch,
Si: $dE/dx \sim 39 \text{ keV}/100\mu\text{m}$

Halbleiter -> kleine Bandlücke, sehr gute E-Auflösung

E-Feld -> schnelle Ladungssammlung (timing, Effizienz)

-> Ortsempfindlicher Nachweis

Halbleiterdetektoren



Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband:

Ge: 0.7 eV

Si: 1.1 eV

GaAs: 1.4 eV

Diamant: 5.5 eV

Ionisationsenergie zur Erzeugung von e-h-Paaren ist proportional zur Bandlücke, jedoch 2-3 größer.

*Energie, Impulserhaltung
=> Phononenanregung
(Kapitel über Fano Faktor)*

Halbleiterdetektoren

Eigenschaften von Silizium und Germanium

	Si	Ge
Atomic number Z	14	32
Atomic weight A	28.1	72.6
Density [g/cm²]	2.33	5.32
Dielectric constant (relative)	12	16
Intrinsic resistivity (300 K) [Ωcm]	230000	45
Energy gap (300 K) [eV]	1.1	0.7
Energy gap (0 K) [eV]	1.21	0.785
Electron mobility (300 K) [cm²/Vs]	1350	3900
Hole mobility (300 K) [cm²/Vs]	480	1900

Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband:

Ge: 0.7 eV

Si: 1.1 eV

Ionisationsenergie zur Erzeugung von e-h-Paaren ist proportional zur Bandlücke, jedoch 2-3 größer.

Halbleiterdetektoren

Für Detektor benötigt man ein Volumen mit hohem elektrischem Feld, niedrigem Gleichstrom und grosse Ladungsmenge von Signal.

Halbleiter p-n-Übergang ermöglicht große Feldstärke bei niedrigem Leckstrom.

-> Dotierung zur Kontrolle der Leitfähigkeit

notwendige Konzentrationen: $\sim 10^{12} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

Zusätzliche Valenzelektronen mit Atomen aus 5. Hauptgruppe

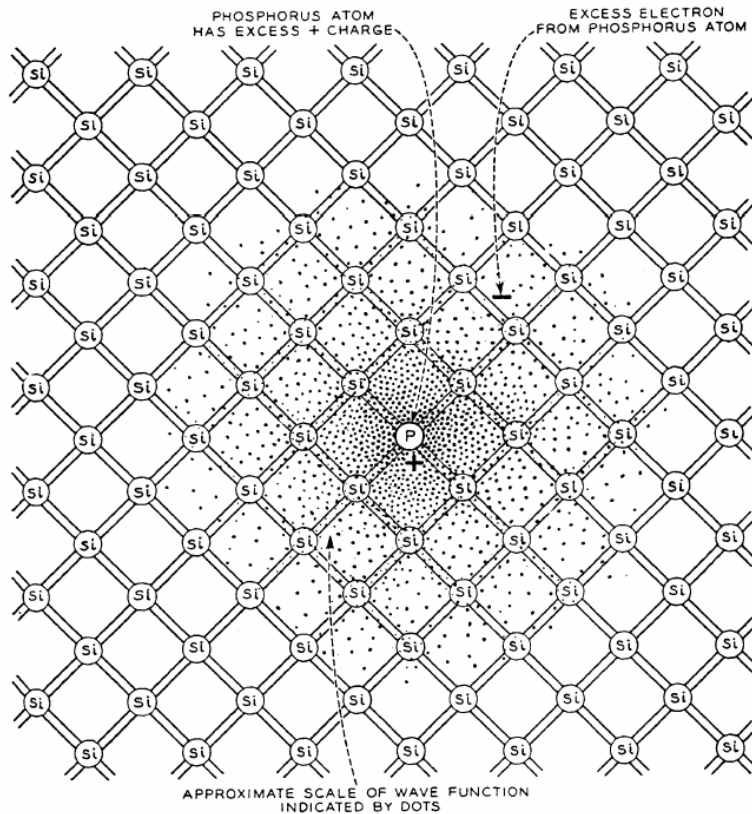
z.B.: P, As, Sb -> Donatoren, n-type

Fehlende Valenzelektronen mit Atomen aus 3. Hauptgruppe

z.B.: B, Al, Ga, In -> Akzeptoren, p-type

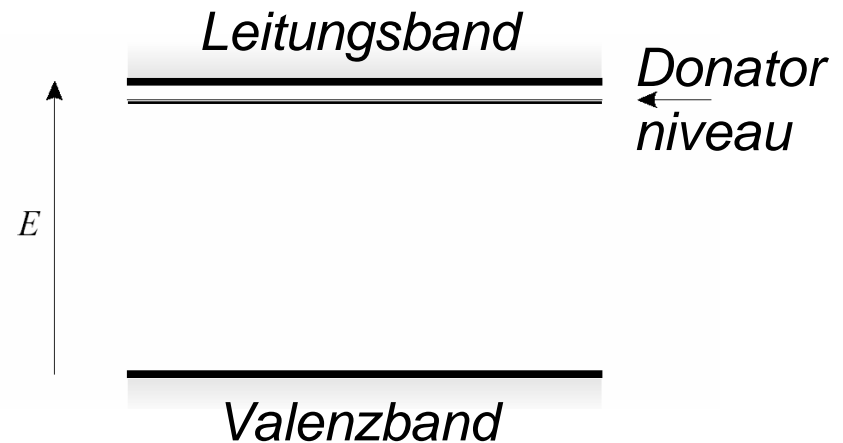
Halbleiterdetektoren

*Ausgedehnte Wellenfunktion
des Donatoratoms z.B. P in Si*



*Schwache Bindung des Elektrons
abgeschwächtes Coul. Potential*

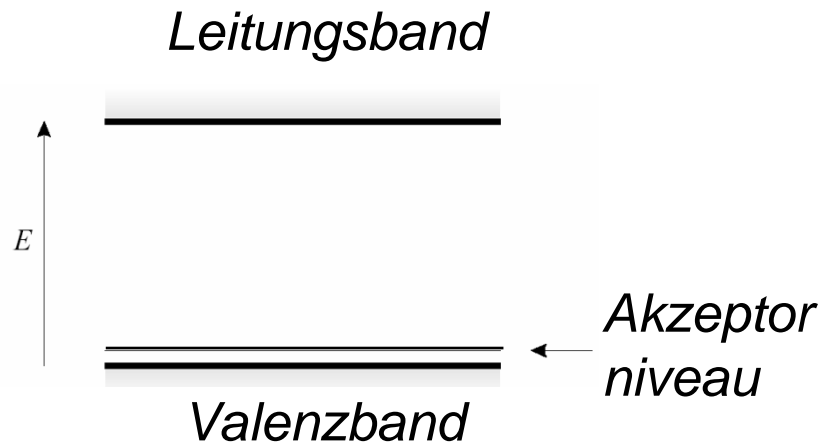
$$E_i(\text{Gitter}) \propto \frac{E_i(\text{Atom})}{\epsilon^2}$$



- Gebundenes Niveau ~ 0.1 eV unterhalb des Leitungsbandes
- bei Raumtemp. ($E=0.026$ eV) Elektronen in Leitungsband

Halbleiterdetektoren

Äquivalente Situation bei Dotierung mit Akzeptoren:



Gebundener Zustand ~ 0.01 eV von Bandkante.

Bor Dotierung in Si $E_v+0.045$ eV

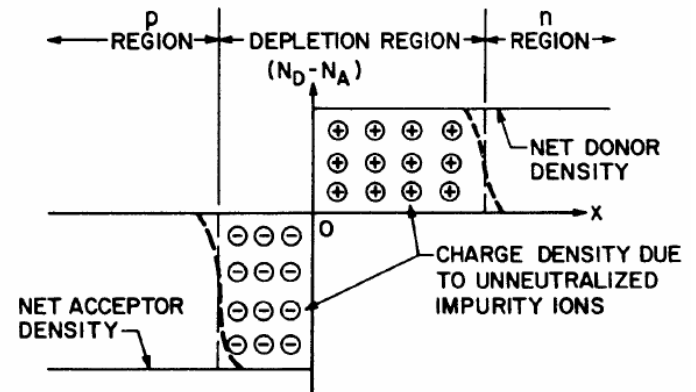
Halbleiterdetektoren

*pn-Übergang ohne
äußeres Potential*

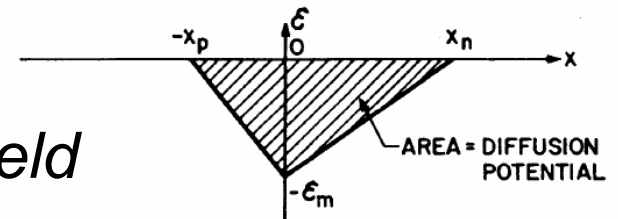
Diffusion von e und h

*E-Feld und Potential
Kontaktpotential $\sim 1V$*

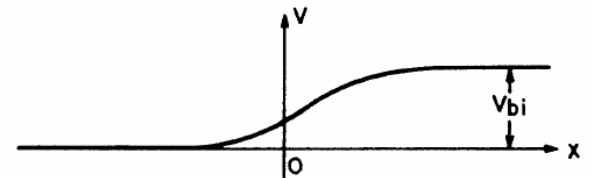
*Ladungsträgerfreie Zone
'depletion zone'*



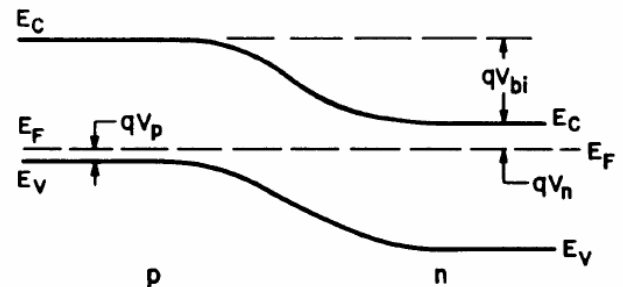
Elektrisches Feld



Potential



*Leitungsband
Valenzband*

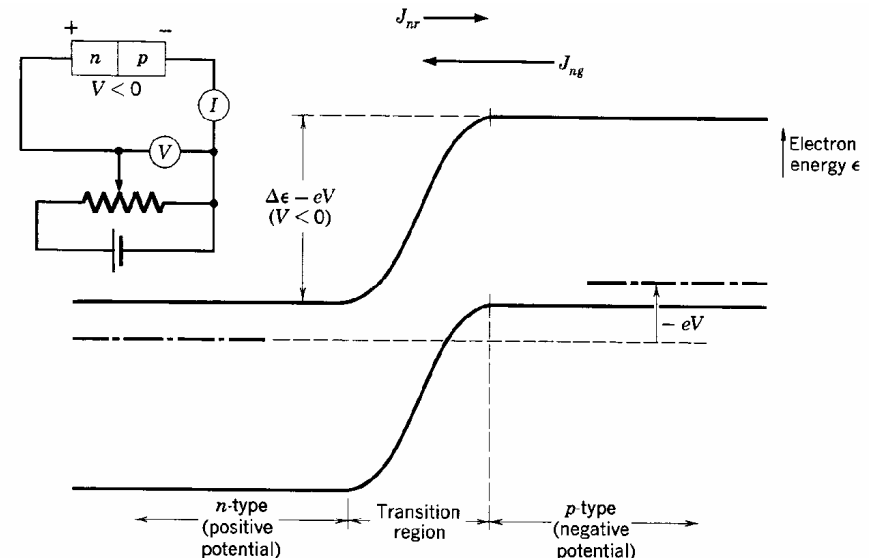
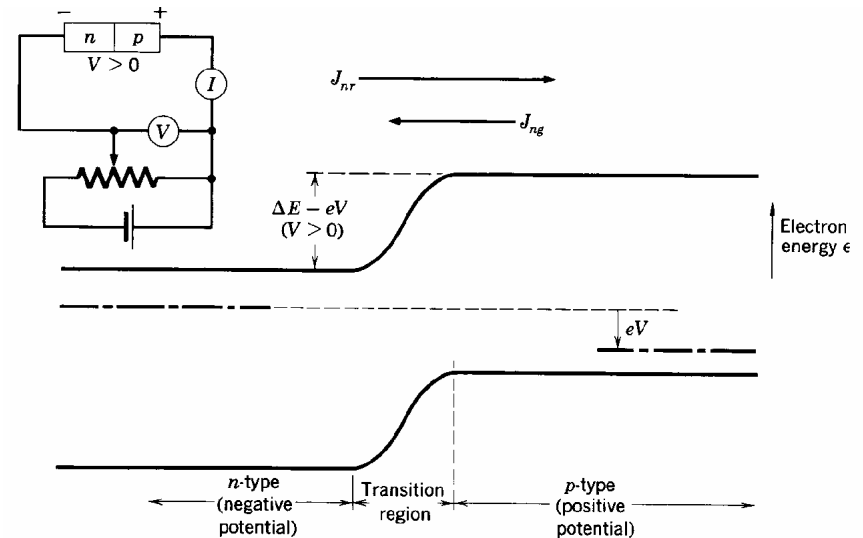


Halbleiterdetektoren

pn-Übergang mit äußerer Spannung:

- *Durchlaßrichtung*
 Pos. Spannung an p-Dotierung
 Neg. Spannung an n-Dotierung
 => großer e-Stromfluß

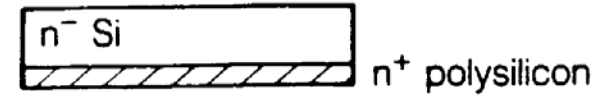
- *Sperrichtung*
 Neg. Spannung an p-Dotierung
 Pos. Spannung an n-Dotierung
 => größere Potentialbarriere
 größere Verarmungszone



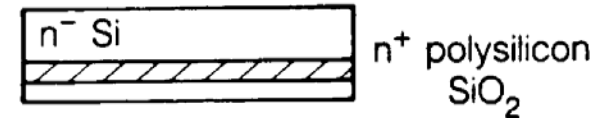
Halbleiterdetektoren

Herstellung von Silizium micro-strip Detektoren

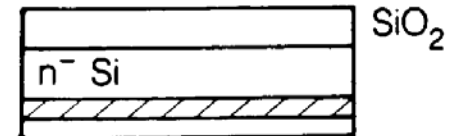
1. Backside contact (typically P diffusion or implant) – here P-doped polysilicon (discussed later)



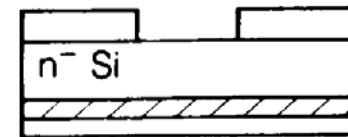
2. Deposition of silicon dioxide on the backside



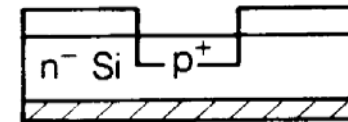
3. Thermal oxidation of the top surface



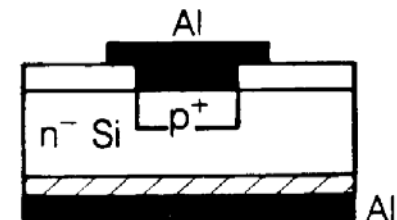
4. Photolithography and etching of the silicon dioxide



5. Boron doping to form p-type electrode and subsequent removal of backside oxide



6. Aluminum metallization and patterning to form contacts



Ge-Detektoren

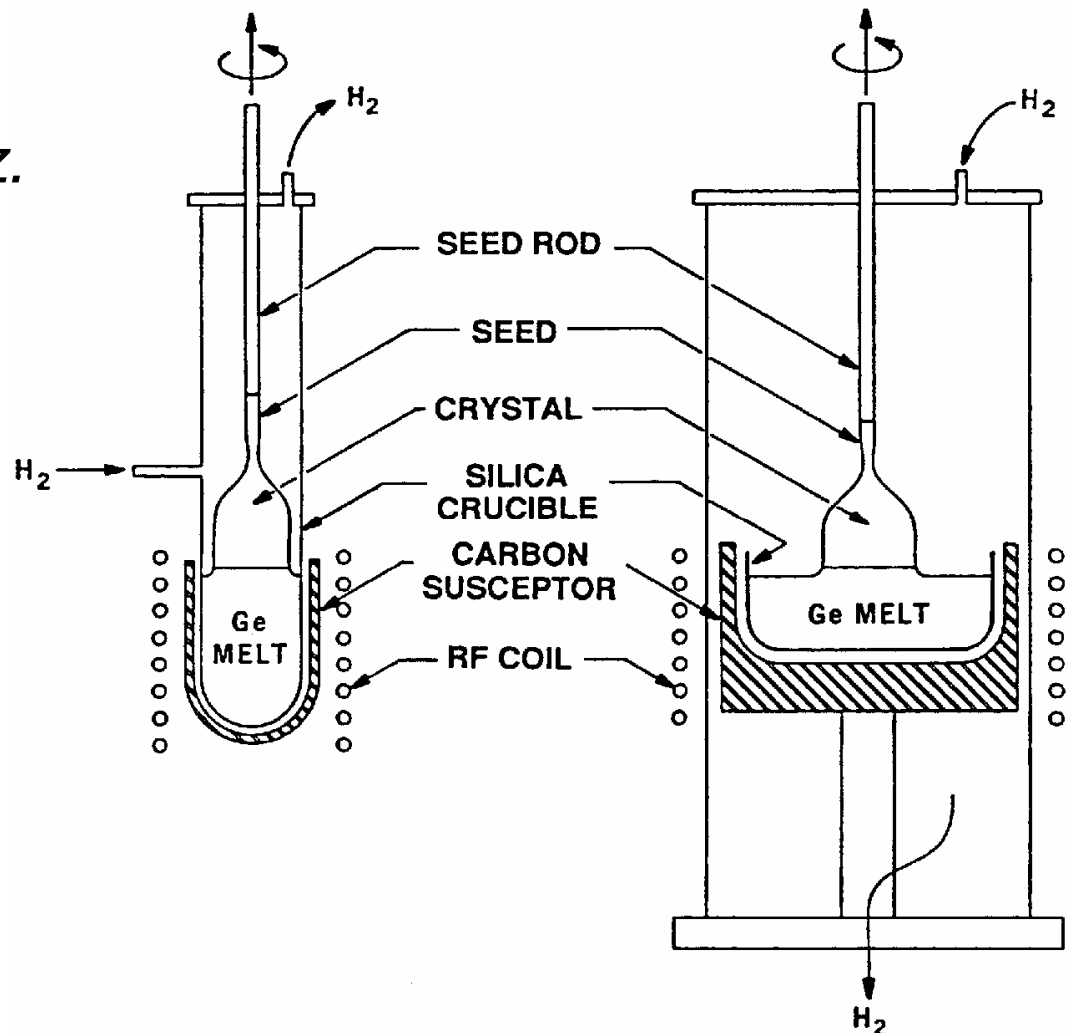
Dicke der Verarmungszone

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_b}{eN}}$$

N – Ladungsträgerkonz.

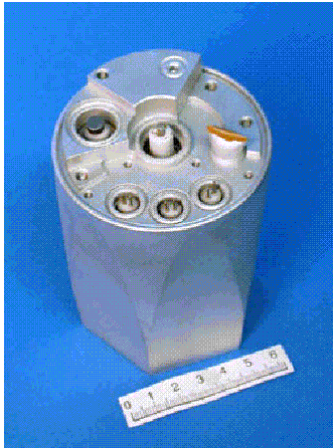
Ge: $N \sim 10^{-12}$ pro Atom

*Herstellung von
high purity Germanium*

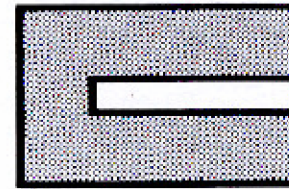


Ge-Detektoren

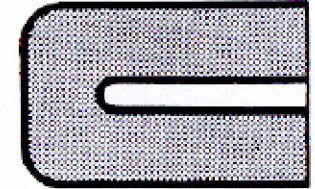
Detektorgeometrie



True coaxial



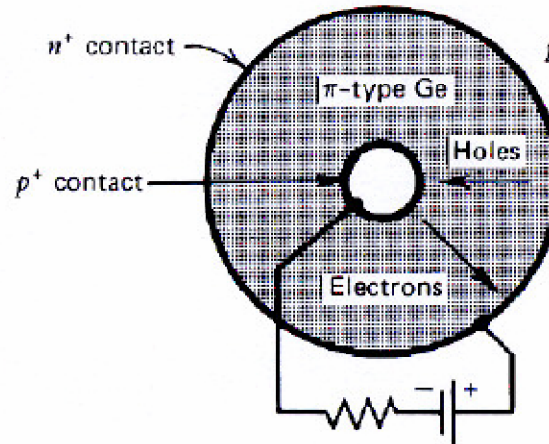
Closed-ended coaxial



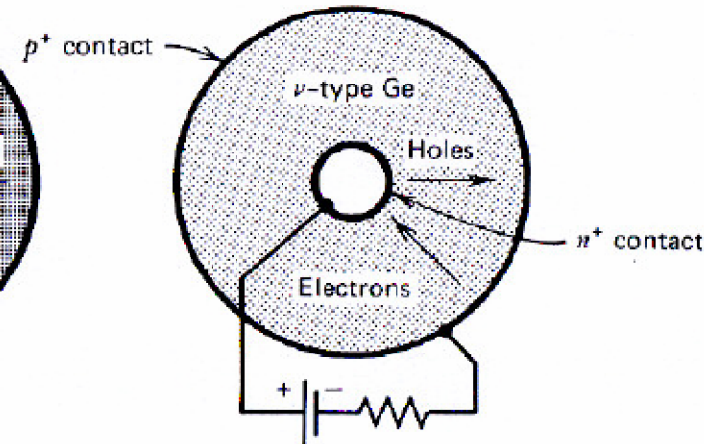
Closed-ended coaxial
(bulletized)

— represents electrical contact surface

Kontaktierung Driftrichtung von Elektronen und Löcher



p -type coaxial



n -type coaxial