

Vertiefung in die Extraterrestrische Physik

Detektoren

Bernd Heber

14 January, 2011

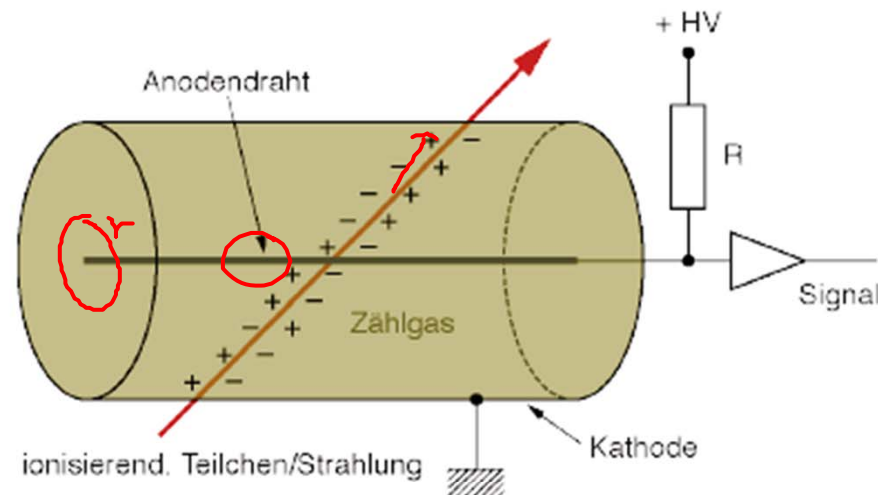


Detektoren Gasdetektoren

- ★ Aufgrund der hohen Beweglichkeit der Elektronen und Ionen ist Gas ein hervorragendes Medium, um eine z.B. durch geladene Teilchen verursachte Ionisation nachzuweisen.
- ★ Beim Eintritt eines geladenen Teilchens in den Gasdetektor entstehen **Elektron-Ion-Paare**. Die mittlere Anzahl dieser Paare ist proportional der deponierten Energie (dE/dx).
- ★ Durch **Anlegen einer externen Spannung** werden die Elektronen zur Anode und die Ionen zur Kathode hin beschleunigt .
- ★ Generell gilt: **Durch die Bewegung der Elektronen und Ionen im elektrischen Feld wird an der Anode und der Kathode ein Signal induziert.**
(D.h. das für die Detektion entscheidende Signal entsteht *nicht* durch die Ladungssammlung selbst, sondern bereits vorher!)
Dieser Punkt gilt nicht nur für Gasdetektoren sondern selbstverständlich auch für die Signalbildung in Flüssigkeiten und Festkörpern.

Funktionsprinzip

Betrachte z.B. einen mit Gas gefüllten Zylinder mit einem als Anode dienenden Draht entlang der Zylinderachse. In der einfachsten Variante kann der Zylinder sowohl als Kathode als auch als Behälter für das Zählgas fungieren.



Bei Anlegen einer externen Spannung V entsteht ein elektr. Feld E . Für die oben gezeigte Geometrie beträgt dieses:

$$|\vec{E}| = \frac{1}{r} \frac{V}{\ln(b/a)}$$

- r ... Abstand von der Achse
- a ... Radius des Anodendrahtes
- b ... Radius des Kathodenzylinders

Kenngrößen

- ★ mittlerer Energieverlust dE/dx (für ein mip)
- ★ mittleres effektives Ionisationspotential pro Hüllenelektron I_0 (eV)
- ★ Energieverlust pro erzeugten Elektron-Ion-Paare W_i (eV)
- ★ mittlere Anzahl der primären (n_p) und der gesamten Elektron-Ion-Paare (n_t) pro Wegstrecke für ein mip.
- ★ Stoßionisation: wichtig für die Gasverstärkung des Detektors (siehe Townsend-Lawine)
- ★ Wirkung elektronegativer Gase: wichtig für die Nachweiswahrscheinlichkeit
- ★ Diffusion: beeinflusst die Ortsauflösung des Detektors

Ionisation in Gasen - allgemeines

- ★ Die **mittlere Energie zur Erzeugung eines Elektron-Ion-Paares beträgt circa 30 eV**. Ein Teil der deponierten Energie geht durch die Anregung des Detektormediums verloren.
- ★ Man verwendet bevorzugt **Edelgase** als Detektormedium, da diese im Gegensatz zu Molekülen **keine Vibrations- und Rotationszustände** haben und daher die **Ionisation überwiegt**.
- ★ 2 Prozesse verringern die Anzahl der freien Elektronen:
 1. **Rekombination**: $A^+ + e^- \rightarrow A + \gamma$
 2. **e⁻-Anlagerung**: $A + e^- \rightarrow A^- + \gamma$

Diffusion von Elektronen und Ionen

thermal energies \Rightarrow Maxwell distribution
for the velocity

\Rightarrow mean diffusion velocity v_{diff}

$$v_{diff} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad T \text{ Temperatur}$$

$$T = 300 \text{ K}$$

$$v_{diff} = 10^6 \text{ cm/s for electrons}$$

$$v_{diff} \approx 10^4 \text{ cm/s for ions}$$

Diffusion von Elektronen und Ionen

Ohne äußeres elektromagnetisches Feld entfernen sich die Elektronen und Ionen durch **Diffusion** gleichförmig vom Entstehungspunkt. Dabei kommt es zur **Mehrfachstreuung** und infolgedessen zu einem **Energieverlust**. Dies führt schließlich zum **thermischen Gleichgewicht**. Fallweise treten Rekombination und e^- -Anlagerung auf.

Bei thermischen Energien folgt die Geschwindigkeitsverteilung der freien Ladungsträger der Maxwell-Verteilung. Die **mittlere Diffusionsgeschwindigkeit** für ein Teilchen der Masse m beträgt:

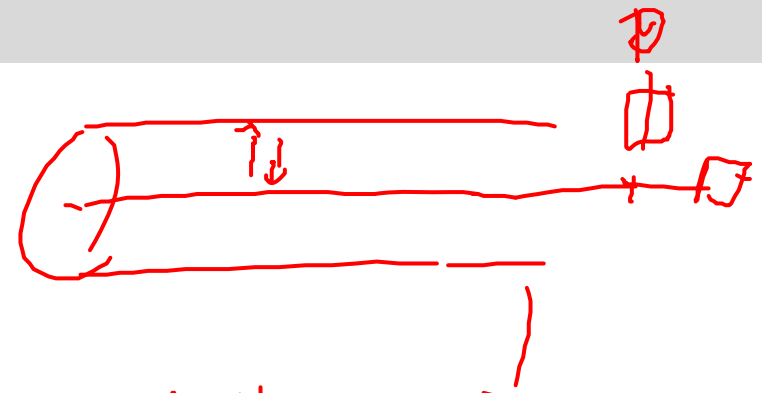
$$v_{\text{diff}} = \sqrt{\frac{8 k T}{\pi m}}$$

Bei Raumtemperatur beträgt sie für

- Elektronen: $v_{\text{diff}} \approx 10^6 \text{ cm/s}$
- Ionen: $v_{\text{diff}} \approx 10^4 \text{ cm/s}$

Driftbewegung im elektrischen Feld

E results in a directional Movement.



Because of scattering the particle reaches a constant velocity (drift velocity)

$$v_d = \frac{q}{m} \cdot E \cdot \tau(E, \omega) \frac{\rho}{\rho_0}$$

Driftbewegung im elektrischen Feld

Two signals because of the
very different mass of the
electrons and ions

Depending on the voltage, secondary
 V_{diff} can get so large that the e^-
can produce another secondary

Driftbewegung im elektrischen Feld

Bei Anlegen eines **äußeres elektrischen Feldes** wird entlang der Feldlinien der Diffusion nun eine **Driftbewegung** überlagert, während die transversale Diffusion unbeeinflusst bleibt. Die Beschleunigung in bzw. gegen Feldrichtung wird durch **Kollisionen mit den Gasmolekülen** unterbrochen, was die maximal erreichbare **Geschwindigkeit limitiert**.

D.h., durch das Wechselspiel von Beschleunigung und Kollisionen stellt sich eine **mittlere Driftgeschwindigkeit v_D** ein:

$$\bar{v}_D = \frac{q}{m} \cdot \tau(\bar{E}, \sigma) \cdot \bar{E} \cdot \frac{p_0}{p} = \mu \cdot \bar{E} \cdot \frac{p_0}{p}$$

q, m ... Ladung bzw. Masse des freien Ladungsträgers

E ... äußeres elektrisches Feld ($E \cdot p/p_0$ wird oft "reduziertes Feld" genannt)

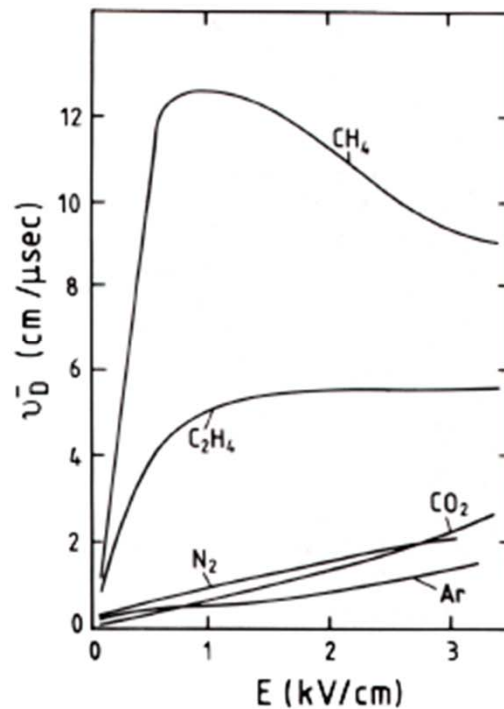
τ ... mittlere Zeit zw. zwei Stößen

p ... Gasdruck, p_0 ... Normaldruck

μ ... **Beweglichkeit (Mobilität) der Ladungsträger, $\mu = \tau \cdot q/m$,**

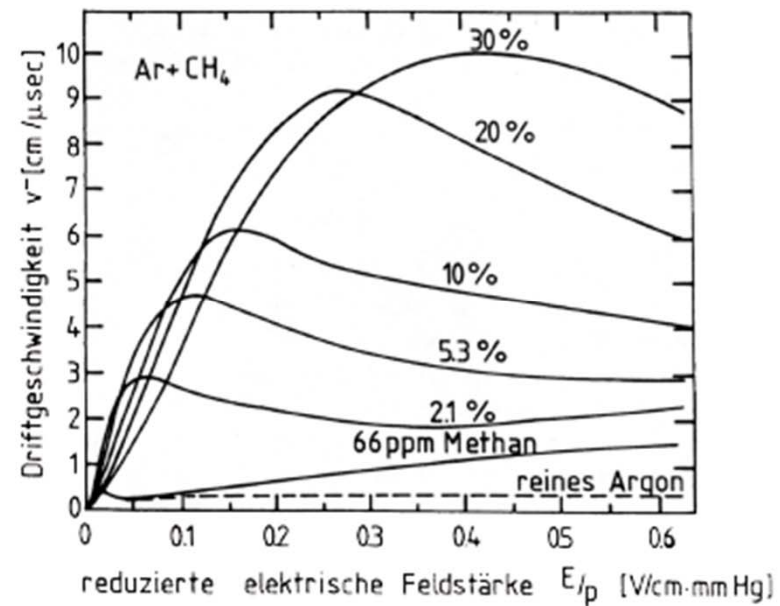
Driftgeschwindigkeiten

Driftgeschwindigkeit von Elektronen
in verschiedenen Gasen bei STP



Quelle: K. Kleinknecht, *Detektoren für Teilchenstrahlung*, B.G. Teubner, 1992

Driftgeschwindigkeit von Elektronen
in Argon-Methan-Gemischen



Quelle: C. Grupen, *Teilchendetektoren*, B.I. Wissenschaftsverlag, 1993

Gasverstärkung

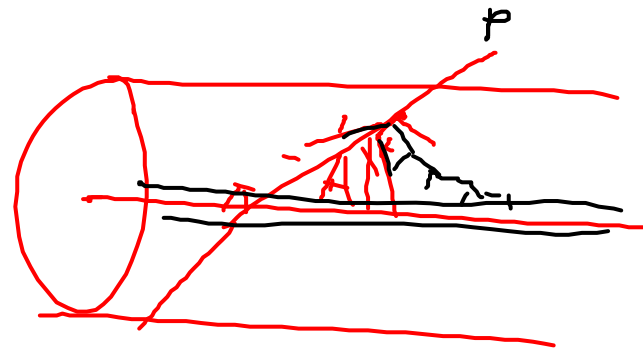
- ★ Durch primäre Ionisation erzeugte Elektronen können durch die Beschleunigung im E-Feld des Detektors ausreichend Energie gewinnen, um ihrerseits Gasatome/-moleküle zu ionisieren und so sekundäre Elektron-Ion-Paare zu erzeugen. Diese können dann ebenfalls zum Detektorsignal beitragen.
- ★ Auch sekundäre Elektronen können bei geeigneten Feldstärken ihrerseits wiederum weitere Elektron-Ion-Paare erzeugen. Durch diesen iterativen Prozeß kann eine regelrechte **Ladungsträgerlawine** ausgelöst werden, was in einigen Gasdetektoren gezielt zur Signalerzeugung genutzt wird.
- ★ Das Ausmaß dieser “Gasverstärkung” hängt ab vom verwendeten Zählgas und den *lokal* vorherrschenden elektrischen Feldstärken.
- ★ Das Verhältnis aus der Anzahl *aller* freien Elektronen (N) zur Zahl der durch primäre Ionisation frei gewordenen Elektronen (N_0) nennt man den **Gasverstärkungsfaktor A : $A = N/N_0$**

Gasverstärkung

Gas amplifikation
...el Feld

From a certain E onwards the electrons
themselves ionize the gas. \Rightarrow amplification
of the detector signal

\Rightarrow Avalanche



\Rightarrow gas Amplification factor

$$A: N/N_0$$

Gasverstärkung

Townsend coefficient

$$N(x) = \underbrace{N_0}_{\text{Primary } e^-} \cdot \underbrace{(A)}_{\text{gas amplification}} = N_0 \cdot e^{\int_0^x \underbrace{\alpha(x')}_{\text{cross section for ionisation by collision}} \cdot \underbrace{dx'}_{\text{density}}$$



cross section
for ionisation
by collision

Gasverstärkung
Townsend Koeffizient α
 γ

$$A_{\gamma} = \frac{A}{1 - \underbrace{\alpha A}} = A(E) = 10^8$$

Gasverstärkung Townsend Koeffizient α

- ★ Die Zahl der Elektron-Ion-Paare, die ein freies Elektron pro zurückgelegter Wegstrecke bildet, wird **erster Townsend-Koeffizient α** genannt.
- ★ α kann berechnet werden aus dem Stoßionisationsquerschnitt σ_i und der Atom-/Moleküldichte des Zählgases:

$$\alpha = \sigma_i \cdot \frac{N_A}{V_{\text{mol}}}$$

N_A ... Avogadrozahl
 V_{mol} ... Molvolumen des Zählgases
(ideales Gas: 22.4 l/mol)

- ★ Da σ_i aber energieabhängig ist, und die kinet. Energie der freien Elektronen unmittelbar mit der Beschleunigung im E-Feld zusammenhängt, ist auch α von der lokalen elektrischen Feldstärke und somit **für die meisten Detektorarten vom Ort x innerhalb des Detektors abhängig: $\alpha = \alpha(x)$**
- ★ Bei N_0 primären Elektronen gilt für die Zahl $N(x)$ der nach einer Driftstrecke x vorhandenen Elektronen:

$$dN(x) = N(x) \alpha(x) dx \quad \text{und damit:}$$

$$N(x) = N_0 \cdot e^{\int \alpha(x) dx} = N_0 \cdot A$$

A ... Gasverstärkungsfaktor

Gasverstärkung, Berücksichtigung von Photonen Townsendkoeffizient γ

- ★ Die Wahrscheinlichkeit, daß ein freies Elektron ein Photoelektron erzeugt wird **zweiter Townsend-Koeffizient γ** genannt.
- ★ Die Gesamtzahl der erzeugten Elektronen in Entfernung x von der Primärionisation ist somit:

$$N(x) = N_0 A_\gamma = N_0 A + N_0 A^2 \gamma + N_0 A^3 \gamma^2 = N_0 A \cdot \sum_{k=0}^{\infty} (A\gamma)^k = \frac{N_0 A}{1 - \gamma A}$$

N ... Gesamtzahl der freien e^- , N_0 ... Zahl der primären e^-
 A_γ ... Gasverstärkungsfaktor unter Einschluß von Photoelektronen
 A ... Gasverstärkungsfaktor ohne Photoeffekt, γ ... 2. Townsend-Koeffizient

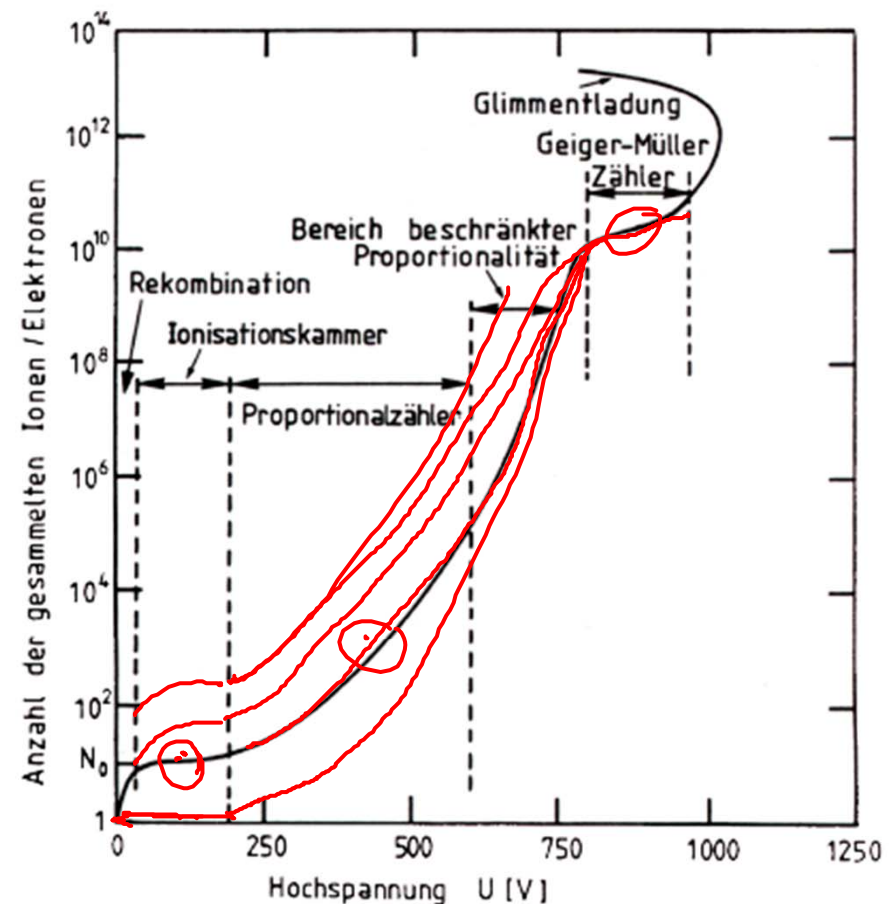
- ★ Für die Berechnung der Gasverstärkung unter Berücksichtigung der Photonen ergibt sich also:

$$A_\gamma = \frac{A}{1 - \gamma A}$$

- ★ Für $\gamma A \rightarrow 1$ wird der im Detektor erzeugte Spannungsimpuls unabhängig von der Primärionisation. Diese Grenze liegt bei $A \approx 10^8$.

Gas-Ionisationszähler

Neben der Detektorgeometrie und der Wahl des Zählgas bestimmt die angelegte Hochspannung wesentlich den Betriebsmodus eines Gasdetektors. Für eine gegebene Geometrie, z.B. ein zylindrisches Design mit zentralem Anodendraht, und ein bestimmtes Zählgas kann man in Abhängigkeit von der externen Hochspannung bestimmte Arbeitsbereiche angeben (siehe Abb. rechts: Zahl der e^- -Ion-Paare für Elektronen als primär ionisierende Teilchen).



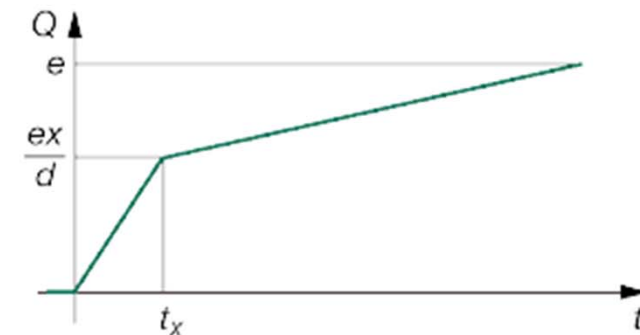
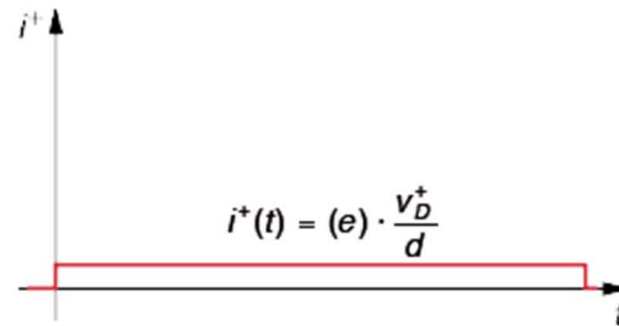
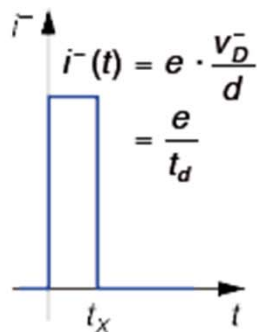
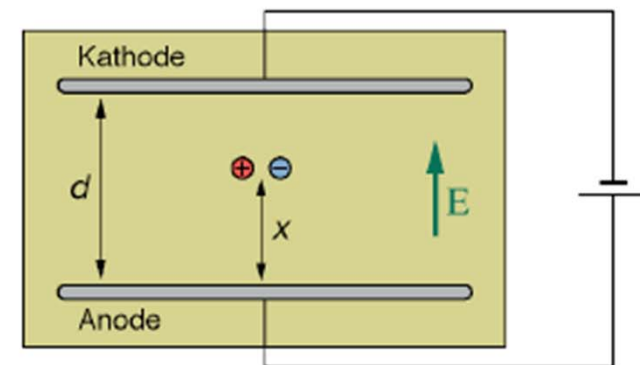
Quelle: C. Grupen, *Teilchendetektoren*, B.I. Wissenschaftsverlag, 1993
(Original: W. Price, *Nuclear Radiation Detection*, McGraw-Hill, 1958)

Funktionsprinzip einer Ionisationskammer

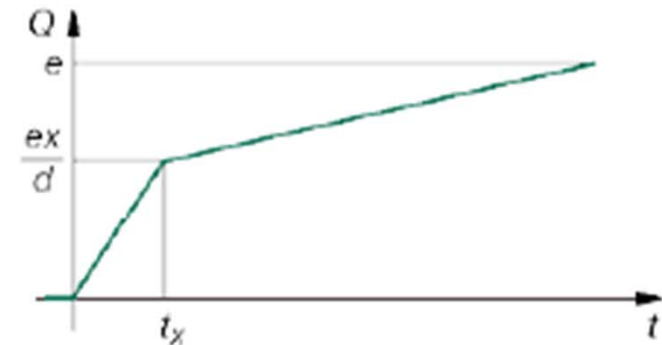
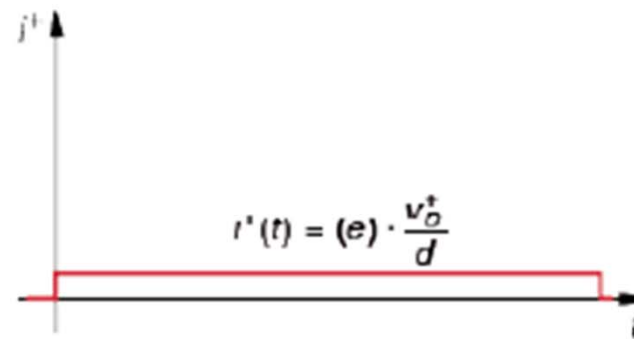
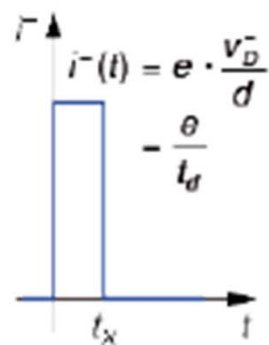
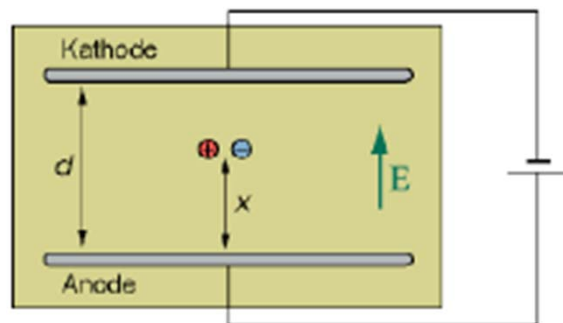
Eine ideale Ionisationskammer wird in dem Spannungsbereich betrieben, in welchem einerseits die erzeugte Ladung vollständig gesammelt wird, andererseits aber noch **keine Sekundärionisation** stattfindet (also **keine Gasverstärkung**).

Für elektr. Feldstärken von 500 V/cm und für typische Driftgeschwindigkeiten erhält man bei 10 cm Driftstrecke Sammelzeiten für e^- von 2 μ s und für Ionen von etwa 2 ms.

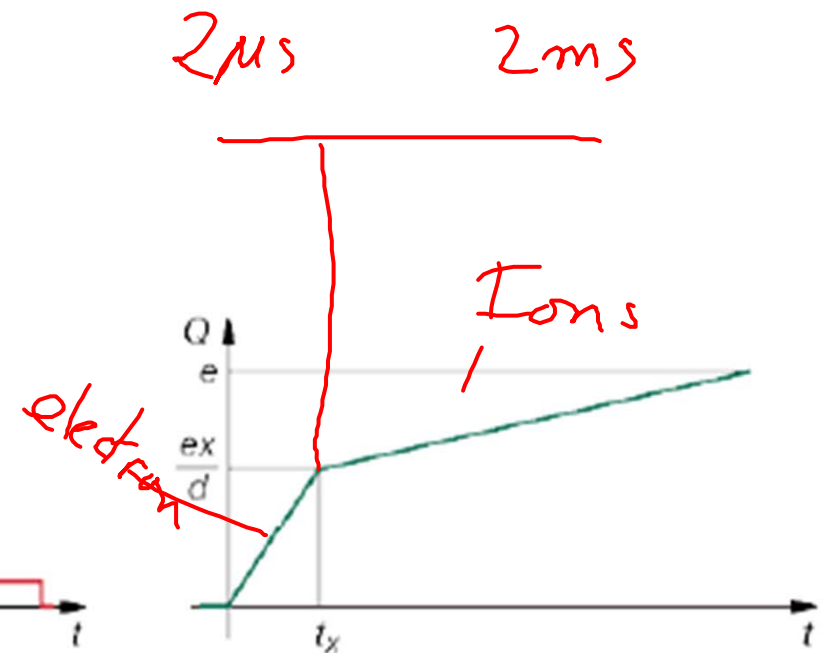
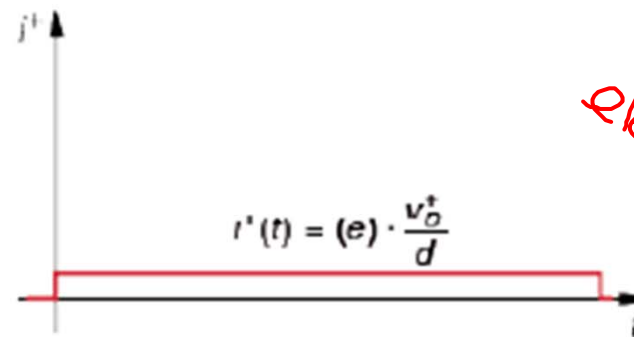
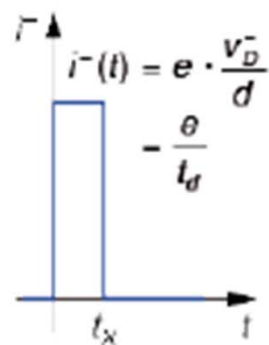
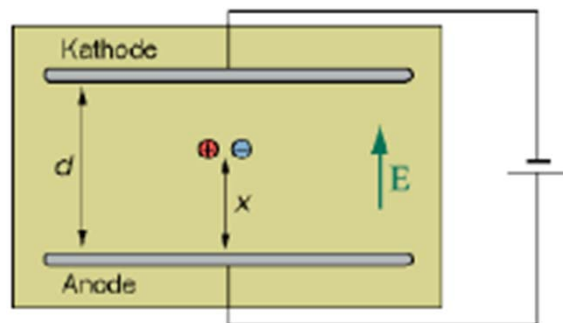
Bilderfolge:
Signal für ein e^- -Ion-Paar in einer planaren Ionisationskammer



Funktionsprinzip einer Ionisationskammer



Funktionsprinzip einer Ionisationskammer



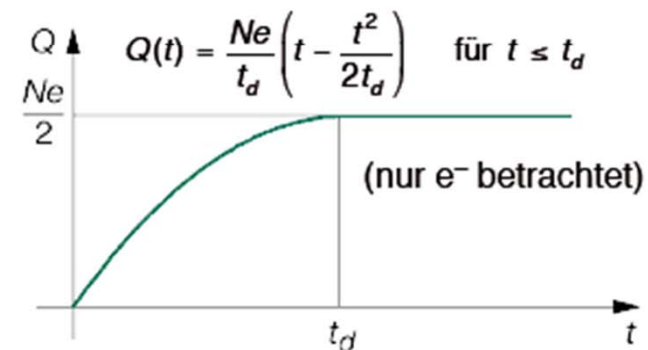
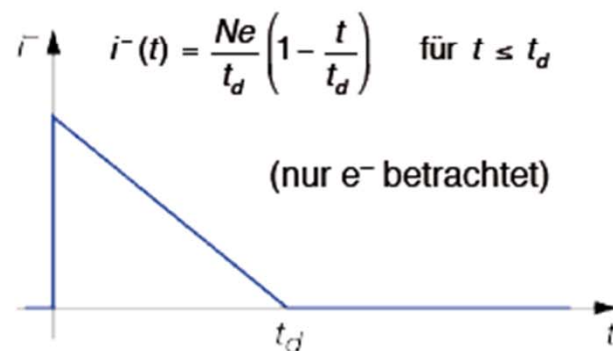
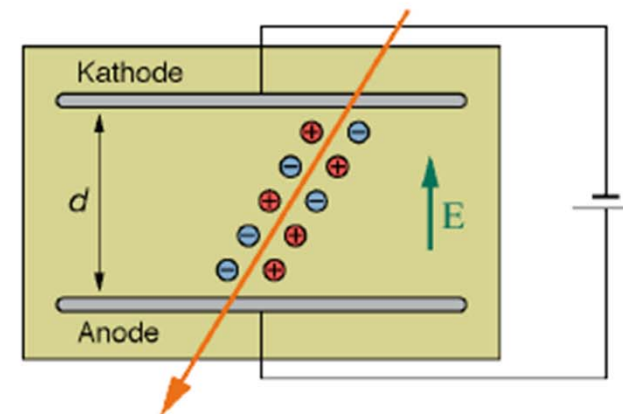
Signale einer Ionisationskammer

Zur Erinnerung:

Das Signal wird durch die Bewegung der Elektronen und Ionen im elektrischen Feld *induziert*.

Die schnell driftenden Elektronen verursachen einen kurzen Strompuls, die viel langsameren Ionen erzeugen ein länger anhaltendes Signal.

Bilderfolge: Signal für eine kontin. Ladungsverteilung in einer planaren Ionisationskammer



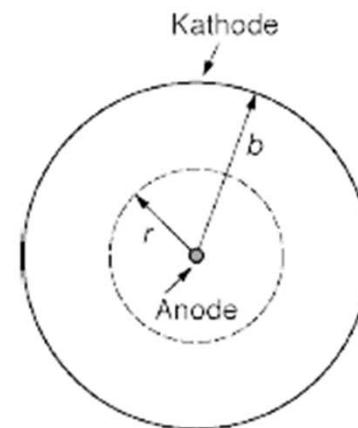
Proportionalitätszähler (Gasverstärkung)

Proportionalzähler nutzen Gasverstärkung durch Sekundärionisation für die Signalerzeugung.

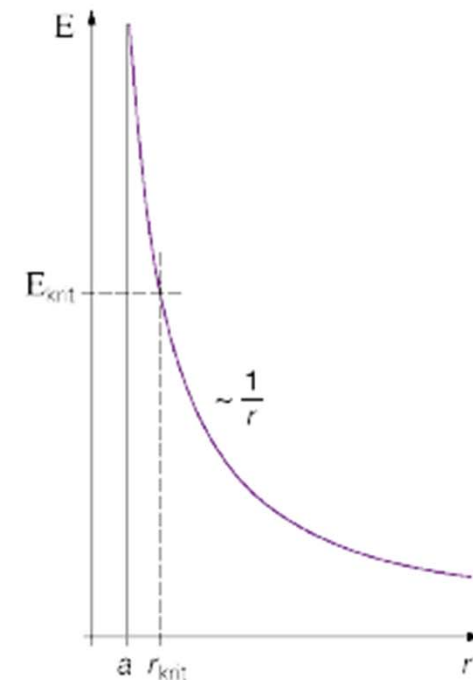
Die dafür übliche Geometrie ist eine zylindrische Kathode mit zentralem Anodendraht. Das dabei entstehende E-Feld ist $\sim 1/r$, d.h. in nächster Umgebung vom Anodendraht treten lokal sehr hohe Feldstärken auf.

Ist der Anodendraht dünn genug, so übersteigt die elektr. Feldstärke für Abstände von $r \leq r_{\text{krit}}$ die kritische Feldstärke für welche Sekundärionisation möglich ist.

Übliche Anodendrahtdurchmesser liegen bei 20–100 μm .



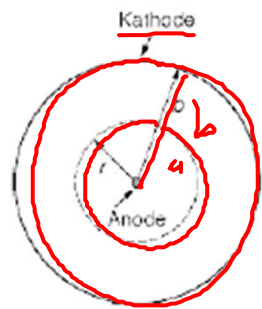
a ... Radius Anodendraht
b ... Radius Kathode



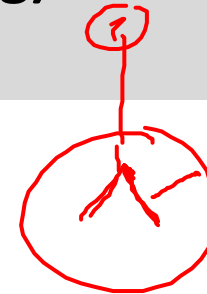
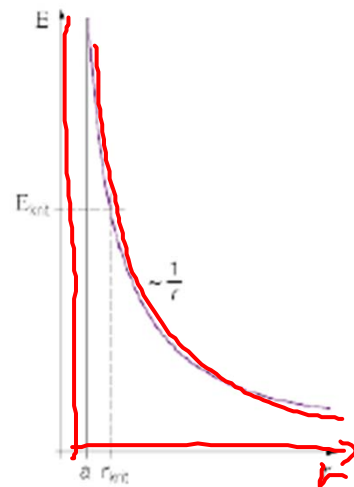
Querschnitt durch ein Proportionalzählrohr und elektrische Feldstärke E in Abhängigkeit vom Abstand zum Anodendraht

Proportionalitätszähler (Gasverstärkung)

Proportional counter

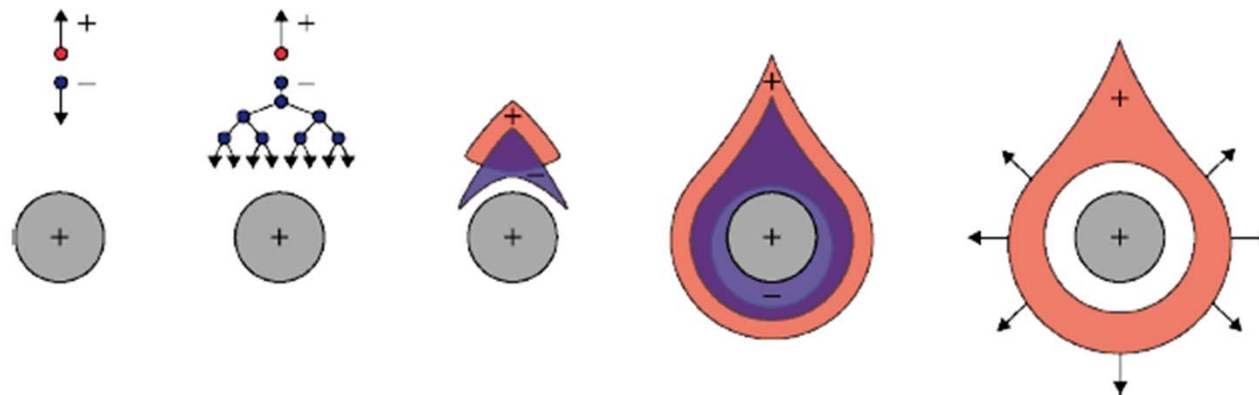


a ... Radius Anodendraht
b ... Radius Kathode



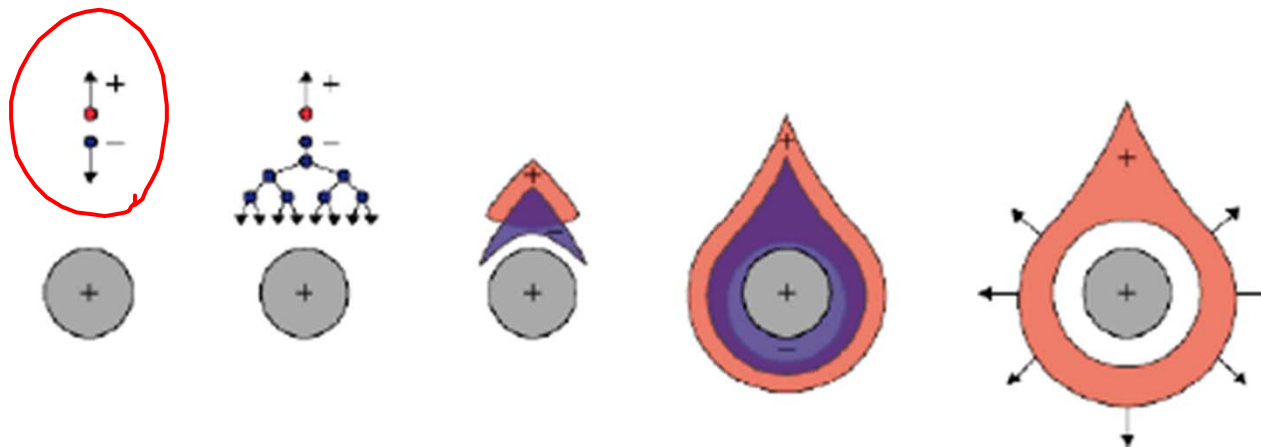
Gasverstärkung

- ★ Durch Primärionisation erzeugte Elektronen driften auf den Anodendraht zu und gelangen so in Bereiche hoher lokaler Feldstärke.
- ★ Sobald die elektr. Feldstärke E_{krit} übersteigt, kommt es zur Sekundärionisation. Infolgedessen bildet sich in der Nähe des Anodendrahtes eine Ladungsträgerlawine aus (siehe Kapitel Gasverstärkung).
- ★ Die dabei erzeugten Elektronen driften schnell auf den Anodendraht zu und werden dort abgeleitet, während die Ionen sich langsam vom Anodendraht entfernen und zur Kathode wandern.

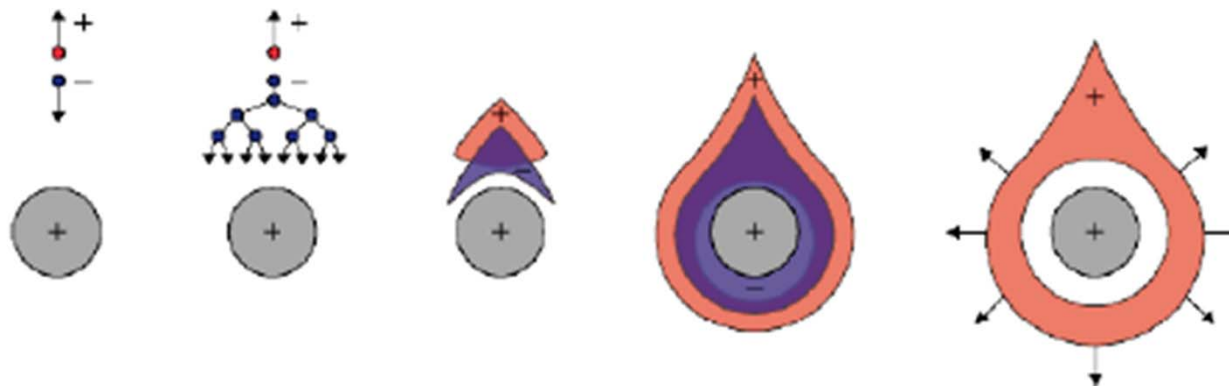


Gasverstärkung

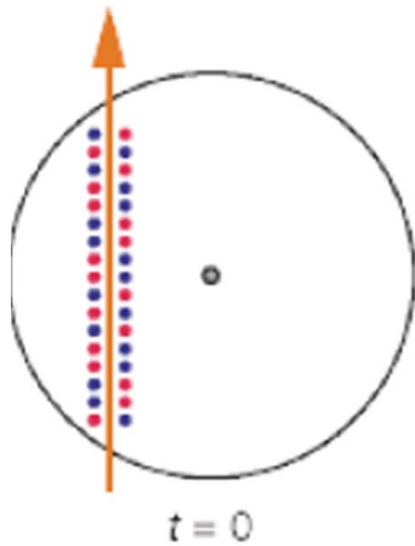
Primary ionization



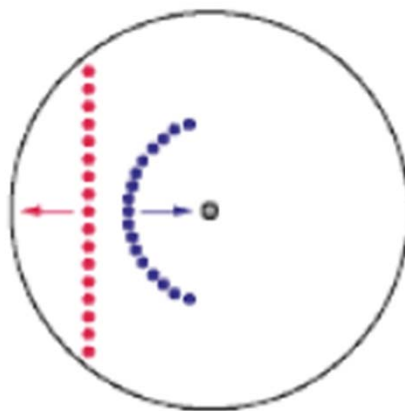
Gasverstärkung



Proportionalitätszähler (Ablauf)



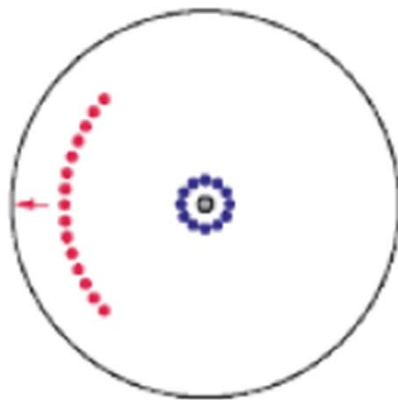
Proportionalitätszähler (Ablauf)



$t = 50 \text{ ns}$

Achtung: Hauptbeitrag von Ionen

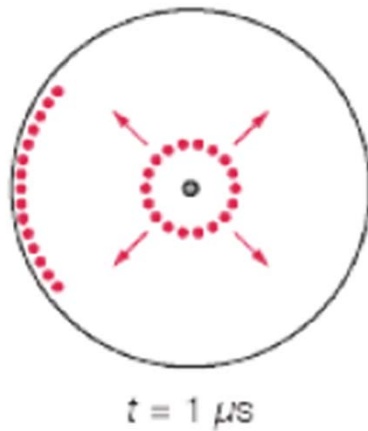
Proportionalitätszähler (Ablauf)



$t = 100 \text{ ns}$

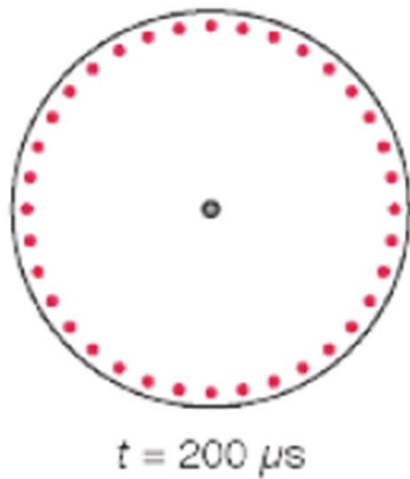
Achtung: Hauptbeitrag von Ionen

Proportionalitätszähler (Ablauf)



Achtung: Hauptbeitrag von Ionen

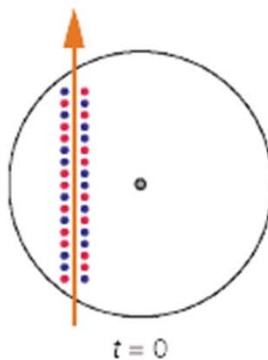
Proportionalitätszähler (Ablauf)



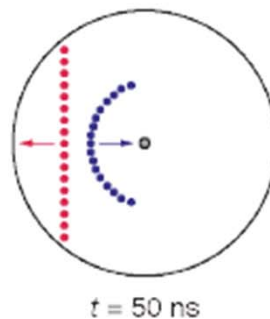
Achtung: Hauptbeitrag von Ionen

Proportionalitätszähler (Ablauf)

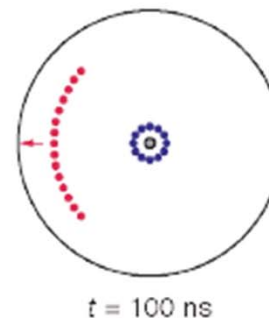
Durchgang eines ionisierenden Teilchens, Primärionisation entlang der Teilchenspur.



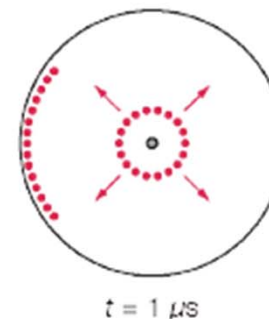
Die primären Ionen driften langsam zum Kathodenzylinder, die primären e^- driften schnell zum Anodendraht.



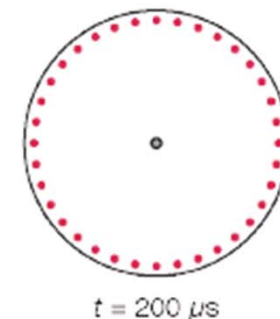
Primäre e^- geraten in den Bereich wo Sekundärionisation eintritt. \rightarrow Ladungsträgerlawine um den Anodendraht. Die primären Ionen driften weiter zur Kathode.



Die durch Sekundärionisation entstandenen Ionen driften zur Kathode. (Die Sekundärelektronen aus der Lawine sind bereits an der Anode angekommen.)



Zuletzt erreichen auch die sekundären Ionen die Kathode.



• ... pos. Ion • ... Elektron

Achtung: Hauptbeitrag von Ionen

Geiger-Müller-Bereich

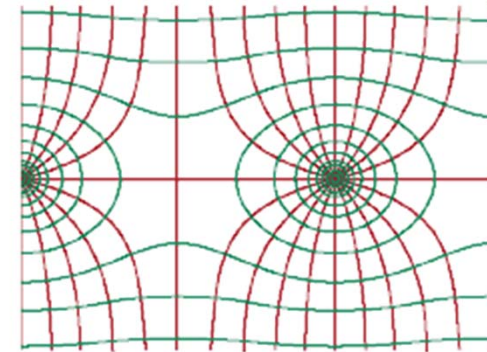
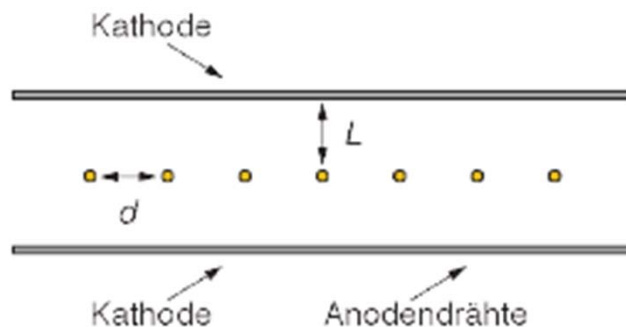
$$\gamma \cdot A = 1 \Rightarrow A_\gamma = \infty$$

In case of an high amplification can not be stopped because photons generated by the interacted Ions with the wall.

Geiger-Müller-Bereich

- ★ Ist die elektrische Feldstärke in einem Zählrohr so groß, daß das Produkt aus Gasverstärkung und 2. Townsend-Koeffizient $\gamma A \approx 1$ wird, so ist das Ende des Proportionalbereiches erreicht. Der nun anschließende Bereich heißt **Auslösebereich oder auch Geiger-Müller-Bereich**.
- ★ Die nun nicht mehr vernachlässigbaren UV-Quanten breiten sich auch *transversal* zum Feld aus und erzeugen Photoelektronen im gesamten Gasvolumen sowie an den Wänden des Zählers. **Die Entladung ist daher nicht länger lokalisiert** sondern breitet sich über den ganzen Zähler aus.
- ★ Die freigesetzte Ladungsmenge ist **unabhängig von der Primärionisation**. Sie hängt nur von der Kapazität des Zählers und der angelegten Spannung ab.
- ★ Die **Gasverstärkung im Auslösebereich beträgt zw. 10^8 und 10^{10}** .
- ★ Das Einsetzen des Auslösebereiches kann zum Beispiel daran erkannt werden, daß die Signale für verschieden stark ionisierende Teilchen (z.B. α - und β -Strahlung) gleich groß werden.

Ortsbestimmung: Multi Wire Proportional Chamber



- ★ 1992 erhielt Georges Charpak den Nobelpreis für Physik für “die Erfindung und Entwicklung von Teilchendetektoren, insbesondere der Vieldraht-Proportionalkammer”.

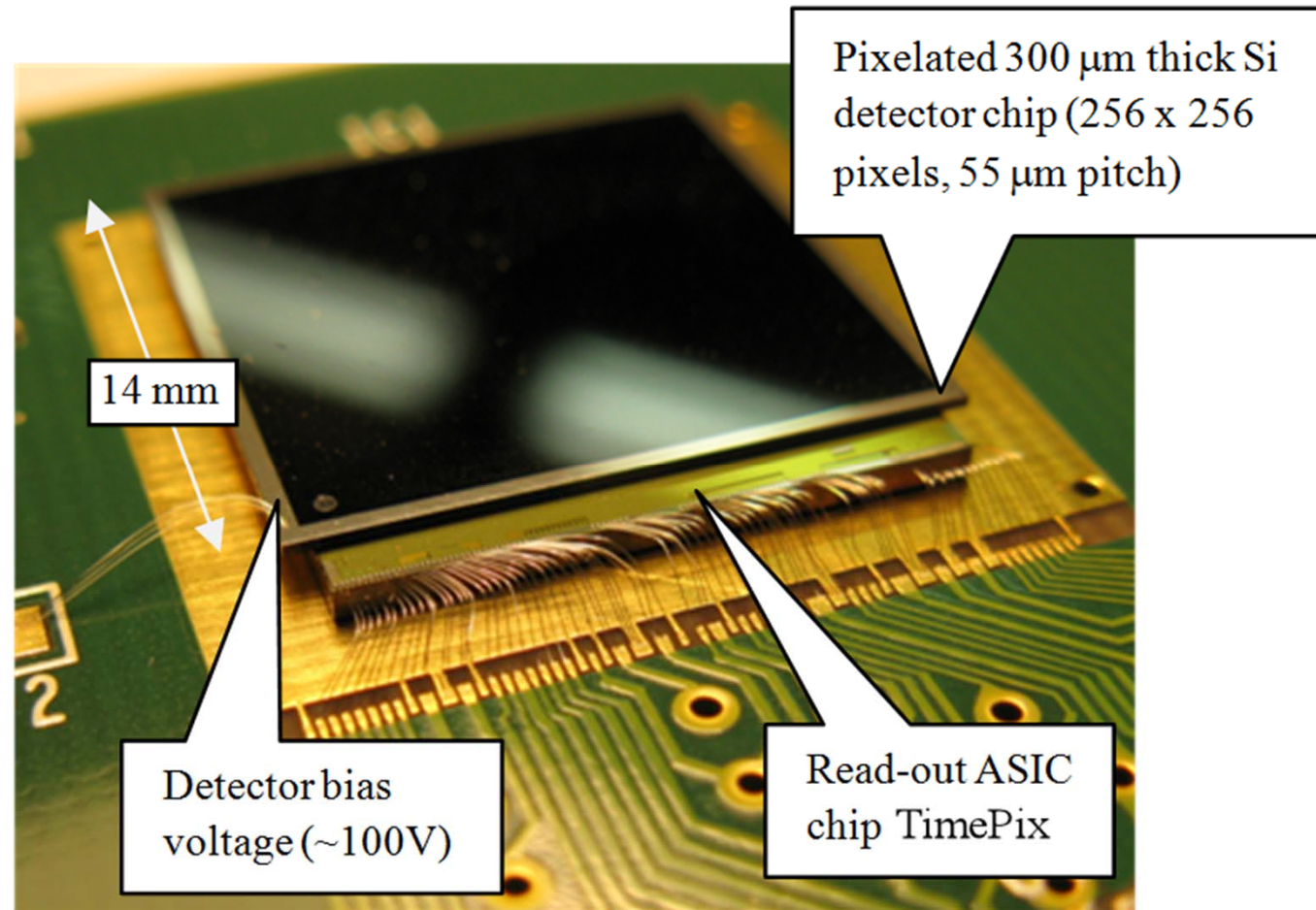
Georges Charpak

Quelle: Nobelprize.org

<http://nobelprize.org/physics/laureates/1992/>



Halbleiterdetektoren



Halbleiterdetektoren

- ★ Halbleiterdetektoren (“**semiconductor detectors, solid state detectors**”) kommen sowohl in der Hochenergie- als auch in der Kernphysik zum Einsatz.
- ★ Hauptanwendungsgebiete:
 1. **Energiemessung**: insbesondere für geladene Teilchen mit Energien von bis zu einigen MeV
 2. **Gammaspektroskopie**: hochpräzise Messung der Energie von Photonen
 3. **Spur- und Vertexdetektoren**: hochpräzise Vermessung von Teilchenspuren
- ★ Gegenüber Gasdetektoren haben alle Festkörperdetektoren eine **hohe Dichte**.
→ Hoher Energieverlust auf relativ kurzer Strecke. Gasdetektoren haben aufgrund der Diffusion der erzeugten e^- bestenfalls Ortsauflösungen von einigen -zig μm , wohingegen mit Festkörperdetektoren **Ortsauflösungen von unter 10 μm** erreicht werden können.
- ★ **Geringe Ionisationsenergie (einige eV pro e^- -Loch-Paar)** verglichen mit Gasdetektoren (20–40 eV pro e^- -Ion-Paar) oder gar mit der in Szintillatoren nötigen Energie zur Erzeugung eines Szintillationsquantums (400–1000 eV).

Halbleiterdetektoren

using a multistrip detector \Rightarrow spatial resolution $< 10 \mu\text{m}$

- gamma spectroscopie because of high z material.

Halbleiterdetektoren

Semiconductor detector.

Advantage. band gap much smaller
than ionization potential

thus you are producing electron-hole pairs

energy resolution depends on the number

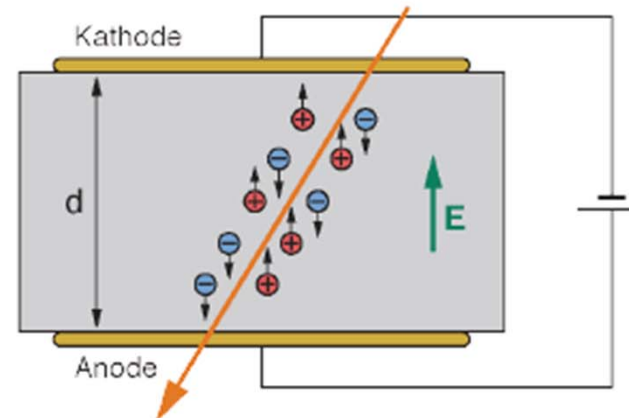
of ion-hole $\frac{\Delta E}{E} \sim \frac{1}{\sqrt{n}}$

Halbleiterdetektoren (Detektionsprinzip)

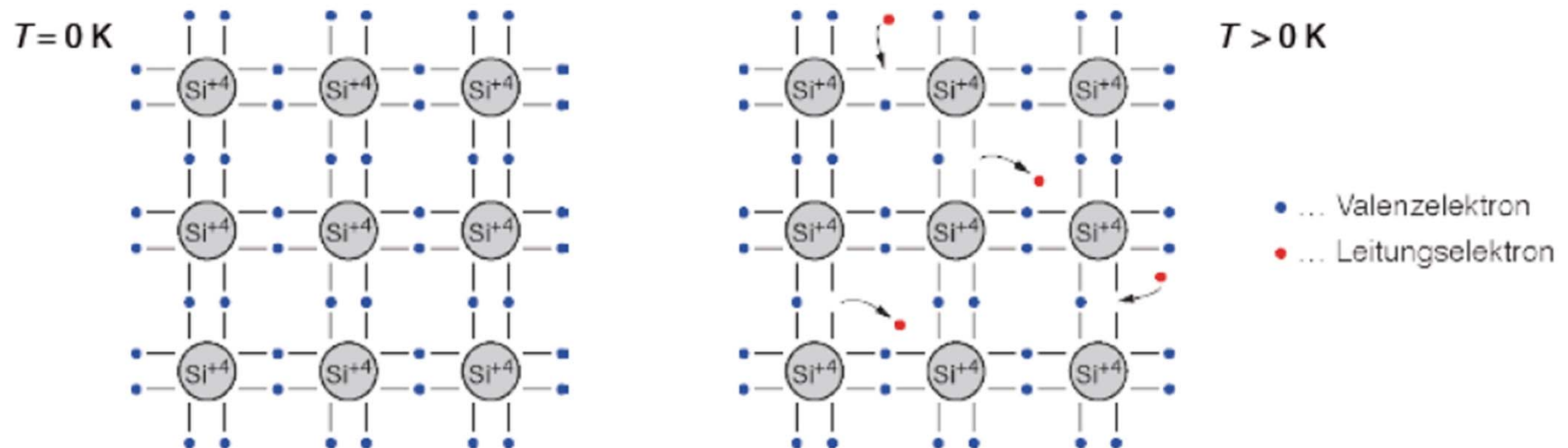
Das Detektionsprinzip eines Halbleiterdetektors ist ganz analog zu jenem einer Gas-Ionisationskammer, nur daß statt Elektron-Ion-Paaren nun Elektron-Loch-Paare (e^- - h^+ -Paare) zur Signalerzeugung genutzt werden.

1. An einem Halbleiter wird eine äußere Spannung angelegt.
2. Ein ionisierendes Teilchen regt beim Durchgang e^- aus dem Valenzband ins Leitungsband an und erzeugt so e^- - h^+ -Paare.
3. Diese e^- - h^+ -Paare driften aufgrund des elektrischen Feldes zu den Elektroden und induzieren so ein elektrisches Signal.

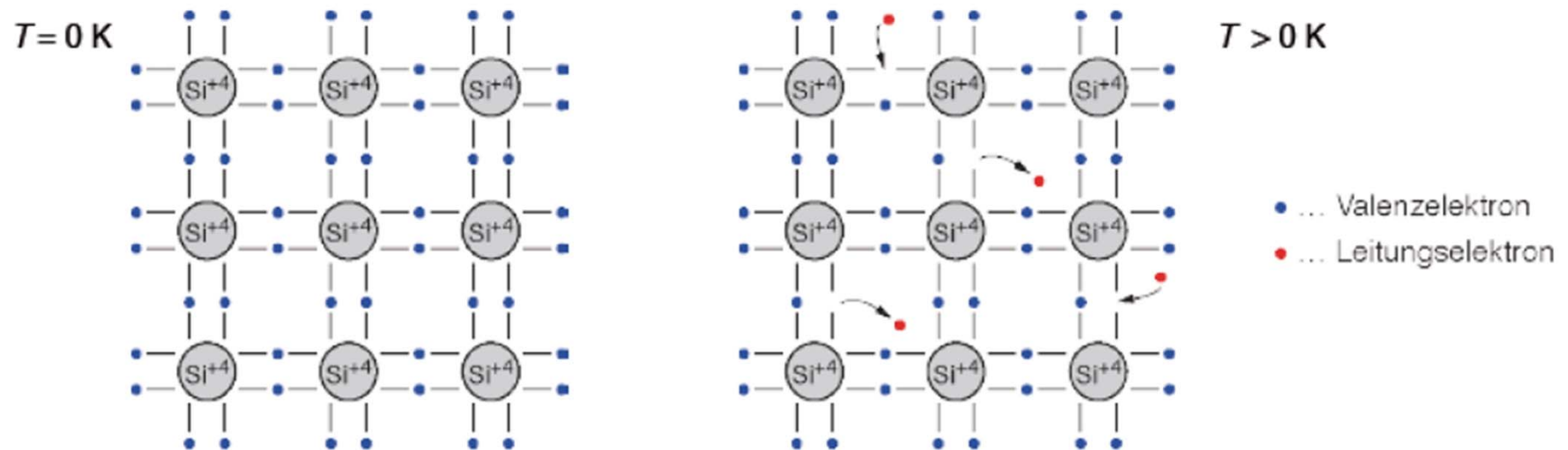
Schema eines einfachen Halbleiterdetektors



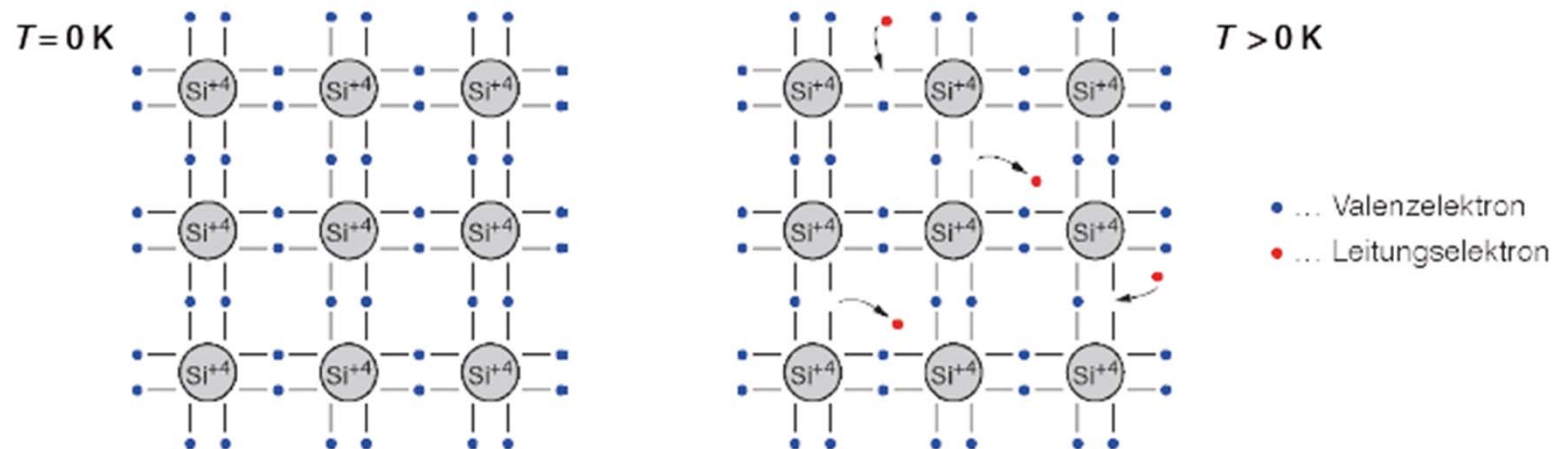
Bindungsmodell eines Halbleiters



Bindungsmodell eines Halbleiters

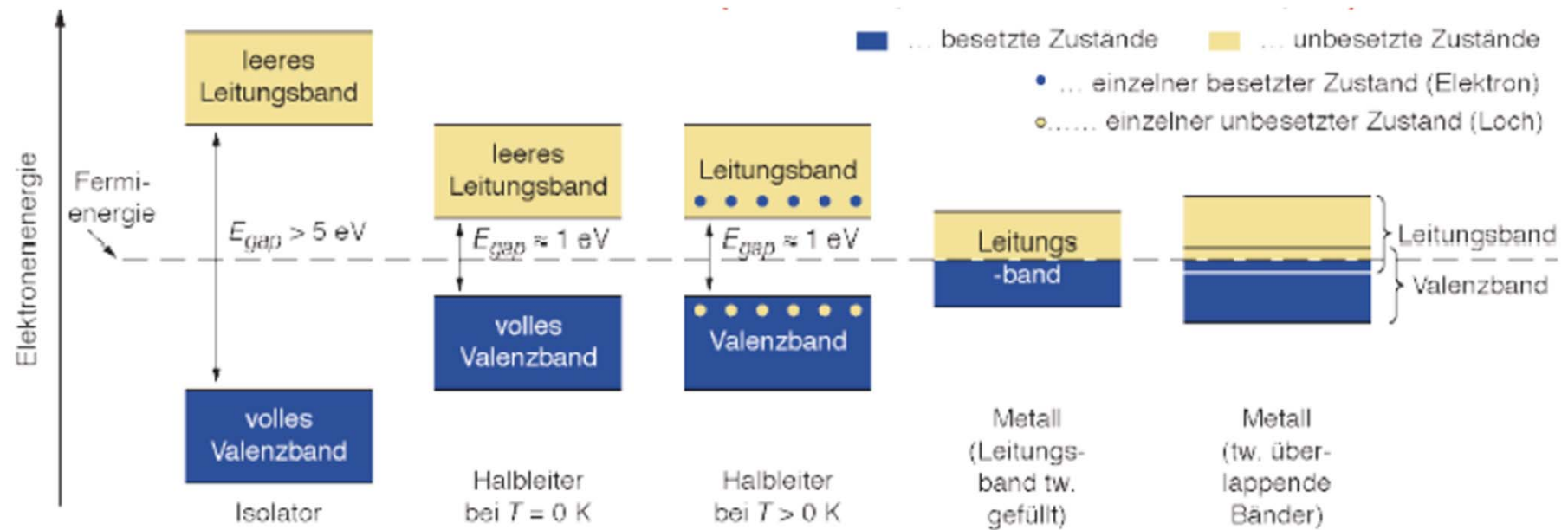


Bindungsmodell eines Halbleiters



- ★ Jedes Atom hat 4 nächste Nachbarn, die 4 Valenzelektronen formen kovalente Bindungen.
- ★ Bei niedrigen Temperaturen sind alle Elektronen gebunden.
- ★ Bei höheren Temperaturen brechen thermische Vibrationen einige Bindungen auf. → Die freien e^- führen zu elektrischer Leitfähigkeit (**Elektronenleitung**).
- ★ Die zurückbleibenden offenen Bindungen können durch andere Elektronen aufgefüllt werden. → "Löcher" wandern (**Löcherleitung**)

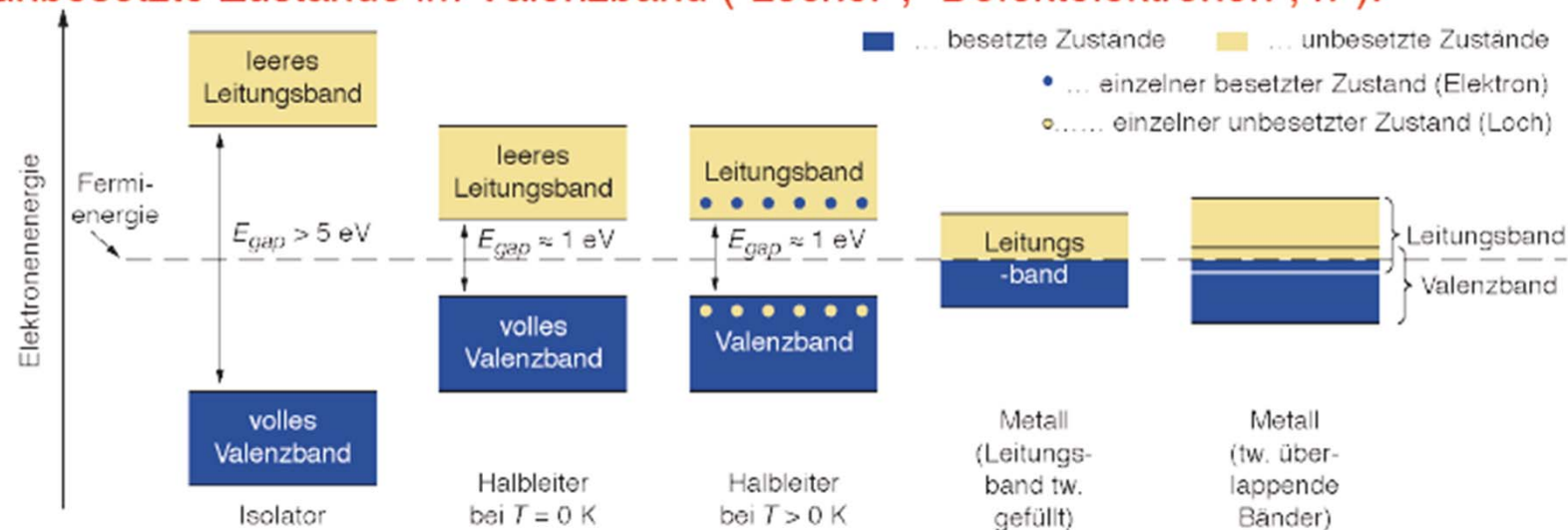
Bändermodell



Bändermodell

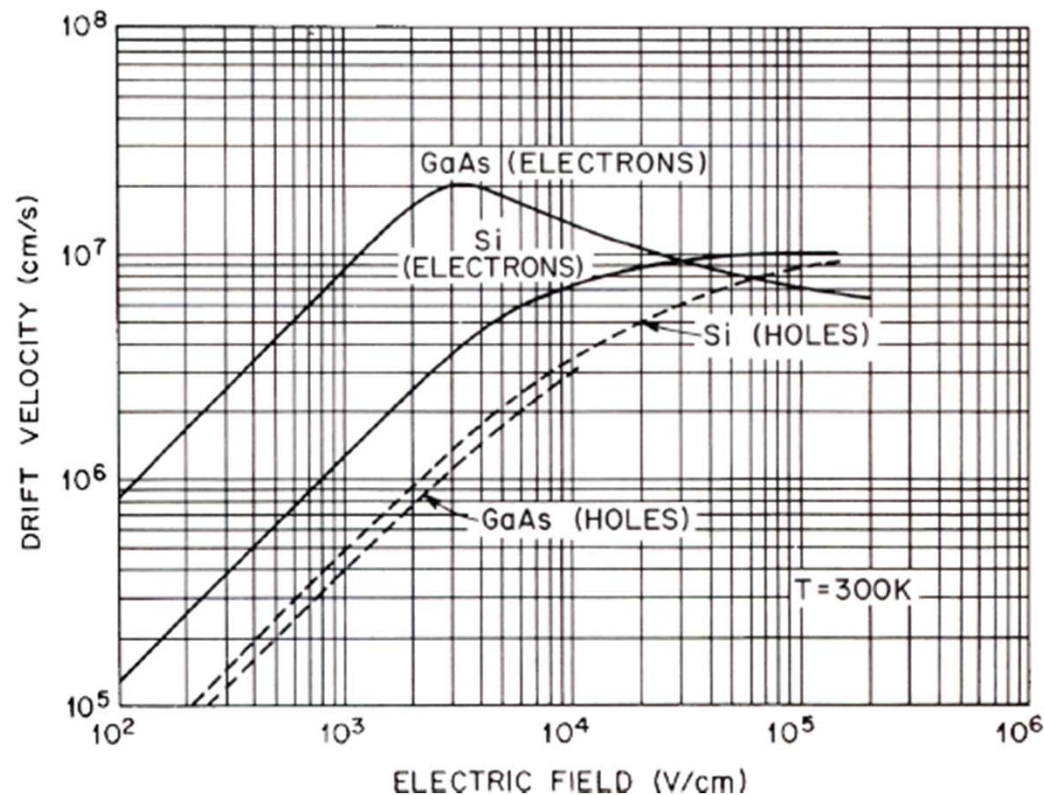
In Festkörpern verschmelzen die diskreten Energieniveaus der Atome zu **Energiebändern**. In Metallen können **Leitungs- und Valenzband** überlappen, in Isolatoren und Halbleitern sind sie durch eine **Bandlücke** ("band gap") getrennt. Der Übergang zw. Isolator und Halbleiter ist fließend, zu den Metallen besteht hingegen eine klare Abgrenzung.

Bei $T = 0\text{ K}$ sind im Leitungsband eines Halbleiters keine e^- . Bei $T > 0\text{ K}$ werden einzelne e^- aus dem Valenzband in das Leitungsband angeregt, zurück bleiben unbesetzte Zustände im Valenzband ("Löcher", "Defektelektronen", h^+).



Driftgeschwindigkeiten in Halbleitern

Driftgeschwindigkeiten für Elektronen und Löcher in Silizium und GaAs bei Raumtemperatur. Man beachte den Bereich negativer differentieller Mobilität bei GaAs.



Quelle: S.M. Sze, *Semiconductor Devices*, J. Wiley & Sons, 1985

Materialeigenschaften einiger Halbleiter

Material	Si	Ge	GaAs	GaP	CdTe	Diamant [*]
Ordnungszahl Z	14	32	31+33	31+15	48+52	6
Atomgewicht A (amu)	28.086	72.61	69.72+74.92	69.72+30.97	112.4+127.6	12.011
Gitterkonstante a (Å)	5.431	5.646	5.653	5.451	6.482	3.567
ρ (g/cm ³)	2.328	5.326	5.32	4.13	5.86	3.52
E_g (eV) bei 300 K	1.11	0.66	1.42	2.26	1.44	5.47–5.6
E_g (eV) bei 0 K	1.17	0.74	1.52	2.34	1.56	≈ 6
rel. Dielektrizität $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$	11.9	16.0	12.8	11.1	10.9	5.7
Schmelzpunkt (°C)	1415	938	1237	1477	1040	3527
eff. e ⁻ -Masse (m_n/m_e)	0.98, 0.19 ⁺⁺	1.64, 0.08 ⁺⁺	0.067	0.82	0.11	0.2
eff. Loch-Masse ⁺ (m_h/m_e)	0.16	0.044	0.082	0.14	0.35	0.25

++ "leichte" Löcher
Oberflächen gleicher Energie sind Ellipsoide

^{*} zählt eigentlich als Isolator

Quellen, u.a.: <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/>; S.M.Sze, *Physics of Semicon. Devices*, J. Wiley & Sons, 1981,
J. Singh, *Electronic & Optoelectronic Properties of Semiconductor Structures*, Cambridge University Press, 2003

Optimales Material

- large signal
- no noise

$E_g \approx 6 \text{ eV} \Rightarrow \text{best signal to noise ratio!!}$

for E_g thermal excitation

Optimales Material

Vom Standpunkt der Signalverarbeitung aus, sollte ein idealer Teilchendetektor ein möglichst **großes Signal-Rausch-Verhältnis** (“signal to noise ratio”, **SNR**) aufweisen. Dies führt zu zwei entgegengesetzten Anforderungen:

- ✗ **großes Signal**

 - niedrige Ionisationsenergie → kleine Bandlücke

- ✗ **geringes Rauschen**

 - wenig freie Ladungsträger → große Bandlücke

Optimal wäre ein Material mit einer Bandlücke von $E_g \approx 6 \text{ eV}$.

In diesem Fall ist das Leitungsband auch bei Raumtemperatur praktisch leer, andererseits ist der Bandabstand nicht zu groß für die zahlreiche Erzeugung von e^-h^+ -Paaren durch ionisierende Teilchen.

Ein solches Material gibt es im Prinzip, nämlich **Diamant**. Leider ist dieser für den Bau größerer Detektoren nach wie vor zu **teuer**.