

Vertiefung in die Extraterrestrische Physik

Detektoren

Bernd Heber

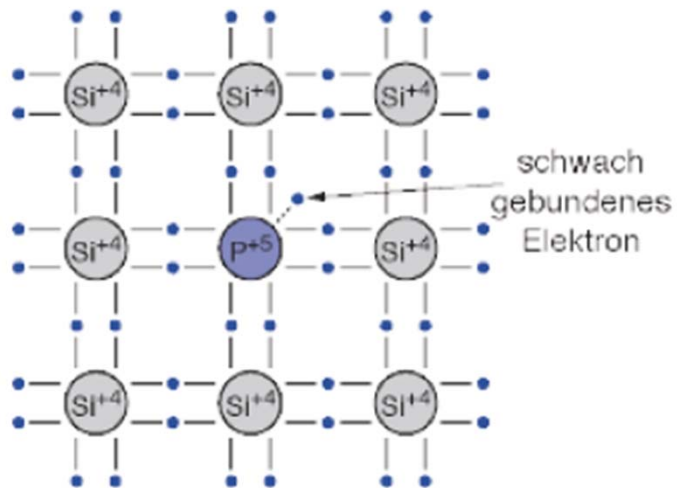
19 January, 2011



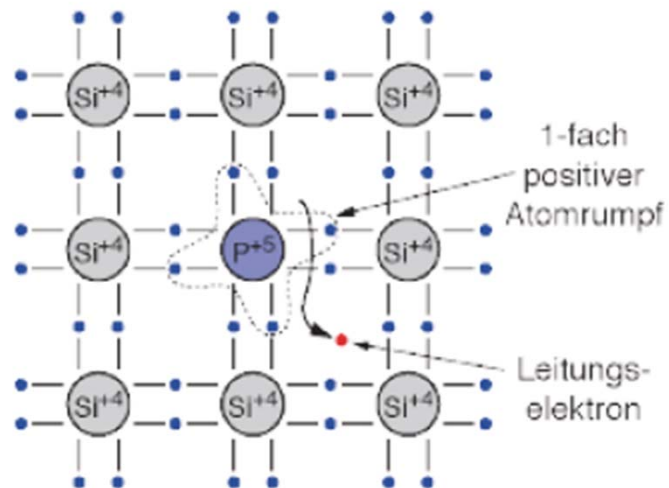
Thermische Anregung

Thermische Anregung

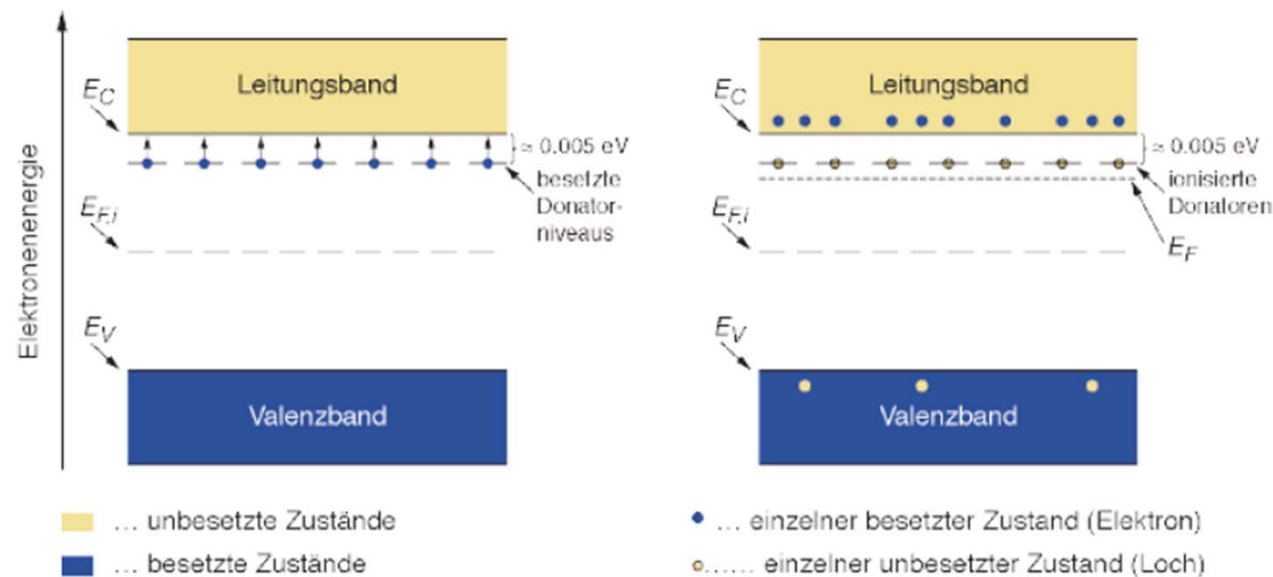
Abhilfe: Dotierung eines Halbleiters



Abhilfe: Dotierung eines Halbleiters

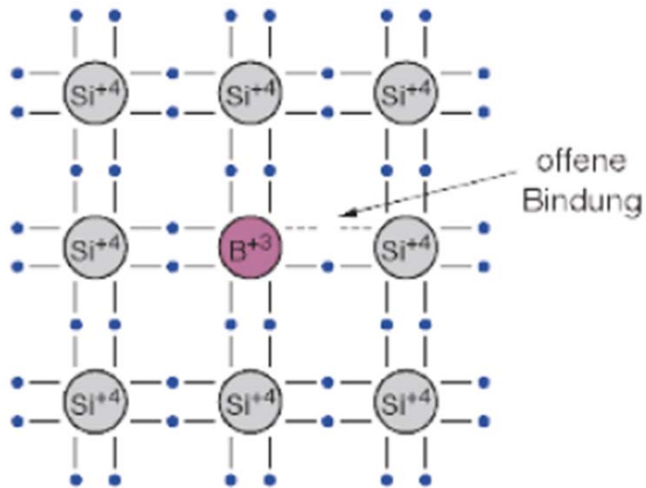


N-Dotierung eines Halbleiters

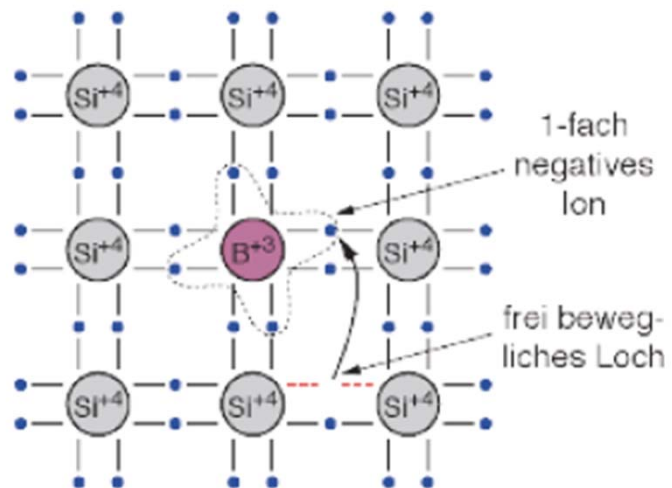


(Energieabstände nicht maßstabgetreu)

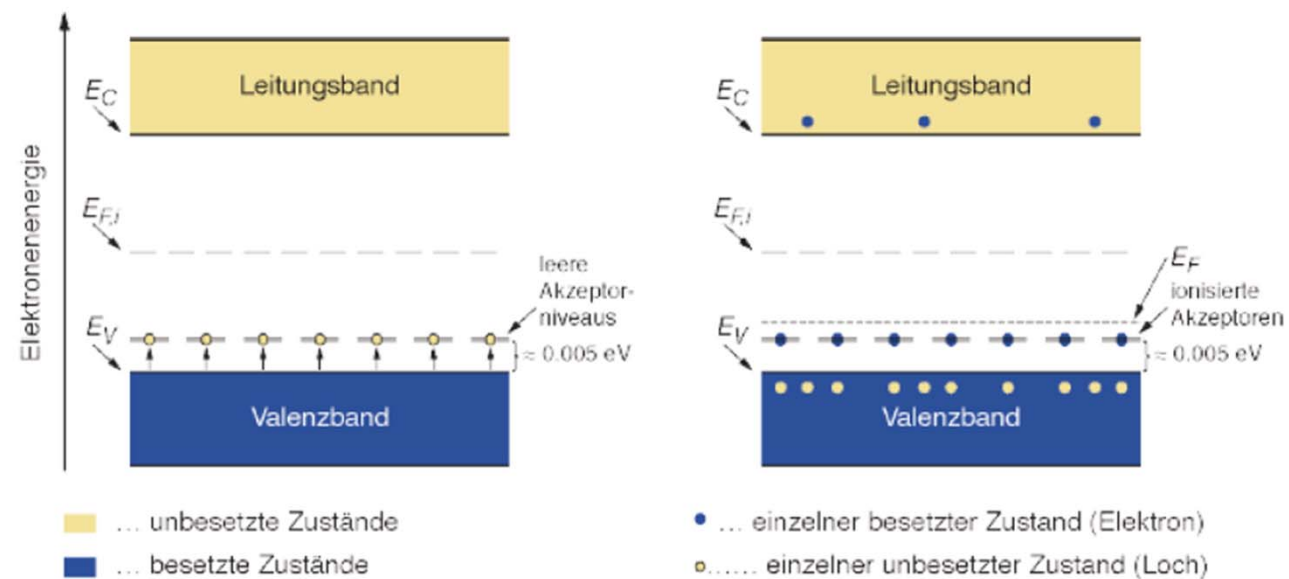
P-Dotierung



P-Dotierung

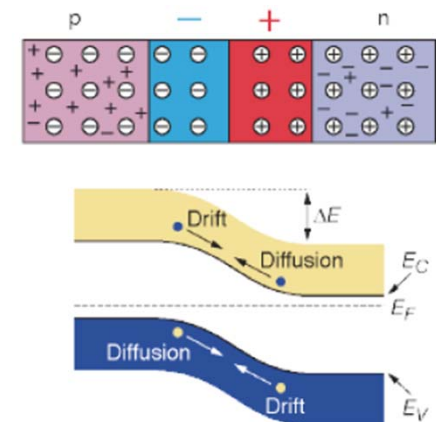
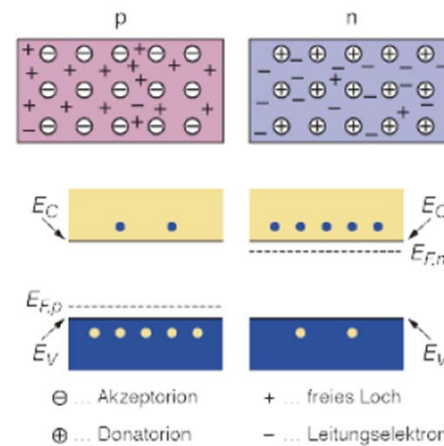


P-Dotierung



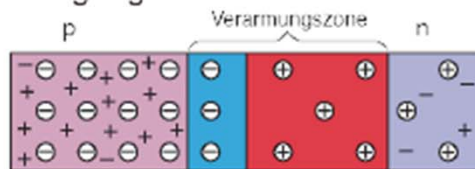
(Energieabstände nicht maßstabgetreu)

P-N-Übergänge



Elektrische Eigenschaften eines P-N-Übergang

pn-Übergang Schema



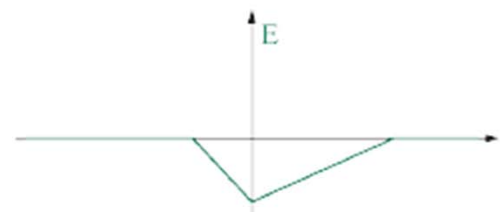
Konzentration der freien Ladungsträger



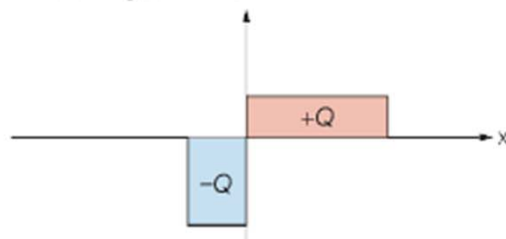
Akzeptor- und Donatorkonzentration



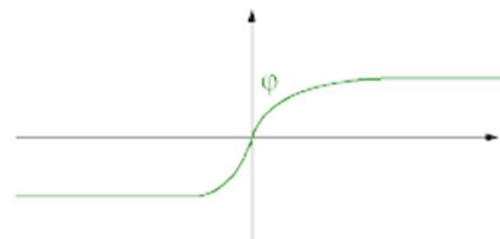
elektrisches Feld



Raumladungsdichte



elektrisches Potential



⊖ ... Akzeptorion

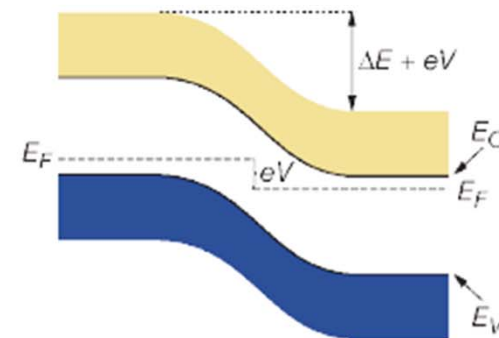
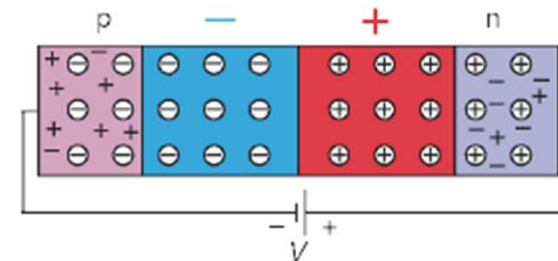
⊕ ... Donatorion

+ ... freies Loch

- ... Leitungselektron

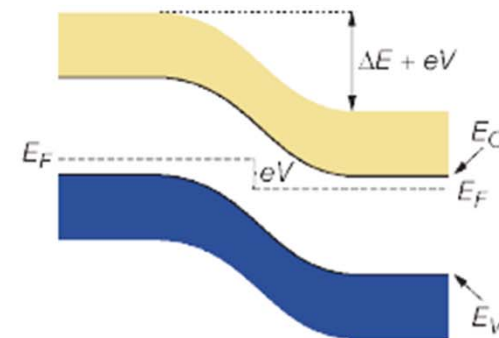
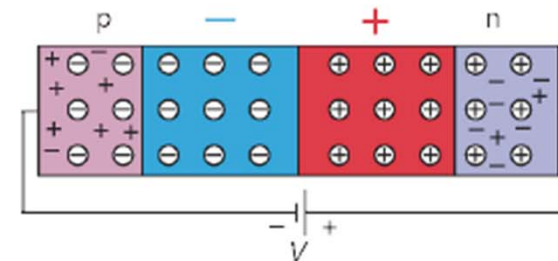
Verhalten in Sperrrichtung

pn-Übergang in Sperrrichtung



Verhalten in Sperrrichtung

pn-Übergang in Sperrrichtung

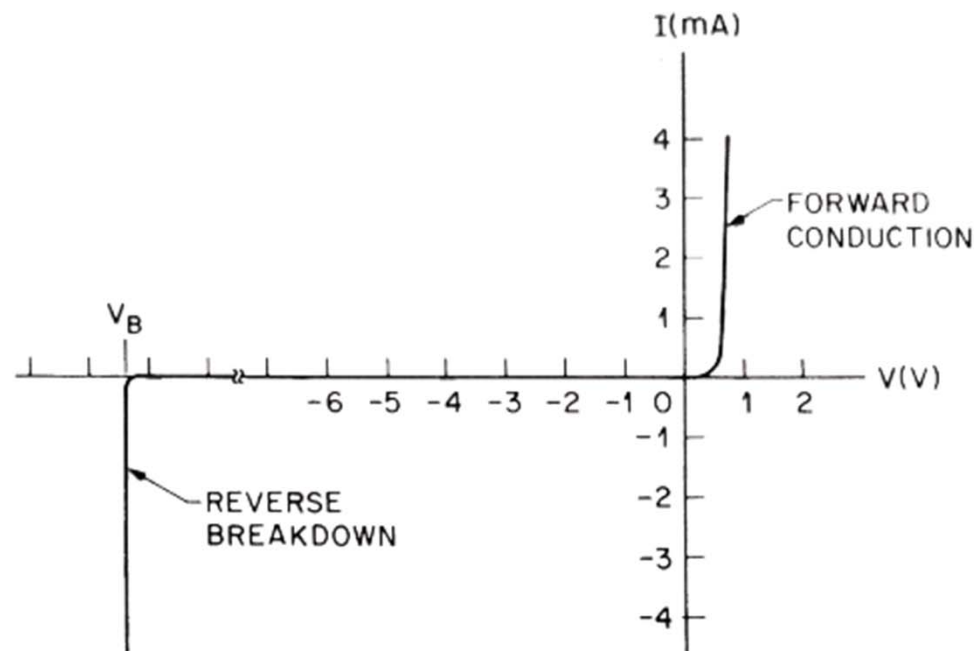


Shockley-Gleichung

Der Strom durch einen pn-Übergang in Abhängigkeit von einer externen Spannung V kann durch die **Shockley-Gleichung** beschrieben werden:

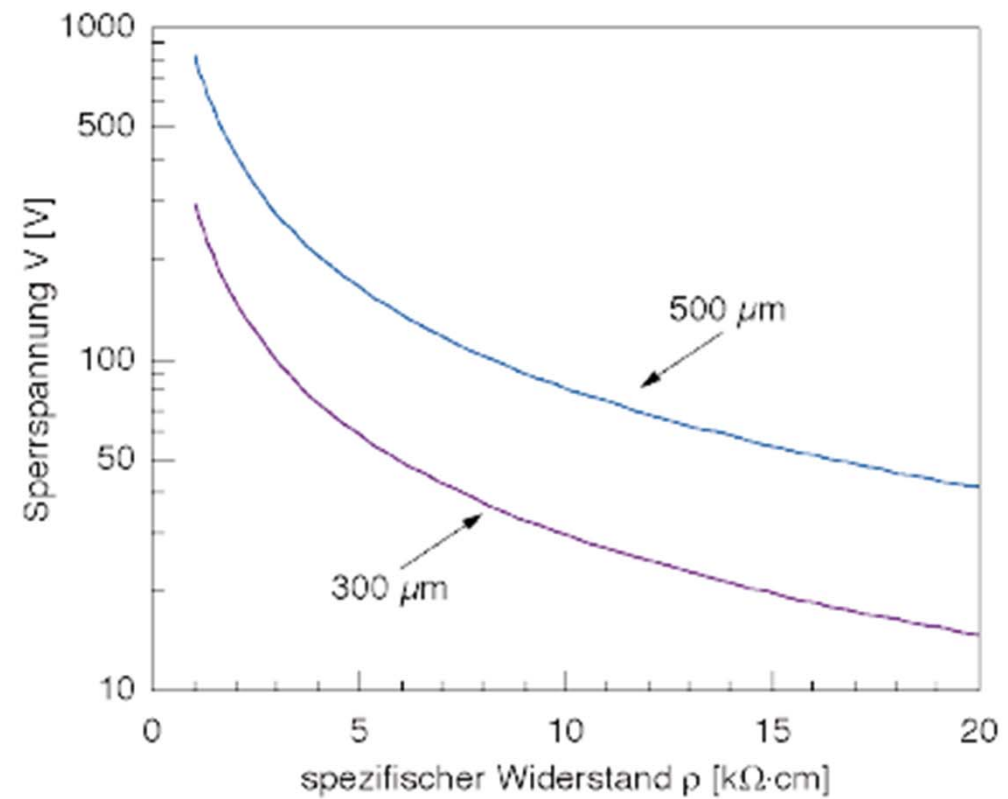
$$I = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right]$$

I_0 ... Sättigungssperrstrom



Leackage Current:
Nano Ampere

Beispiel: Verarmungszone



Kapazitäten

Erhöht man an einem pn-Übergang die Sperrspannung, so erhält man durch die Verbreiterung der Verarmungszone einen Ladungszuwachs an den beiden Elektroden. Man kann daher von einer Kapazität des pn-Überganges sprechen und diese wie folgt definieren:

$$C = \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ}{dW} \cdot \frac{dW}{dV}$$

dQ ... Ladungsänderung,
 dV ... Änderung der Sperrspannung
 W ... Breite der Verarmungszone

Die Breite des Kondensators wird also bestimmt durch die Breite der Verarmungszone.

Für einen abrupten pn-Übergang ergibt sich, unter Annahme des einfachsten Modells für einen Plattenkondensator, somit:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot A}{W} = \sqrt{\frac{e \varepsilon_0 \varepsilon_r N_a N_d}{2(N_a + N_d) \cdot |V|}} \cdot A$$

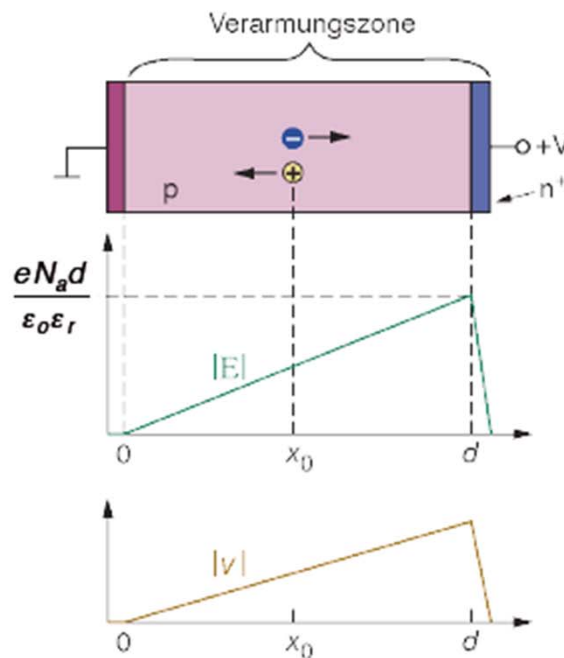
N_a ... eff. Dotierdichte im p-dotierten Bereich,
 V ... Sperrspannung,

N_d ... eff. Dotierdichte im n-dotierten Bereich,
 A ... Kondensatorfläche

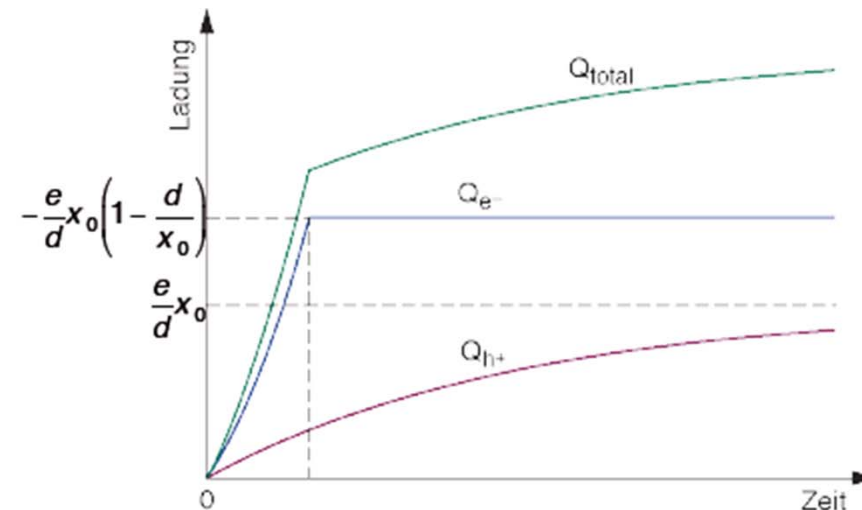
Halbleiterdetektoren Impulsform

Halbleiterdetektoren Impulsform

Ortsabhängigkeit des elektrischen Feldes und der Driftgeschwindigkeit in einem pn⁺-Übergang.



Pulsform für ein Signal das von einem *einzigem* e⁻h⁺-Paar im nebenstehenden pn⁺-Übergang generiert wird.

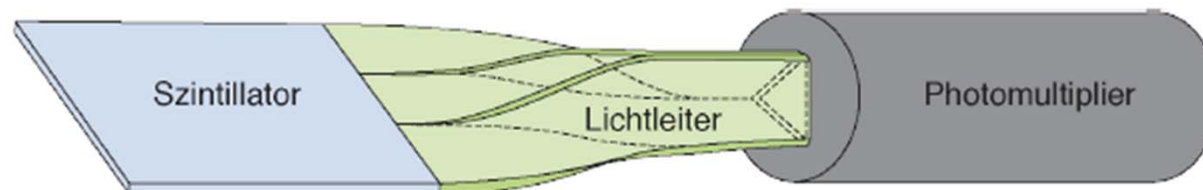


Quelle: W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, 1987
(Nachzeichnung des Originals)

Szintillationszähler

★ **Szintillation:** Emission von Photonen (sichtbares Licht, UV oder Röntgenstrahlen) nach Anregung von Atomen oder Molekülen des szintillierenden Materials durch energiereiche Strahlung (γ - oder Teilchenstrahlung).

1. Im **szintillierenden Medium** wird γ - oder Teilchenstrahlung in Licht (sichtbar, UV, manchmal auch Röntgenstrahlung) umgewandelt. Manchmal ist ein Wellenlängenschieber dem primären Szintillator beigemischt.
2. Der **Lichtleiter** bringt das Licht zum Photodetektor. Ein eventuell integrierter Wellenlängenschieber kann die Wellenlänge an das Ansprechverhalten der Photokathode anpassen und so die Ausbeute erhöhen.
3. Der **Photodetektor** wandelt das Licht in elektrische Ladung um und vervielfacht letztere auch meistens. Üblicherweise werden Photomultiplier verwendet, möglich sind aber auch z.B. Lawinenphotodioden und CCDs.

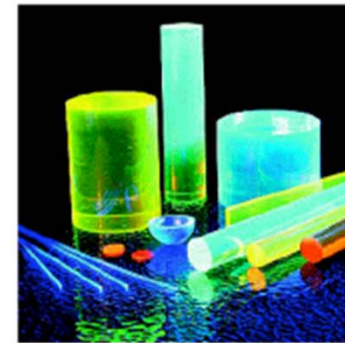


Szintillatoren

★ Szintillierende Materialien:

- Anorganische Kristalle
- Organische Kristalle
- Organische Flüssigkeiten
- Plastiksintillatoren
- Edelgase (gasförmig und flüssig)
- szintillierende Gläser

diverse Szintillatoren



★ Anwendungsgebiete in der Kern- und Teilchenphysik:

- Trigger für langsamere Detektoren (z.B. Driftkammern)
- Flugzeitspektrometer (TOF-Counter = “Time of Flight Counter”)
- Kalorimeter
- tw. auch als Positionsdetektoren (z.B.: szintillierende Fasern)
- zusammen mit einem Neutronenkonverter zum Nachweis und zur Spektroskopie von thermischen und schnellen Neutronen
- Neutrinodetektoren (besonders flüssige Szintillatoren)

Szintillatoren

★ Vorteile:

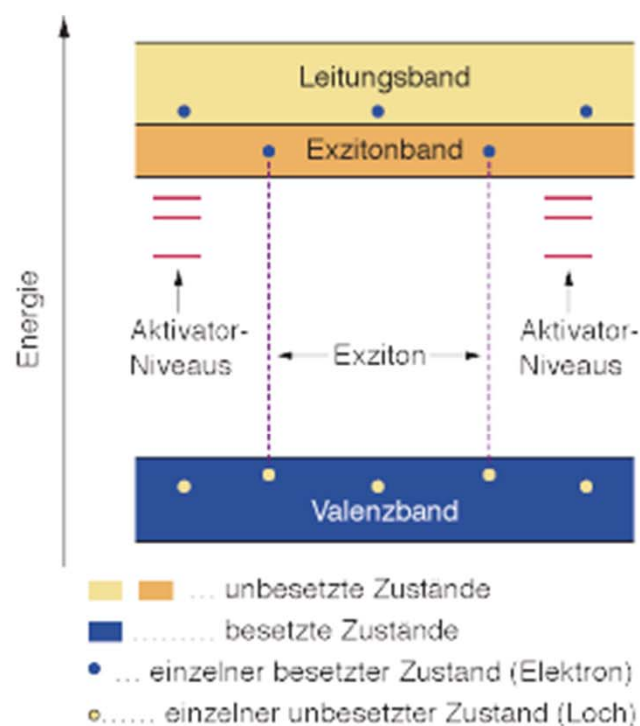
- **schnelle Ansprechzeit** (besonders organische Szintillatoren, ns-Bereich)
- **sensitiv auf die deponierte Energie**
- Herstellung und Betrieb unkompliziert → **billig, zuverlässig**

★ Nachteile:

- empfindlich gegenüber Magnetfeldern (Photomultiplier sowie manche organische Szintillatormaterialien)
- Alterungserscheinungen (besonders bei Plastiksintillatoren)
- Strahlenschäden (besonders bei Plastiksintillatoren)
- Plastiksintillatoren: Anfälligkeit gegenüber Mikrorissen ("Crazing"), welche die Lichtausbeute stark verringern. Werden oft ausgelöst durch Verschmutzung (Lösungsmittel, Öle, Fingerabdrücke).
- Anorganische Kristalle: Teilweise hygroskopisches Verhalten mit Verschlechterung der Lichtausbeute.
- Gassintillatoren: Geringe Lichtausbeute.

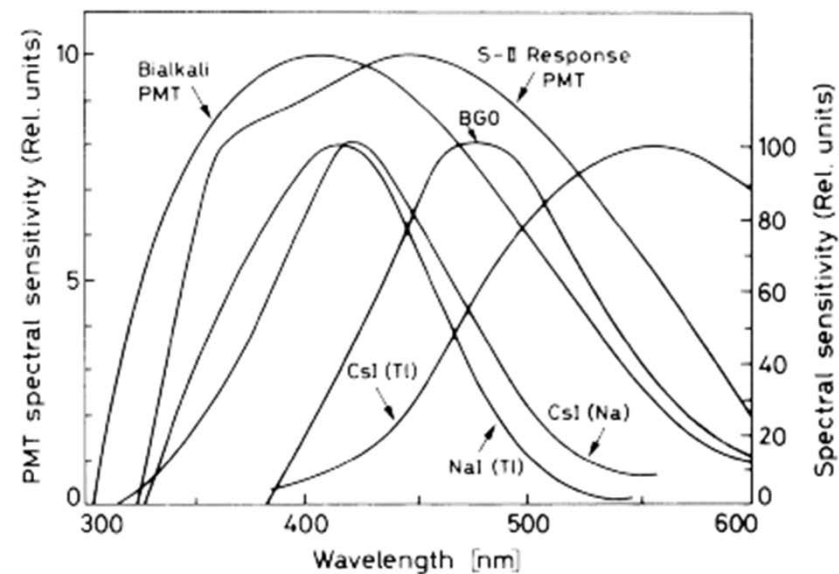
Typische Materialien

Material	Typ	Dichte [g/cm ³]	max. Emission bei λ [nm]	Lichtausbeute [% Anthracen]	Abklingzeit* [ns]	* der Hauptkomponente † bei T = 77 K
NaI	anorgan. Kristall	3.67	303†	440†	60†	
NaI:TI	anorgan. Kristall	3.67	413	230	230	
LiI:Eu	anorgan. Kristall	4.06	475	75	1200	
CsI	anorgan. Kristall	4.51	400†	500†	600†	
CsI:TI	anorgan. Kristall	4.51	580	95	1100	
BaF ₂	anorgan. Kristall	4.9	310	46	620	
CeF ₃	anorgan. Kristall	6.16	310–340	23	30	
BGO (= Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂)	anorgan. Kristall	7.13	480	35–45	350	
GSO (= Gd ₂ SiO ₅ :Ce)	anorgan. Kristall	6.71	430	45–60	≈50	
PbWO ₄	anorgan. Kristall	8.28	440–500	≈2.5	5–15	



Emissionsspektrum

Emissionsspektren diverser anorganischer Kristalle (rechte Ordinate) sowie spektrale Sensitivität zweier Standard-Photomultiplier (linke Ordinate).



Quelle: W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer, 1987

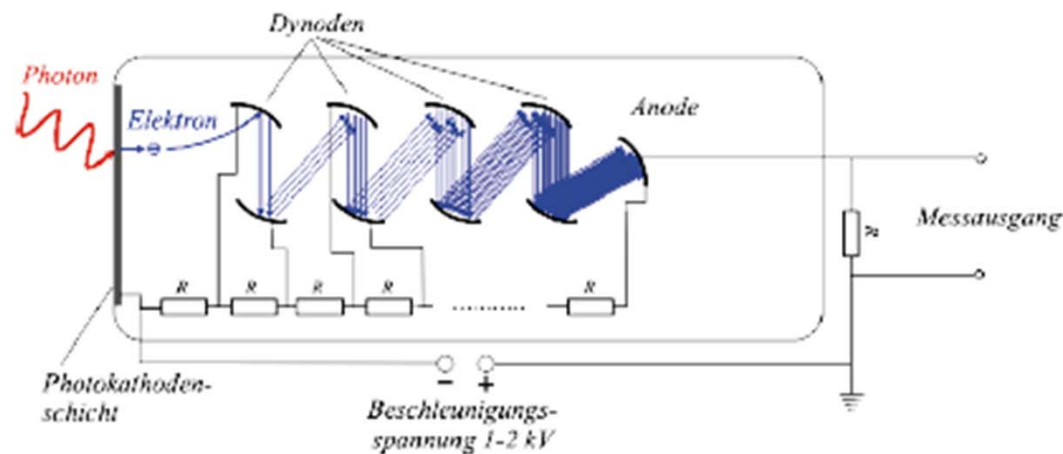
Szintillierende Fasern aus dem em.
Kalorimeter des CHORUS Detektors
(SPS, CERN)



Szintillierende Fasern für den MINOS
Detektor (Fermilab), Faserdurchmesser
1 mm, min. Biegeradius 1.7 cm.



Photomultiplier



Schema zur prinzipiellen Funktionsweise eines Photomultipliers: Licht fällt auf die Photokathode (links) und wird in e^- umgewandelt, welche durch die Dynoden vervielfacht und anschließend an der Anode ausgelesen werden (rechts).

Dyodenmaterial

Tabelle: Wellenlänge für optimale Effizienz und maximale Quantenausbeute (quantum efficiency, Q.E.) einiger Legierungen für Photokathoden:

Material	max. Emission bei λ_{peak} [nm]	Q.E. @ λ_{peak} [%]
Ag-O-Cs	800	0.36
SbCs	400-440*	16-22*
SbNa-KCs	420-550*	8-20*
SbRb-Cs	420	26
Sb-K-Cs	400	26
Cs-Te	235	10

*je nach Mischungsverhältnis und Herstellungsprozess

Bild : Quantenausbeute als Funktion der Wellenlänge für einige kommerziell erhältliche Photokathoden:

