

4. Moleküle und Festkörper

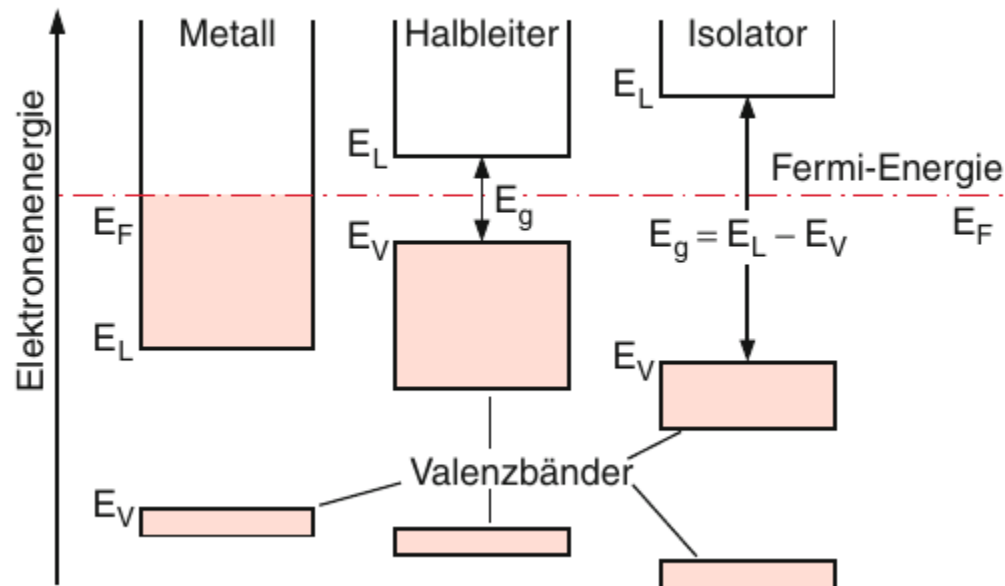
Prof. David Hunger

Physikalisches Institut, KIT Fakultät für Physik

4.6. Halbleiter

Halbleiter

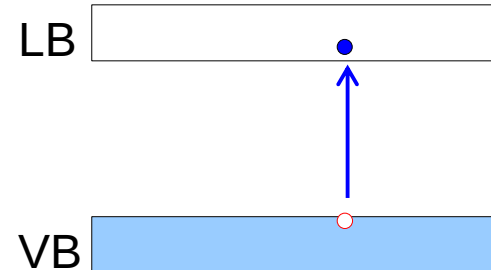
- Bei Halbleitern ist die Bandlücke klein gegen $k_B T$
→ thermische Anregungen ins Leitungsband möglich



Stoff	E_g / eV
Diamant	5,60
Si	1,11
Ge	0,66

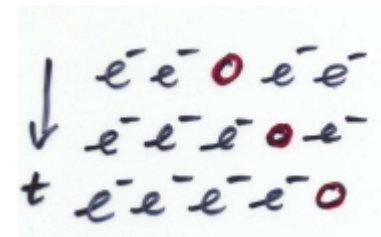
Halbleiter

thermische Anregung
vom Valenzband (VB)
ins Leitungsband (LB)



→ bewegliches Elektron im LB,
Defektelektron („Loch“) im VB

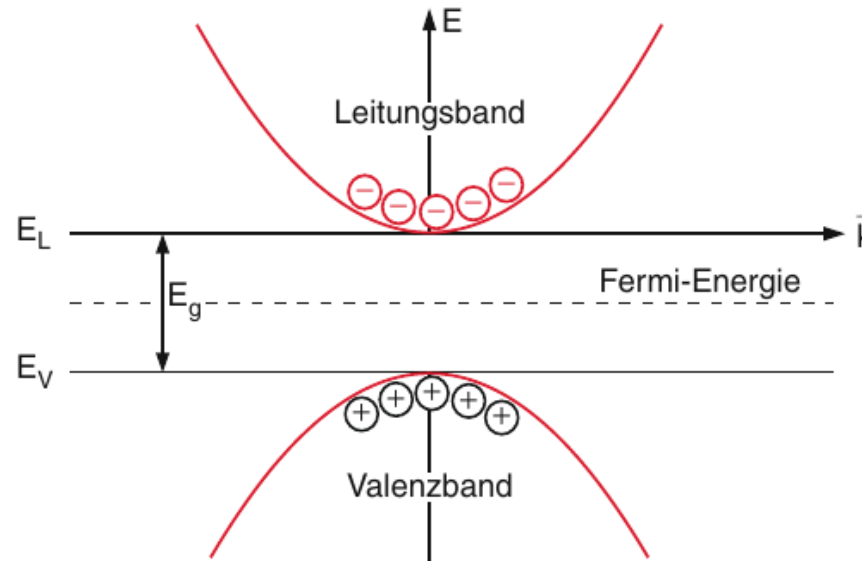
- Lücke im VB wird durch andere Elektronen im VB besetzt
→ Loch bewegt sich wie positive Ladung !



Analogie Luftblase im Wasser
Wassermoleküle bewegen sich um die Luftblase herum
↔ Beschreibung als Bewegung der Luftblase



Halbleiter



Lücke befindet sich an der Oberkante des Valenzbandes

→ negative effektive Masse m^* für Elektronen

→ **Loch bewegt sich wie positive Ladung mit $m^* > 0$**

Halbleiter

→ Leitfähigkeit von Halbleitern bekommt einen zusätzlichen Term:

$$\sigma = \frac{n_e e^2 \tau_e}{m_e^*} + \frac{n_p e^2 \tau_p}{m_p^*}$$

durch Einführung der „**Beweglichkeiten**“ $\mu_e = \frac{e \tau_e}{m_e^*}$ für Elektronen im LB
und $\mu_p = \frac{e \tau_p}{m_p^*}$ für Löcher im VB

ergibt sich: $\sigma = n_e e \mu_e + n_p e \mu_p$

Im reinen Halbleiter (auch „intrinsischer Halbleiter“) entspricht jedem Elektron ein Loch, daher sind die Ladungsträgerdichten gleich.

Beispiel: Silizium (Si) bei $T = 300 \text{ K}$

Ladungsträgerdichte (in reinstem Si): $n_e = n_p = 1.45 \times 10^{16} / \text{m}^3$

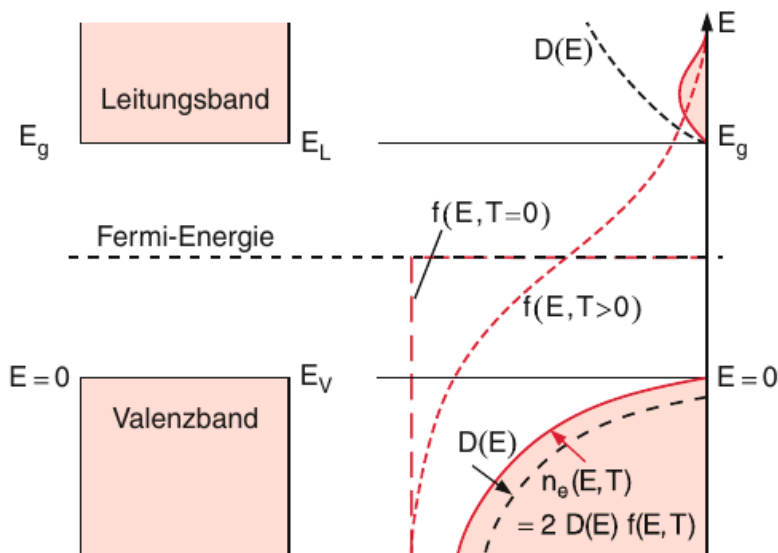
$$\mu_n = 1450 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$$

$$\mu_p = 450 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$$

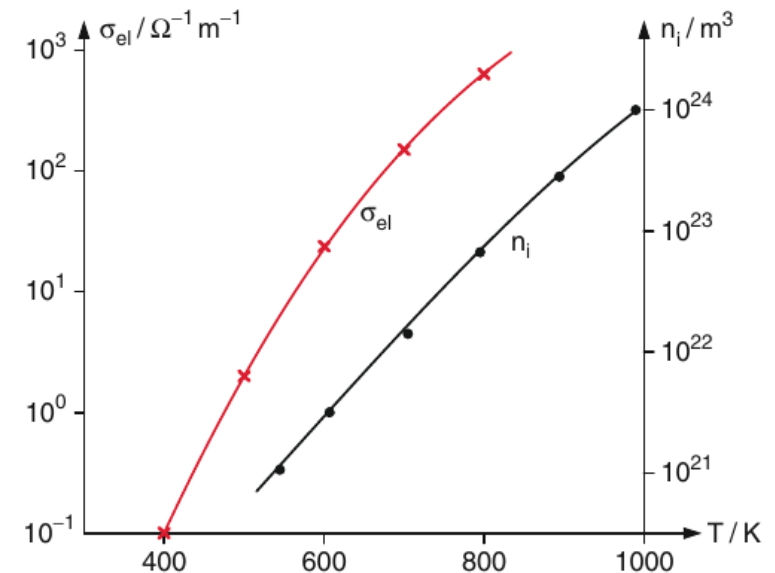
Spezifischer Widerstand: $\rho = 230 \text{ k}\Omega \text{ cm}$

Halbleiter

Charakteristisch für Halbleiter ist, dass sie „Heißleiter“ sind:
ihr spezifische Leitwert steigt exponentiell mit der Temperatur,



Bandlücke mit Verteilung der temperaturabhängigen Besetzung der Zustände



Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit und der Ladungsträgerdichte in reinem Silizium

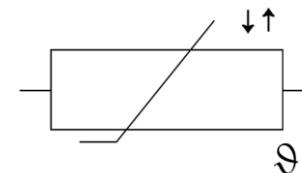
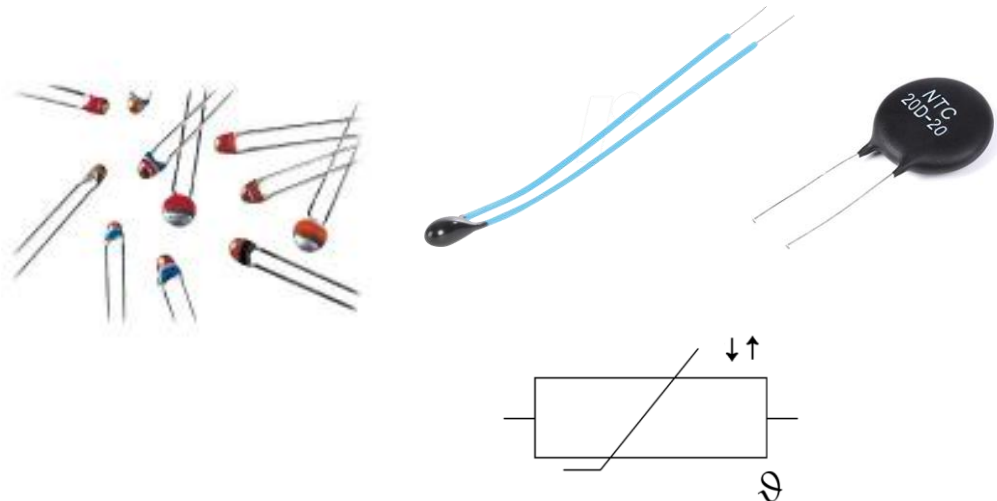
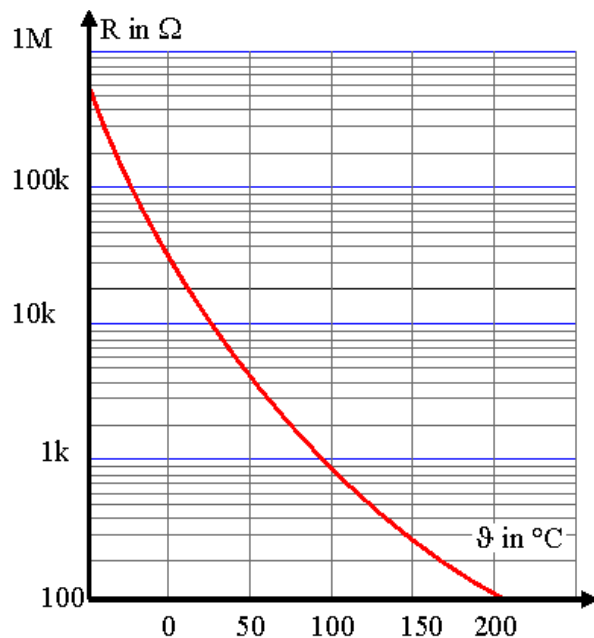
Halbleiter: Anwendung

Der spezifische Widerstand von Halbleitern sinkt mit der Temperatur,
sie sind sog. „Heißleiter“

Daher der Name für ein elektrisches Bauteil:

NTC = **N**egative **T**emperature **C**oefficient

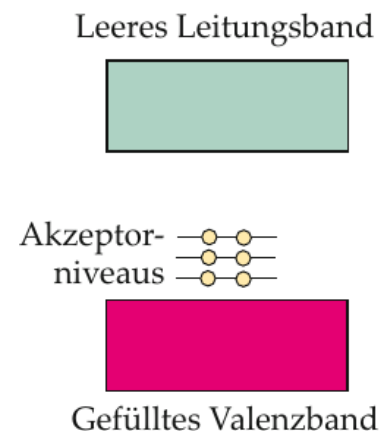
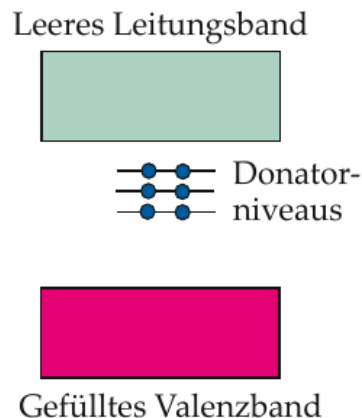
Anwendung als (nicht-linearer) Temperatursensor



typ. Kennlinie, Bauformen und Schaltzeichen von NTC-Widerständen

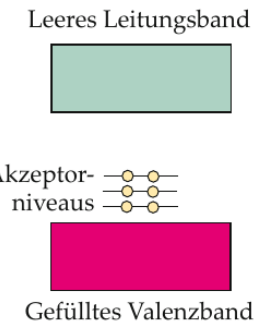
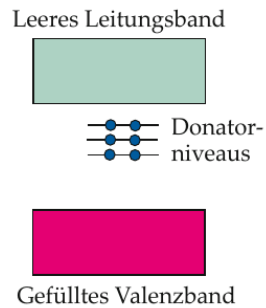
Dotieren von Halbleitern

- **Dotieren** = gezieltes Einbringen von Fremdatomen ins Gitter
→ Beeinflussung elektrischer Eigenschaften
- Grundlage der Halbleiterelektronik
- Dotieren erzeugt zusätzliche Niveaus in der Nähe der Bandkanten

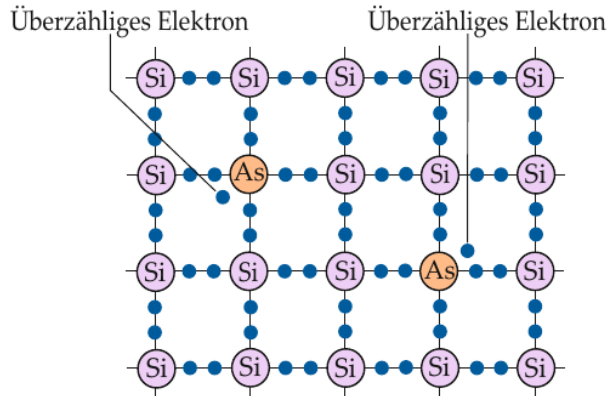


Konzentration der Fremdatome	typ. 10^{16} bis $10^{19} / \text{cm}^3$
sehr gering i. Vgl. zur Zahl der Si-Atome	von $10^{23} / \text{cm}^3$

Dotieren von Halbleitern

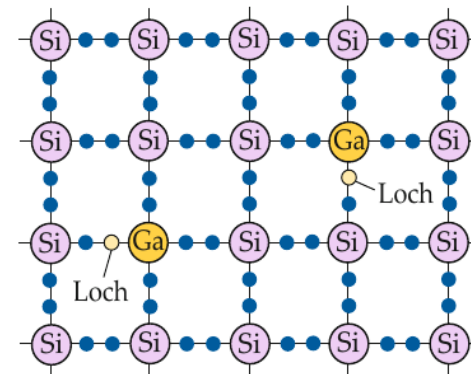


n-Dotierung mit Atomen mit 5 Valenz-Elektronen (P, As, Sb, ...)



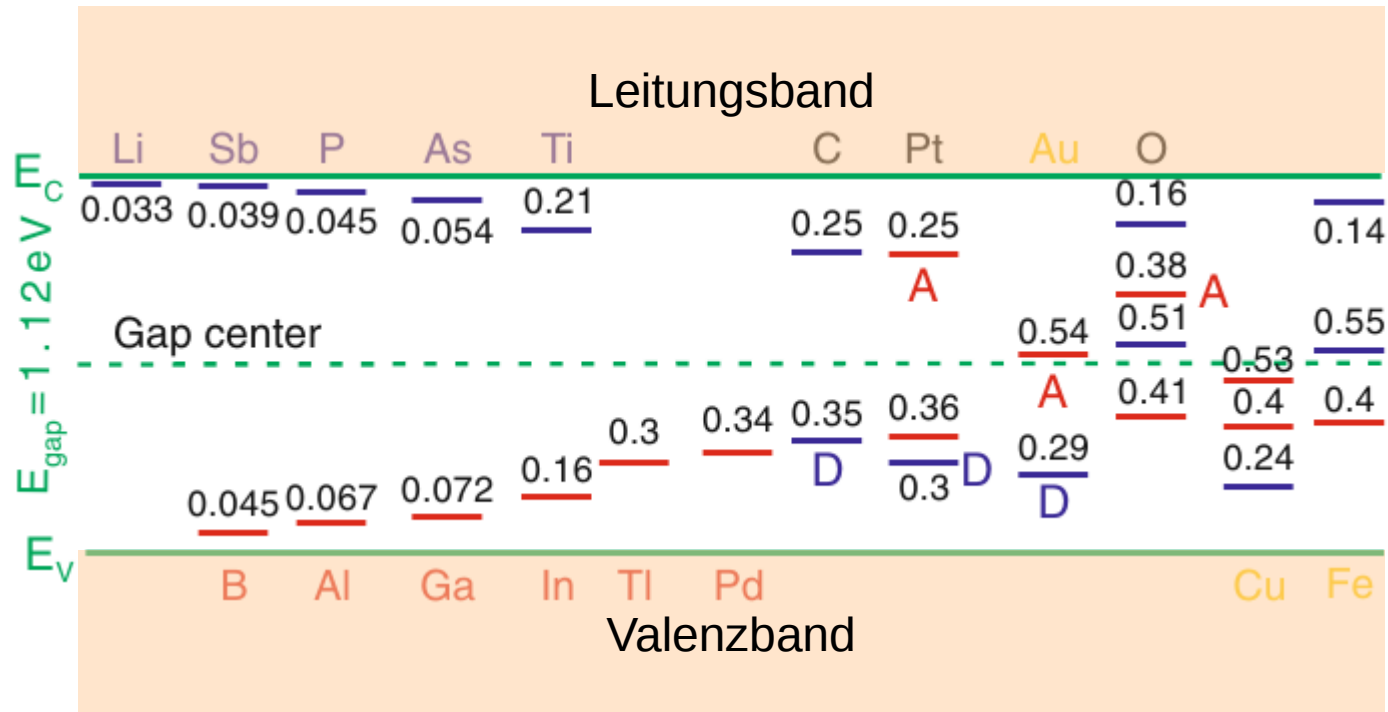
... geben lose gebundenes Elektronen ab
→ **Elektron im LB ohne Loch im VB**

p-Dotierung mit Atomen mit 3 Valenz-Elektronen (B, Al, Ga, ...)



... binden Valenzelektronen
→ **Loch im VB ohne Elektron im LB**

Dotieren von Halbleitern



Zusätzliche Niveaus in dotiertem Silizium
für verschiedene Fremdatome (Quelle: Hartmann)

Dotieren von Halbleitern

Konzentration n_D der Donatoren oder n_A der Akzeptoren bestimmt Art der (dominierenden) Stromleitung:

$n_D = n_A = 0$: Intrinsischer Halbleiter, $n_e = n_p =: n$, Elektronen- und Löcherleitung

$n_D \neq 0, n_A = 0$: n-Halbleiter, $n_e \gg n_p$, Elektronenleitung

$n_D = 0, n_A \neq 0$: p-Halbleiter, $n_p \gg n_e$, Löcherleitung

$n_D \neq 0, n_A \neq 0$: gemischte Halbleiter, Elektron- und Löcherleitung

Unter Vernachlässigung der Eigenleitung ist die
Leitfähigkeit eines dotierten Halbleiters gegeben durch:

$$\sigma = e (\mu_e n_D + \mu_p n_A)$$

μ_e, μ_p : Mobilität der Elektronen bzw. Löcher

n_D, n_A : Donator- bzw. Akzeptor-Konzentration

Halbleiter: Anwendung

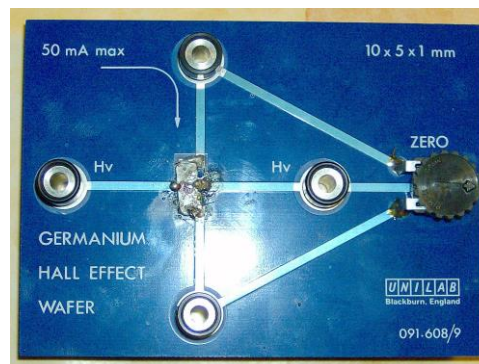
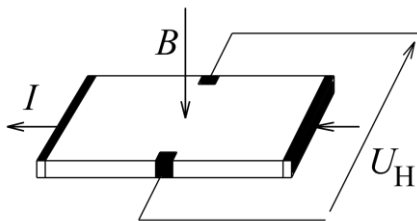
i. Vgl. zu Metallen **geringe Dichte an Ladungsträgern**

→ bei gleicher Stromdichte $j = n e v_D$ ist die Geschwindigkeit der Ladungsträger höher

→ **großer Hall-Effekt**

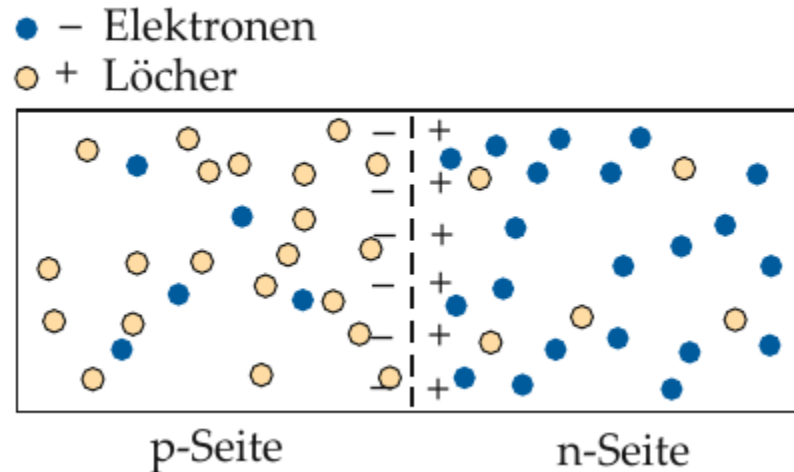
Anwendung als

- „Hall-Sensor“ zur Messung von Magnetfeldern
- kostengünstige Magnetsensoren für Schalter,



Dotierte Halbleiter: der p-n-Übergang

Direkter Kontakt eines p-Halbleiters und eines n-Halbleiters



Löcher diffundieren von der p-Seite zur n-Seite

Elektronen diffundieren von der n-Seite zur p-Seite

Elektronen und Löcher „rekombinieren“

→ ladungsträgerverarmte Zone am Übergang

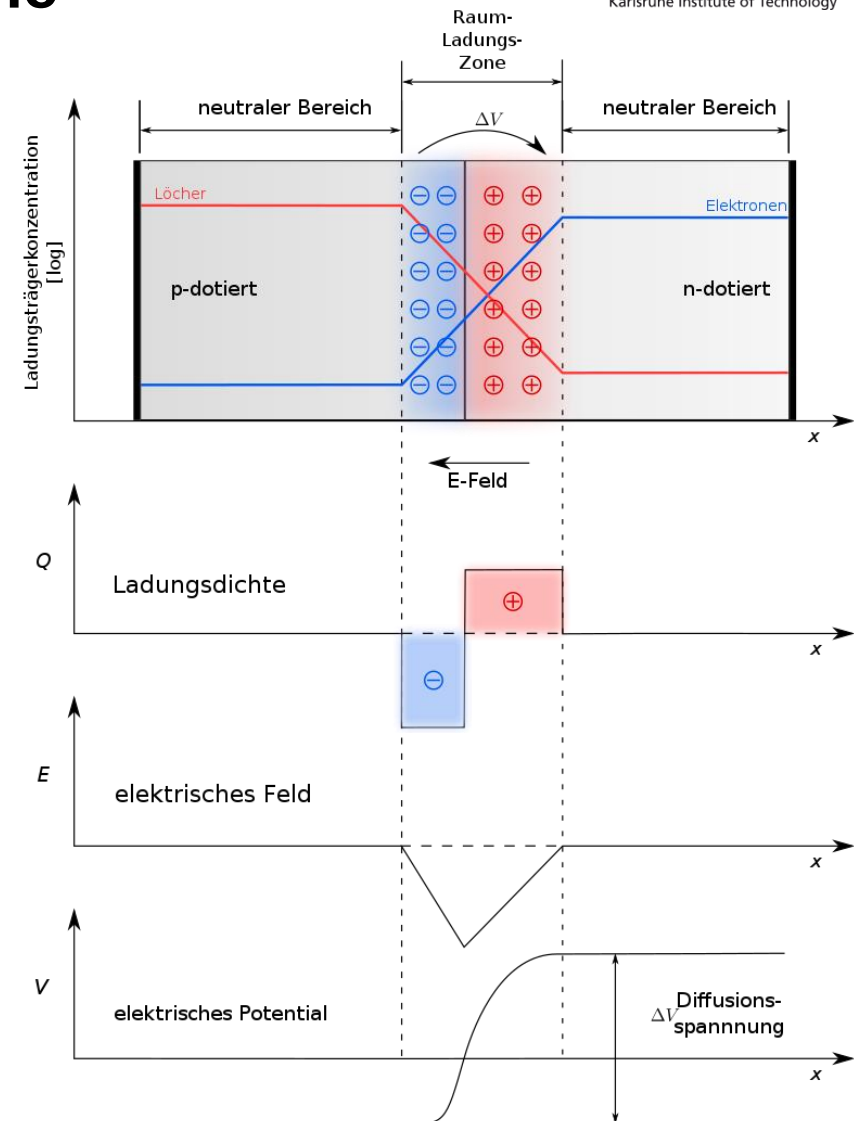
– effektive negative Ladung auf p-Seite und

– positive Ladung auf n-Seite

→ elektrisches Feld von n→p wirkt Diffusion entgegen

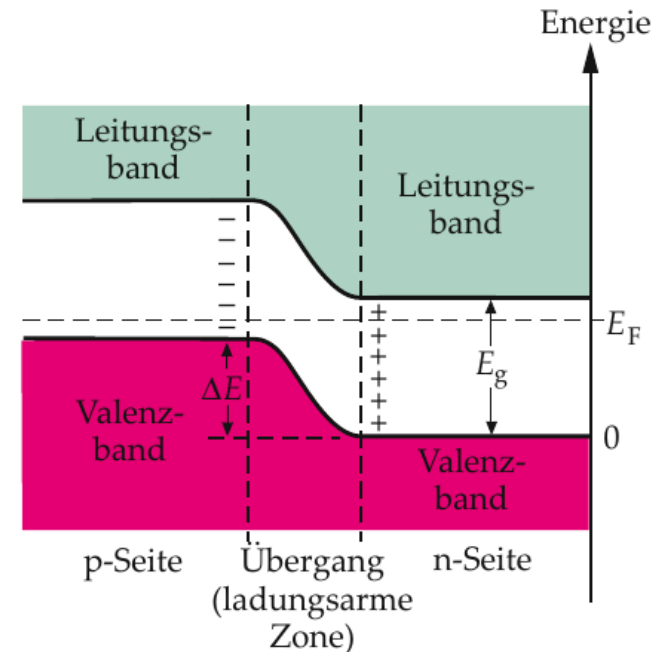
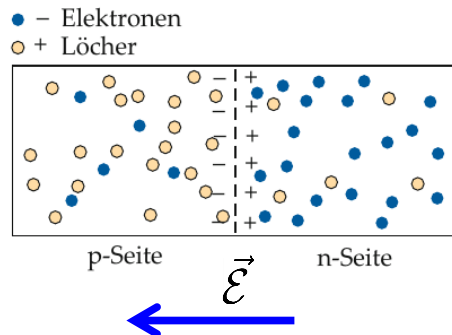
p-n-Übergang: Verarmungszone

- Diffusion von Löchern ($p \rightarrow n$) und Elektronen ($n \rightarrow p$) erzeugt Verarmungszone
→ Raumladungen
- resultierendes elektrisches Feld führt zu entgegengesetztem Strom
- Breite der Raumladungsdichte hängt von Ladungsträgerdichte, also der Dotierung, ab
- Raumladungsdichte führt zu elektrischem Feld
- Durch Anlegen einer **elektrischen Spannung** kann die Potentialstufe verringert oder vergrößert werden.



p-n-Übergang: Bandverbiegung

- Diffusion und Rekombination erzeugen ein elektrisches Feld
- elektrisches Potenzial der positiv geladenen n-Seite höher,
d.h. **potentielle Energie der (negativ geladenen) Elektronen wird abgesenkt**

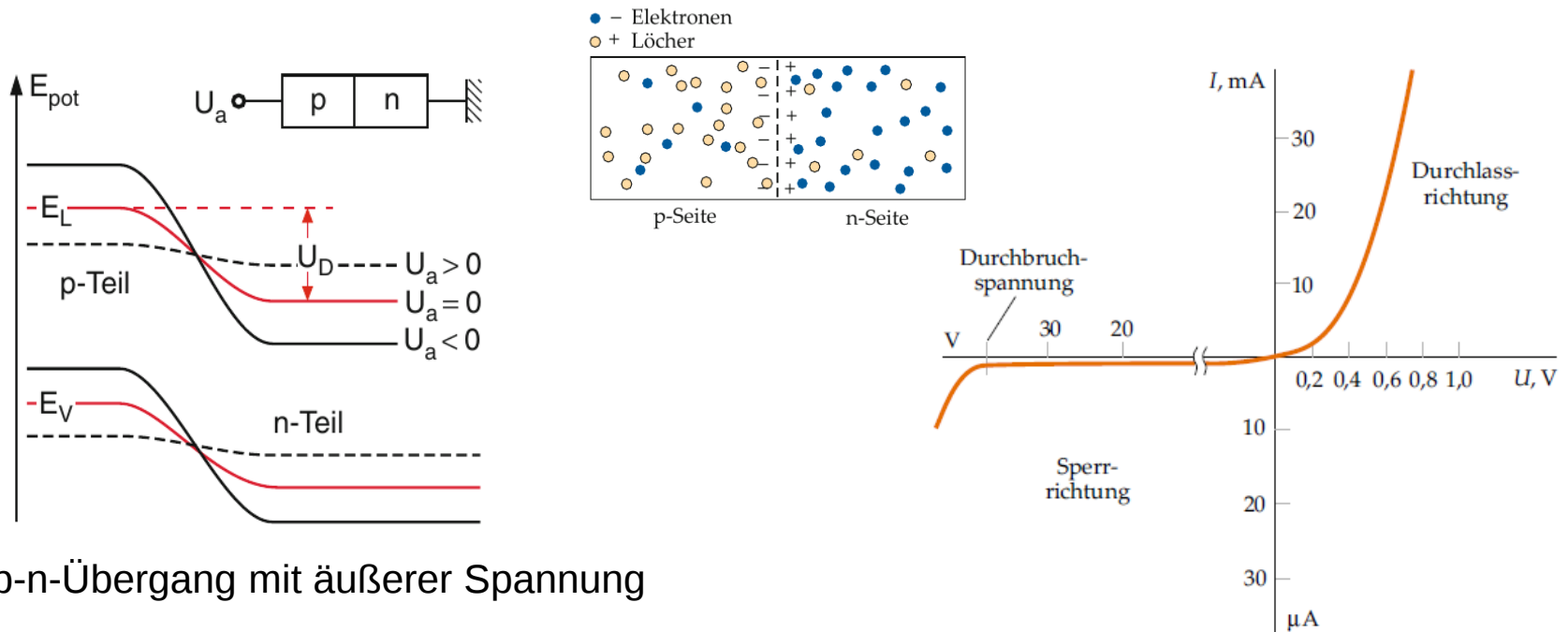


Potentielle Energie von Elektronen,
„Verbiegung der Bandkanten“ am
p-n-Übergang

Die Verarmungszone ($n_e = n_p = 0$) hat einen sehr hohen Widerstand !
Bei kleinen Spannungen ist der p-n-Übergang nicht-leitend !

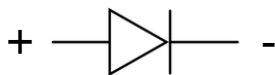
Anwendung p-n-Übergang: Diode

Angelegte Spannung kann Potentialdifferenz erhöhen oder erniedrigen

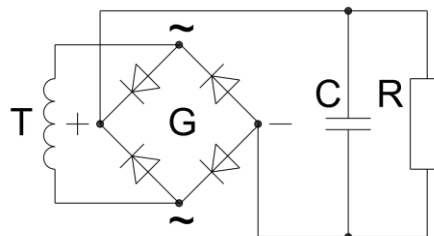


p-n-Übergang mit äußerer Spannung

Diode



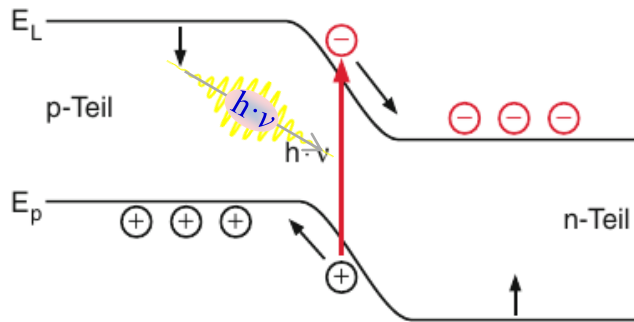
Gleichrichter



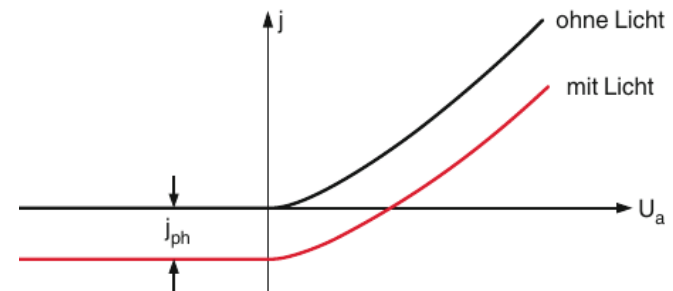
Anwendung p-n-Übergang: Photodiode

Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren durch Anregung von Elektronen ins VB

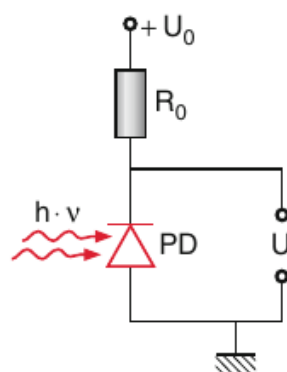
→ **Photostrom durch „inneren Photoeffekt“**



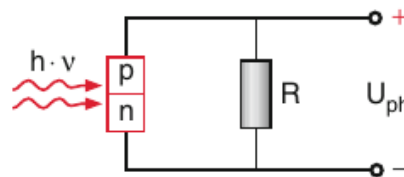
Erzeugung von Elektronen-Loch-Paaren durch Absorption von Photonen.



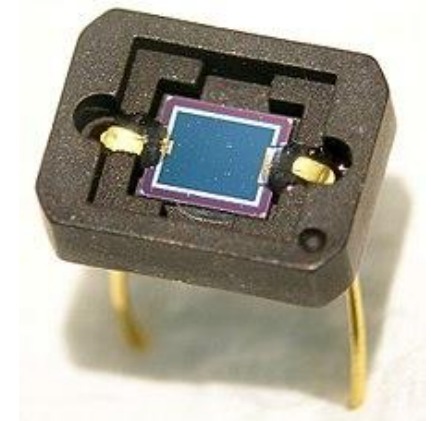
Strom-Spannungs-Charakteristik mit und ohne Beleuchtung



Lichtsensord und Solarzelle



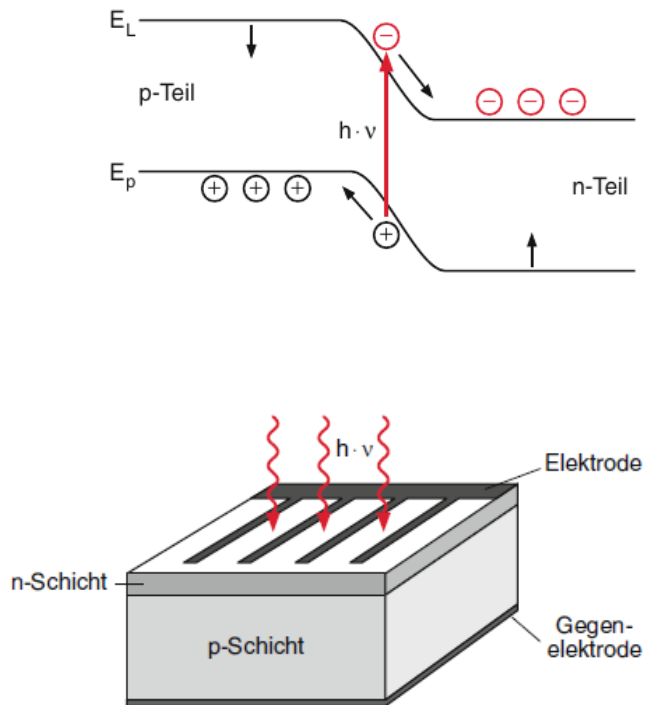
Schaltung als Photowiderstand bzw. als Photospannungsquelle



Anwendung p-n-Übergang: Solarzelle

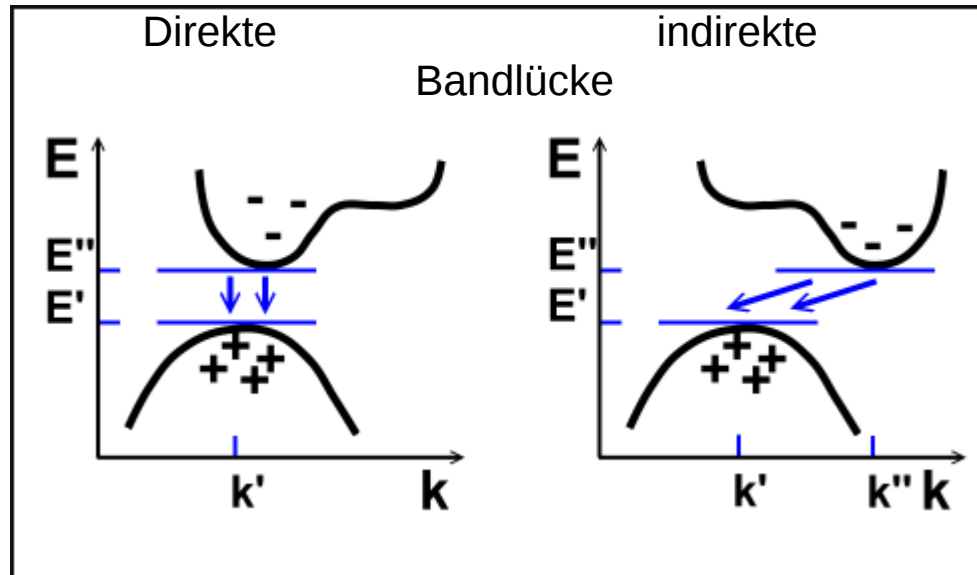
Großflächige Anwendung des inneren Photoeffekts:

Solarzelle



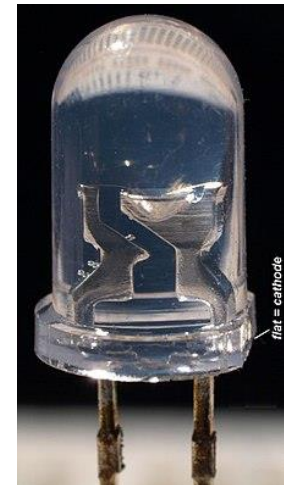
Durch Wahl eines optimalen Verbraucher-Widerstands kann die abgegebene Leistung maximiert werden.

Anwendung p-n-Übergang: Leuchtdiode



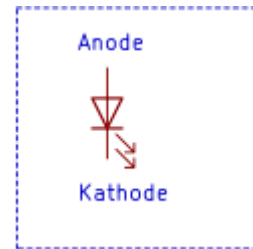
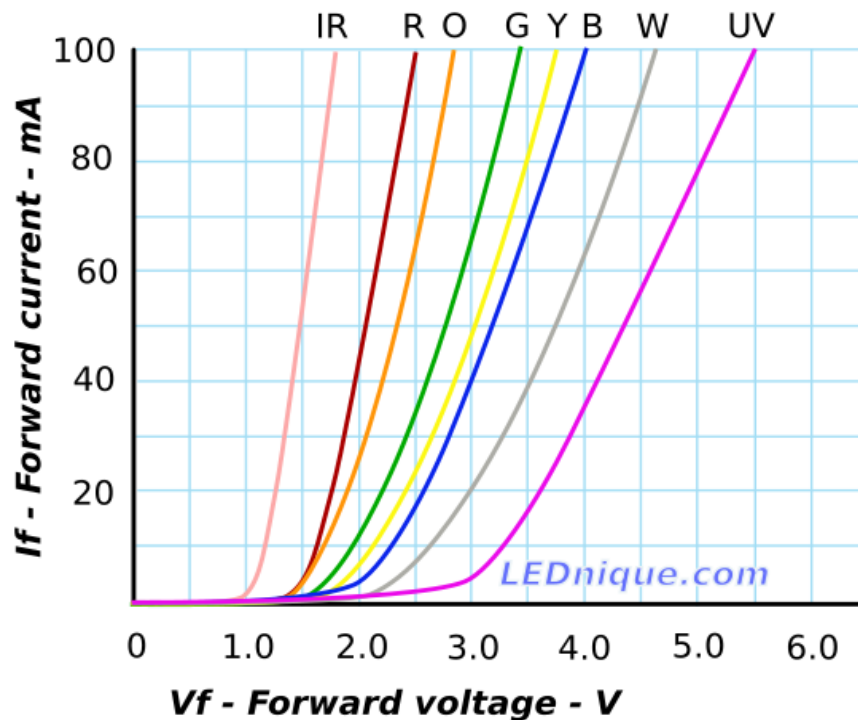
Photon-Emission ist wahrscheinlicher, wenn kein Impulsübertrag auf ein Phonon notwendig ist !

Verwendung von Halbleitern mit direkter Bandlücke für Leuchtdioden (**L**ight **E**mitting **D**iode = LED) !
Material und Dotierung bestimmen Farbe !

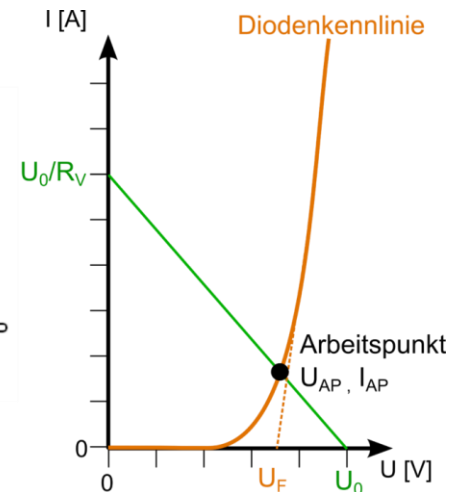
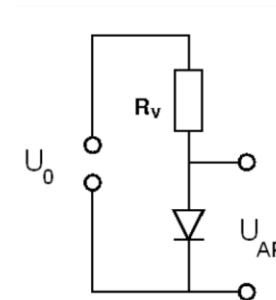


Si hat eine indirekte Bandlücke, ist daher ungeeignet !

Anwendung p-n-Übergang: Leuchtdiode



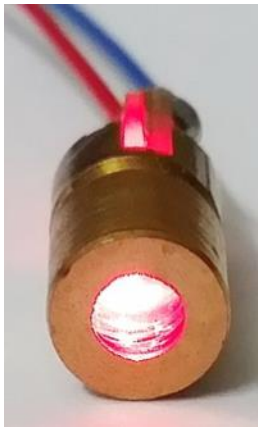
Durchlassspannung der Diode steigt mit Lichtfrequenz !



Kennlinie verläuft sehr steil

→ Vorwiderstand zur Strombegrenzung

Halbleiter-Laser



Prinzip:

- Leuchtdiode mit
- ladungsträgerverarmter Zone
 - verspiegelten Endflächen

Vorteile:

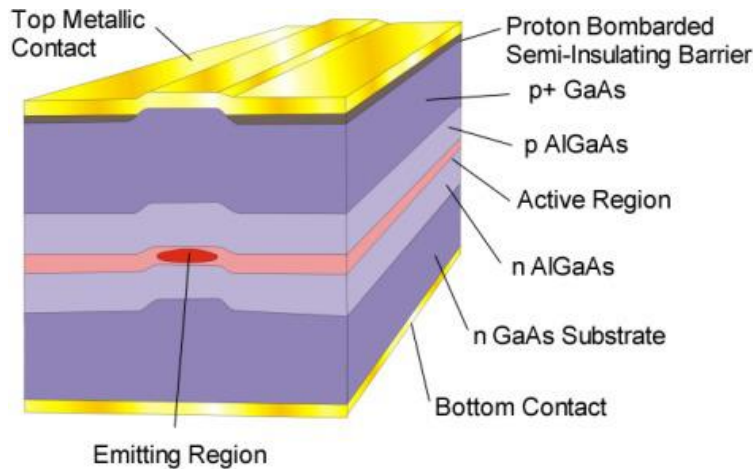
- sehr kostengünstig (~1€)
- Betrieb mit Niederspannung
- Leistungen von 10^{-4} – 10 W pro Emitterschicht
- hohe (~50%) Energieeffizienz



Achtung: trotzdem gefährlich !

Laserschutzverordnung !

Leistungsangaben der Hersteller
nicht immer vertrauenswürdig !



Struktur eines Halbleiter-Lasers

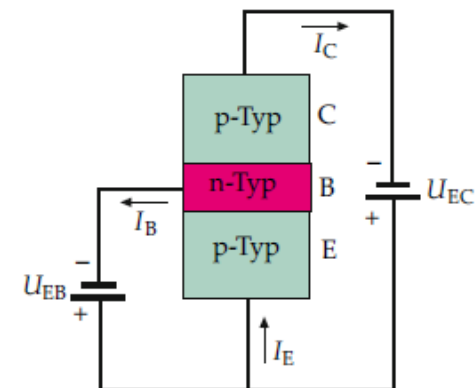
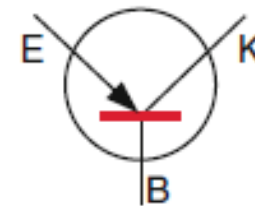
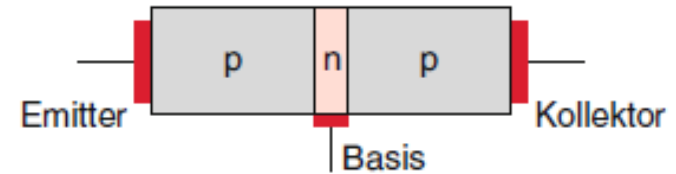
Transistor

- Zwei p-n-Übergänge
- Emitter-Basis in Durchlassrichtung
- Basis-Kollektor in Sperrrichtung
- Negative Spannung an Basis erzeugt Reduktion der Ladungsdichte und kleinen Basis Strom I_B
- Dieser steuert größeren Strom vom Emitter zum Kollektor

$$I_C = \beta I_B, \quad \beta \sim 10^1 - 10^2$$

Anwendungen

- Verstärkerschaltung (Spannungsverstärkung, Stromverstärkung → Transistorradio)
- Elektronischer Schalter
→ integrierte Halbleiterelektronik



Our World
in Data

Our World
in Data

Our World
in Data



Our World
in Data

Our World
in Data

Our World
in Data