

## 8. *Halbleiter-Bauelemente*

8.1 Reine und dotierte Halbleiter

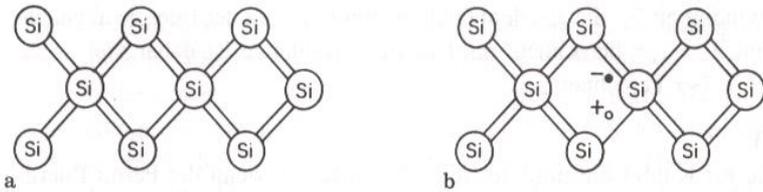
8.2 der pn-Übergang

8.3 Die Diode

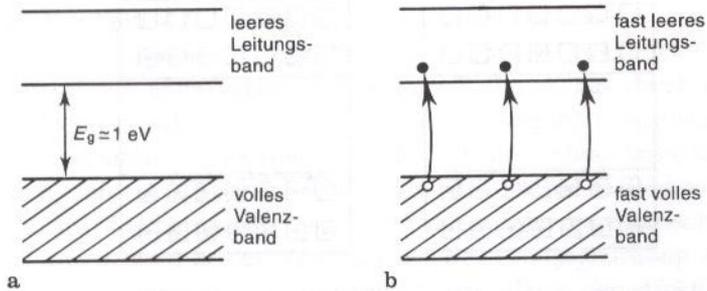
8.4 Schaltungen mit Dioden

8.5 Der bipolare Transistor

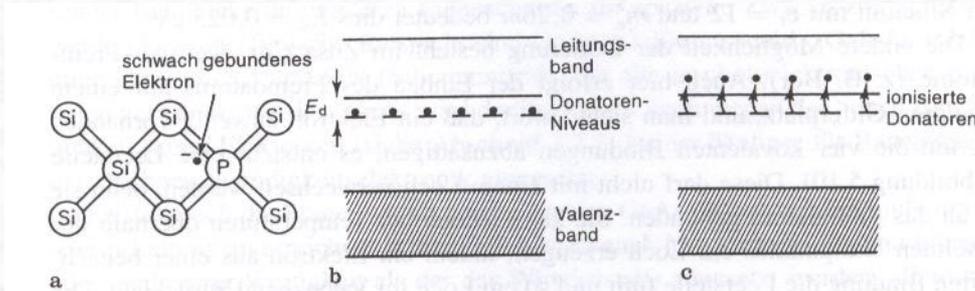
8.6 Transistorschaltungen



Zweidimensionale Veranschaulichung der kovalenten Bindungen eines intrinsischen Halbleiters:

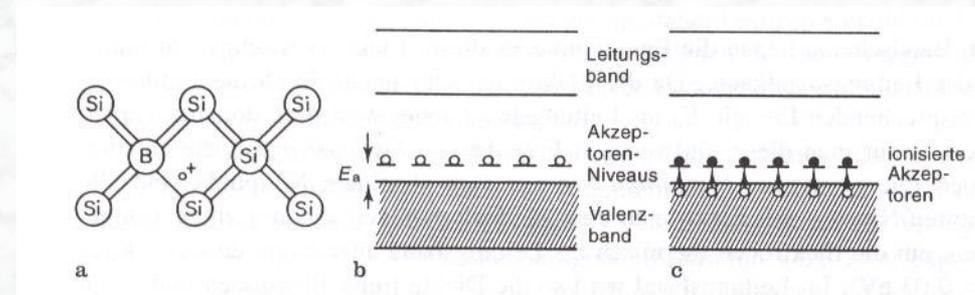


Valenz- und Leitungsband eines intrinsischen Halbleiters:



***n*-dotierter Halbleiter:**

- a) Kristallgitter (schematisch);
- b) Donatoren-Niveaus bei  $T = 0 \text{ K}$ ;
- c) Donatoren-Niveaus bei Raumtemperatur (aus Ref. [4])

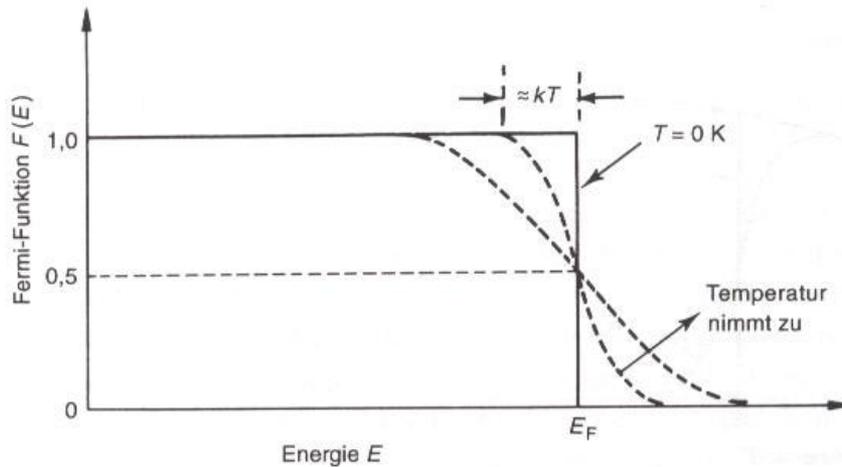


***p*-dotierter Halbleiter:**

- a) Kristallgitter (schematisch);
- b) Akzeptoren-Niveaus bei  $T = 0 \text{ K}$ ;
- c) Akzeptoren-Niveaus bei Raumtemperatur aus (Ref [4]).

## Zu 8.1: Fermi-Energie

Fermi-Energie  $E_F$ : das am absoluten Nullpunkt oberste besetzte Energieniveau.  
(alle Energiezustände mit  $E < E_F$  sind am absoluten Nullpunkt besetzt, alle Energiezustände mit  $E > E_F$  sind unbesetzt).

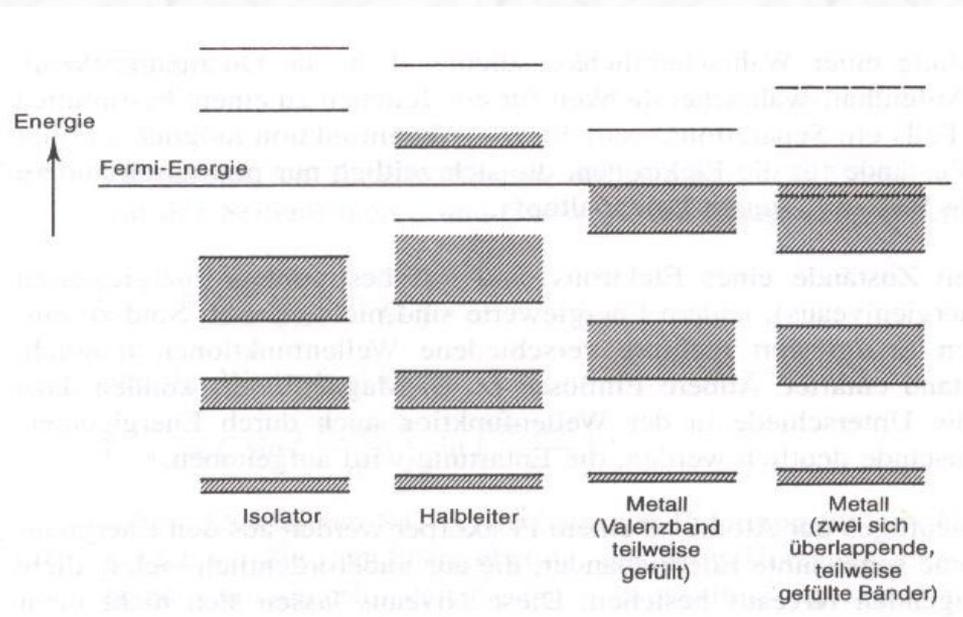


$$F(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}}$$

$k$  = Boltzmann-Konstante  
 $E_F$  = Fermi-Energie

- $T > 0$ : thermische Bewegung, kein scharfer Übergang, die Verteilung auf die Energieniveaus wird durch die **Fermi-Funktion  $F(E)$**  beschrieben.
- Diese berücksichtigt, dass ein einzelner Quantenzustand nur mit einem Elektron besetzt werden darf.
- Ausdehnung des Übergangsbereiches ist von der Größenordnung  $kT \sim 0.025 \text{ eV} = 1/40 \text{ eV}$  bei Zimmertemperatur.
- Die **Fermi-Energie  $E_F$**  entspricht bei jeder Temperatur derjenigen Energie, für die  $F(E)$  den Wert  $\frac{1}{2}$  annimmt.
- Die Breite der Energiebänder, die Breite der Bandlücke und die Lage des Fermi-Niveaus sind wichtige Parameter des Bändermodells, sie sind relevant für die Berechnung der elektrischen Leitfähigkeit eines Festkörpers.

# Breite und Lage der Bänder für verschiedene Festkörper:



Isolatoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Valenzband ist am absoluten Nullpunkt vollständig gefüllt</li> <li>- vom Leitungsband durch eine Bandlücke getrennt Bandlücke <math>\sim 4 \text{ eV}</math></li> </ul>
Halbleiter	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Valenzband ist am absoluten Nullpunkt vollständig gefüllt</li> <li>- vom Leitungsband durch eine Bandlücke getrennt Bandlücke <math>\sim 1 \text{ eV}</math></li> <li>- aufgrund der thermischen Energie ist eine Anregung von Elektronen und ihr Übergang in das Leitungsband schon bei Zimmertemperatur möglich</li> </ul>
Metalle	<ul style="list-style-type: none"> <li>(i) Valenzband ist nur teilweise gefüllt; Elektronen können kinetische Energie aufnehmen d.h. sich durch den Festkörper bewegen, und zur Leitfähigkeit beitragen</li> <li>(ii) Valenzband und Leitungsband überlappen (Beispiel: zweiwertige Metalle, wie z.B. Calcium, Magnesium)</li> </ul>

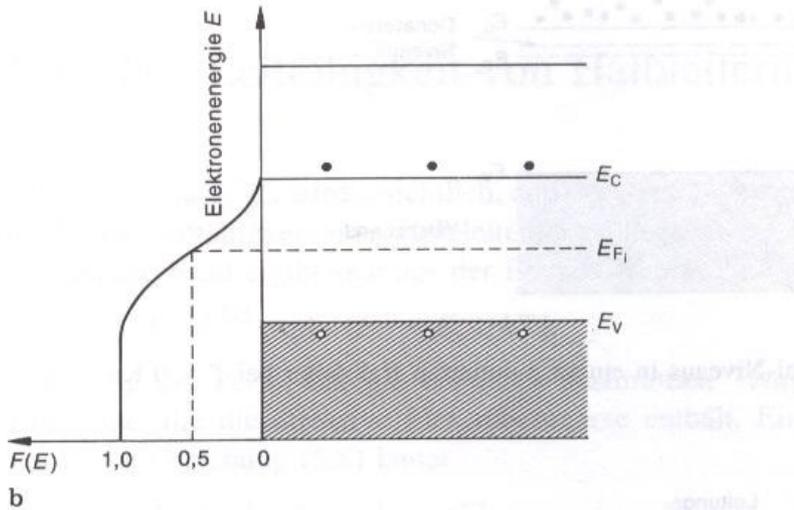
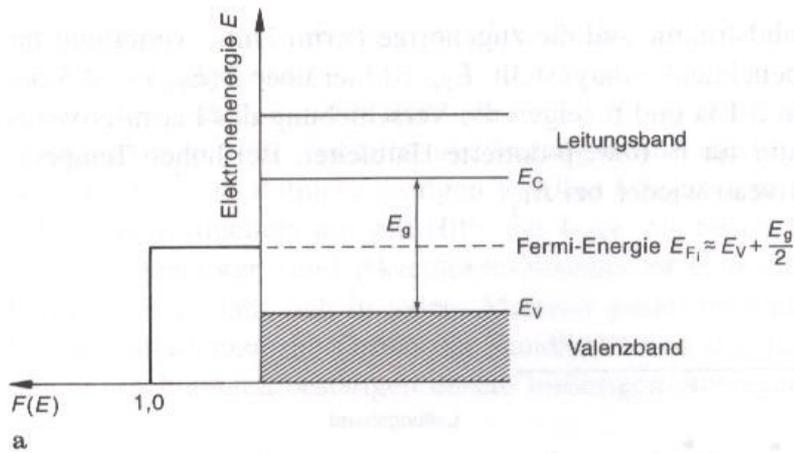
vollständig gefüllte Bänder: kein makroskopischer Stromfluss möglich

äußeres E-Feld: Elektronen erfahren eine äußere Kraft, können sich jedoch nicht in Bewegung setzen, d.h. keine kinetische Energie aufnehmen

Grund: kin. Energie  $\rightarrow$  höhere Gesamtenergie, nicht möglich, da bereits alle Energiezustände im Band besetzt sind.

teilweise gefüllte Bänder: tragen zur Leitfähigkeit bei,  
viele Elektronen, viele unbesetzte Zustände,

äußeres E-Feld: Elektronen können Energie aufnehmen und höher liegende Energiezustände besetzen.  
 $\rightarrow$  quasi-freie Elektronen

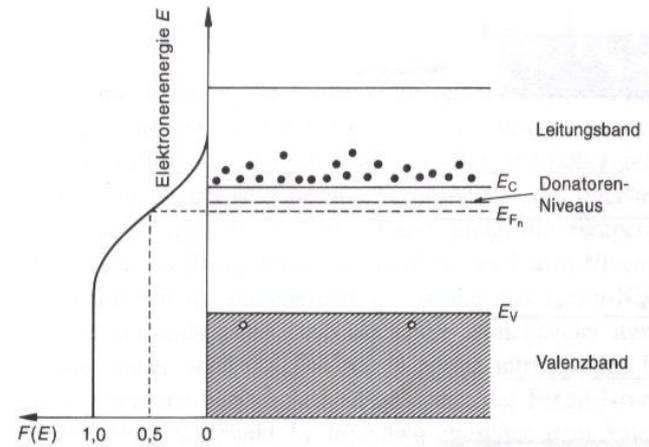


Lage des Fermi-Niveaus in einem intrinsischen Halbleiter

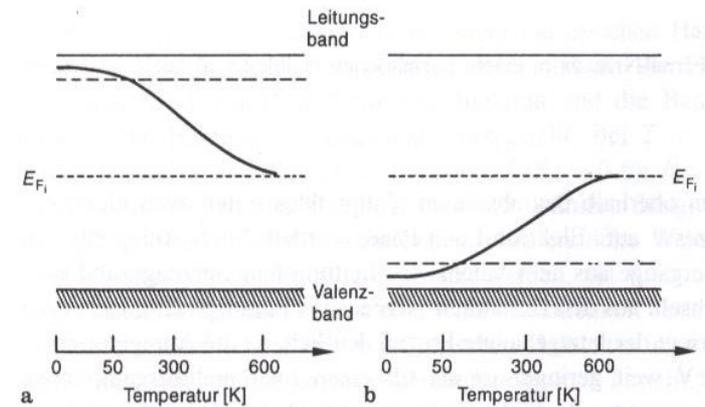
a) bei  $T = 0 \text{ K}$ ,

b) bei  $T > 0 \text{ K}$

(aus Ref. [4]).



Lage des Fermi-Niveaus in einem  $n$ -dotierten Halbleiter bei  $T > 0 \text{ K}$



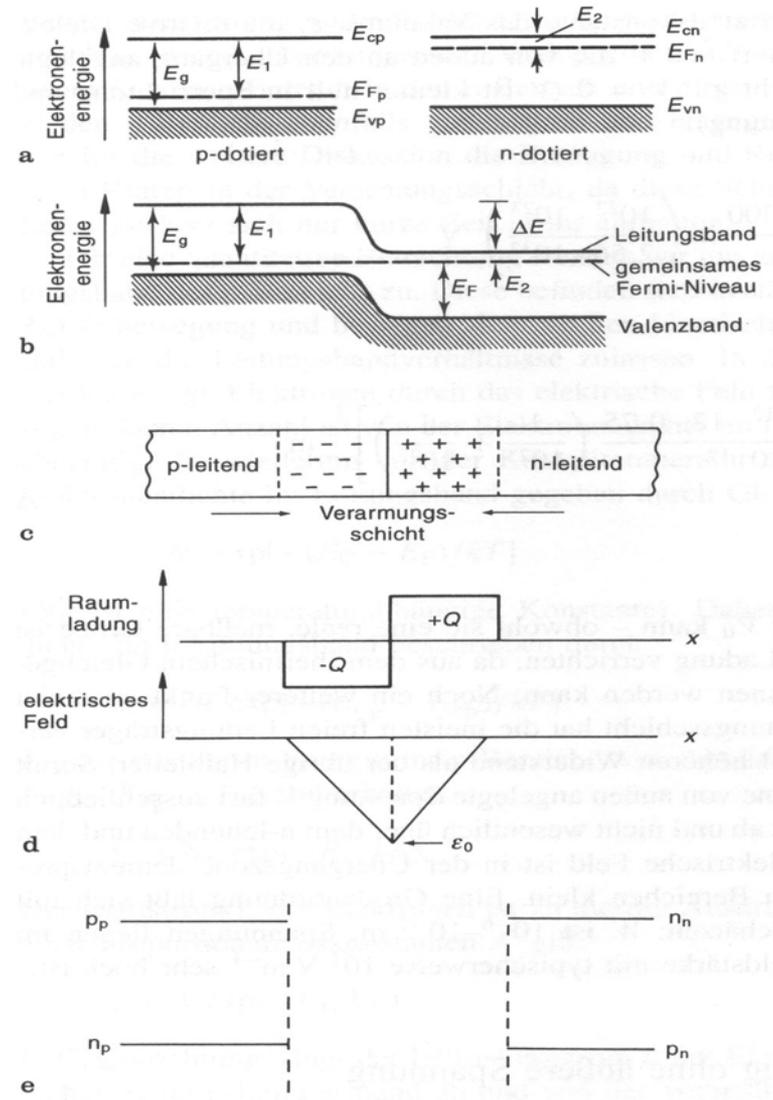
Verschiebung des Fermi-Niveaus mit steigender Temperatur in a) einem  $n$ -dotierten Halbleiter; b) einem  $p$ -dotierten Halbleiter

# 8.2 Der pn-Übergang

Abrupter Übergang zwischen p- und n-dotierten Bereichen in einem Halbleitermaterial  
 Übergangszone  $\sim 0.1 \mu\text{m}$

Kontakt  $\Rightarrow$

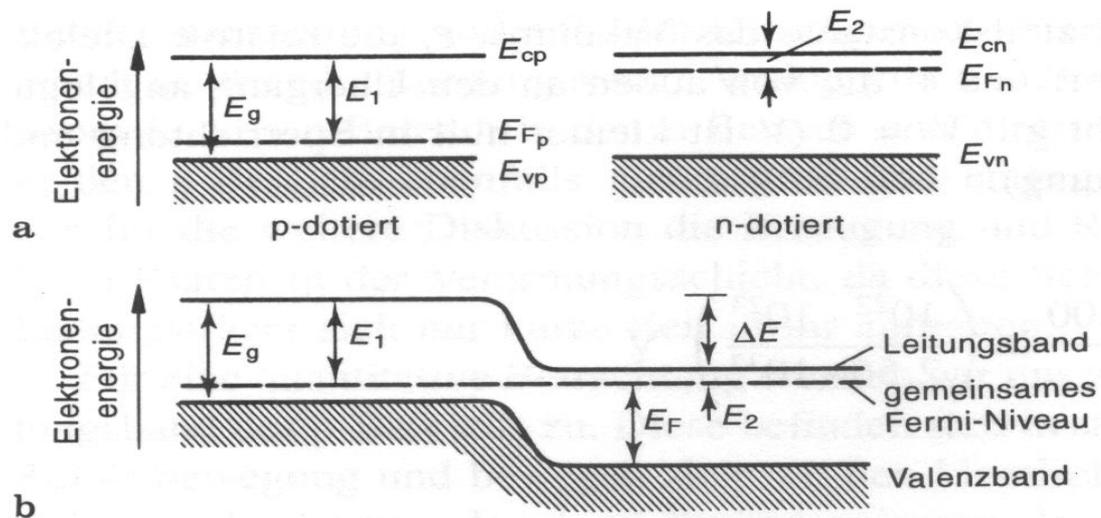
- Elektronen diffundieren aus dem  $n$ -Bereich (Elektronenüberschuß) in den  $p$ -Bereich (Elektronenmangel)
- (Konzentrationsgefälle  $\rightarrow$  Diffusionsstrom)
- Löcher diffundieren aus dem  $p$ -Bereich in den  $n$ -Bereich
- $n$ -Bereich: positive Donator-Atome bleiben zurück  $\rightarrow$  pos. Raumladung
- $p$ -Bereich: negative Akzeptor-Atome bleiben zurück  $\rightarrow$  neg. Raumladung
- Raumladungsschicht, die arm ist an freien Ladungsträgern (Verarmungsschicht)
- Diffusionsbewegung wird durch das elektrische Feld, das sich aufgrund dieser Raumladungen in der Verarmungsschicht aufbaut, abgebremst.

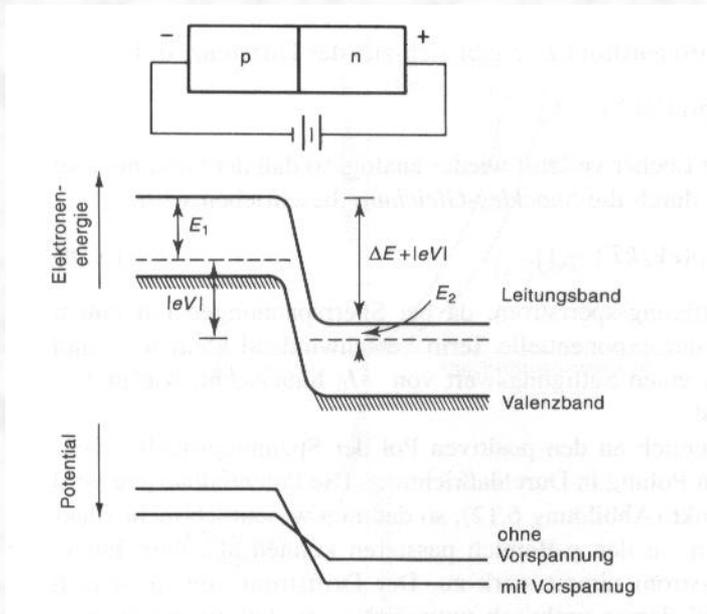


Der pn-Übergang im thermischen Gleichgewicht:  
 (a) Bandstruktur im p- und im n-Halbleiter vor dem Kontakt;  
 (b) Bandstruktur im Übergangsbereich nach dem Kontakt;  
 (c) Verarmungsschicht;  
 (d) Raumladungen und elektrisches Feld  
 (e) Ladungsdichten in den Bereichen außerhalb der Verarmungsschicht. (aus Ref. [4])

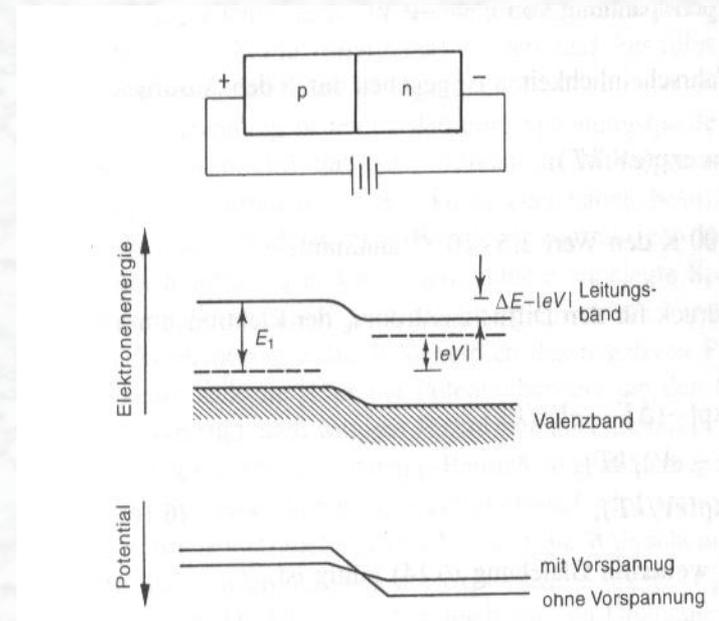
## Der pn-Übergang (cont.)

- elektrisches Feld  $\Rightarrow$  Kontakt- oder Diffusionsspannung  
 $\Rightarrow$  Gleichgewicht, kein Stromfluss
- Angleichen des Fermi-Niveaus über die Kontaktzone hinweg,  
Die Energie-Niveaus des  $p$ -Bereiches werden relativ zu denen des  $n$ -Bereichs angehoben.

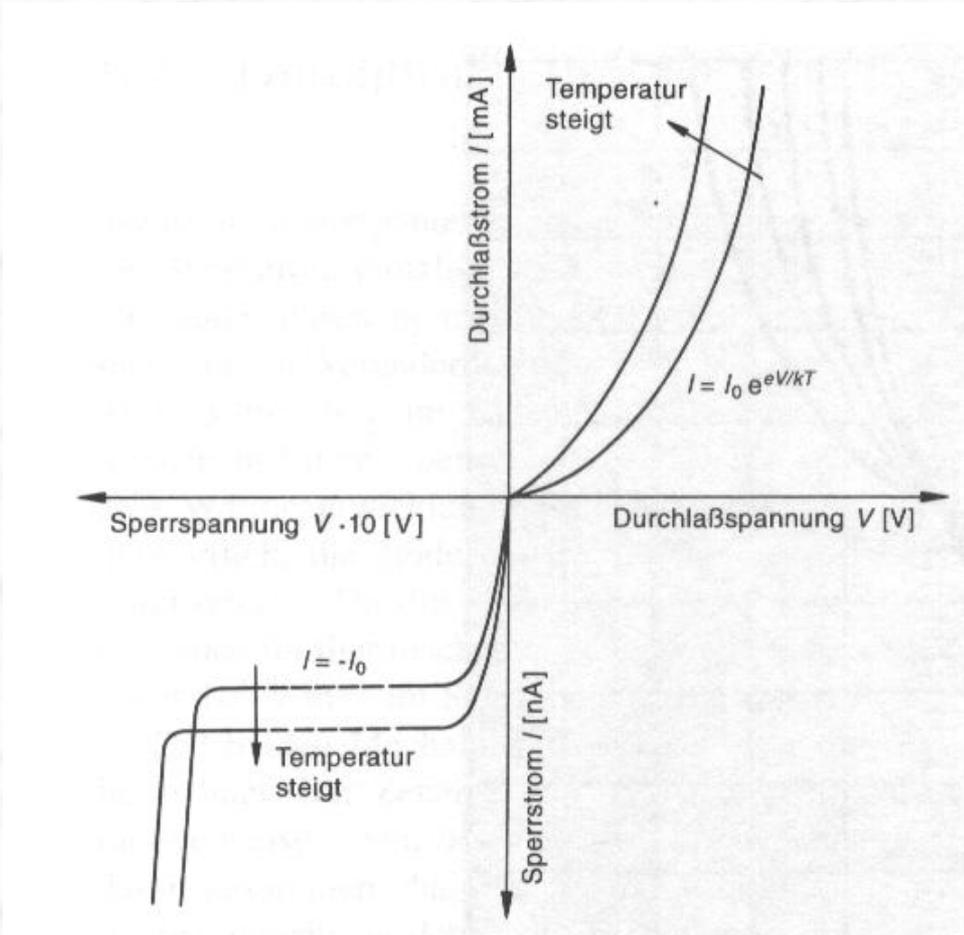




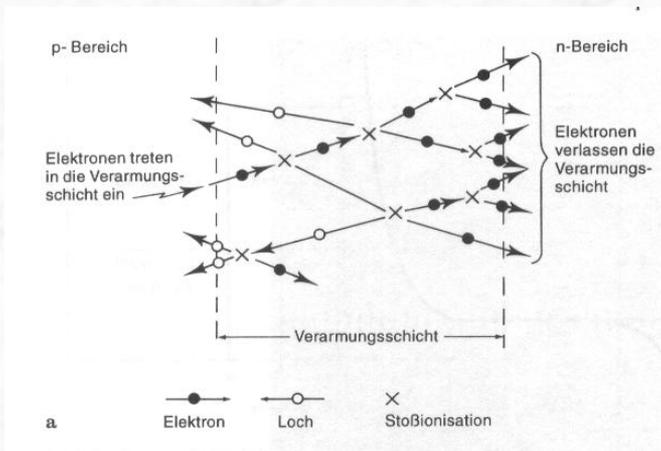
Schematischer Aufbau einer *pn*-Diode mit angelegter Sperrspannung. Dargestellt sind außerdem das Bandschema und der Potentialverlauf im Bereich des Übergangs (aus Ref. [4]).



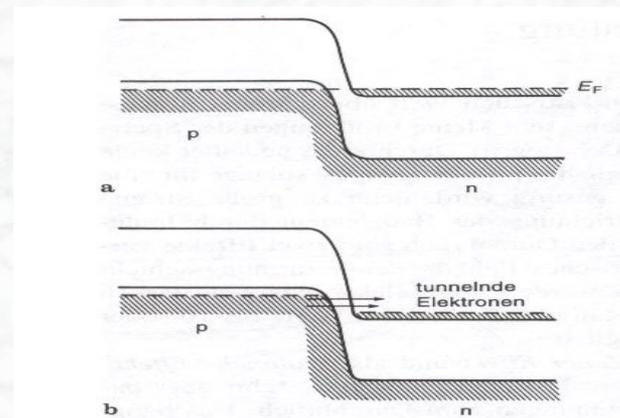
Schematischer Aufbau einer *pn*-Diode mit angelegter Durchlaßspannung. Dargestellt sind außerdem das Bandschema und der Potentialverlauf im Bereich des Übergangs (aus Ref. [4]).



Typische Kennlinie eines  $pn$ -Übergangs in Silizium  
 (man beachte die unterschiedliche Einteilung der Achsenabschnitte,  
 aus Ref. [4]).

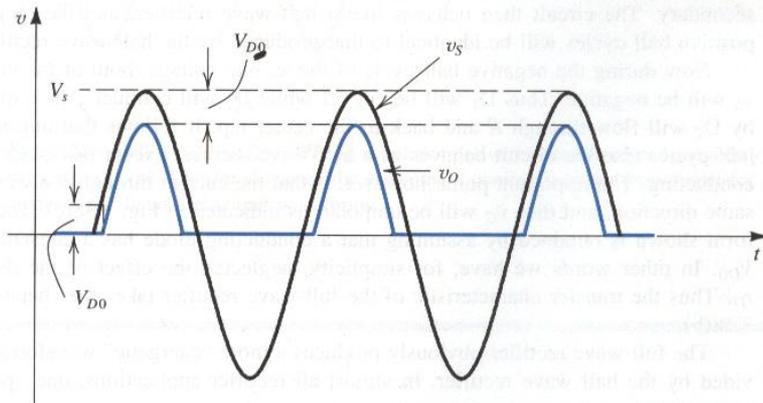
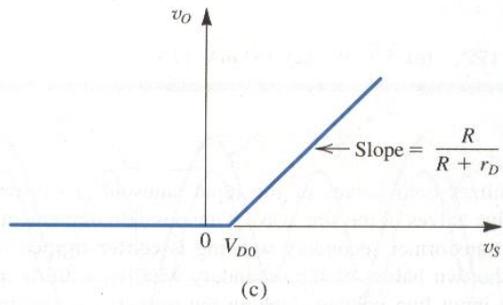
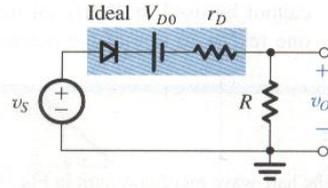
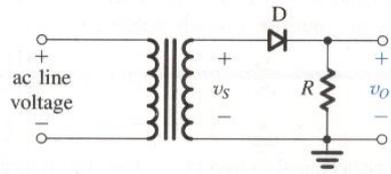


Avalanche-Durchbruch: Ladungsträgervielfachung durch ionisierende Stöße in der Verarmungsschicht (aus Ref. [4]).

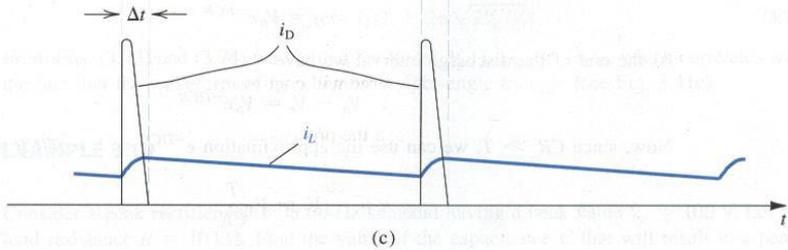
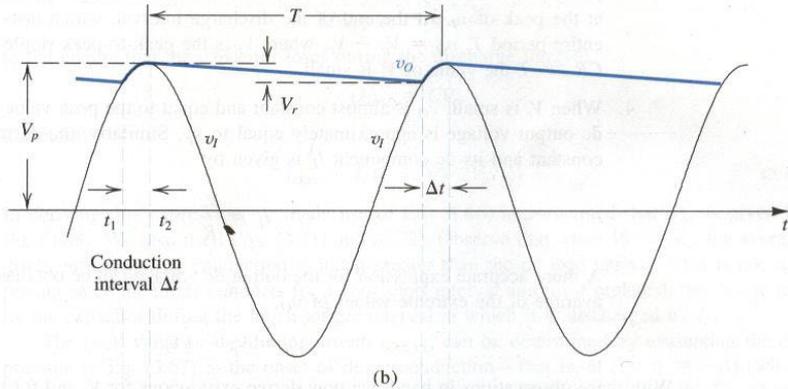
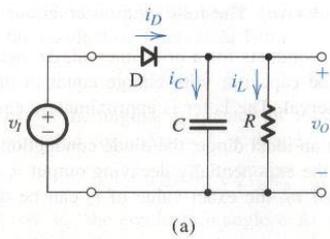


Zener-Durchbruch: a) pn-Übergang zwischen stark dotierten Halbleitern im thermischen Gleichgewicht; b) Durch Anlegen einer Sperrspannung können die Elektronen vom p- in den n-Bereich tunneln (aus Ref. [4]).

## 8.4 Schaltungen mit Dioden



Einfache Gleichrichterschaltung



Verlauf von Spannung und Strom für eine Gleichrichterschaltung mit Kondensator ( $RC \gg T$ )

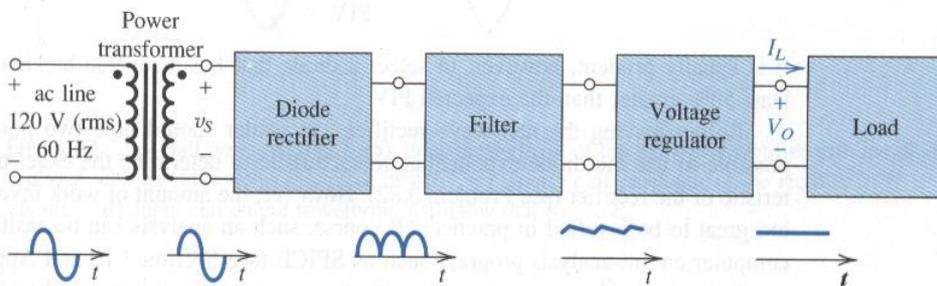
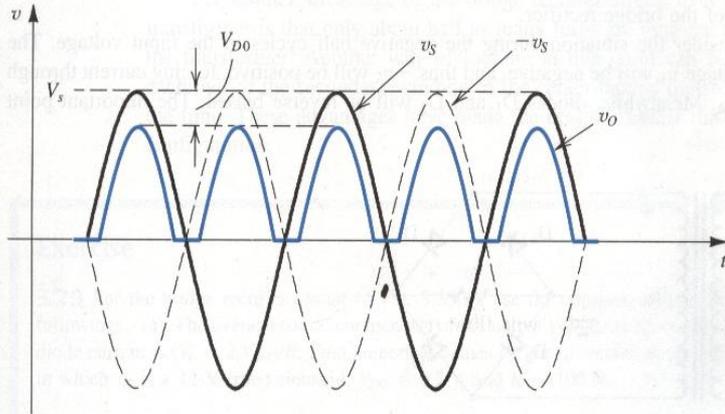
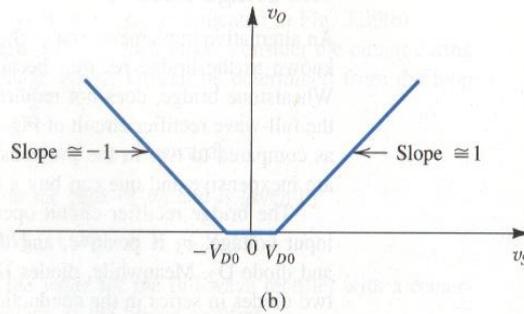
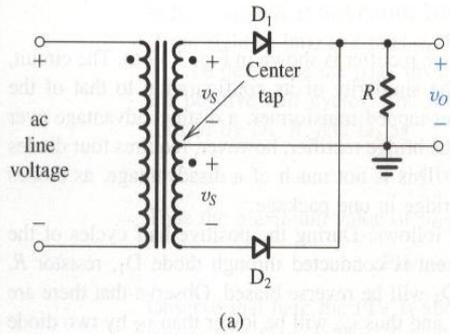
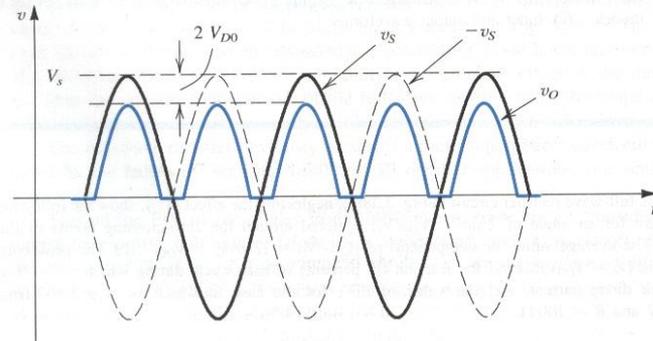
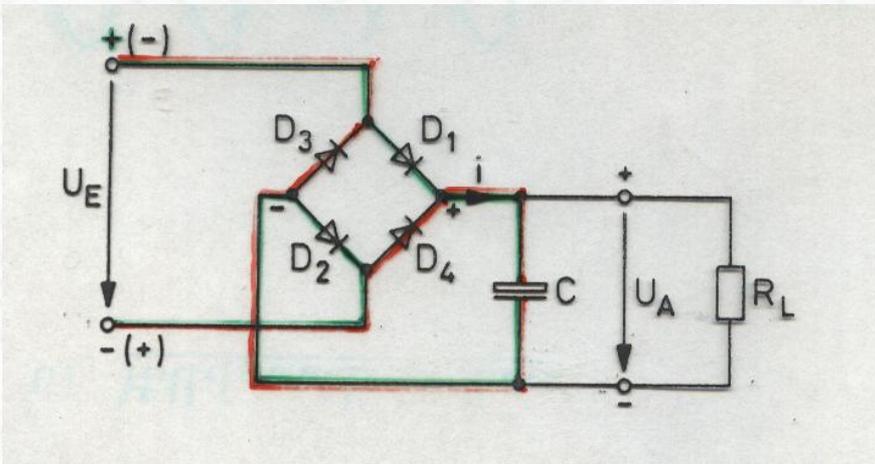


Fig. 3.36 Block diagram of a dc power supply

Stufen einer Gleichrichterschaltung



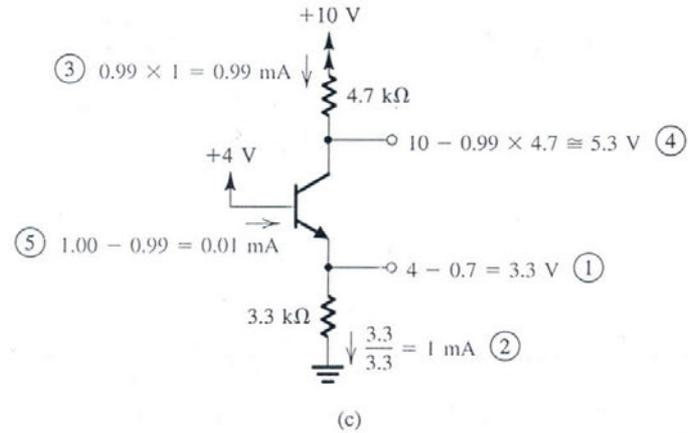
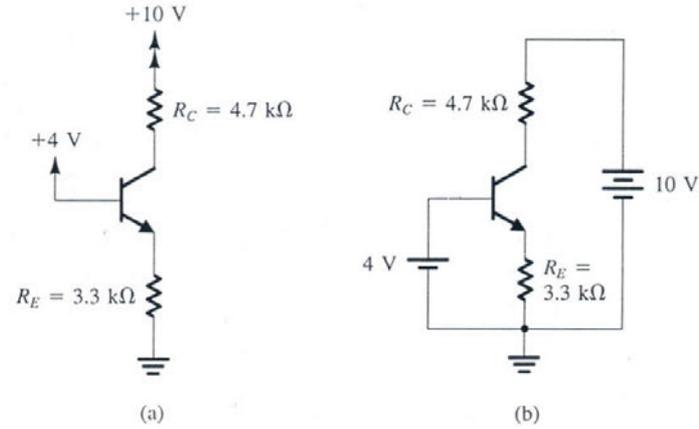
Doppelweg-Gleichrichtung



Gleichrichter-Brücke  
(Grätz-Schaltung)

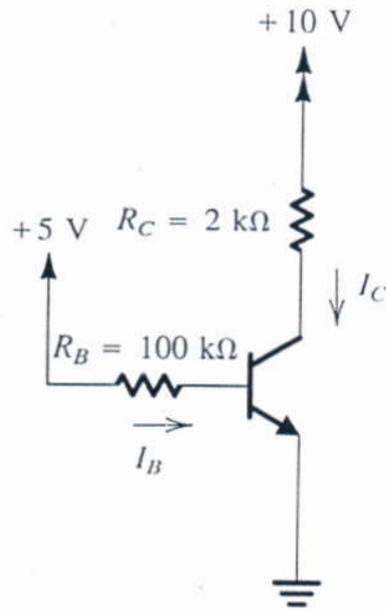
zu Kap. 8.5: Transistor

Beispiel:  $\beta = 100$  - 17 -  
 zu bestimmen: Ströme u. Spannungen

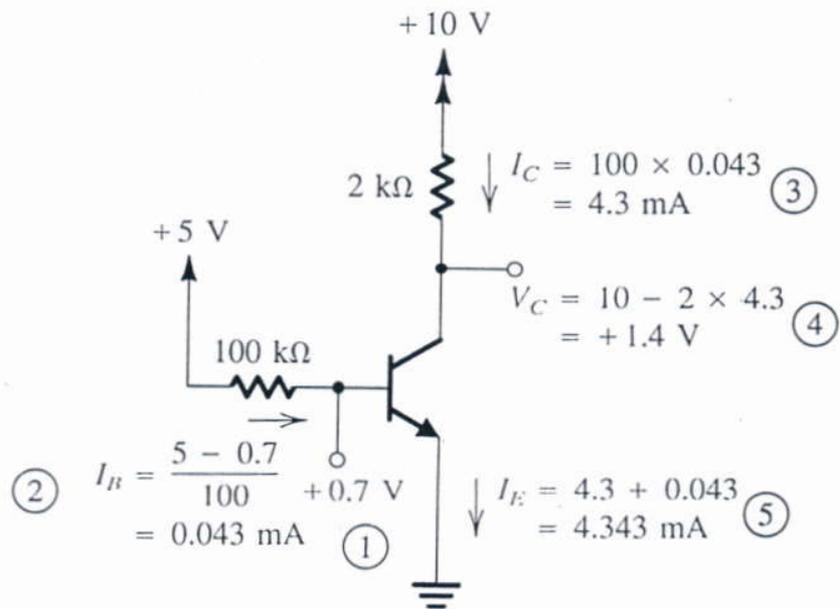


- ①  $U_E = 4V - 0.7V = 3.3V$
- ②  $I_E = U_E / R_E = \frac{3.3V}{3.3k\Omega} = 1mA$
- ③  $I_C = \frac{\beta}{\beta+1} I_E = 0.99mA$
- ④  $U_C = U^+ - R_C \cdot I_C = 10V - 0.99 \times 4.7k\Omega \cdot mA = 5.3V$
- ⑤  $I_B = I_C / \beta = I_E - I_C = 0.01mA$

Beispiel:  $\beta = 100$ , Basis vor Widerstand  
 zu bestimmen: Ströme und Spannungen



(a)



(b)

**Fig. 4.20** Example 4.5: (a) circuit; (b) analysis with the steps indicated by the circled numbers.