

---

# Elektronik für Informatiker

*Eine Einführung in Analoge und Digitale Systeme für Informatiker mit Elektronikgrundlagen  
und Signalverarbeitung*

Prof. Dr. Stefan Bosse

Universität Koblenz - Praktische Informatik

# Halbleiterbauelemente



Bisher haben wir uns mit passiven Bauteilen (Widerstände, Kapazitäten, Induktivitäten) beschäftigt. Das einzig aktive Element war der Operationsverstärker mit einem mathematischen Näherungsmodell.

# Halbleiter

Wir unterscheiden: Leiter, Halbleiter, Isolatoren.

**Tabelle 4.1.:** Spezifischer Widerstand einiger Metalle, Halbleiter und Isolatoren

Stoffgruppe	Material	spezifischer Widerstand $\rho$ in $\Omega \text{ m}$
<b>Leiter</b>	Silber	$1.59 \cdot 10^{-8}$
	Kupfer	$1.68 \cdot 10^{-8}$
	Aluminium	$2.65 \cdot 10^{-8}$
<b>Halbleiter</b>	Germanium, rein	$600 \cdot 10^{-3}$
	Germanium, dotiert	$(1 \dots 600) \cdot 10^{-3}$
	Silizium, rein	2300
	Silizium, dotiert	$0.1 \dots 2300$
<b>Isolatoren</b>	Glas	$10^9 \dots 10^{12}$
	Teflon	$> 10^{13}$

Tab. 1. Spezifischer Widerstand einiger Metalle, Halbleiter und Isolatoren

# Halbleiter

- Wie bei Metallen sind die elektrischen Leitungsphänomene im klassischen Halbleiter rein elektronischer Art, d.h. die Ladungsträger sind Elektronen



Grundlegend verschieden ist jedoch die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit bei Leitern und bei Halbleitern. Bei Leitern sinkt die Leitfähigkeit mit steigender Temperatur, während sie bei Halbleitern wächst!

- Alle Halbleiterbauelemente basieren auf elektrischen Leitungsphänomenen und deren Beeinflussung durch elektrische oder andere physikalische (magnetische) bzw. chemische Größen.
- Halbleiterphysik und Halbleitertechnologie bilden die Basis der heutigen Elektronik.

Zur Vertiefung: Elektronik für Informatiker, Kap. 4.2 -4.3 (Halbleitermaterialien, Ausgewählte festkörperphysikalische Grundlagen).

## Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit

Es wird komplizierter: Halbleiter können rein oder wie bei unseren Bauteilen mit Fremdatomen (also anderes Material) dotiert sein (eingebracht). Dann ändern sich sowohl die elektrischen also temperaturabhängigen Eigenschaften.

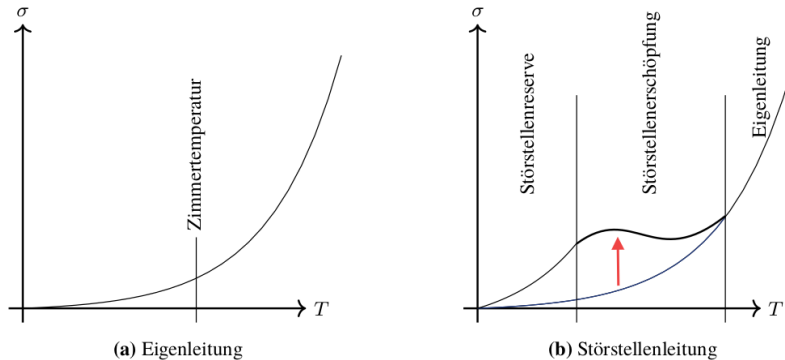


Abb. 1. Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit für eigenleitende (reine) und dotierte Halbleiter, schematisch

# Halbleiterbauelemente

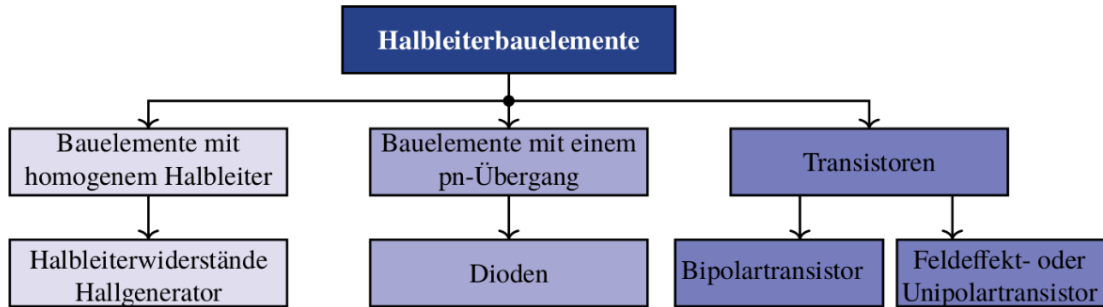


Abb. 2. Halbleiterbauelemente – eine erste Übersicht

## Der pn-Übergang



Als pn-Übergang bezeichnet man eine Halbleiterstruktur, in welcher ein p-leitendes und ein n-leitendes Gebiet so eng in einem Kristall benachbart sind, dass beide Gebiete miteinander wechselwirken, wodurch neue elektronische Eigenschaften entstehen.

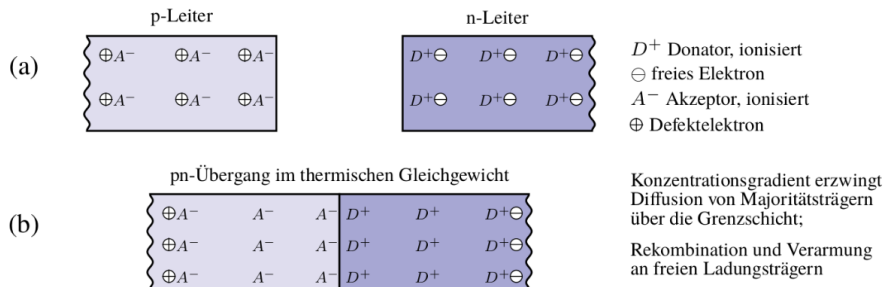
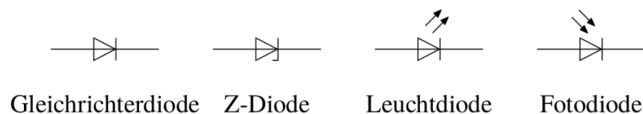


Abb. 3. (a) Ein p-Material (positive Überschussladungen, oder besser fehlende Elektronen) und ein getrenntes n-Material (negative Überschussladungen, Elektronen) (b) zusammengefügt mit Grenzfläche

# Die Diode

Dioden: Bauelemente mit einem pn-Übergang

- Gleichrichterdioden,
- Zener-Dioden (Z-Dioden),
- Leuchtdioden,
- Fotodioden.



---

Abb. 4. Schaltzeichen verschiedener Dioden



## Die Diode

Gleichrichterdioden dienen dazu, Wechselspannung gleich zu richten, d.h. eine am Eingang der Gleichrichterschaltung angelegte Wechselspannung wird in eine pulsierende Gleichspannung am Ausgang umgesetzt. Solche Schaltungen werden in praktisch allen Geräten genutzt, die mit Wechselspannung gespeist werden, aber intern Gleichspannung benötigen.

Bei Zener-Dioden wird bei Betrieb in Sperrrichtung der Durchbruch bei einer wohldefinierten Spannung  $U_Z$  technisch genutzt. Der Sperrstrom steigt dann exponentiell an und muss begrenzt werden, um die Z-Diode vor Zerstörung zu schützen. Die Durchbruchsspannung kann während des Herstellungsprozesses eingestellt werden; sie kann etwa zwischen 3 V und 100 V liegen.

- Z-Dioden werden zur Spannungsstabilisation benutzt. Dazu wird die Z-Diode über einen Vorwiderstand in Sperrrichtung betrieben und über der Z-Diode wird die auf die Spannung  $U_Z$  stabilisierte Gleichspannung abgegriffen

# Die Diode

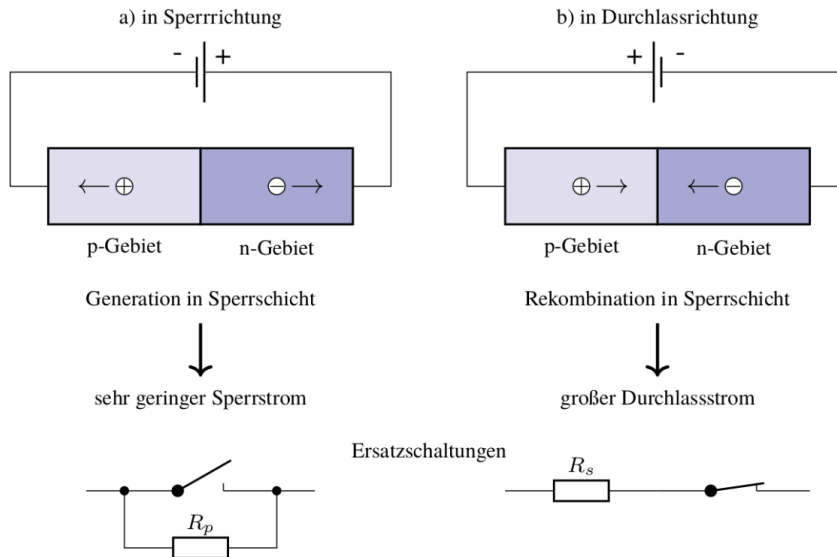
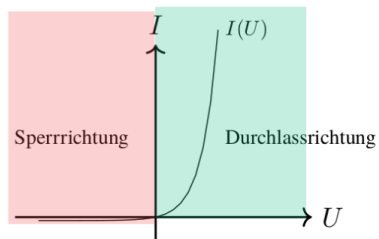
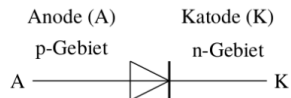


Abb. 5. Diode: pn-Übergang in Sperr- und in Durchlassrichtung

# Die Diode



(a) Kennlinie



(b) Schaltzeichen

---

Abb. 6. Kennlinie eines pn-Überganges und Diodenschaltzeichen

[diode1.txt]



## Die Diode

Für den Strom durch den pn-Übergang als Funktion der außen angelegten Spannung erhält man unter Berücksichtigung verschiedener Halbleitereigenschaften, der Dotierung und aller inneren Teilströme die Gleichung

$$I = I_S \left( e^{\frac{eU_{AK}}{kT}} - 1 \right)$$

Dabei ist  $I_S$  der sog. Sättigungsstrom, der sich aus Eigenschaften und Dotierung der eingesetzten Halbleiter ergibt

- Näherungsweise kann man den pn-Übergang als einen von der Spannungsrichtung gesteuerten Schalter betrachten

## Der Bipolartransistor

Bipolartransistoren: Bauelemente mit zwei pn-Übergängen.

- Um zwei pn-Übergänge in einem Bauelement zu realisieren, sind zwei Zonenfolgen möglich, nämlich die Zonenfolgen n-p-n und p-n-p; dementsprechend spricht man vom npn-Transistor und vom pnp-Transistor
- Die Elektroden heißen bei beiden Transistorarten Emitter (E), Basis (B) und Kollektor (C).
- Die am Transistor anliegenden Spannungen erhalten einen Doppelindex, der angibt, zwischen welchen Elektroden die Spannung gemessen wird.

## Der Bipolartransistor

- So steht  $U_{BE}$  für die von der Basis zum Emmitter gemessene Spannung, die Basis-Emmitter-Spannung. Dabei gilt  $U_{BE} = -U_{EB}$
- Entsprechend ist  $U_{CE}$  die Spannung zwischen Kollektor und Emmitter, also die Kollektor-Emmitter-Spannung und  $U_{CB}$  die Kollektor-Basis-Spannung.
- Kollektorstrom  $I_C$ , Basisstrom  $I_B$  und Emmitterstrom  $I_E$ , werden jeweils zum Transistor hin fließend betrachtet.

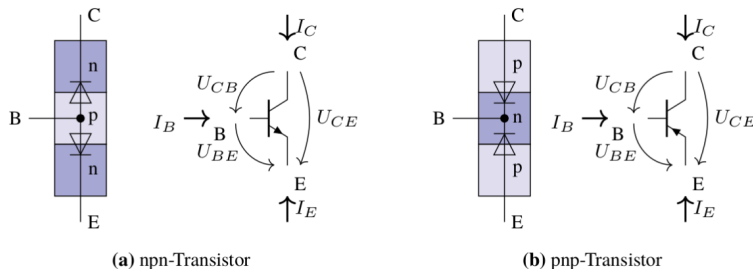


Abb. 7. Bipolartransistoren, Zonenfolgen und Schaltsymbole mit Zählpfeilen

## Der Bipolartransistor

Es gilt die Knotenpunktregel für die Ströme und für Spannungen die Maschengleichung:

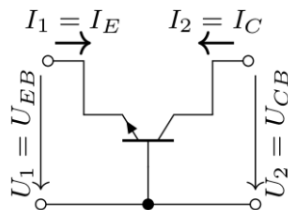
$$I_E + I_B + I_C = 0$$

$$U_{CE} = U_{CB} + U_{BE}.$$

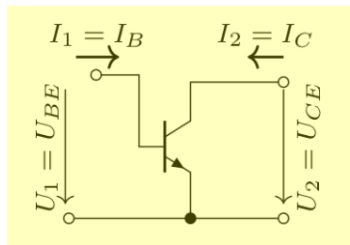
- Mit wachsender Basis-Emitter-Spannung  $U_{BE}$  wächst der Basisstrom  $I_B$ ; der Zusammenhang entspricht einer Diodenkennlinie.
- Mit der Basis-Emitter-Spannung respektive mit dem Basisstrom kann so der Kollektorstrom gesteuert werden. Beim normalen Betrieb ist die Spannung  $U_{BE}$  eine Durchlassspannung; ihr Wert beträgt bei einem Si-Transistor ca. 0,7 V.



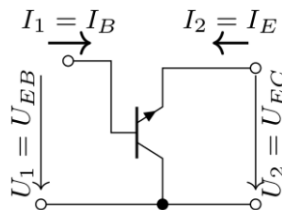
## Der Bipolartransistor



(a) Basisschaltung



(b) Emitterschaltung



(c) Kollektorschaltung

Abb. 8. Transistorgrundschaltungen in Vierpoldarstellung

Die Grundsaltungen kann man mit dem Verhältnis zwischen gesteuertem Strom im Ausgangskreis und steuerndem Strom im Eingangskreis charakterisieren.

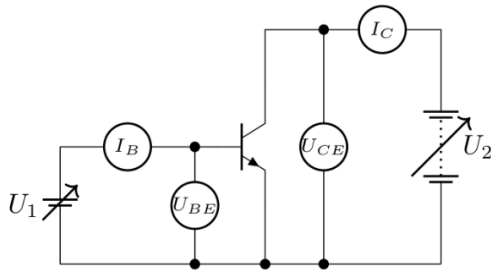
- Der Quo-tient heißt Gleichstromverstärkung und wird für die Basisschaltung mit A, für die Emitter- schaltung mit B und für die Kollektorschaltung mit C bezeichnet:

$$A = \frac{|I_C|}{|I_E|} < 1,$$

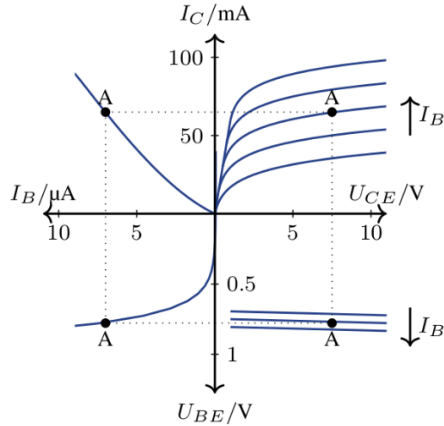
$$B = \frac{|I_C|}{|I_B|} = \frac{A}{A-1} \gg 1$$

$$C = \frac{|I_E|}{|I_B|} = \frac{1}{1-A} \gg 1$$

# Der Bipolartransistor



(a) Messanordnung



(b) Kennlinienfeld

Abb. 9. Bipolartransistor: Messanordnung zur Kennlinienaufnahme in Emitterschaltung und Kennlinienfeld, schematisch

## Der Bipolartransistor

Vier-Quadranten-Kennlinienfeld:

1. Quadrant, Ausgangskennlinienfeld:  $I_C = f(U_{CE})$  mit  $I_B$  als Parameter,
2. Quadrant, Übertragungskennlinie:  $I_C = f(I_B)$ ,
3. Quadrant, Eingangskennlinie:  $U_{BE} = f(I_B)$  und
4. Quadrant, Rückwirkungskennlinien:  $U_{BE} = f(U_{CE})$  mit  $I_B$  als Parameter.

Die Kennlinien sind stark nichtlinear.

# Der Bipolartransistor



Der Bipolartransistor ist also eine stromgesteuerte Stromquelle. Das unterscheidet ihn vom Feldeffekttransistor, der eine spannungsgesteuerte Spannungsquelle (im Ersatzmodell) ist.

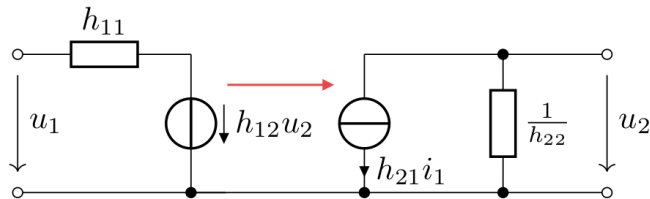


Abb. 10. Bipolartransistor: Kleinsignal-Ersatzschaltbild und Ersatzmodell

[npn1.txt]



# Der Feldeffekttransistor