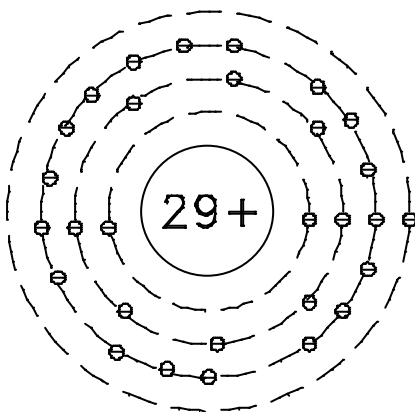


Halbleiterphysik

1. Physikalische Definition des elektrischen Stromes

Nach dem Bohrschen Atommodell sind Atome aus positiven und negativen Ladungsträgern aufgebaut. Die positiven Ladungsträger (Protonen) bilden den Atomkern, die negativen Ladungsträger (Elektronen) kreisen in Bahnen um den Atomkern, die schalenförmig angelegt sind. Die kinetische Energie eines Elektrons steigt mit seiner Entfernung vom Atomkern, hierbei sind die Energiesprünge gequantelt. Ein Atom hat ebenso viele Elektronen wie Protonen und ist somit **nach außen elektrisch neutral**.

Jedes Atom ist bestrebt, eine sog. **Edelgashülle** zu erreichen. Dazu werden Elektronen der äußersten Schale an Nachbaratome abgegeben oder von einem Nachbaratom aufgenommen. Elektronen, die ihr Atom verlassen haben, können ein beliebiges Energieniveau annehmen (d.h. daß dieser Zustand nicht der Quantelung unterliegt). Die Edelgashülle ist erreicht, wenn sich auf einer Schale n genau $2 \cdot n^2$ Elektronen befinden. Der Wechsel von Elektronen von einem Atom zum anderen führt dazu, daß beide Atome nicht mehr elektrisch neutral sind, das Spender-Atom ist positiv, das Empfänger-Atom negativ geladen (Ionenbildung).



Aufbau eines Atoms am Beispiel des Kupferatoms. Die 28 inneren Elektronen sind fest an den Atomkern gebunden. Die Elektronen auf den äußersten Schalen nennt man Valenzelektronen. Sie führen ungerichtete Schwirrbewegungen aus.

Bei Anlegen einer elektrischen Spannung wird dieser Schwirrbewegung eine gerichtete Bewegung überlagert. Diese Bewegung nennt man elektrischen Strom.

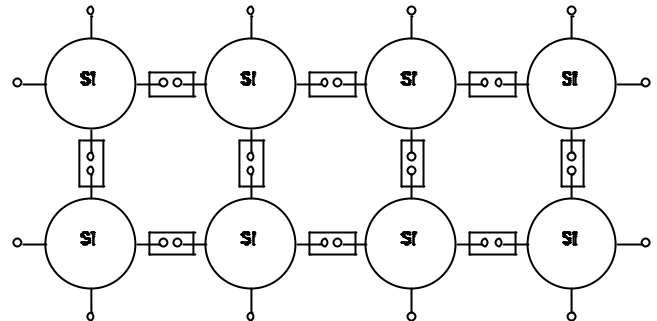
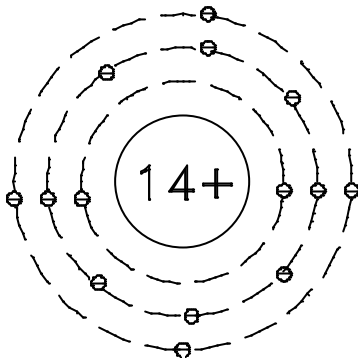
2. Metallische und nichtmetallische Leiter

2.1 Metalle

Zur Entstehung eines elektrischen Stromes werden **freie** Ladungsträger benötigt. In metallischen Leitern sind sie als Valenzelektronen auf den äußeren Elektronenschalen vorhanden. Ihre Anzahl ist unabhängig von der Temperatur.

Allerdings nimmt mit der Temperatur die Schwirrbewegung zu, gleichzeitig die Eigenbewegung der Atome um ihre Ruhelage. Beides bewirkt, dass zum Erzeugen einer gerichteten Bewegung mehr Energie notwendig ist. Für denselben Strom wird also mehr Spannung benötigt, d.h. der Widerstand steigt. **Metallische Leiter führen ausschließlich einen Elektronenstrom. Ihr Widerstand steigt in geringem Maße mit der Temperatur.**

2.2 Reine Halbleiter



In nichtmetallischen Leitern (4-wertige Elemente, z.B. Silizium, Germanium) erreichen die Elemente ihre Edelgashülle durch das Eingehen von Paarbindungen. Jeweils zwei Atomkerne „teilen“ sich ein Elektronenpaar. Freie Ladungsträger sind nur vorhanden, soweit Paarbindungen zeitweilig aufbrechen. Die Häufigkeit des Aufbrechens von Paarbindungen ist abhängig von der Temperatur des Stoffes. Für die Konzentration n der freien Ladungsträger in einem Halbleiter gilt der Zusammenhang

$$n \cong e^{-\frac{W}{K \cdot T}}$$

mit $K = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws} \cdot \text{K}^{-1}$ (Boltzmannkonstante) und der Bindungsenergie W der Elektronen ($1,15 \cdot 10^{-19} \text{ Ws}$ für Si, $1,79 \cdot 10^{-19} \text{ Ws}$ für Ge).

Die Leitfähigkeit bzw. der elektrische Widerstand von Halbleitern ist daher stark temperaturabhängig. Bei $T = 0$ (-273°C) sind Halbleiter Nichtleiter.

Das Aufbrechen einer Elektronenpaarbindung („Generation“) stellt einen doppelten Effekt dar: zum einen entstehen freie Elektronen, zum anderen entsteht dort, wo das Elektron freigesetzt wurde, ein Fehlplatz, ein sog. Defektelektron oder Loch. Dieses Loch wirkt wie ein positiver Ladungsträger.

Ohne Einwirkung einer äußeren Spannung führen die freigesetzten Elektronen ungerichtete Schwirrbewegungen aus. Gerät ein Elektron dabei in die Nähe eines Lochs, kann es die Bindungsfunktion wieder erfüllen. Es „fällt“ in das Loch und füllt es aus („Rekombination“).

Da beim Freiwerden eines Elektrons ein Loch entsteht, ist **im reinen Halbleiter die Konzentration der freien Elektronen n zu jedem Zeitpunkt genauso groß wie die der Löcher p .**

Bei Anlegen einer elektrischen Spannung fließt ein bestimmter Strom. Man spricht von **Eigenleitung** des Halbleiters. Er setzt sich aus zwei Komponenten zusammen:

1) **Elektronenstrom**, verursacht durch die Bewegung von freien Elektronen

2) **Löcherstrom**, verursacht durch schrittweises Springen von Elektronen in Löcher

Die Anregung zur Generation kann auch durch andere Energiequellen, z.B. Wärme, erfolgen. Ein Beispiel hierfür ist hier die Anregung durch Licht (fotoelektrischer Effekt). Andererseits kann die Energieabgabe bei der Rekombination ebenfalls durch Licht (Entstehung von Photonen) erfolgen. Optokoppler, bei denen der „Dunkelwiderstand“ bei einigen $M\Omega$, der „Hellwiderstand“ jedoch nur bei wenigen $K\Omega$ liegt, sind eine Anwendung dieses Effekts, Luminiszenzdiolen (LED) eine andere.

Das Vorangegangene bezieht sich auf reine Halbleiterwerkstoffe. Für die Herstellung von Halbleiterbauelementen müssen diese Stoffe so rein gehalten werden, daß auf 10^7 Atome höchstens 1 Fremdatom kommt. Dies entspricht beispielsweise der Verunreinigung eines 50m langen, 20m breiten und 2m tiefen Wasserbeckens mit einem Fingerhut voll Tinte.

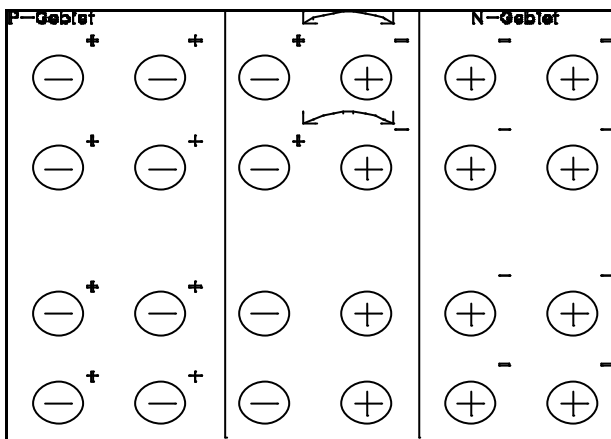
3. Dotierung von Halbleitern

Durch Diffusion können in einen reinen Halbleiter sog. Störatome eingebracht werden (**Dotierung**). Je nachdem, ob es sich um 3 oder 5wertige Störatome handelt, wird dadurch ein positiver oder negativer Ladungsträgerüberschuß verursacht. Zu beachten ist, daß der Werkstoff nach wie vor nach außen elektrisch neutral bleibt, da ja die Anzahl der positiven Ladungen immer noch genauso groß ist wie die der negativen. Lediglich der kristalline Aufbau ist gestört, das Verhältnis von freien zu gebundenen Ladungsträgern hat sich verschoben. 3-wertige Störatome rufen einen positiven Überschuß (P-leitendes Material entsteht) hervor, da sie Elektronen binden, die nun nicht mehr als freie Elektronen verfügbar sind. 5-wertige Atome bringen zusätzliche Elektronen in den Stoff ein und verursachen damit einen negativen Ladungsträgerüberschuß (N-leitendes Material). Die Leitfähigkeit, die durch die Dotierung ausgelöst wird, nennt man **Fremdleitung** oder **Störstellenleitung**. Dotierte Halbleiter haben stets Eigen- und Störstellenleitung. Stärkere Dotierung hat logischerweise ein größeres Verhältnis von Fremd- zu Eigenleitung zur Folge.

Fremdatome, die im Kristallverbund Elektronen abgeben (also 5-wertige Elemente, z.B. Antimon, Phosphor, Arsen), nennt man **Donatoren**. Das dabei entstehende Halbleitermaterial bezeichnet man als **n-leitend**, da die Anzahl freier negativer Ladungsträger überwiegt. Umgekehrt sind für die Herstellung von **p-leitendem** Material (mit Überschuß an positiven Ladungsträgern) 3-wertige **Akzeptoren** erforderlich (z.B. Bor, Aluminium, Gallium). Die in der Überzahl vorhandenen Ladungsträger (Elektronen im n-Leiter, Löcher im p-Leiter) heißen **Majoritätsträger**, die in der Minderheit vorkommenden dagegen **Minoritätsträger**.

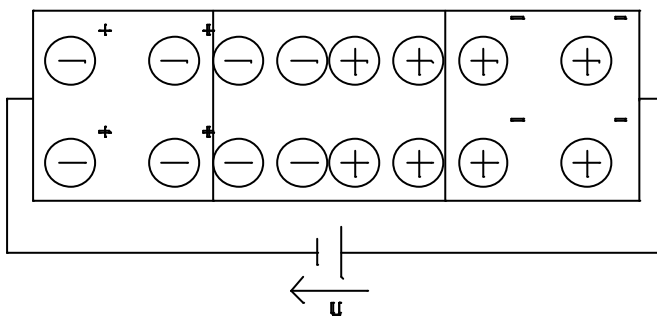
4. PN - Übergang

Bringt man P- und N-leitende Schichten sehr nah zusammen, entsteht ein sog. PN-Übergang. Unmittelbar an diesem Übergang findet ein Ladungsträgerausgleich statt und die Grenzschicht verarmt an freien Ladungsträgern. Ein weiterer Ladungsträgerübertritt wird verhindert, so daß insgesamt die beiden Gebiete in ihrem ursprünglichen Konzentrationszustand erhalten bleiben.

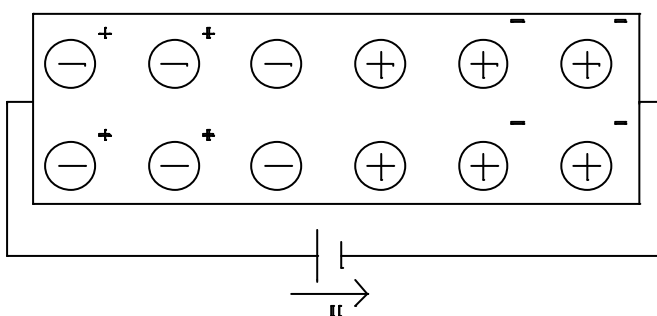


Diffusion an einem PN-Übergang

Schließt man an einen solchen PN-Übergang eine äußere elektrische Spannung an, so hängt das Verhalten von der Polarität ab.



PN-Übergang in Sperrichtung: die Ladungsträger müssen zum Durchqueren der Sperrschicht durch eine Zone gleichnamiger Ladungsträger. Die Sperrschicht wird dadurch verbreitert, was einen hohen Innenwiderstand des Halbleiters bewirkt.



PN-Übergang in Durchlaßrichtung: die Sperrschicht wird durch das Eindringen der Ladungsträger verkleinert bzw. ganz abgebaut: der Halbleiter hat einen geringen Innenwiderstand.

Fazit:

Der Innenwiderstand von dotierten Halbleitern im Schalterbetrieb hängt von der Stromrichtung ab. Im Idealfall können Halbleiter als Schalter angesehen werden, die in Durchlaßrichtung völlig geschlossen sind ($R=0$, $U=0$), in Sperrichtung völlig geöffnet ($I=0$, $R=\infty$).

Rechnerische Behandlung der Strom- und Spannungsverhältnisse bei Halbleitern

Im Gegensatz zu Leitern besteht bei Halbleitern, also Dioden und Transistoren, kein linearer Zusammenhang zwischen der angelegten Spannung und dem daraus resultierenden Strom. Gesucht ist also $I_D = f(U_D)$.

Hier sei nochmals an den Zusammenhang zwischen Temperatur und freien Ladungsträgern erinnert:

$$n \cong e^{-\frac{W}{K \cdot T}}$$

Der Strom in Leitern ist aber eine direkte Funktion der Anzahl von frei beweglichen Ladungsträgern, diese wiederum ergeben sich aus der Größe der wirksamen Spannung. Also kann geschlossen werden, daß

$$I_D \cong e^{-\frac{W}{K \cdot T}}$$

Ersetzt man die Arbeit W , die für die Elektronenverschiebung aufgebracht werden muß, durch die angelegte Spannung und die Elementarladung q eines Elektrons, so erhält man mit $W = U \cdot q$

$$I_D \cong e^{-\frac{q \cdot U}{K \cdot T}}$$

Die Größen q , U und T faßt man zusammen zur sog. Temperaturspannung:

$$U_T = \frac{K \cdot T}{q}$$

Sie läßt sich mit $K=1.38 \cdot 10^{-23} \text{ WsK}^{-1}$ und $q=1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$ für jede Temperatur berechnen. Für normale Umgebungstemperatur liegt sie bei 26 mV. Man erhält damit

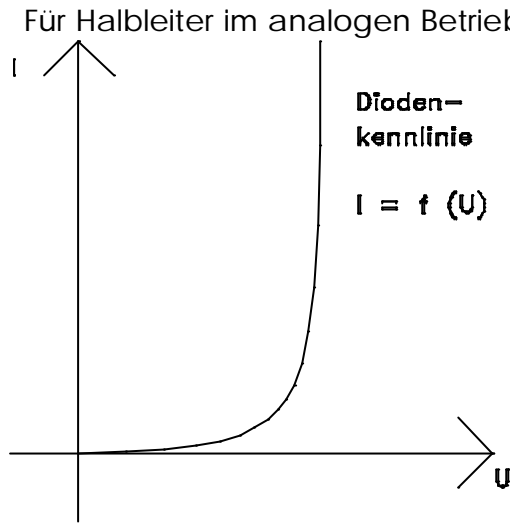
$$I_D = C1 * (e^{\frac{U}{U_T}} + C2)$$

Wegen der Gleichheit der Dimensionen muß C1 einen Strom darstellen, der mit I_s bezeichnet werden soll, C2 eine dimensionslose Zahl:

$$I_D = I_s * (e^{\frac{U}{U_T}} + C2)$$

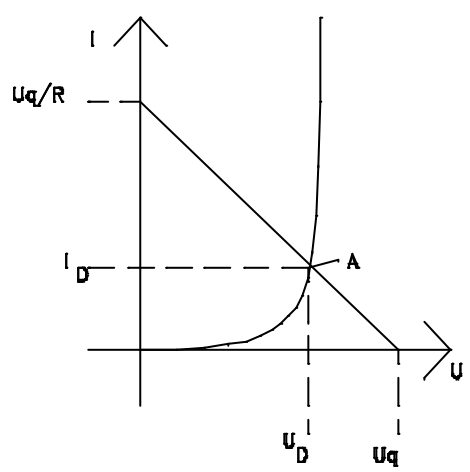
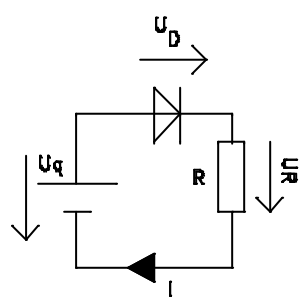
I_s ist der sog. Sperr-Sättigungsstrom der Diode. Liegt keine Spannung am PN-Übergang ($U=0$), so kann auch kein Strom fließen ($I_D = 0$). Aus dieser Bedingung erhält man $C2 = -1$ und somit die endgültige Funktion:

$$I_D = I_s * (e^{\frac{U}{U_T}} - 1)$$



Für Halbleiter im analogen Betrieb gelten Kennlinien, die den Strom als Funktion der angelegten Spannung darstellen. Sie haben exponentiellen Verlauf. Der „Spannungsknick“ ist materialtypisch und liegt für Germaniumhalbleiter bei ca. 0.3V, für Siliziumhalbleiter bei ca. 0.7V. Aus diesen Kennlinien, die als Datenblätter vom Hersteller zur Verfügung stehen, läßt sich für alle Spannungen der Strom und somit der differentielle Widerstand des Halbleiters entnehmen. Er entspricht der Steilheit der Kennlinie (di / dU) im Arbeitspunkt.

Im realen Stromkreis müssen nun anhand der Kennlinie die tatsächlichen Werte für Diodenstrom und -spannung (Arbeitspunkt) ermittelt werden. Die Kennlinie stellt eine von zwei Ortskurven für den Arbeitspunkt dar. Die zweite Ortskurve erhält man aus den Kenngrößen der Schaltung:



Ermittlung des Arbeitspunktes A einer Diode.

Für $I = 0$ ist $UR = I \cdot R = 0$, und nach der Maschenregel $UD = Uq$.

Für $UD = 0$ ist entsprechend $UR = Uq$ und $ID = I = Uq/R$.

Dies entspricht der Widerstandsgeraden des Widerstandes R in 2-Punkte-

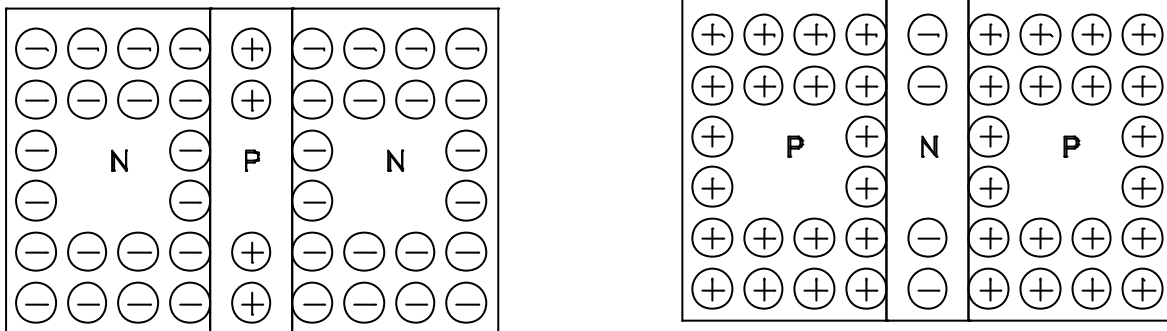
Form. Sie ist die zweite Ortslinie für UD bzw. ID .

Mehrschichtige Halbleiter

1. Bipolare Transistoren

1.1 Aufbau und Wirkungsweise

Bipolare Transistoren bestehen grundsätzlich aus einer Kombination von 2 PN-Übergängen entgegengesetzter Polarität. Daraus folgt, daß hier zwei verschiedene Schichtfolgen möglich sind. Man unterscheidet demnach PNP- und NPN-Transistoren. Dabei gibt der mittlere Index die Dotierung der Basis an, die beiden äußeren die Dotierungen von Kollektor und Emitter.



Die drei Schichten sind, wie in der Grafik skizziert, unterschiedlich stark dotiert und haben unterschiedliche Abmessungen. Für den nachfolgend beschriebenen Transistoreffekt sind 2 Tatsachen Voraussetzung:

- die Basis ist im Vergleich zu Kollektor und Emitter schwach dotiert
- die Basisschicht ist von den geometrischen Abmessungen her schmal

Transistoreffekt:

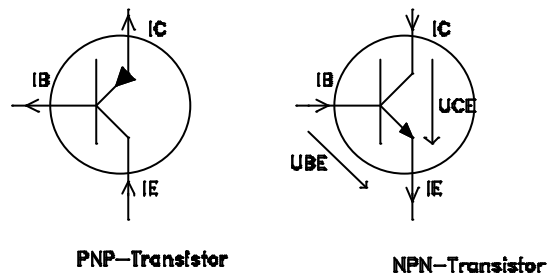
Die Wirkungsweise von NPN- und PNP-Transistoren unterscheidet sich einzig in der Art der bewegten Ladungsträger und wird deshalb hier am Beispiel des NPN-Transistors beschrieben, wo diese Ladungen Elektronen sind. Für den PNP-Transistor gilt genau die selbe Gesetzmäßigkeit mit dem Unterschied, daß hier ein Löcherstrom wirksam ist, also positive Ladungen bewegt werden. Für die rechnerische Behandlung von Transistorschaltungen bedeutet dies, das für PNP- und NPN-Typen jeweils Ströme bzw. Spannungen mit umgekehrten Vorzeichen wirksam sind.

Wird an die Basis-Emitterstrecke eines NPN-Transistors eine positive Spannung U_{BE} gelegt, so haben wir einen in Durchlaßrichtung gepolten PN-Übergang und es fließt ein Strom in positiver Stromrichtung. Dies bedeutet aber, daß Elektronen vom Emitter in die Basis hinein übertreten. Da die Basis schwächer dotiert ist, finden

diese negativen Ladungen dort nur relativ wenige Rekombinationspartner und es entsteht ein Überschuß an negativen Ladungsträgern. Besitzt nun der Kollektor bezüglich der Basis positives Potential, so wandern sie weiter in den Kollektor und von dort aus zum positiven Pol der Spannungsversorgung. Weitere Ladungsträger fließen direkt durch den Basisanschluß zur Spannungsquelle. Dieser Strom ist allerdings im Vergleich zum Emittier-Kollektor-Strom relativ klein (aufgrund der schwachen Dotierung).

Dies heißt, anders ausgedrückt, daß zu einer großen Änderung des Kollektorstroms eine geringe Änderung des Basisstroms gehört und umgekehrt. Diesen Effekt bezeichnet man als Stromverstärkung des Transistors.

Im folgenden sind anhand der Schaltsymbole der jeweiligen Transistortypen die Ströme und Spannungen skizziert, die für die rechnerische Behandlung von Bedeutung sind.

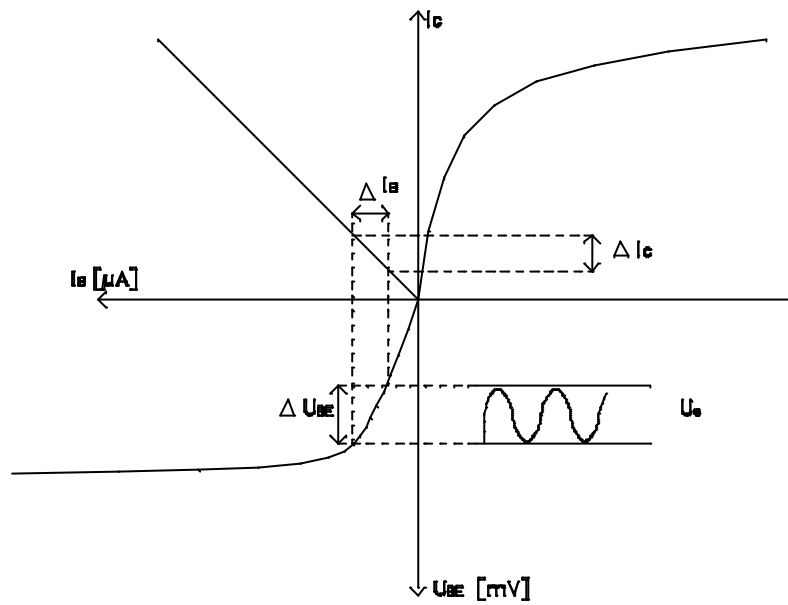


Zu beachten ist, daß die Strompfeile jeweils die technische Stromrichtung angeben. Sie zeigen also jeweils die Richtung der positiven Ladungsträger an. Der physikalischen Stromrichtung folgend, fließen also, wie oben beschrieben, in Wirklichkeit Elektronen, also negative Ladungsträger, vom Emittier des NPN-Transistors zur Basis bzw. zum Kollektor.

Die Stromverstärkung eines Transistors ist typspezifisch und wird in Datenblättern als Größe β angegeben. Für Gleichströme gelten Richtwerte von $150 < \beta < 350$. Die Wechselstromverstärkung ist, wie man bei der Behandlung der Transistorkennlinien sehen wird, eine Funktion des gewählten Arbeitspunktes. Da Transistoren als Halbleiter immer kapazitive Anteile enthalten, ist die Wechsignalverstärkung außerdem abhängig von der Frequenz.

Für die Gleichstromverhältnisse gelten damit folgende Zusammenhänge:

$$\begin{aligned}
 I_E &= I_B + I_C \\
 I_E &= I_B * b \quad \text{und da } b \gg 1 \\
 I_C &\approx I_E
 \end{aligned}$$



der Basis-Emitter-Diode ist

Graphische Ermittlung der Verstärkung eines Transistors.

Eine Änderung der Eingangsspannung $U_E = U_{BE}$ bewirkt eine Änderung des Basisstromes I_B gemäß der Kennlinie der Basis-Emitter-Diode. I_C als Funktion von I_B