

III Berechnung von Schaltungen

III.1 Die ideale Diode

Wegen der großen Bedeutung der Strom-Spannungs Kennlinie eines pn-Übergangs für alle bipolaren Bauele-

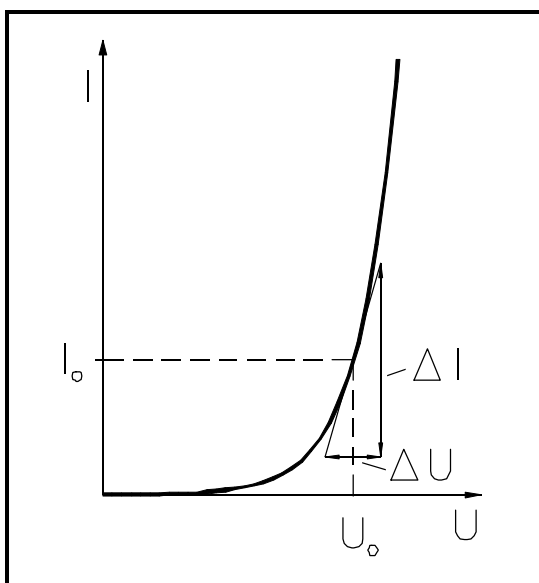


Abb. 3-1: Kennlinie ideale Diode

mente soll diese genauer untersucht werden. Man kann das elektrische Verhalten einer idealen Diode aus sehr grundlegenden physikalischen Gesetzen herleiten. Da dies den Rahmen dieser Vorlesung sprengen würde, wird die Formel vorgegeben:

$$i = i_0 \cdot \left(e^{\left(\frac{q \cdot U}{k \cdot T} \right)} - 1 \right)$$

Mit: $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} =$
= Elektronenladung

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} =$
= Boltzmann Konstante

$T = \text{°C} + 273,15 =$
= absol. Temp. in K

Diese Formel beschreibt auch reale Dioden sehr gut. Der Strom i_0 hängt ab von Fläche, Dotierung, Temperatur etc. des pn-Übergangs. Im Exponen-

ten stehen außer der Spannung U nur die folgenden Naturkonstanten:

kT/q hat die Dimension einer Spannung, die bei 25 °C einen Wert von $25,69 \text{ mV}$ hat. Nimmt die Spannung um kT/q zu, so erhöht sich der fließende Strom um den Faktor e ($=2,71828$). Der Strom hängt also exponentiell von der Spannung ab, umgekehrt erhält man eine logarithmische Abhängigkeit der Spannung vom fließenden Strom. Ohne Spannung wird der Strom zu 0. Negative Spannungen geben große negative Exponenten der e -Funktion, so daß der Sperrstrom der idealen Diode schon bei kleinen Sperrspannungen den Wert $-i_0$ erreicht.

Für die Berechnung der Verstärkung von Schaltungen ist die Steilheit S wichtig, die Änderung des Stroms in Abhängigkeit von der Spannung. Diese entspricht der Steigung der Tangente an die Diodenkennlinie (siehe Abb. 3-1). Ihr Wert ist gleich der Ableitung dI/dU der Formel für den Strom im Arbeitspunkt I_0, U_0 :

$$\begin{aligned} I &= I_0 \cdot \left(e^{\left(\frac{q \cdot U}{k \cdot T} \right)} - 1 \right) = \\ S &= dI / dU = \\ &= I_0 \cdot \left(e^{\left(\frac{q \cdot U}{k \cdot T} \right)} \right) \cdot \frac{q}{k \cdot T} \end{aligned}$$

Abgesehen von der zu subtrahierenden 1 ist dies gleich:

$$\begin{aligned} S &= I \cdot \frac{q}{k \cdot T} = \\ &= I \cdot 38,93 \text{ (mA/V)} = \\ &\approx I \cdot 40 \text{ (mA/V)} \end{aligned}$$

Neben einer geringen Abhängigkeit von der Temperatur hängt die Steil-

heit also nur vom fließenden Ruhestrom ab. Aus alter Gewohnheit (von der Röhre her) setzt man den Strom in mA ein, so daß die Steilheit die Dimension mA/V hat. Bei allen folgenden Rechnungen nehmen wir für $\frac{q}{k \cdot T}$

den runden Wert von 40 an und die Steilheit wird $S = 40 \cdot I_f$ (mA/V).

Die Größe des Stroms i_0 soll einmal aus den Datenblattwerten einer realen Diode errechnet werden:

Durch die Diode BAY41 fließt bei 0,6 V und 25°C ein Strom von 2 mA.

Man erhält:

$$\begin{aligned} 2 \text{ mA} &= i_0 \cdot \left(e^{\left(\frac{600}{25.7}\right)} - 1 \right) \\ &= i_0 \cdot (e^{23.3} - 1) = \\ &= i_0 \cdot 1,38 \cdot 10^{10} \end{aligned}$$

Die subtrahierte 1 darf also sicher vernachlässigt werden.

$$i_0 = 2 \text{ mA} / 1,38 \cdot 10^{10} \text{ A} = 0,145 \text{ pA}$$

i_0 ist relativ stark von der Temperatur abhängig. Er ändert sich bei 1°C Temperaturänderung um etwa 10 %. Einfach zu merken sind die Anhaltswerte:

1 °C Erhöhung: 1,1-facher Strom
25 °C Erhöhung: 10-facher Strom

Gemäß der Formel der idealen Diode gilt dies für Fluß- und Sperrströme. Auf ähnlichen (Diffusions-) Prozessen beruht auch die Alterung elektronischer Bauelemente. Zur Zuverlässigkeit elektronischer Bauelemente siehe Abschnitt III.5.

III.2 Die Faustformeln für bipolare Transistoren

Aus der Formel der idealen Diode erhalten wir für die Steilheit:

$$S = dI/dU = 40 \cdot I_f \text{ (mA/V)}$$

Der Kehrwert der Steilheit ist ein differentieller Widerstand dU/dI . Eine vom Strom I durchflossene Diode hat daher den differentiellen Innenwiderstand $dU/dI = 1/S$. Bei 1 mA ist $S = 40$ (mA/V) und der differentielle Innenwiderstand beträgt 25 Ω. In Kenntnis der Steilheit und des Innenwiderstands können wir die Formeln für das elektrische Verhalten von Transistoren in verschiedenen Anordnungen ableiten. Die Ein- und Ausgangswiderstände sind immer die differentiellen Innenwiderstände.

a) Eingangswiderstände R_{ein} Basisschaltung

Am Emitteranschluß tritt völlig unverfälscht der Innenwiderstand der BE-Diode auf:

$$R_{\text{ein}} = 1/S.$$

Emitterschaltung

Der Basisstrom ist um den Faktor B (Gleichstromverstärkung) kleiner als der Kollektorstrom. Daher ist der Eingangswiderstand B -mal so groß:

$$R_{\text{ein}} = B/S$$

Kollektorschaltung

Der Basisstrom ist um den Faktor B kleiner (Emitterfolger) als der Emitterstrom (=Kollektorstrom). Die Stromaufnahme des Widerstands am Emitter erscheint daher um den Faktor B geringer an der Basis. Der Eingangswiderstand an der Basis ist um den Faktor B höher als der Emitterwiderstand:

$$R_{\text{ein}} = B \cdot R_{\text{Emitter}}$$

Das Gate eines Feldeffekttransistors bzw. das Gitter einer Röhre sind im

Schaltung:	R_{in}	R_{aus}	Verstärkung
Emitter-	B / S	∞	$S \cdot R_a$
Basis-	$1 / S$	∞	$S \cdot R_a$
Kollektor-	$B \cdot R_{\text{em}}$	$1 / S$	1

Prinzip stromlos. Die Eingangswiderstände dieser Bauelemente sind daher unendlich groß.

b) Ausgangswiderstände R_{aus}

Basis- und Emitterschaltung

Sowohl in der Emitter- als auch der Basisschaltung ist der Kollektor der Ausgang. Der Kollektorstrom hängt nur ganz geringfügig von der CE-Spannung ab, so daß der Ausgangswiderstand beider Schaltungen sehr hoch ist. Man darf ihn als unendlich groß annehmen:

$$R_{\text{aus}} \approx \infty$$

Kollektorschaltung

Am Emitter erscheint der Innenwiderstand der (Emitterfolger) BE-Diode. Damit ist der Ausgangswiderstand gleich dem Kehrwert der Steilheit:

$$R_{\text{aus}} = 1/S.$$

c) Verstärkungen V

Wie bei den Widerständen der differentiellen Widerstand gemeint ist, so verstehen wir bei den Verstärkungen die Spannungen und Ströme als kleine Auslenkungen vom Ruhewert aus.

Basis- und Emitterschaltung

Die Spannung an der BE-Diode steuert über die Steilheit den Kollektorstrom.

$$\begin{aligned} \Delta I_C &= S \cdot \Delta U_{\text{BE}} = \\ &= S \cdot \Delta U_{\text{ein}} \end{aligned}$$

Der Kollektorstrom verursacht die Ausgangsspannung als Spannungsabfall am Arbeitswiderstand:

$$\Delta U_{\text{aus}} = \Delta I_C \cdot R_a$$

Beim Einsetzen von I_C erhalten wir:

$$\Delta U_{\text{aus}} = S \cdot \Delta U_{\text{ein}} \cdot R_a$$

$$\frac{\Delta U_{\text{aus}}}{\Delta U_{\text{ein}}} = V = S \cdot R_a$$

Das ist die leicht zu merkende Formel für die Kleinsignalverstärkung V der Emitter- und der Basisschaltung, die sich nur im Eingangswiderstand unterscheiden.

Bei der Ableitung all dieser Formeln wurde keinerlei Gebrauch davon gemacht, daß die Steilheit S bipolarer Transistoren $S = 40 \cdot I_C$ proportional zum Kollektorstrom ist. Die Formeln gelten daher ebenso für die Verstärkung jedes anderen aktiven Bauelements. Deren Steilheit muß dem Datenblatt entnommen werden.

Kollektorschaltung

Der Emitter folgt der Basis, wobei eine Stromzunahme um den Faktor e die Basis-Emitter Spannung nur um 25,7 mV erhöht. Wir begehen also nur einen minimalen Fehler, wenn wir $V = 1$ setzen.

Damit sind alle Formeln gefunden. Sie enthalten einige Vereinfachungen, doch gehen die Fehler im allgemeinen in den Toleranzen der Bauelemente unter. Auf jeden Fall erhält man mit geringem Rechenaufwand eine relativ gute Abschätzung.