

5.) Nichtlineare Schaltungen mit Halbleiterbauelementen

5.1 Einleitung

Bei den in Kap. 4 betrachteten elektrischen Schaltungen wurde stets vorausgesetzt, daß sie keine stromabhängigen Widerstände enthalten. Diese Schaltungen waren daher sog. *lineare* Schaltungen.

Jetzt sollen Schaltungen untersucht werden, die neben linearen Schaltelementen auch Widerstände enthalten, deren Widerstandswert von der Stärke und von der Richtung des Stromes, der durch sie hindurchfließt, abhängig ist. Man bezeichnet solche Widerstände ebenso wie die betreffenden Schaltungen (oder Netzwerke) als *nichtlinear* .

Die Widerstandseigenschaften von nichtlinearen Elementen werden in der Regel nicht durch ihre Widerstandswerte, sondern durch die Darstellung von *Strom-Spannungs-Kennlinien* beschrieben. Das hat zur Folge, daß die Bestimmung von Spannungen und Strömen in nichtlinearen Schaltungen meistens auf graphischem Wege vorgenommen wird.

Im folgenden werden einfache Grundkenntnisse zur Halbleiterphysik (Elektrotechnik, 1.Sem.) vorausgesetzt. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt in der Beschreibung von Halbleiterbauelementen durch Kennlinien und Parameter sowie deren Anwendungen bei der Schaltungsberechnung.

Es gibt einige wenige für die Bauelementetechnik wichtige Halbleiterwerkstoffe. Der heute mit Abstand wichtigste ist das *Silizium* (chem. Kurzzeichen: *Si*, engl.: *Silicon*). Die ersten industriellen Halbleiterbauelemente wurden auf der Basis von Germanium (Ge) hergestellt, die Bedeutung von Germanium hat aber stark abgenommen. Weiterhin gibt es die Verbindungshalbleiter wie z.B. *Galliumarsenid* (GaAs).

In einem reinen Halbleiter ist die Dichte von freien Ladungsträgern wesentlich geringer als in Metallen:

Werkstoff	Cu	Si	Ge	GaAs
Ladungsträgerdichte/cm ⁻³	ca. 10 ²³	1,4·10 ¹⁰	2,3·10 ¹³	1,3·10 ⁶

Tab. 5.1-1. Eigenleitungsdichte n_i der Ladungsträger bei Raumtemperatur

Durch den Einbau von Fremdatomen (Dotierung) kann die Ladungsträgerdichte stark erhöht werden auf 10¹⁶ ... 10¹⁸cm⁻³. Durch verschiedenartige Dotierung entstehen n-leitende (Elektronenleitung) oder p-leitende (Löcherleitung) Gebiete. Die verschiedenartige und verschieden starke Dotierung ist der Schlüssel für Aufbau und Funktion von Bauelementen.

5.2 Halbleiterdioden

5.2.1 Bauelemente und ihre Beschreibung

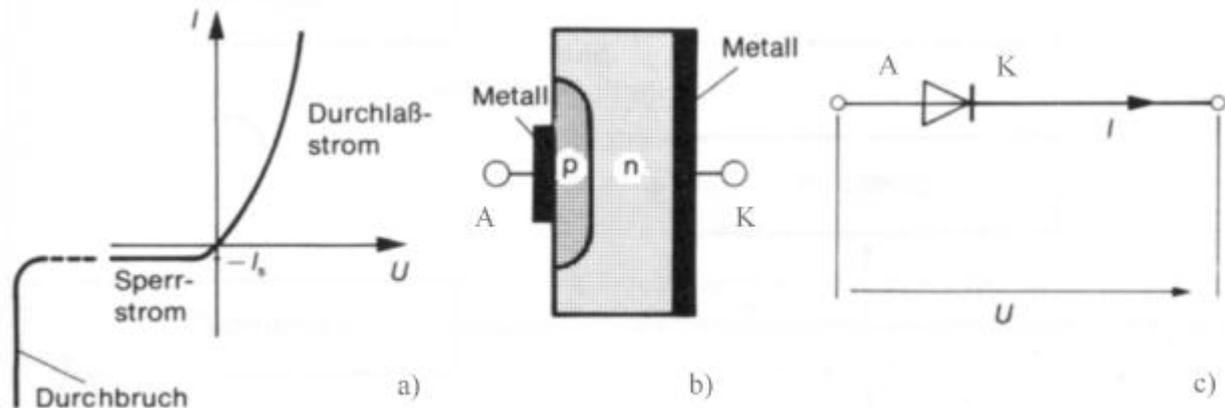


Bild 5.2-1 Halbleiterdioden, a) Kennlinie des pn-Übergangs,
 b) Schnitt durch eine Planardiode, c) Schaltsymbol

Begriffe und Eigenschaften:

- Der Anschluß des p-Gebietes wird als „Anode“ (A) bezeichnet, der Anschluß des n-Gebietes als „Katode“ (K). Liegt die Anode am positiven Potential und die Katode am negativen, so kann Strom fließen (Durchlaßstrom), bei umgekehrter Polung fließt nur ein sehr geringer Sperrstrom.
- Strom-Spannungskennlinie: grafische Darstellung des Stromes in Abhängigkeit von der Spannung bei Betrieb mit Gleichstrom (statischer Fall).

Die Kennlinie ist näherungsweise
 anzugeben durch:

$$I(U) = I_s \left(e^{\frac{U}{mU_T}} - 1 \right) \quad \text{mit } 1 < m < 2$$

$$U_T = 25,25 \text{ mV} \quad \text{bei Raumtemperatur, } U_T \sim T$$

$$I_s = I(U \rightarrow -\infty) : \text{ Sperrstrom}$$

- Bei zu großen Sperrspannungen erfolgt ein Stromdurchbruch, der Strom steigt lawinenartig an und der Halbleiter wird schnell zerstört.

Vereinfachte Kennlinien:

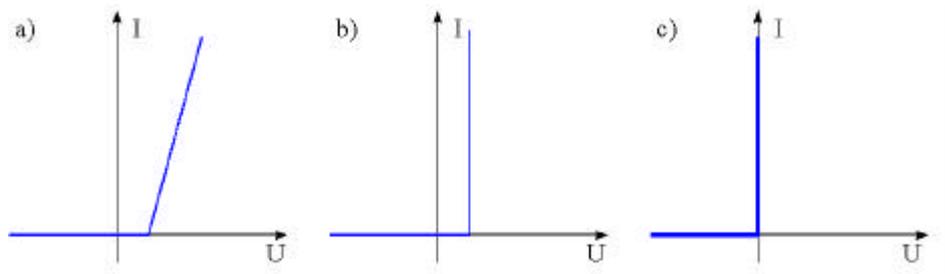


Bild 5.2-2 Stückweise geradlinige Kennlinien

- a) mit endlicher Steigung und Knickspannung $> 0V$
- b) mit unendlicher Steigung und Knickspannung $> 0V$
- c) mit unendlicher Steigung und Knickspannung $= 0V$

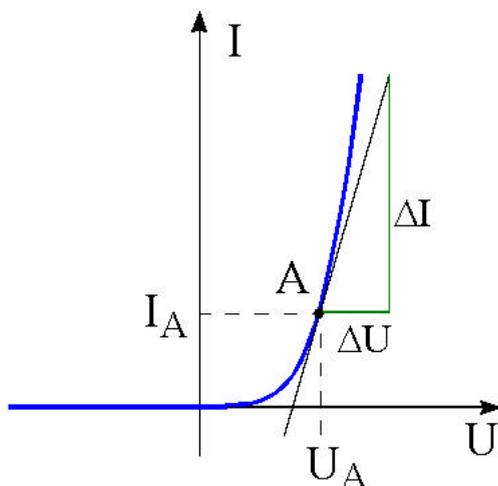
Die vereinfachten Kennlinien können verwendet werden,

- wenn eine Diode mit großen Strömen betrieben wird
- wenn in der Schaltungsberechnung eine erste Näherung genügt
- wenn ein schneller Überblick über das Schaltungsverhalten gewonnen werden soll.

5.2.2 Differentielle Angaben

Begriffe „Differenzieller Leitwert“ und „Differenzieller Widerstand“

Wird eine Diode durch eine Summe aus einer Gleichspannung und einer Wechselspannung so angesteuert, daß die Wechselspannung nur einen relativ kleinen Teil der Kennlinie aussteuert, dann enthält auch der Diodenstrom einen Wechselanteil, dessen Größe durch den „Differenziellen Widerstand“ im Arbeitspunkt zu bestimmen ist.



A: Arbeitspunkt mit den Gleichanteilen
 Spannung U_A und Strom I_A

Differenzieller Leitwert $G_{diff} = \Delta I / \Delta U$

Differenzieller Widerstand $R_{diff} = \Delta U / \Delta I = 1 / G_{diff}$

Bild 5.2-3 Kennlinie mit Arbeitspunkt

Diodenspannung mit einem zusätzlichen kleinen Wechselanteil:

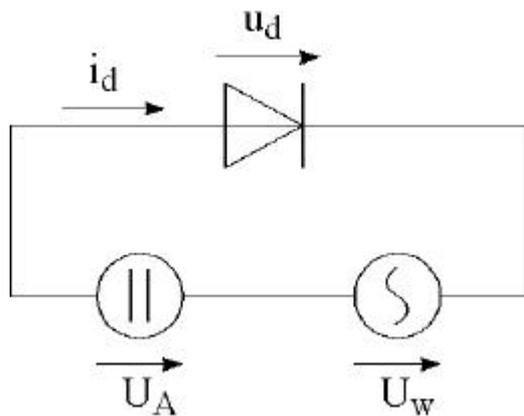


Bild 5.2-4 Aussteuerung mit Gleich- und Wechselspannung

$$u_d(t) = U_A + u_w(t), \quad i_d(t) = I_A + i_w(t)$$

$$\text{mit } i_w(t) \approx G_{\text{diff}} \cdot u_w(t)$$

(Das \approx -Zeichen steht, weil tatsächlich der Wechselanteil des Stromes nicht rein sinusförmig ist.)

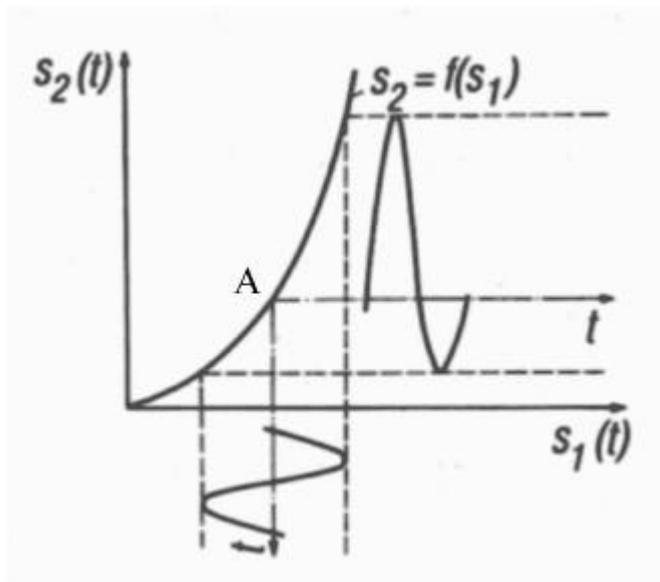


Bild 5.2-5 Grundsätzlich wird ein sinusförmiges Steuersignal \$S_1\$, das auf eine nicht-lineare Kennlinie gegeben wird, immer zu einem verzerrten, nicht-sinusförmigen Ausgangssignal \$S_2\$ führen. Wie stark die Verzerrung sichtbar wird, hängt von der Größe des Steuersignals und von der Krümmung der Kennlinie ab.

Beispiele zu den differentiellen Größen

1.) Diodenkennlinie ist in analytischer Form durch die Kennliniengleichung gegeben

$$I(U) = I_s \left(e^{\frac{U}{mU_T}} - 1 \right) \quad \text{mit } I_s = 1\text{nA}, \quad m = 1,5$$

Gesucht: der differentielle Leitwert \$G_{\text{diff}}\$ im Arbeitspunkt

Gegeben: Arbeitspunkt mit \$U = 636,7\text{mV} \Rightarrow I = 20\text{mA}\$

$$\text{Ansatz: } G_{\text{diff}} = \frac{dI}{dU} = \frac{I_s}{mU_T} e^{\frac{U}{mU_T}} \quad \text{Für } U = 636,7\text{mV} \Rightarrow G_{\text{diff}} = 0,528\text{S}$$

2.) Die Diode werde im Arbeitspunkt durch eine zusätzliche Wechselspannung $u_w(t) = 2\text{mV} \cdot \sin(\omega t)$ angesteuert. Gesucht ist die Amplitude \hat{i}_w des Wechselstromanteils des Diodenstromes, siehe oben.

Ansatz: $\hat{i}_w = G_{\text{diff}} \cdot \hat{u}_w$ $\hat{i}_w = 0,528\text{S} \cdot 2\text{mV} = 1,056\text{mA}$

Anmerkung: die Stromamplitude \hat{i}_w ist noch relativ klein gegenüber dem Gleichstrom im Arbeitspunkt ($I = 20\text{mA}$). Daher kann der vereinfachte Ansatz benutzt werden.

3.) Die Diodenkennlinie liege in Form einer (Meß-)Wertetabelle vor:

U/V	0,4	0,46	0,5	0,56	0,6	0,64	0,66	0,68	0,70
I/mA	0,02	0,09	0,24	1,05	2,82	7,6	12,4	20,4	33,5

In diesem Fall gibt es zwei Möglichkeiten, den differentiellen Leitwert zu ermitteln:

(A) Die Wertetabelle wird für eine grafische Darstellung benutzt.

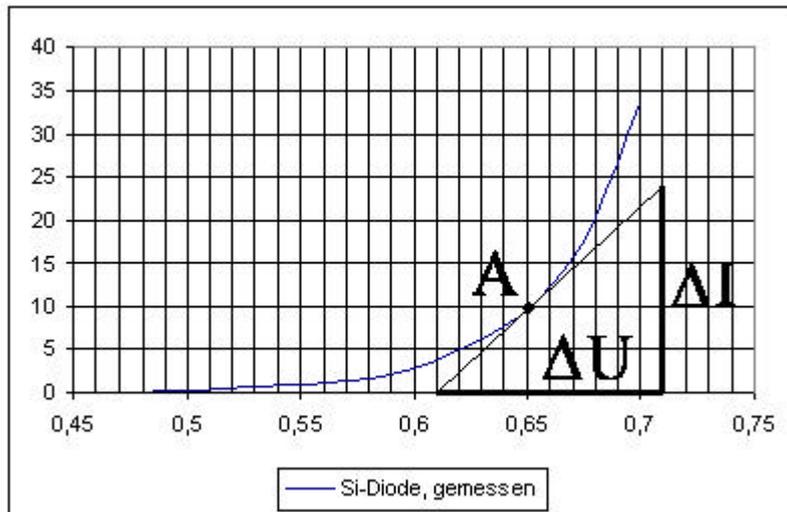


Bild 5.2-6
 Grafische Darstellung
 der Tabellenwerte

Differentieller Leitwert:

$$G_{\text{diff}} = \Delta I / \Delta U$$

$$= 24\text{mA} / 0,1\text{V}$$

$$= 0,24\text{S}$$

Dann wird der vorgegebene Arbeitspunkt eingetragen und im Arbeitspunkt die Tangente an die Kennlinie eingetragen (mittels Lineal, geschätzt).

Aus der Steigung der Tangente erhält man dann den differentiellen Leitwert.

(B) Die Meßwerte werden benutzt, um die Parameter m und I_s der Kennlinienfunktion

$$I(U) = I_s \left(e^{\frac{U}{mU_T}} - 1 \right)$$

zu bestimmen, so daß die Kennlinie in analytischer Form als Näherung der Meßwerte benutzt werden kann. Um die Parameter m und I_s zu bestimmen,

- können in einem Iterationsverfahren alle Wertepaare der Tabelle verwendet werden oder
- nur zwei Wertepaare verwendet werden, um zwei Gleichungen für die zwei Unbekannten m und I_s zu erhalten.

Ist die Kennlinienfunktion bestimmt, wird weiter wie im 1. Beispiel verfahren.

(C) $G_{\text{diff}}(U) = \Delta I / \Delta U$ mit ΔI und ΔU möglichst symmetrisch zum Arbeitspunkt U

zum Beispiel von (A): $G_{\text{diff}}(0,65\text{V}) = \frac{12,4\text{mA} - 7,6\text{mA}}{0,66\text{V} - 0,64\text{V}} = 0,24\text{S}$

5.3 Behandlung nichtlinearer Schaltkreise mit Dioden

5.3.1 Parallel- und Serienschaltung von Widerstand und Diode

Parallelschaltung von Widerstand und Diode

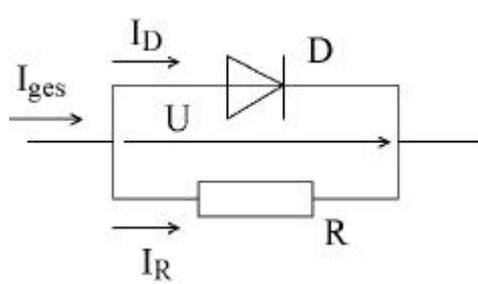


Bild 5.3-1
 Widerstand und Diode in Parallelschaltung

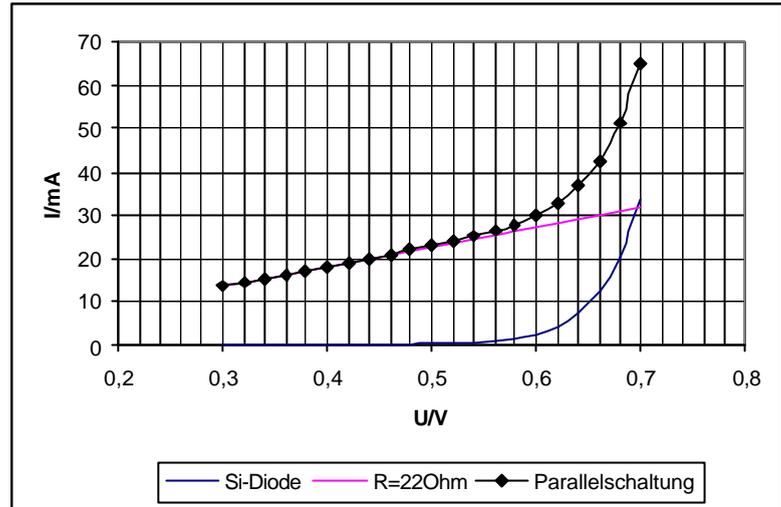
Die Parallelschaltung der nichtlinearen Diode mit dem linearen Widerstand ergibt einen neuen nichtlinearen Zweipol mit einer eigenen Kennlinie für $I_{\text{ges}} = f_p(U)$. Für I_{ges} gilt

$$I_{\text{ges}} = I_D + I_R$$

Mit $I_R = U/R$, $I_D = f_D(U)$ (Kennlinie der Diode) folgt

$$I_{\text{ges}} = U/R + f_D(U) = f_p(U)$$

Bild 5.3-2 zeigt die Kennlinien einer Parallelschaltung mit $R = 22\Omega$ und den Diodenparametern $m = 1,6$ und $I_s = 1\text{nA}$.



Serienschaltung von Widerstand und Diode

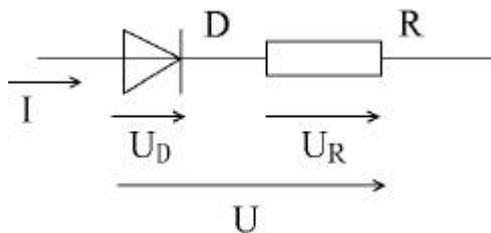


Bild 5.3-3
 Widerstand und Diode in Serienschaltung

Die Serienschaltung der nichtlinearen Diode mit dem linearen Widerstand ergibt einen neuen nicht-linearen Zweipol mit einer eigenen Kennlinie für $U_{ges} = g_S(I)$

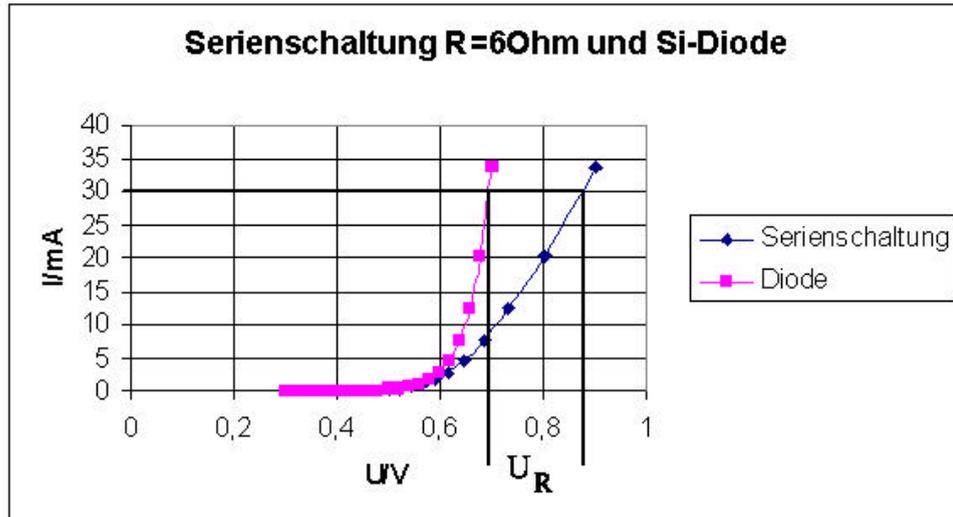
Für die Gesamtspannung gilt $U_{ges} = U_D + U_R$

Mit $U_R = I \cdot R$ und $U_D = g_D(I)$ folgt: $U_{ges} = I \cdot R + g_D(I) = g_S(I)$

Dabei ist $g_D(I)$ die Umkehrfunktion der Diodenkennlinie: $g_D(I) = m U_T \ln \left(\frac{I}{I_s} + 1 \right)$

Geht man von einer gegebenen Diodenkennlinie in der Form $I(U_D) = I_s \left(e^{\frac{U_D}{m U_T}} - 1 \right)$ aus, so kann die Spannung an R aus $U_R = I \cdot R$ bestimmt und zu U_D addiert werden. Damit ergibt sich eine tabellarische oder grafische Darstellung der Gesamtkennlinie der Serienschaltung. Diese Methode ist in Bild 5.3-3 angewandt worden.

Bild 5.3-3



Durch den Reihenwiderstand ergibt sich eine sog. Scherung der Diodenkennlinie, bei gleicher Spannung ist der Strom in der Serienschaltung kleiner und die Steigung der Gesamtkennlinie ist geringer.

5.3.2 Einfacher Stromkreis mit Spannungsquelle, Widerstand und Diode

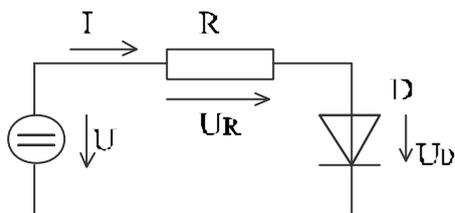


Bild 5.3-4 Spannungsquelle mit Innenwiderstand und Diode

Gegeben seien: U , R , Diode mit Kennlinie

Gesucht: Strom und Spannungen an den Schaltelementen

Für die Bestimmung von Strom und Spannungen gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- (A) Man faßt entsprechend 5.3.1 den Widerstand und die Diode zusammen und ermittelt aus der Gesamtkennlinie den Strom für den gegebenen Wert von U .
- (B) Die Spannungsquelle und der Innenwiderstand können als Zweipol, der eine eigene Kennlinie hat, zusammengefaßt werden (siehe Vorl. Elektrotechnik). Die Kennlinie des Quellenzweipols wird in das Diagramm der Diodenkennlinie eingetragen. Da der gleiche Strom durch den

Quellenzweipol und die Diode fließt, erhält man diesen Strom im Schnittpunkt der beiden Kennlinien.

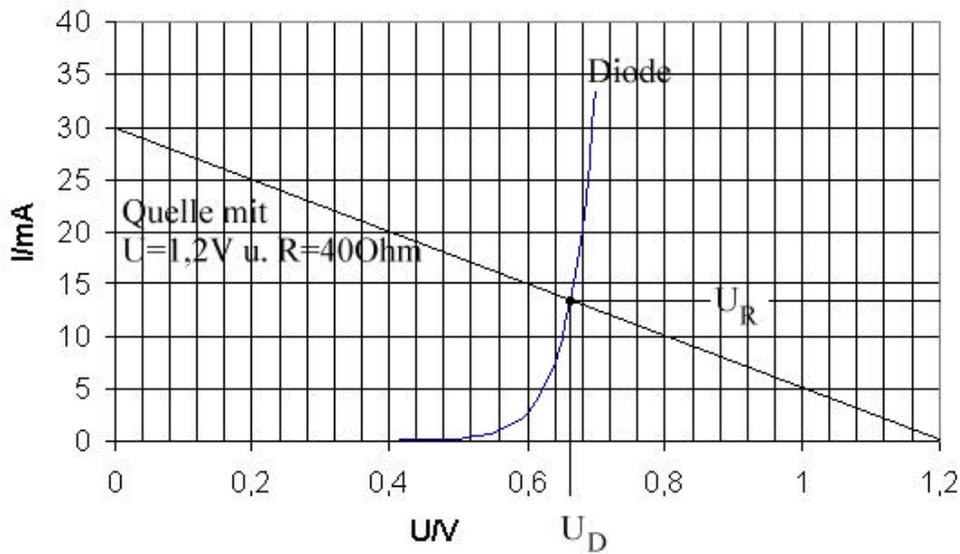


Bild 5.3-5 Spannungsquelle mit Widerstand R und Diode in Serie
 Grafische Bestimmung des Stromes und der Spannungen an R und Diode

Für die Spannungen gilt: $U = U_R + U_D$ bzw. $U_R = U - U_D$

Die Spannung am Widerstand ist also immer die Differenz von der Diodenspannung bis zur Quellenspannung U.

Auswertung des Beispiels:

Der Schnittpunkt der Kennlinien ergibt $U_D = 0,66V$, $I = 13,5mA$

Damit folgt $U_R = 1,2V - 0,66V = 0,54V$

5.3.3 Verzweigter Stromkreis mit mehreren Widerständen und einer Diode

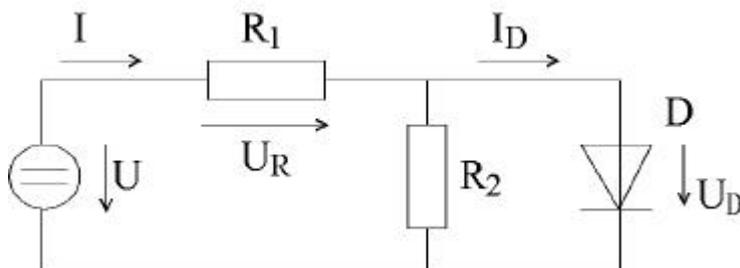


Bild 5.3-6 Nichtlineare Schaltung mit zwei Widerständen

Gegeben: U, R_1, R_2, D durch Kennlinie
 Gesucht: I_D, U_D

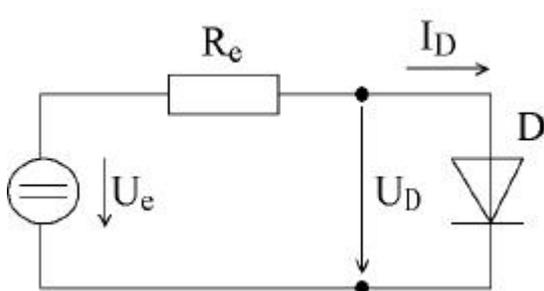
Auch in diesen Fällen gibt es mehrere Lösungswege:

- (A) Die Diode und der Widerstand R_2 werden zu einem neuen nichtlinearen Zweipol zusammengefaßt. Danach wird wie unter 5.3.2 verfahren.
- (B) Die Quelle und alle Widerstände werden durch eine Ersatzspannungsquelle ersetzt. (Zum Thema Ersatzspannungsquelle siehe Anhang 2)
 Danach wird wie unter 5.3.2 verfahren.

Beispiel zu (B):

Gegeben seien: $U = 1V, R_1 = 15\Omega, R_2 = 22\Omega$, Diode mit Kennlinie wie in Bild 5.3-5

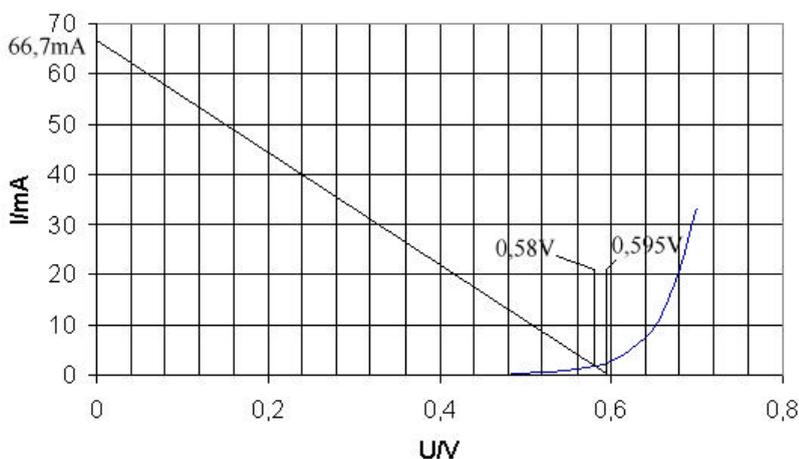
Die Zusammenfassung von U, R_1 und R_2 zu einer Ersatzspannungsquelle ergibt folgendes Bild:



$$U_e = U \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 0,595V$$

$$R_e = R_1 \text{ par. } R_2 = 8,92\Omega$$

Bei Verwendung der Ersatzspannungsquelle ändern sich U_D, I_D und die Diode selbst nicht. Daher können U_D und I_D jetzt wieder nach 5.3.2/Bild 5.3-5 grafisch bestimmt werden.



Kurzschlußstrom:
 $U_e / R_e = 66,7mA$

Ergebnisse:
 $U_D = 0,58V,$
 $I_D = 1,72mA$

5.3.4 Verwenden der vereinfachten Diodenkennlinie

Beispiel 1: Einphasen-Gleichrichter

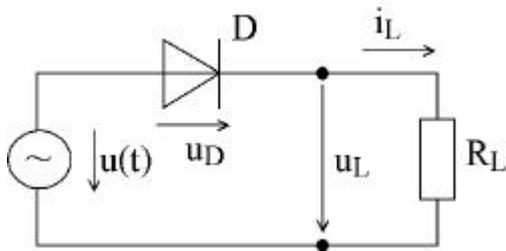


Bild 5.3-8

Lastwiderstand R_L und Einweggleichrichter an einer Wechselspannungsquelle

$$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t)$$

Die Diode soll durch die vereinfachte Kennlinie nach Bild 5.2-2.c) beschrieben werden. Sie ist damit ein idealer spannungsgesteuerter Schalter:

- bei Polung in Durchlaßrichtung ist sie ein Kurzschluß
- bei Polung in Sperrichtung ist sie ein Leerlauf (= offener Zweig)

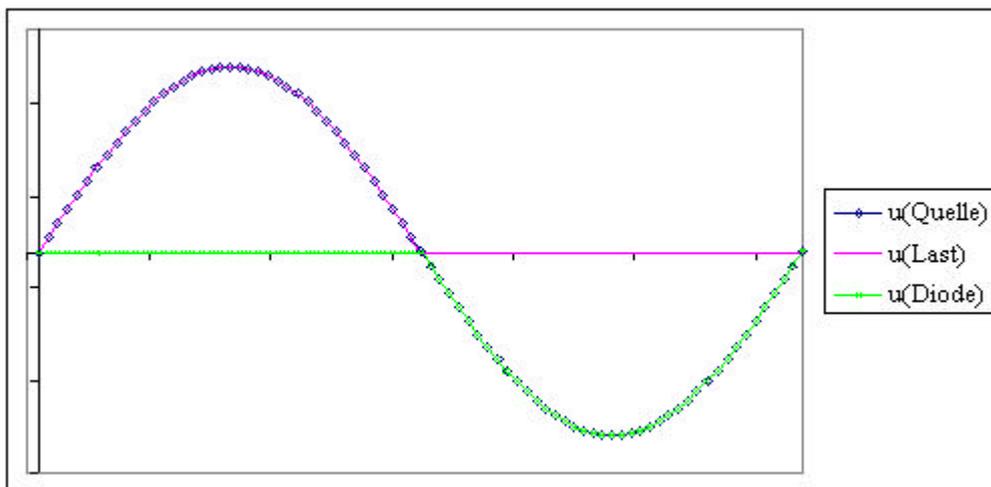


Bild 5.3-9 Spannungsverläufe zum Einweg-Gleichrichter nach Bild 5.3-8.

Die Spannung an der Last ist mit der Quellenspannung identisch, solange die Quellenspannung positiv ist, die Diodenspannung ist dann gleich null. Bei negativer Quellenspannung wirkt die Diode wie ein offener Schalter, sie übernimmt die gesamte Quellenspannung, für die Last bleibt keine Spannung mehr übrig.

zu 5.3.4 Verwenden der vereinfachten Diodenkennlinie

Beispiel 2: Logische Verknüpfung mit Dioden (Dioden-Widerstands-Logik)

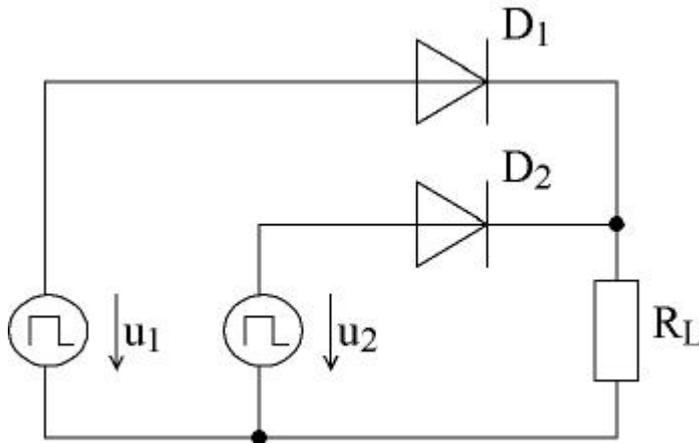


Bild 5.3-10
 Verknüpfungsschaltung mit zwei
 Dioden

Die Quellen u_1 und u_2 können umgeschaltet werden zwischen den Spannungen 0V und +5V. Dabei gelte die Zuordnung

Spanng. 0V	Potential „Low“	logische 0
Spanng. 5V	Potential „High“	logische 1

Werden die Dioden als ideale spannungsgesteuerte Schalter betrachtet, erhält man für die Spannung an dem Lastwiderstand folgende Ergebnisse:

u_1	u_2	u an R_L
0V (L)	0V (L)	0V (L)
0V (L)	5V (H)	5V (H)
5V (H)	0V (L)	5V (H)
5V (H)	5V (H)	5V (H)

Ergebnis in Worten: die Spannung am Lastwiderstand ist 5V, wenn eine der Quellen auf 5V eingestellt ist. Betrachtet man den Lastwiderstand als Schaltungsausgang und die Quellen als zwei gesteuerte Eingänge, so erzeugt die Schaltung am Ausgang eine logische ODER-Verknüpfung der beiden Eingänge.

5.4 Transistoren

In Nachrichtentechnik und Automatisierungstechnik wird eine Reihe verschiedener Arten von Transistoren verwendet. Da in diesem Kapitel nur die grundlegenden Eigenschaften von Transistoren und Transistorschaltungen behandelt werden sollen, werden nur zwei Transistorarten als Beispiele herausgegriffen: der Bipolar-Transistor (Injektionstransistor), npn-Typ, und aus der Gruppe der Unipolar- oder Feldeffekttransistoren der MOSFET.

5.4.1 Der npn-Transistor

Aufbau und Wirkungsweise. Ein Bipolartransistor besitzt zwei pn-Übergänge (Dioden), die in nur geringem Abstand aufeinander folgen. Dabei gibt es zwei mögliche Abfolgen: pnp-Aufbau oder npn-Aufbau. Die meisten modernen Bipolartransistoren haben den npn-Aufbau, weshalb hier nur dieser Typ betrachtet werden soll.

Bild 5.4-1a zeigt die konstruktive Ausführung eines npn-Transistors mit den drei elektrischen Anschlüssen Emittor (E), Basis (B) und Kollektor (C).

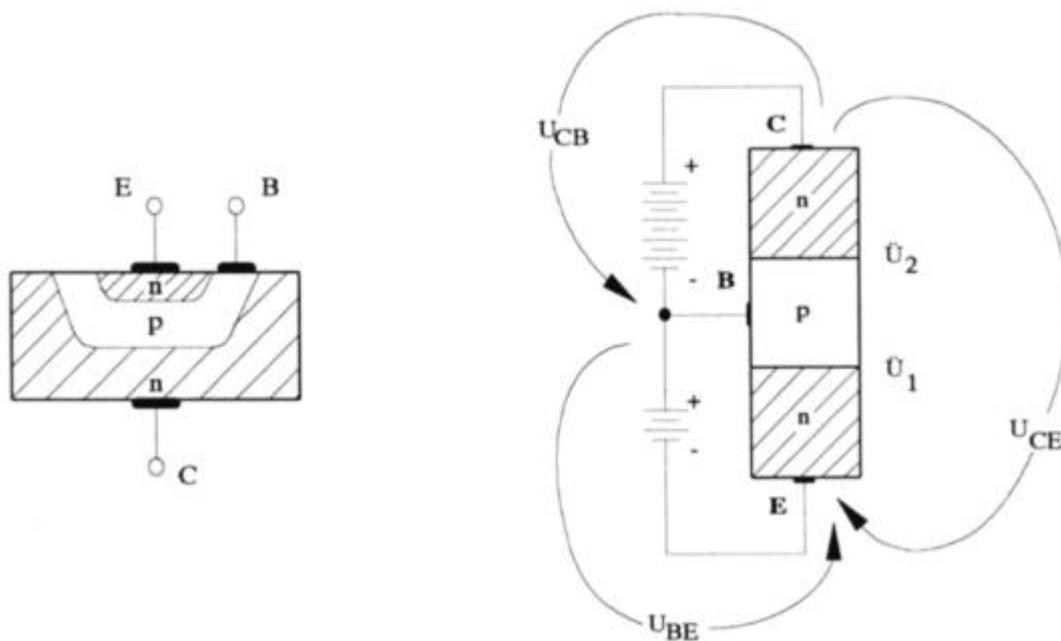


Bild 5.4-1 a) Ausführung eines npn-Transistors, Schnitt

b) Spannungen am Transistor

- U_{BE} : Basis-Emitter-Spannung
- U_{CE} : Kollektor-Emitter-Spannung
- U_{CB} : Kollektor-Basis-Spannung

Bild 5.4-1b zeigt die drei Transistor-Spannungen mit der im Betrieb üblichen Polarität. An der Polarität der Spannung U_{BE} erkennt man, daß die Basis-Emitter-Diode in Durchlaßrichtung betrieben wird, und an der Polarität der Spannung U_{CB} , daß die Kollektor-Basis-Diode in Sperrichtung betrieben wird. Die Spannung U_{BE} kann daher nicht viel größer als 0,7V sein, während die Spannung U_{CB} (und damit auch U_{CE}) wesentlich größer sein kann.

Betrachtet man die beiden pn-Übergänge völlig getrennt voneinander, so kann über die Basis-Emitter-Diode ein Durchlaßstrom fließen, wie er auch bei einfachen Dioden auftritt, und über die Kollektor-Basis-Diode kann nur der winzige Sperrstrom fließen. Tatsächlich liegen die Verhältnisse völlig anders, weil die Basiszone immer nur sehr schwach dotiert und vor allem nur sehr schmal gehalten wird (typisch $10\mu\text{m}$ und kleiner). Dadurch ergibt sich eine starke Verkopplung des Kollektorstromes mit dem Basisstrom, die beiden pn-Übergänge funktionieren also nicht wie zwei einzelne Dioden getrennt voneinander. Bild 5.4-2 zeigt die Ströme im npn-Transistor.

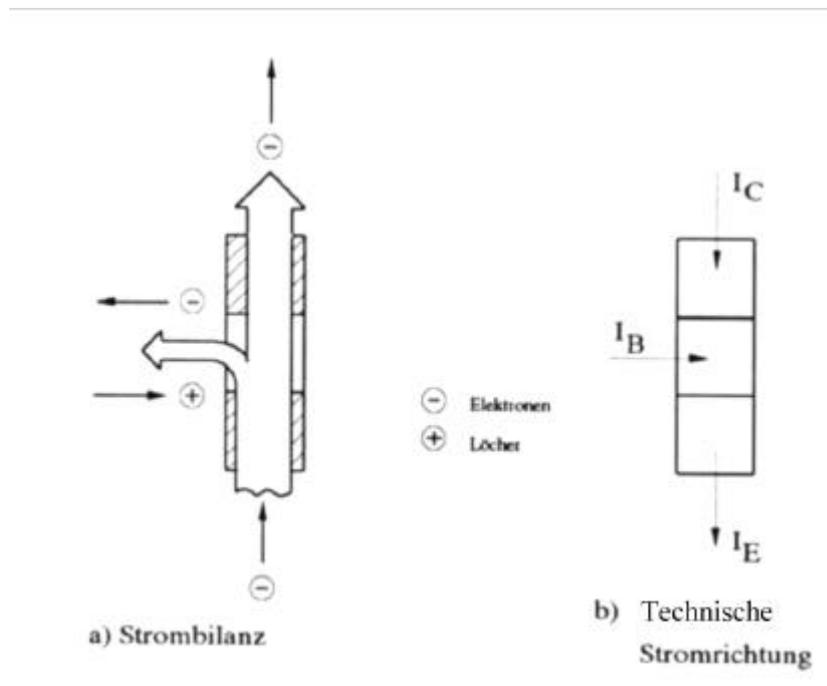


Bild 5.4-2 Ströme im npn-Transistor

Elektronen fließen als Emitterstrom I_E vom Emitteranschluß E in den Transistor, durchqueren ihn in Richtung über die Basis bis zum Kollektor und verlassen ihn wieder als Kollektorstrom I_C über den Kollektoranschluß C. Im p-Gebiet der Basis wird ein kleiner Teil des Elektronenstromes infolge von Rekombination mit Löchern (Majoritätsträger in der Basis) abgezweigt. Dieser kleine Teil bildet den Basisstrom I_B im Basisanschluß B. Es gilt: $I_B \ll I_E$, $I_C \approx I_E$.

Zur Funktion sei noch ergänzt, daß der Vorgang des Eintretens der Elektronen vom Emitter in die Basis als „Elektroneninjektion“ und deshalb der Bipolartransistor auch als Injektionstransistor bezeichnet wird.

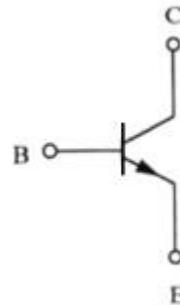
Der sehr kleine Basisstrom kann benutzt werden, um den Kollektorstrom zu steuern. Verwendet man den Basisstrom als Eingangsgröße, die vorgegeben wird, und bezieht den davon abhängenden Kollektorstrom auf den Basisstrom, so ist eine Stromverstärkung zu beobachten:

$$\text{Gleichstromverstärkung } B = I_C / I_B$$

Der Bipolartransistor ist ein stromgesteuertes Bauelement.

Bild 5.4-3 Schaltsymbol des Bipoltransistors vom npn-Typ

Der Pfeil am Emitteranschluß zeigt in die technische Stromrichtung. Beim pnp-Transistor ist er umgekehrt gerichtet.



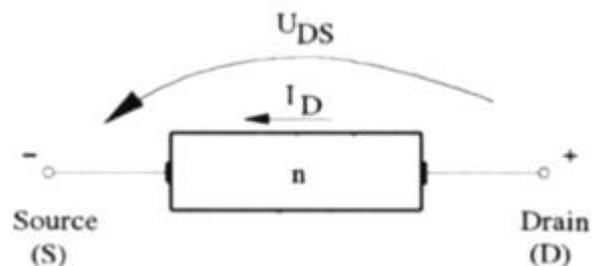
5.4.2 Der MOSFET

Die Gruppe der Feldeffekt-Transistoren (FETs) weist eine größere Anzahl von unterschiedlichen Typen mit mehr oder weniger verschiedenen Eigenschaften auf. Als ein wichtiger Vertreter soll hier der MOSFET vom Anreicherungstyp beschrieben werden. MOSFET steht für Metal Oxide on Semiconductor FET.

Das grundlegende Prinzip der FETs ist einfach: Steuerung der Leitfähigkeit eines Halbleiterkanals.

Bild 5.4-4 zeigt einen solchen durch ein n-leitendes Gebiet realisierten Kanal mit den für FETs üblichen Bezeichnungen für die elektrischen Größen und die Anschlüsse Source (= Quelle, von dort kommen die Elektronen) und Drain (= Senke, dorthin fließen die Elektronen).

Bild 5.4-4 Halbleiterstück mit n-Kanal



Der Drainstrom I_D durch diesen Kanal mit der Drain-Source-Spannung U_{DS} ist:

$$I_D = \frac{U_{DS}}{R_{\text{Kanal}}}$$

Der Kanalwiderstand R_{Kanal} ist abhängig von der Kanallänge l , dem Kanalquerschnitt A und der spezifischen Leitfähigkeit κ :

$$R_{\text{Kanal}} = \frac{l}{\kappa \cdot A}$$

In der Praxis nutzt man die Steuerung des Kanalwiderstands über den Querschnitt A und über die Leitfähigkeit κ und erhält so die beiden FET-Grundtypen

- 1.) Steuerung über $A \rightarrow$ Sperrschicht-FET, engl.: Junction FET (JFET)
- 2.) Steuerung über $\kappa \rightarrow$ FET mit isolierter Steuerelektrode (MOSFET)

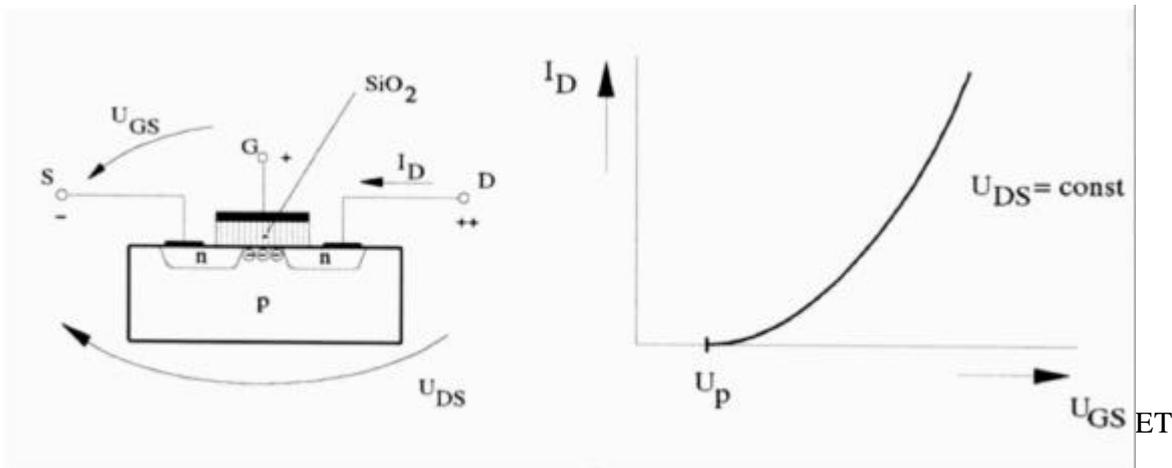
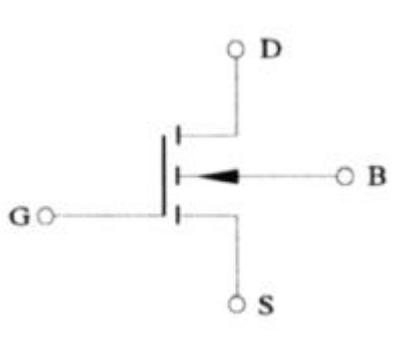


Bild 5.4-5 Prinzip des MOSFET

Bild 5.4-6 Kennlinie $I_D = f(U_{GS})$

Bild 5.4-6 zeigt, daß der Drainstrom I_D erst ab einer bestimmten positiven Steuerspannung $U_{GS} > U_p$ zu fließen anfängt. Bei $U_{GS} = 0$ leitet der Transistor nicht; dieser MOSFET-Typ wird daher als selbstsperrend bezeichnet. Die Eigenheit „selbstsperrend“ ist im Schaltsymbol Bild 5.4-7 durch die gestrichelte Linie zu erkennen.



Der vierte Anschluß B („Bulk“) liegt am p-Substrat, der Pfeil zeigt von p nach n. B wird meist mit S verbunden, eine entscheidende Wirkung auf die Funktion hat er in diesem Falle nicht.

Bild 5.4-7 Schaltsymbol des selbstsperrenden n-Kanal-MOSFET

In Zusammenhang mit Bild 5.4-6 sei noch auf einen wichtigen Unterschied zwischen den bipolaren Transistoren und den MOSFETs, der in den Kennlinienfeldern (siehe 5.4.3) noch deutlicher wird, hingewiesen. Aufgrund der Gestaltung der Steuerelektrode, des Gate, nimmt der MOSFET an seinem Gate-Anschluß keinen Strom auf, er ist *spannungsgesteuert* ohne Leistungsaufnahme. Bipolartransistoren dagegen nehmen am Basis-Anschluß einen Strom auf, sie benötigen damit auch eine Steuerleistung.

5.4.3 Kennlinien von Transistoren

In der analogen Schaltungstechnik werden Transistoren meist zur Signalverstärkung eingesetzt. In dieser Anwendung wird ein Transistor als Vierpol oder - genauer - als Zweitor angesehen, obwohl er nur drei Anschlüsse hat. Die Darstellung als Zweitor erhält man dadurch, daß einer der Transistoranschlüsse zweimal benutzt wird, z.B. der Emitter beim Bipolar-Transistor oder der Sourceanschluß beim FET.

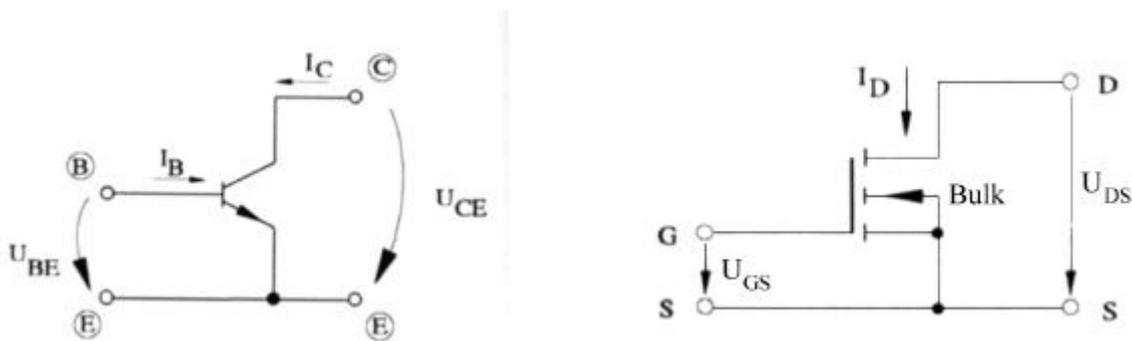


Bild 5.4-8 a) Emitterschaltung

b) Sourceschaltung

Ein Signalverstärker soll ein kleines Quellensignal aufnehmen und ein größeres an einen Verbraucher (Last) abgeben. In Bild 5.4-8a wird das Quellensignal an den Anschlüssen B-E in das Transistor-Zweitor hineingegeben und an den Anschlüssen C-E an den Verbraucher abgegeben. Das Anschlußtor B-E wird daher als *Eingangstor* und das Anschlußtor C-E als *Ausgangstor* bezeichnet.

Die elektrischen Größen eines Transistors werden in Form von Kennlinien oder Kennlinienfeldern grafisch dargestellt. Bild 5.4-9 zeigt zunächst das Kennlinienfeld eines Bipolartransistors in der sog. Hybridform.

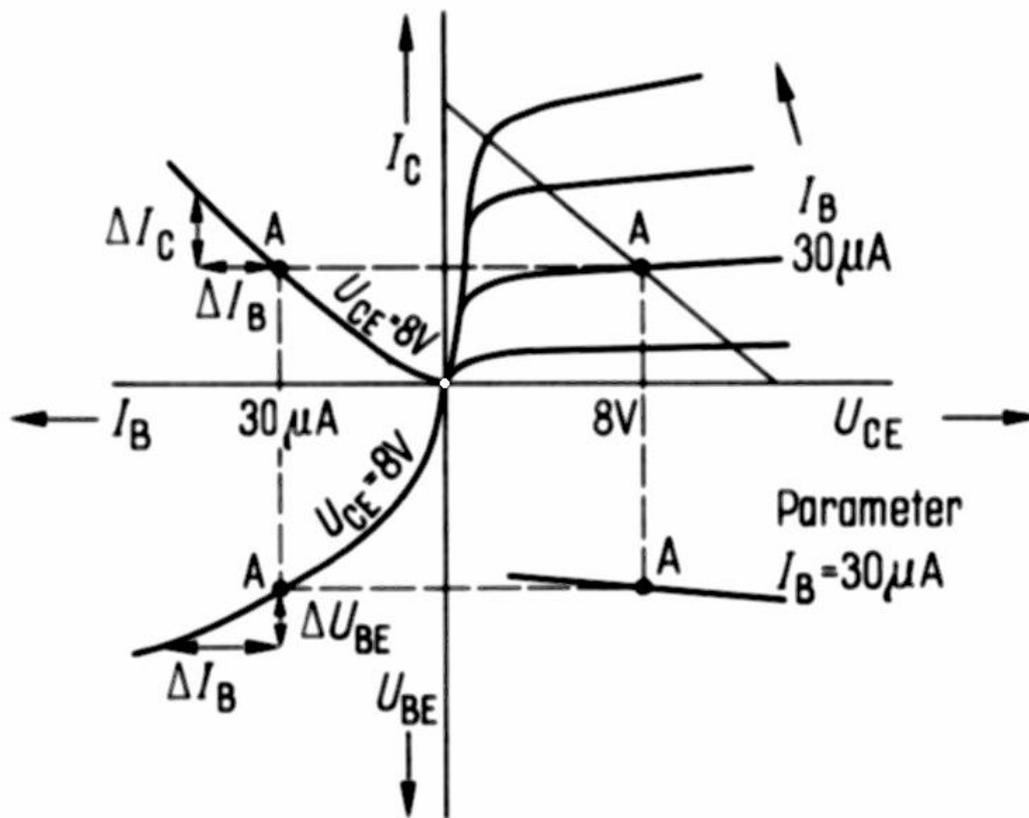


Bild 5.4-9 Kennlinienfeld eines npn-Bipolartransistors

Achtung: Die Hybridform des Kennlinienfeldes hat keine durchgehenden Achsen wie ein normales Kartesisches Koordinatensystem. In der Darstellung müssen die vier Quadranten zunächst als unabhängige Einzeldiagramme betrachtet werden mit jeweils eigenen Achsen und Achsenrichtungen. Allerdings ist zu bemerken, daß zwei benachbarte Quadranten immer über die gemeinsame Achse mit der gemeinsamen Größe verbunden sind.

1. Quadrant: Ausgangskennlinien $I_C = f(U_{CE})$ mit Parameter I_B ; die verschiedenen Werte von I_B ergeben deutlich verschiedene Kennlinienäste.
2. Quadrant: Transferkennlinie $I_C = f(I_B)$ mit einem Parameterwert von U_{CE} ; andere Werte von U_{CE} ergeben keine deutlich verschiedenen Kennlinien
3. Quadrant: Eingangskennlinie $I_B = f(U_{BE})$ mit einem Parameterwert von U_{CE} ; andere Werte von U_{CE} ergeben keine deutlich verschiedenen Kennlinien
4. Quadrant: Spannungsrückwirkung $U_{BE} = f(U_{CE})$ mit einem Parameterwert von I_B ; andere Werte von I_B ergeben deutlich verschiedene Kennlinienäste

Das Kennlinienfeld gibt die Verhältnisse im statischen Fall, also bei Gleichstrom wieder. Es läßt sich aber auch benutzen, um die sog. Kleinsignalparameter in einem Arbeitspunkt A zu ermitteln. So kann z.B. die Stromverstärkung β näherungsweise aus dem Differenzenquotienten

$$\beta \approx \Delta I_C / \Delta I_B$$

bestimmt werden, siehe 2. Quadrant. Exakt ist die Kleinsignal-Stromverstärkung in A die Steigung der Tangente an die Transferfunktion in A.

Der differentielle Eingangswiderstand r_{BE} in A ist näherungsweise

$$r_{BE} \approx \Delta U_{BE} / \Delta I_B$$

siehe 3. Quadrant. Der exakte Wert des differentiellen Eingangswiderstandes ergibt sich auch hier aus der Steigung der Tangente an die Eingangskennlinie in A.

Kennlinienfeld eines MOSFET

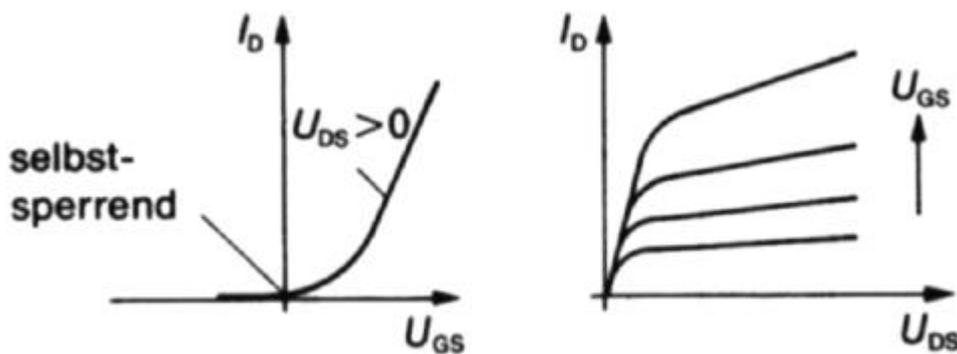


Bild 5.4-10 Kennlinienfeld eines n-Kanal MOSFET

Da der MOSFET am Gate-Anschluß keinen Strom aufnimmt, tritt der Parameter U_{GS} an die Stelle von I_B an den Ausgangskennlinien und die Transferkennlinie gibt den Zusammenhang zwischen U_{GS} und I_D an. Die Kennliniendarstellung besteht daher nur aus zwei Diagrammen.

5.4.4 Der Transistor im Grundstromkreis

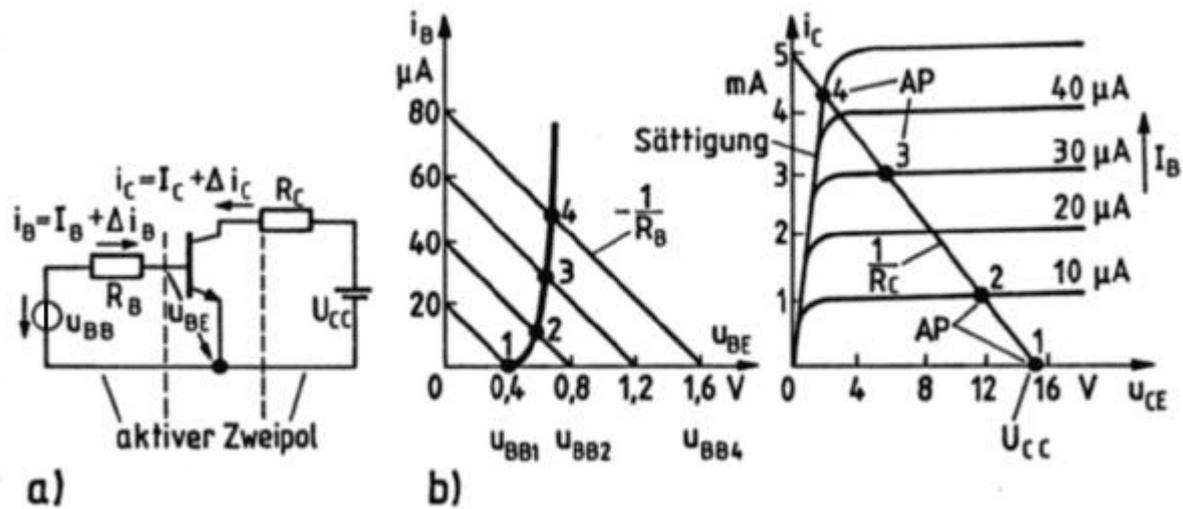


Bild 5.4-11 Der Bipolar-Transistor im Grundstromkreis
 a) Schaltbild mit Transistor und zwei Spannungsquellen mit Arbeitswiderstand
 b) Eingangskennlinie bei verschiedenen Werten der Quellenspannung U_{BB} und Ausgangskennlinienfeld mit Arbeitsgerade

Auf der Eingangsseite (Basis-Emitter) ist der Transistor an die Spannungsquelle u_{BB} mit dem Arbeitswiderstand $R_B = 20k\Omega$ (inkl. Innenwiderstand) angeschlossen und auf der Ausgangsseite an die Spannungsquelle U_{CC} mit dem Arbeitswiderstand $R_C = 3k\Omega$ (inkl. Innenwiderstand). Die Quelle U_{CC} ist eine Gleichspannungsquelle mit $U_{CC} = 15V$, die Quelle u_{BB} ist veränderlich. Bei vorgegebenem zeitlichen Verlauf kann $u_{BB}(t)$ als steuerndes Signal aufgefaßt werden, das durch den Transistor verstärkt werden soll.

Mit Hilfe der beiden Kennlinienbilder kann nun bestimmt werden,

- 1.) welcher Basisstrom i_B sich für einen gegebenen Wert von u_{BB} einstellt
- 2.) welcher Kollektorstrom i_C und welche Kollektorspannung u_{CE} sich für den jeweiligen Basisstrom i_B ergibt.

Die Auswertung der Kennlinien erfolgt genauso, wie es im Kap. 5.3 für Dioden angegeben ist. In Bild 5.4-11b sind vier verschiedene Werte von u_{BB} markiert, für die sich die übrigen Größen wie folgt ergeben:

Arbeitspunkt	u_{BB}/V	$i_B/\mu A$	u_{BE}/V	i_C/mA	u_{CE}/V
1	0,4	0	0,40	0	15
2	0,8	10	0,58	1,1	11,6
3	1,2	30	0,64	3,05	5,55
4	1,6	50	0,68	4,3	1,85

Tab. 5.4-1 Werte der elektrischen Größen zu Bild 5.4-11

Aus den Werten der Tabelle 5.4-1 können abgeleitete Größen berechnet werden:

- Gleichstromverstärkung $B = I_C/I_B$
- Kleinsignal-Stromverstärkung $\beta = \Delta i_C/\Delta i_B$
- differentieller Eingangswiderstand $r_{BE} = \Delta u_{BE}/\Delta i_B$
 r_{BE} ergibt sich auch aus der Steigung der Tangente an die Eingangskennlinie $i_B = f(u_{BE})$ in einem Arbeitspunkt. Die Steigung der Tangente im Arbeitspunkt ist der differentielle Eingangsleitwert g_{BE} , der Kehrwert davon ist $r_{BE} = 1/g_{BE}$.
- Kleinsignal-Spannungsverstärkung $v_U = \Delta u_{CE}/\Delta u_{BE}$

Mit $\Delta u_{BE} = r_{BE} \Delta i_B$ gilt auch $v_U = \frac{\Delta u_{CE}}{r_{BE} \cdot \Delta i_B}$

Mit den Werten in Tab. 5.4-1 erhält man:

Arbeitspunkt	B	β	$r_{BE}/k\Omega$	v_U
1	undef.			
1→2		110	18	-18,9
2	110			
2→3		97,5	3	-101
3	102			
3→4		62,5	2	-92,5
4	86			

Tab. 5.4-2

Aus Tab.5.4-1 abgeleitete Größen:
 Gleichstromverstärkung B,
 Kleinsignal-Stromverstärkung β
 differentieller Eingangswiderstand r_{BE}
 Kleinsignal-Spannungsverstärkung v_U

Die Tabellen zeigen, daß sich die Ströme und Spannungen nicht proportional zueinander ändern und Widerstände und Verstärkungen nicht konstant sind: der Transistor ist ein nichtlineares Bauelement.

Der nichtlineare Zusammenhang zwischen Steuerspannung u_{BB} und Ausgangsspannung u_{CE} ist noch einmal in Bild 5.4-12 dargestellt. Man erkennt drei Betriebsbereiche:

- 1.) „Sperrbereich“ mit $u_{BB} < U_F$
 Der Basisstrom ist null, die Basis-Emitter-Diode ist gesperrt.
 Weil kein Kollektorstrom fließt, ist $U_{CE} = U_{CC}$.
- 2.) „Aktiver Bereich“
 Der reguläre Arbeitsbereich zur Signalverstärkung. Werden ausreichende Abstände zu Sperr- und Sättigungsbereich eingehalten, sind Strom- und Spannungsverstärkung annähernd konstant.
- 3.) „Sättigungsbereich“
 i_C ist maximal, u_{CE} minimal. Die Kennlinienäste des Ausgangskennlinienfeldes treffen sich und verlaufen von oben nach unten gemeinsam in den Koordinatenursprung. Je nach Größe des Arbeitswiderstandes R_C verbleibt eine geringe Kollektor-Emitter-Restspannung.

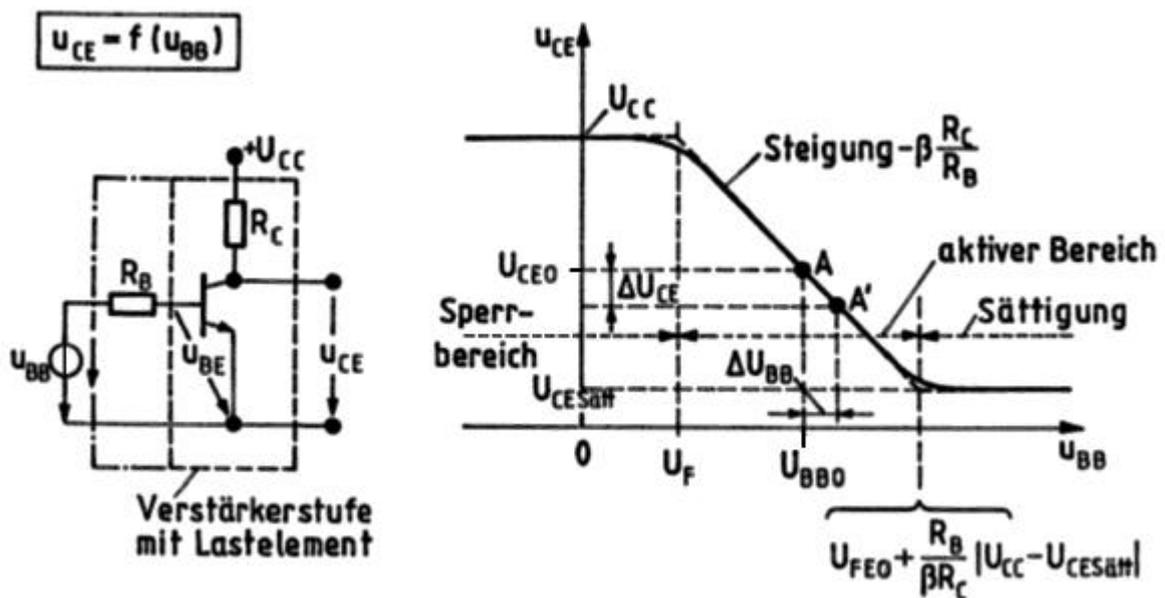


Bild 5.4-12 Bipolar-Transistor als Spannungsverstärker

Frage: Wie ermittelt man aus Bild 5.4-12 die Kleinsignal-Spannungsverstärkung v_U ?