
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 ρ in $\Omega \text{ m}$
Leiter	Silber	$1.59 \cdot 10^{-8}$
	Kupfer	$1.68 \cdot 10^{-8}$
	Aluminium	$2.65 \cdot 10^{-8}$
Halbleiter	Germanium, rein	$600 \cdot 10^{-3}$
	Germanium, dotiert	$(1 \dots 600) \cdot 10^{-3}$
	Silizium, rein	2300
	Silizium, dotiert	$0.1 \dots 2300$
Isolatoren	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.

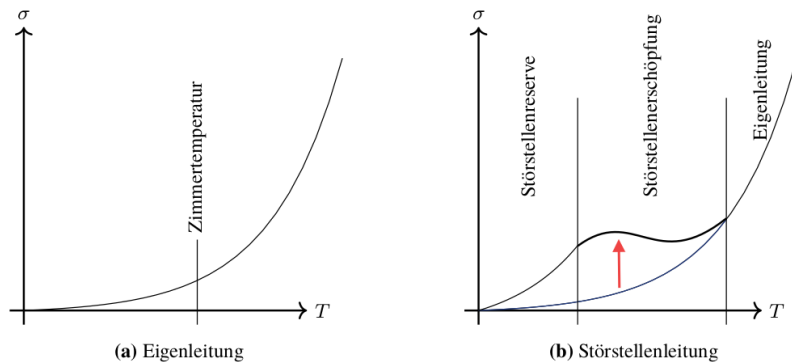


Abb. 1. Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit für eigenleitende (reine) und dotierte Halbleiter, schematisch

Halbleiterbauelemente

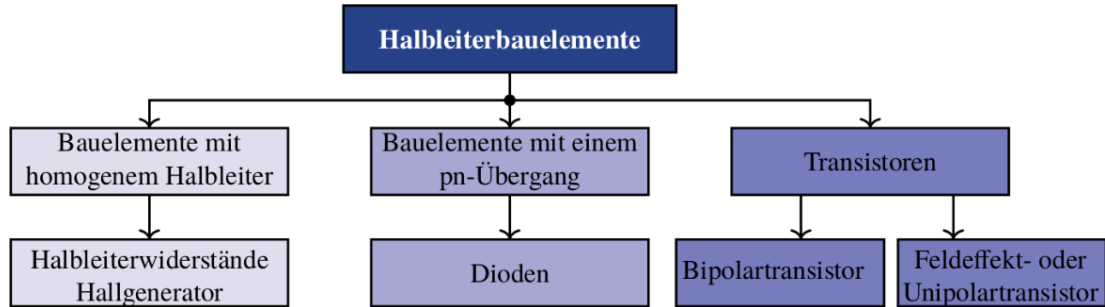


Abb. 2. Halbleiterbauelemente – eine erste Übersicht

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.

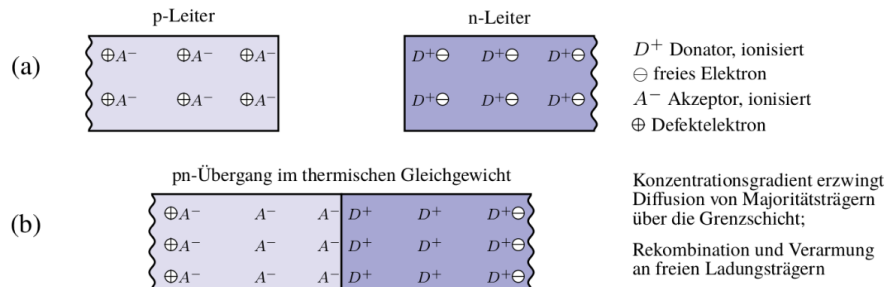


Abb. 3. (a) Ein p-Material (positive Überschussladungen, oder besser fehlende Elektronen) und ein getrenntes n-Material (negative Überschussladungen, Elektronen) (b) zusammengefügt mit Grenzfläche

Die Diode

Dioden: Bauelemente mit einem pn-Übergang

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

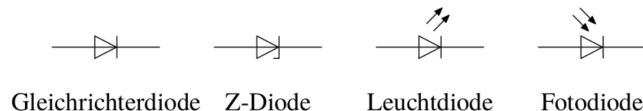


Abb. 4. Schaltzeichen verschiedener Dioden

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

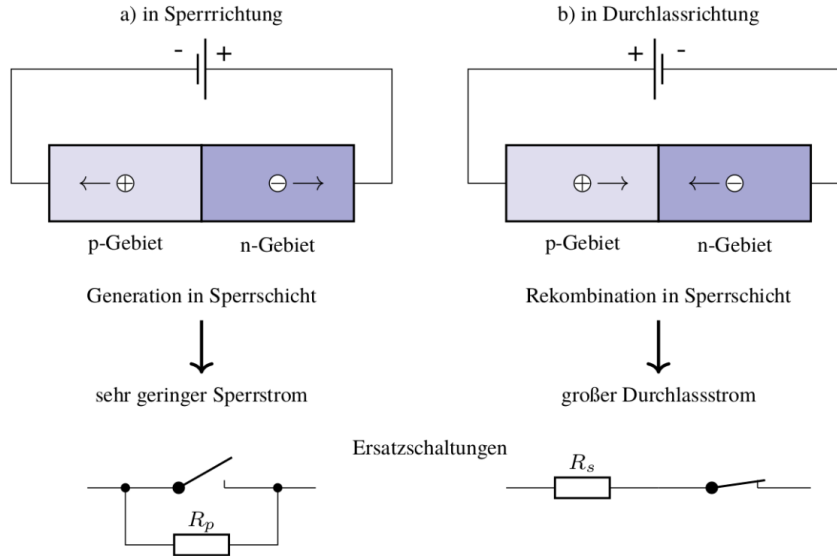
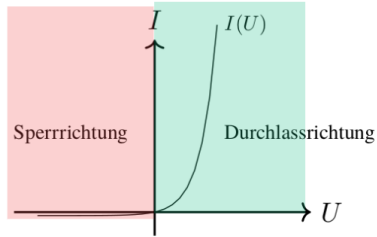
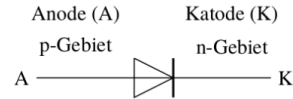


Abb. 5. Diode: pn-Übergang in Sperr- und in Durchlassrichtung

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

Die Zenerdiode

Die Zenerdiode hat im "negativen" Quadranten eine weitere Leitfähigkeit ab einer bestimmten Spannung U_Z , die herstellungsbedingt eingestellt werden kann (ca. 2-50V, (reversibler erster Durchbruch). Die Vorwärtsspannung ist hier auch ca. 0.6 V.

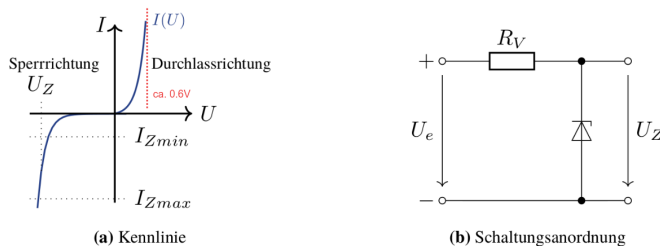


Abb. 7. Z-Diode: Kennlinie und Einsatzschaltung, im Sperrbereich betrieben für eine definierte Spannungseinstellung.

Die Leuchtdiode

LEDs werden entsprechend in Durchlassrichtung betrieben und emittieren bei Stromfluss Licht. Der Strom durch eine LED muss begrenzt werden; dazu eignet sich ein Vorwiderstand.

Für LED's werden Verbindungshalbleiter, wie z.B. Galliumarsenid oder Galliumphosphid verwendet. Die Wellenlänge (Farbe) des emittierten Lichtes hängt vom Bandabstand des Halbleiters ab. Mit kürzer werdender Wellenlänge wächst die notwendige Brennspannung (rot: $U = 1.6 \text{ V}$, blau: $U = 2.9 \text{ V}$). Damit die Strahlung aus dem Gehäuse austreten kann, haben Leuchtdioden ein optisches Fenster oder ein gänzlich transparentes Gehäuse, welches in Abstrahlrichtung des Lichtes als Linse ausgebildet sein kann.

Die Fotodiode

Fotodioden - das Gegenstück zur LED, nutzen den inneren lichtelektrischen Effekt im Raumladungsgebiet des in Sperrrichtung betriebenen pn-Überganges. Bei Belichtung des pn-Überganges werden dort Ladungsträgerpaare generiert, wenn die Energie der einfallenden Lichtquanten größer als der Bandabstandsenergie ist (wellenlängenabhängig).

Die durch das einfallende Licht erzeugten Ladungsträgerpaare werden im Raumladungsfeld des pn-Überganges getrennt und bilden den Fotostrom, der über einige Größenordnungen proportional zum Lichteinfall (Lichtintensität) ist.

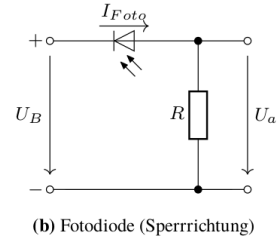
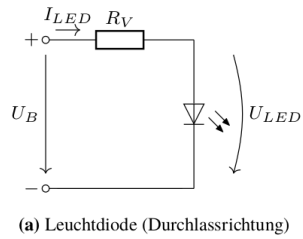


Abb. 8. Leucht- und Fotodiode

Der Gleichrichter

Eine Anwendung der Diode ist die Gleichrichtung von Wechselspannung in eine Gleichspannung. Besser ausgedrückt die Umwandlung eines bipolaren Signals (positive und negative Spannungen) in ein unipolares Signal (nur noch ein Vorzeichen), vereinfacht:

$$U_{ep} = \begin{cases} 0 & U < U_{thr} \\ U & U \geq U_{thr} \end{cases}$$
$$U_{vp} = \begin{cases} 0 & |U| < U_{thr} \\ |U| & |U| \geq U_{thr} \end{cases}$$

Dabei ist die "Offsetspannung" der Diode von ca. 0.6V (bei Silizium, hier U_{thr}) zu beachten. Ep ist der Einfachgleichrichter (eine Diode), VP ist der Vollgleichrichter mit vier Dioden.

Der Gleichrichter

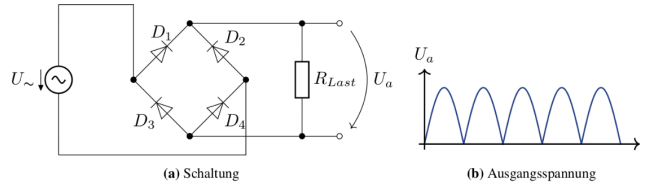


Abb. 9. Schaltung Voll- oder Zweiweggleichrichter

Der Gleichrichter

Bisher haben wir für Spannungen kleiner ca. $0.7V$ eine Lücke und in der Nähe nichtlineares Übertragungsverhalten. Diese kann aktive durch Einsatz eines Operationsverstärkers "geschlossen" werden und wir erhalten den Präzisionsgleichrichter.

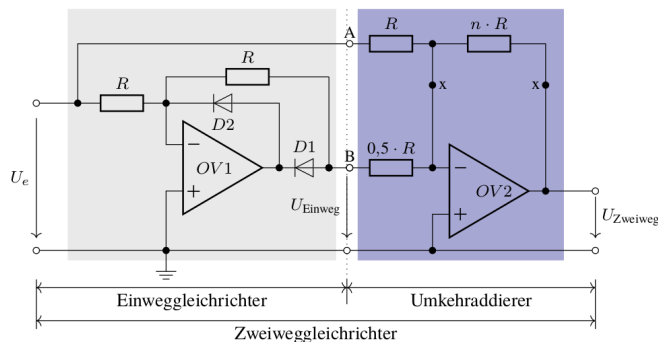


Abb. 10. Präzisionsgleichrichter: Die Dioden werden in den R_{pk}kopplungsblock des OpAmp eingefügt.

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.

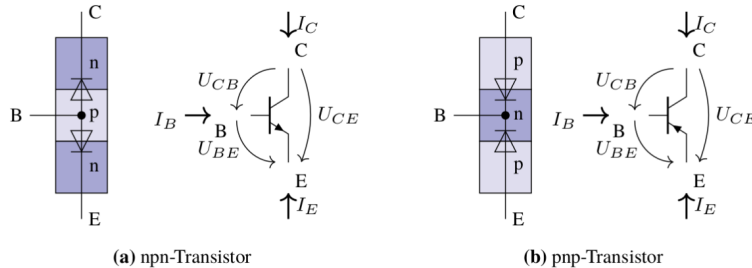


Abb. 11. Bipolartransistoren, Zonenfolgen und Schaltsymbole mit Zählpfeilen

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

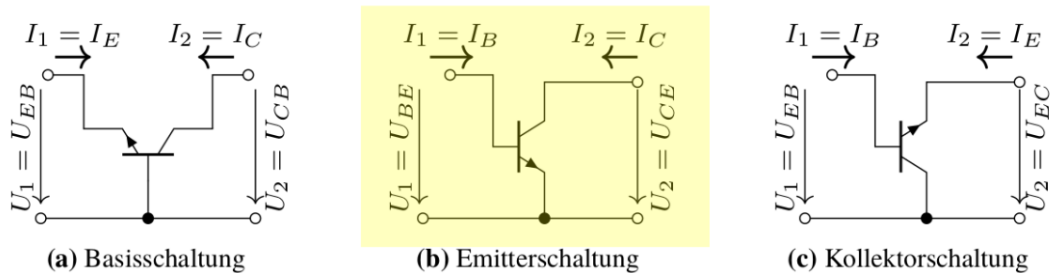


Abb. 12. Transistorgrundschaltungen in Vierpolderstellung

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

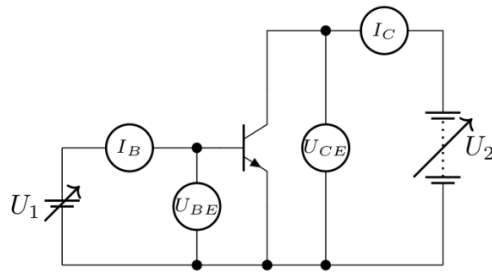
- Der Quo-tient heißt Gleichstromverstärkung und wird für die Basisschaltung mit A, für die Emitter- schaltung mit B und für die Kollektorschaltung mit C bezeichnet:

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

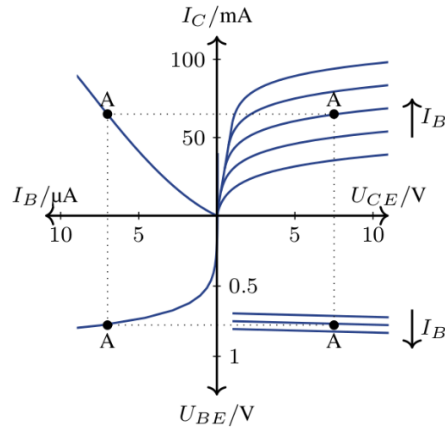
$$B = \frac{|I_C|}{|I_B|} = \frac{A}{A - 1} \gg 1$$

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

Der Bipolartransistor



(a) Messanordnung



(b) Kennlinienfeld

Abb. 13. 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.

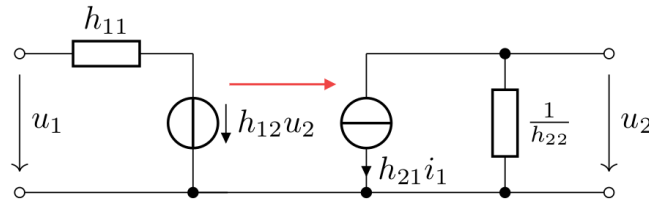


Abb. 14. Bipolartransistor: Kleinsignal-Ersatzschaltbild und Ersatzmodell

[npn1.txt]



Der Kleinsignalverstärker

Der Begriff Kleinsignalverhalten beschreibt, dass die Aussteuerung so begrenzt wird, dass der Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen als linear betrachtet werden kann.

- Damit der Transistor als Verstärker arbeiten kann, muss ein Arbeitspunkt eingestellt werden.
- Arbeitspunkt nennt man die Strom- und Spannungsverhältnisse, die an einem Bauelement oder in einer Schaltung ohne ansteuerndes Signal herrschen.
- Beim Bipolartransistor wird der Arbeitspunkt durch einen Punkt in jedem Quadranten des Kennlinienfeldes repräsentiert. Die für den Arbeitspunkt notwendigen Bedingungen werden durch Beschaltung des Transistors geschaffen.

Der Kleinsignalverstärker

- Der Widerstand R_B bestimmt u.A. den Arbeitspunkt und die Verstärkung. Dieser kann an die obere Spannungsquelle oder an den Kollektor des Transistors angeschlossen werden.

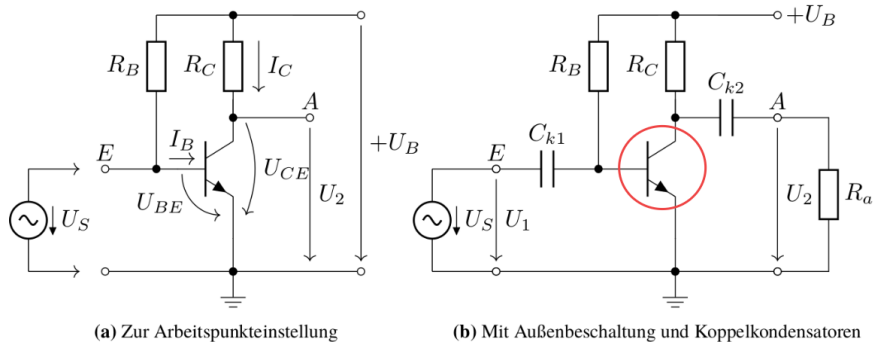


Abb. 15. Einstufiger Transistor-Kleinsignalverstärker in Emitterschaltung

Der Kleinsignalverstärker



Die Transistorkennlinie(n) ist (sind) nichtlinear (i.A. e-Funktionen). Daher wird die Verstärkung eines (Wechsel)Signals mit einem einzigen Transistor zu Verzerrungen führen.

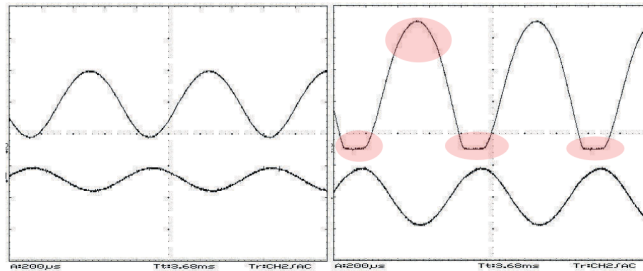


Abb. 16. Oszillogramme von Signalen am Eingang (unten) und am Ausgang (oben) des Verstärkers

Der Feldeffekttransistor

Der Feldeffekttransistor baut auf einen Kondensator (mit elektrischen Feld) auf. Aus einem Metall-Oxid-Substrat (MOS)-Kondensator entsteht ein MOSFET, indem zwei weitere Elektroden ergänzt werden. Der MOSFET Transistor ist der heute in der Technik vorherrschende Transistortyp.

- Auch hier wieder pn Übergang!

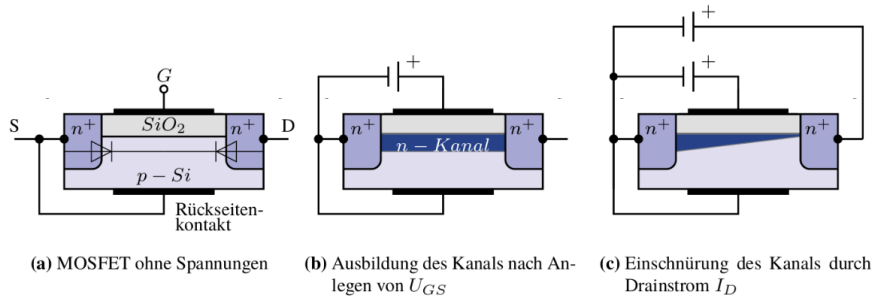


Abb. 17. Struktur eines MOSFET ohne und mit Spannungen, schematisch

Der Feldeffekttransistor

Es gibt drei (vier) Anschlüsse:

- Source (S) ~ Emitter (E)
- Gate (G) ~ Basis (B)
- Drain (D) ~ Kollektor (C)
- Substrat (B, Bulk)

Der Feldeffekttransistor

n-Kanal		p-Kanal	
selbstleitend Verarmungstyp (<i>depletion</i>)	selbstsperrend Anreicherungstyp (<i>enhancement</i>)	selbstleitend Verarmungstyp (<i>depletion</i>)	selbstsperrend Anreicherungstyp (<i>enhancement</i>)
	 nMOS		 pMOS
G: Gate, S: Source, D: Drain, B: Bulk (ist entweder fest mit Source verbunden und wird manchmal nicht gezeichnet – oder wird nach außen geführt)			

Abb. 18. Symbole für MOSFET-Arten

Der Feldeffekttransistor



Beim n-Kanal-MOSFET fließt der Strom innerhalb des Transistors nur in n-leitenden Gebieten (Source→Kanal→Drain). Es ist nur eine Ladungsträgersorte am Stromfluss beteiligt. Entsprechendes gilt für den p-Kanal-Typ. Man spricht deshalb im Gegensatz zum Bipolartransistor hier von Unipolartransistoren.

Für jede dieser beiden MOSFET-Arten wird eine weitere Unterscheidung nach dem Verhalten bei der Gate-Source-Spannung $U_{GS} = 0 \text{ V}$ getroffen; man unterscheidet:

- selbstleitende oder Verarmungstypen und
- selbstsperrende oder Anreicherungstypen.

Der Feldeffekttransistor

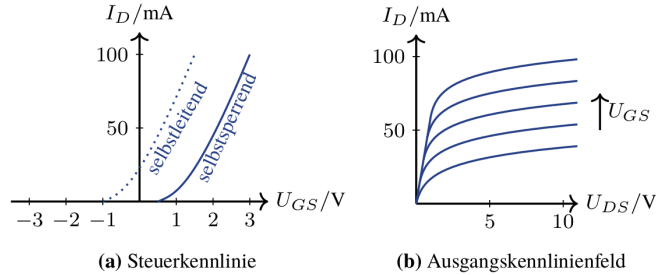


Abb. 19. n-Kanal-MOSFET-Kennlinien, schematisch

Der Feldeffekttransistor



Der Feldeffekttransistor ist vereinfacht eine spannungsgesteuerte Stromquelle.

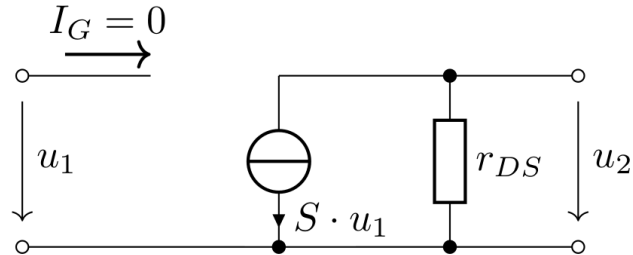


Abb. 20. FET: Kleinsignal-Ersatzschaltbild

Der Feldeffekttransistor

- Beim Bipolartransistor war die Verstärkung durch das Verhältnis vom Emitter/Kollektorstrom I_C zu Basistrom gegeben I_B .
- Beim Feldeffekttransistor ist es die Steilheit als:

$$S = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}$$

Der Sperrschicht-Feldeffekt-Transistoren (JFET)

Etwas anders als der MOSFET aufgebaut, aber ähnliches Prinzip.

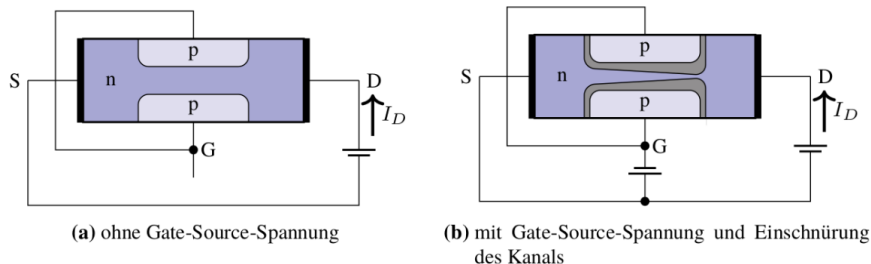


Abb. 21. JFET: Aufbau und Funktion, schematisch

Der Sperrschicht-Feldeffekt-Transistoren (JFET)

Die Kennlinien sehen etwas anders aus und obwohl beruhend auf einer Sperrschicht in den negativen Bereich verschoben, d.h. bei U_{GS} leitend (selbstleitend, Verarmungstyp)!

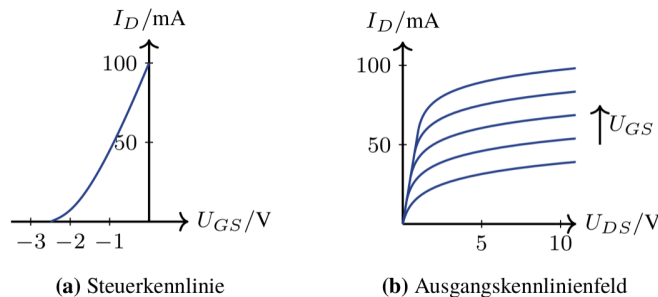


Abb. 22. JFET-Kennlinien, schematisch

Der Sperrschicht-Feldeffekt-Transistoren (JFET)

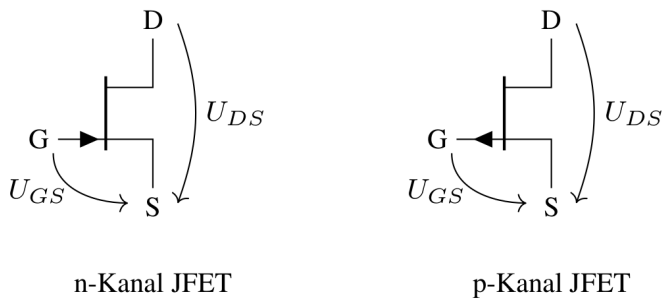


Abb. 23. JFET-Schaltssymbole

Der steuerbare Analogschalter

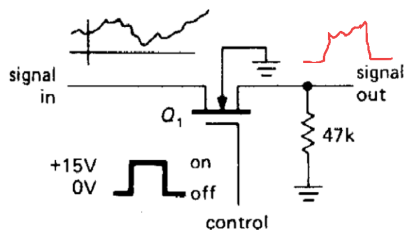
- Analogschalter werden technisch mit Feldeffekttransistoren realisiert.
- Prinzipiell kann man mit nur einem FET einen Signalpfad trennen und wieder schließen, daher eignen sich FET Transistoren auch für die Digitaltechnik.
- Der Durchgangswiderstand einer so einfachen Anordnung ist aber von der Polarität der Signalspannung abhängig.
- Man verbessert das Verhalten, indem entsprechend Abb. 6.40 zwei MOSFETs unterschiedlichen Leitfähigkeitstyps parallelgeschaltet werden.
 - Die Steuerung der MOSFETs erfolgt mit einem digitalen Steuersignal. Das digitale Steuersignal hat nur die beiden logischen Zustände 1 und 0.
 - Für den zweiten MOSFET muss das Steuersignal negiert werden. Die Negation leistet ein NICHT-Gatter.

Der steuerbare Analogschalter



Aber: Beachte die Kennlinien von FET Transistoren und die Steuerspannung U_{GS} .
Ein Logikpegel wird i.A. durch die Spannungen 0V und z.B. 3V repräsentiert.

- Würde man $-U_B=0V$ setzen können die Transistoren direkt angesteuert werden, da U_{GS} entweder 0 (sperrend) oder $+U_B$ (leitend) für den n-Kanal Transistor ist.



https://neurophysics.ucsd.edu/courses/physics_120/AoE_FET_Switches.pdf

Abb. 24. Einfacher analoger Schalter mit einem n-Kanal FET Transistor

Der steuerbare Analogschalter

- Da nächste Problem: Der Durchgangswiderstand eines FET (leitend) hängt von der U_{DS} Spannung ab (also hier das Signal selber) und nimmt mit U ebenfalls zu/ab (je nach Transistortyp).
- Mit zwei komplementären Transistoren (CMOS) parallel geschaltet kann man das etwas kompensieren

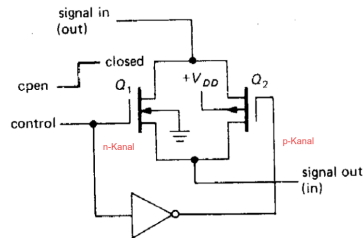
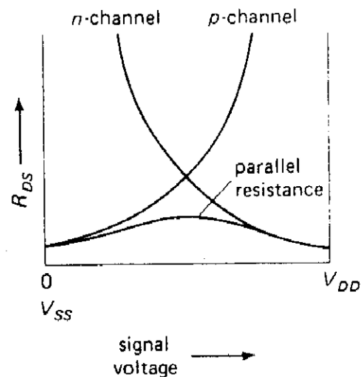


Abb. 25. (Links) Anstieg/Abfall des Widerstands
(Rechts) CMOS Analog Schalter

Digitaltechnik Schaltungen



Digitalelektronik basiert heute meist auf MOSFET Transistortechnik. Daher ist Digitaltechnik eigentlich Analogtechnik!

Repetitorium der Digitalen Schaltungstechnik:

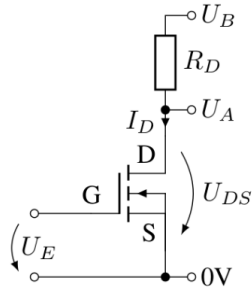
1. Boolesche Algebra für zustandslose Logik (kombinatorische Logik)

- Werte 0/1 → Spannungen (oder Ströme), z.B. 0V/3V
- Negierung → Not(x) → Inverter
- Konjunktion → Und-Verknüpfung → Und-Gatter
- Disjunktion → Oder-Verknüpfung

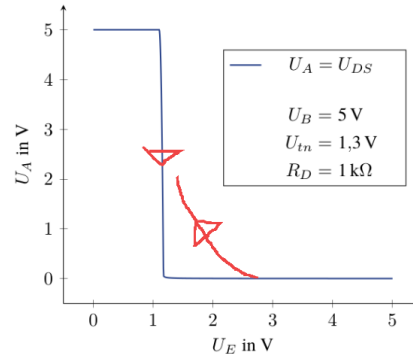
2. Zustandsbasierte (sequenzielle) Logik

- Speicher, Register → Flip-Flop

Digitaltechnik Schaltungen



(a) Schaltung



(b) U_A als Funktion von U_E

Abb. 26. nMOS-Inverter: Der Übergang von 1 \rightarrow 0 geht "schnell", da aktiv durch den Transistor, der Übergang 0 \rightarrow 1 geht "langsamer" da nur über den Widerstand (Laden eines Kondensators). Daher spricht man bei dem Ausgangspegel von [0,H], 0 ist "stark", H ist "schwach".

Digitaltechnik Schaltungen

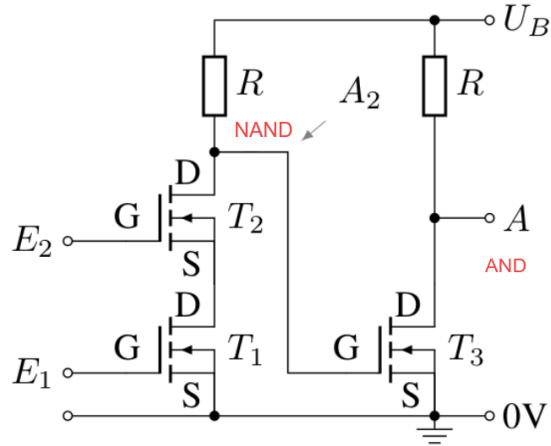


Abb. 27. (N)AND-Schaltung mit nMOS-Transistoren

Digitaltechnik Schaltungen



Digitallogikschaltungen mit nur einer Transistorsorte können immer nur $[0,H]$ oder $[L,1]$ Werte ausgeben. Ein Wert ist über den Widerstand "schwach", und eine Belastung (nachgeschaltete Logikgatter) führt schnell zu einem Spannungseinbruch (und aus z.B. H wird ein ungültiger Logikpegel).

Daher brauchen wir n- und p-Kanal Transistoren, also die heute gängige Complementary MOS Transistortechnik.

- Bei CMOS haben wir immer Paare von n- und p-Kanal Transistoren.
- Aber: Ein p-Kanal Transistor ist niemals (technisch/physikalisch bedingt) der spigelsymmetrische Zwilling eines n-Kanal Transistors, und umgekehrt!
- Die komplementären Transistoren sind nur "ähnlich", niemals "invers". Z.B. sind p-Kanal MOSFET langsamer als n-Kanal, die Strombelastbarkeit ist niedriger usw.

Digitaltechnik Schaltungen

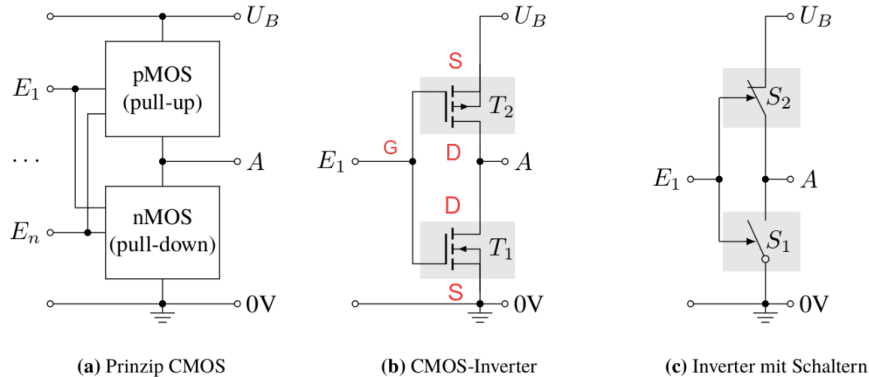


Abb. 28. CMOS-Funktionsweise: Der p-Kanal Transistor befindet sich immer oben (positive Versorgungsspannung), der n-Kanal unten (Grund, 0V). Beim p-Kanal oben ist die Source oben, beim n-Kanal unten

Digitaltechnik Schaltungen

NAND

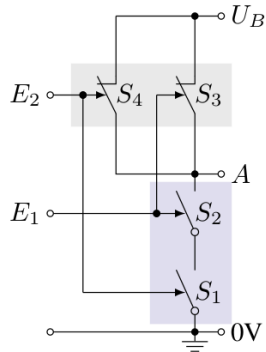
E_1	E_2	A
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

$$A = \overline{E_1 \cdot E_2}$$

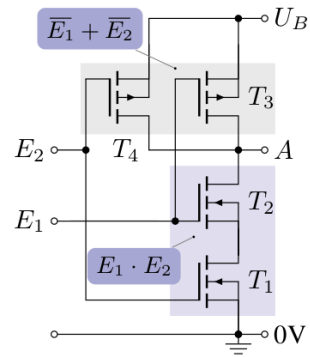
$$= \overline{E_1} + \overline{E_2}$$

$$\overline{A} = \overline{\overline{E_1 \cdot E_2}}$$

$$= E_1 \cdot E_2$$



(a) NAND mit Schaltern



(b) CMOS-NAND

Abb. 29. CMOS-NAND Gatter

Der Differenzverstärker



Ein einziger Transistor ist durch die nichtlineare Kennlinie wenig geeignet Gleichspannungen, also unsere Variablen, zu verarbeiten und zu verstärken, wir können keine kleinen Werte relativ zu 0 verarbeiten (Offset, Nichtlinearität). Aber zwei in einer symmetrischen Schaltungen als Differenzverstärker können dieses!

- Der Differenzverstärker ist die Eingangsstufe von einem Operationsverstärker und kann mit Bipolar- als auch FET Transistoren (JFET) aufgebaut werden.
- Die Schaltung hat zwei Eingänge (U_{e1} und U_{e2}) und zwei Ausgänge (U_{a1} und U_{a2}).
- Sie wird durch zwei zum Bezugspotential (Masse) symmetrische Spannungen $+U_B$ und $-U_B$ versorgt

Der Differenzverstärker

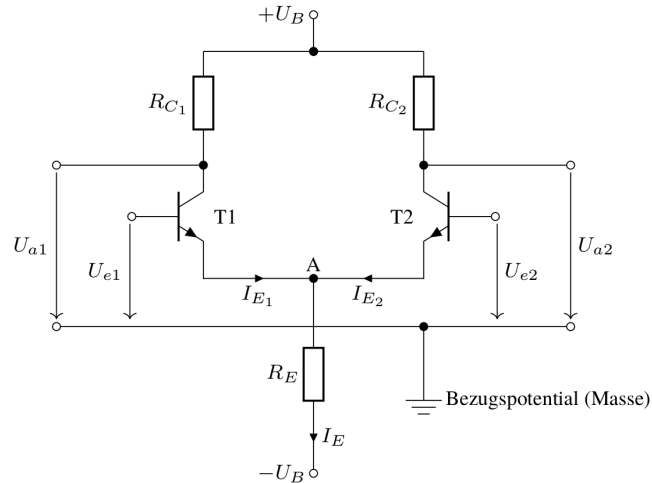


Abb. 30. Differenzverstärker, schematisch, mit bipolaren Transistoren

Der Differenzverstärker

- Bei Gleichtaktansteuerung ($U_{e1}=U_{e2}$) wird die Symmetrie der Schaltung nicht gestört und die Stromverteilung am Knoten A nicht verändert. Folglich entsteht bei Gleichtaktansteuerung mit kleiner Amplitude im Idealfall keine Spannungsdifferenz zwischen den Kollektoren von T_1 und T_2 und damit kein Ausgangssignal, d.h. $U_{a1} = U_{a2}$.
- Bei Differenzansteuerung wird die Symmetrie der Schaltung gestört und die Stromverteilung am Knoten A verändert sich und somit auch $U_{a1} \neq U_{a2}$.
- Deshalb entstehen bei Differenzansteuerung zwei gegenphasige Ausgangssignale

$$\Delta U_{e1} = - \Delta U_{e2}$$

$$\Delta U_{a1} = - \Delta U_{a2}$$

Der Differenzverstärker



Der Differenzverstärker erzeugt eine Potentialdifferenz zwischen seinen Eingängen und seinem Ausgang. Diese Potentialdifferenz muss kompensiert werden, um $U_a = 0$ für $U_{e1} = U_{e2}$ zu erreichen.

- Um diese und die anderen oben gestellten Forderungen, wie eine hohe Verstärkung und ein geringer Innenwiderstand, zu erfüllen, sind **weitere direkt gekoppelte Verstärkerstufen** mit speziellen Eigenschaften erforderlich.

⇒ Operationsverstärker

Der 3-Transistor OpAmp

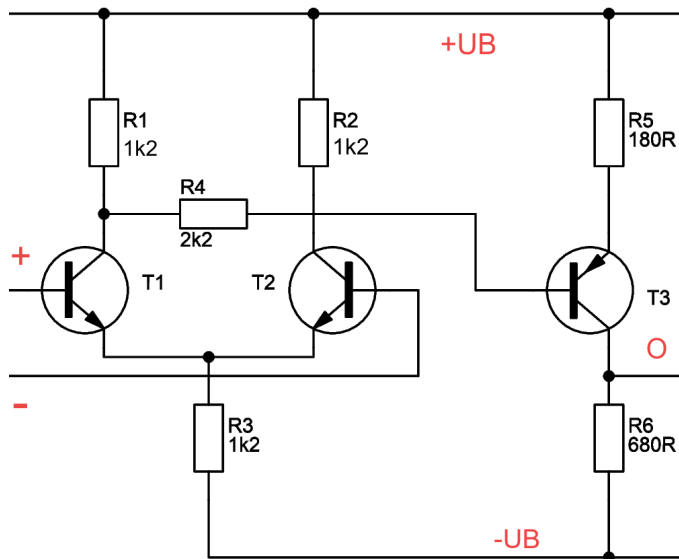


Abb. 31. Der OpAmp3 besteht aus einem Differenzverstärker (NPN Bipolar) und einem nachfolgenden Transistor (PNP Bipolar) der die Spannungs- und Stromverstärkung übernimmt.

[opamp3.txt]

