GET it digital

Modul 9: Halbleiterbauelemente

Stand: 10. März 2026

Lizenz

Weiternutzung als OER ausdrücklich erlaubt: Dieses Werk und dessen Inhalte sind lizenziert unter CC BY 4.0. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. Nennung gemäß TULLU-Regel bitte wie folgt: „GET it digital Modul 9: Halbleiterbauelemente“ von D. Thiem, J. Brodmann, M. Kaminski, K. Siebert Lizenz: CC BY 4.0.

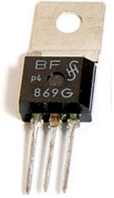
Der Lizenzvertrag ist hier abrufbar:
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de
Das Werk ist online verfügbar unter:
https://getitdigital.uni-wuppertal.de/module/modul-9-halbleiterbauelemente

Lernziele: Halbleiter

Die Studierenden können

- Zusammenhänge zwischen Festkörpern und dem Bändermodell erklären.
- Vorgänge innerhalb von Halbleitern beschreiben.
- verschiedene Halbleitermaterialien und deren Eigenschaften bennen.

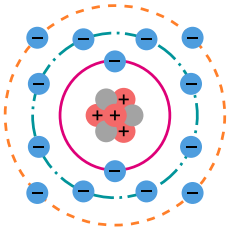
Einführung



Einführung

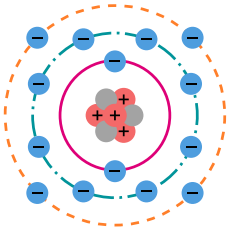
- Halbleiterbauelemente sind zentral für die Funktion zahlreicher elektronischer Geräte wie Computer, Mobiltelefone und Solarzellen.
- Sie basieren auf Materialien, die weder gute Leiter noch gute Isolatoren sind. Ihre Funktionsweise kann mithilfe des Bändermodells erklärt werden.
- In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Halbleitertechnik erläutert.

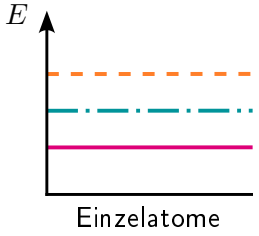
Das Bändermodell



- Das Bändermodell beschreibt die elektronischen Eigenschaften von Festkörpern und ordnet die Energiezustände von Elektronen in Energiebänder.

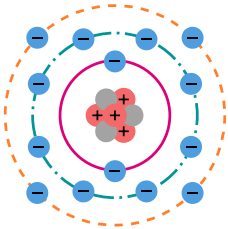
Das Bändermodell

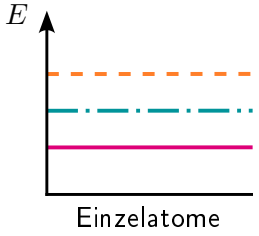




- Das Bändermodell beschreibt die elektronischen Eigenschaften von Festkörpern und ordnet die Energiezustände von Elektronen in Energiebänder.
- Es hilft, elektrische, optische und magnetische Eigenschaften von Materialien zu verstehen und zu erklären.

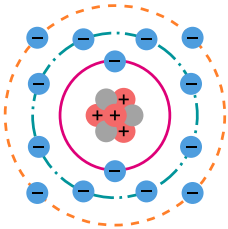
Das Bändermodell

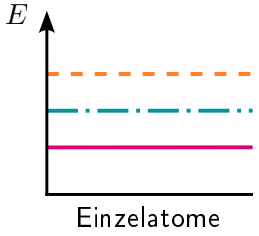




- Das Bändermodell beschreibt die elektronischen Eigenschaften von Festkörpern und ordnet die Energiezustände von Elektronen in Energiebänder.
- Es hilft, elektrische, optische und magnetische Eigenschaften von Materialien zu verstehen und zu erklären.
- Das Modell ermöglicht die Erklärung von Leitung, Isolation, Halbleiterverhalten sowie Oberflächen- und Grenzflächenzuständen.

Das Bändermodell





- Das Bändermodell beschreibt die elektronischen Eigenschaften von Festkörpern und ordnet die Energiezustände von Elektronen in Energiebänder.
- Es hilft, elektrische, optische und magnetische Eigenschaften von Materialien zu verstehen und zu erklären.
- Das Modell ermöglicht die Erklärung von Leitung, Isolation, Halbleiterverhalten sowie Oberflächen- und Grenzflächenzuständen.
- In der Abbildung auf der linken Seite ist der Zusammenhang zwischen bohrschem Atommodell und Bändermodell illustriert.

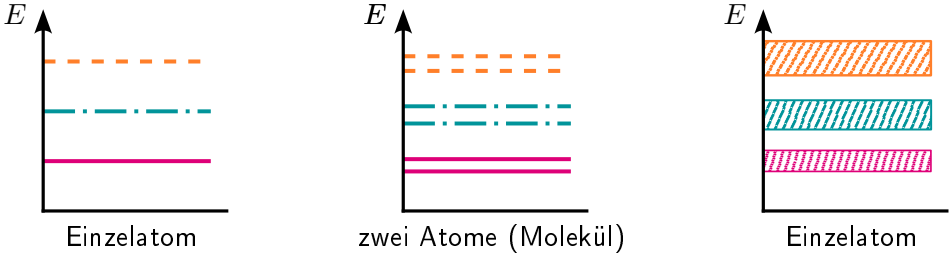


Abbildung: **Übergang von Energieniveaus zu Bändern** Zusammenhang zwischen den möglichen Energiezustände in Abhängigkeit zur Anzahl der Atome. V.l.n.r. Energiezustände von Elektronen bei einem Einzelatom, 2 Atomen (Molekül) und einem Festkörper.

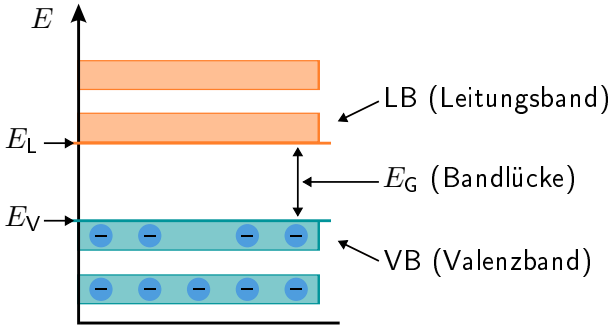


Abbildung: **Bändermodell eines Materials bei 0 K** Darstellung der Energiebänder mit zugehöriger Beschriftung sowie deren alternativen Bezeichnungen.

Einteilung von Materialien

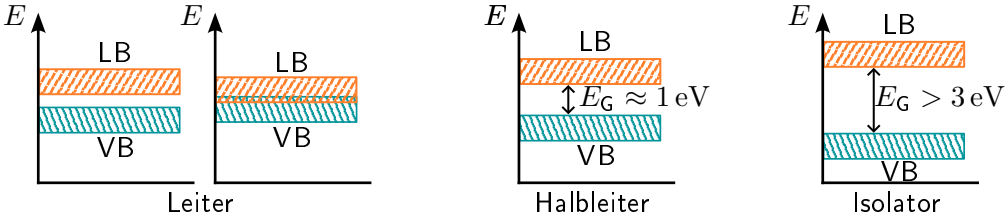


Abbildung: **Bändermodell verschiedener Halbleitermaterialien** V.l.n.r.: Leiter ohne und mit Überlappung, Halbleiter und Isolator

Merke:

- Ladungsträger können nur definierte Energieniveaus im Festkörper besetzen.

Merke:

- Ladungsträger können nur definierte Energieniveaus im Festkörper besetzen.
- Bei $T = 0\,\mathrm{K}$ ist das Valenzband das höchste besetzte Energieniveau, das darüberliegende Leitungsband beinhaltet keine freien Ladungsträger.

Einteilung von Materialien

Merke:

- Ladungsträger können nur definierte Energieniveaus im Festkörper besetzen.
- Bei $T = 0\,\mathrm{K}$ ist das Valenzband das höchste besetzte Energieniveau, das darüberliegende Leitungsband beinhaltet keine freien Ladungsträger.
- Materialien können über die Bandlücke Kategorisiert werden.

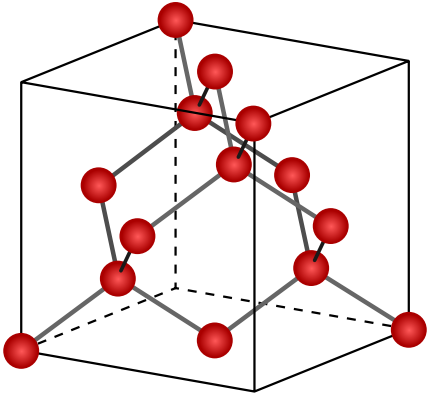


Abbildung: **Diamantgitterstruktur von Silizium**

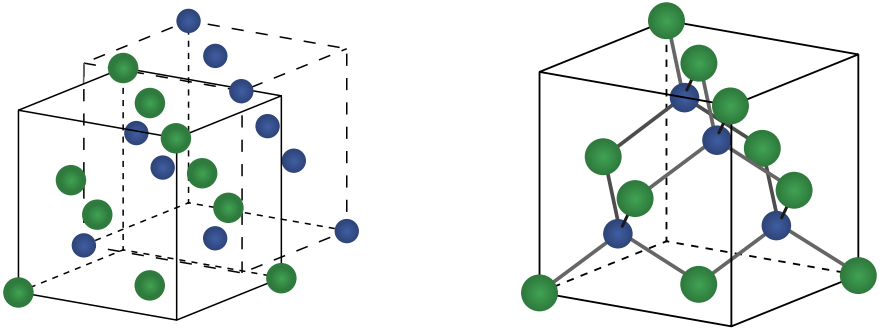


Abbildung: **Zinkblende-Gitterstruktur von GaAs**

Merke:

- Silizium ist das am weitesten verbreitete Halbleitermaterial.

Merke:

- Silizium ist das am weitesten verbreitete Halbleitermaterial.
- Verbindungshalbleiter bestehen aus zwei Materialen, die in bestimmter Kombination Halbleiterverhalten aufweisen.

Merke:

- Silizium ist das am weitesten verbreitete Halbleitermaterial.
- Verbindungshalbleiter bestehen aus zwei Materialen, die in bestimmter Kombination Halbleiterverhalten aufweisen.
- Silizium ist aus der IV. Hauptguppe des Periodensystem, Verbindungshalbleiter typischerweise aus der III. und V. Hauptguppe.

Material	Bandlücke (eV)	Ladungsträgerdichte (cm^{-3})	Elektronenbeweglichkeit (cm^2/Vs)	Löcherbeweglichkeit (cm^2/Vs)	Anwendungen
Si	1,1	$10^{10} - 10^{15}$	1500	450	Mikrochips, Solarzellen, Sensoren
Ge	0,7	$10^{13} - 20^{19}$	3900	1900	Transistoren, Infrarot-Detektoren
GaAs	1,43	$10^{6} - 10^{8}$	8500	400	Hochfrequenzschaltungen, LEDs, Laserdioden

Tabelle: Eigenschaften verschiedener Halbleitermaterialien

Material	Bandlücke (eV)	Ladungsträgerdichte (cm^{-3})	Elektronenbeweglichkeit (cm^2/Vs)	Löcherbeweglichkeit (cm^2/Vs)	Anwendungen
InP	1,35	$10^{16} - 10^{17}$	5000 - 7000	200 - 400	Optoelektronik, Solarzellen
GaN	3,4	$10^{13} - 10^{17}$	1000 - 2000	50- 200	Leistungselektronik, LED-Beleuchtung, Displays
SiC	3,0	$10^{12} - 10^{16}$	800 - 1200	200 - 400	Leistungseletronik, Hochtemperaturanwendung

Tabelle: Eigenschaften verschiedener Halbleitermaterialien

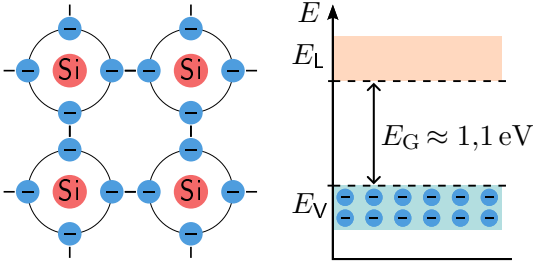


Abbildung: Gitterstruktur und Bändermodell von **reinem Silizium** bei $T = 0\,\mathrm{K}$

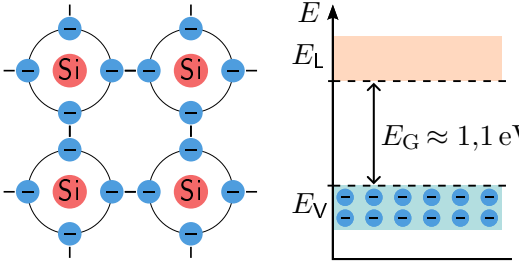


Abbildung: Gitterstruktur und Bändermodell von **reinem Silizium** bei $T = 0\,\mathrm{K}$

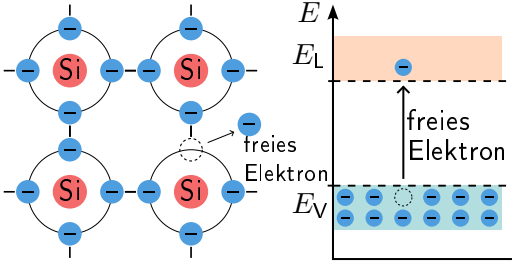


Abbildung: Gitterstruktur und Bändermodell von **reinem Silizium** bei $T > 0\,\mathrm{K}$

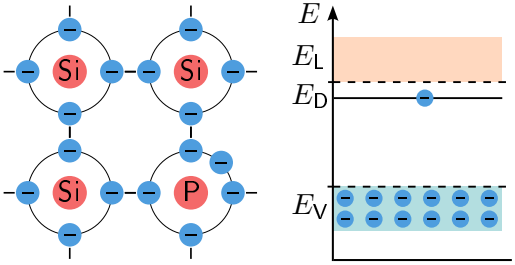


Abbildung: Gitterstruktur und Bändermodell von **n-dotiertem Silizium** bei $T = 0\,\mathrm{K}$

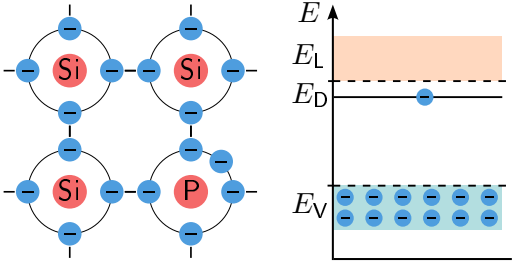


Abbildung: Gitterstruktur und Bändermodell von **n-dotiertem Silizium** bei $T = 0\,\mathrm{K}$

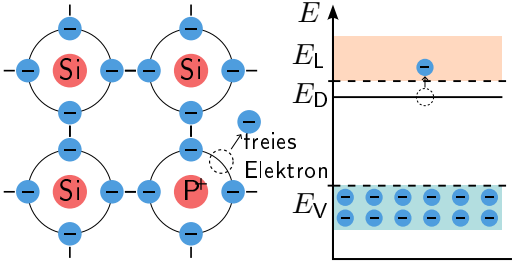


Abbildung: Gitterstruktur und Bändermodell von **n-dotiertem Silizium** bei $T > 0\,\mathrm{K}$

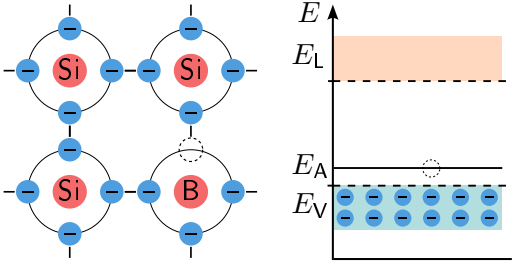


Abbildung: Gitterstruktur und Bändermodell von **p-dotiertem Silizium** bei $T = 0\,\mathrm{K}$

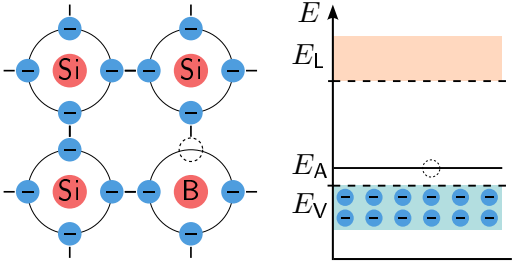


Abbildung: Gitterstruktur und Bändermodell von **p-dotiertem Silizium** bei $T = 0\,\mathrm{K}$

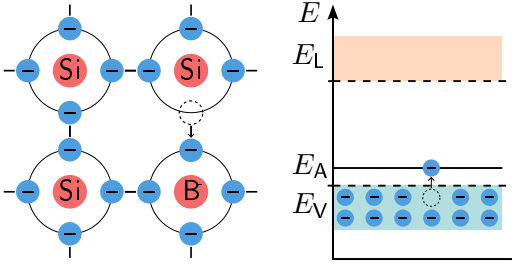


Abbildung: Gitterstruktur und Bändermodell von **p-dotiertem Silizium** bei $T > 0\,\mathrm{K}$

Merke:

- Durch thermische Anregung können freie Elektronen entstehen, die zum Ladungsträgertransport beitragen.

Merke:

- Durch thermische Anregung können freie Elektronen entstehen, die zum Ladungsträgertransport beitragen.
- Dotierung ist das gezielte Einbringen von Fremdatomen mit oder weniger Valenzelektronen als das Ausgangsmaterial.

Merke:

- Durch thermische Anregung können freie Elektronen entstehen, die zum Ladungsträgertransport beitragen.
- Dotierung ist das gezielte Einbringen von Fremdatomen mit oder weniger Valenzelektronen als das Ausgangsmaterial.
- Für n-Dotierung kann Phosphor und für p-Dotierung Bor genutzt werden.

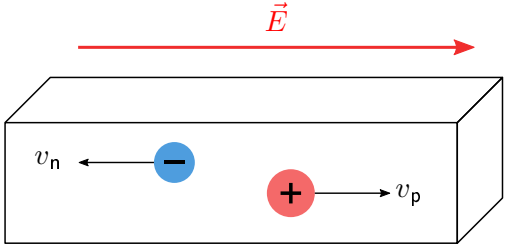


Abbildung: **Driftstrom innerhalb eines Halbleiters**

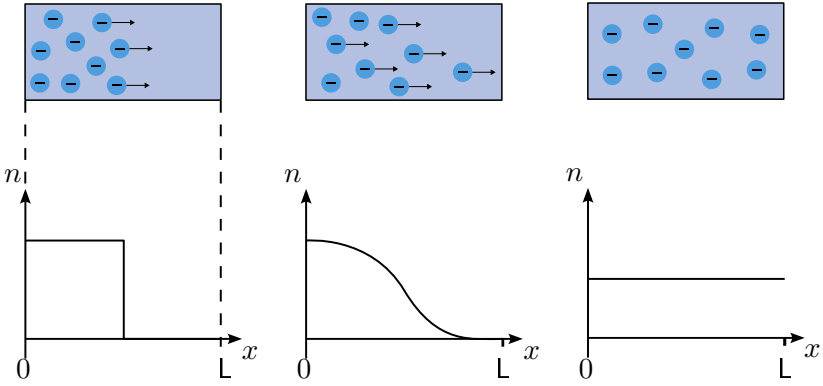


Abbildung: **Diffusionsstrom innerhalb eines Halbleiters**

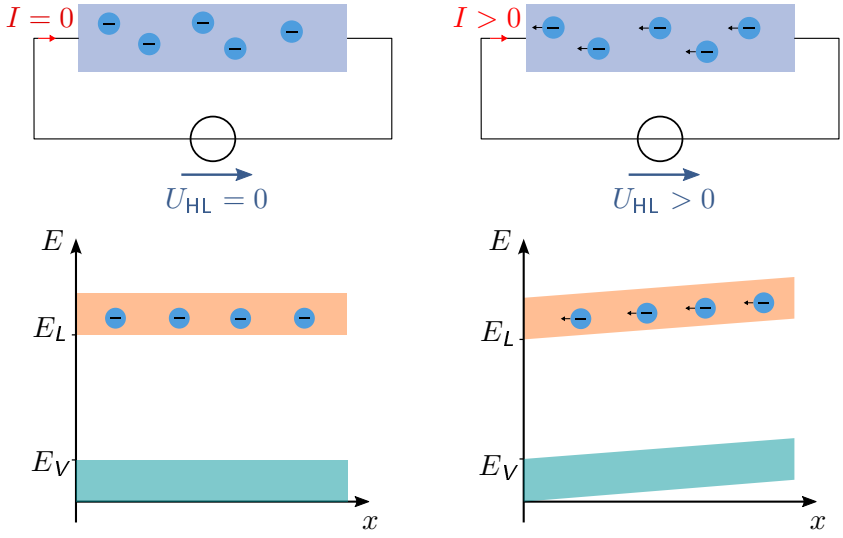


Abbildung: **Einfluss von Spannungen auf Halbleiter**

Merke:

- Driftstrom ist der Ladungsträgertransport auf Grund eines elektrischen Feldes.

Merke:

- Driftstrom ist der Ladungsträgertransport auf Grund eines elektrischen Feldes.
- Diffusionsstrom ist die Bewegung von Ladungsträgern auf Grund eines Konzentrationsunterschiedes.

Merke:

- Driftstrom ist der Ladungsträgertransport auf Grund eines elektrischen Feldes.
- Diffusionsstrom ist die Bewegung von Ladungsträgern auf Grund eines Konzentrationsunterschiedes.
- Drift- und Diffusionsstrom ergeben zusammen den Gesamtstrom.

Merke:

- Driftstrom ist der Ladungsträgertransport auf Grund eines elektrischen Feldes.
- Diffusionsstrom ist die Bewegung von Ladungsträgern auf Grund eines Konzentrationsunterschiedes.
- Drift- und Diffusionsstrom ergeben zusammen den Gesamtstrom.
- Eine externe Spannung führt zu einer Verschiebung des Bändermodells.

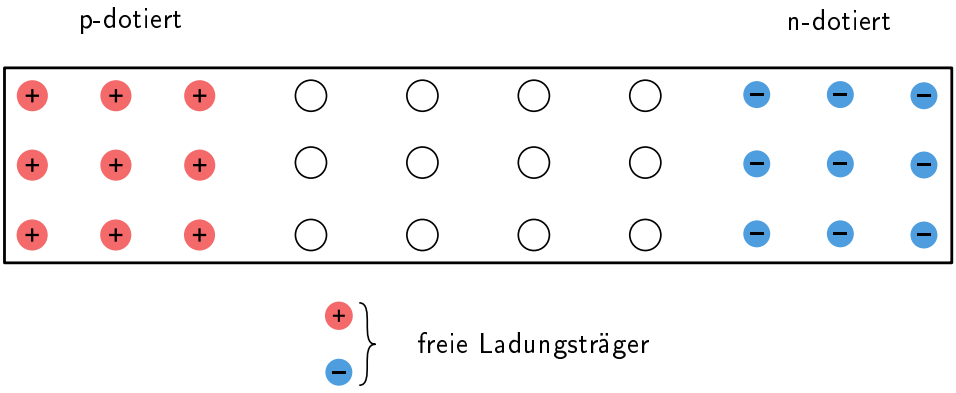


Abbildung: **Vorgänge innerhalb eines pn-Übergangs.**

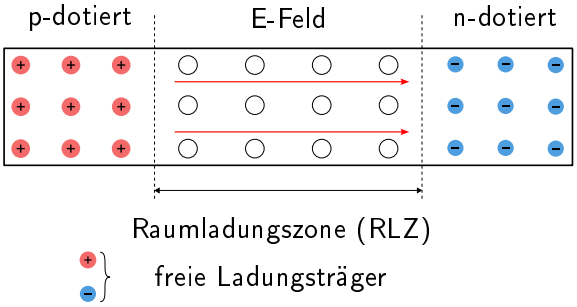


Abbildung: **Vorgänge innerhalb eines pn-Übergangs.**

- Durch die Bindung der Löcher und Elektronen an deren Atome begrenzt diese den Diffusionsstrom.

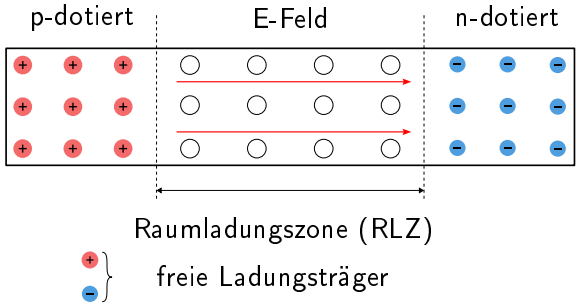


Abbildung: **Vorgänge innerhalb eines pn-Übergangs.**

- Durch die Bindung der Löcher und Elektronen an deren Atome begrenzt diese den Diffusionsstrom.
- Der Bereich in der Mitte nennt sich Raumladungszone (RLZ). Dort sind keine freien Ladungsträger, da die Elektronen und Löcher sich gegenseitig neutralisieren.

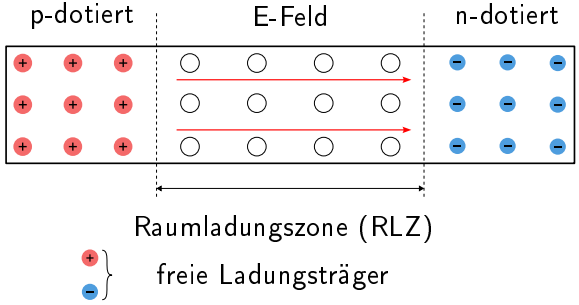


Abbildung: **Vorgänge innerhalb eines pn-Übergangs.**

- Durch die Bindung der Löcher und Elektronen an deren Atome begrenzt diese den Diffusionsstrom.
- Der Bereich in der Mitte nennt sich Raumladungszone (RLZ). Dort sind keine freien Ladungsträger, da die Elektronen und Löcher sich gegenseitig neutralisieren.
- Es entsteht ein elektrisches Feld zwischen den p- und n-dotierten Bereichen.

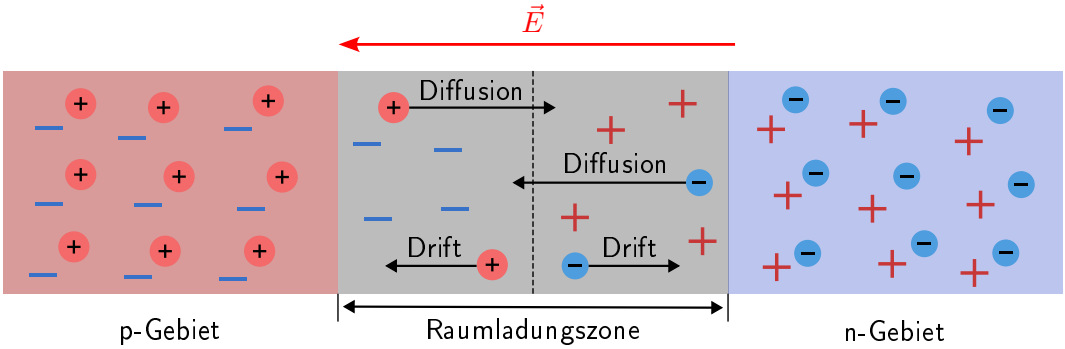


Abbildung: **Vorgänge innerhalb des pn-Übergangs.**

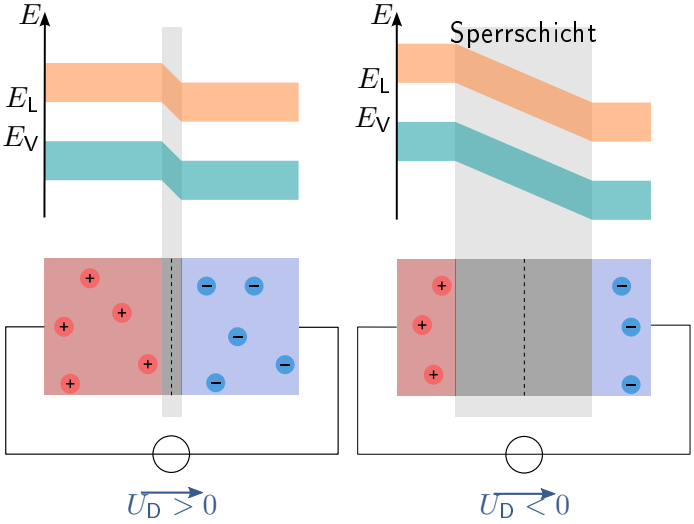


Abbildung: **Einfluss von Spannungen auf pn-Übergang.** Raumladungszone bei verschiedenen angelegten Spannungen. Links: Spannung in Durchlassrichtung. Rechts: Spannung entgegen der Durchlassrichtung, Sperrrichtung

Merke:

- Der pn-Übergang kombiniert eine p- und n-dotierte Halbleiterschicht.

Merke:

- Der pn-Übergang kombiniert eine p- und n-dotierte Halbleiterschicht.
- Im Übergangsbereich sind keine freien Ladungsträger, der Bereich wird Raumladungszone genannt.

Merke:

- Der pn-Übergang kombiniert eine p- und n-dotierte Halbleiterschicht.
- Im Übergangsbereich sind keine freien Ladungsträger, der Bereich wird Raumladungszone genannt.
- In Durchlassrichtung wird die RLZ verkleinert, in Sperrrichtung wird diese vergrößert.

Lernziele: Halbleiterbauelemente

Die Studierenden können

- Bauteile für verschiedene Anwendungen auswählen.
- den Aufbau verschiedener Halbleiterbauelemente beschreiben.
- Arbeitspunkte bestimmen und fehlende Bauteilwerte berechnen.
- Anwendungen einzelner Bauelemente nennen.

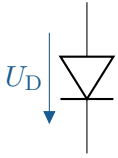


Abbildung: **Silizium Diode.** V.l.n.r. Schaltzeichen, Bauform und Querschnitt einer Silizium Diode.

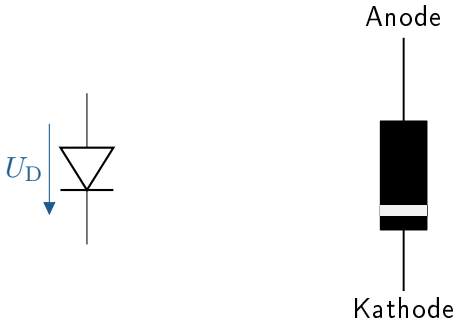


Abbildung: **Silizium Diode.** V.l.n.r. Schaltzeichen, Bauform und Querschnitt einer Silizium Diode.

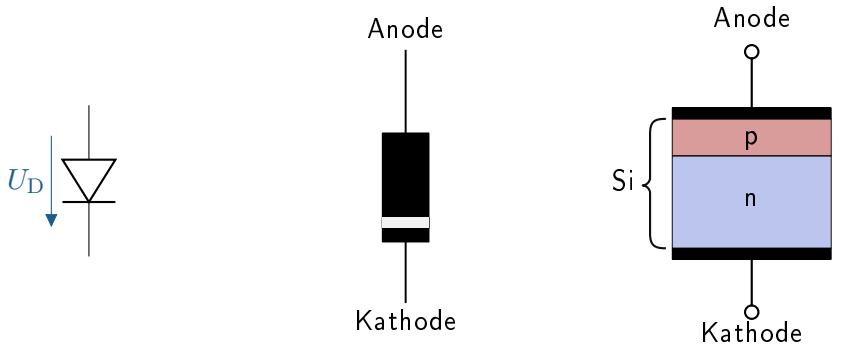
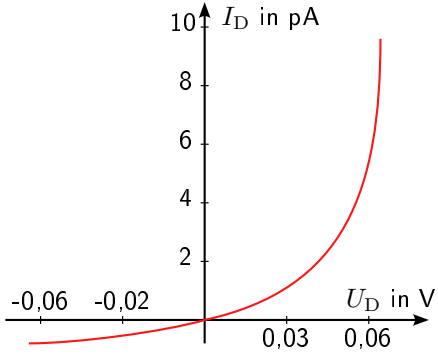


Abbildung: **Silizium Diode.** V.l.n.r. Schaltzeichen, Bauform und Querschnitt einer Silizium Diode.

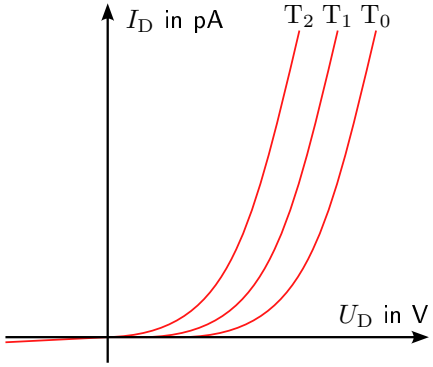
Diodenkennlinie



$$I_D = I_S \cdot (e^{\frac{U}{U_T}} - 1) = I_S e^{\frac{U_D}{U_T}} - I_S$$

- I_D: Diodenstrom
- I_S: Sperrstrom
- U_D: Flussspannung
- U_T: Temperaturspannung
- $U_T = \frac{k \cdot T}{e}$, bei Raumtemperatur $U_T \approx 25\,\mathrm{mV}$

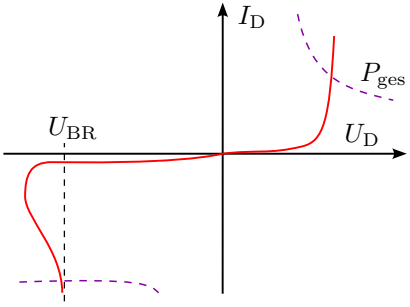
Temperaturverhalten von Dioden



$$I_\mathrm{D} = I_\mathrm{S} \cdot (e^{\frac{U}{U_\mathrm{T}}} - 1) = I_\mathrm{S} e^{\frac{U_\mathrm{D}}{U_\mathrm{T}}} - I_\mathrm{S} \text{ mit } U_\mathrm{T} = \frac{k \cdot T}{e}$$

- Boltzmannkonstante $k = 1.380649 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{J/K}$
- $T_2 > T_1 > T_0$
- Die Flussspannung U_D sinkt um ca. 2 mV pro °C bei konstantem Diodenstrom
- Jede 5 °C Temperaturerhöhung verdoppelt den Diodenstrom

Belastungsgrenzen einer Diode



- Eine Diode verträgt in Sperrrichtung mehr Spannung als in Flussrichtung.
- Bei hohen Spannungen in Sperrrichtung kann es zu einem Durchbruch kommen.
- Die Diode in Sperrrichtung wird in dem violett markierten Bereich irreversibel zerstört.

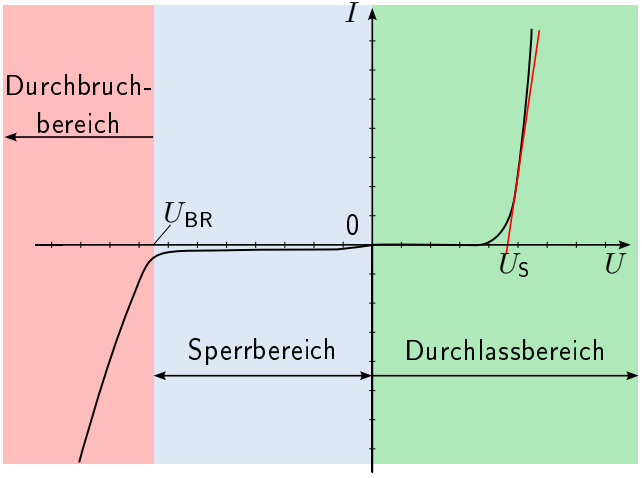


Abbildung: **Diodenkennlinie.** Relevante Bereiche v.l.n.r. Durchbruchbereich, Sperrbereich und Durchlassbereich

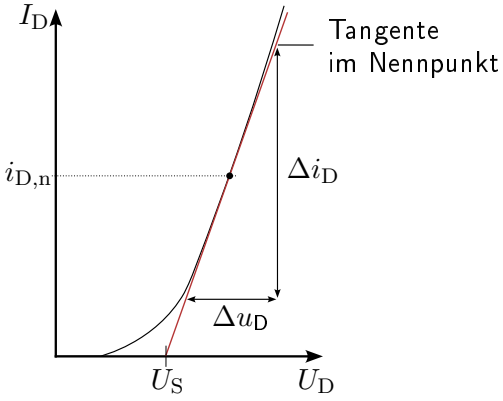


Abbildung: **Diodenkennlinie und Ersatzschaltbild.** Links: Diodenkennlinie mit Näherung für den differenziellen Widerstand.

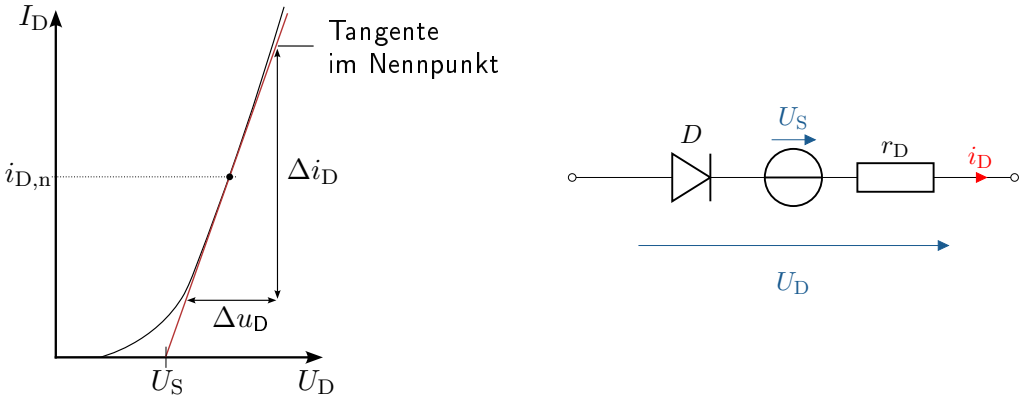


Abbildung: **Diodenkennlinie und Ersatzschaltbild.** Links: Diodenkennlinie mit Näherung für den differenziellen Widerstand. Rechts: Dioden-Ersatzschaltbild mit der idealen Diode, Spannungsquelle und differenzieller Widerstand.

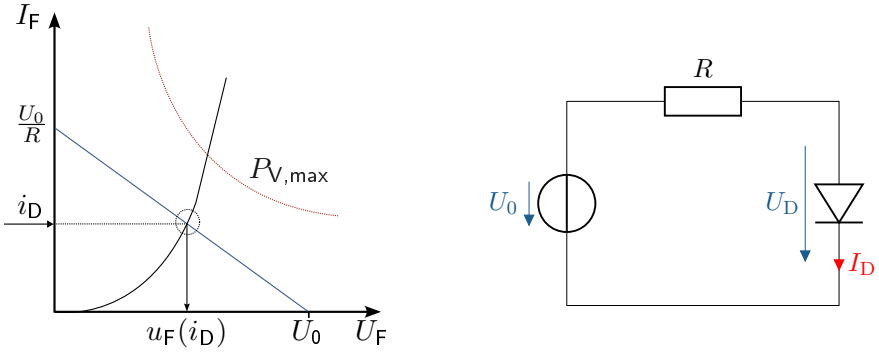


Abbildung: **Grafische Bestimmung des Arbeitspunktes.** Links: Diodenkennlinie (schwarz), Widerstandsgerade (blau) und Asymptote der maximalen Verlustleitung (rot) der Diode. Rechts: Schaltung der Diode mit Vorwiderstand.

Merke:

- Die Kennlinie der Diode ist stark nichtlinear.

Merke:

- Die Kennlinie der Diode ist stark nichtlinear.
- Das Verhalten der Kennlinie kann in drei Bereichen, den Durchbruch-, Sperr- und Durchlassbereich, beschrieben werden.

Merke:

- Die Kennlinie der Diode ist stark nichtlinear.
- Das Verhalten der Kennlinie kann in drei Bereichen, den Durchbruch-, Sperr- und Durchlassbereich, beschrieben werden.
- Mittels idealer Diode, Spannungsquelle und Widerstand kann die reale Diode in verschiedenen Bereichen angenähert werden.

Diode – Aufbau

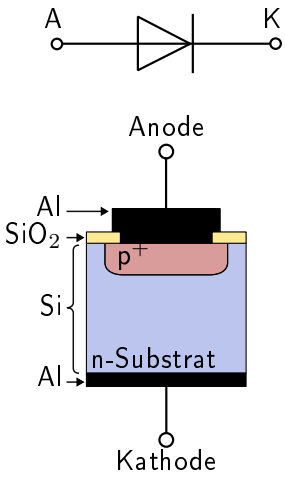


Abbildung: **Schichtaufbau von Dioden.** Aufbau und Vergleich einer klassischen Si-Diode (links) und Schottky-Diode(rechts).

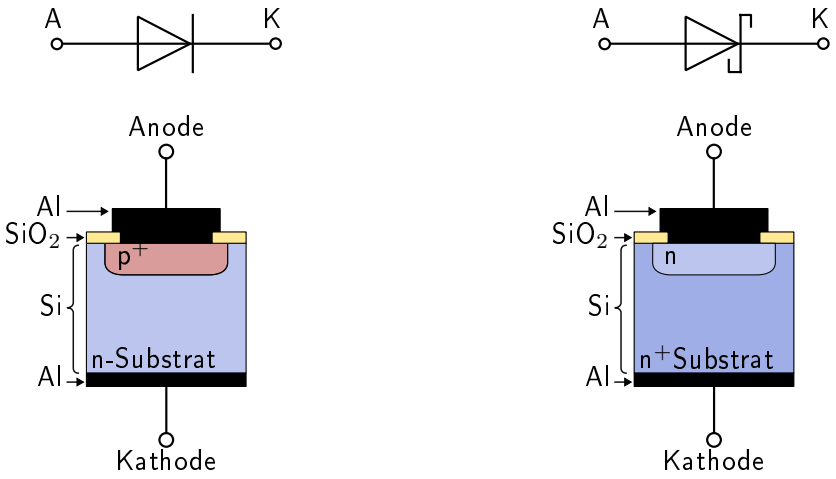
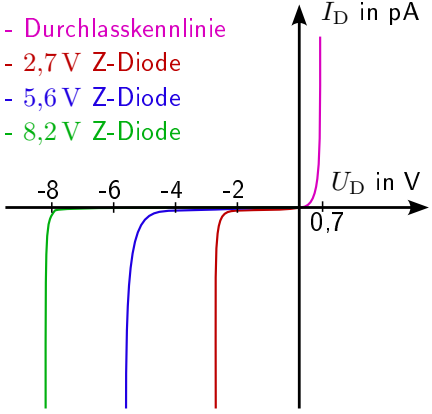


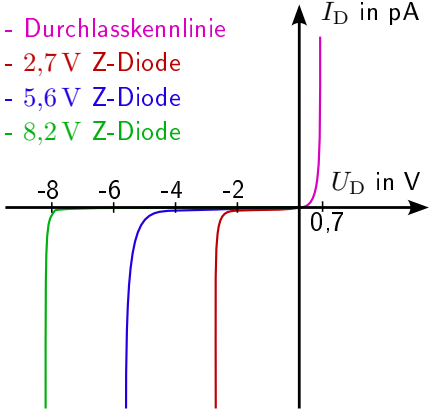
Abbildung: **Schichtaufbau von Dioden.** Aufbau und Vergleich einer klassischen Si-Diode (links) und Schottky-Diode(rechts).

Kennlinien einer Zener-Diode



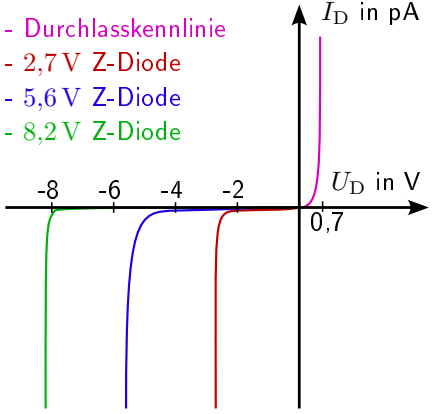
- Zener-Effekt bei einer Durchbruchspannung von $< 5\,V$ (Elektronen tunneln in Sperrrichtung)

Kennlinien einer Zener-Diode



- Zener-Effekt bei einer Durchbruchspannung von $< 5\,V$ (Elektronen tunneln in Sperrrichtung)
- Avalanche-Effekt bei einer Durchbruchspannung von $> 5\,V$ (Lawinendurchbrucheffekt)

Kennlinien einer Zener-Diode



- Zener-Effekt bei einer Durchbruchspannung von $< 5\,V$ (Elektronen tunneln in Sperrrichtung)
- Avalanche-Effekt bei einer Durchbruchspannung von $> 5\,V$ (Lawinendurchbrucheffekt)
- U_{BR} im Bereich von $1{,}8\,V$ bis $300\,V$ möglich.

Merke:

- Schottky-Dioden weisen keinen pn-Übergang auf, sondern einen Schottky-Kontakt.

Merke:

- Schottky-Dioden weisen keinen pn-Übergang auf, sondern einen Schottky-Kontakt.
- Bei geeigneter Materialkombination bilden sich zwischen Metall und Halbleiter eine RLZ aus.

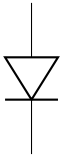
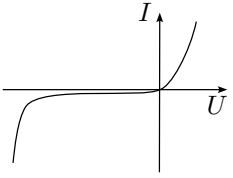
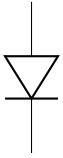
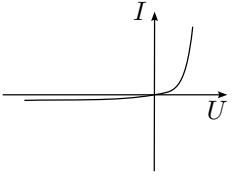
Bezeichnung	Symbol	Kennlinie	Eigenschaften	Anwendung
Gleich-richterdiode			hoher Durchlass-strom	große Sperrspan-nung, Gleichrichtung
Schaltdiode			kleiner Durch-bruchwiderstand	hoher Sperrwider-stand, kleine Umschalt-zeiten

Tabelle: **Übersicht typischer Dioden.**

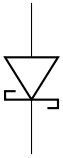
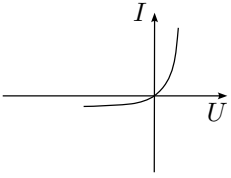
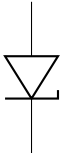
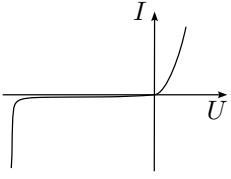
Bezeichnung	Symbol	Kennlinie	Eigenschaften	Anwendung
Schottky-diode			kleine Durchlasss-pannung	kleine Sperrspan-nung, HF-Gleichrichter, Freilaufdiode, Schaltnetzteile
Z-Diode			definierte Durch-bruchspannung	Stabilisierung von Spannungen, Begrenzung

Tabelle: **Übersicht typischer Dioden.**

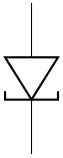
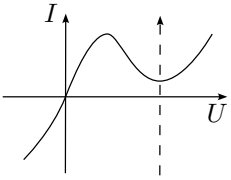
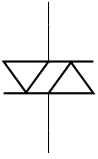
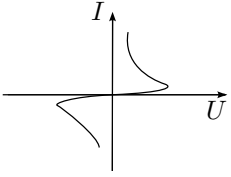
Bezeichnung	Symbol	Kennlinie	Eigenschaften	Anwendung
Tunneldiode			negativer differentieller Widerstand	Entdämpfung von Schwingkreisen, HF-Oszillator
Diac			gesteuerter Durchbruch	Entdämpfung, Triggerdiode

Tabelle: **Übersicht typischer Dioden.**

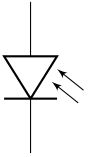
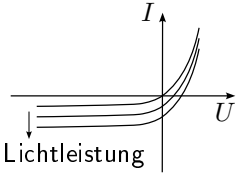
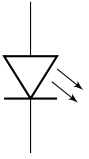
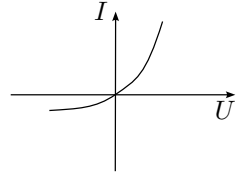
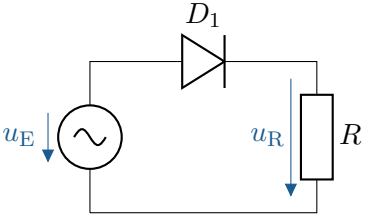
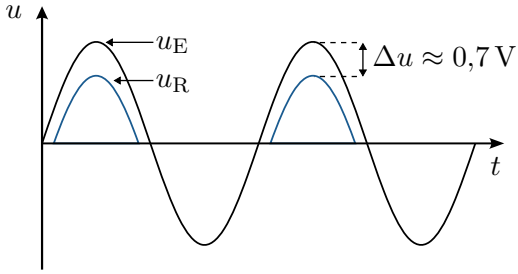
Bezeichnung	Symbol	Kennlinie	Eigenschaften	Anwendung
Photodiode			Strom ändert sich proportional zur Lichtleistung	Photoempfänger, Messtechnik, Solarzellen
LED, Laserdiode			Durchlassstrom erzeugt optische Strahlung	Beleuchtung, Strahlungsquelle

Tabelle: **Übersicht typischer Dioden.**

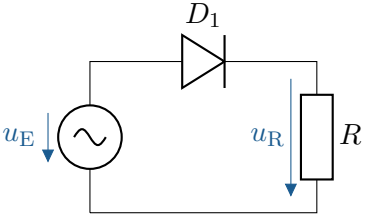
Diode bei Wechselspannung

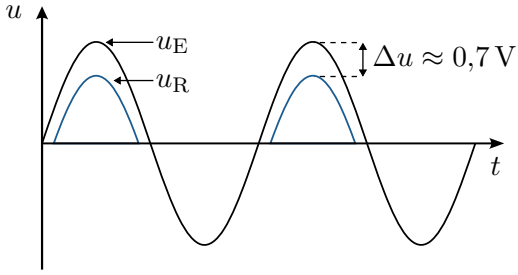




- In Sperrrichtung fällt die gesamte Spannung über die Diode ab.

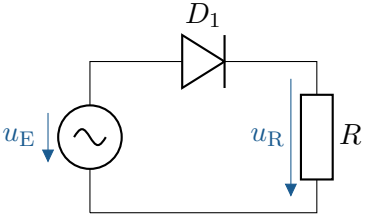
Diode bei Wechselspannung

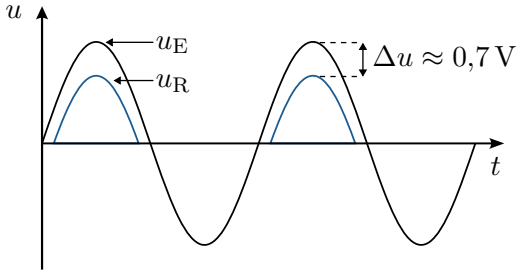




- In Sperrrichtung fällt die gesamte Spannung über die Diode ab.
- Positive Halbwelle der Wechselspannung wird durchgelassen. Die Flussspannung der Diode wird abgezogen.

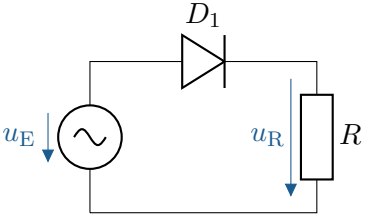
Diode bei Wechselspannung

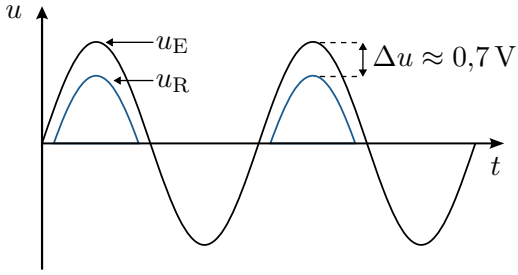




- In Sperrrichtung fällt die gesamte Spannung über die Diode ab.
- Positive Halbwelle der Wechselspannung wird durchgelassen. Die Flussspannung der Diode wird abgezogen.
- Negative Halbwelle der Wechselspannung wird blockiert.

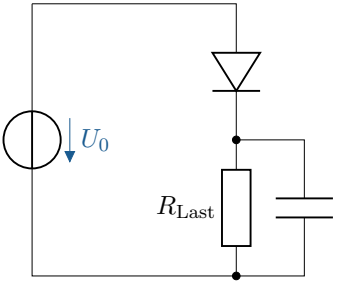
Diode bei Wechselspannung

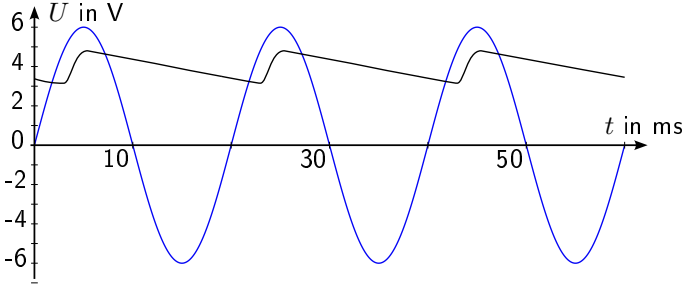




- In Sperrrichtung fällt die gesamte Spannung über die Diode ab.
- Positive Halbwelle der Wechselspannung wird durchgelassen. Die Flussspannung der Diode wird abgezogen.
- Negative Halbwelle der Wechselspannung wird blockiert.
- Die Diode wirkt als Gleichrichter.

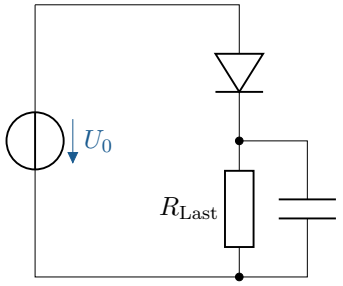
Einweggleichrichter

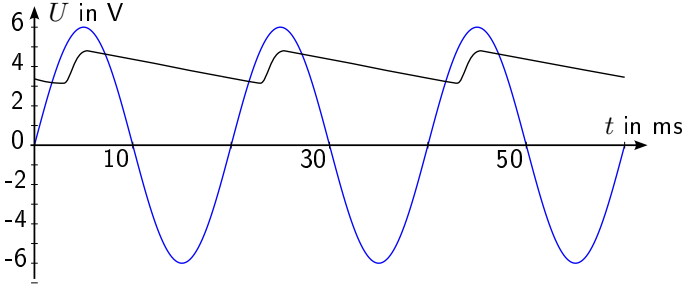




- Eine Gleichspannung kann nicht mit einer Diode allein erzeugt werden.

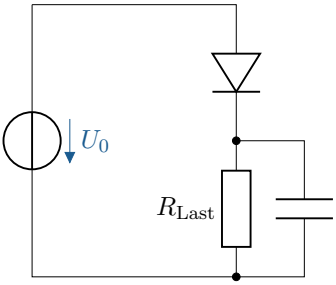
Einweggleichrichter

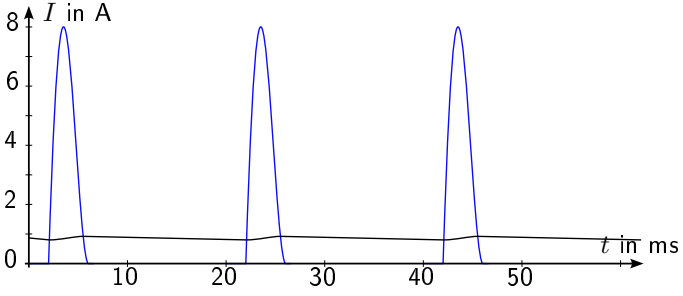




- Eine Gleichspannung kann nicht mit einer Diode allein erzeugt werden.
- Signal muss durch einen Kondensator geglättet werden.

Einweggleichrichter





- Strom durch die Last wird geglättet.

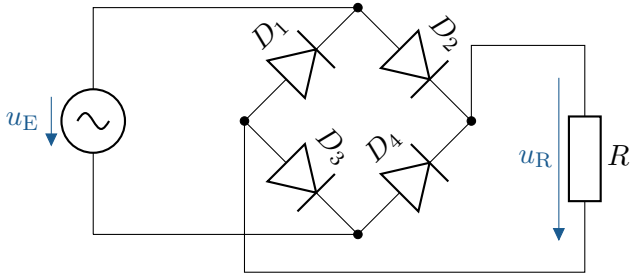


Abbildung: **Brückengleichrichter-Schaltung** Schaltkreis eines Brückengleichrichters mit angelegter Last R.

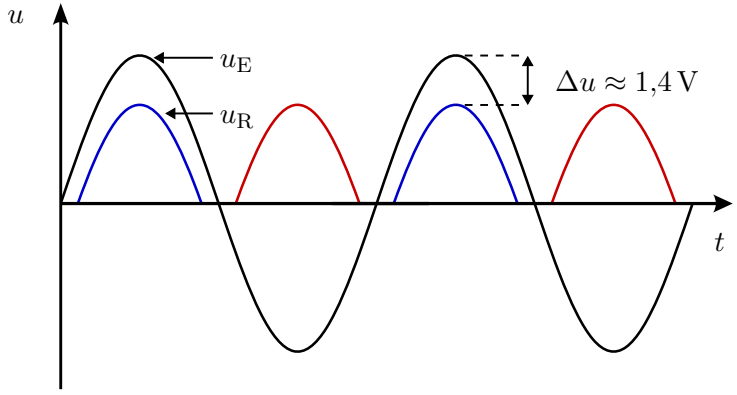


Abbildung: **Brückengleichrichter Signalverläufe.** Verlauf der Eingangsspannung und Lastspannung des Brückengleichrichters

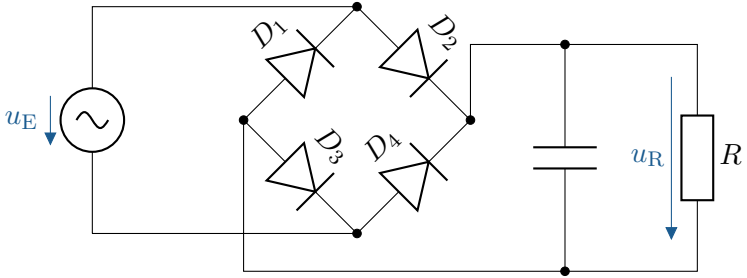


Abbildung: **Brückengleichrichterschaltung mit Glättungskondensator**

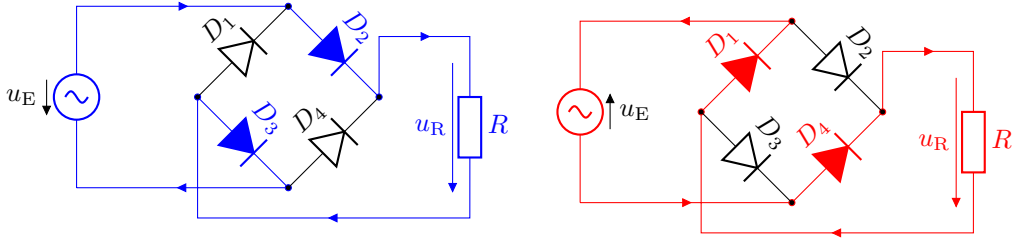


Abbildung: **Strompfade im Brückengleichrichter.** Links: Strompfad bei der positiven Halbwelle der Eingangsspannung. Rechts: Strompfad bei der negativen Halbwelle der Eingangsspannung.

Delon-Schaltung

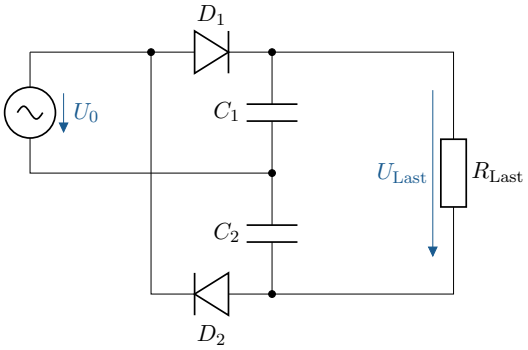


Abbildung: **Delon-Schaltung**

- Beinhaltet eine Gleichrichterschaltung aus zwei Dioden und zwei Kondensatoren.

Delon-Schaltung

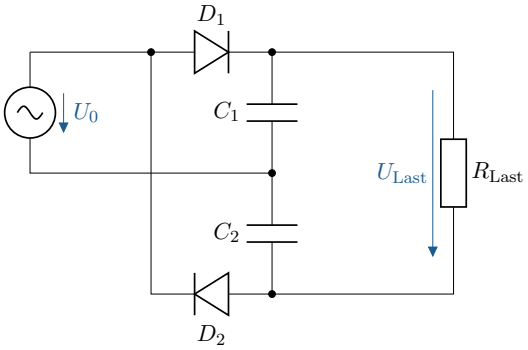


Abbildung: **Delon-Schaltung**

- Beinhaltet eine Gleichrichterschaltung aus zwei Dioden und zwei Kondensatoren.
- Positive Halbwelle lädt den Kondensator C_1 über die Diode D_1 auf.

Delon-Schaltung

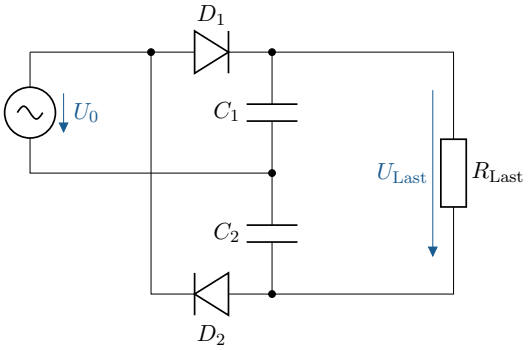


Abbildung: **Delon-Schaltung**

- Beinhaltet eine Gleichrichterschaltung aus zwei Dioden und zwei Kondensatoren.
- Positive Halbwelle lädt den Kondensator C_1 über die Diode D_1 auf.
- Negative Halbwelle lädt den Kondensator C_2 über die Diode D_2 auf.

Delon-Schaltung

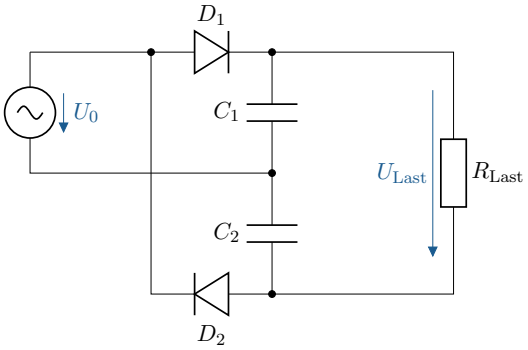


Abbildung: **Delon-Schaltung**

- Beinhaltet eine Gleichrichterschaltung aus zwei Dioden und zwei Kondensatoren.
- Positive Halbwelle lädt den Kondensator C_1 über die Diode D_1 auf.
- Negative Halbwelle lädt den Kondensator C_2 über die Diode D_2 auf.
- Dadurch, dass der Ausgang parallel zu den in Reihe geschalteten Kondensatoren liegt, wird die Spannung verdoppelt.

Merke:

- Dioden werden in Gleichrichter eingesetzt um Wechselspannungen in Gleichspannungen umzuformen.

Merke:

- Dioden werden in Gleichrichter eingesetzt um Wechselspannungen in Gleichspannungen umzuformen.
- In Einweggleichrichter wird nur eine Polarität der Halbwellen durchgelassen.

Merke:

- Dioden werden in Gleichrichter eingesetzt um Wechselspannungen in Gleichspannungen umzuformen.
- In Einweggleichrichter wird nur eine Polarität der Halbwellen durchgelassen.
- Brückengleichter nutzen beide Polaritäten der Eingangsspannung.

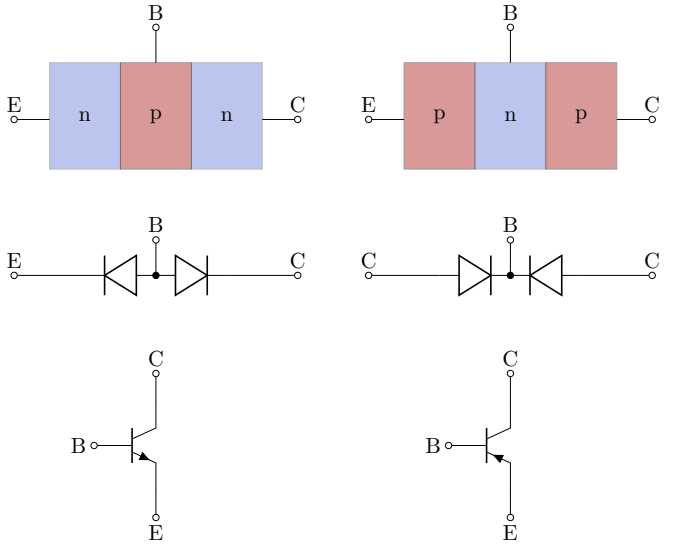


Abbildung: **Übersicht Bipolartransistoren.** Vereinfachte Darstellung des Querschnittes, Logik und Schaltzeichen von npn- und pnp-Transistoren.

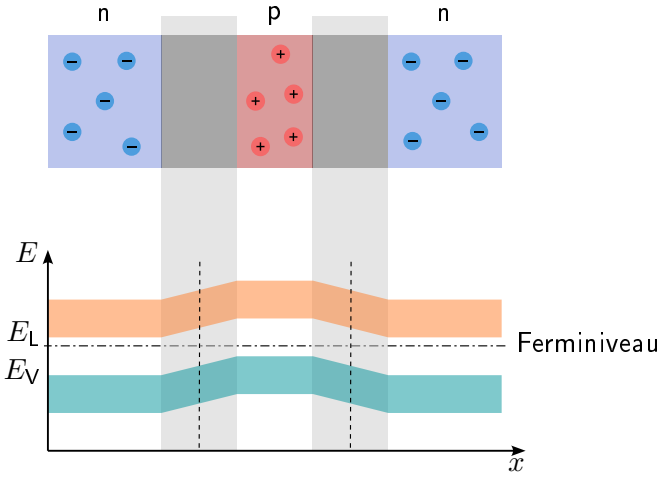


Abbildung: **Verhalten unbeschalteter Bipolartransistor.** Querschnitt eines unbeschalteten npn-Transistors und zugehörige Bändermodell

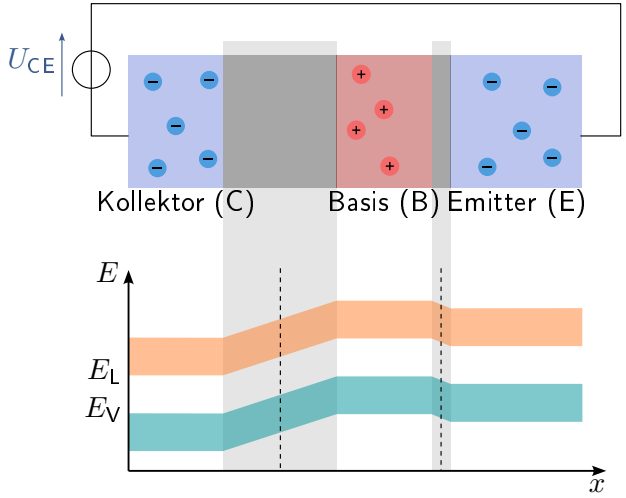


Abbildung: **Bipolartransistor mit Kollektor-Emitter-Spannung.** Querschnitt eines npn-Transistors und zugehörige Bändermodell bei einer positiven Spannung zwischen Kollektor und Emitter.

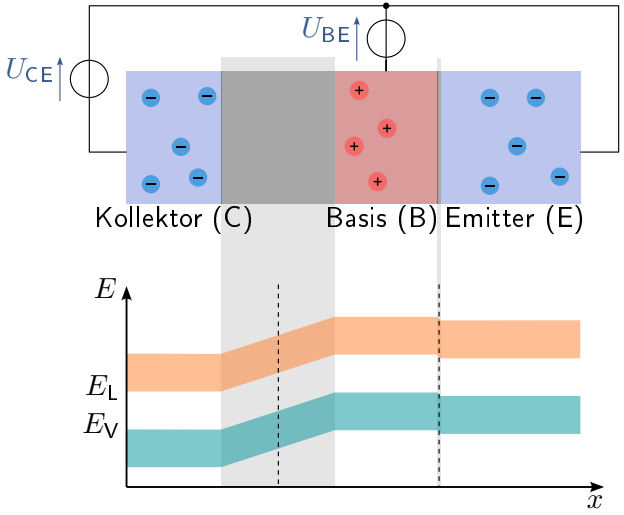


Abbildung: **Beschalteter Bipolartransistor** Querschnitt eines npn-Transistors und zugehörige Bändermodell bei einer positiven Spannung zwischen Kollektor und Emitter sowie Basis und Emitter

Merke:

- Bipolartransistoren weisen zwei pn-Übergänge auf.

Merke:

- Bipolartransistoren weisen zwei pn-Übergänge auf.
- Es gibt drei Anschlüsse, den Kollektor (C), die Basis (B) und den Emitter (E).

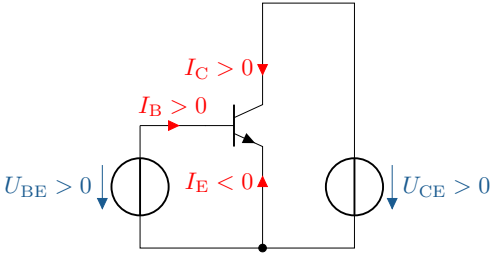


Abbildung: **Ströme und Spannungen beim Bipolartransistor.** Relevante Ströme und Spannungen bei npn- und pnp-Transistor.

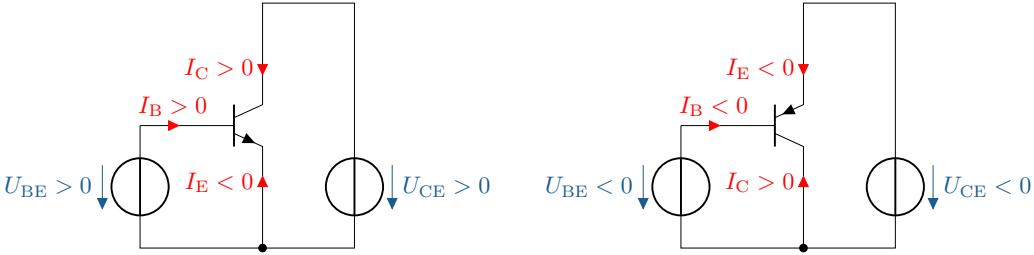


Abbildung: **Ströme und Spannungen beim Bipolartransistor.** Relevante Ströme und Spannungen bei npn- und pnp-Transistor.

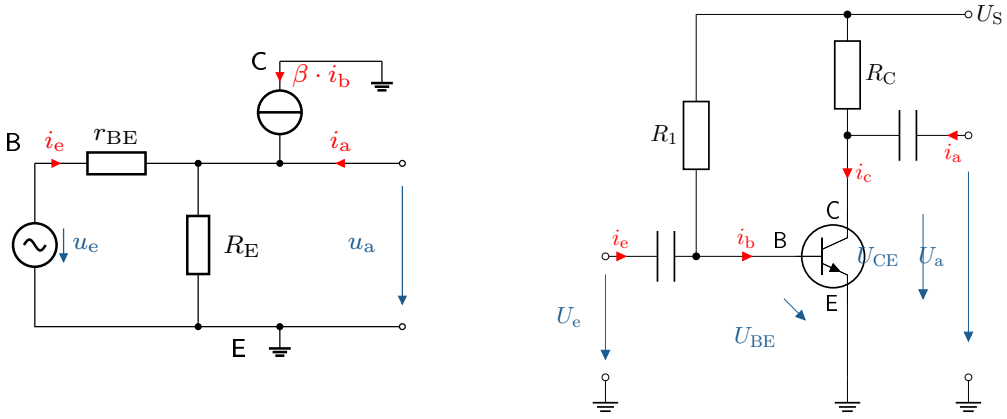


Abbildung: Grundschaltung und Ersatzschaltbild einer Kollektorschaltung.

- Eingangswiderstand $r_\mathrm{E} = \frac{u_\mathrm{e}}{i_\mathrm{e}} = \frac{R_1 r_\mathrm{BE}}{R_1 + r_\mathrm{BE}} = R_1 \parallel r_\mathrm{BE}$

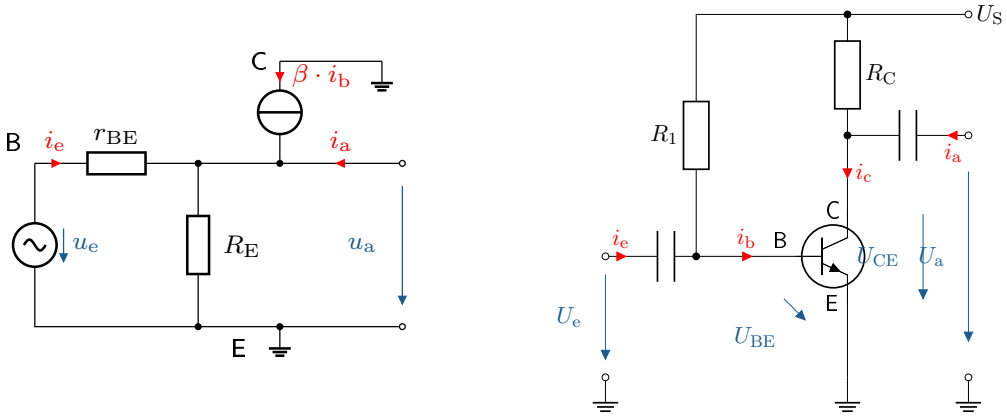
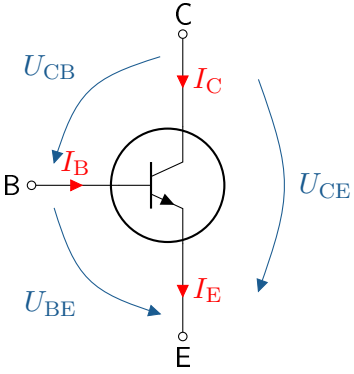


Abbildung: Grundschaltung und Ersatzschaltbild einer Kollektorschaltung.

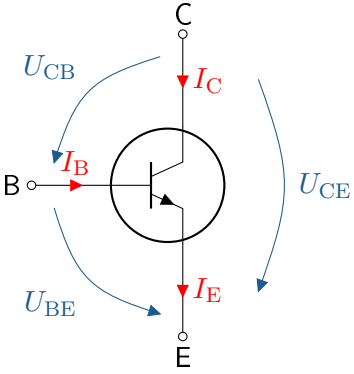
- Eingangswiderstand $r_E = \frac{u_e}{i_e} = \frac{R_1 r_{BE}}{R_1 + r_{BE}} = R_1 \parallel r_{BE}$
- Ausgangswiderstand $r_A = \frac{u_e}{i_e} = \frac{R_C r_{CE}}{R_C + r_{CE}} = R_C \parallel r_{CE}$

Transistorspannungen und -ströme



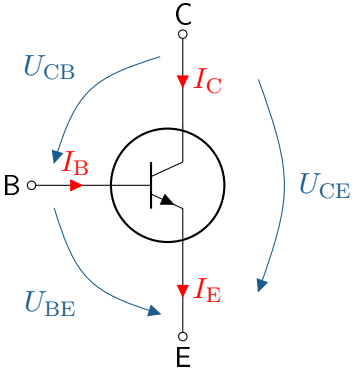
- Werte im durchgeschalteten Zustand:
- $U_{BE} \approx 0.6\,V$ (Basis-Emitter-Spannung)
- $U_{CB} \approx 2...300\,V$ (Kollektor-Basis-Spannung)
- $I_B = 1\,\%; I_C = 99\,\%; I_E = 100\,\%$

Transistorspannungen und -ströme



- Werte im durchgeschalteten Zustand:
- $U_{BE} \approx 0.6\,\mathrm{V}$ (Basis-Emitter-Spannung)
- $U_{CB} \approx 2...300\,\mathrm{V}$ (Kollektor-Basis-Spannung)
- $I_B = 1\,\%; I_C = 99\,\%; I_E = 100\,\%$
- Im Transistor gelten Knoten- und Maschenregel:
- $U_{CE} = U_{CB} + U_{BE} = 0$
- $I_B + I_C - I_E = 0$

Transistorspannungen und -ströme



- Werte im durchgeschalteten Zustand:
- $U_{BE} \approx 0.6\,V$ (Basis-Emitter-Spannung)
- $U_{CB} \approx 2...300\,V$ (Kollektor-Basis-Spannung)
- $I_B = 1\,\%; I_C = 99\,\%; I_E = 100\,\%$
- Im Transistor gelten Knoten- und Maschenregel:
- $U_{CE} = U_{CB} + U_{BE} = 0$
- $I_B + I_C - I_E = 0$
- Transistor verstärkt Strom und Spannung:
- $B = \frac{I_C}{I_B}$
- $D = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}}$

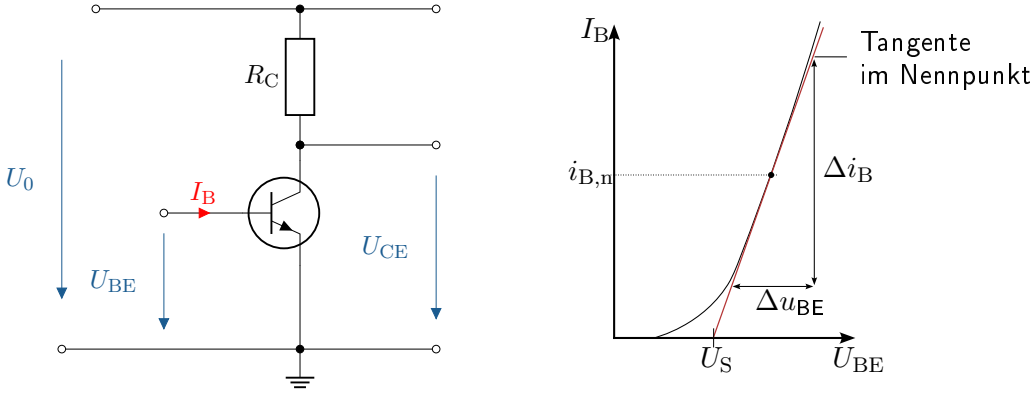


Abbildung: **Eingangskennlinie eines npn Transistors.**

- Zusammenhang zwischen Basis-Emitter-Spannung U_{BE} und Basisstrom I_B bei konstanter Ausgangsspannung U_{CE}.

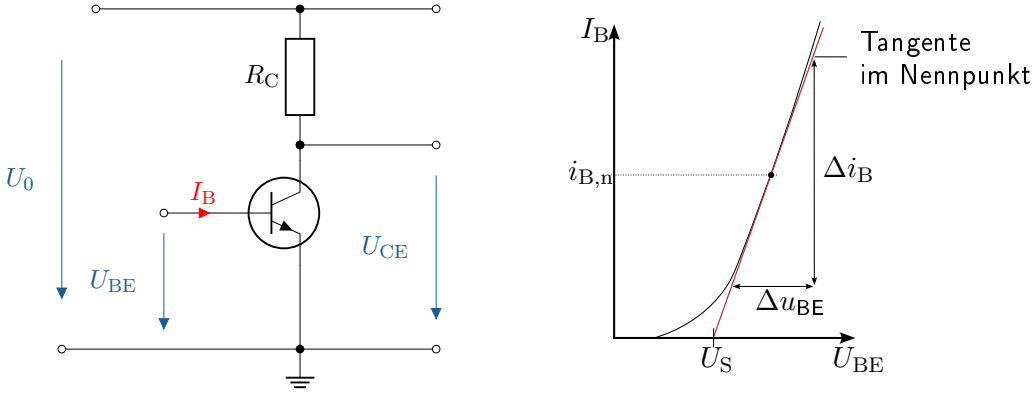


Abbildung: **Eingangskennlinie eines npn Transistors.**

- Zusammenhang zwischen Basis-Emitter-Spannung U_{BE} und Basisstrom I_B bei konstanter Ausgangsspannung U_{CE}.
- Am Arbeitspunkt ist der differentielle Widerstand als $r_{BE} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$ definiert.

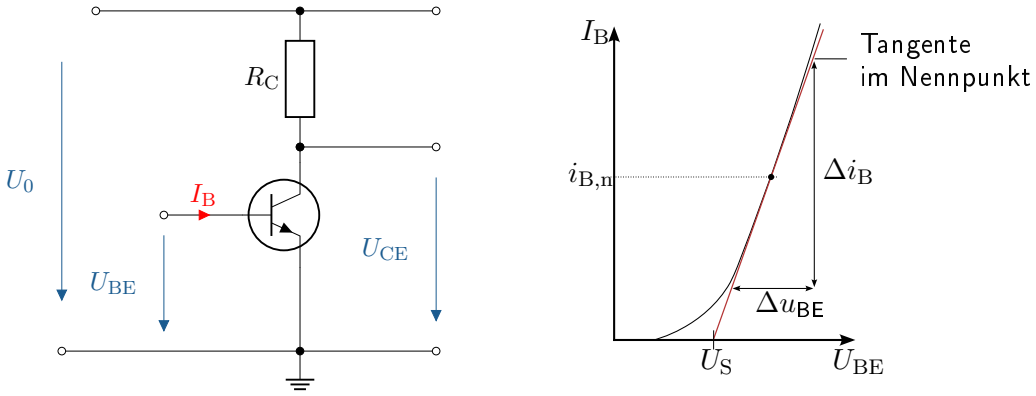


Abbildung: **Eingangskennlinie eines npn Transistors.**

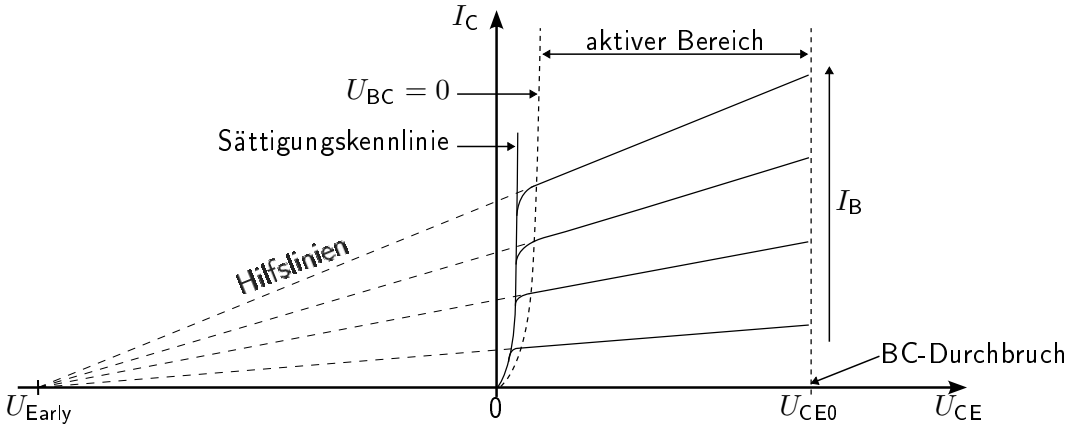
- Zusammenhang zwischen Basis-Emitter-Spannung U_{BE} und Basisstrom I_B bei konstanter Ausgangsspannung U_{CE}.
- Am Arbeitspunkt ist der differentielle Widerstand als $r_{BE} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$ definiert.
- Vergleiche Diodenkennlinie

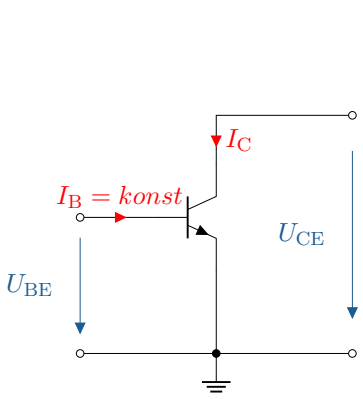
Merke:

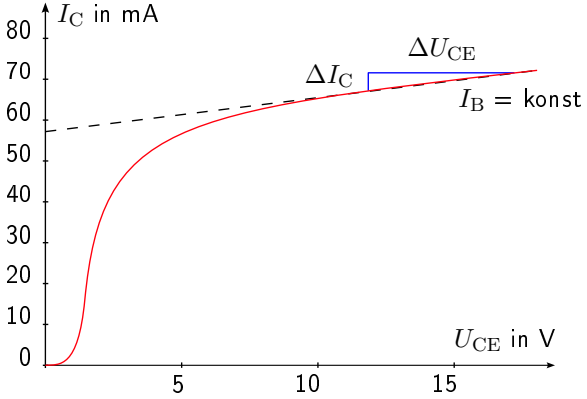
- Die Eingangskennlinie $I_{\mathrm{B}} = f(U_{\mathrm{BE}})$ gleicht der einer Diode.

Merke:

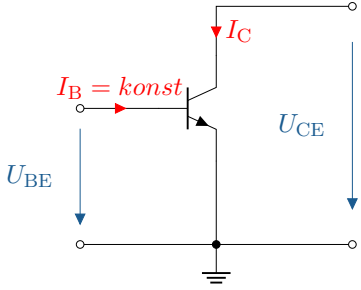
- Die Eingangskennlinie $I_\mathrm{B} = f(U_\mathrm{BE})$ gleicht der einer Diode.
- Eine Änderung von U_CE führt zu einer Verschiebung der Kennlinie.

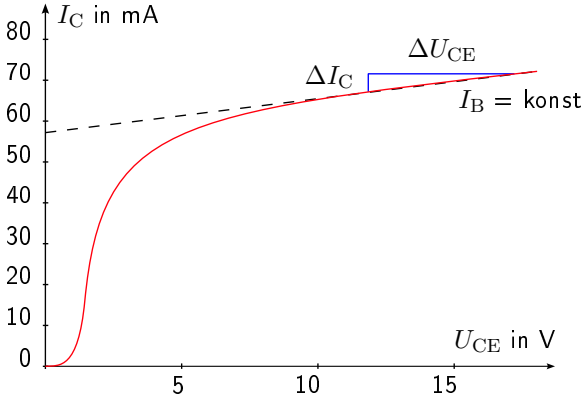

I_C
aktiver Bereich
$U_{BC} = 0$
Sättigungskennlinie
I_B
Hilfslinien
BC-Durchbruch
U_{Early}
0
U_{CE0}
U_{CE}





- Zusammenhang zwischen Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} und Kollektorstrom I_C bei konstantem Basisstrom I_B.





- Zusammenhang zwischen Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} und Kollektorstrom I_C bei konstantem Basisstrom I_B.
- Differentieller Widerstand $r_{CE} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C}$.

Merke:

- Die Ausgangskennlinie stellt $I_{\mathrm{C}} = f(U_{\mathrm{CE}})$ dar.

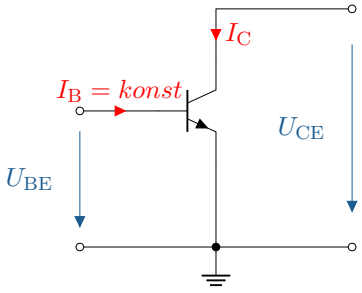
Merke:

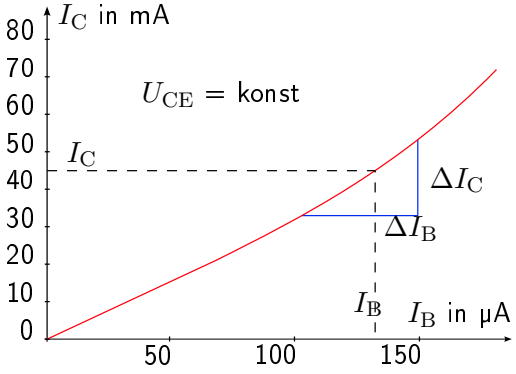
- Die Ausgangskennlinie stellt $I_\mathrm{C} = f(U_\mathrm{CE})$ dar.
- Im aktiven Bereich flacht der Verlauf ab, der Einfluss von U_CE auf I_C sinkt.

Merke:

- Die Ausgangskennlinie stellt $I_\mathrm{C} = f(U_\mathrm{CE})$ dar.
- Im aktiven Bereich flacht der Verlauf ab, der Einfluss von U_CE auf I_C sinkt.
- I_B beeinflusst die Höhe der Kennlinie.

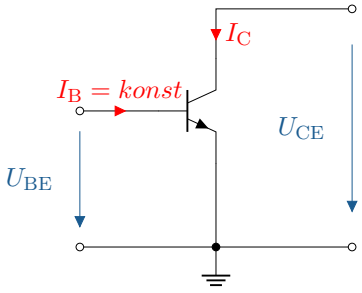
Stromsteuerungskennlinie

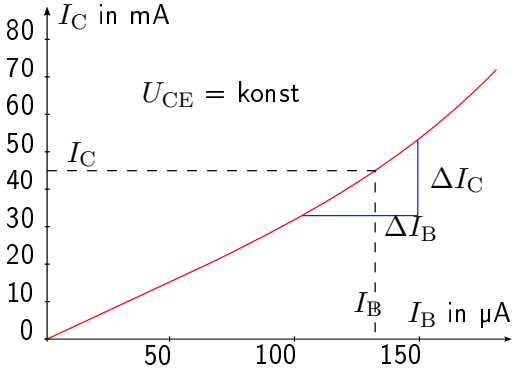




- Zusammenhang zwischen Basisstrom I_B und Kollektorstrom I_C bei konstanter Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE}.

Stromsteuerungskennlinie

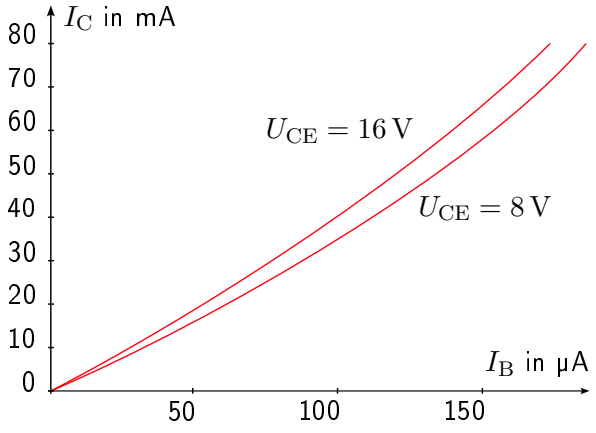




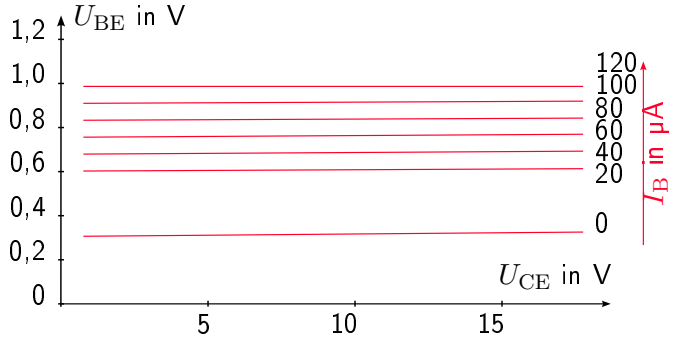
- Zusammenhang zwischen Basisstrom I_B und Kollektorstrom I_C bei konstanter Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE}.
- Keine Gerade: Zuerst linearer Anstieg, dann nimmt die Steigung mit wachsendem Basisstrom zu.

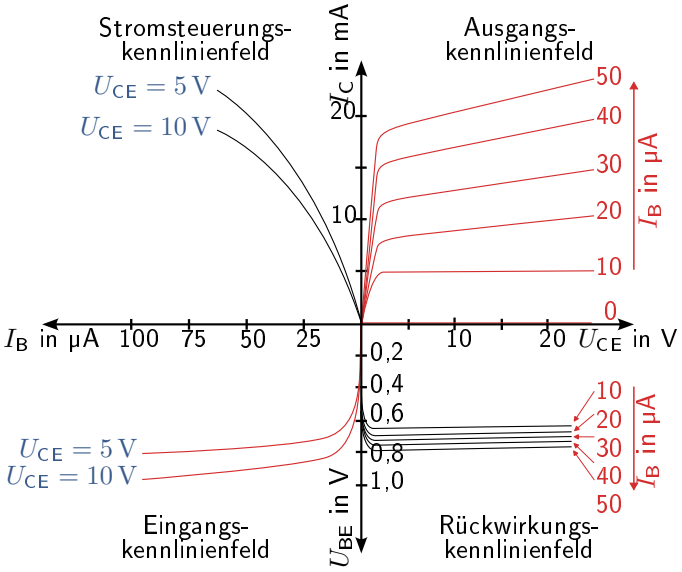
Stromsteuerungskennlinie

- Kurvenschar von Stromsteuerungskennlinien bei variabler Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE}.



- Kurvenschar von Rückwirkungskennlinien bei variablen Basisstrom I_B.




Stromsteuerungs-
kennlinienfeld
$U_{CE} = 5\,V$
$U_{CE} = 10\,V$
I_C in mA
20
10
Ausgangs-
kennlinienfeld
50
40
30
20
10
0
I_B in µA
I_B in µA 100 75 50 25
10 20 U_{CE} in V
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
U_{BE} in V
$U_{CE} = 5\,V$
$U_{CE} = 10\,V$
10
20
30
40
50
I_B in µA
Eingangs-
kennlinienfeld
Rückwirkungs-
kennlinienfeld

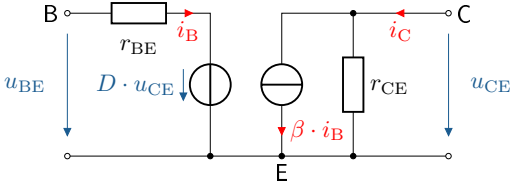


Abbildung: **Kleinsignal-Ersatzschaltbild eines Bipolartransistors.**

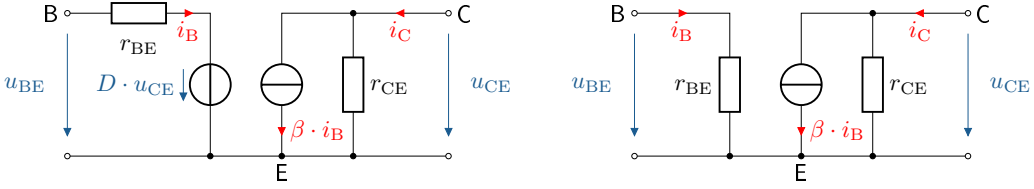


Abbildung: **Kleinsignal-Ersatzschaltbild eines Bipolartransistors.**

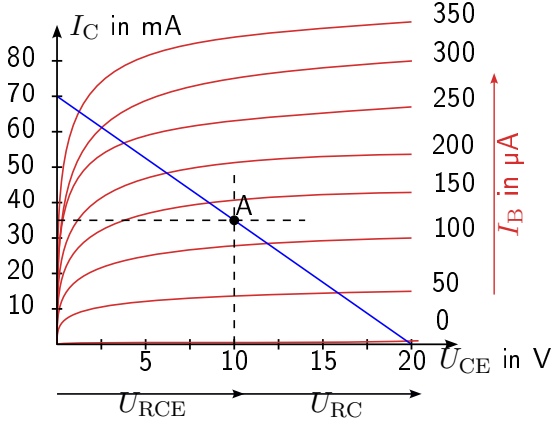
Merke:

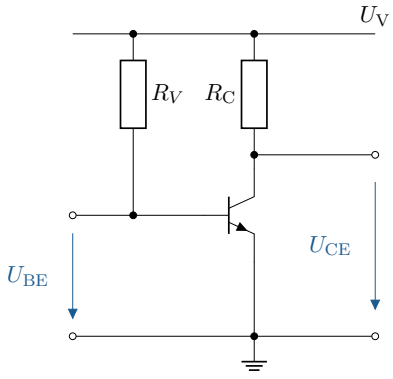
- Das Vierquadrantenkennlinienfeld zeigt die Strom-Spannungs-Kennlinien am Ein- und Ausgang sowie die Kopplungen dazwischen.

Merke:

- Das Vierquadrantenkennlinienfeld zeigt die Strom-Spannungs-Kennlinien am Ein- und Ausgang sowie die Kopplungen dazwischen.
- Mittels der differentiellen Größen kann das Ersatzschaltbild aufgestellt werden.

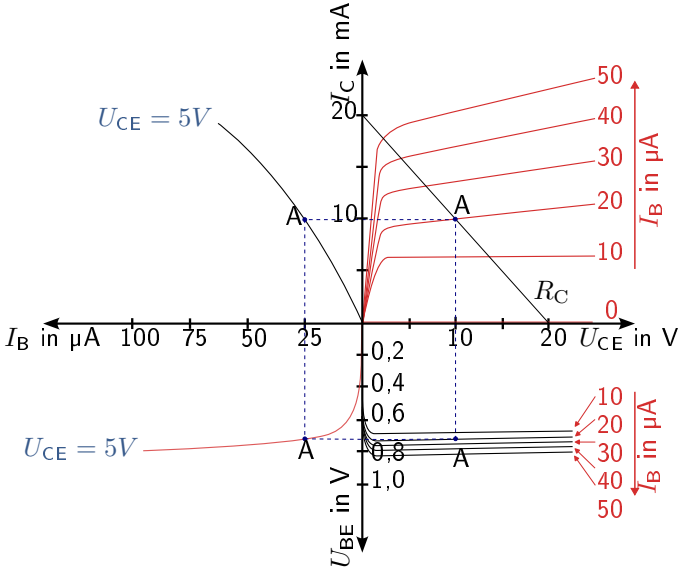
Die Versorgungsspannung U_V beträgt $20\,\mathrm{V}$. Über den Widerstand R_C, der einen ohmschen Verbraucher repräsentiert, soll die halbe Versorgungsspannung anliegen und ein Strom von $10\,\mathrm{mA}$ fließen.





Bipolartransistor – Beispiel 2.2

- Arbeitspunkt A im Vierquadrantenkennlinienfeld eines Bipolartransistors.



In den jeweiligen Quadranten ergeben sich die folgenden Arbeitspunkte und Kenngrößen.

Ausgang (bei: $I_\mathrm{B} = 20\,\mu\mathrm{A}$):

$$
\begin{aligned}
U_\mathrm{CE} &= 10\,\mathrm{V} \\
I_\mathrm{C} &= 10\,\mathrm{mA} \\
R_\mathrm{C} &= \frac{U_\mathrm{RC}}{I_\mathrm{RC}} = \frac{U_\mathrm{V}/2}{I_\mathrm{C}} = \frac{10\,\mathrm{V}}{10\,\mathrm{mA}} = 1000\,\Omega
\end{aligned}
$$

In den jeweiligen Quadranten ergeben sich die folgenden Arbeitspunkte und Kenngrößen.

Ausgang (bei: $I_\mathrm{B} = 20\,\mu\mathrm{A}$):

$$U_\mathrm{CE} = 10\,\mathrm{V}$$
$$I_\mathrm{C} = 10\,\mathrm{mA}$$
$$R_\mathrm{C} = \frac{U_\mathrm{RC}}{I_\mathrm{RC}} = \frac{U_\mathrm{V}/2}{I_\mathrm{C}} = \frac{10\,\mathrm{V}}{10\,\mathrm{mA}} = 1000\,\Omega$$

Stromsteuerung:

$$I_\mathrm{C} = 10\,\mathrm{mA}$$
$$I_\mathrm{B} = 25\,\mu\mathrm{A}$$
$$B = \frac{I_\mathrm{C}}{I_\mathrm{B}} = \frac{10\,\mathrm{mA}}{25\,\mu\mathrm{A}} = 400$$

In den jeweiligen Quadranten ergeben sich die folgenden Arbeitspunkte und Kenngrößen.

Eingang:

$$I_{\mathrm{B}} = 25\,\mu\mathrm{A}$$
$$U_{\mathrm{BE}} = 0{,}72\,\mathrm{V}$$
$$R_{\mathrm{V}} = \frac{U_{\mathrm{RV}}}{I_{\mathrm{RV}}} = \frac{U_{\mathrm{V}} - U_{\mathrm{BE}}}{I_{\mathrm{B}}} = \frac{20\,\mathrm{V} - 0{,}72\,\mathrm{V}}{25\,\mu\mathrm{A}} = 771{,}2\,\mathrm{k\Omega}$$

In den jeweiligen Quadranten ergeben sich die folgenden Arbeitspunkte und Kenngrößen.

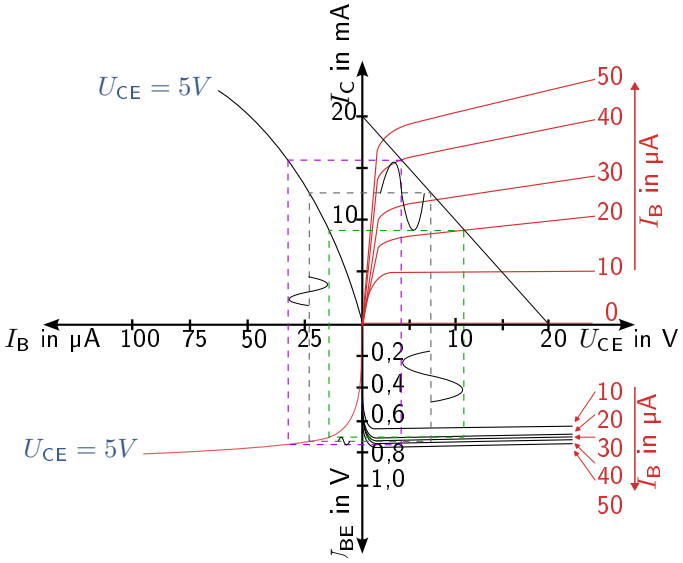
Eingang:

$$I_\mathrm{B} = 25\,\mu\mathrm{A}$$
$$U_\mathrm{BE} = 0{,}72\,\mathrm{V}$$
$$R_\mathrm{V} = \frac{U_\mathrm{RV}}{I_\mathrm{RV}} = \frac{U_\mathrm{V} - U_\mathrm{BE}}{I_\mathrm{B}} = \frac{20\,\mathrm{V} - 0{,}72\,\mathrm{V}}{25\,\mu\mathrm{A}} = 771{,}2\,\mathrm{k\Omega}$$

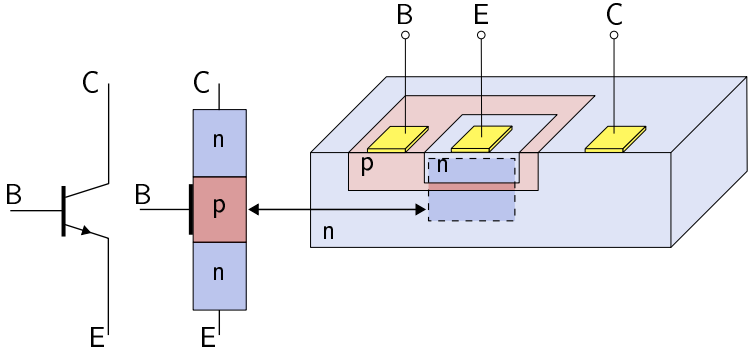
Rückwirkung:

$$U_\mathrm{BE} = 0{,}72\,\mathrm{V}$$
$$U_\mathrm{CE} = 10\,\mathrm{V}$$
$$D = \frac{U_\mathrm{BE}}{U_\mathrm{CE}} = \frac{0{,}72\,\mathrm{V}}{10\,\mathrm{V}} = 0{,}072$$

- Darstellung eines Wechselstrom Eingangssignals bei einem Bipolartransistor im Vierquadrantenkennlinienfeld.



- **Aufbau npn-Bipolartransistor.** Schaltzeichen, idealer schematischer Aufbau, realer Aufbau.



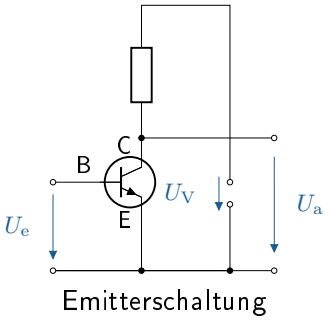


Abbildung: **Grundschaltungen npn-Bipolartransistor.**

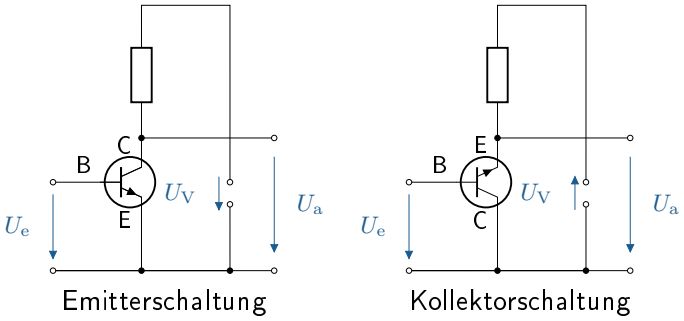


Abbildung: **Grundschaltungen npn-Bipolartransistor.**

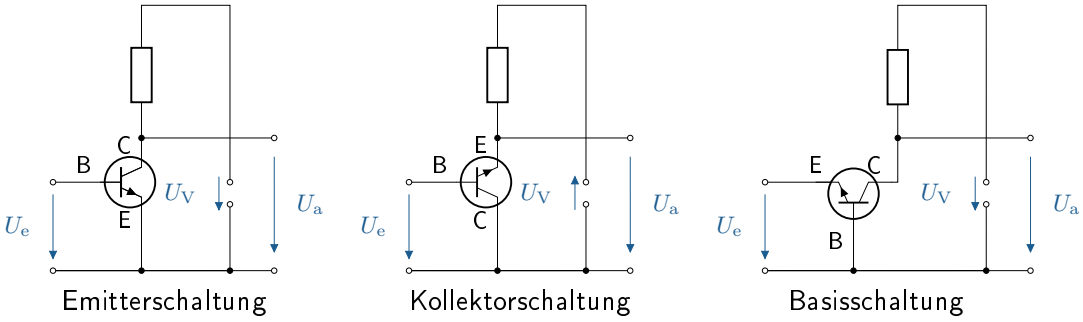
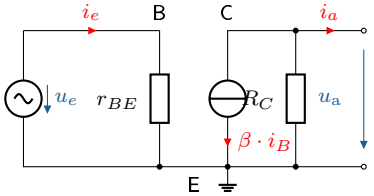
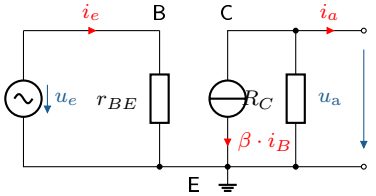


Abbildung: **Grundschaltungen npn-Bipolartransistor.**

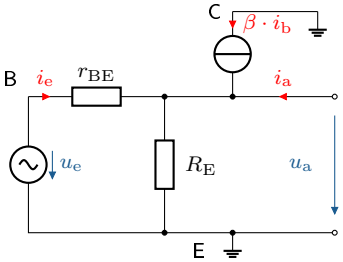


Emitterschaltung

Abbildung: **Ersatzschaltbilder der Grundschaltungen.**

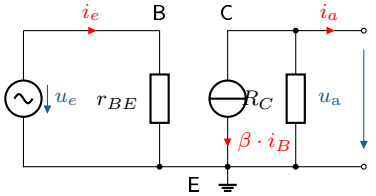


Emitterschaltung

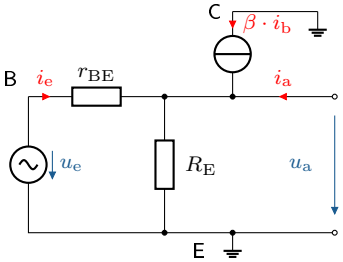


Kollektorschaltung

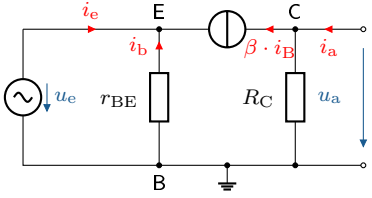
Abbildung: **Ersatzschaltbilder der Grundschaltungen.**



Emitterschaltung



Kollektorschaltung



Basisschaltung

Abbildung: **Ersatzschaltbilder der Grundschaltungen.**

Eigenschaft	**Emitter-schaltung**	**Kollektor-schaltung**	**Basis-schaltung**
Eingangswiderstand r_e	mittel $1\,\mathrm{k\Omega}$	groß $> 100\,\mathrm{k\Omega}$	klein $50\,\Omega$
Ausgangswiderstand r_a	mittel $10\,\mathrm{k\Omega}$	klein $50\,\Omega$	groß $100\,\mathrm{k\Omega}$
Stromverstärkung v_i	groß 100	groß 100	klein < 1
Spannungsverstärkung v_u	groß 100	klein < 1	groß 100
Leistungsverstärkung v_p	sehr groß $1\,\mathrm{k}$	groß 100	groß 100
Phasendrehung φ_u	gegenphasig 180°	gleichphasig 0°	gleichphasig 0°

Tabelle: Elektrische Eigenschaften von Grundschaltungen

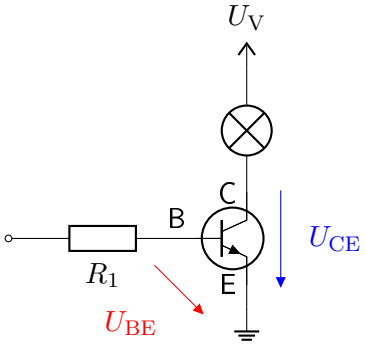


Abbildung: **Transistor als Schalter.** Links: Schaltbild mit Lampe als Verbraucher in der Kollektor-Emitter-Strecke. Rechts: Spannungsverläufe mit U_CE als Folge von U_BE.

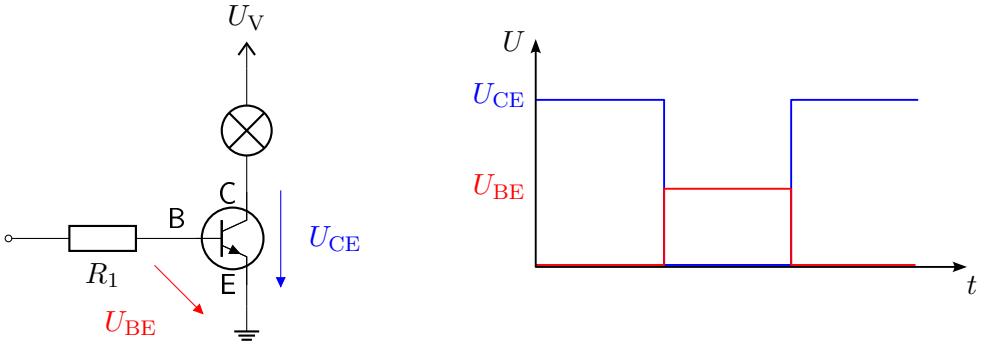
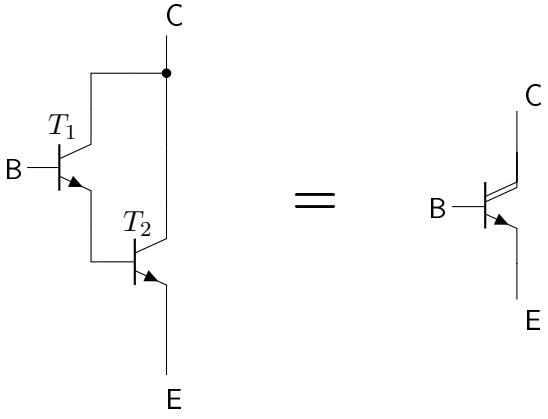


Abbildung: **Transistor als Schalter.** Links: Schaltbild mit Lampe als Verbraucher in der Kollektor-Emitter-Strecke. Rechts: Spannungsverläufe mit U_CE als Folge von U_BE.

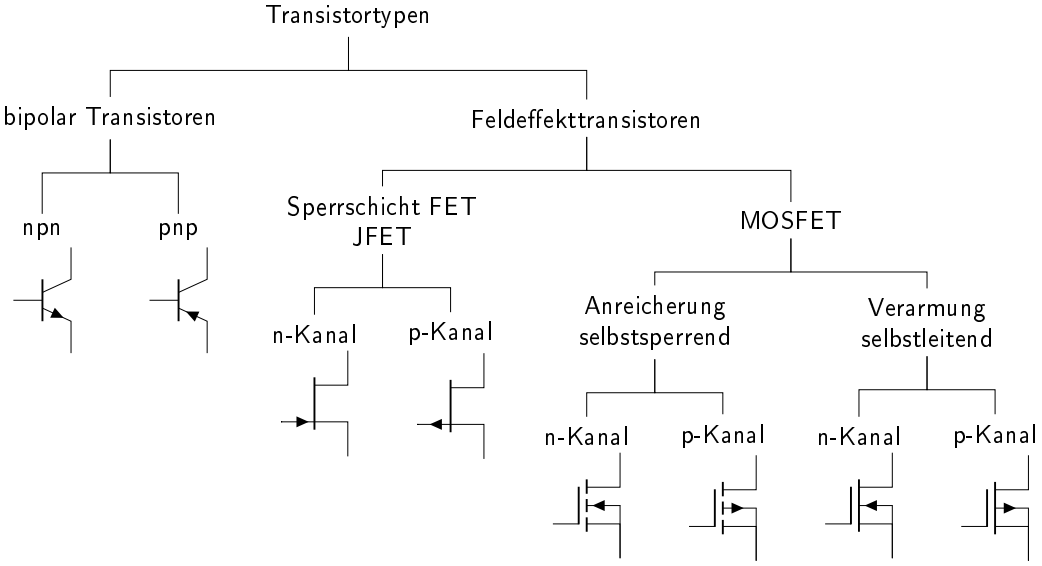
Merke:

Im Vergleich zu einem elektromechanischen Schalter in Form eines Relais weisen Transistoren einen deutlich kleineren Bauraum und geringeren Preis auf. Durch den kontaktlosen Aufbau tritt zudem kein Kontaktprellen auf, was zu einer höheren Lebensdauer führt.

- Ein **Darlington-Transistor** bzw. Darlington-Schaltung kombiniert zwei Transistoren für eine höhere Stromverstärkung.



Feldeffekttransistor



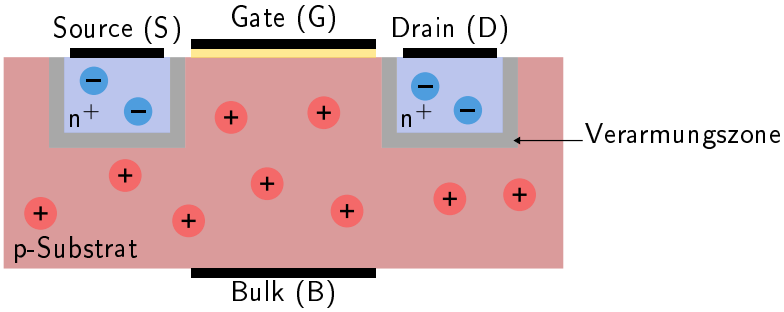


Abbildung: Querschnitt eines n-Kanal MOSFETs (selbstsperrend) ohne angelegte Spannungen.

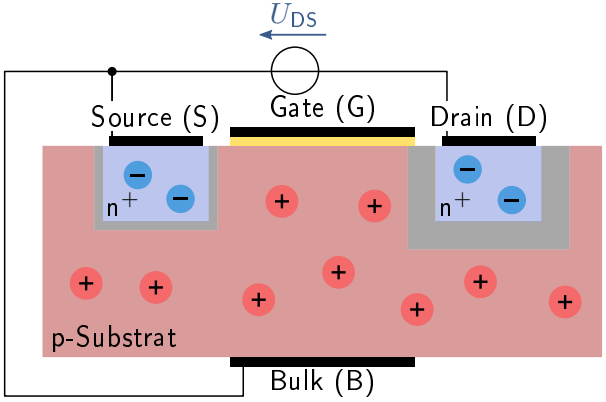


Abbildung: Querschnitt eines n-Kanal MOSFETs (selbstsperrend) mit angelegter Drain-Source-Spannung.

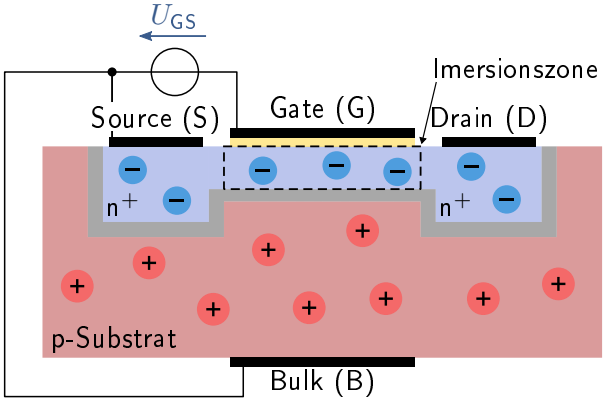


Abbildung: Querschnitt eines n-Kanal MOSFETs (selbstsperrend) mit angelegter Gate-Source-Spannung.

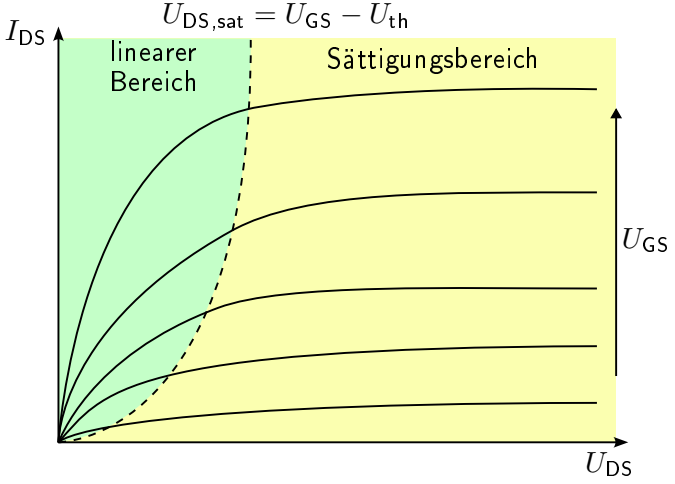


Abbildung: Ausgangskennlinienfeld eines n-Kanal MOSFETs bei verschiedenen Gate-Source-Spannungen.

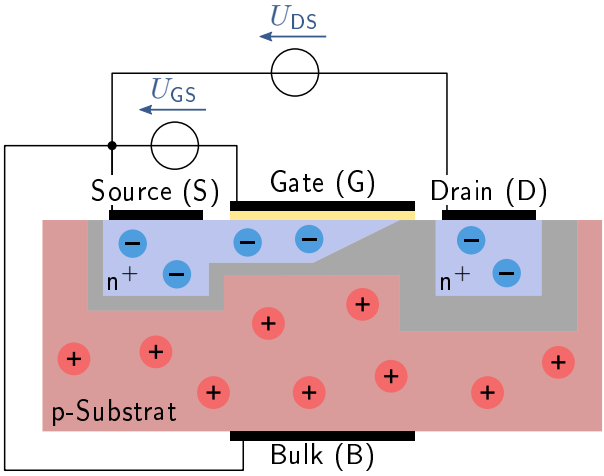
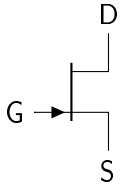
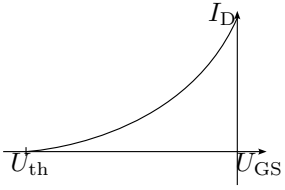
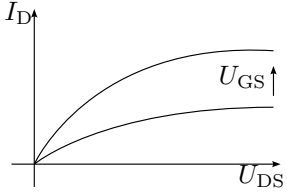
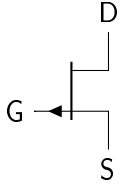
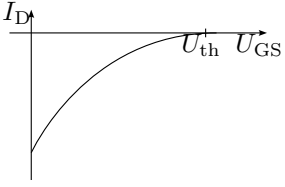
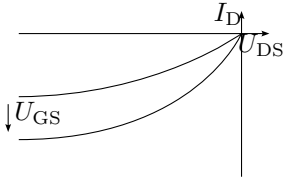


Abbildung: Querschnitt eines n-Kanal MOSFETs (selbstsperrend) im Sättigungsbereich.

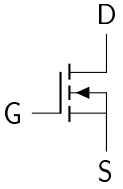
Merke:

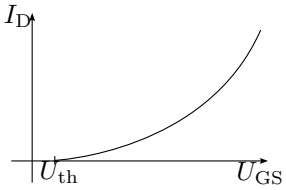
- MOSFETs besitzen drei Anschlüsse, Gate(G), Source(S) und Drain (D).
- Das elektrische Verhalten wird leistungslos gesteuert.
- Durch U_{GS} erfolgt eine Inversion der Ladungsträger unterhalb des Gates.

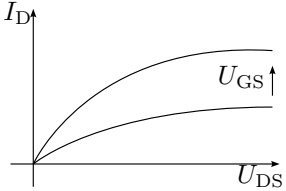
Feldeffekttransistor – Elektrisches Verhalten

Type	Symbol	Eingangskennlinie	Ausgangskennlinienfeld
n-JFET			
p-JFET			

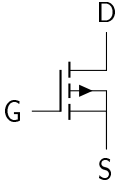
n-Mosfet, selbst-sperrend

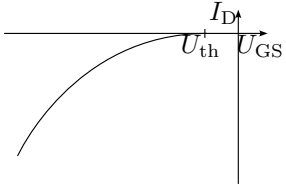


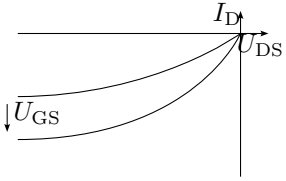




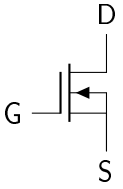
p-Mosfet, selbst-sperrend

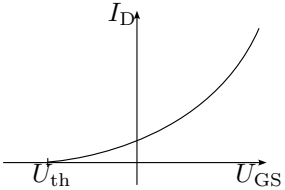


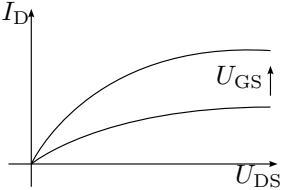




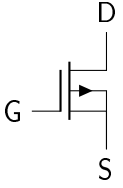
n-
Mosfet,
selbstleitend

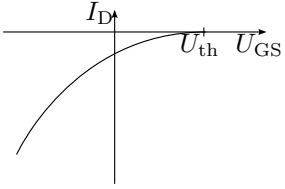


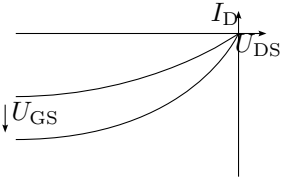




p-
Mosfet,
selbstleitend







Merke:

- Die Dotierung des Kanals gibt die notwendigen Vorzeichen der Ströme und Spannungen am Transistor vor.
- Die Eingangskennlinien können durch die Lage der Schwellenspannung U_{th} unterschieden werden.

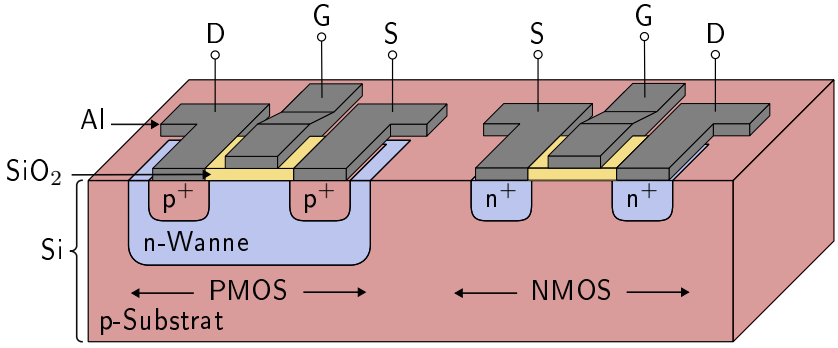


Abbildung: Querschnitt einer CMOS-Struktur mit n-Kanal- und p-Kanal-MOSFET.

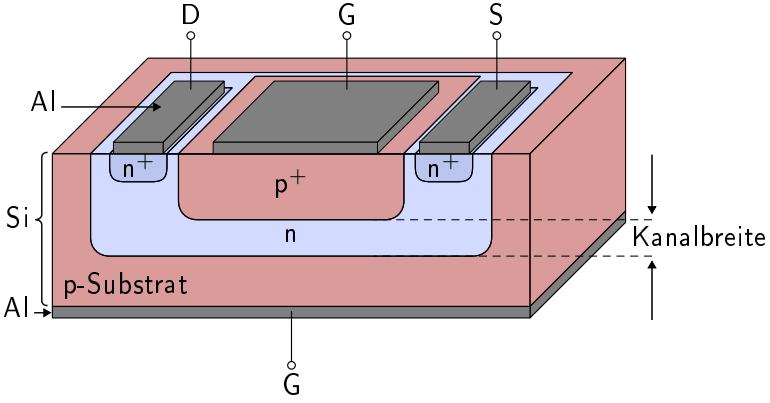
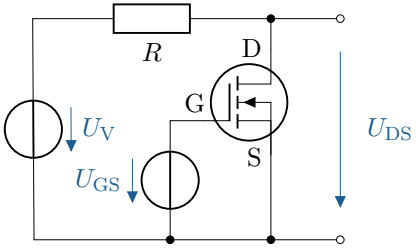
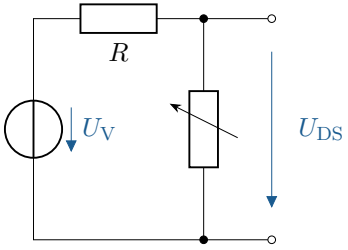


Abbildung: Querschnitt eines n-Kanal-JFETs.

Merke:

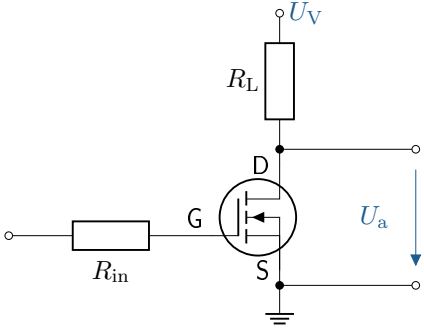
- CMOS-Technik kombiniert komplementäre MOSFETs in einem Bauteil.
- JFETs weisen den einfachsten Aufbau von FETs auf.

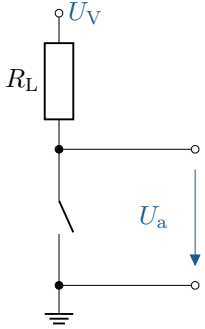




Merke:

Der ohmsche Widerstand eines MOSFETs kann durch U_{GS} gesteuert werden, der Durchgangswiderstand ist allerdings gering und der Wertebereich sehr schmal.





Merke:

Der große Vorteil von MOSFETs in diesem Szenario ist ihre hohe Schaltgeschwindigkeit, der niedrige Widerstand im leitenden Zustand sowie der hohe Eingangswiderstand am Gate.

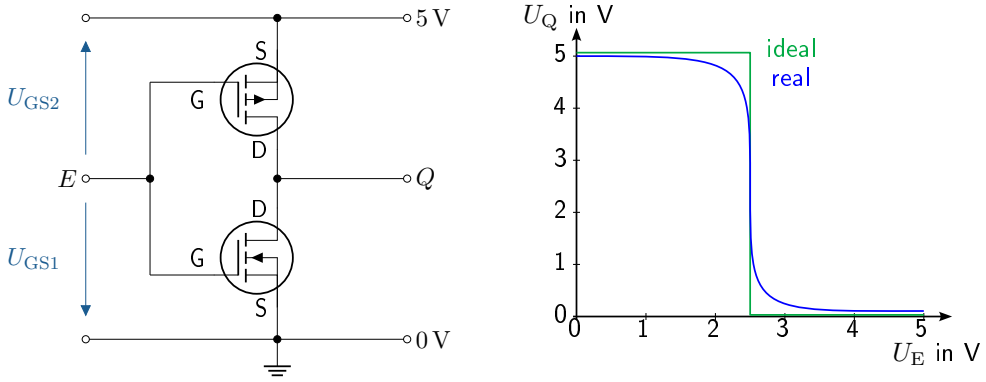


Abbildung: MOSFET als Inverter mit zugehörigen Spannungsverläufen.