

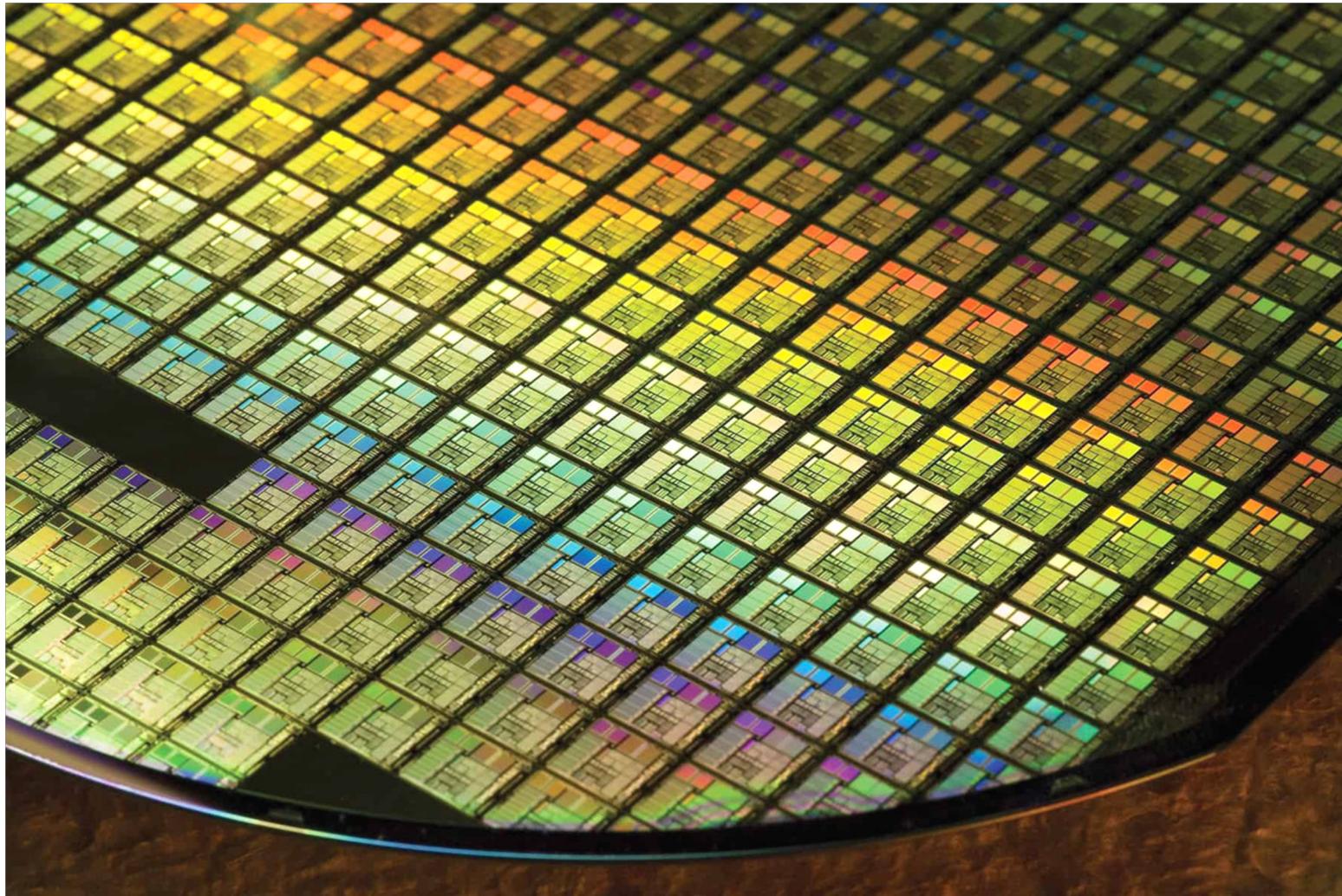
Einführung in die Technische Informatik

Prof. Dr.-Ing. Stefan Kowalewski

WS 22/23

Kapitel 6: Halbleiter

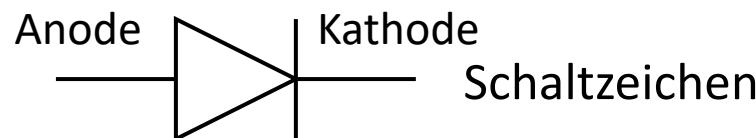
Halbleiter-Bauteile



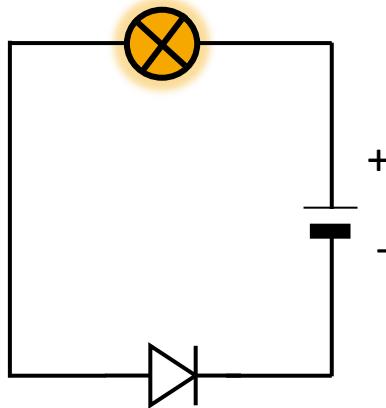
Quelle: TSMC

Experiment

- Neues Bauelement: die **Halbleiterdiode**

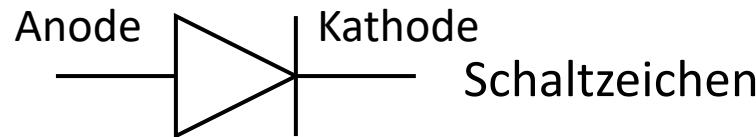


- Experiment:

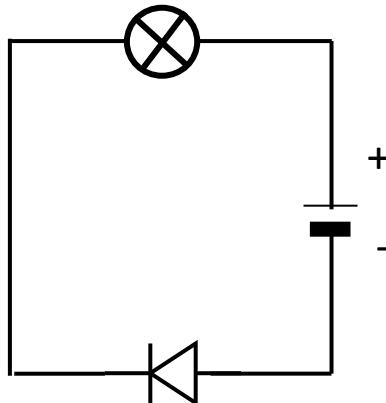


Experiment

- Neues Bauelement: die **Halbleiterdiode**



- Experiment:



Lampe leuchtet nicht

Halbleiterdiode: Beobachtung

- Der Strom kann nur in eine Richtung (**Durchlassrichtung**) fließen, in die andere Richtung (**Sperrichtung**) fließt (fast) keiner.

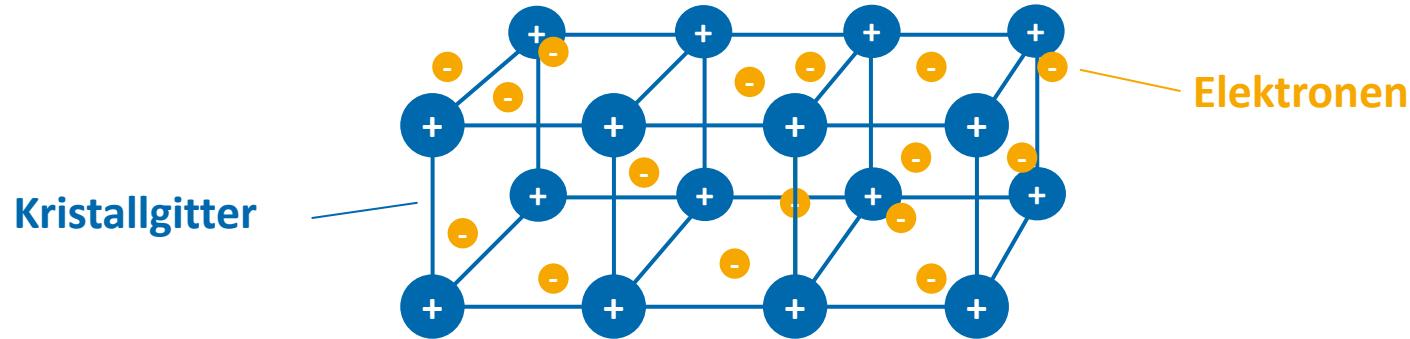
Abschnitt 6.1

Aufbau der Materie

- ▶ Energieniveaus des Wasserstoffs
- ▶ Energiebändermodell

Erinnerung: Der Aufbau eines elektrischen Leiters

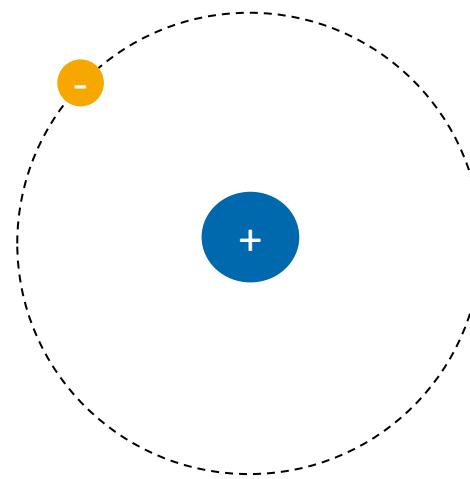
- In metallischen Leitern bilden die Atome ein Kristallgitter, in dem sich Elektronen frei bewegen können.



- Bei Nichtleitern sind die Elektronen dagegen fest an die Atome gebunden.

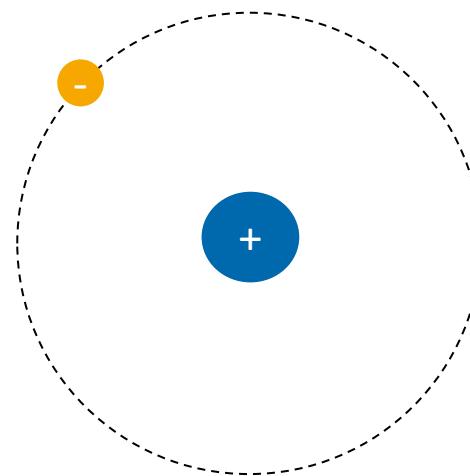
Aufbau der Materie

- Das Bohrsche Atommodell wurde bereits vorgestellt.
- Die Elektronen können sich innerhalb der Atomhülle in verschiedenen Schalen (**Energieniveaus**) bewegen.
- Nur diskrete Energieniveaus sind möglich.
- Die Energieniveaus werden in **Elektronenvolt eV** angegeben.

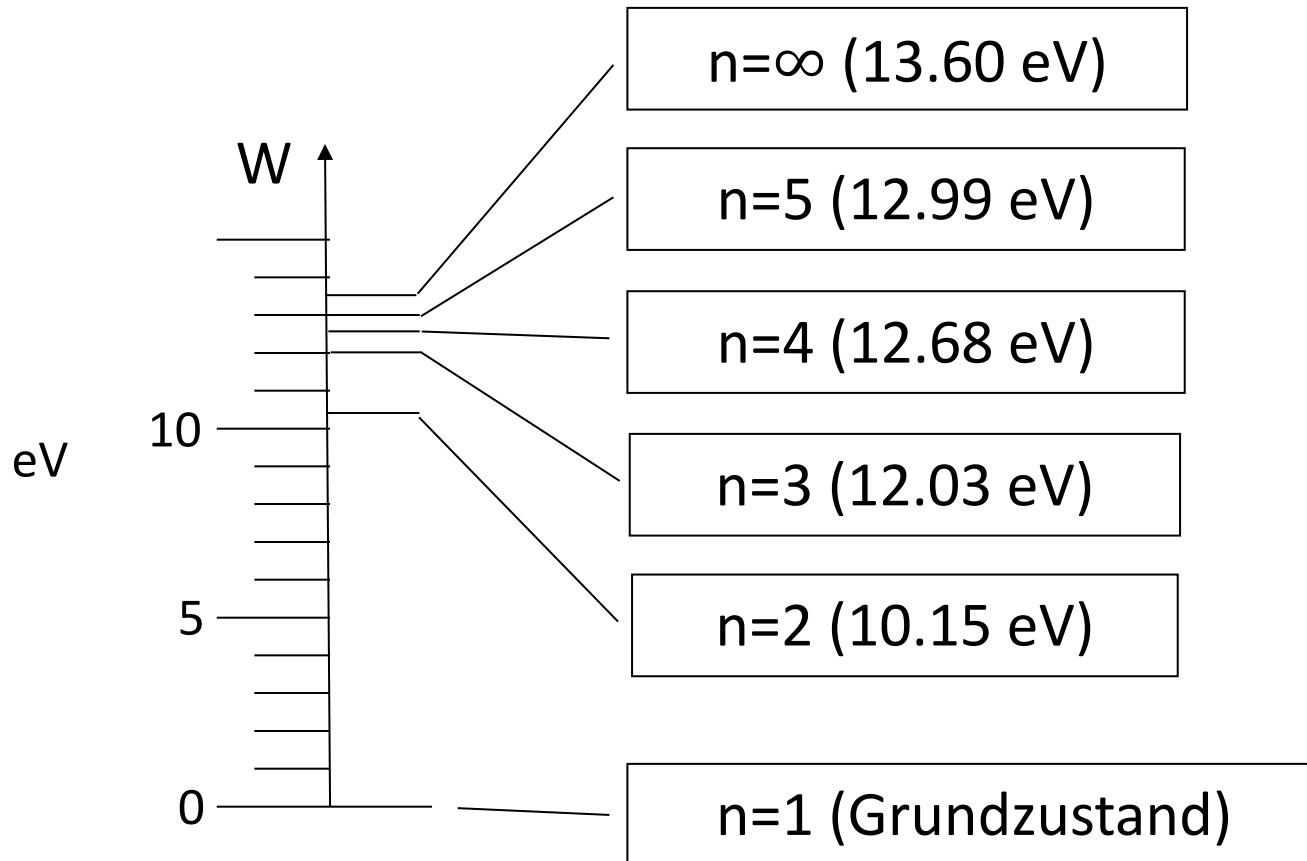


Aufbau der Materie

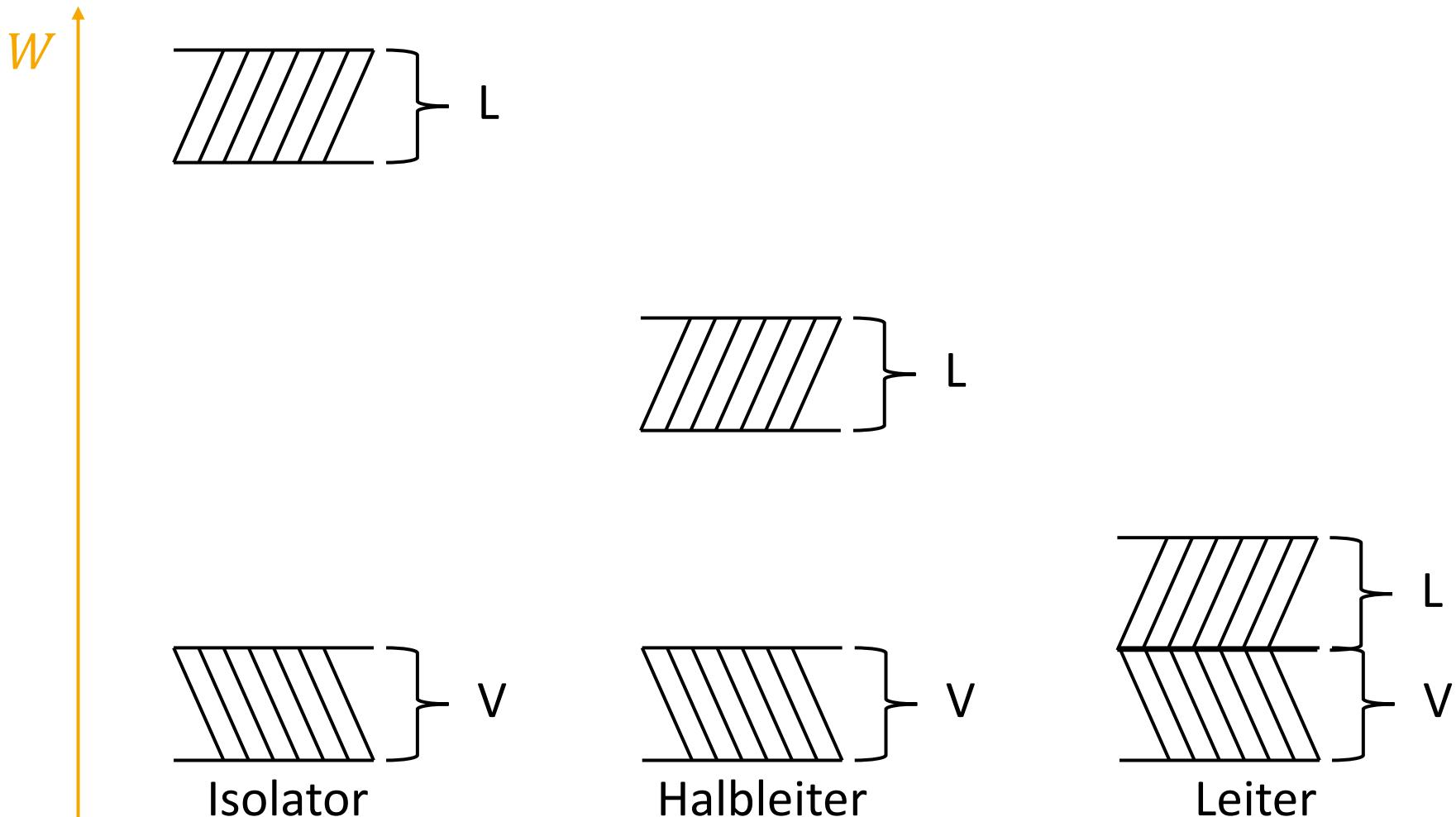
- Befindet sich ein Elektron in einem Atom (z.B. Wasserstoffatom) auf der 1. Schale, dann befindet sich das Elektron im **Grundzustand**.
- Die **Energiedifferenz** ΔW zwischen zwei Energieniveaus ist stets diskret.



Energieniveaus des Wasserstoffs



Energiebändermodell



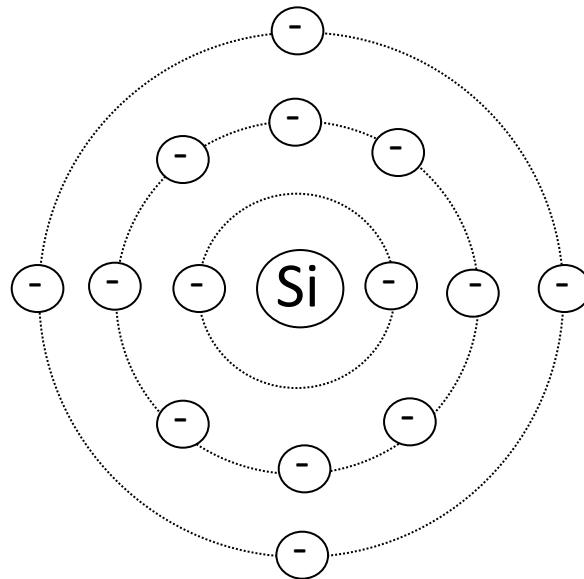
© W. Schiffman, R. Schmitz

Abschnitt 6.2

Silicium und Dotierung

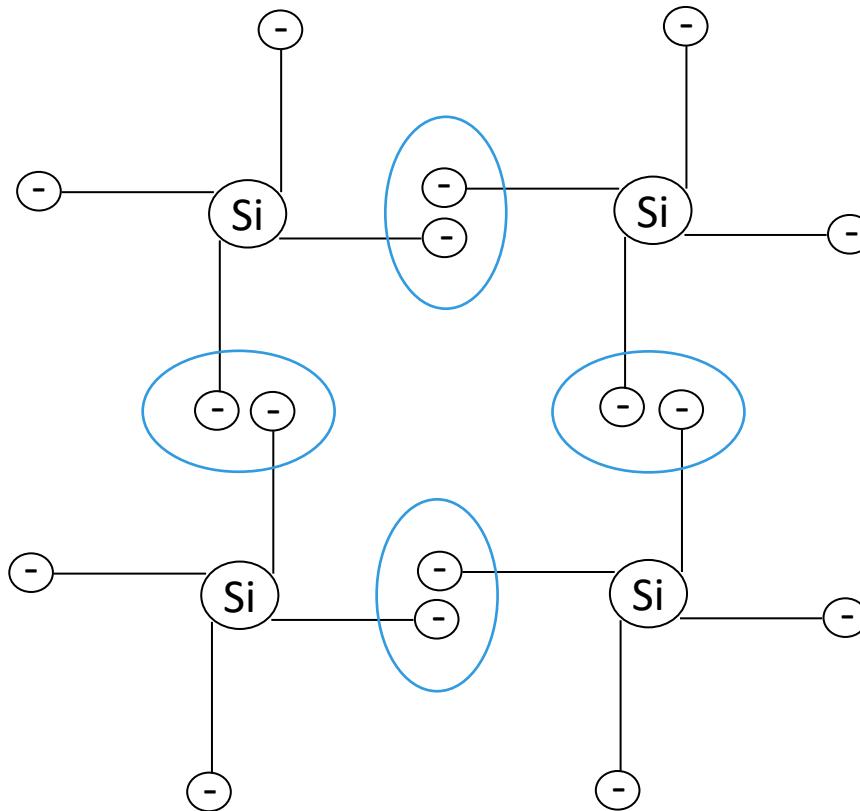
- ▶ Atommodell von Silicium
- ▶ Kristallstruktur von Silicium
- ▶ Löcher und Rekombination
- ▶ Eigenleitfähigkeit
- ▶ Dotierte Halbleiter

Atommodell von Silicium



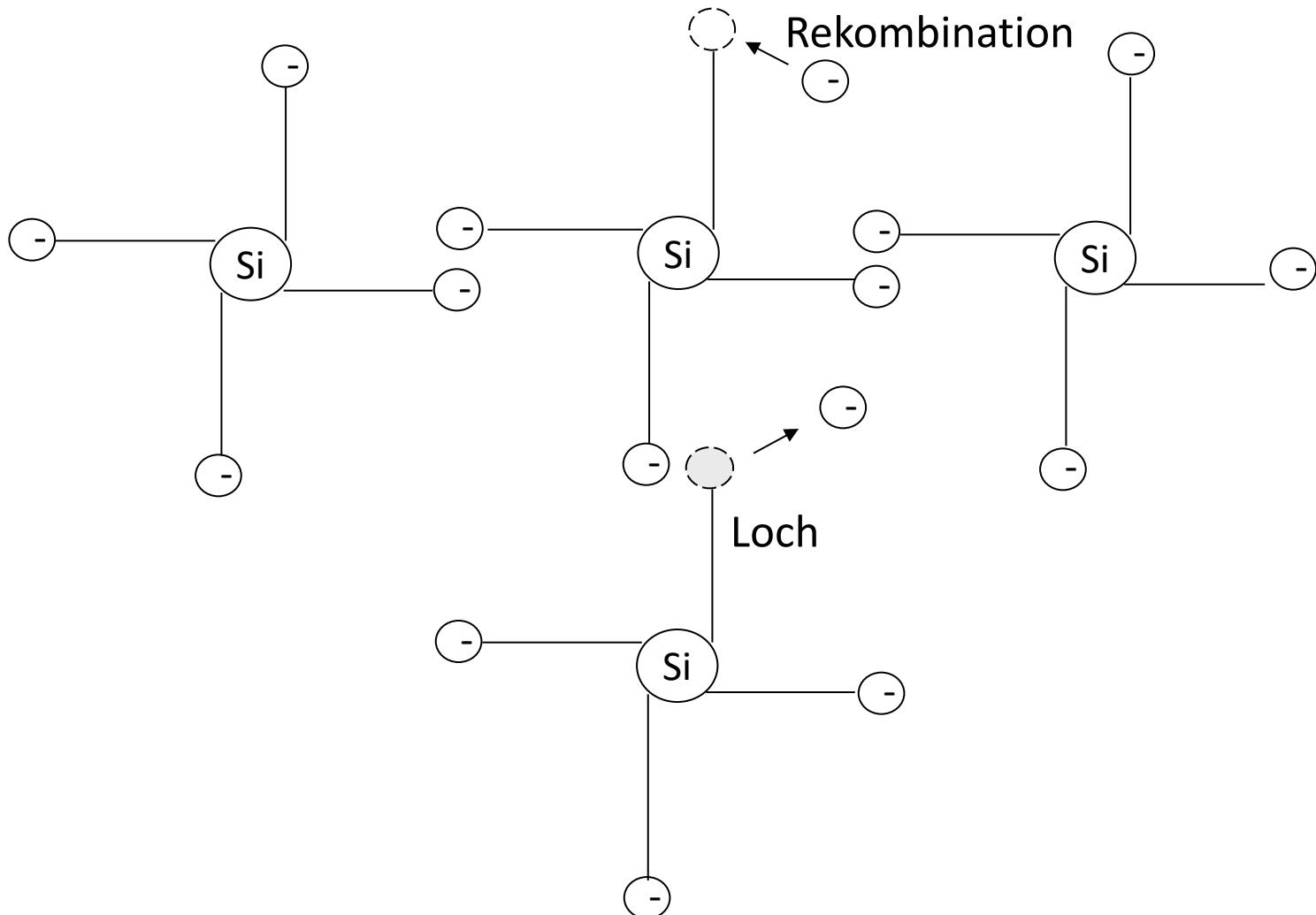
Das Silicium-Atom hat vier **Valenzelektronen**

Kristallaufbau von Silicium

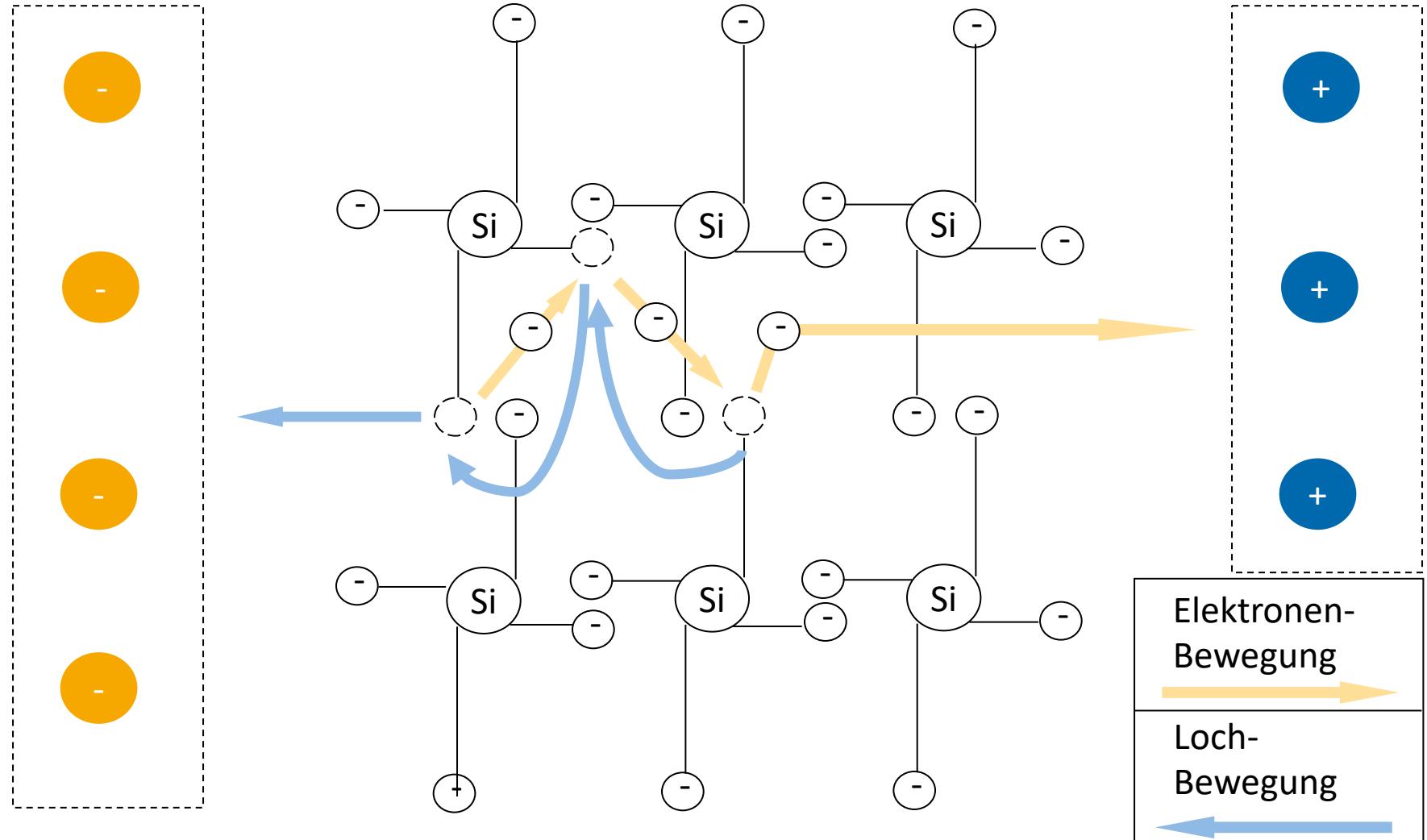


- Die Valenzelektronen bilden mit den Valenzelektronen der vier benachbarten Silicium-Atome **gemeinsame Elektronenpaare**

Löcher und Rekombination



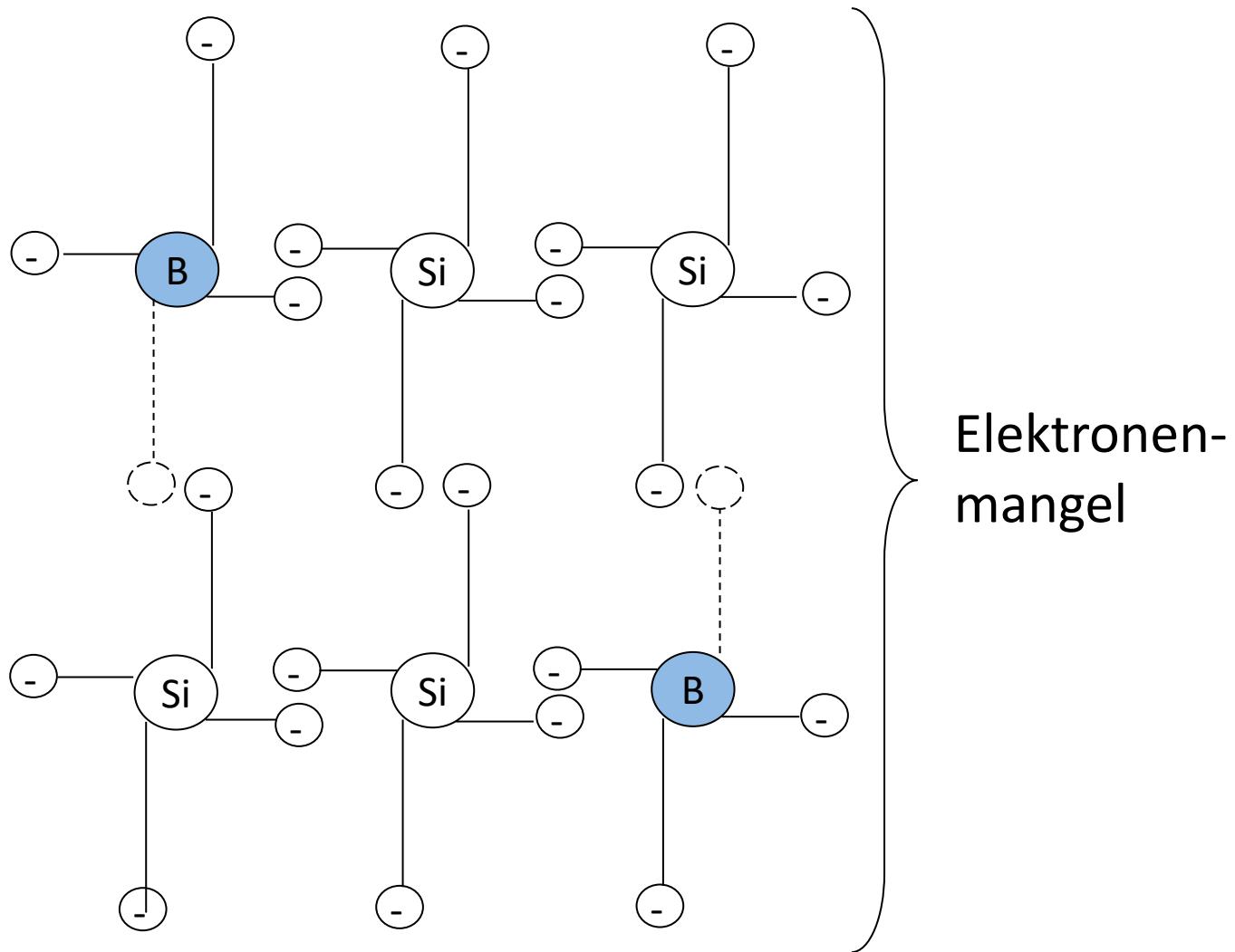
Eigenleitfähigkeit



- Das Einfügen von Fremdatomen wird **Dotieren** genannt
- Das Dotieren führt zu einer Veränderung der Anzahl an freien Elektronen
- Beispiel: Silicium-Atome (4 Valenzelektronen) werden mit Antimon-Atomen (5 Valenzelektronen) dotiert

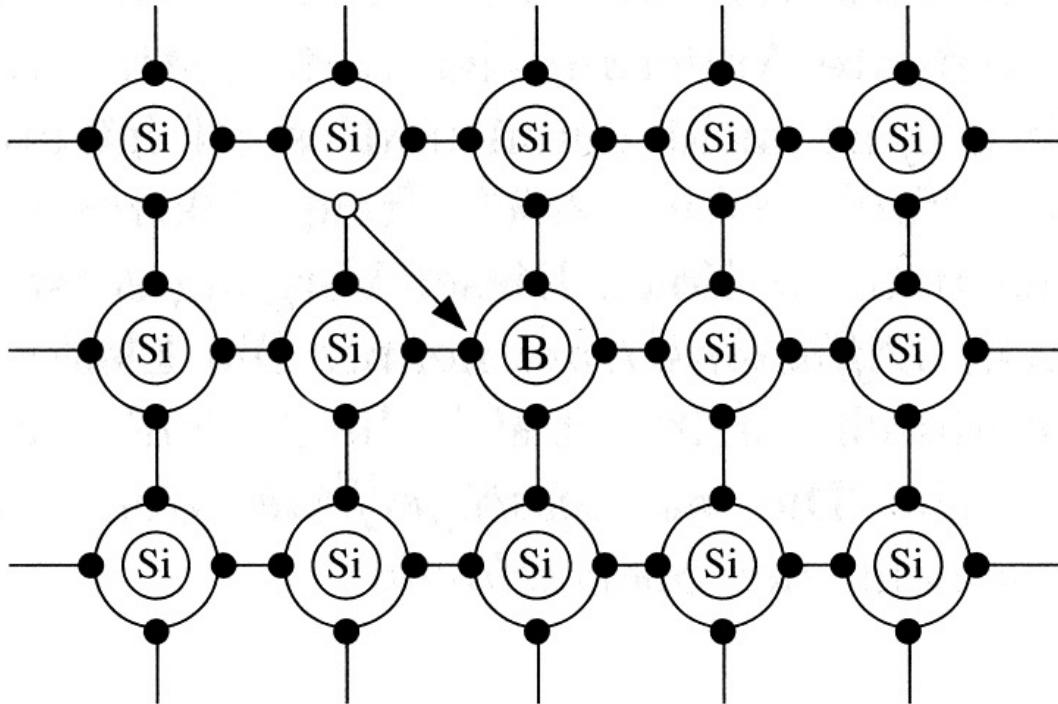
Beispiel für dotierte Halbleiter mit 3 Valenzelektronen: Silicium + Bor

positiv-leitendes
Material

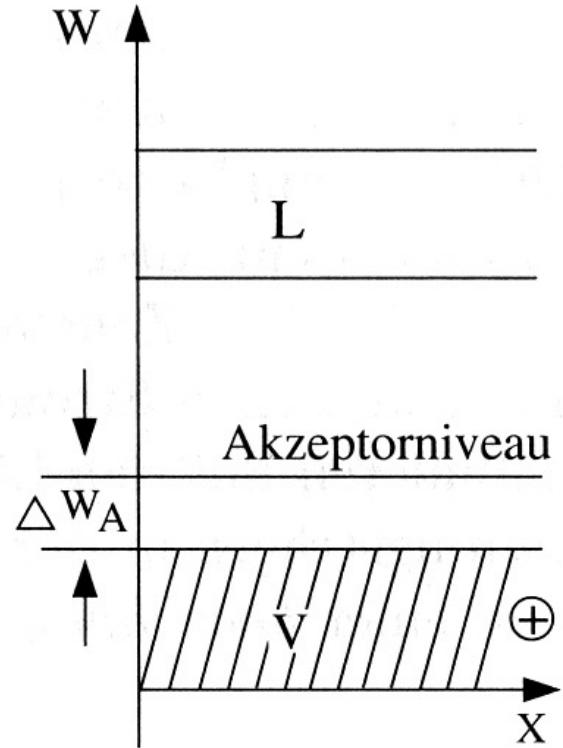


Beispiel für dotierte Halbleiter mit 3 Valenzelektronen: Silicium + Bor

- VI-3 Silizium / Dotierung



a) Ebene Darstellung der Kristallstruktur eines mit Bor-Atomen dotierten Si-Halbleiters

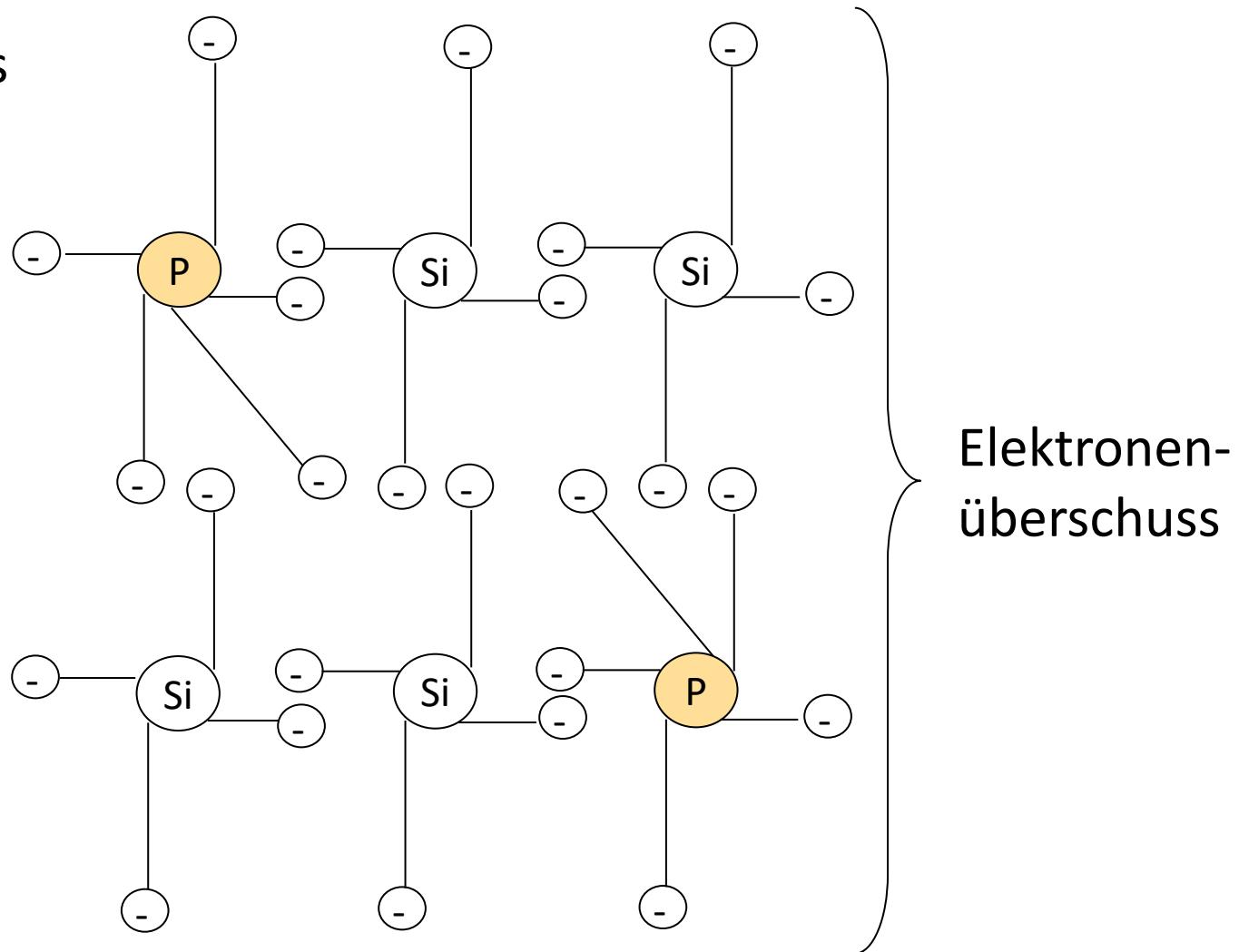


b) Bändermodell

© W. Schiffman, R. Schmitz

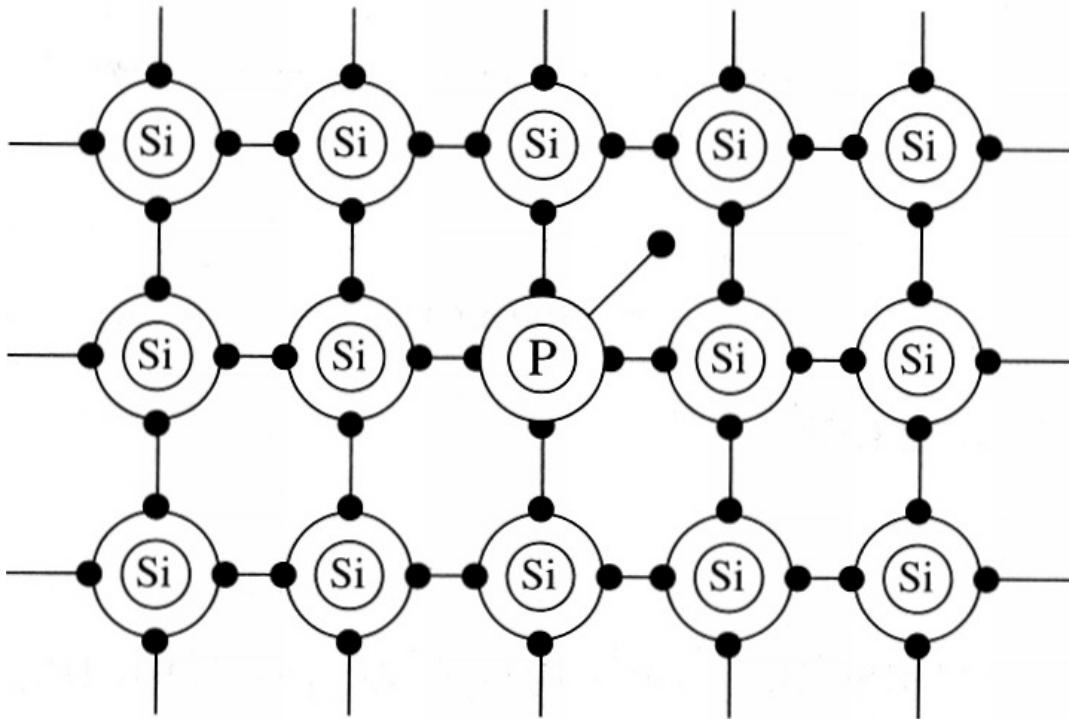
Beispiel für dotierte Halbleiter mit 5 Valenzelektronen: Silicium + Phosphor

negativ-leitendes
Material

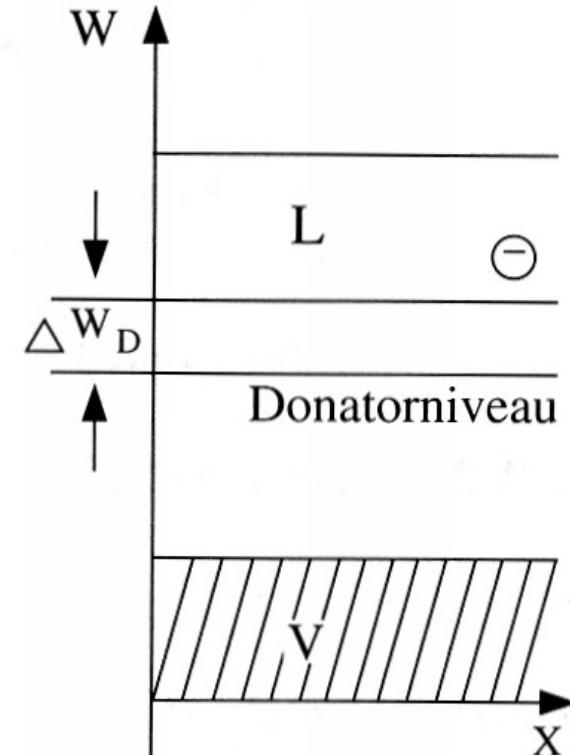


Beispiel für dotierte Halbleiter mit 5 Valenzelektronen: Silicium + Phosphor

- VI-3 Silizium / Dotierung



a) Ebene Darstellung der Kristallstruktur eines mit Phosphor-Atomen dotierten Si-Halbleiters



b) Bändermodell

© W. Schiffman, R. Schmitz

Abschnitt 6.3

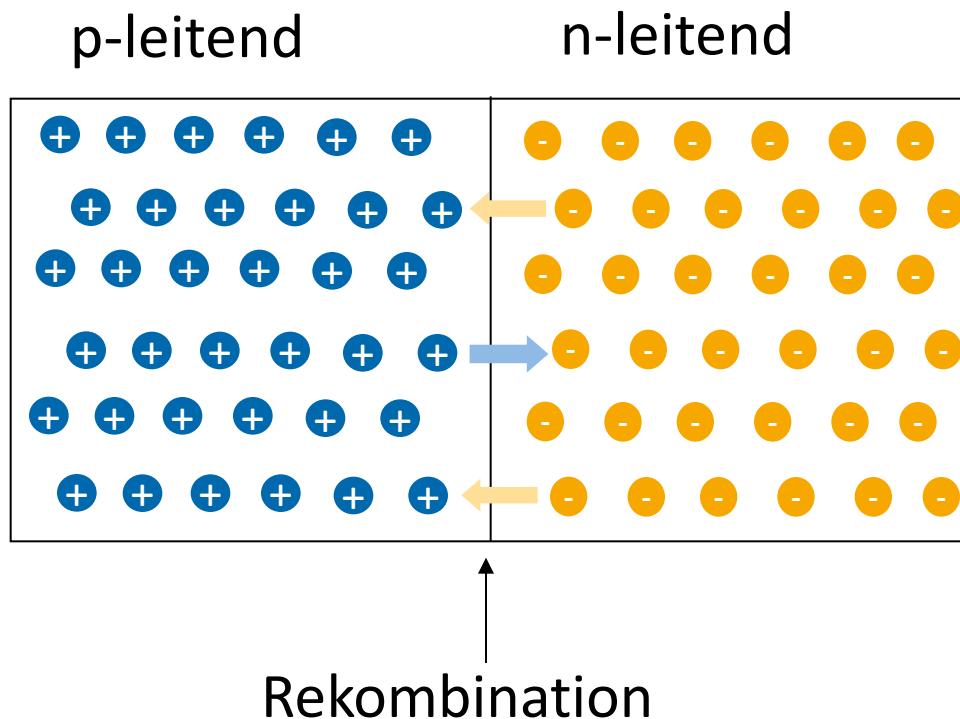
PN-Übergänge

- ▶ Sperrsicht
- ▶ Kennlinie

pn-Übergang

Löcher =
Majoritäts-
ladungsträger

Elektronen =
Minoritäts-
ladungsträger

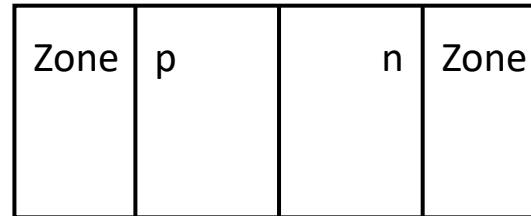


Elektronen =
Majoritäts-
ladungsträger

Löcher =
Minoritäts-
ladungsträger

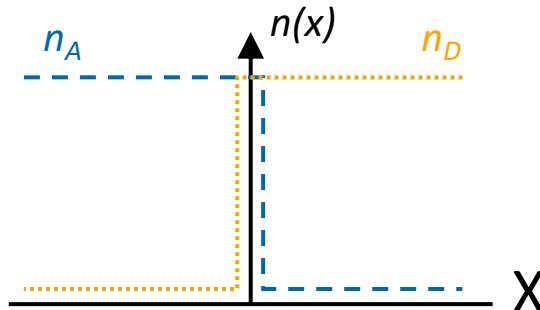
pn-Übergang

- a) Schematische Darstellung eines pn-Übergangs



Grenzschicht mit n-dotierter und p-dotierter Zone

- b) Bei gleichem Grad der n- und p-Dotierung, ergibt sich eine sprunghafte Dotierungsdichte

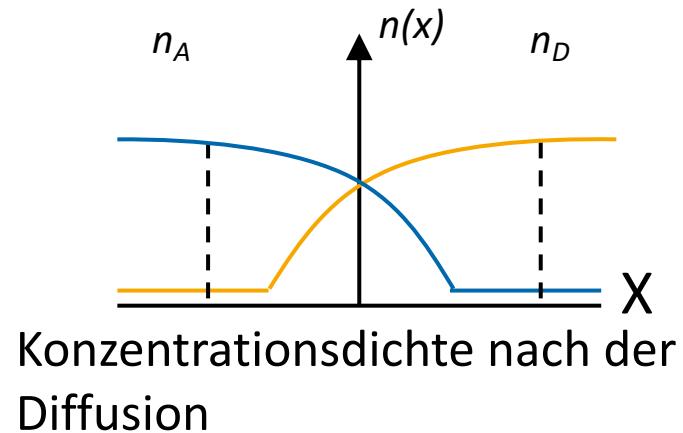


Konzentration der Donatoren n_D und Akzeptoren n_A ohne Ausgleich

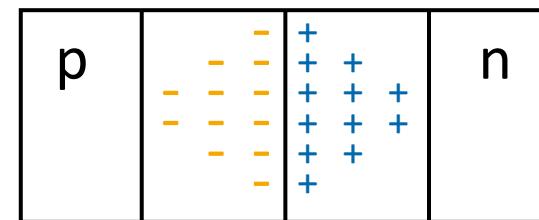
© W. Schiffman, R. Schmitz

pn-Übergang

- c) Zunächst sprunghafte Änderung der Ladungsträgerdichte, dann Ausgleich an der Grenzschicht durch **Diffusion**



- d) Durch Diffusion verbleiben in der n-Zone ortsfeste **positive Ionen** und durch Rekombination der Elektronen in der p-Zone ortsfeste **negative Ionen**

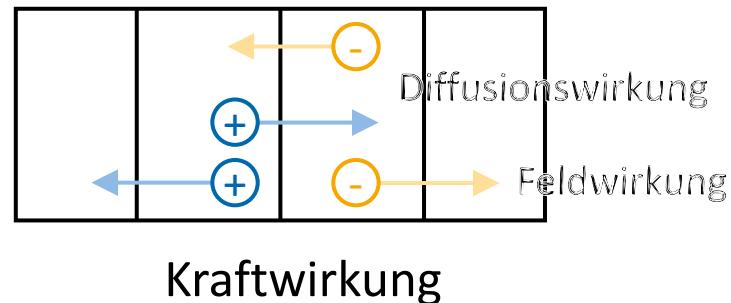


Grenzschicht mit n-dotierter und p-dotierter Zone

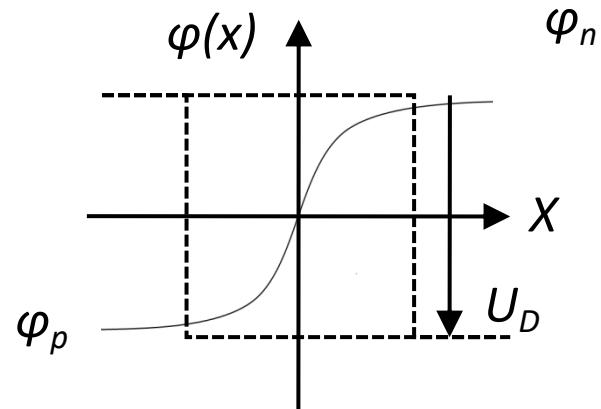
© W. Schiffman, R. Schmitz

pn-Übergang

- e) Zwischen den positiven Ionen in der n-Zone und negativen Ionen in der p-Zone entsteht ein elektr. Feld

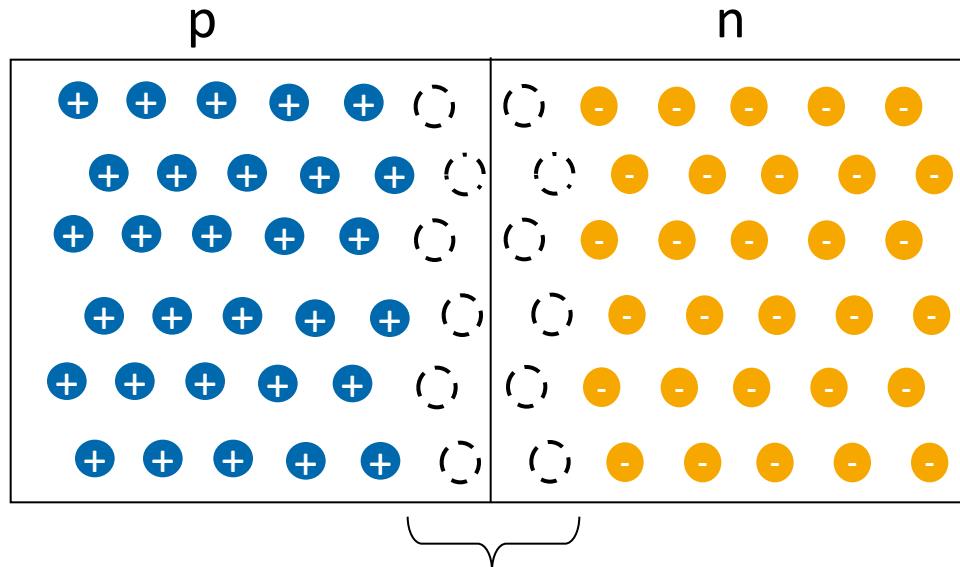


- f) Wenn Diffusions- und elektr. Feldwirkung auf die freien Ladungsträger gleich ist, führt dies zu einem dynamischen Gleichgewicht



© W. Schiffman, R. Schmitz

Sperrschicht



Grenzschicht,
arm an freien Ladungsträgern

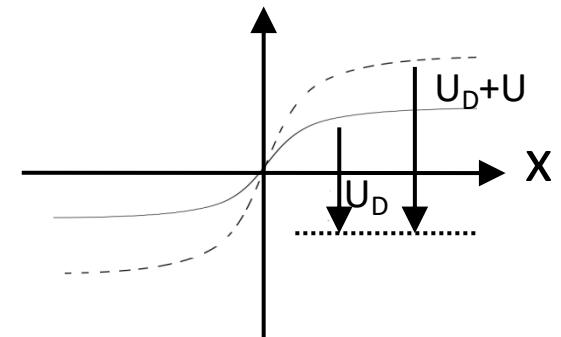
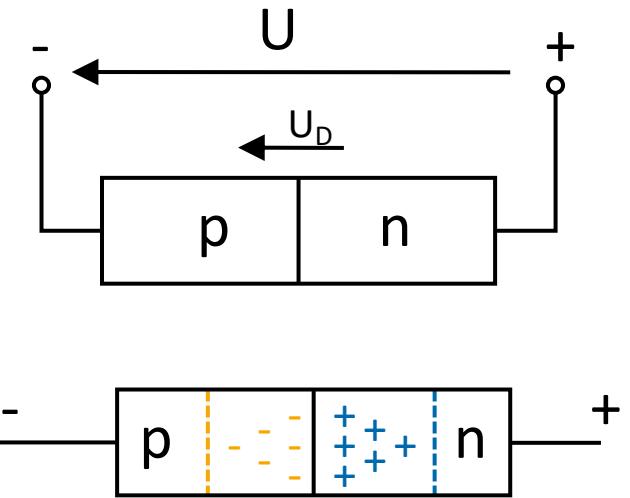
pn-Übergang mit äußerer Spannung

Wird der Minuspol der Spannungsquelle an die p – Zone und der Pluspol an die n – Zone angeschlossen, so ist die Diode in Sperrrichtung gepolt.

$$U_R = U_D + U$$

Nur Minoritätsträger können als Driftstrom (Größenordnung: μA) die Sperrsicht durchqueren.

Bei extrem hoher Spannung:
Zener-Effekt



© W. Schiffman, R. Schmitz

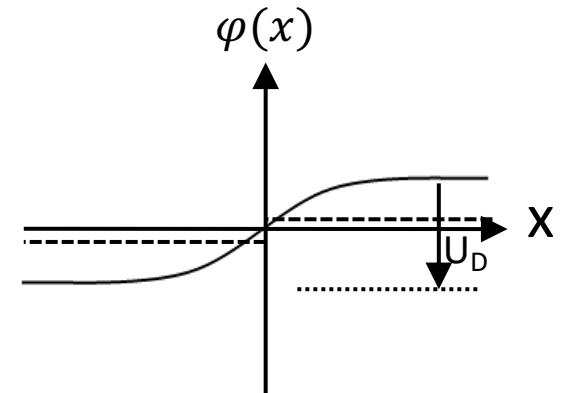
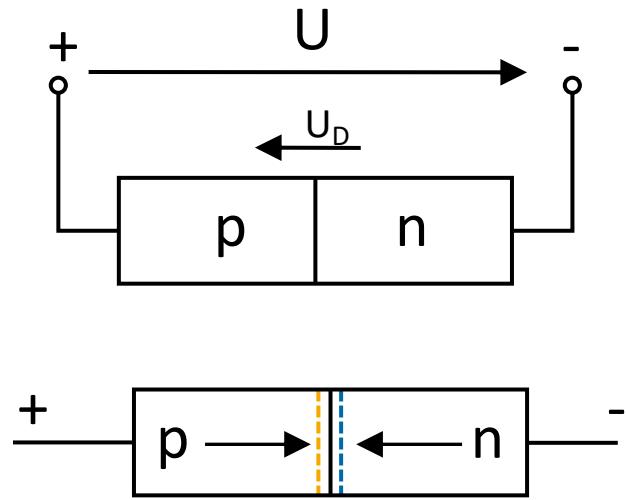
pn-Übergang mit äußerer Spannung

Wird der Pluspol an die p – Zone und der Minuspol an die n – Zone angeschlossen, dann wird die Spannung über die Raumladungen (pos. und neg. Ionen) auf $U_D - U$ verringert.

$$U_R = U_D - U$$

Dadurch Verringerung der Sperrsicht.

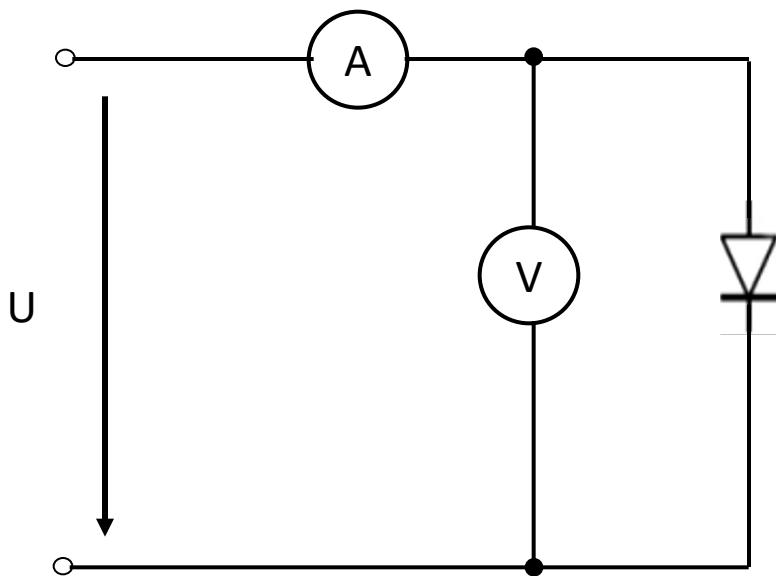
Falls $U > U_D$ gilt: alle Majoritätsträger tragen zum Strom bei. Die Diode ist in Durchlassrichtung gepolt.



© W. Schiffman, R. Schmitz

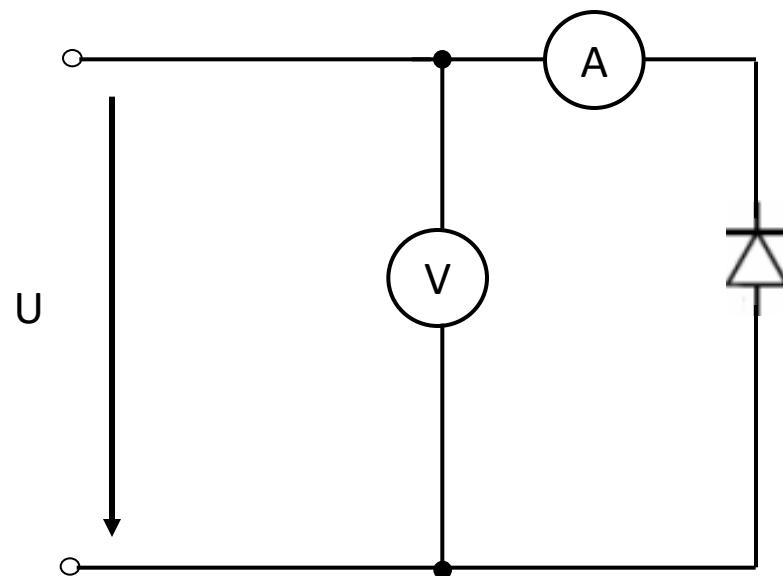
Kennlinie des pn-Übergangs

- Schaltung zur Aufnahme der Dioden-Kennlinien in Durchlass- bzw. Sperrrichtung.



Durchlassrichtung

Spannungsmessgerät richtig

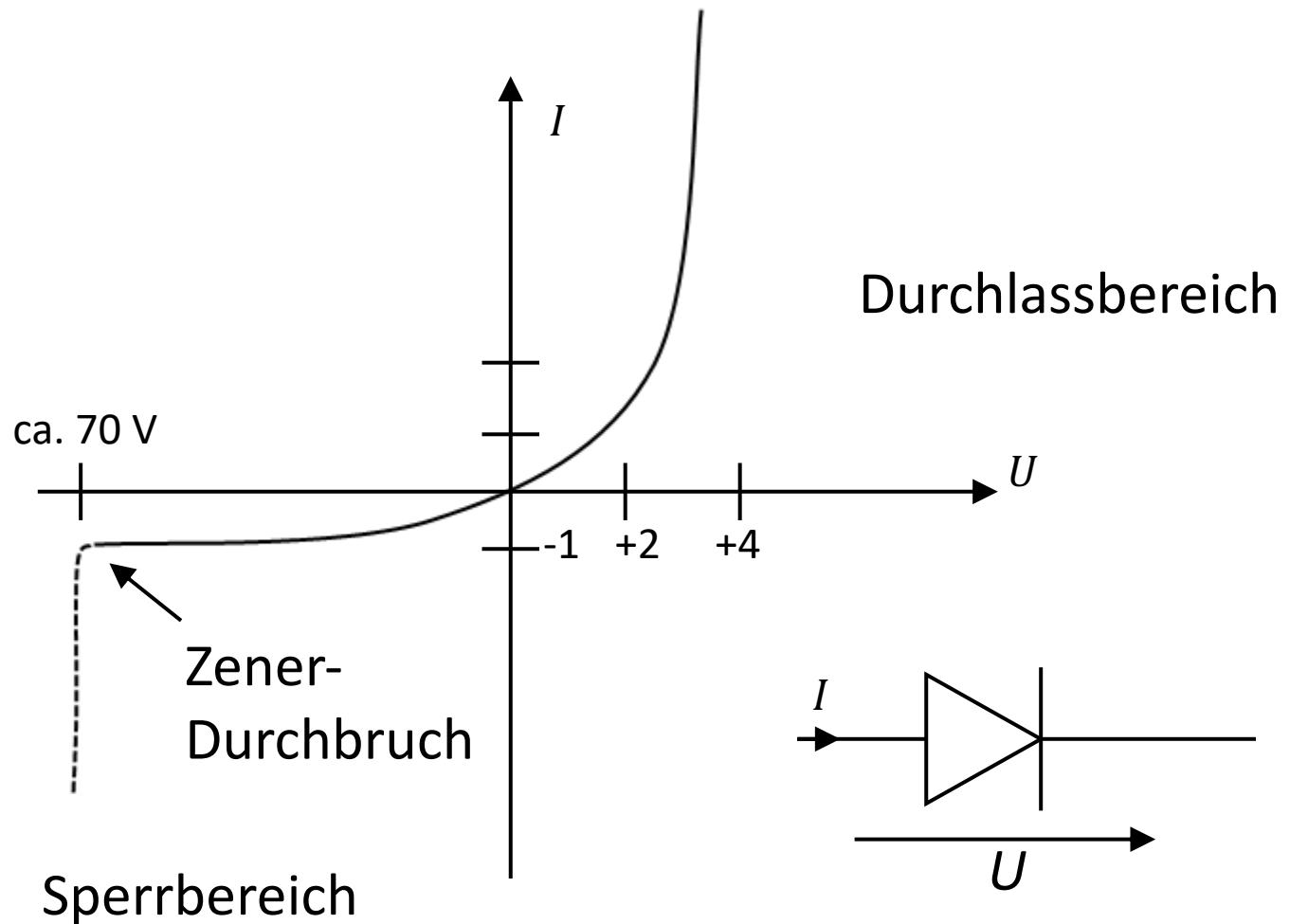


Sperrrichtung

Strommessgerät richtig

© W. Schiffman, R. Schmitz

Aufzeichnen der Dioden-Kennlinie



Ideale Strom- und Spannungskennlinie des pn-Übergangs

© W. Schiffman, R. Schmitz

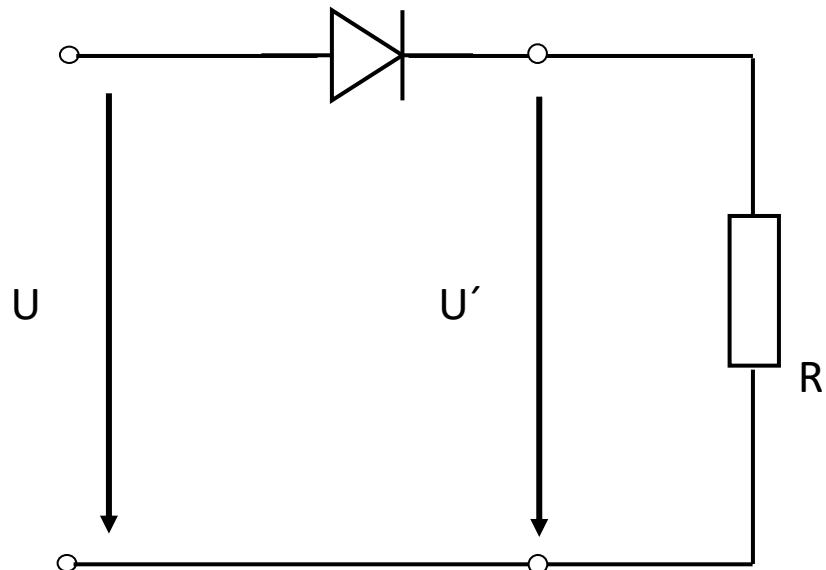
Abschnitt 6.4

Anwendungen der Diode

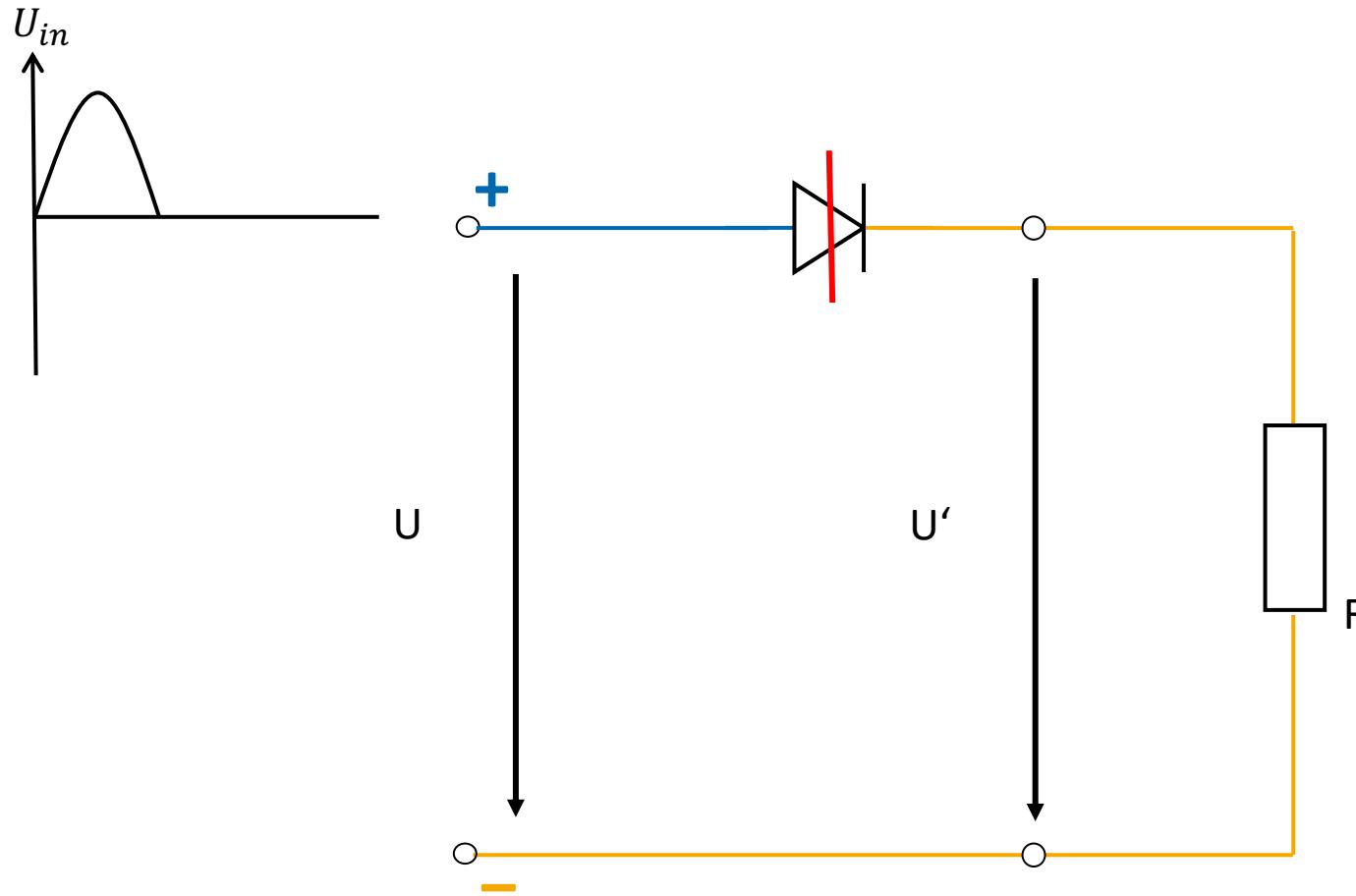
- ▶ Gleichrichter
- ▶ UND/ODER-Schaltungen

Anwendung: Gleichrichter

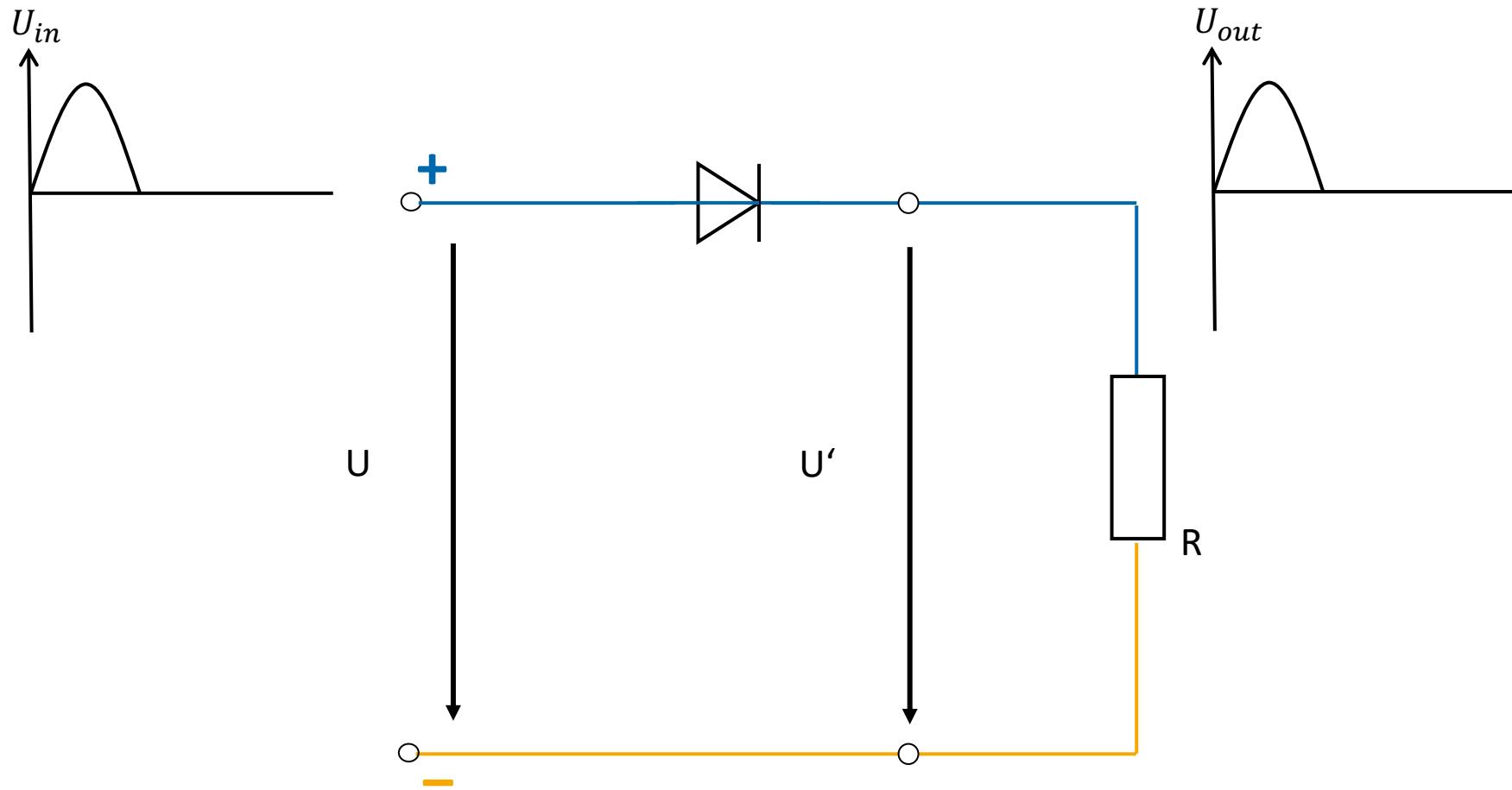
- Gleichrichter werden zur Umwandlung von Wechselspannung in Gleichspannung verwendet
- Beispiele:
 - Einweg-Gleichrichter
 - Brücken-Gleichrichter



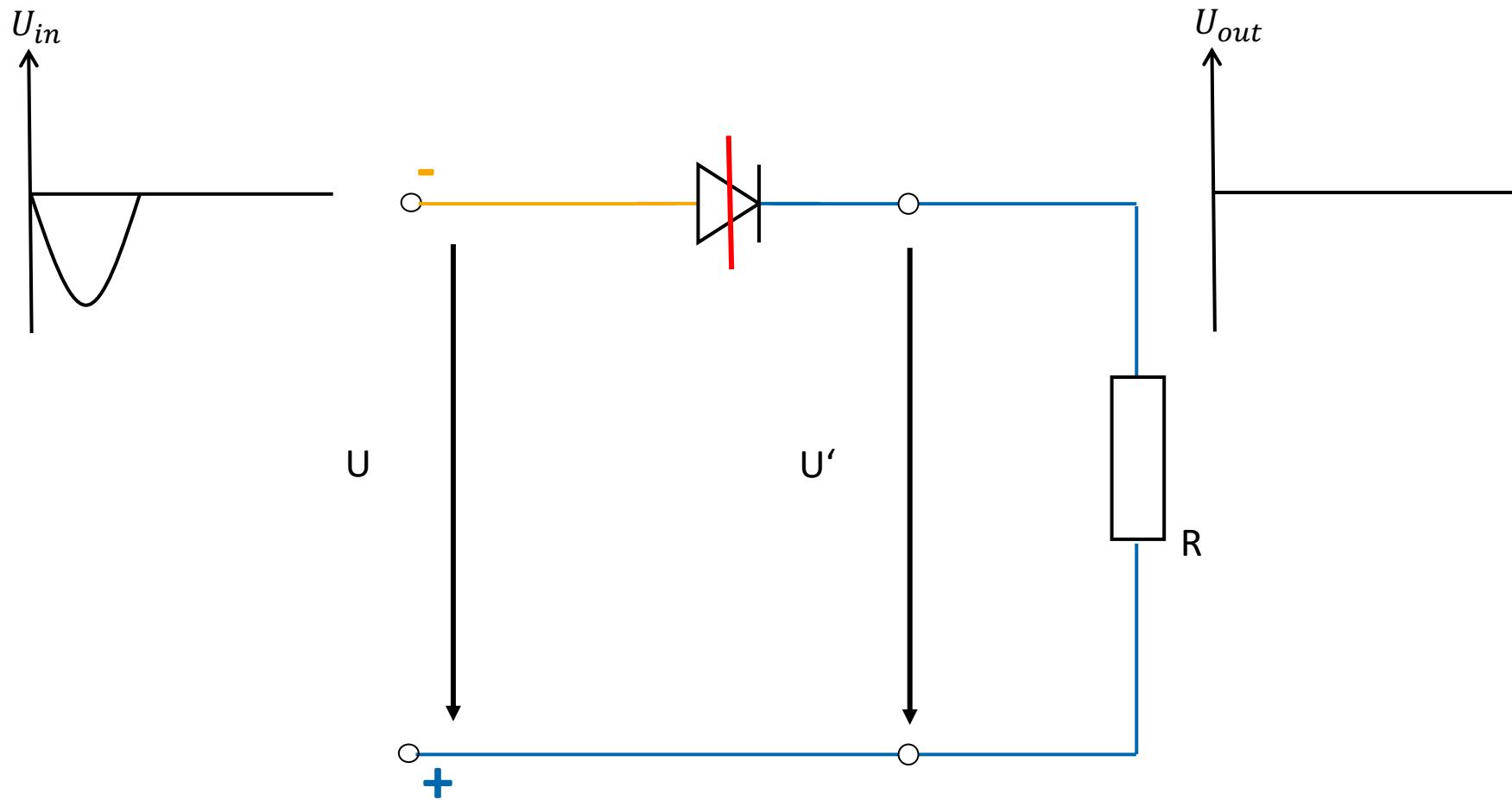
Einweg-Gleichrichter



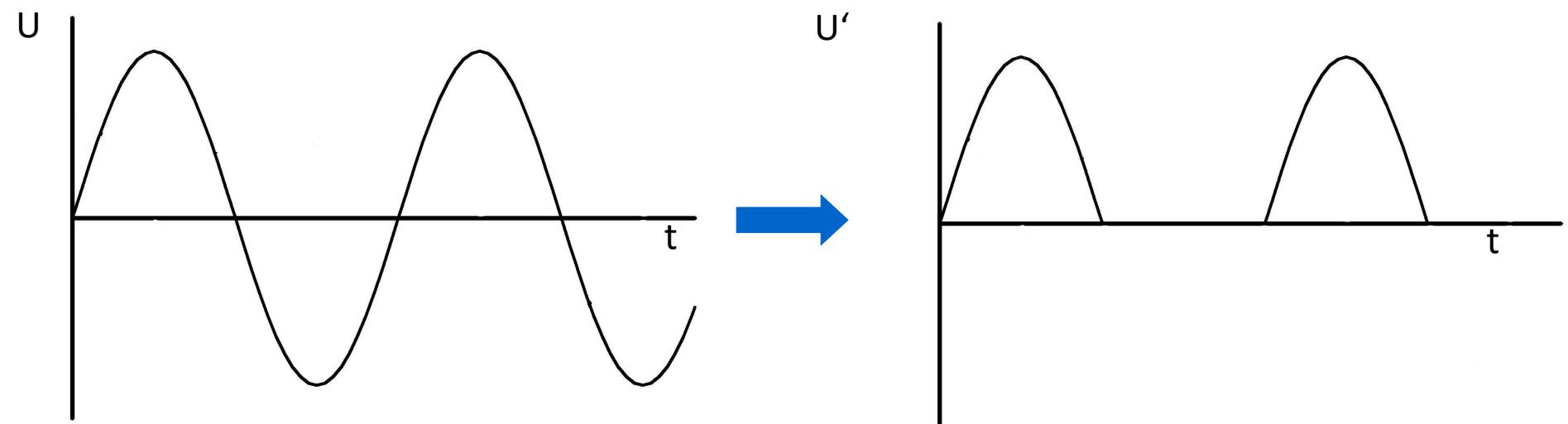
Einweg-Gleichrichter



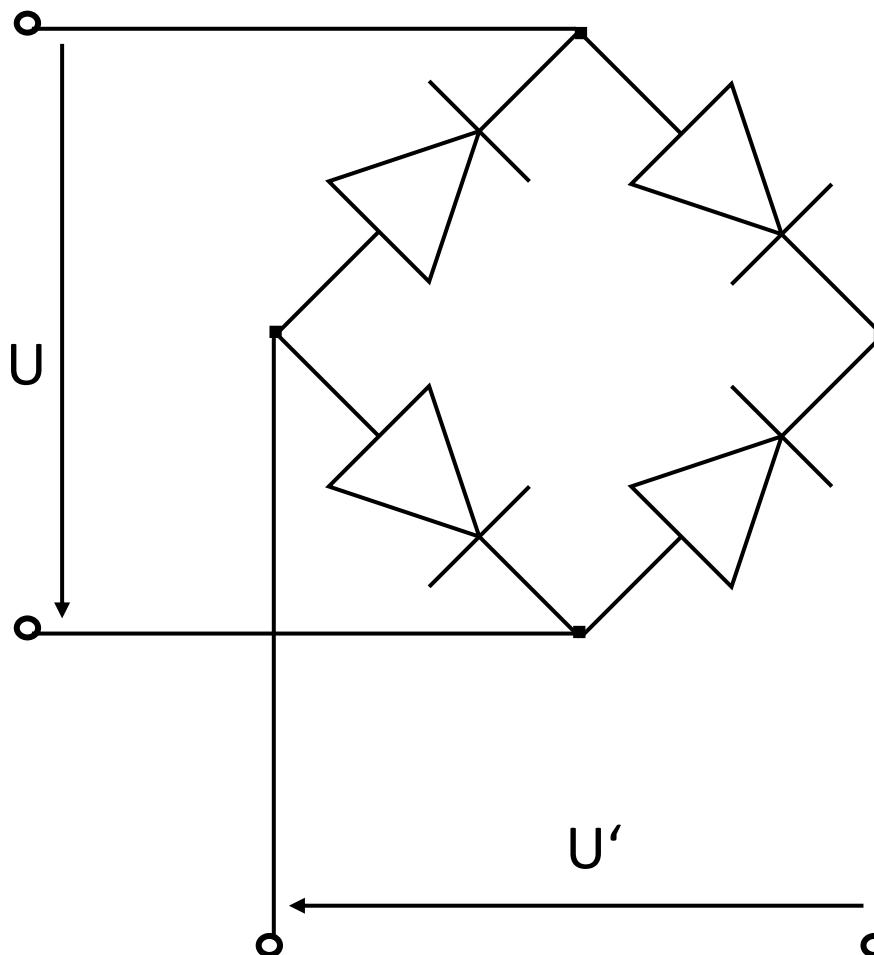
Einweg-Gleichrichter



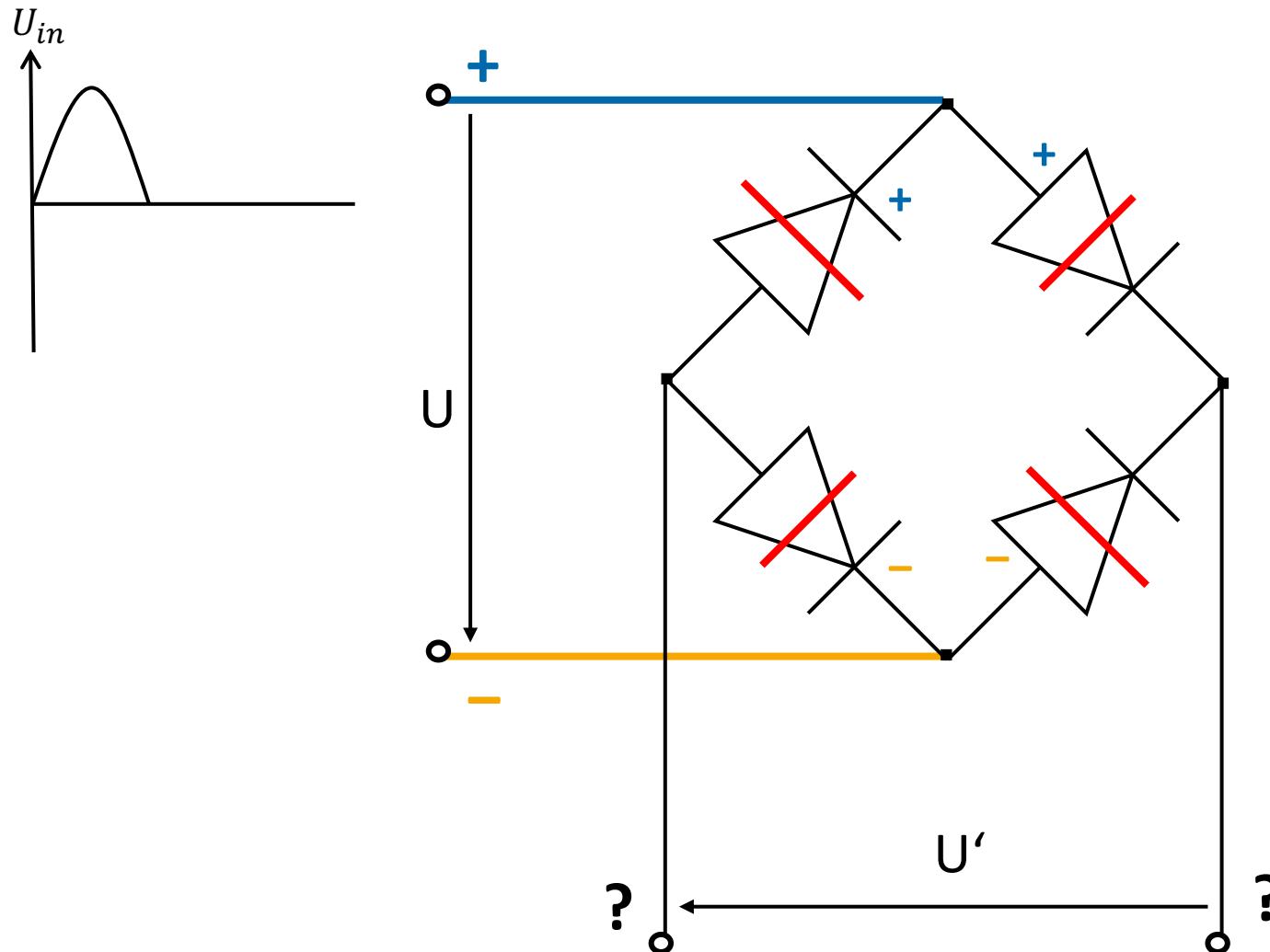
Einweg-Gleichrichter



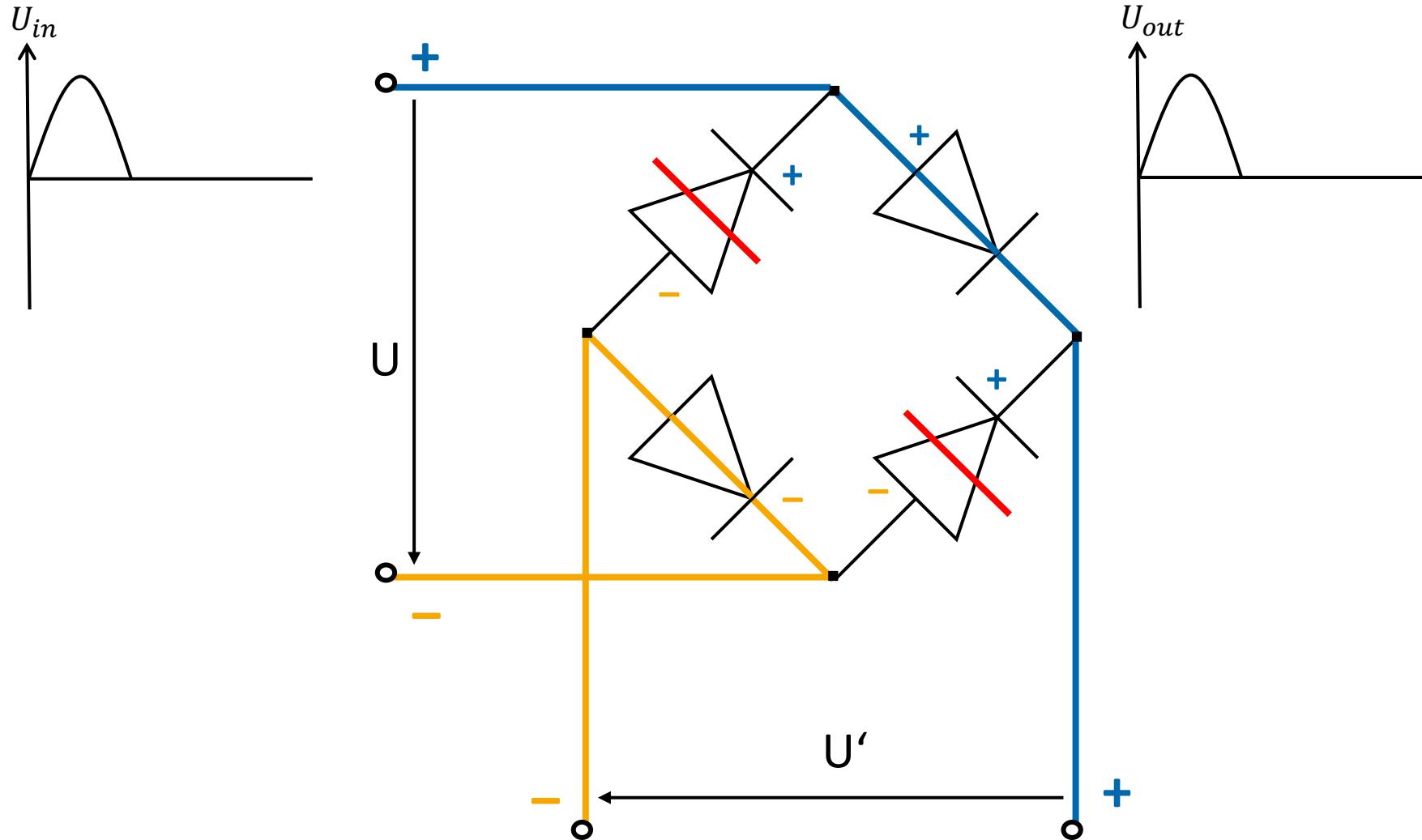
Brücken-Gleichrichter



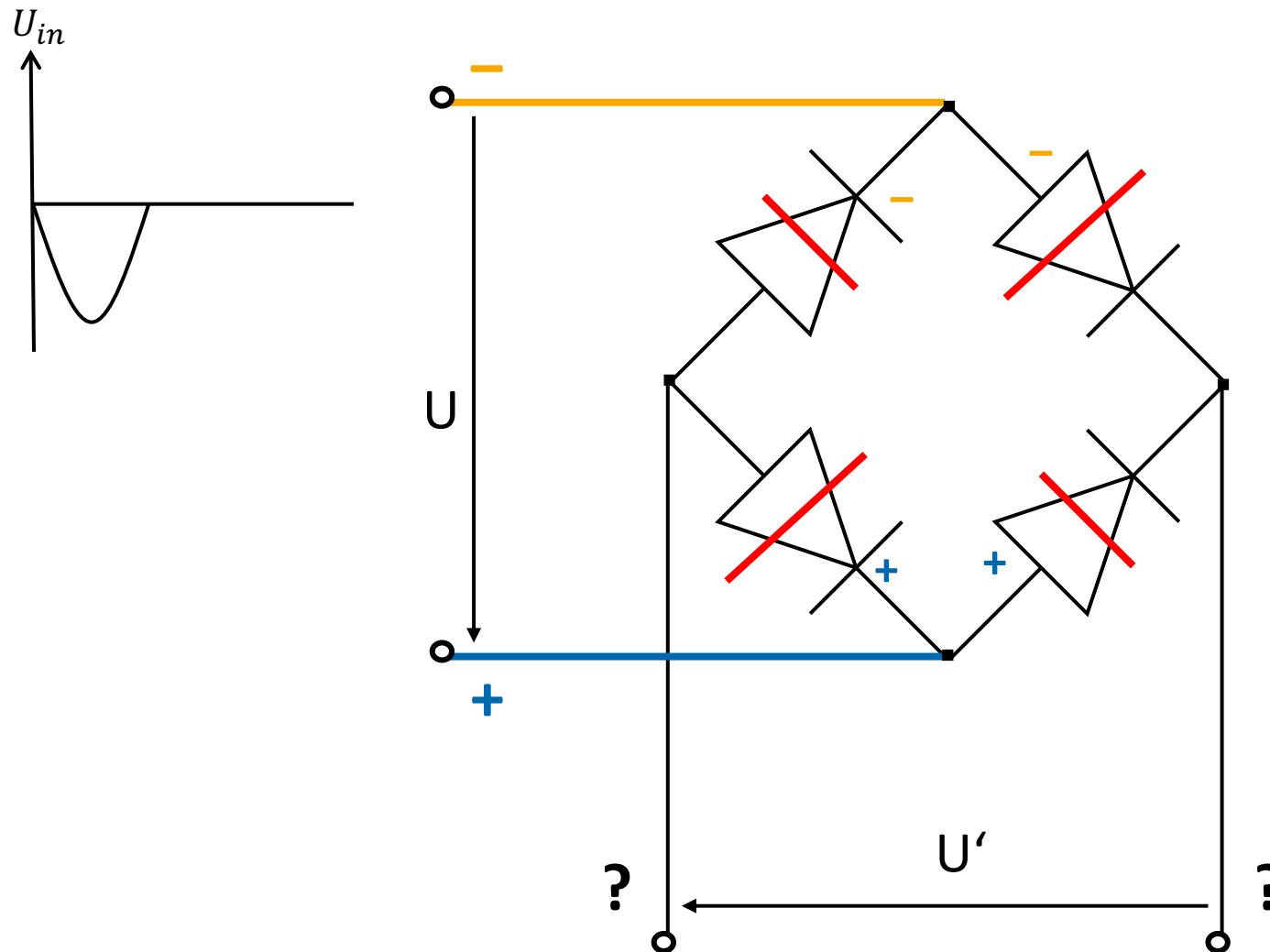
Brücken-Gleichrichter



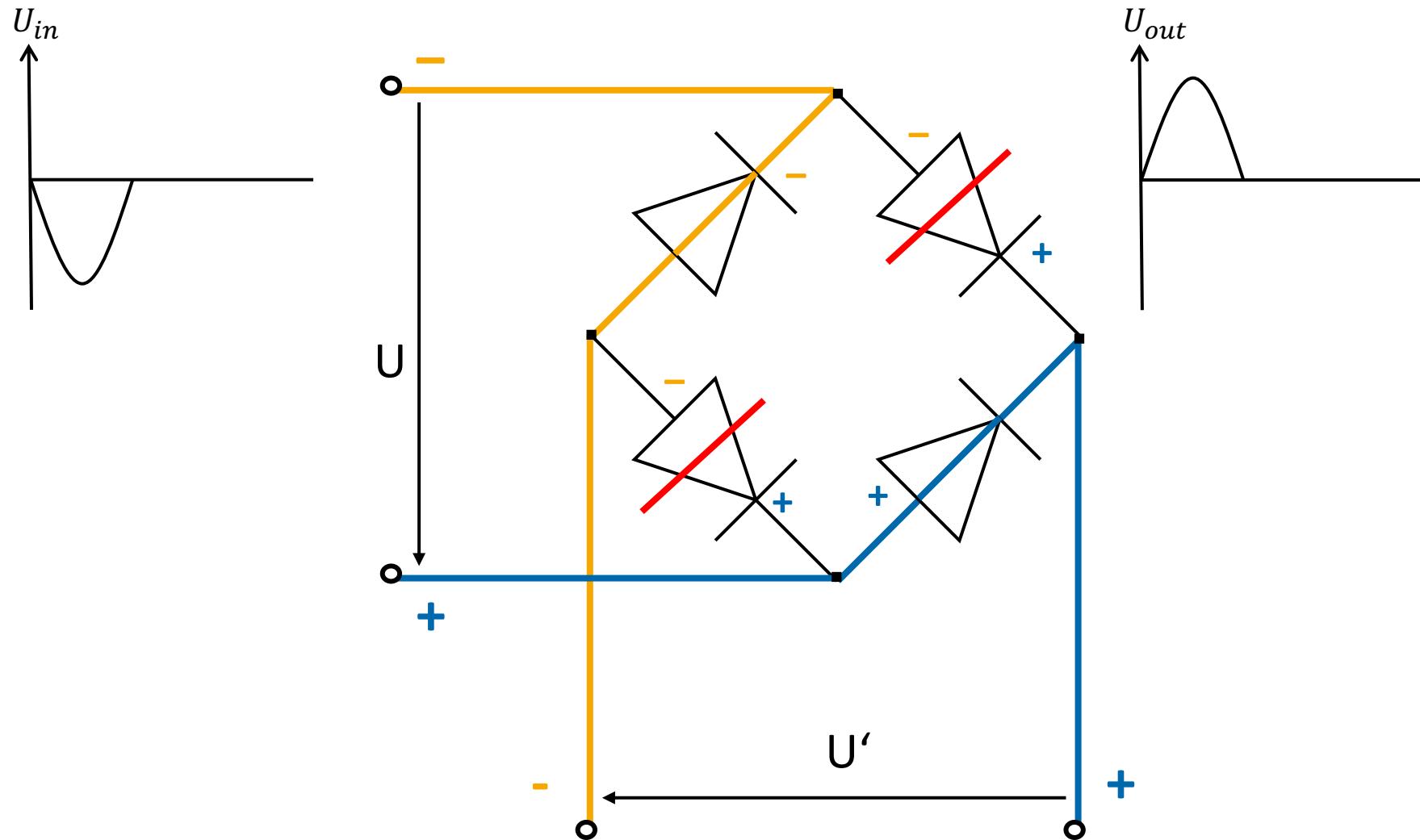
Brücken-Gleichrichter



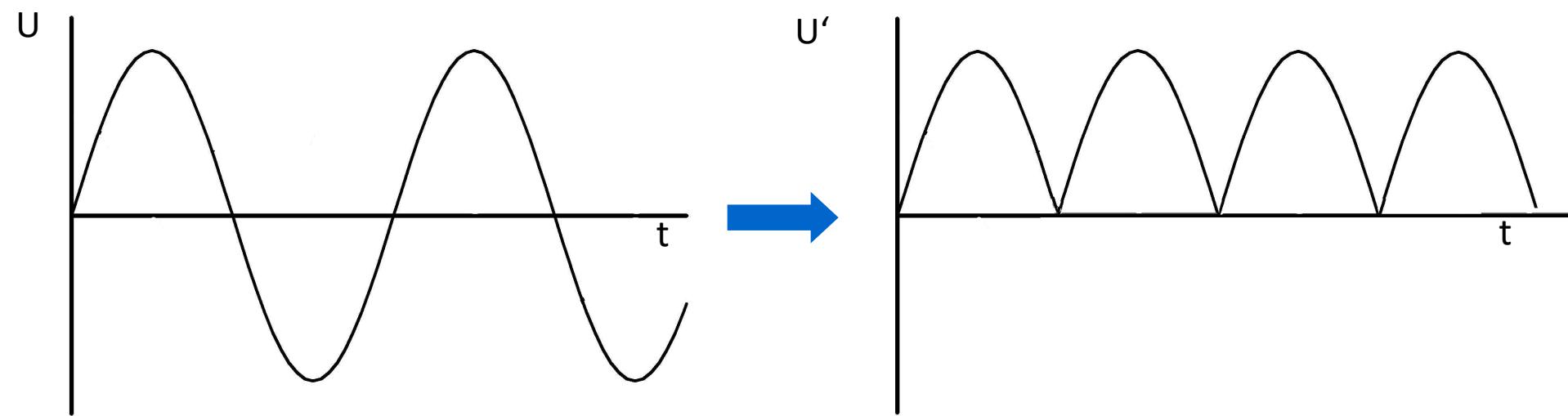
Brücken-Gleichrichter



Brücken-Gleichrichter

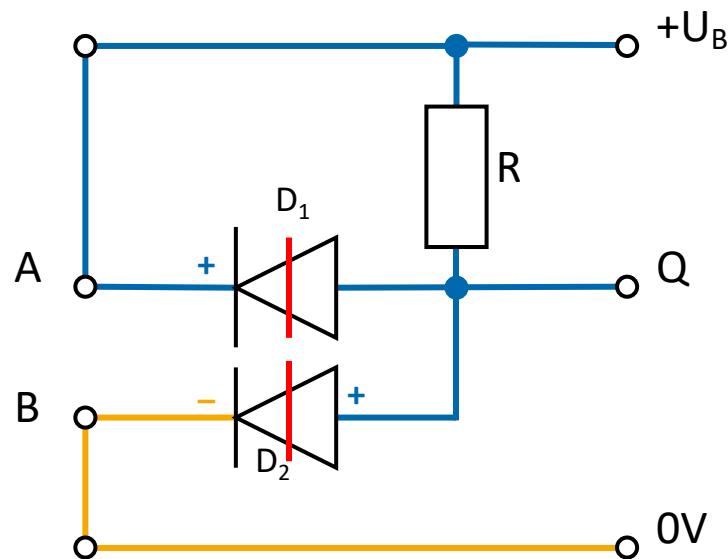


Brücken-Gleichrichter



Anwendungen: UND Schaltungen

- Schaltung zur Darstellung des logischen UND



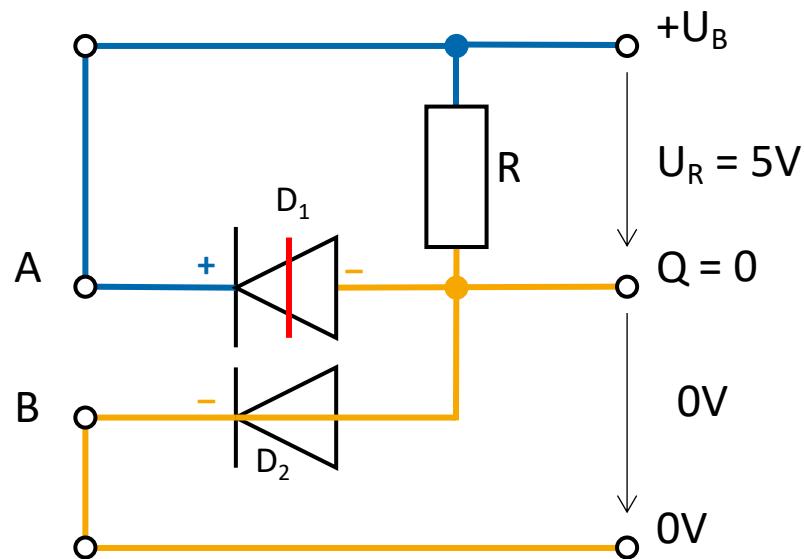
→

A	B	A \wedge B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Quelle: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/dig/0710091.htm>, November 2006

Anwendungen: UND Schaltungen

- Schaltung zur Darstellung des logischen UND



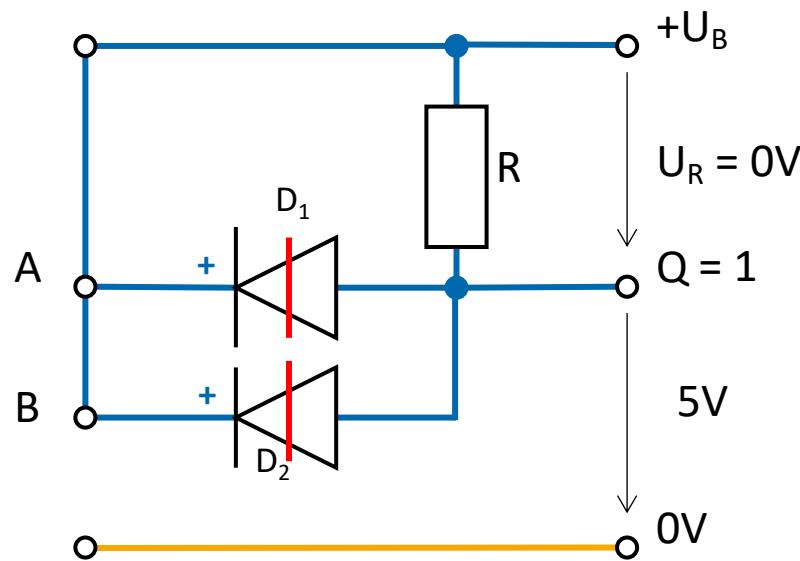
→

A	B	$A \wedge B$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Quelle: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/dig/0710091.htm>, November 2006

Anwendungen: UND Schaltungen

- Schaltung zur Darstellung des logischen UND



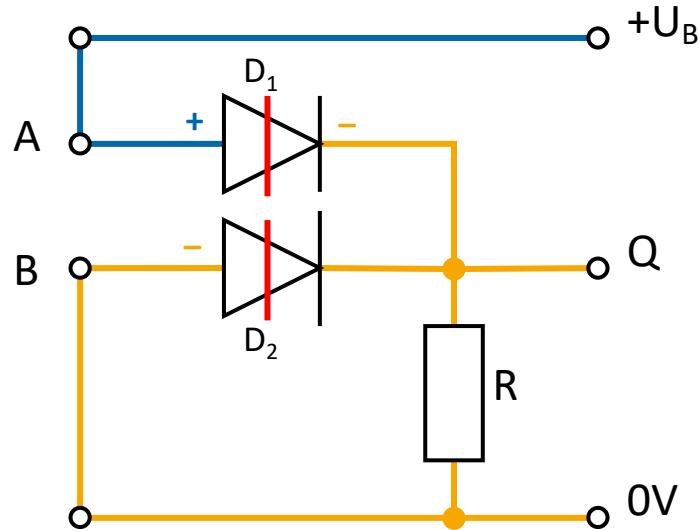
→

A	B	$A \wedge B$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Quelle: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/dig/0710091.htm>, November 2006

Anwendungen: ODER Schaltungen

- Schaltung zur Darstellung des logischen ODER



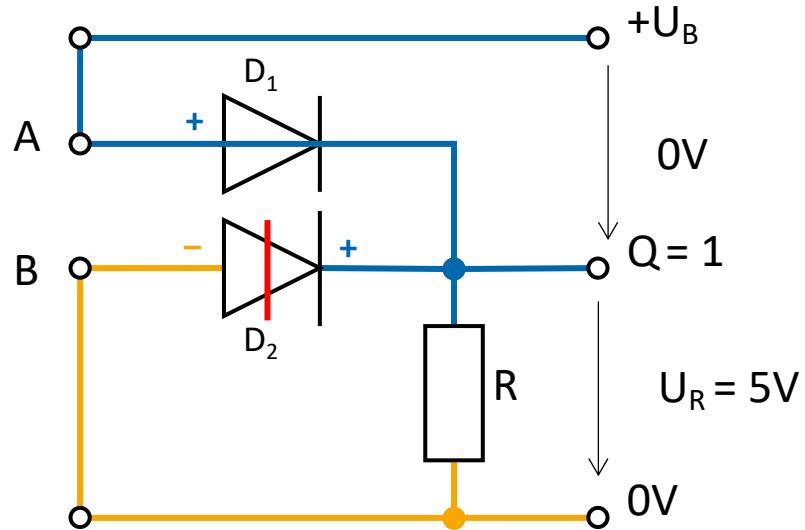
→

A	B	$A \vee B$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Quelle: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/dig/0710091.htm>, November 2006

Anwendungen: ODER Schaltungen

- Schaltung zur Darstellung des logischen ODER



→

A	B	A \vee B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

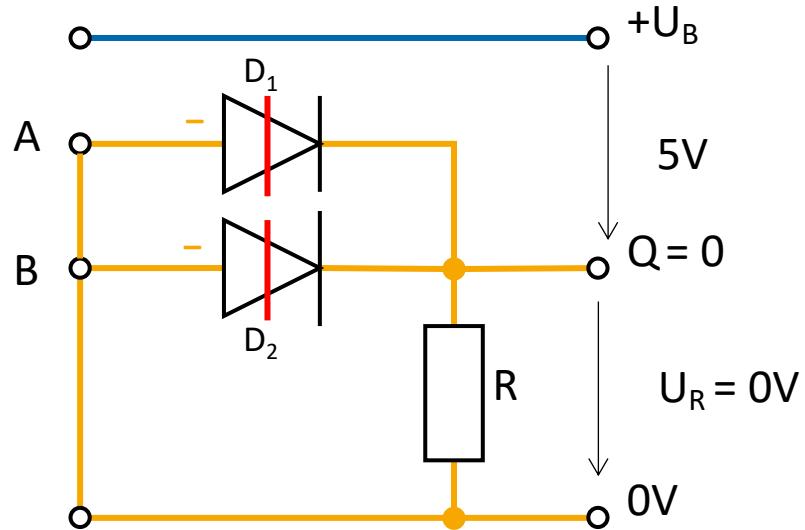
Quelle: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/dig/0710091.htm>, November 2006

Anwendungen: ODER Schaltungen

- Schaltung zur Darstellung des logischen ODER

→

A	B	$A \vee B$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1



Quelle: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/dig/0710091.htm>, November 2006

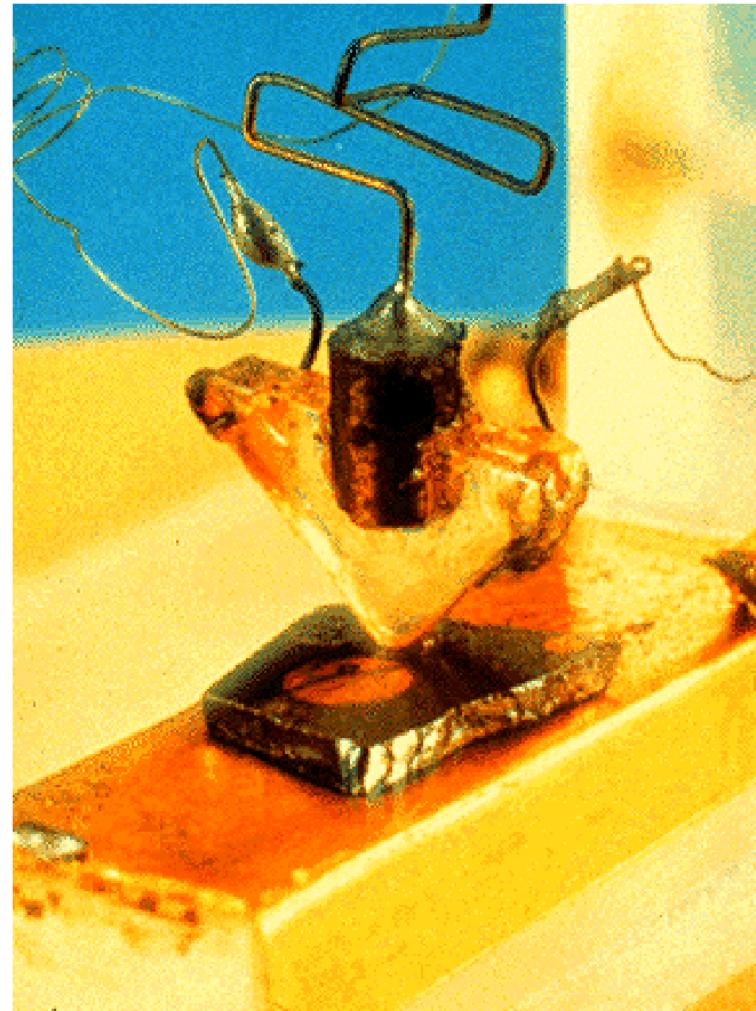
Abschnitt 6.5

Transistoren

- ▶ Bipolare Transistoren
- ▶ Funktionsprinzip
- ▶ Verstärkerschaltung
- ▶ Emitterschaltung
- ▶ Kennlinien
- ▶ Feldeffekttransistoren
- ▶ Bipolar vs. Unipolar

Der Transistor

- Bereits (kurz) in den Grundlagen vorgestellt
- 1947 von Shockley, Bardeen und Brattain erfunden
- 1956 wurden sie hierfür mit dem Physik-Nobelpreis geehrt



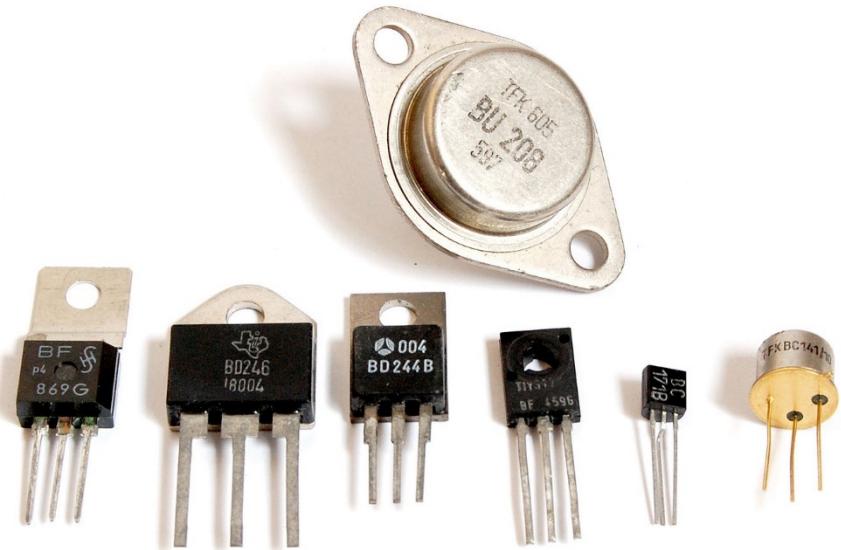
© G. Lakemeyer, W. Oberschelp, G. Vossen

„moderne“ Transistoren

Technische Daten

Typ:	BU 208
I_C :	Max. 8 A
U_{CEO} :	700 V
Ausführung:	NPN
Gehäuse:	TO 3

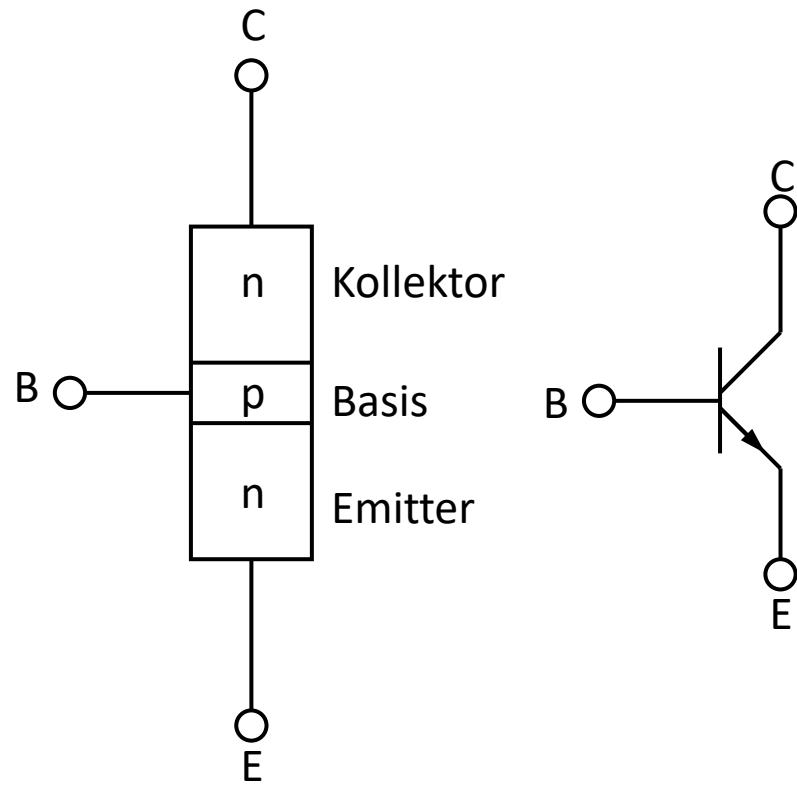
Quelle: www.reichelt.de, September 2020



© Wikimedia Commons

Aufbau eines Bipolaren Transistors

- Zunächst betrachten wir sogenannte **Bipolare Transistoren**.
- Diese bestehen aus drei Schichten mit unterschiedlicher Dotierung:
 - npn (im Bild zu sehen)
 - pnp
- Die Halbleiterschichten verfügen über metallische Anschlüsse
 - Kollektor
 - Basis
 - Emitter



© W. Schiffman, R. Schmitz

Die Emitterschaltung - NPN

U_{CB} = Kollektor – Basis – Spannung

U_{BE} = Basis – Emitter – Spannung

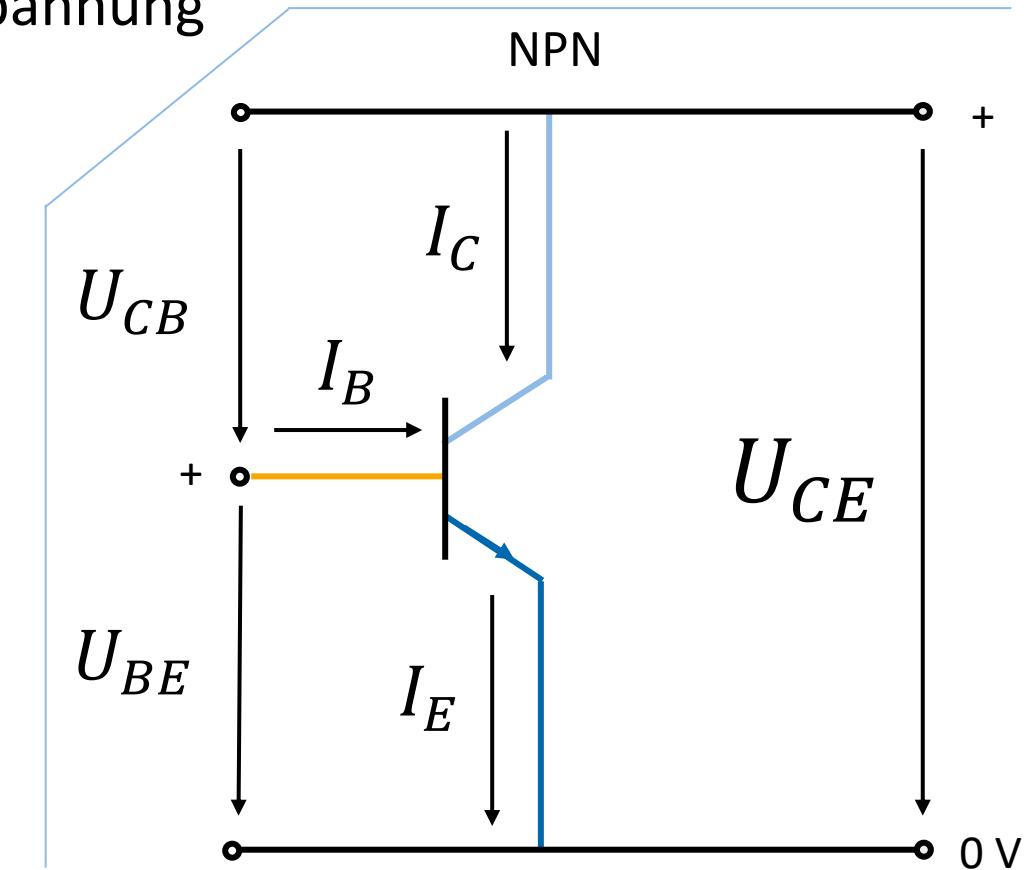
U_{CE} = Kollektor – Emitter – Spannung

I_C = Kollektorstrom

I_B = Basisstrom

I_E = Emitterstrom

$$B_N = \frac{I_C}{I_B} \quad \text{Stromverstärkung}$$



Die Emitterschaltung - PNP

U_{CB} = Kollektor – Basis – Spannung

U_{BE} = Basis – Emitter – Spannung

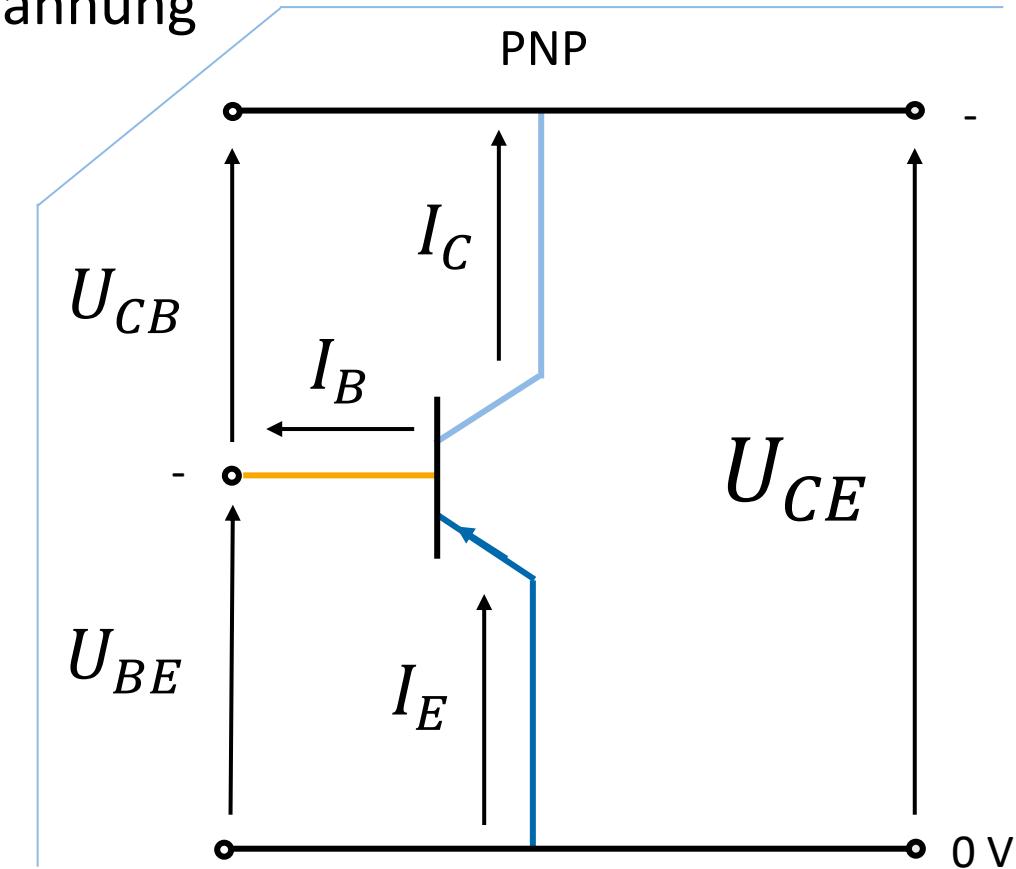
U_{CE} = Kollektor – Emitter – Spannung

I_C = Kollektorstrom

I_B = Basisstrom

I_E = Emitterstrom

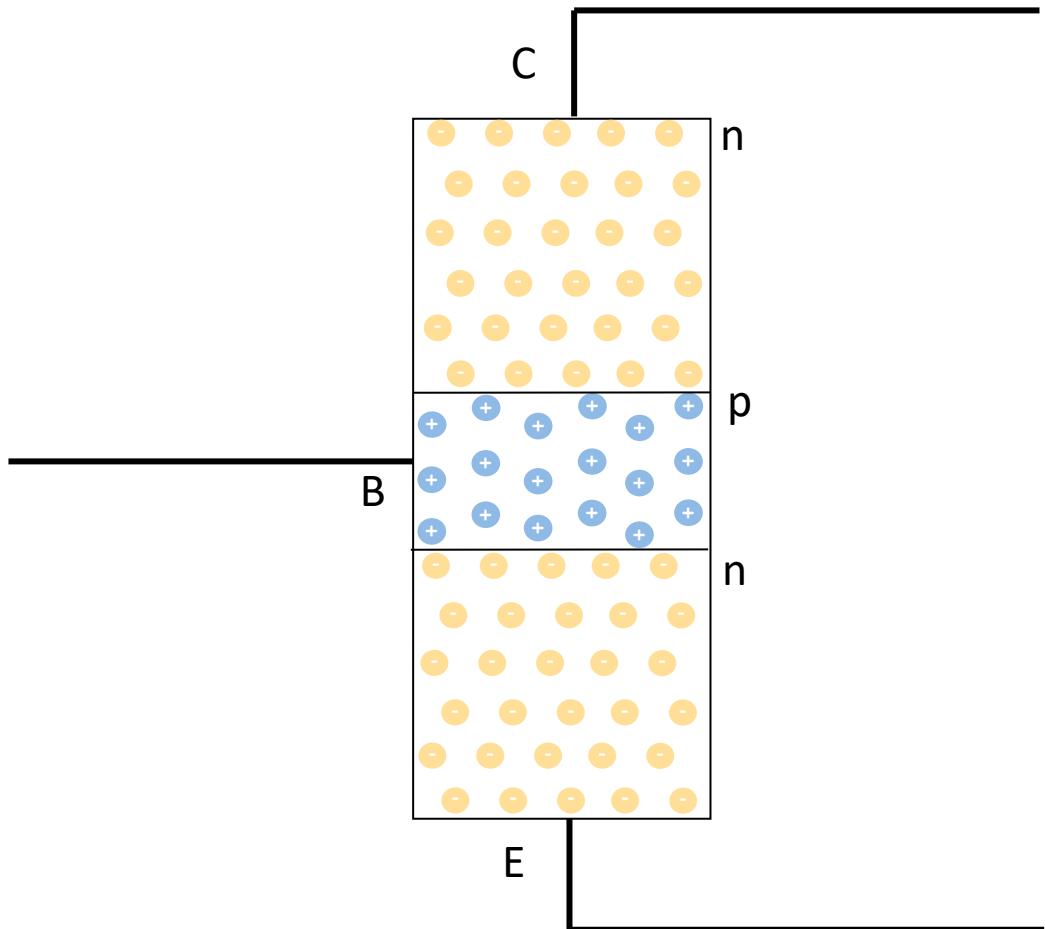
$$B_N = \frac{I_C}{I_B} \quad \text{Stromverstärkung}$$



Funktionsprinzip eines Transistors

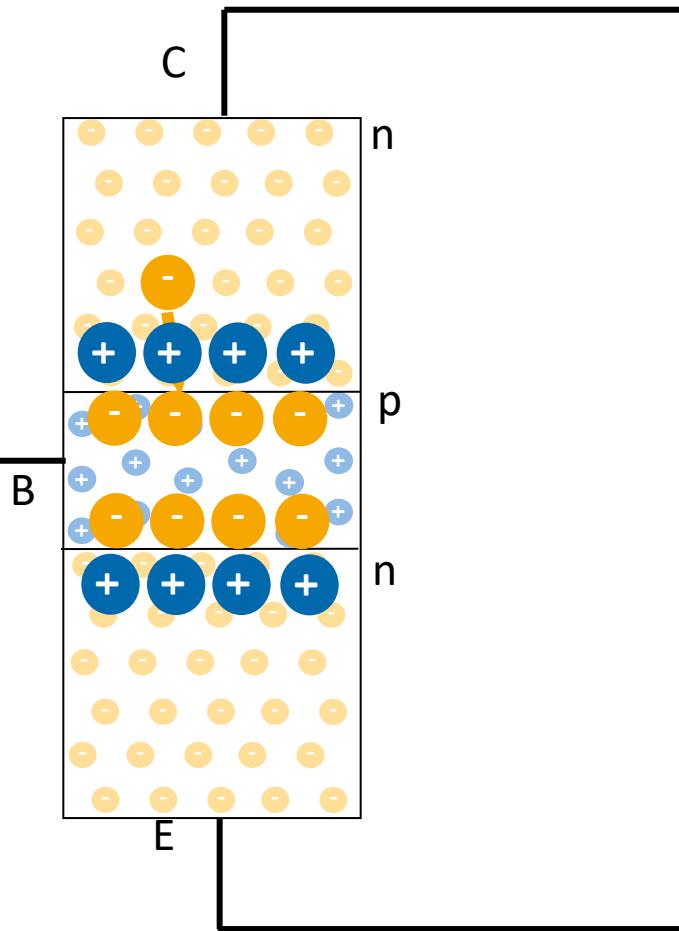
Freie Ladungsträger:

- Bewegliche Elektronen
- Bewegliche Löcher



Funktionsprinzip eines Transistors

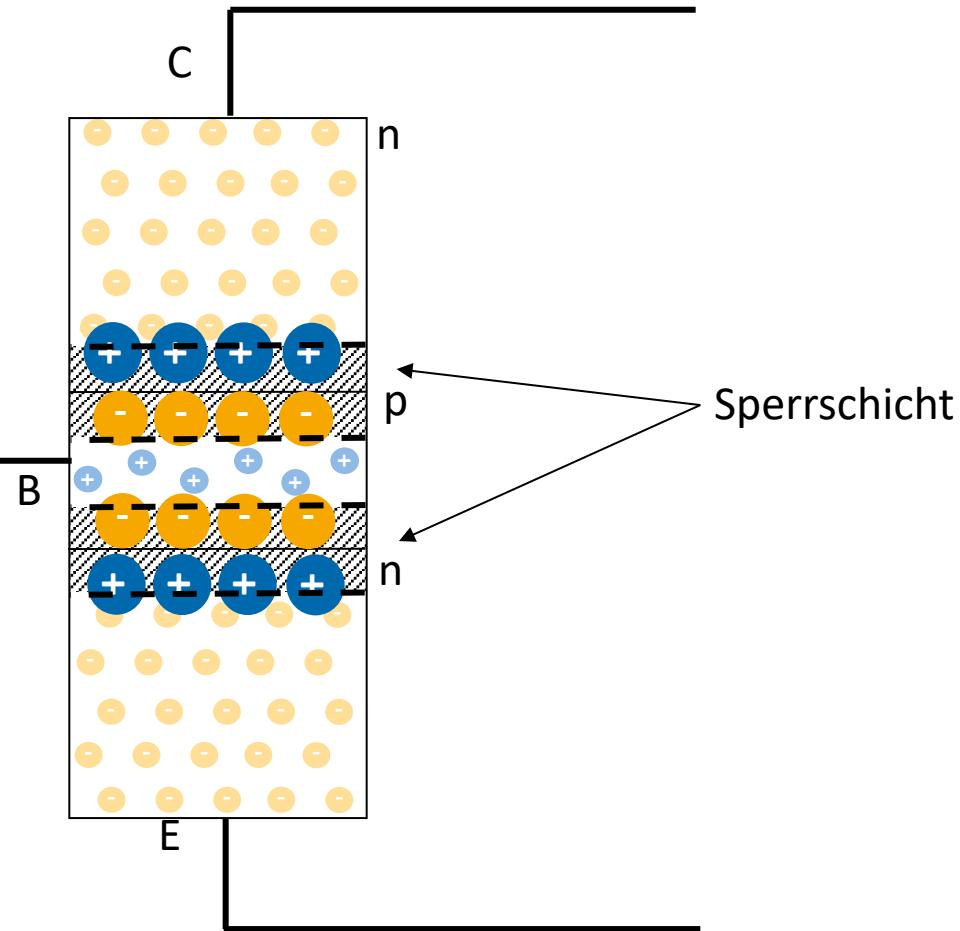
+ Positive Ladung



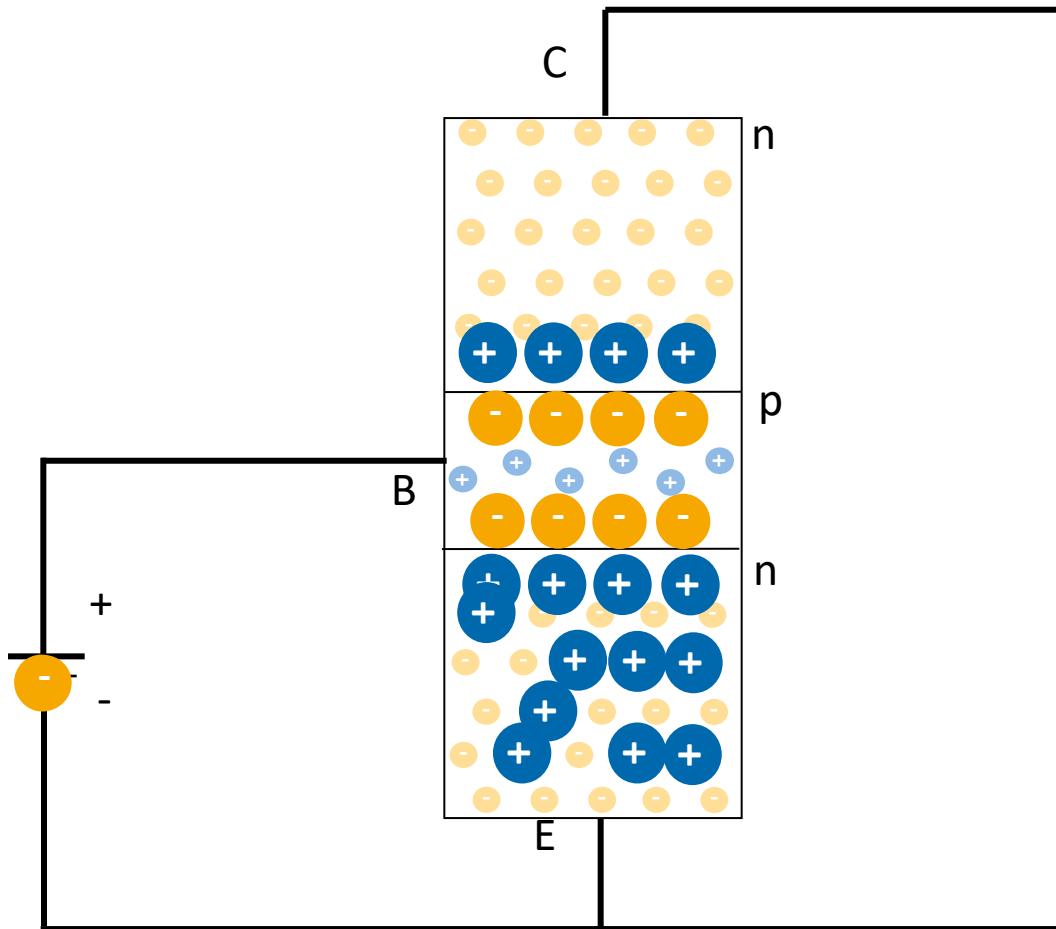
- Negative
Ladung

Funktionsprinzip eines Transistors

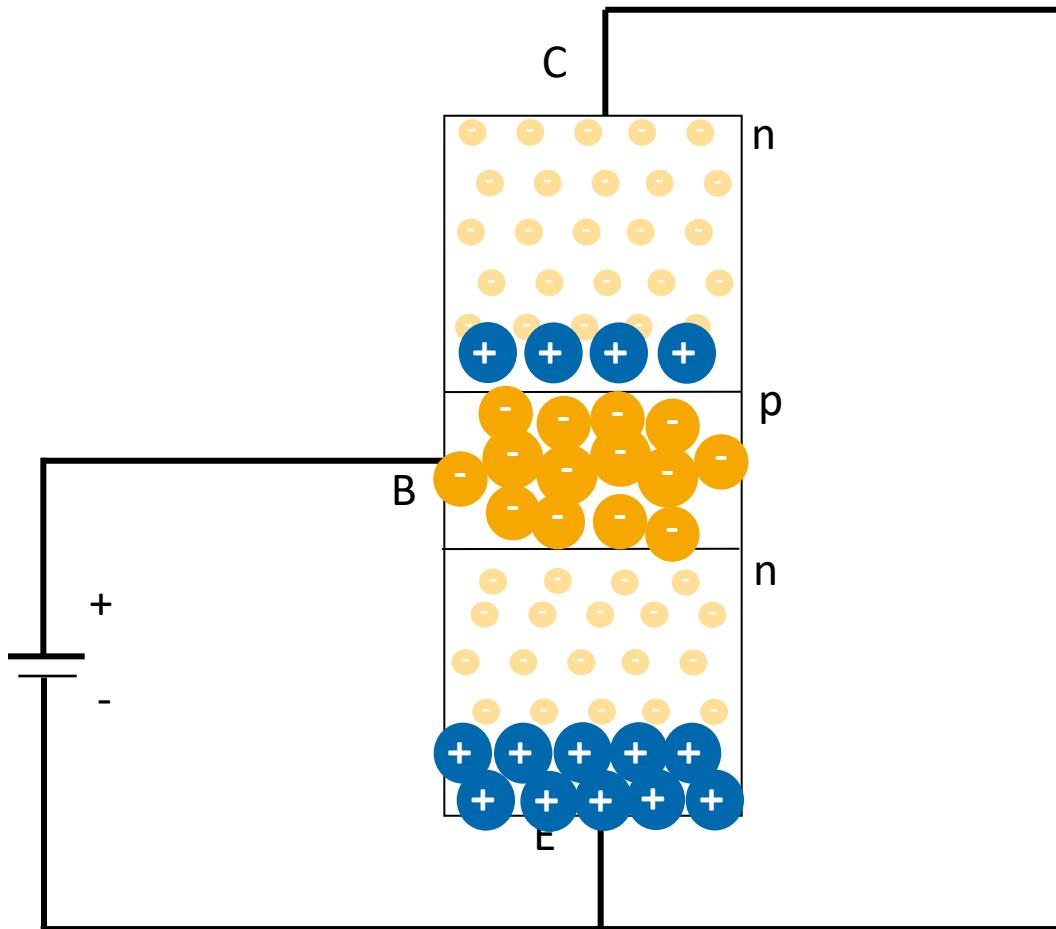
- + Positive Ladung
- Bew. Elektronen
- + Bew. Löcher
- Negative Ladung



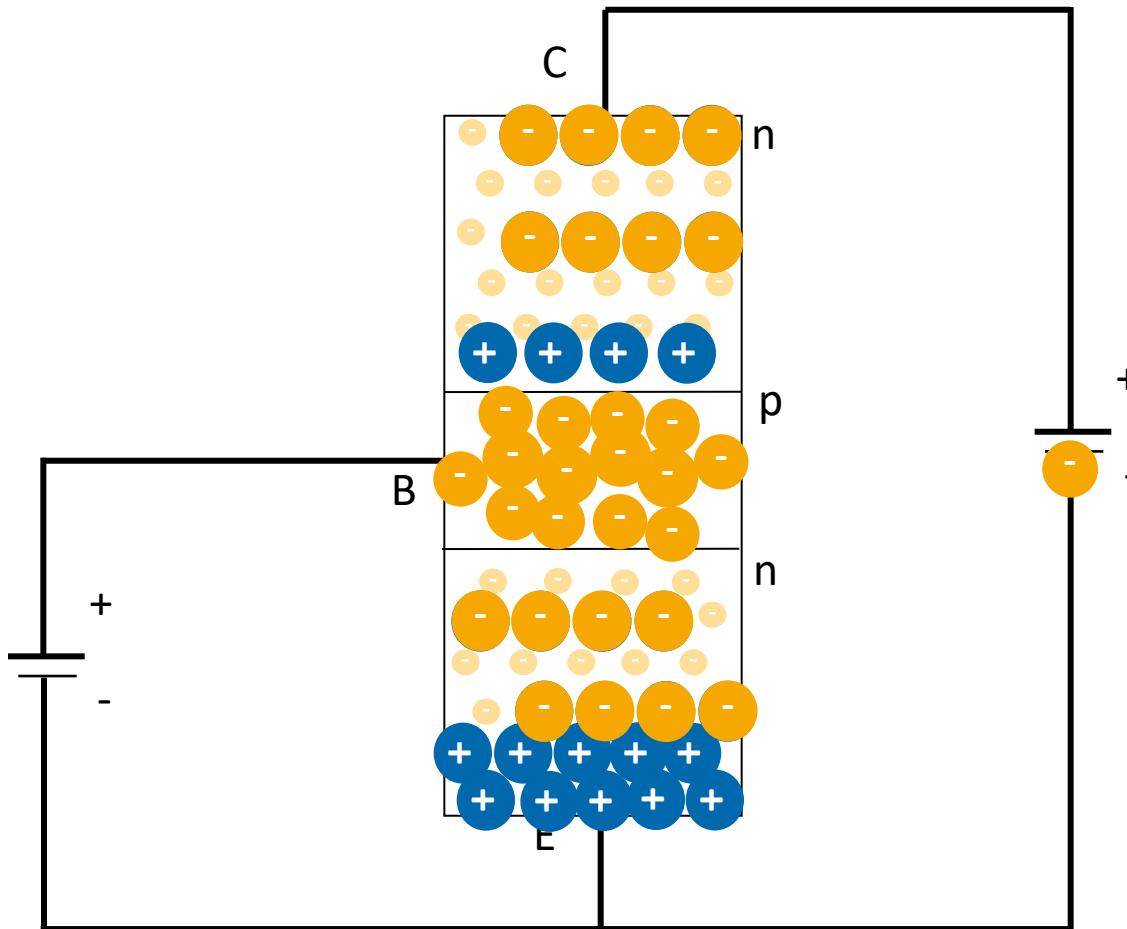
Funktionsprinzip eines Transistors



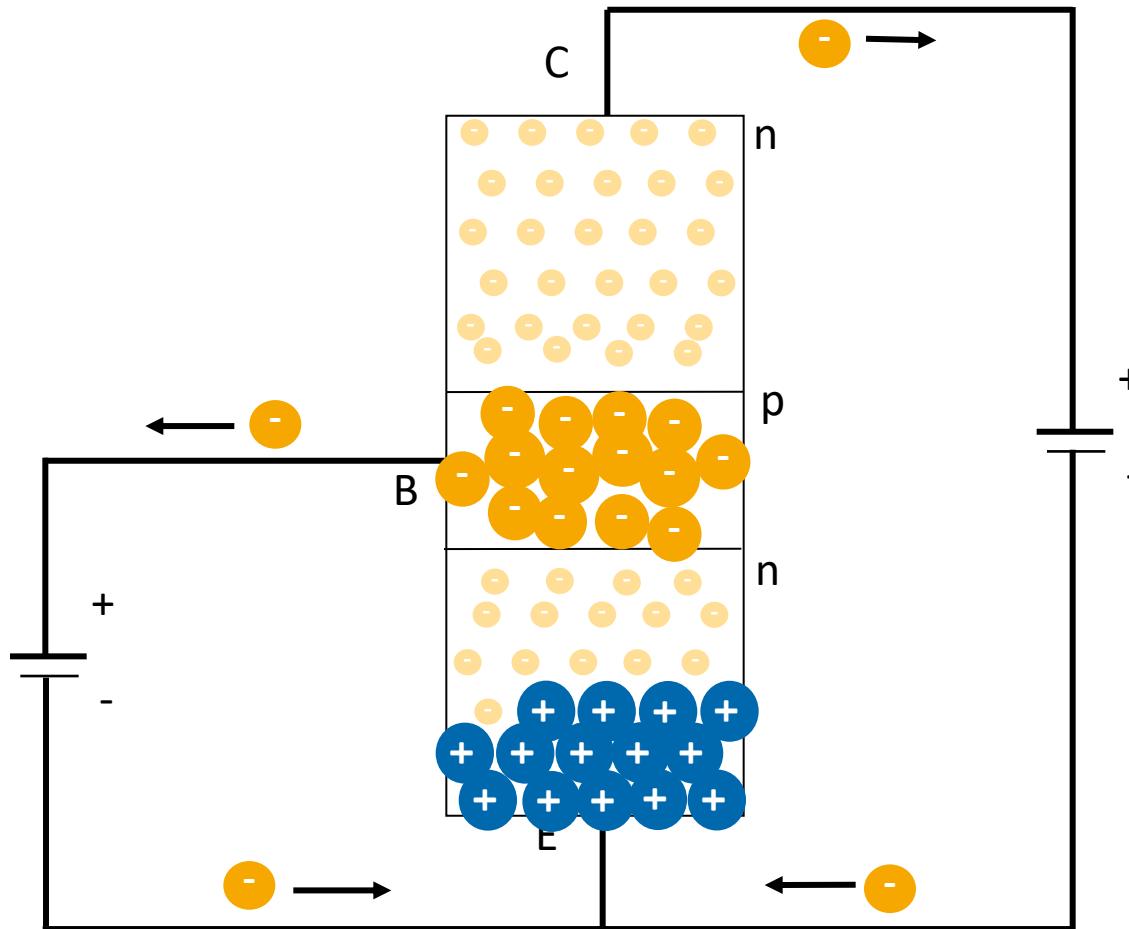
Funktionsprinzip eines Transistors



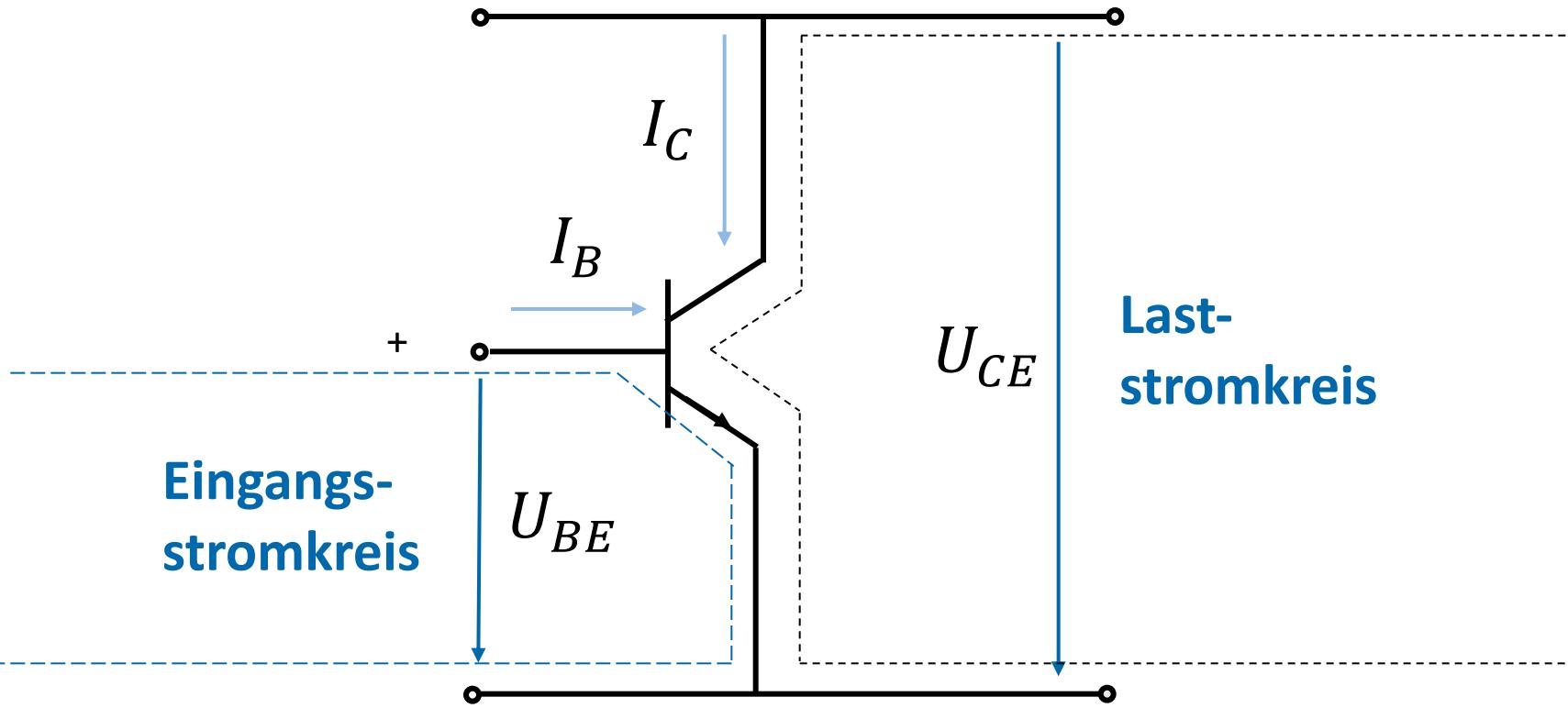
Funktionsprinzip eines Transistors



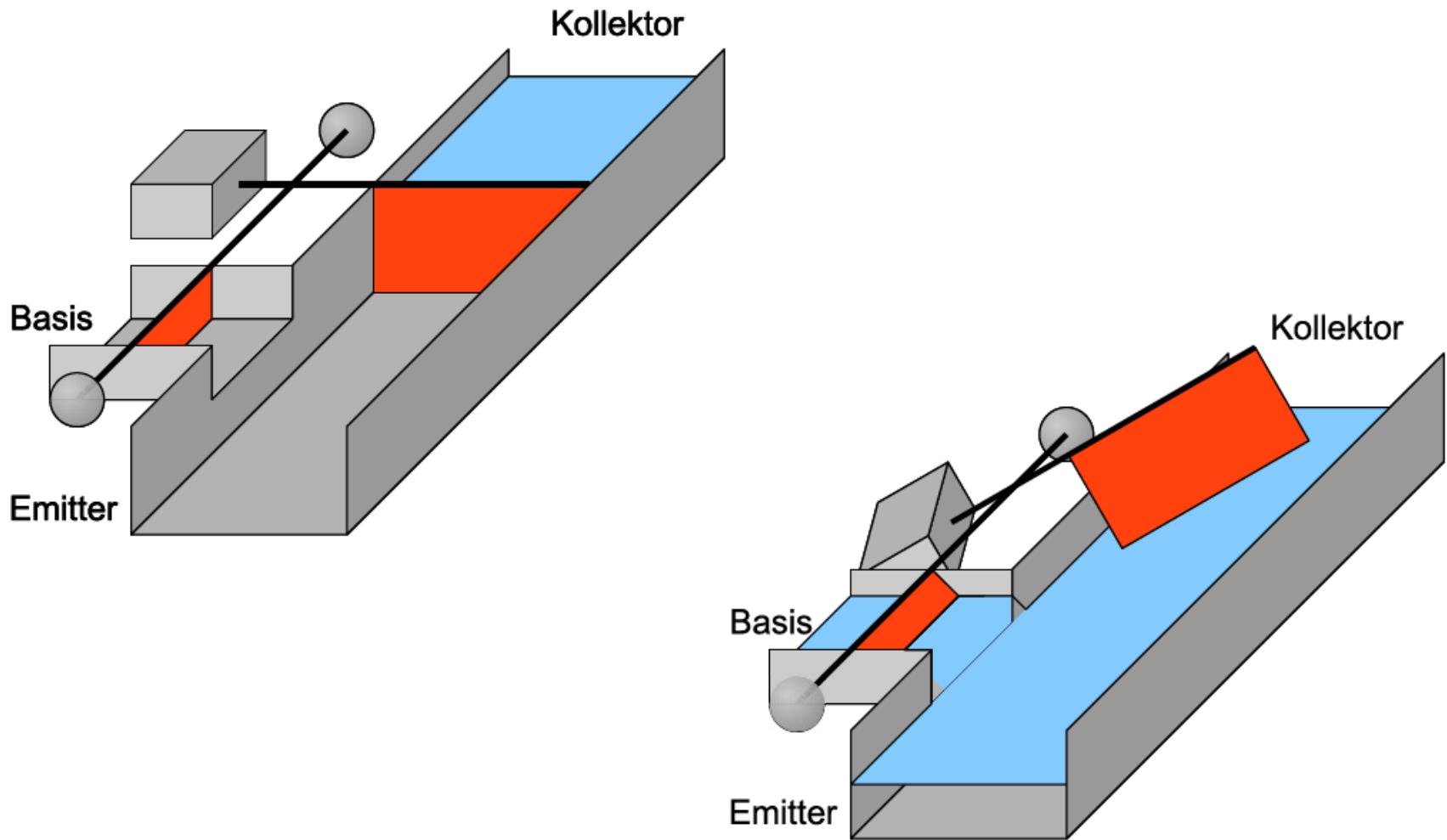
Funktionsprinzip eines Transistors



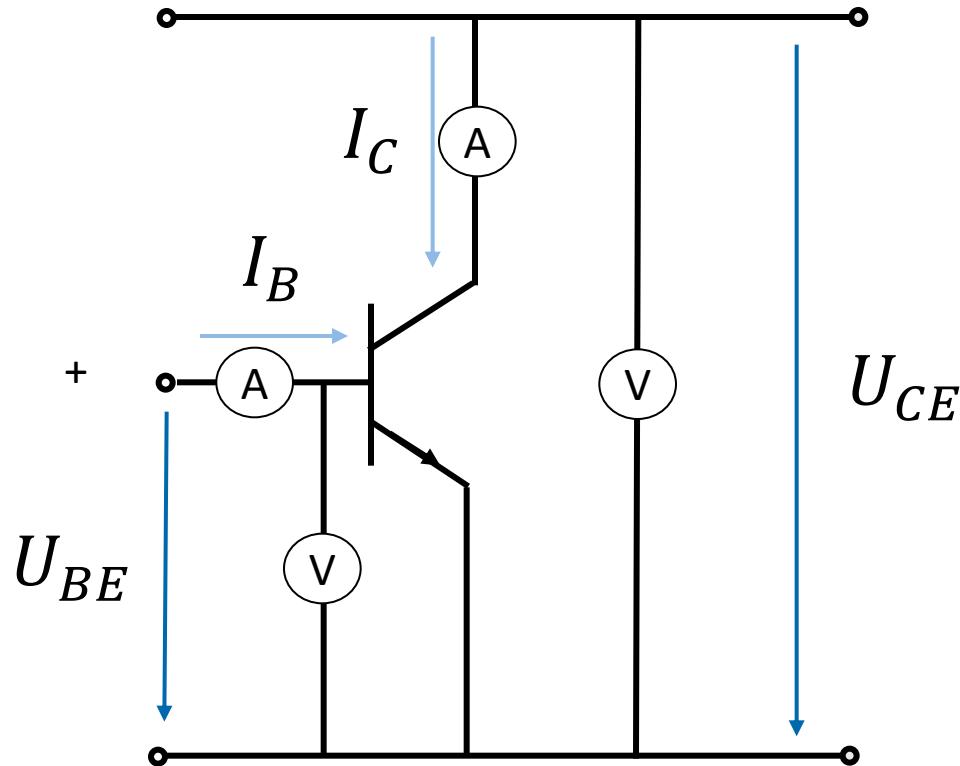
Verstärkungsprinzip eines npn-Transistors in Emitterschaltung



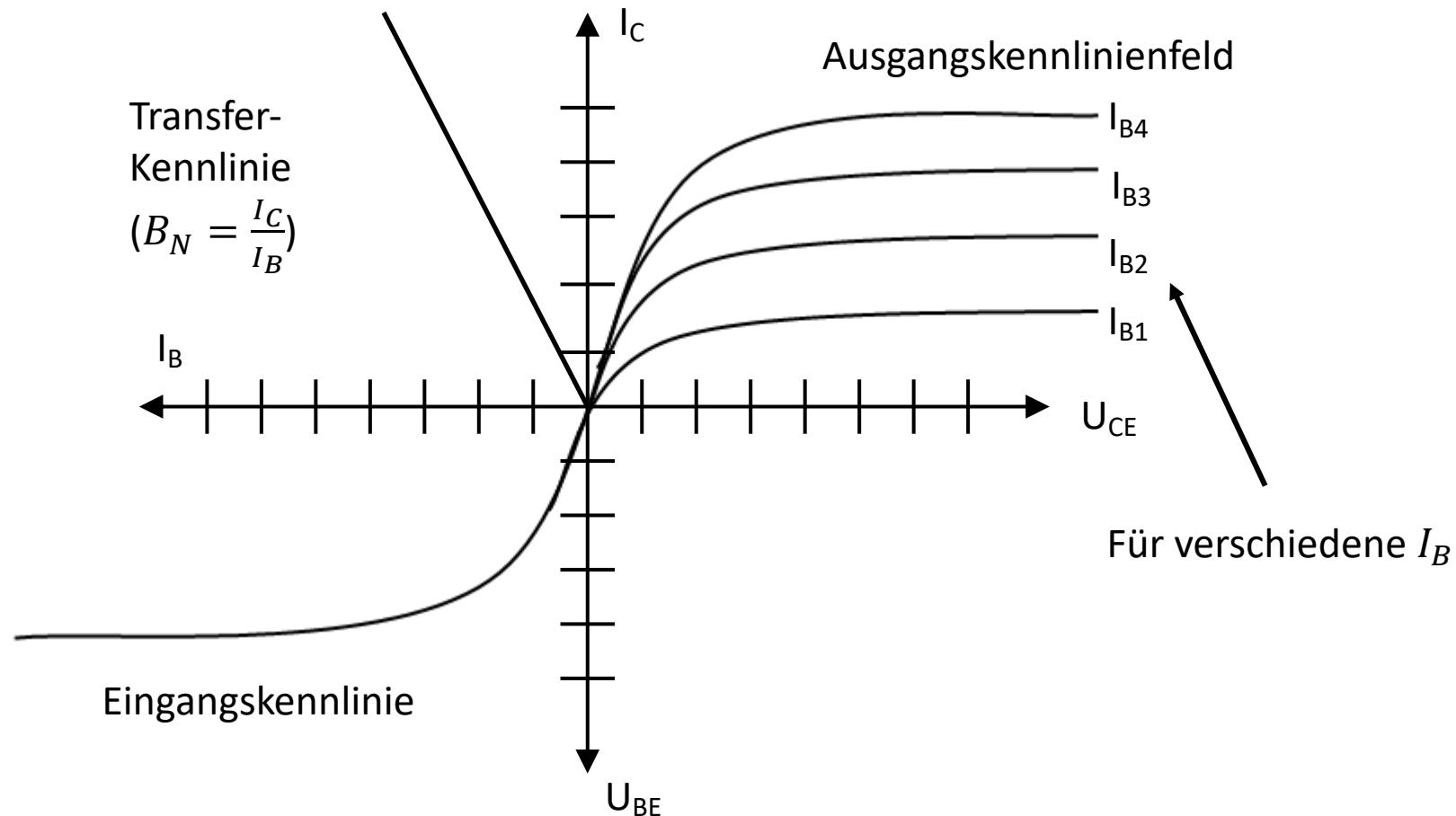
Analogie Wasserkanal



Schaltung zur Aufnahme der Kennlinien

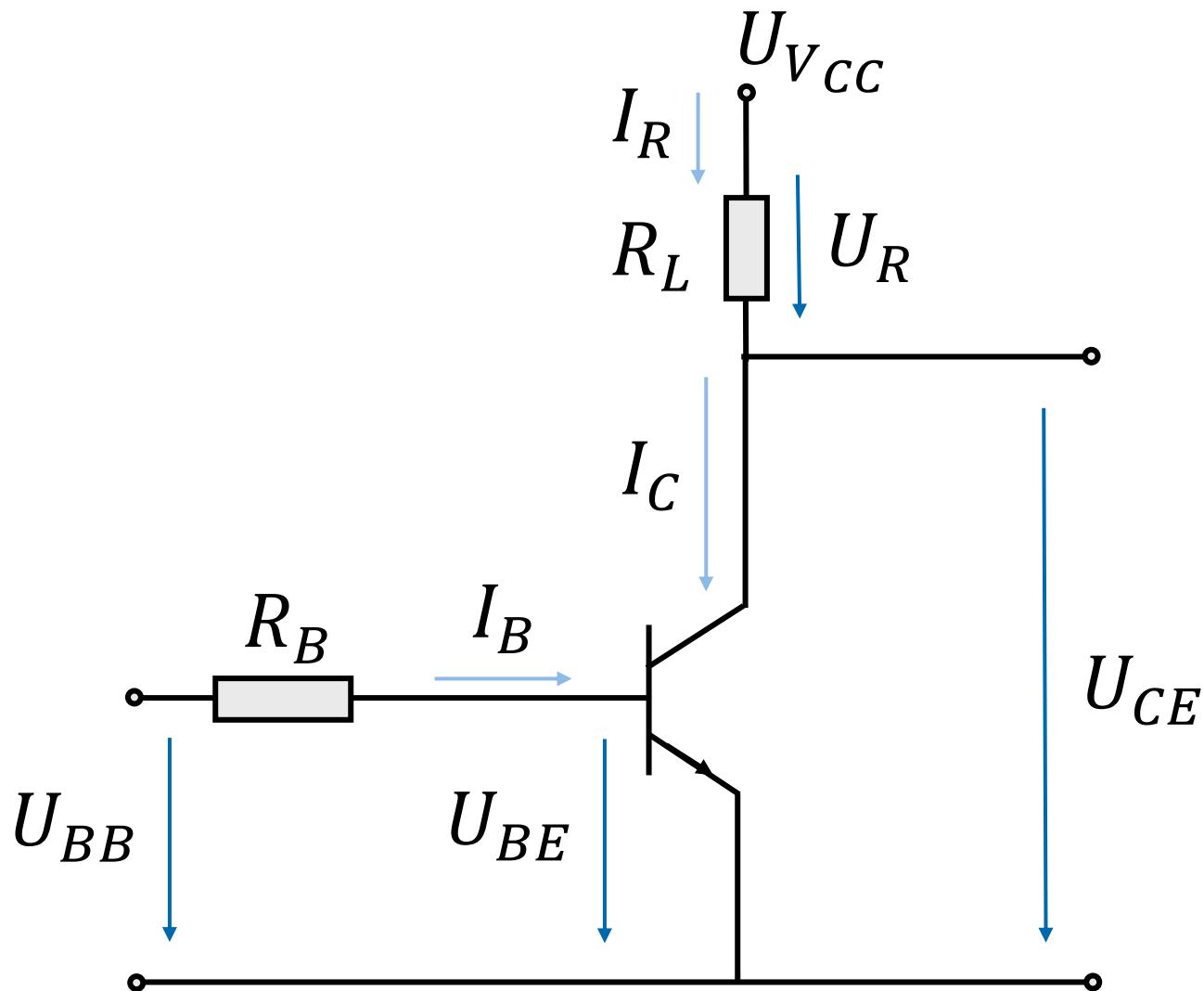


Kennlinienfelder



© W. Schiffman, R. Schmitz

Verstärkerschaltung



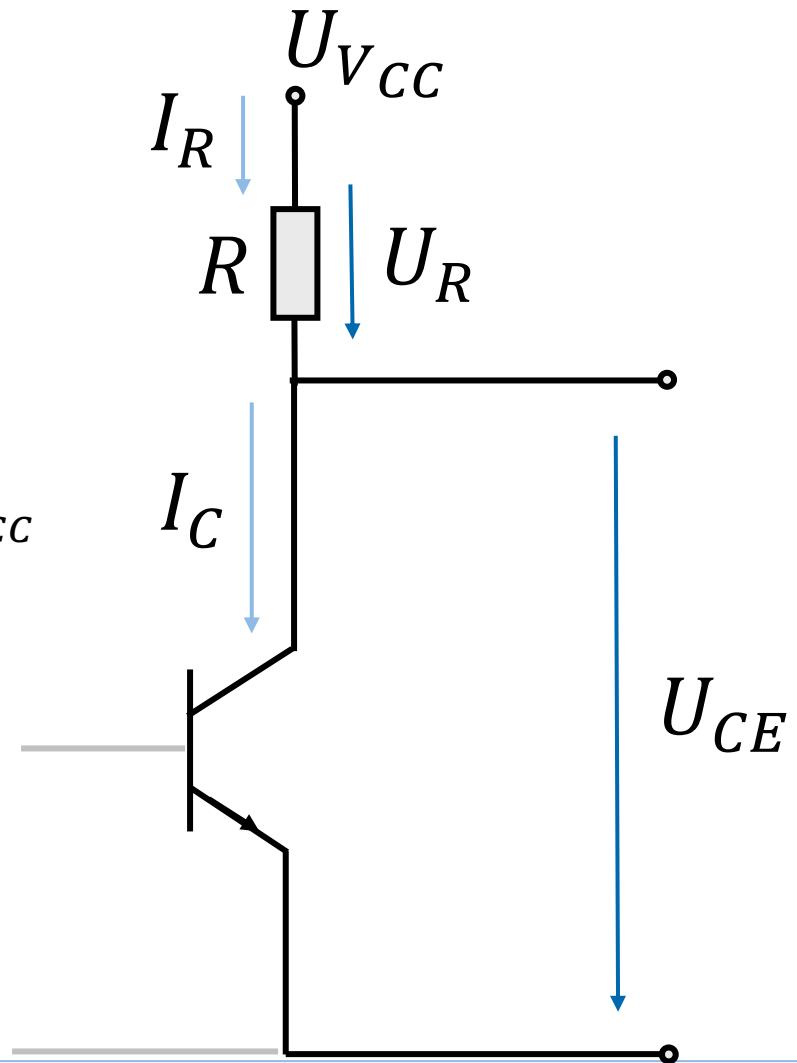
Bestimmung der Lastwiderstandsgeraden

Mit der Maschen- und Knotenregel gilt für den Kollektorstrom:

$$I_C = I_R = \frac{U_R}{R} \quad \text{mit} \quad U_{CE} + U_R = U_{VCC}$$

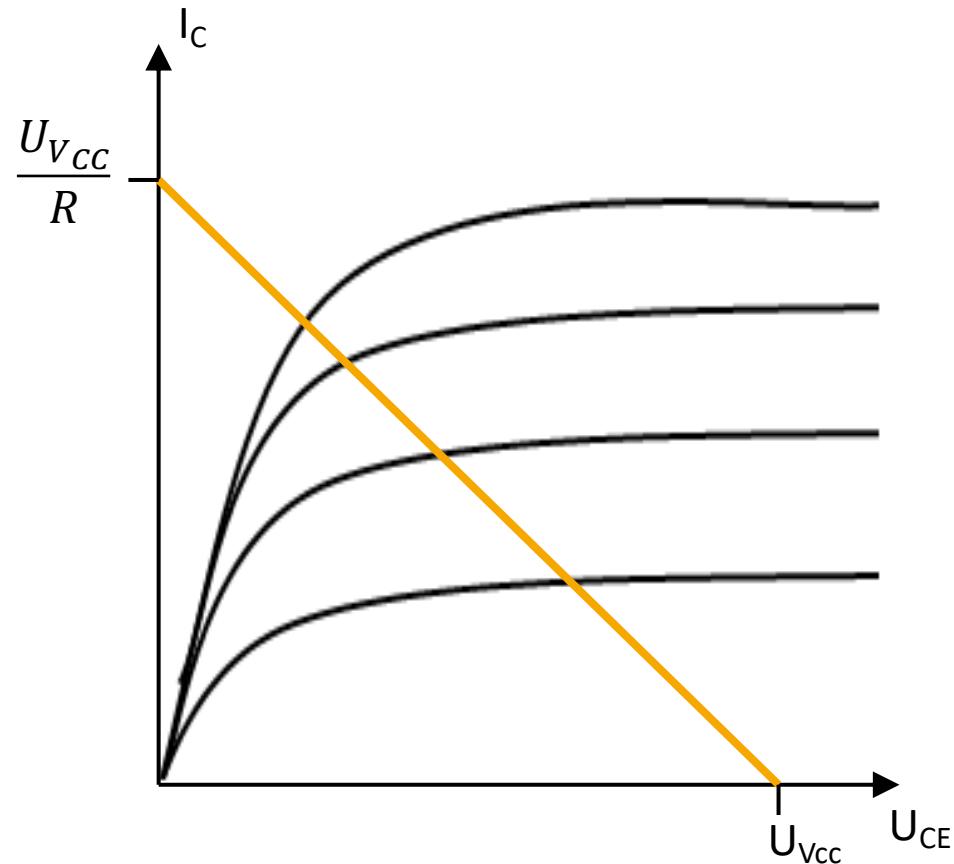
$$I_C = \frac{U_{VCC} - U_{CE}}{R}$$

$$I_C = -\frac{1}{R} \cdot U_{CE} + \frac{U_{VCC}}{R}$$



Lastwiderstandsgeraden-Gleichung

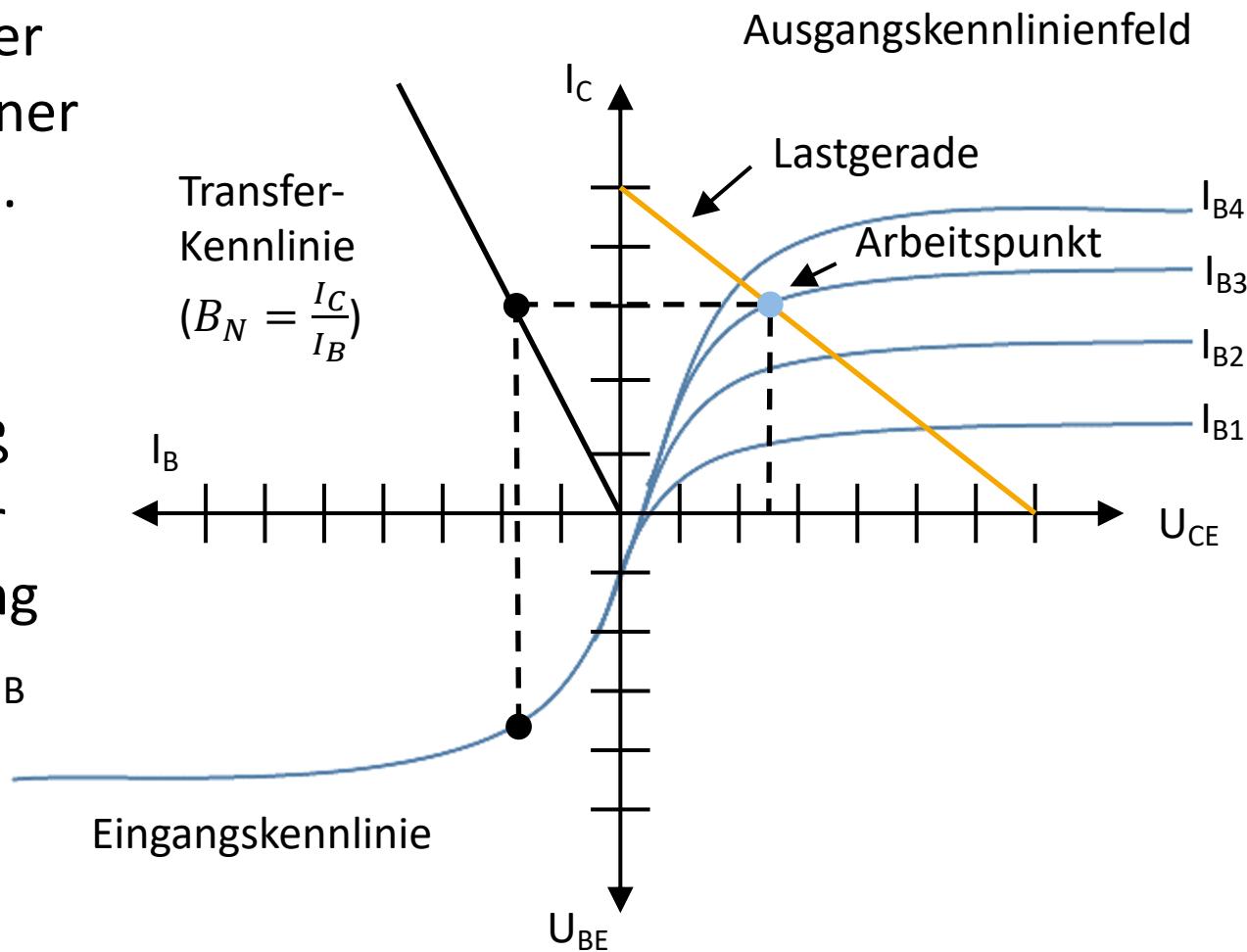
$$I_C = -\frac{1}{R} \cdot U_{CE} + \frac{U_{VCC}}{R}$$



© W. Schiffman, R. Schmitz

Bestimmung des Arbeitspunktes

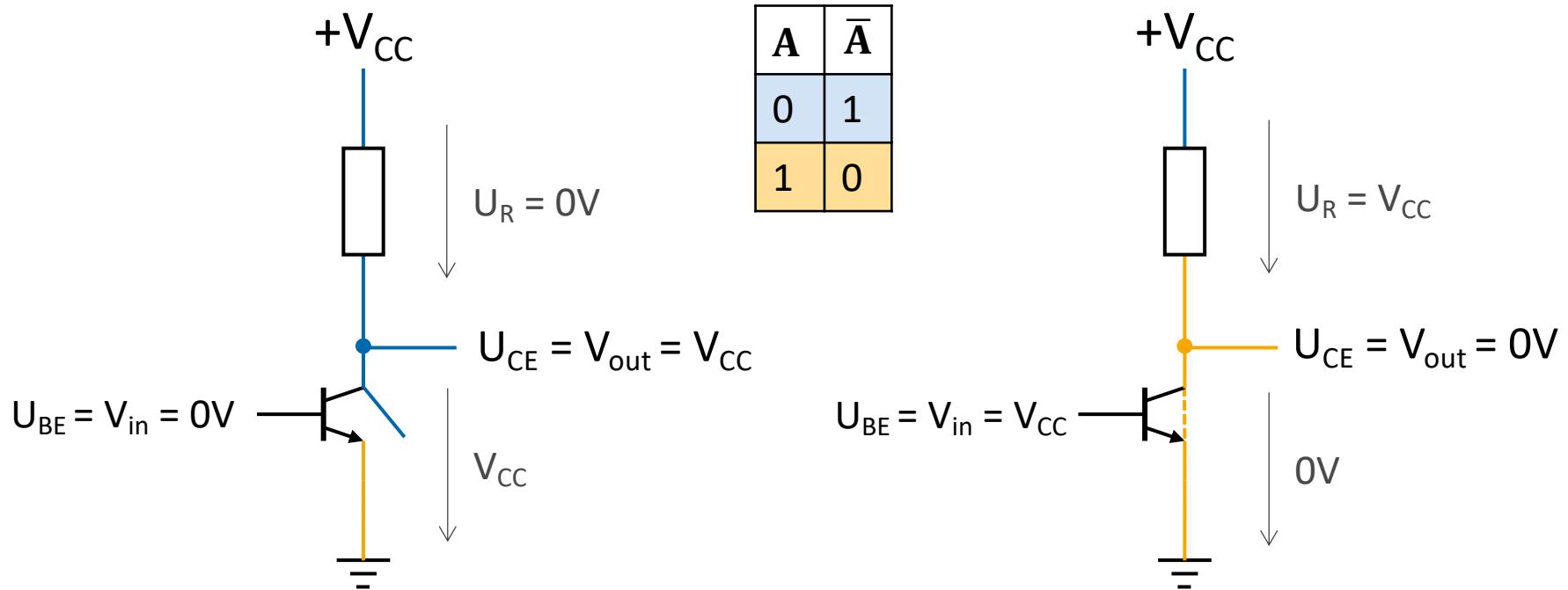
- Der **Arbeitspunkt** ist der Schnittpunkt der **Lastgeraden** mit einer **Ausgangskennlinie**.
- Er gibt an, wie groß I_C und U_{CE} in einer konkreten Schaltung für ein gegebenes I_B sind.



© W. Schiffman, R. Schmitz

Realisierung Boolescher Funktionen auf Transistorebene

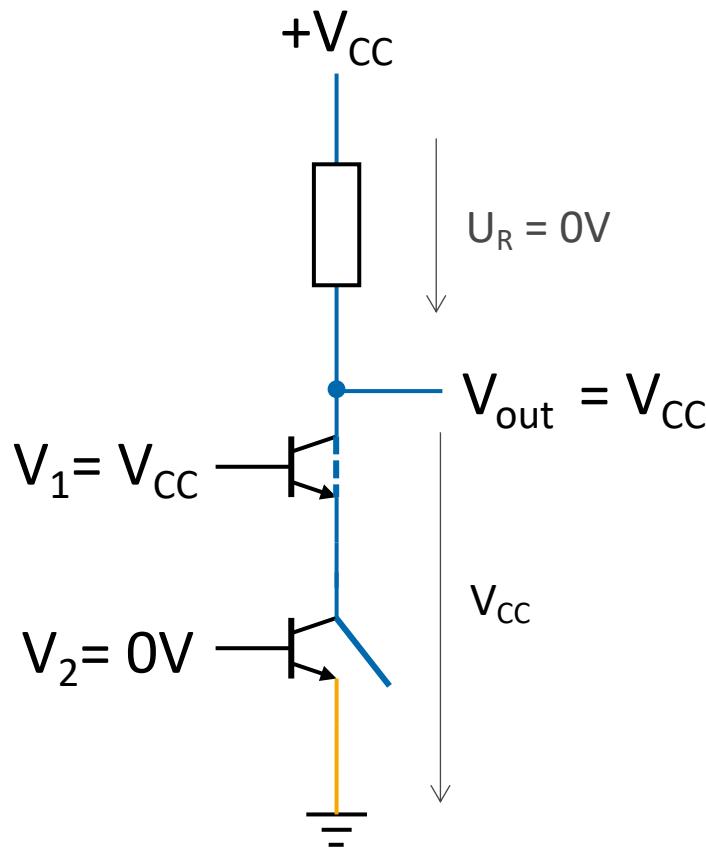
Transistor-Inverter (NOT)



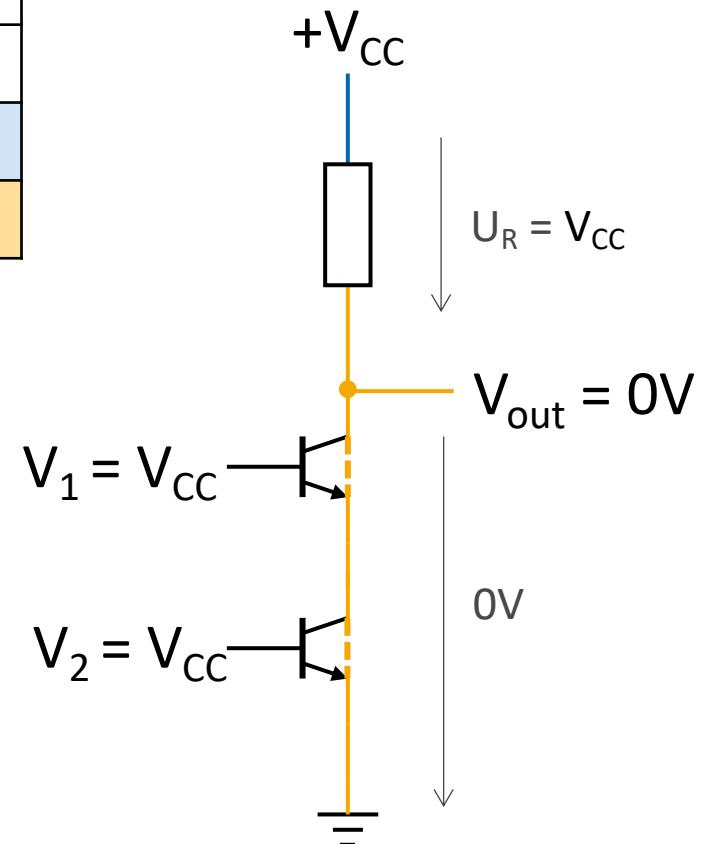
© G. Lakemeyer, W. Oberschelp, G. Vossen

Realisierung Boolescher Funktionen auf Transistorebene

NAND



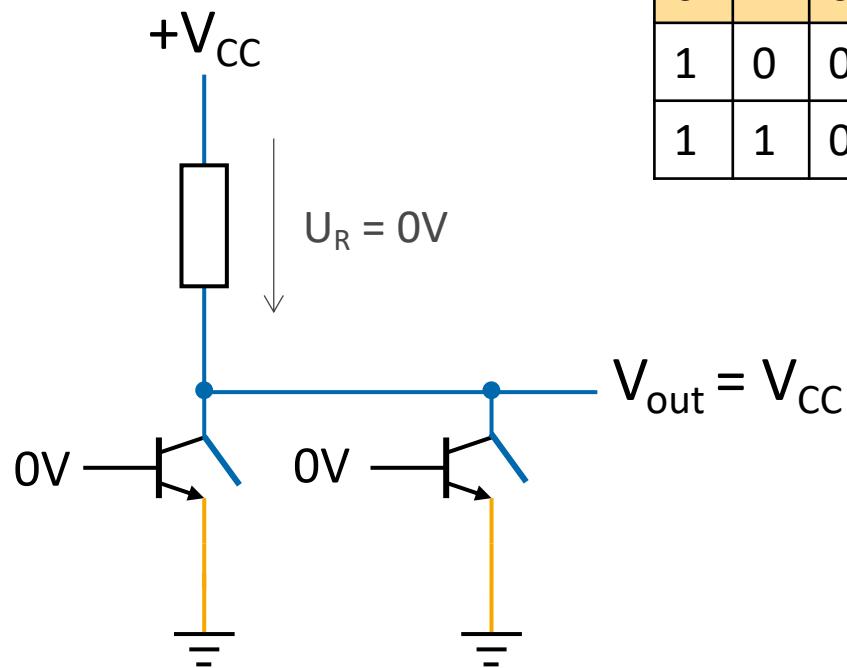
A	B	$\overline{A \wedge B}$
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



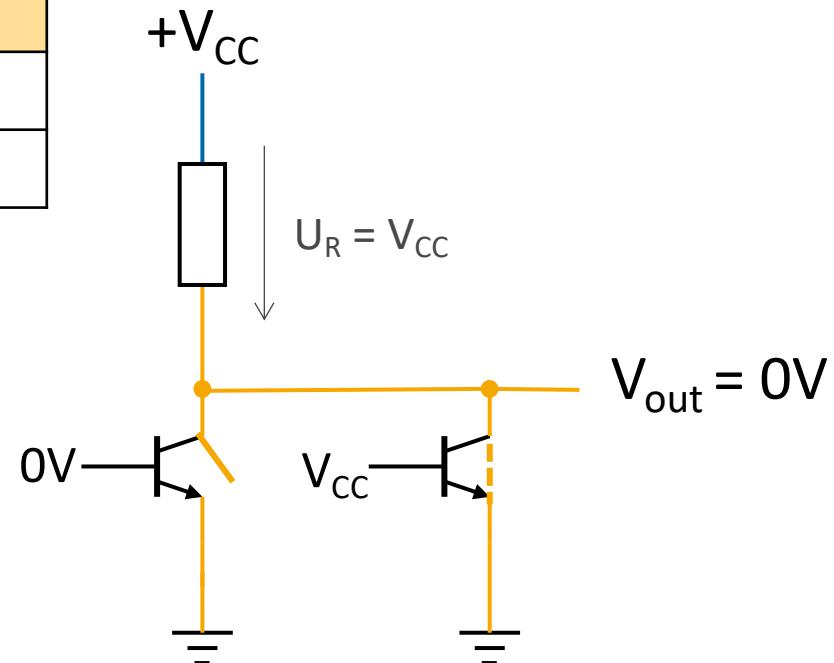
© G. Lakemeyer, W. Oberschelp, G. Vossen

Realisierung Boolescher Funktionen auf Transistorebene

NOR



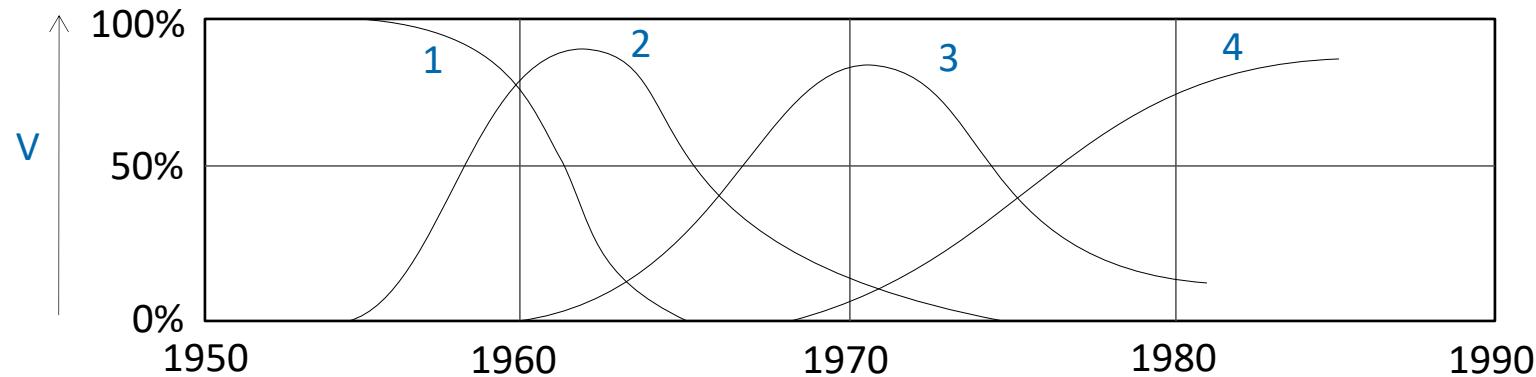
A	B	$\overline{A \vee B}$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0



© G. Lakemeyer, W. Oberschelp, G. Vossen

Feldeffekttransistoren

- Wechsel der Bauelementtechnologien



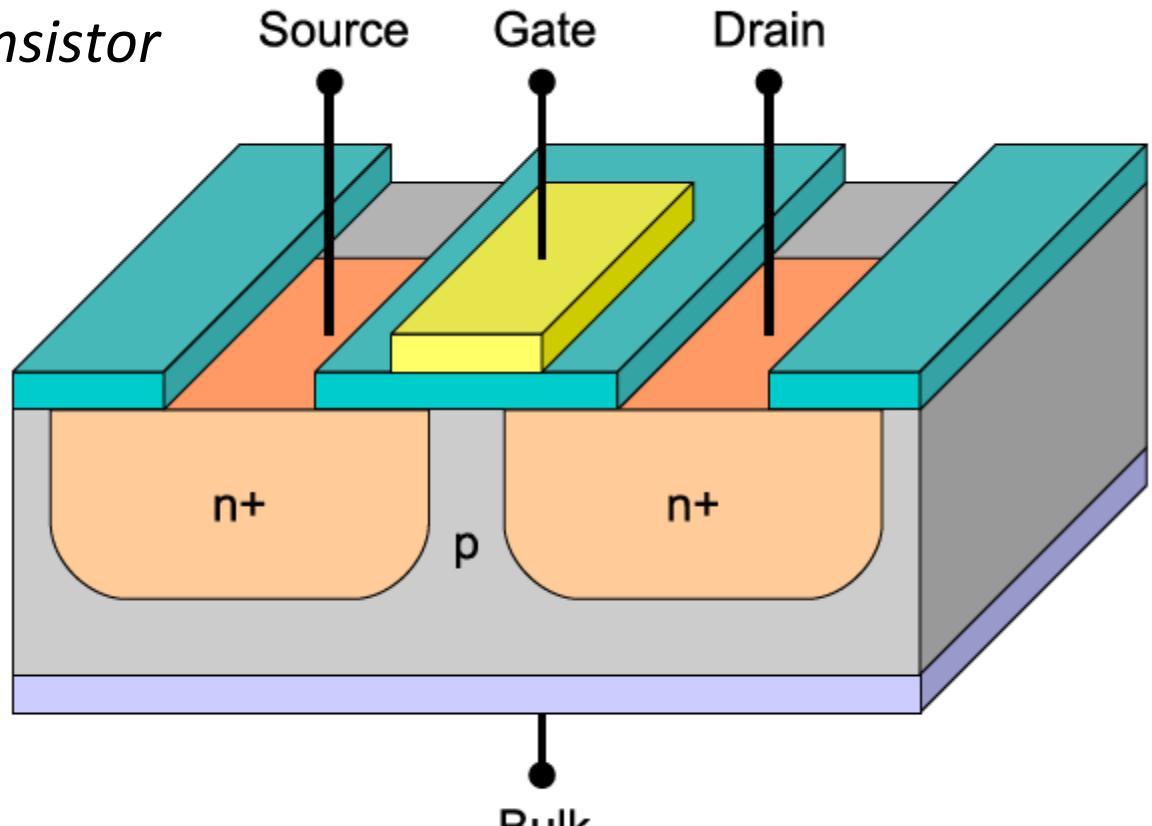
- 1 Röhrenschaltungen
- 2 Schaltungen mit diskreten Transistoren
- 3 Integrierte bipolare Schaltungen
- 4 Integrierte MOS-Schaltungen
- V Anteil der Funktionseinheiten an den gesamten Gerätefunktionen

Feldeffekttransistoren

- MOS = Metal-Oxide-Semiconductor
- (\approx Metall-Oxid-Halbleiterbauteil)
- Vorteile gegenüber bipolaren Schaltungen:
 - Höhere Integrationsfähigkeit
 - Geringere Verlustleistung
 - Einfachere Herstellung
 - Geringere Abmessungen, geringes Gewicht
 - Niedriger Energieverbrauch
 - Höhere Zuverlässigkeit
 - Verringerte Gesamtkosten

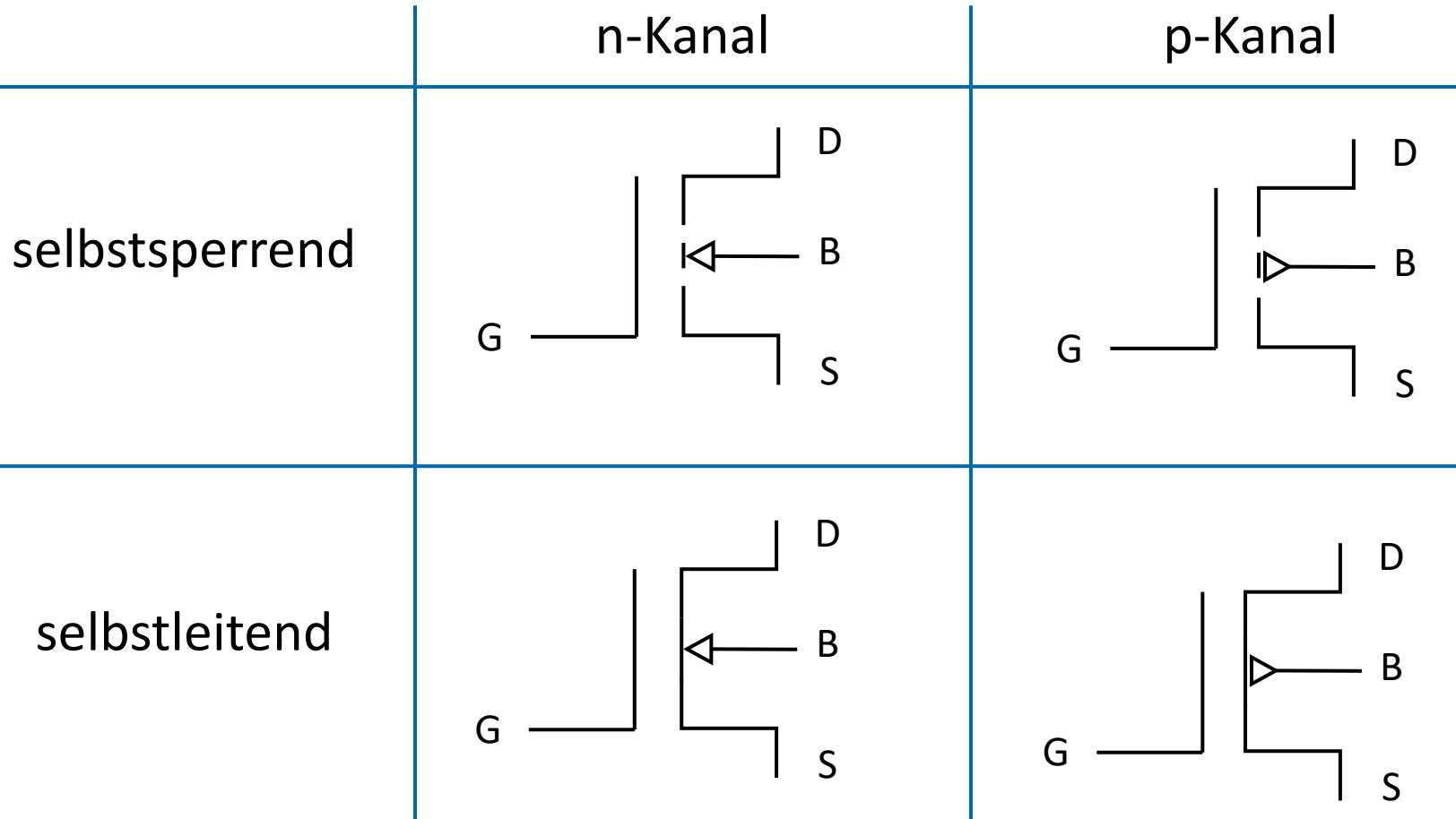
Feldeffekttransistoren

- Beispiel: *n-Kanal Transistor*



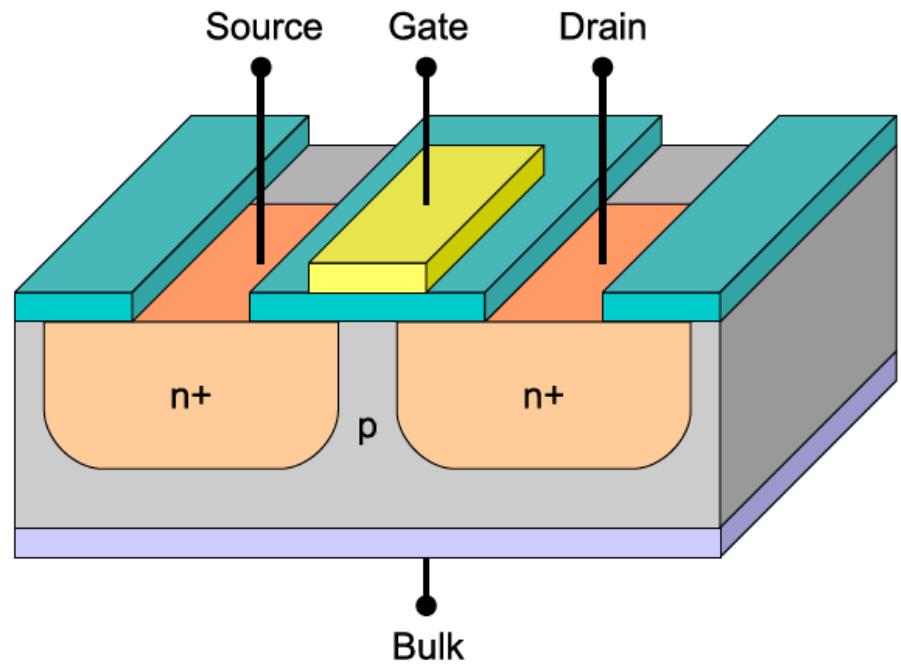
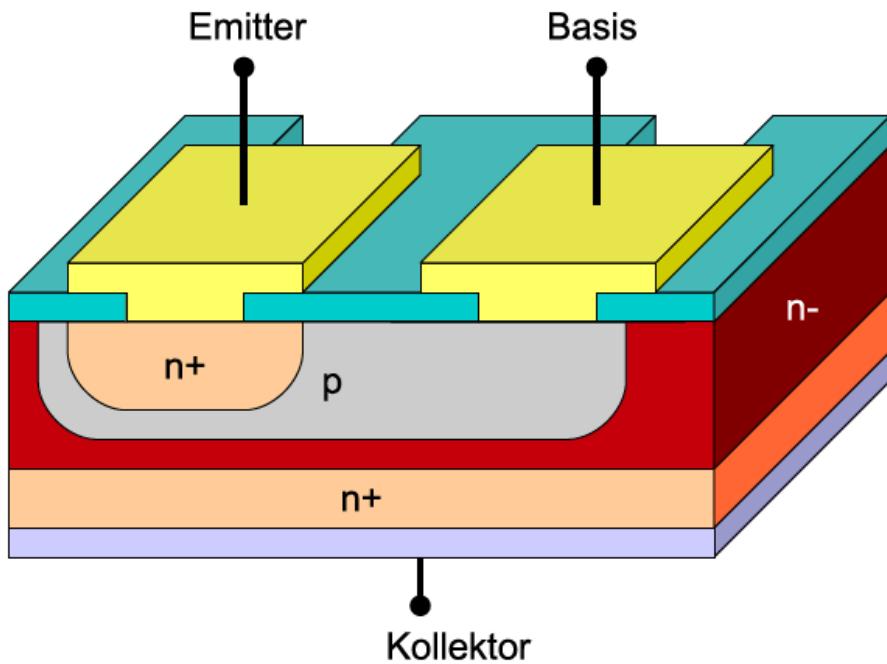
- selbstsperrender Feldeffekttransistor
- selbstleitender Feldeffekttransistor

Schaltzeichen MOSFET



Vergleich Bi- und Unipolar

- Bipolarer Transistor
- Isolierschicht-Feldeffekt-Transistor (unipolarer Transistor)



Transistor: Vergleich Bipolar vs. MOSFET (Unipolar)

Bipolartransistor

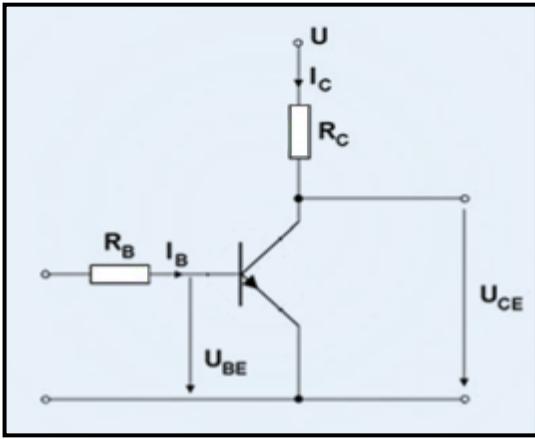
- Strom steuert Strom
- Schaltzeit klein
- Hohe Verlustleistung
- Geringe Herstellungskosten

Unipolartransistor

- Spannung steuert Strom
 - Schaltvorgang nahezu leistungslos
- Langsamer als Bipolartransistor
- Hoch Integrierbar

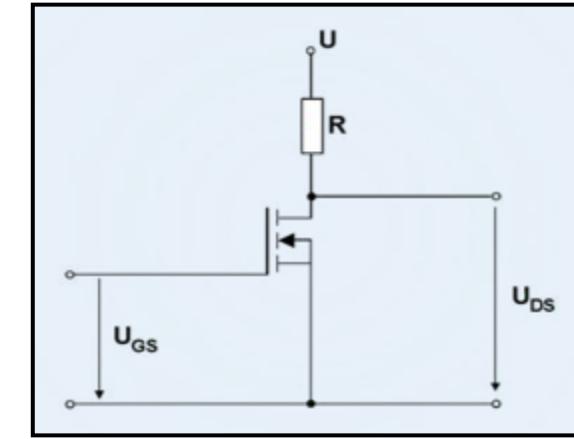
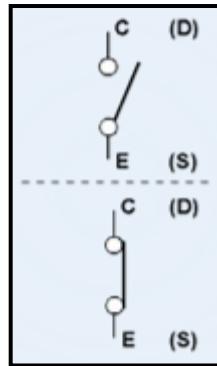
Der Transistor als Schalter

Funktionsprinzip



$I_B = 0 \Rightarrow$ Kollektor-Emitter-Strecke ist gesperrt
 $U_{CE} = U$

$I_B > 0 \Rightarrow$ Kollektor-Emitter-Strecke ist geöffnet
 $U_{CE} = 0$



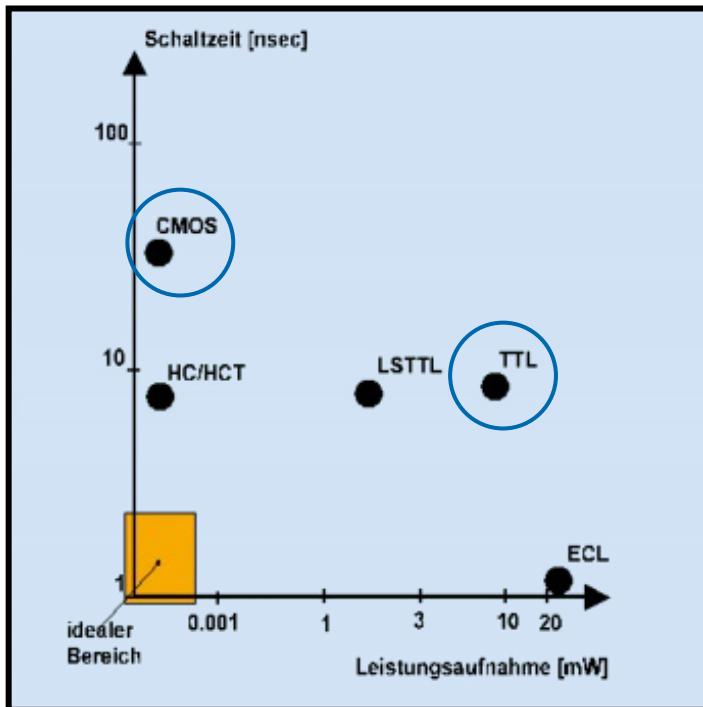
$U_{GS} < U_{Thr} \Rightarrow$ Drain-Source-Strecke ist gesperrt
 $U_{DS} = U$

$U_{GS} > U_{Thr} \Rightarrow$ Drain-Source-Strecke ist geöffnet
 $U_{DS} = 0$

U_{Thr} : Schwellenspannung, typischer Kennwert eines FET

Vergleich verschiedener Logikfamilien

Schaltgeschwindigkeit - Leistungsaufnahme



	CMOS	TTL
Spannung	3 - 15V	4.75 - 5.25V
Schaltzeit	35ns	10ns
Leistungs-aufnahme	10nW	10mW

- CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor
- TTL: Transistor–Transistor Logic