

# Angewandte Elektronik

## Bachelorstudiengänge Maschinenbau, Fahrzeugtechnik, Wirtschaftsingenieurwesen Automobilindustrie



**Tilman Küpper**

**E-Mail**

[tilman.kuepper@hm.edu](mailto:tilman.kuepper@hm.edu)

**Internet**

<https://kuepper.userweb.mwn.de/>

**Foliensammlung und alte Klausuren**

Im Internet und als Skript (Fachschaft)

### Aufbau der Lehrveranstaltung



- 1. Einleitung**
- 2. Grundlagen der Halbleiterphysik**  
Bindungs- und Bändermodell, Stromfluss in Halbleitern
- 3. Homogene Halbleiterbauelemente**  
Heiß- und Kaltleiter, Fotowiderstand, Hall-Sensor
- 4. Dioden**  
Gleichrichterdiode, Fotodiode, Leuchtdiode, Zenerdiode
- 5. Anwendungen von Dioden in Stromversorgungseinheiten**  
Gleichrichter für Ein- und Dreiphasenwechselstrom, Spannungsstabilisierung
- 6. Bipolare Transistoren**  
NPN- und PNP-Transistor, Transistor als Verstärker und Schalter
- 7. Unipolare Transistoren, MOSFETs**  
Aufbau und Funktion von MOSFETs, Anwendungen
- 8. Digitaltechnik, nur für (Fahrzeug-)Mechatroniker prüfungsrelevant**  
Logikbausteine, Aufbau und Funktion von Mikroprozessoren
- 9. Leistungselektronik, nur für (Fahrzeug-)Mechatroniker prüfungsrelevant**  
Abwärts- und Aufwärtswandler
- 10. Operationsverstärker**  
Grundsaltungen, Anwendungen

## **Stefan Goßner: Grundlagen der Elektronik**

**Shaker-Verlag, 10. Auflage, 2018, ISBN-13: 978-3826588259**

Ein über 500-seitiges Lehrbuch, das deutlich über die Inhalte dieser Lehrveranstaltung hinausgeht. Unter <https://www.prof-gossner.de> gibt es eine ältere Auflage zum Download (Stand: 08/2018).

## **Paul Horowitz, Winfield Hill: The Art of Electronics**

**Cambridge University, 3. Auflage, 2015, ISBN-13: 978-0521809269**

Eine ausführliche Darstellung der analogen und digitalen Schaltungstechnik mit unzähligen Beispielen. Das Kapitel 9 („Voltage Regulation and Power Conversion“) kann unter <https://artofelectronics.net> heruntergeladen werden (Stand: 08/2018).

## **Bruce Carter, Ron Mancini: Op Amps for Everyone**

**Newnes, 5. Auflage, 2017, ISBN-13: 978-0128116487**

„(...) and an effort has been made to make the material understandable to the relative novice while not too boring for the practicing engineer.“ Ältere Auflagen gibt es kostenlos im Internet. 3

# 1. Einleitung

Elektronik („Lehre von der Steuerung von Elektronen“) ist

- eine **Disziplin der Physik** (Verhalten elektrischer Ströme in Gasen, Festkörpern und Flüssigkeiten),
- der darauf aufbauende **Teilbereich der Elektrotechnik**.

Letzterer befasst sich speziell mit der Entwicklung und Anwendung elektronischer Bauelemente, von Elektronenröhren bis zu Dioden, Transistoren und integrierten Schaltungen.



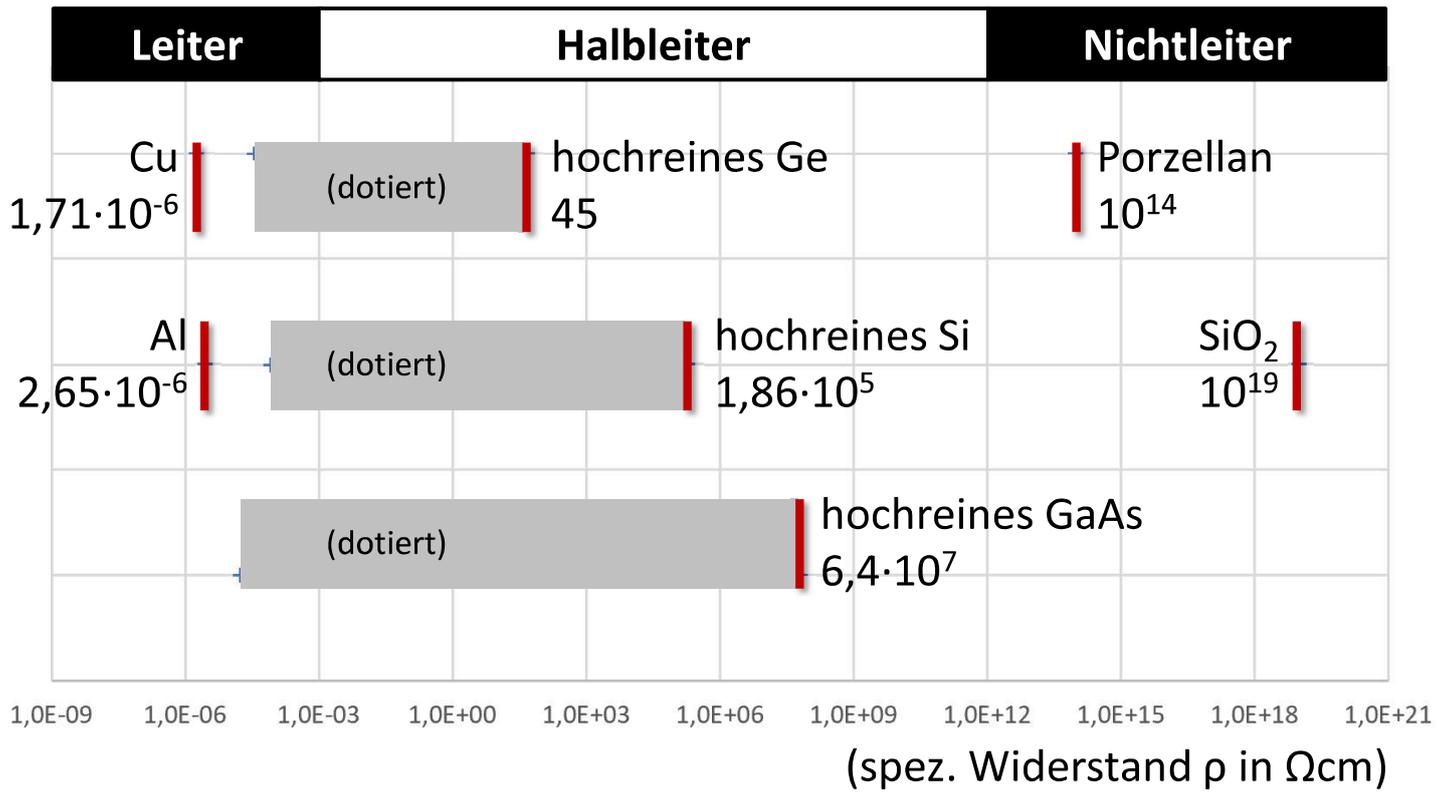
**In dieser Lehrveranstaltung geht es um Grundlagen und Anwendungen der modernen Halbleiterelektronik.**

	Integrationsdichte	Trans. pro Chip	Typische Bauelemente
<b>2018</b>	<i>A12X-Bionic-Prozessor (ca. 10 Milliarden Transistoren, Apple)</i>		
<b>1999</b>	Very Large Scale Integration, VLSI	> 100.000	Athlon-Mikroprozessor, AMD
<b>1990</b>			4-Megabit-RAM
<b>1980</b>			Intel 80286 (1982)...80486 (1989) IGBTs (Insulated-Gate Bipolar Tr.) in der Leistungselektronik
<b>1974</b>	Large Scale Integration, LSI	100...100.000	Charge-Coupled Device (CCD),
<b>1971</b>			Mikroprozessor (4004, TMS1000)
<b>1970</b>			1-Kilobit-RAM
<b>1960</b>	Med. Scale Integration, MSI Small Scale Integration, SSI	10...100 1...10	Logikschaltungen, Gatter, Operationsverstärker (Fairchild)
<b>1958</b>	<i>Erste integrierte Schaltung: Jack S. Kilby (Nobelpreis 2000), Texas Instruments</i>		
<b>1959</b>	Einzelbauelemente	1	MOSFET (Bell Labs)
<b>1957</b>			Thyristor (Bell Labs, Gen. Electric)
<b>1947</b>	<i>Erfindung des Bipolartransistors am 23. Dezember 1947, Bell Labs (Nobelpreis für Bardeen, Brattain und Shockley in 1956)</i>		

## Was sind Halbleiter?

**Halbleiter sind Elemente oder Verbindungen mit einem spezifischen Widerstand zwischen dem von Metallen und Isolatoren.**

- Der spezifische Widerstand ist eine temperaturabhängige Materialkonstante. Mit dem spezifischen Widerstand und den Abmessungen eines homogenen (Halb-)Leiters lässt sich dessen ohmscher Widerstand berechnen. Der spezifische Widerstand ist der Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit.
- Ein wichtiges Kennzeichen von Halbleitern ist ein spezieller Leitungsmechanismus (Elektronen- und Löcherleitung, siehe Kapitel 2), wobei durch gezielte „Verunreinigung“ (Dotierung) der spezifische Widerstand erheblich verändert werden kann.

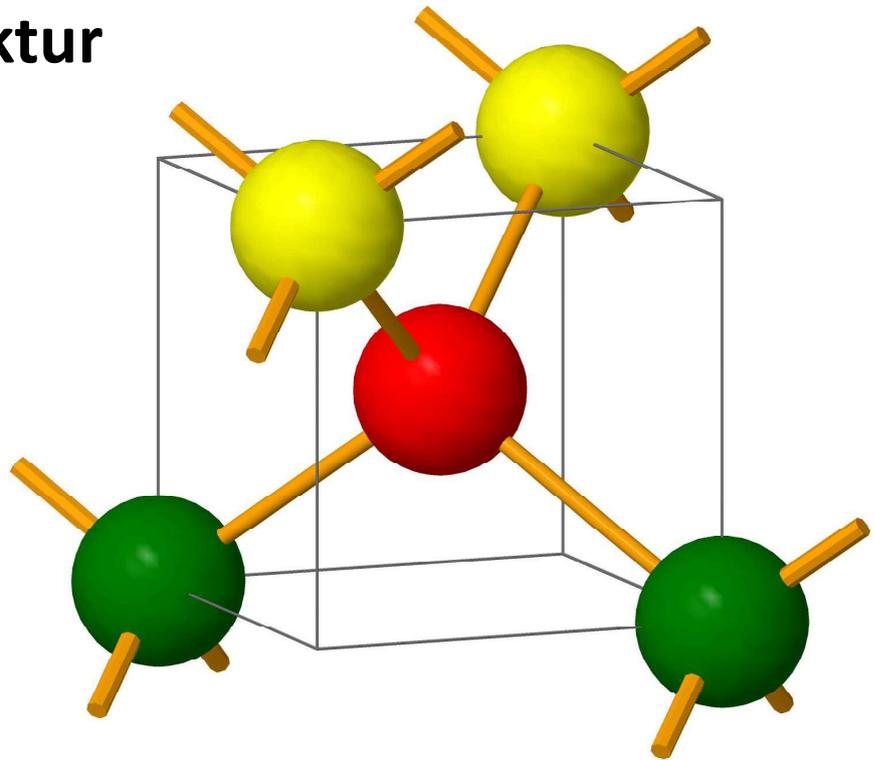


## 2. Grundlagen der Halbleiterphysik

### 2.1. Kristallstruktur

#### Kristallstruktur von Silizium und Germanium:

Jedes Atom hat vier  
gleich weit entfernte  
Nachbaratome  
(„Diamantstruktur“)



2. Grundlagen der Halbleiterphysik

1

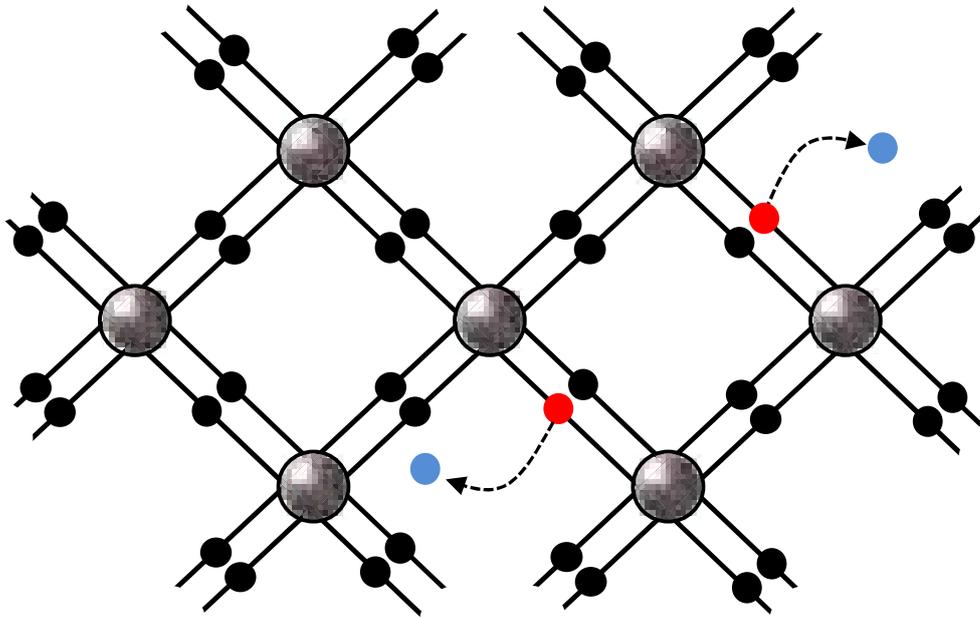
### Atombindungen im Halbleiter

Si und Ge besitzen eine stabile Kristallstruktur (Diamantstruktur):

- Jedes Atom hat vier gleich weit entfernte Nachbaratome.
- Die Atome haben auf ihrer äußeren Elektronenschale vier **Valenzelektronen**, die mit den Nachbaratomen Elektronenpaarbindungen bilden (kovalente Bindung).
- Durch Energiezufuhr (Wärme, Licht) gerät der Kristall in Schwingung, einzelne Bindungen brechen auf (**Ladungsträger-Generation**).
- Ein aus der Atombindung gerissenes Elektron kann sich im Kristall frei bewegen (**freies Elektron**). Es hinterlässt eine Lücke, wo die positive Kernladung nicht mehr durch das Elektron abgedeckt ist (**Loch, Defektelektron**).
- Die **Löcher können als bewegliche positive Ladungsträger** aufgefasst werden. Wird elektrische Spannung angelegt, wandern freie Elektronen zum Pluspol und Löcher zum Minuspol.

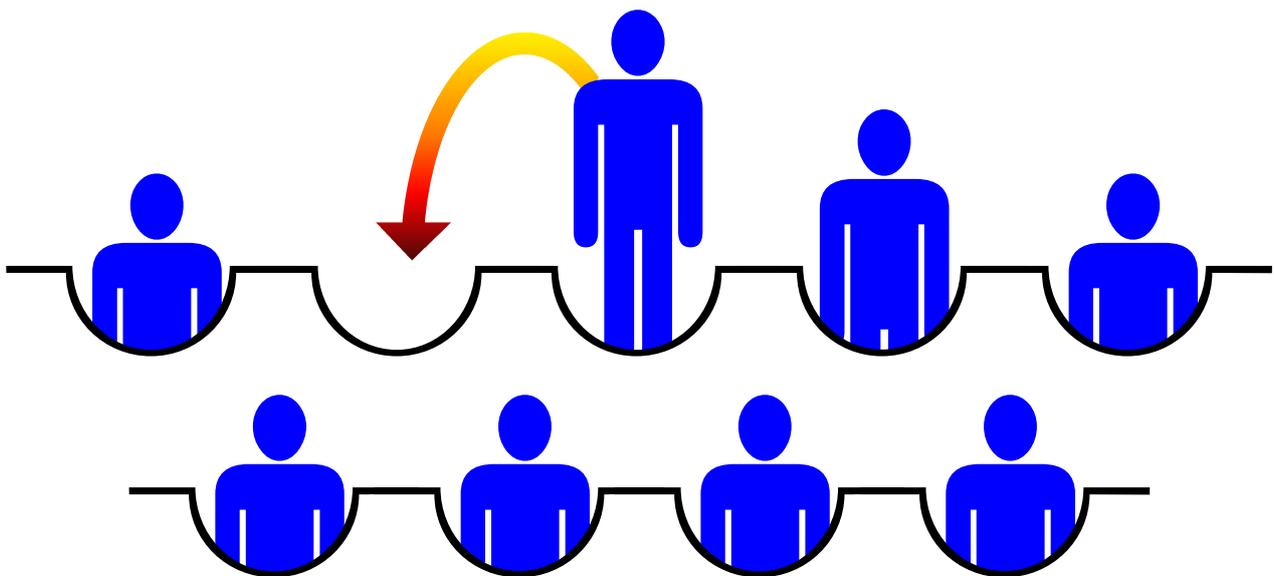
2. Grundlagen der Halbleiterphysik

2



● Si-Atom    ● Elektron (negativ)    ● Loch (positiv)

## Wandern von Löchern im Halbleiter

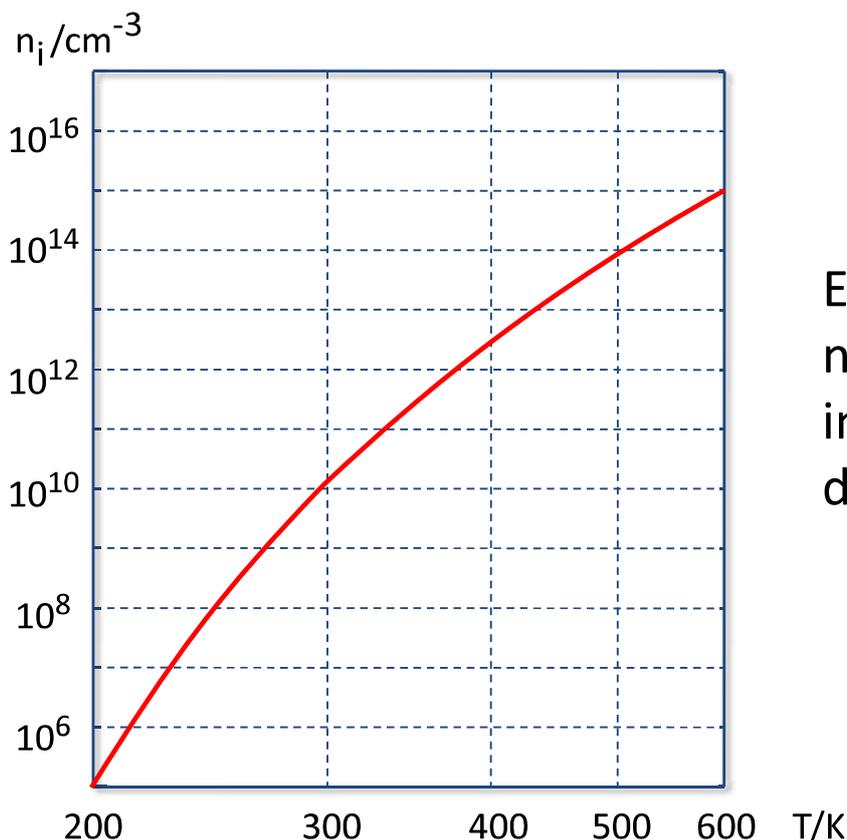


Das Wandern von Löchern im Halbleiter kann man mit leeren Sitzen im Kino vergleichen, wenn die Zuschauer aufrücken: Die Zuschauer wandern immer mehr nach links, die „Löcher“ wandern nach rechts.

Trifft ein freies Elektron auf ein Loch, verschmelzen beide wieder miteinander (**Rekombination**):

- Im Mittel stellt sich ein Gleichgewicht von thermischer Generation und Rekombination ein.
- Elektronendichte  $n_0$  und Löcherdichte  $p_0$  in einem reinen Halbleiter (**intrinsischer Halbleiter**) sind immer gleich groß.
- Man spricht auch von der **Eigenleitungsdichte**  $n_i$
- Im reinen (intrinsischen) Halbleiter gilt also:  $n_i = n_0 = p_0$
- Die Eigenleitungsdichte eines Halbleiters ist abhängig von Material und Temperatur.
- Ändert sich die Eigenleitungsdichte, so ändert sich auch der spezifische Widerstand bzw. die elektrische Leitfähigkeit.

## Eigenleitungsdichte und Temperatur



Eigenleitungsdichte  $n_i$  von Silizium (Si) in Abhängigkeit von der Temperatur  $T$

## 2.2. Eigenleitung

Aus der Eigenleitungsdichte kann der **spezifische Widerstand** des reinen (intrinsischen) Halbleiters berechnet werden:

Für die **elektrische Leitfähigkeit** gilt entsprechend:

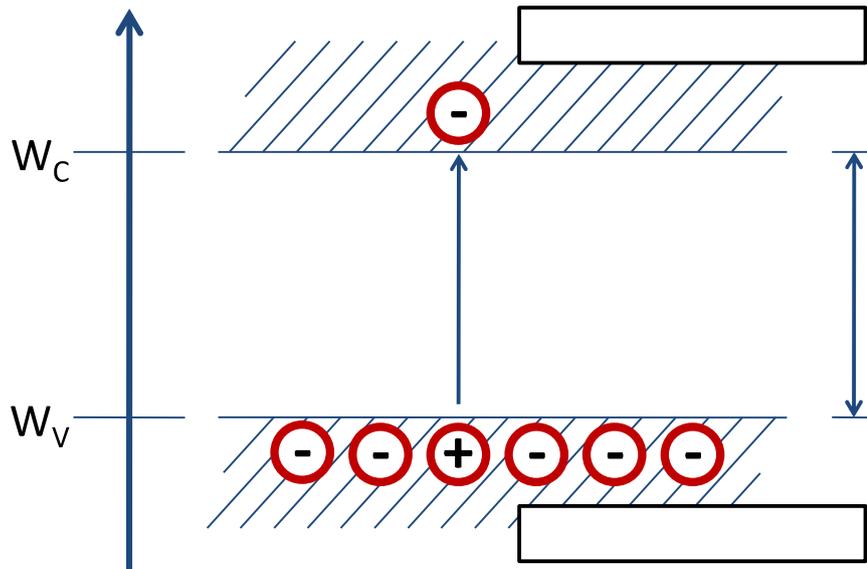
$\mu_p$  und  $\mu_n$  sind die **Beweglichkeiten** der Elektronen und Löcher:

$v_D$  ist die **Driftgeschwindigkeit** und E die elektrische Feldstärke.

## Halbleiter-Eigenschaften bei Raumtemperatur

Isolatoren

	Formelzeichen	Einheit	Ge	Si	GaAs	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Bandabstand	$W_g$	eV	0,66	1,12	1,43	8,9	8,7
Eigenleitungsdichte	$n_i$	cm <sup>-3</sup>	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,6 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^7$		
Elektronenbeweglichkt.	$\mu_n$	cm <sup>2</sup> /Vs	3900	1500	8500		
Löcherbeweglichkt.	$\mu_p$	cm <sup>2</sup> /Vs	1900	600	400		
Durchbruchfeldstärke	$E_{Br}$	V/cm	$10^5$	$3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$



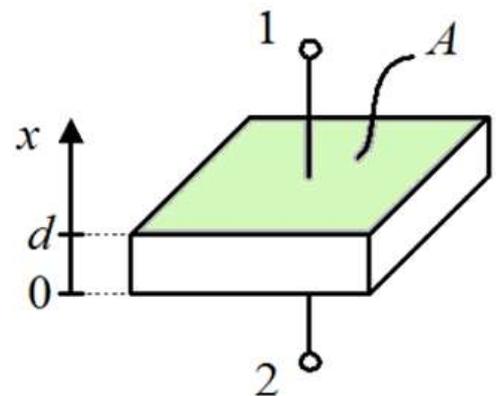
$W_V$  ist das Energieniveau der (gebundenen) Elektronen im Valenzband,  $W_C$  ist das Energieniveau der (freien) Elektronen im Leitungsband. Um Valenzelektronen ins Leitungsband anzuheben, ist der Bandabstand  $W_G = W_C - W_V$  zu überwinden. Zustände im „verbotenen Bereich“ zwischen Valenz- und Leitungsband sind nicht möglich.

## Übungsaufgabe 2.1

### (WS 2008/09 – FA, Aufgabe 1)

Die nebenstehende Abbildung zeigt ein Halbleiterplättchen aus Silizium. Die Fläche beträgt  $A = 4 \text{ mm}^2$  und die Dicke  $d = 0,2 \text{ mm}$ .

- Wie groß muss die Eigenleitungsichte  $n_i$  im Plättchen sein, damit es zwischen den Anschlussklemmen einen Widerstand von  $4,593 \Omega$  hat?
- Geben Sie zwei Möglichkeiten an, die Eigenleitungsichte eines Halbleiters zu erhöhen.



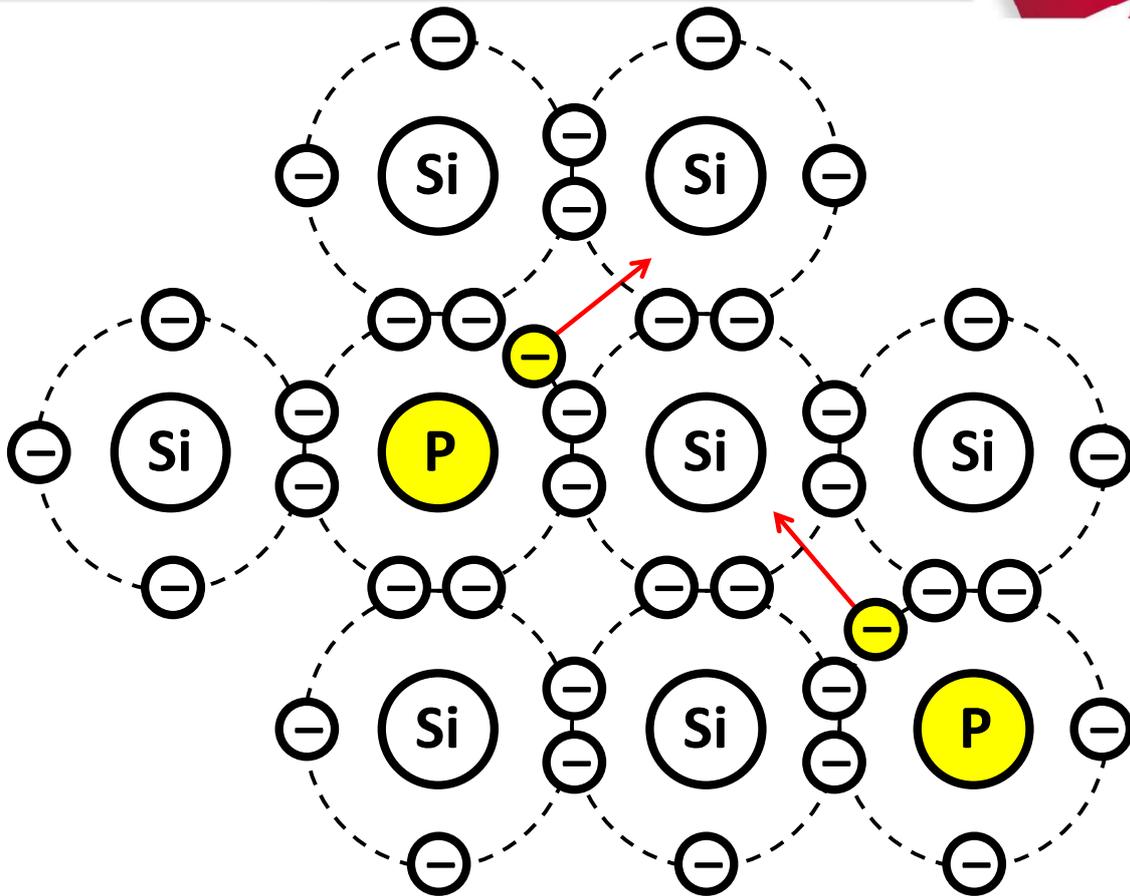
## 2.3. Dotierung, Störstellenleitung

Das **Einbringen von Fremdatomen (Dotieren)** in das Kristallgitter ermöglicht die **gezielte Erzeugung freier Elektronen und Löcher** und somit die Beeinflussung der Leitfähigkeit des Halbleiters.

- Dotiert man einen Halbleiter mit einem Stoff mit fünf Valenzelektronen („**Donator**“), zum Beispiel Arsen (As) oder Antimon (Sb), lässt sich das fünfte, „überzählige“ Elektron durch sehr geringe thermische Energie von seinem Atom abtrennen. Es herrscht **Elektronenüberschuss**, man spricht von einem **n-Halbleiter**.
- Dotiert man einen Halbleiter mit einem Stoff mit drei Valenzelektronen („**Akzeptor**“), z. B. Gallium (Ga) oder Indium (In), fehlt jeweils ein Elektron bei der Bindung an die Nachbaratome. Durch die Dotierung werden also zusätzliche Löcher eingebracht. Es herrscht **Löcherüberschuss**, man spricht von einem **p-Halbleiter**.

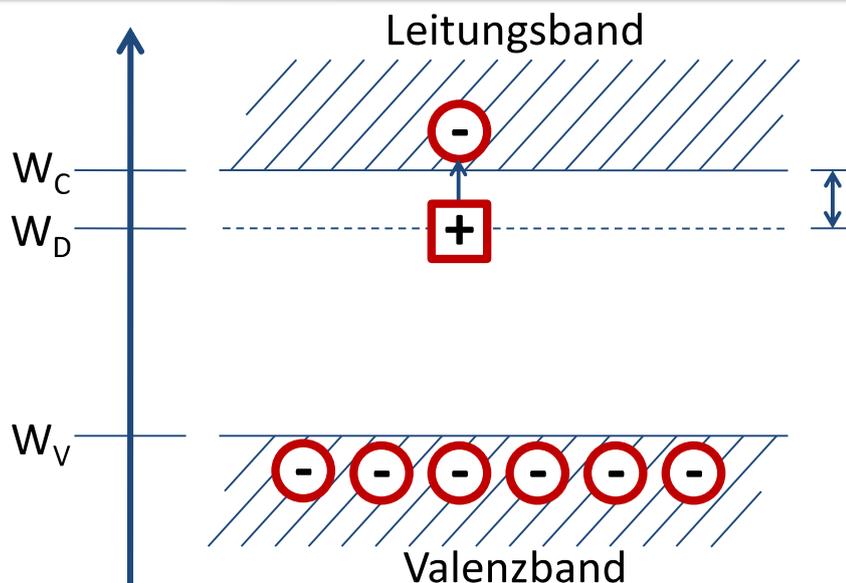
## Periodensystem: Donatoren und Akzeptoren

I a												III a					IV a	V a	VI a	VII a	VIII a	
1 H												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne					
3 Li	4 Be											11 Al	12 Si	13 P	14 S	15 Cl	16 Ar					
7 Na	8 Mg	III b	IV b	V b	VI b	VII b	VIII b		I b	II b	17 Ga	18 Ge	19 As	20 Se	21 Br	22 Kr						
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr					
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe					
86 Cs	88 Ba	89 La	91 Hf	93 Ta	95 W	97 Re	101 Os	103 Ir	106 Pt	108 Au	112 Hg	115 Tl	119 Pb	122 Bi	128 Po	127 At	131 Rn					
133	137	139	179	181	184	186	190	192	195	197	201	204	207	209	210	222						
		58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu							
140	141	144	145	150	152	157	159	163	165	167	169	173	175									
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U																	
223	226	227	232	231	238																	

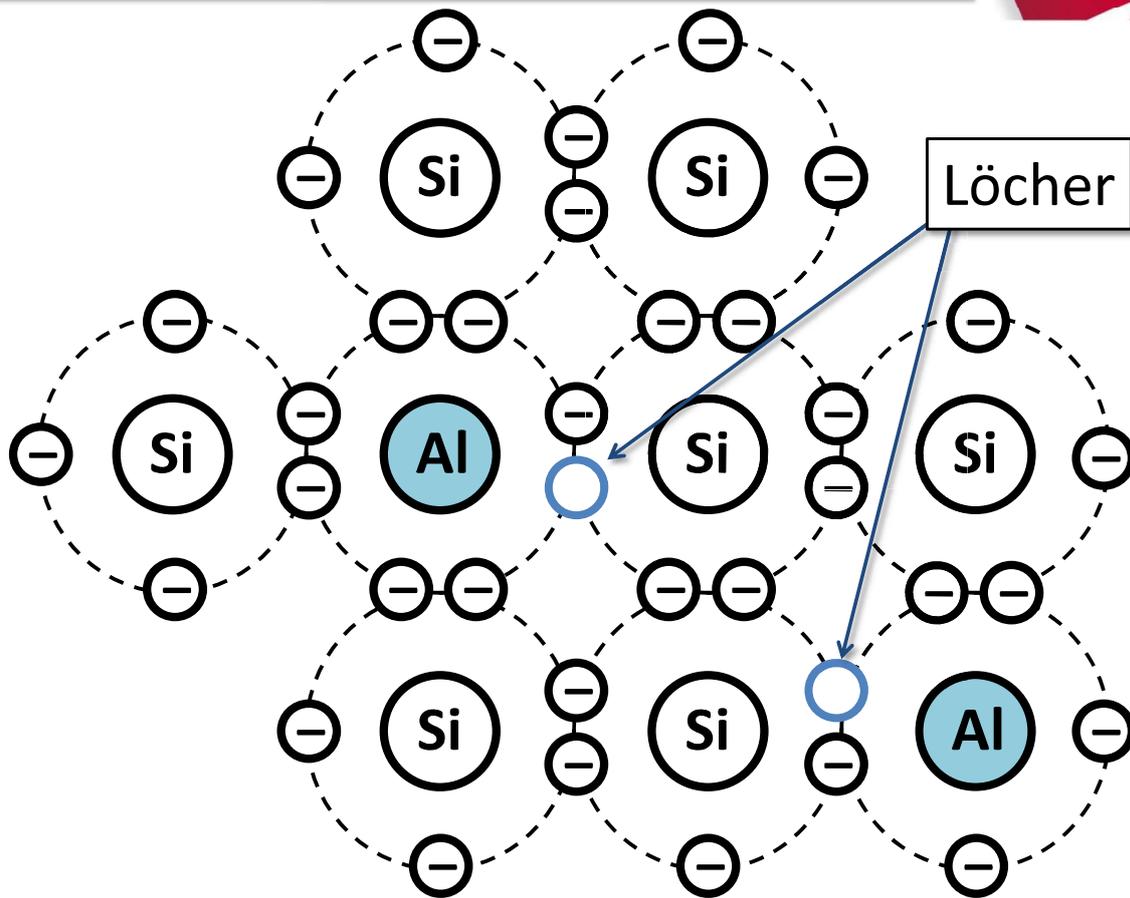


2. Grundlagen der Halbleiterphysik

# Bändermodell eines n-Halbleiters

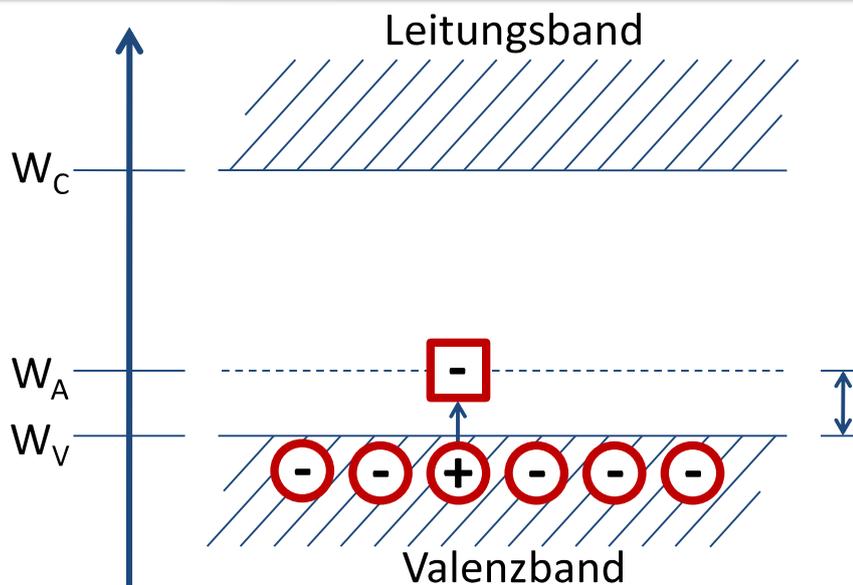


**Donatoren** bringen zusätzliche Elektronen mit einem Energieniveau  $W_D$  in die Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband. Es reicht eine sehr geringe Energiezufuhr  $\Delta W_D = W_C - W_D$  aus, um diese Elektronen ins Leitungsband anzuheben. Es entstehen freie Elektronen und ortsfeste positiv ionisierte Störstellen.



2. Grundlagen der Halbleiterphysik

# Bändermodell eines p-Halbleiters



**Akzeptoren** bewirken ein Energieniveau  $W_A$  nahe der Valenzbandkante. Ein Elektron aus dem Valenzband braucht nur eine kleine Energiestufe  $\Delta W_A = W_A - W_V$  zu überwinden, um dieses Energieniveau zu besetzen. Es hinterlässt ein Loch im Valenzband und eine negativ ionisierte Störstelle.

- Im n-Halbleiter gibt es viele freie Elektronen („**Majoritätsträger**“) und wenige Löcher („**Minoritätsträger**“).
- Im p-Halbleiter sind die Löcher Majoritätsträger und die freien Elektronen Minoritätsträger.
- Bei Raumtemperatur sind praktisch alle Störstellen ionisiert („**Störstellenschöpfung**“).
- Im dotierten Halbleiter sind Elektronen- und Löcherdichte nicht mehr gleich, stattdessen gilt das sog. **Massenwirkungsgesetz** (ohne Herleitung):
  
- Da der Halbleiter nach außen elektrisch neutral ist, gilt außerdem die folgende **Neutralitätsbedingung**:

## Ladungsträgerdichte im dotierten Halbleiter

---

Sind Donator- und Akzeptordichte im dotierten Halbleiter bekannt, können Elektronendichte  $n_0$  und Löcherdichte  $p_0$  aus dem Massenwirkungsgesetz und der Neutralitätsbedingung berechnet werden:

### (WS 2002/03 – FA, Aufgabe 1)

Ein homogener Halbleiter weist bei Zimmertemperatur folgende Ladungsträgerkonzentrationen auf:

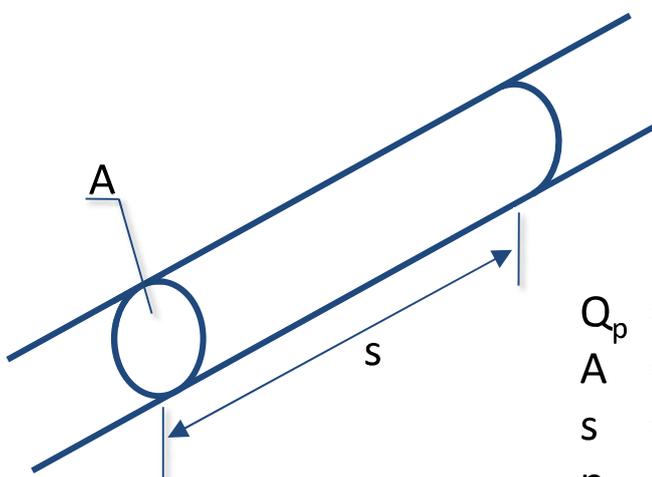
$$p_0 = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \quad n_0 = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

- Welcher Halbleitertyp liegt vor (Begründung)?
- Berechnen Sie die Eigenleitungsichte  $n_i$  des Halbleiters.
- Der Halbleiter wurde mit einem Akzeptor der Dichte  $N_A = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  dotiert. Wie hoch muss er zusätzlich mit einem Donator dotiert werden, um die oben genannten Eigenschaften zu erhalten?
- Handelt es sich bei dem Grundmaterial um Silizium, Germanium oder keines von beiden (Begründung)?

### Zur Berechnung des Driftstroms im Halbleiter

## 2.4. Stromfluss in Halbleitern

Gesamtladung der pos. Ladungsträger (z. B. Löcher) in einem Abschnitt der Länge  $s$  eines langen Leiters mit dem Querschnitt  $A$ :



Ladung pro Volumen

$$Q_p = \overbrace{p_0 e} \cdot \underbrace{A s}$$

Volumen des Abschnitts

$Q_p$  = positive Ladung (z. B. Löcher)

$A$  = Querschnitt

$s$  = Länge des Leiterabschnitts

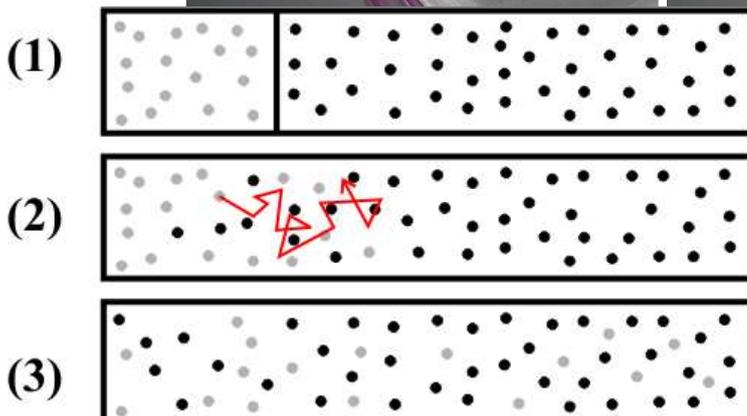
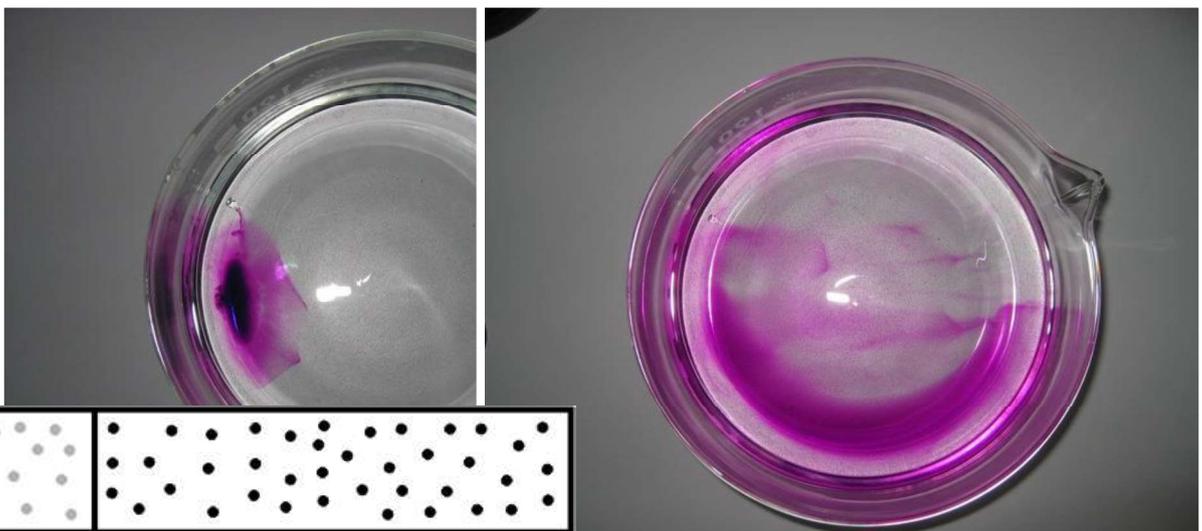
$p_0$  = Dichte der pos. Ladungsträger

$e$  =  $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$  („Elementarladung“)

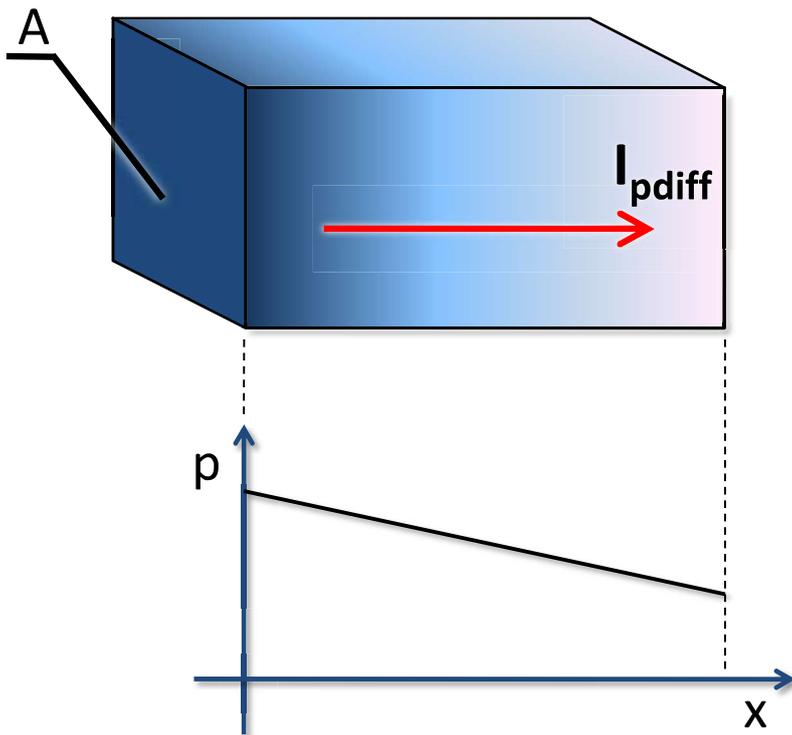
## Ein elektrisches Feld $E$ in einem Halbleiter bewirkt eine Bewegung der freien Ladungsträger (Driftstrom):

- Der Driftstrom in einem Halbleiter setzt sich zusammen aus dem Driftstrom der Löcher und dem Driftstrom der freien Elektronen.
- Für den spezifischen Widerstand und die elektrische Leitfähigkeit gilt (sowohl für reine als auch für dotierte Halbleiter):

## Beispiel: Diffusion im Wasserglas



Fotos: Andreas Kalt  
(Creative Commons Lizenz)



$A$  = Querschnitt des Halbleiters

$p$  = Ladungsträgerdichte der pos. Ladungsträger („Löcher pro Volumen“)

$I_{p,diff}$  = Diffusionsstrom von Löchern

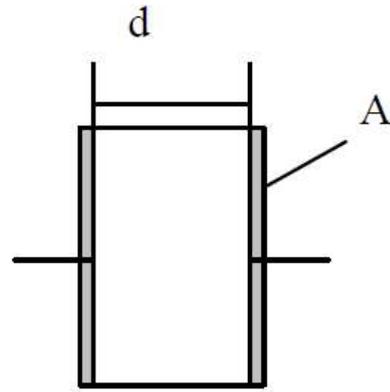
## Diffusionsstrom im Halbleiter

**Ist die Konzentration der freien Ladungsträger im Halbleiter nicht konstant, treten Diffusionsströme auf. Diese „versuchen“, das Konzentrationsgefälle auszugleichen:**

- Diffusionsstrom der Löcher:
- Diffusionsstrom der freien Elektronen:
- Für die Diffusionskonstanten  $D_n$  und  $D_p$  gilt:
  
- Dabei ist  $T$  die „absolute Temperatur“ in Kelvin und  $k$  die sog. Boltzmannkonstante:

### (SS 2006, Aufgabe 1)

Ein beidseitig mit Metallblättchen kontaktiertes Halbleiterelement der Dicke  $d = 0,5 \text{ mm}$  mit einem Querschnitt  $A = 5 \text{ mm}^2$  hat einen Widerstand von  $R = 0,3 \Omega$ .



Das Material ist mit einer Sorte Fremdatomen dotiert. Die Beweglichkeit der Elektronen bzw. Löcher beträgt bei Raumtemperatur:

$$\mu_n = 15000 \text{ cm}^2/\text{Vs}, \quad \mu_p = 5000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

Ferner sei bekannt, dass die Löcherdichte um den Faktor  $10^6$  höher ist als die Elektronendichte.

## Übungsaufgabe 2.3 (b)

- Berechnen Sie die Elektronendichte  $n_0$ , Löcherdichte  $p_0$  und Eigenleitungsdichte  $n_i$ .
- Ist das Material mit einem Akzeptor oder Donator dotiert? Geben Sie dessen Dichte an.
- Nun wird obiges Grundmaterial ( $\mu_n$ ,  $\mu_p$ ,  $n_i$ ) mit einem Akzeptor und mit einem Donator dotiert.

Die Donatordichte beträgt  $N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ 1/cm}^3$ . Diesmal soll die Elektronendichte um den Faktor  $10^6$  höher sein als die Löcherdichte.

Berechnen Sie die Akzeptordichte.

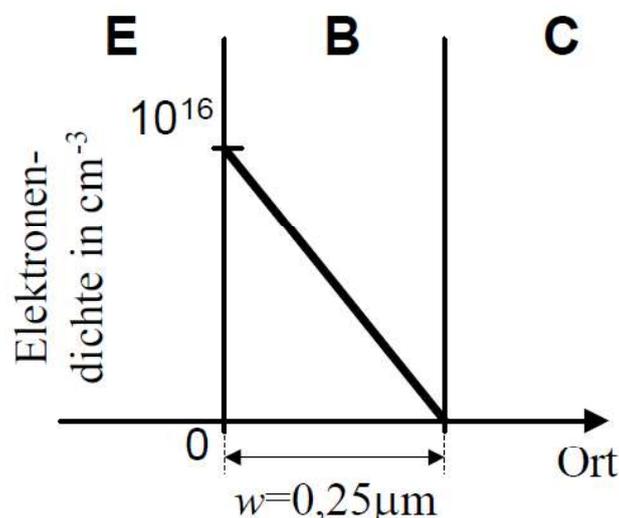
### (WS 2006/07, Aufgabe 1)

- a) Ein Si-Halbleiter ist mit einer Phosphordichte von  $1 \cdot 10^{15}$  Atomen pro  $\text{cm}^3$  dotiert. Berechnen Sie die Elektronendichte  $n_0$  und die Löcherdichte  $p_0$  bei Raumtemperatur.
- b) Dieser Halbleiter wird erwärmt, wodurch die Eigenleitungsichte auf  $n_i = 4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  steigt. Berechnen Sie die Elektronendichte  $n_0$  und die Löcherdichte  $p_0$  für diesen Fall.
- c) Nun wird obiger Halbleiter neben Phosphor auch noch mit Bor der gleichen Dichte ( $1 \cdot 10^{15}$  Atomen pro  $\text{cm}^3$ ) dotiert. Wie groß sind nun die Elektronendichte  $n_0$  und die Löcherdichte  $p_0$  im erwärmten Zustand ( $n_i = 4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ )?

## Übungsaufgabe 2.4 (b)

- d) Die nachstehende Abbildung zeigt die Minoritätsträgerdichte in der Basis eines npn-Bipolartransistors im Arbeitspunkt. Die aktive Fläche der Basis sei  $A = 25 \mu\text{m}^2$ .

Wie groß ist der Diffusionsstrom bei Raumtemperatur ( $T = 300 \text{ K}$ ) aufgrund des Elektronengradienten in der Basis?



### 3. Homogene Halbleiterbauelemente

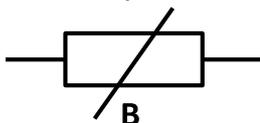
Halbleiter weisen gegenüber Metallen besondere Eigenschaften auf, die zur Herstellung von Bauelementen genutzt werden können:

- Die im Vergleich zu Metallen geringe Ladungsträgerkonzentration in Verbindung mit einer hohen Ladungsträgerbeweglichkeit führt zu **hohen Driftgeschwindigkeiten der Ladungsträger** im elektr. Feld.
- Bei **Erwärmung des Halbleiters** oder bei **Bestrahlung mit Licht** ergeben sich **starke Änderungen des spezifischen Widerstands**.

Bereits aus „einfachen“, homogenen Halbleiterkristallen können Bauelemente gefertigt werden (je nach Material, Dotierung, geom. Abmessungen). Einige Beispiele werden auf den folgenden Folien vorgestellt.

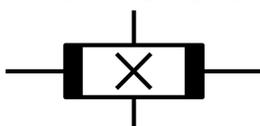
#### Homogene Halbleiterbauelemente (a)

Feldplatte



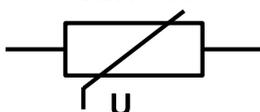
Magnetfeld lenkt el. Ladungsträger ab  
→ Widerstandsänderung durch unterschiedliche Weglänge

Hall-Element



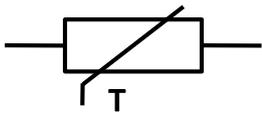
Magnetfeld lenkt el. Ladungsträger ab  
→ Hallspannung abhängig vom B-Feld

Varistor



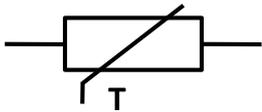
Spannungsabhängiger Widerstand  
(z. B. zum Schutz vor Überspannung)

Heißleiter (NTC)



Erhöhung der Temperatur verringert den Widerstandswert

Kaltleiter (PTC)



Erhöhung der Temperatur vergrößert den Widerstandswert

Fotowiderstand



Lichteinstrahlung generiert zusätzliche Ladungsträgerpaare  
→ Widerstand verringert sich

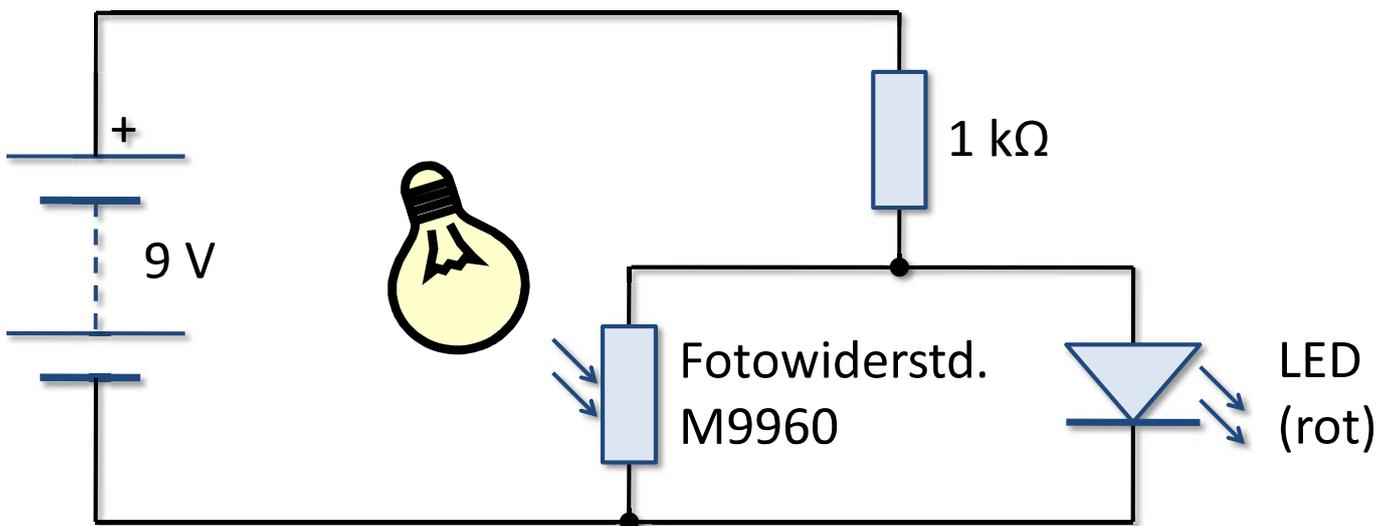
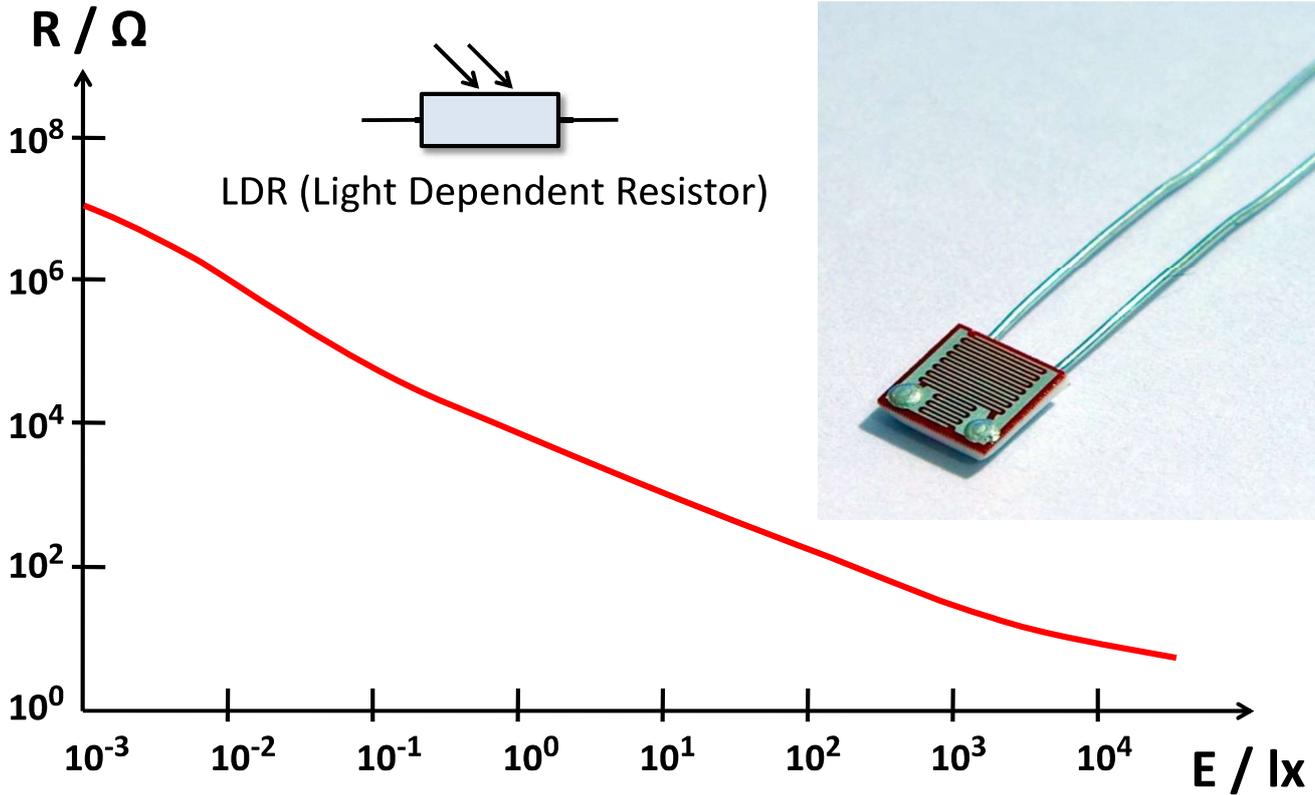
### 3.1. Heißleiter, Fotowiderstand

**Die Erwärmung des Halbleiters führt zur Generation von Ladungsträgerpaaren (freie Elektronen und Löcher):**

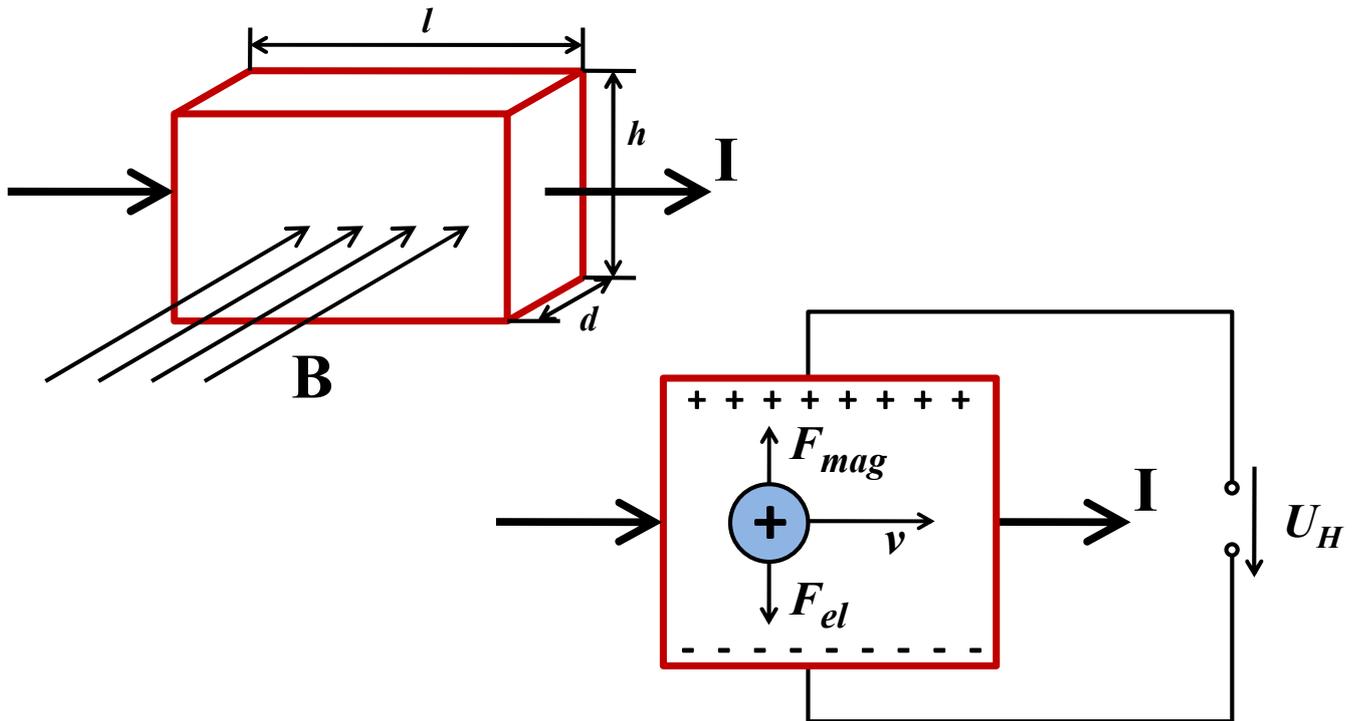
- Steigt die Ladungsträgerkonzentration, dann sinkt der spezifische Widerstand des Halbleiters („Heißleiter“).
- Anwendungen: Temperatursensor (NTC, Negative Temperature Coefficient), Messung der Strömungsgeschwindigkeit von Gasen oder Flüssigkeiten (Anemometer).

**Die Bestrahlung des Halbleiters mit Licht führt ebenfalls zur Generation von Ladungsträgerpaaren:**

- Der Widerstand eines Fotowiderstands (LDR, Light Dependent Resistor) sinkt mit steigender Beleuchtungsstärke.
- Anwendungen: Helligkeitsmessung, Lichtschranken.



## 3.2. Hall-Element



3. Homogene Halbleiterbauelemente

7

### Hall-Element (a)

Hall-Spannung bei einem p-Halbleiter:

Hall-Spannung bei einem n-Halbleiter:

Für die Ladungsträgersgeschwindigkeit im Halbleiter gilt:

3. Homogene Halbleiterbauelemente

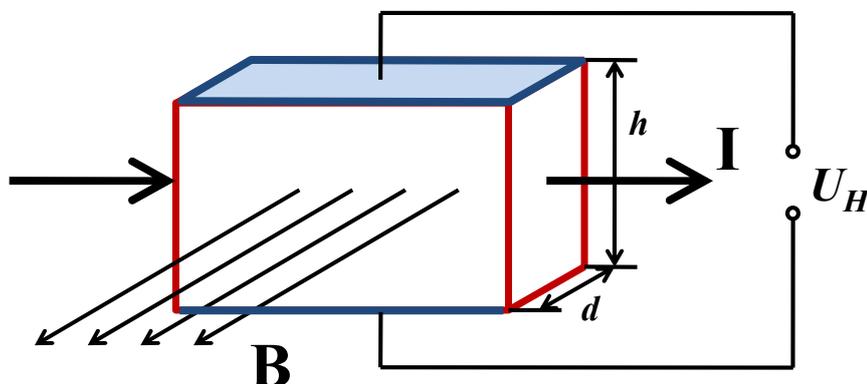
8

### Zusammenfassung:

- Mit Hall-Elementen (Hall-Sensoren) können Magnetfelder gemessen werden.
- Die Hall-Spannung  $U_H$  ist proportional zur magn. Flussdichte  $B$ .
- Aus Größe und Vorzeichen von  $U_H$  kann die Ladungsträgerkonzentration und der Typ (n- oder p-Halbleiter) eines Halbleiters bestimmt werden, falls die magnetische Flussdichte  $B$  bekannt ist.

### Übungsaufgabe 3.1

In einem Halbleiterplättchen (n-Halbleiter) der Dicke  $d = 1,0 \text{ mm}$  entsteht bei der Stromstärke  $I = 34 \text{ mA}$  und der magn. Flussdichte  $B = 0,040 \text{ T}$  eine Hallspannung  $U_H$  mit einem Betrag von  $44 \text{ mV}$ .



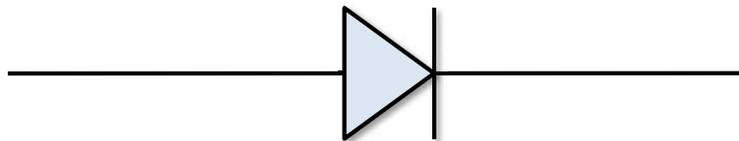
- Geben Sie die Polarität der Hallspannung in der Zeichnung an!
- Wie ist die Konzentration der freien Elektronen im Halbleiter?
- Die Höhe des Halbleiterplättchens beträgt  $h = 10 \text{ mm}$ . Berechnen Sie die Driftgeschwindigkeit der freien Elektronen!

## 4. Dioden

### 4.1. Der pn-Übergang

Die Diode ist ein Halbleiterbauelement mit zwei Anschlüssen:

- Eine Diode besteht aus einem Halbleiterkristall, der auf der einen Seite p- und auf der anderen Seite n-dotiert ist.
- Die Anschlüsse der Diode heißen **Anode** und **Kathode**.
- Dioden lassen elektrischen Strom nur in einer Richtung passieren (**Durchlassrichtung, Flussrichtung**).
- In der anderen Richtung wirken sie wie ein Isolator (**Sperrrichtung**).

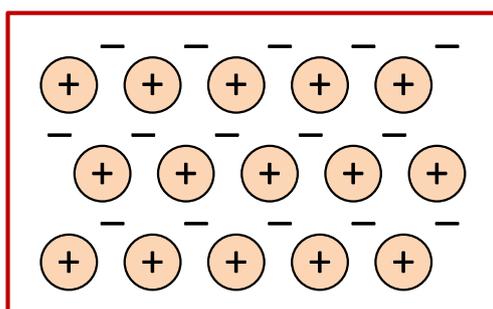


4. Dioden

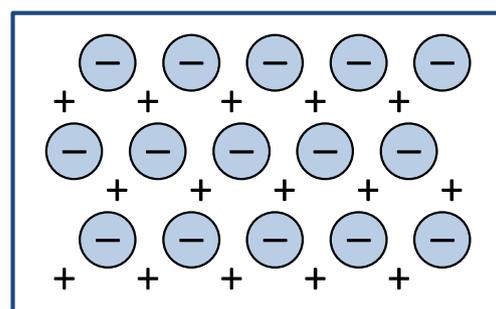
1

### pn-Übergang (a)

p-Halbleiter



n-Halbleiter



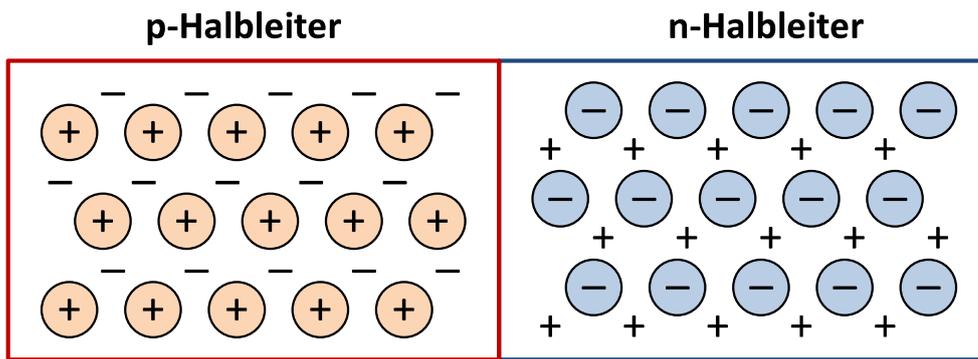
⊕ Loch (Majoritätsträger)

− Ortsfeste Akzeptor-Störstelle

⊖ Freies Elektron (Majoritätsträger)

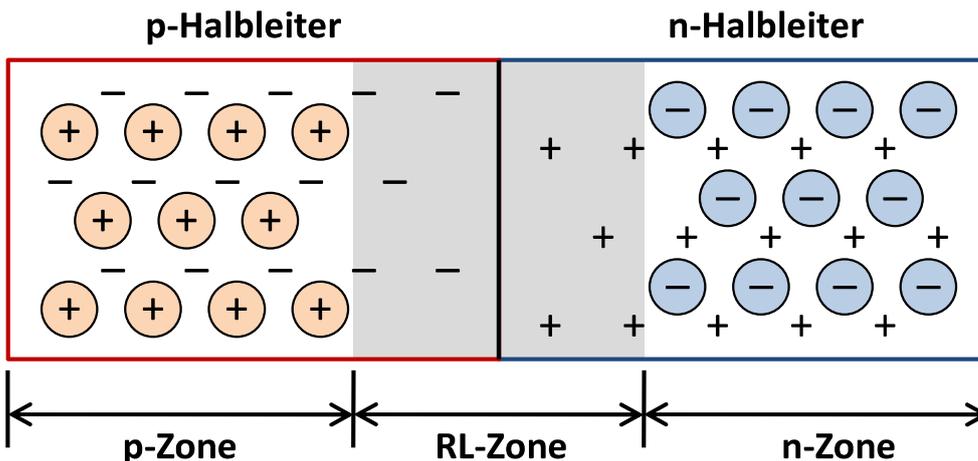
+ Ortsfeste Donator-Störstelle

Zwei getrennte Halbleiter (p- und n-Halbleiter) sind jeweils neutral. Die Ladungen der freien Ladungsträger (Löcher bzw. freie Elektronen) und der ortsfesten Störstellen-Ionen heben sich auf.



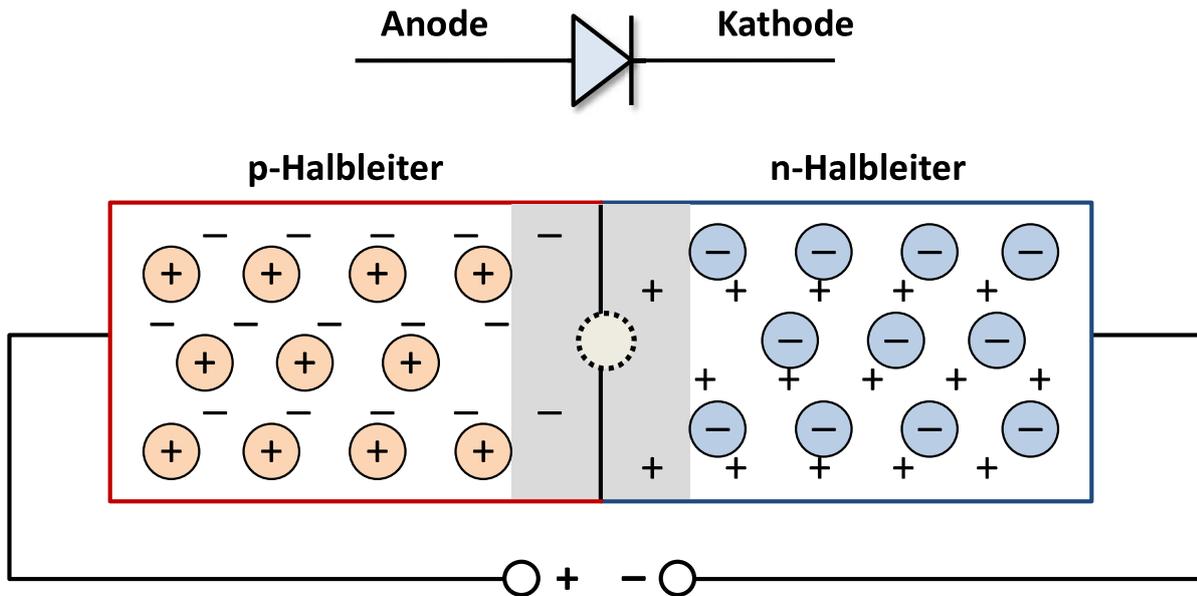
- + Loch (Majoritätsträger)
- Freies Elektron (Majoritätsträger)
- Ortsfeste Akzeptor-Störstelle
- + Ortsfeste Donator-Störstelle

Am pn-Übergang diffundieren die beweglichen Majoritätsträger in die benachbarte Zone (**Diffusionsstrom**). Die geladenen, ortsfesten Störstellen bewirken ein immer stärker werdendes elektrisches Feld. Schließlich stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein.



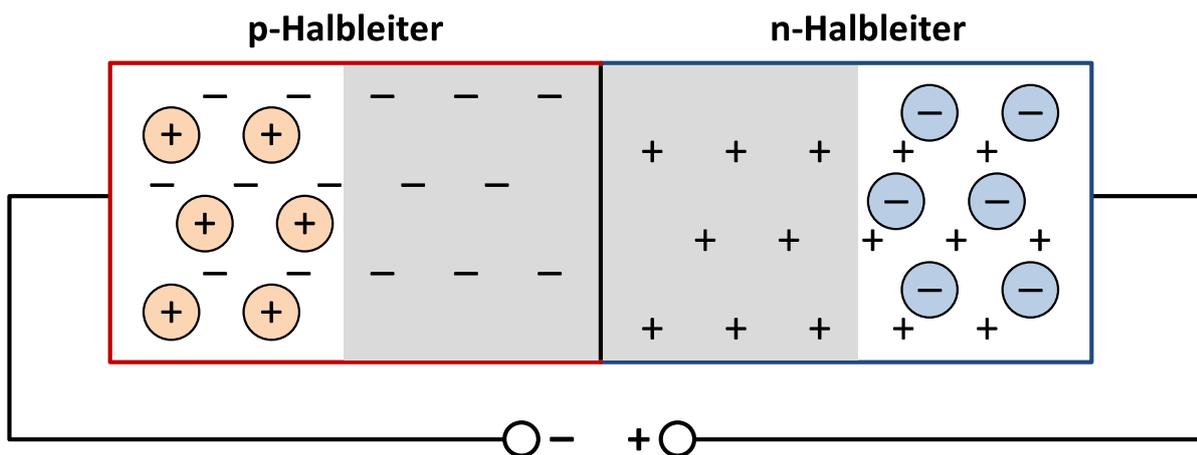
Durch Rekombination der freien Ladungsträger (Löcher und Elektronen) entsteht an der Grenzschicht eine Zone, die praktisch keine freien Ladungsträger enthält. In dieser Zone befinden sich nur noch die ortsfesten, negativen Akzeptor-Störstellen bzw. die positiven Donator-Störstellen (**Raumladungszone**).

## pn-Übergang (d)



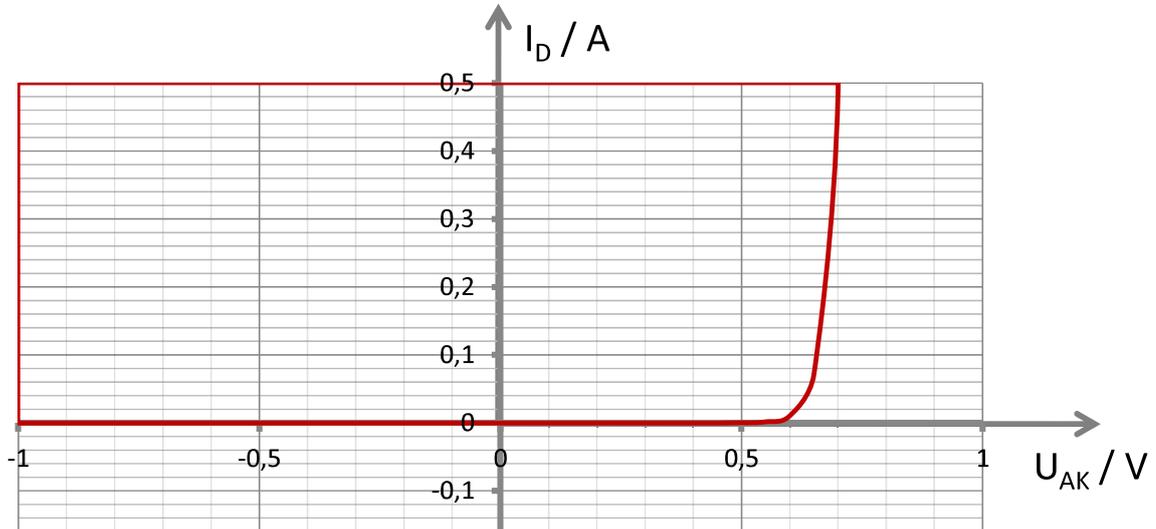
Bei Anlegen einer Spannung in **Durchlassrichtung** fließen Ladungsträger in die Raumladungszone und rekombinieren dort. Die Raumladungszone wird schmaler, es fließt Strom.

## pn-Übergang (e)



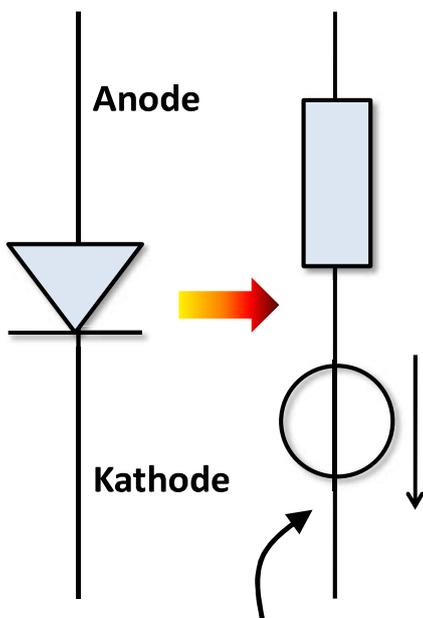
Beim Anlegen einer Spannung in **Sperrrichtung** fließen die Ladungsträger von der Raumladungszone weg. Die Raumladungszone verbreitert sich. Es fließt nur noch ein kleiner **Sperrstrom**, der von der thermischen Generation von Ladungsträgerpaaren im Bereich der Raumladungszone herrührt.

Die **Diodenkennlinie** zeigt, dass der Durchlassstrom **exponentiell** zur Diodenspannung zunimmt. Zur einfacheren Berechnung wird oft eine idealisierte, lineare Kennlinie verwendet (nächste Folie).

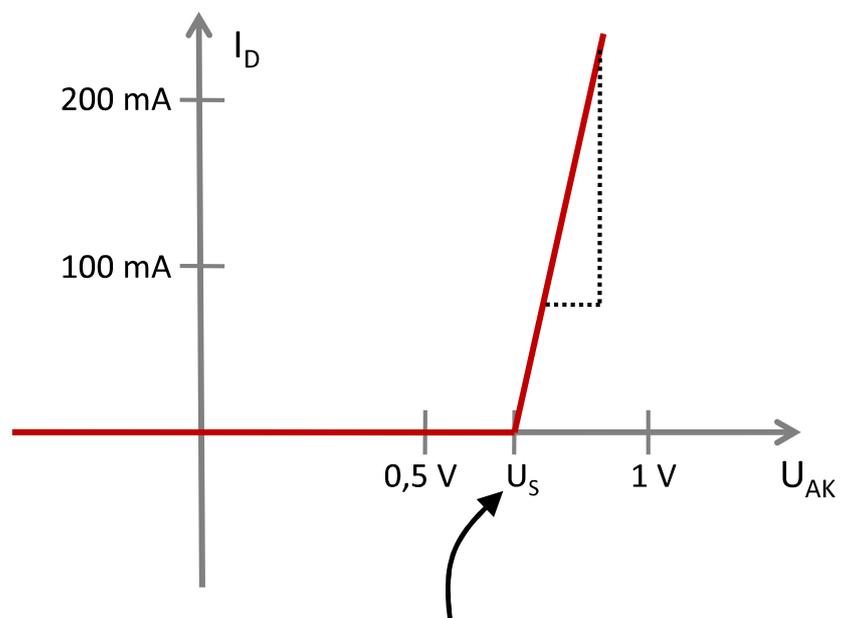


$$I_D = I_S \cdot \left( e^{\frac{U_{AK}}{U_T}} - 1 \right), \text{ bei } T = 300 \text{ K ist } U_T = 25,852 \text{ mV}$$

7

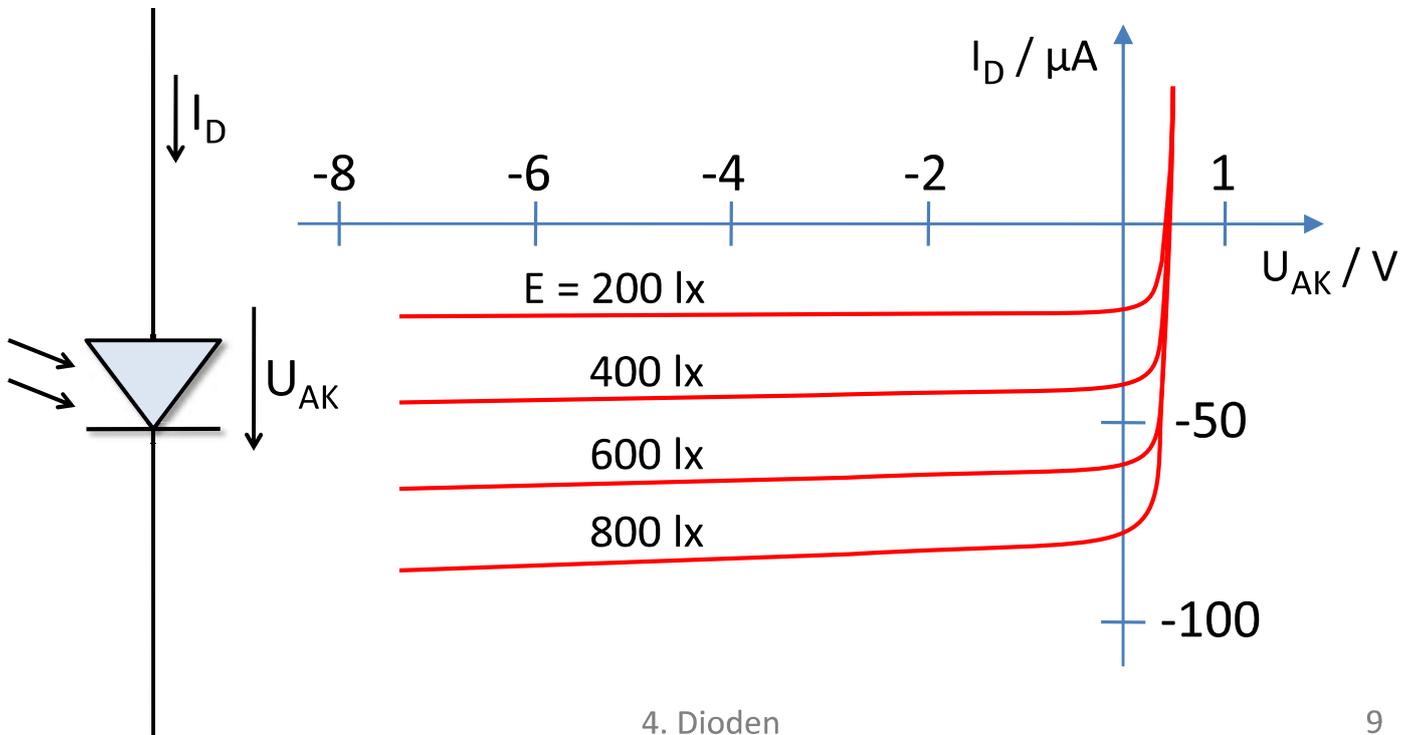


Lineares Ersatzschaltbild  
in Durchlassrichtung



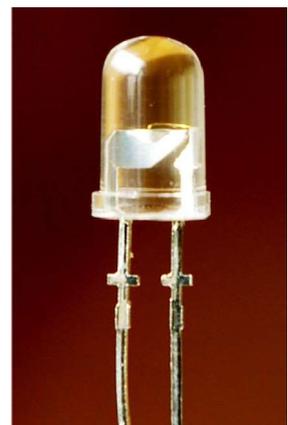
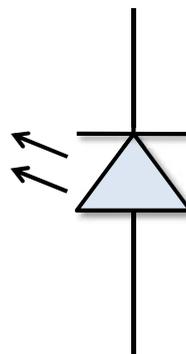
Schwellen-, Schleusenspannung:

Bei **Fotodioden** ist es möglich, die Sperrschicht mit Licht zu bestrahlen. Der Kennlinienverlauf ändert sich mit der Beleuchtungsstärke.



## Leuchtdiode, LED (Light Emitting Diode)

Eine Diode in Durchlassrichtung nimmt die Leistung  $P = U_{AK} \cdot I_D$  auf ( $U_{AK}$  = Diodenspannung,  $I_D$  = Durchlassstrom). Bei **Leuchtdioden** wird ein Teil davon als Licht abgestrahlt.



Vergleich von Leuchtdioden und „konventionellen“ Leuchtmitteln:\*

„Klassische“ Glühlampe	10 ... 14 Lumen / Watt
Halogenlampe	15 ... 20 Lumen / Watt
Leuchtstoffröhre	70 ... 90 Lumen / Watt
LED-Leuchtmittel (inkl. Elektronik u. Optik)	40 ... 100 Lumen / Watt

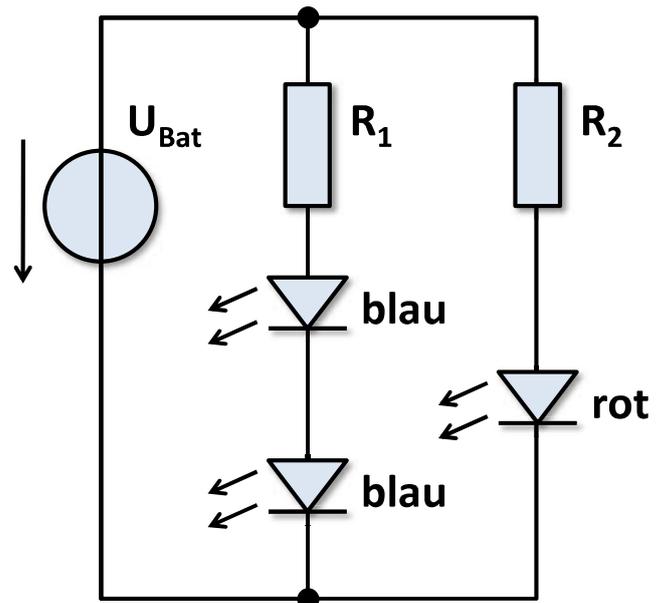
\*Quelle: Wikipedia/Leuchtdiode, 09/2014

An einer Batterie ( $U_{\text{Bat}} = 9 \text{ V}$ ) sollen zwei blaue und eine rote LED betrieben werden. Die Dioden haben folgende Daten:

Rote LED:  $U_S = 1,5 \text{ V}$  und  $r_F = 10 \Omega$

Blaue LED:  $U_S = 2,7 \text{ V}$  und  $r_F = 35 \Omega$

- Welchen Wert muss der Widerstand  $R_2$  besitzen, damit durch die rote Leuchtdiode ein Strom von  $20 \text{ mA}$  fließt?
- Welchen Wert muss der Widerstand  $R_1$  besitzen, damit durch die blauen Leuchtdioden ein Strom von  $20 \text{ mA}$  fließt?
- Wie groß sind die Diodenströme, falls die Batteriespannung (bei unveränderten Widerständen  $R_1$  und  $R_2$ ) auf  $U_{\text{Bat}} = 7 \text{ V}$  sinkt?



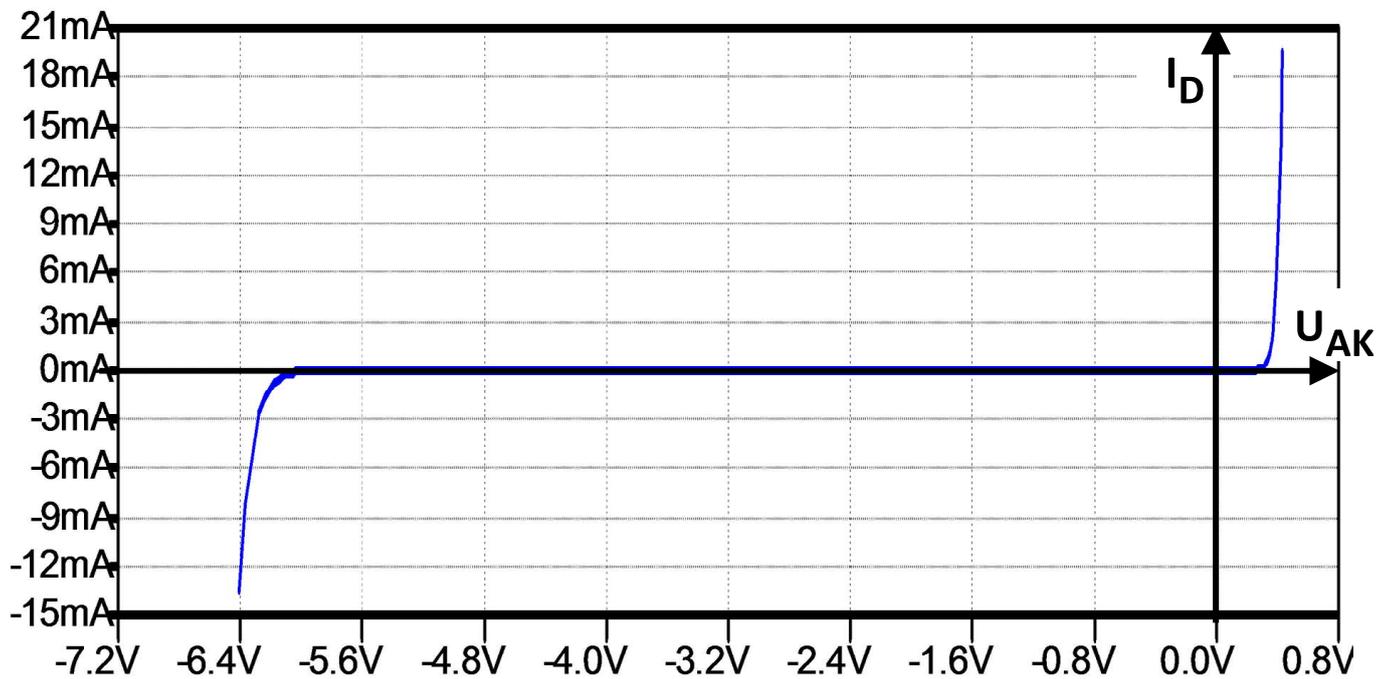
## 4.2. Die Z-Diode

Z-Dioden (auch Zenerdioden) sind Dioden, die speziell für den Betrieb im Durchbruchbereich entwickelt wurden:

- In Durchlassrichtung verhält sich eine Z-Diode wie eine herkömmliche Halbleiterdiode.
- In Sperrrichtung beginnt ab einer **genau definierten Spannung** der **Durchbruchbereich**.
- Im Gegensatz zu herkömmlichen Halbleiterdioden wird eine Z-Diode durch den Betrieb im Durchbruchbereich nicht beschädigt, solange der Strom den zulässigen Maximalwert nicht überschreitet.
- Z-Dioden werden in der Praxis zur **Spannungsstabilisierung** sowie zum **Schutz vor Überspannung** eingesetzt.

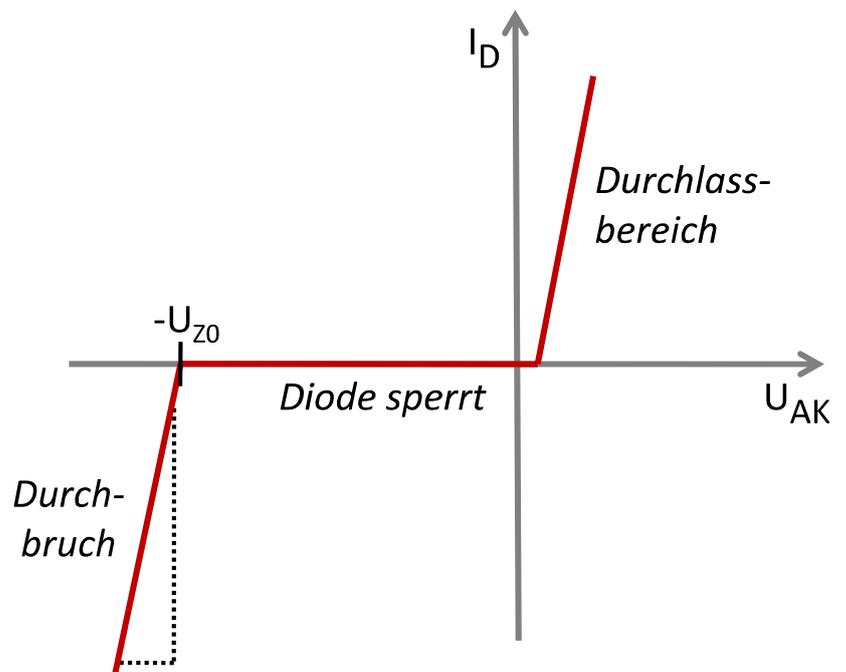
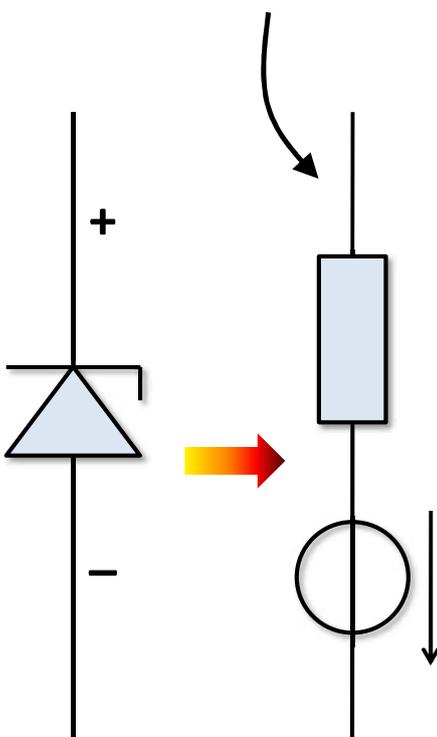
## Kennlinie der Z-Diode BZX84C6V2L

max. Verlustleistung: 225 mW



# Z-Diode (b)

## Lineares Ersatzschaltbild im Durchbruchbereich



**Idealisierte, linearisierte  
Kennlinie einer Z-Diode**

### (WS 2002/03 – FA, Aufgabe 3)

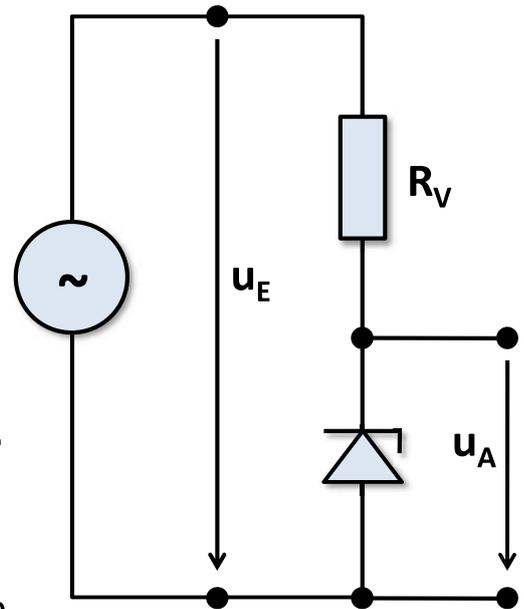
Eine Z-Diode wird an einer Wechselspannung mit dem Effektivwert  $u_{E,\text{eff}} = 10 \text{ V}$  betrieben. Die Daten der Z-Diode sind:

Sperrrichtung:  $U_{Z0} = 5,1 \text{ V}$  und  $r_Z = 2 \Omega$

Durchlassrichtung:  $U_S = 0,7 \text{ V}$  und  $r_F = 2 \Omega$

Der Vorwiderstand beträgt  $R_V = 10 \Omega$

- Bei welcher positiven Spannung  $u_A^+$  und bei welcher negativen Spannung  $u_A^-$  beginnt die Z-Diode gerade zu leiten bzw. zu sperren?
- Welche max. Ausgangsspannung  $u_{A,\text{max}}$  und welche min. Ausgangsspannung  $u_{A,\text{min}}$  treten bei den Scheitelwerten von  $u_E$  auf?
- Welche maximale Verlustleistung (Momentanwert)  $p_{V,\text{max}}$  tritt an der Z-Diode auf?



## 5. Anwendungen von Dioden in Stromversorgungseinheiten

Stromversorgungseinheiten („Netzgeräte“) erzeugen die von elektronischen Schaltungen benötigten Gleichspannungen. Sie bestehen oft aus den folgenden drei Blöcken:

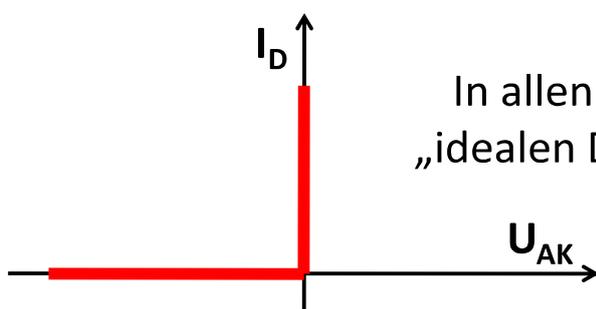
- **Transformator**
- **Gleichrichter und Glättungskondensator** (→Abschnitt 5.1)
- **Spannungsstabilisierung** (→Abschnitt 5.2)

Im **Transformator** wird die Netzwechselfspannung in eine Wechselspannung der benötigten Größe transformiert und im **Gleichrichter** gleichgerichtet. Der **Glättungskondensator** verringert die Welligkeit dieser Gleichspannung. Die **Spannungsstabilisierung** gleicht Schwankungen von Netzspannung und Belastung aus.

### 5.1. Netzgleichrichtung mit Dioden

In dieser Lehrveranstaltung werden folgende Gleichrichterschaltungen für Wechselstrom und Drehstrom betrachtet:

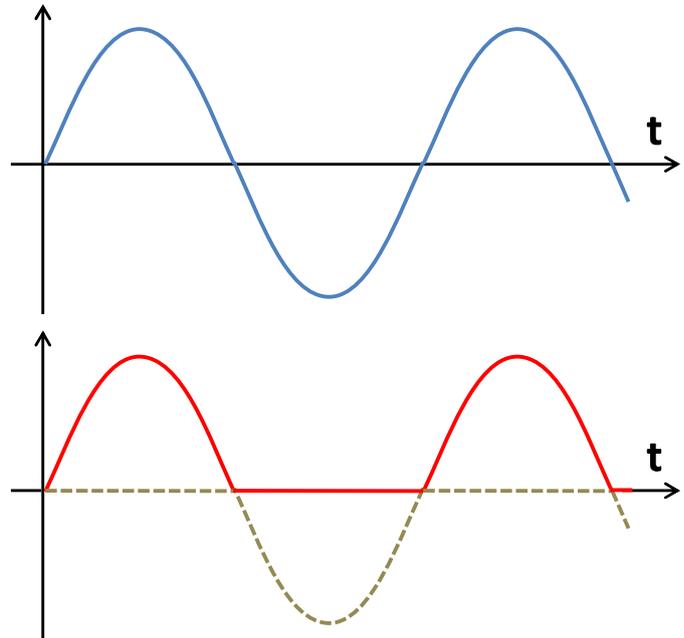
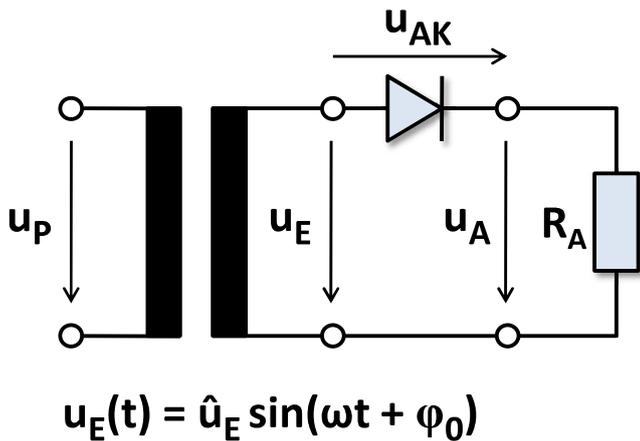
- **Einpuls-Mittelpunktschaltung** (M1, Einweggleichrichter)
- **Zweipuls-Brückenschaltung** (B2, Graetzschaltung)
- **Dreipuls-Mittelpunktschaltung** (M3)
- **Sechspuls-Brückenschaltung** (B6, Drehstrombrücke)



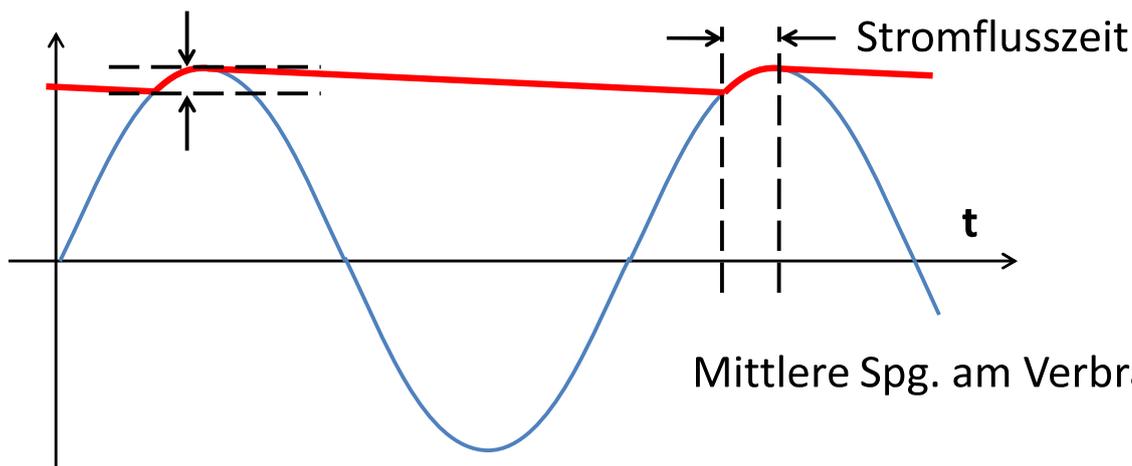
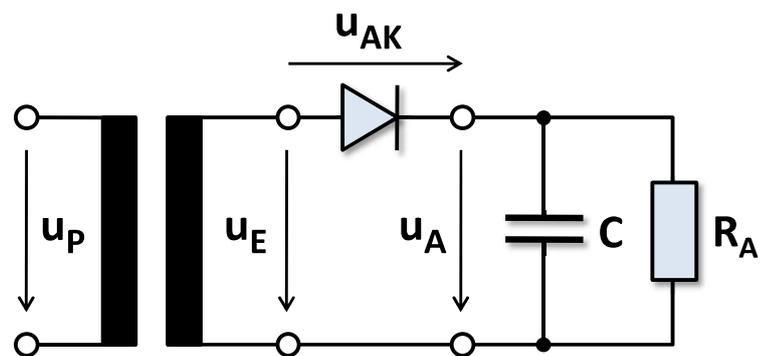
In allen Beispielen wird von „idealen Dioden“ ausgegangen.

Bei der **Einpuls-Mittelpunktschaltung** (auch **M1-Schaltung**, Einweggleichrichter) leitet die Diode nur während der positiven Halbwelle der Wechselspannung  $u_E$ .

$u_p$  = Spannung an der Primärseite des Transformators  
 $u_E$  = Spg. am Gleichrichter-Eingang



Die Ausgangsspannung der Einpuls-Mittelpunktschaltung wird praktisch immer geglättet. Dies geschieht am einfachsten durch Parallelschaltung eines **Glättungskondensators**.



Scheitelwert der gleichgerichteten Spannung	Zeitl. Mittelwert der gleichgerichteten Spannung	Maximale Sperrspannung an der Diode
	<b>Ohne Glättung:</b>	<b>Ohne Glättung:</b>
		<b>Mit Glättung:</b>

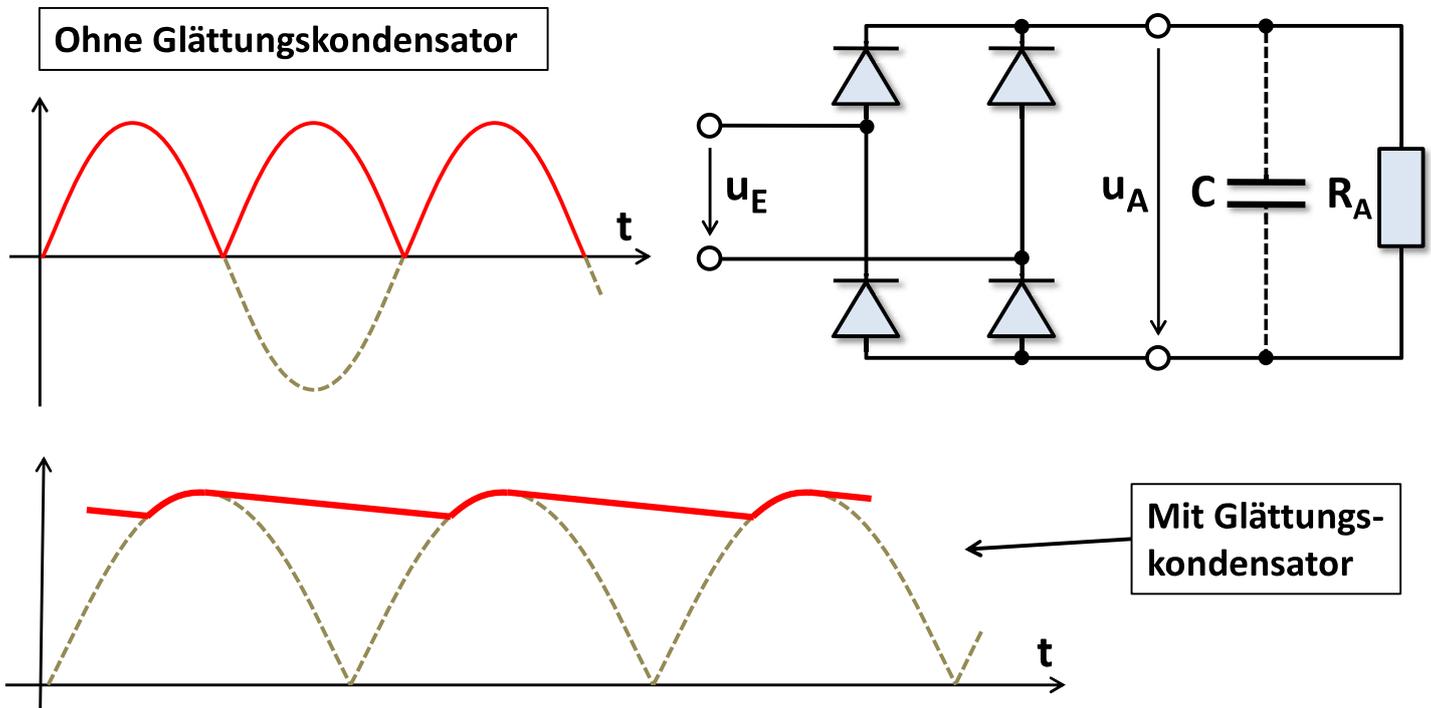
### Mit Glättungskondensator:

Periodische Spannungsdifferenz am Glättungskondensator

Mittelwert der gleichgerichteten Spannung

## Zweipuls-Brückenschaltung (a)

Die **Zweipuls-Brückenschaltung** (auch **B2-Schaltung**, Graetzschaltung) ist die wichtigste Gleichrichterschaltung für Einphasen-Wechselstrom.



5. Anwendungen von Dioden

7

## Zweipuls-Brückenschaltung (b)

Scheitelwert der gleichgerichteten Spannung	Zeitl. Mittelwert der gleichgerichteten Spannung	Maximale Sperrspannung an den Dioden
	<b>Ohne Glättung:</b>	<b>Mit und ohne Glättung:</b>

5. Anwendungen von Dioden

8

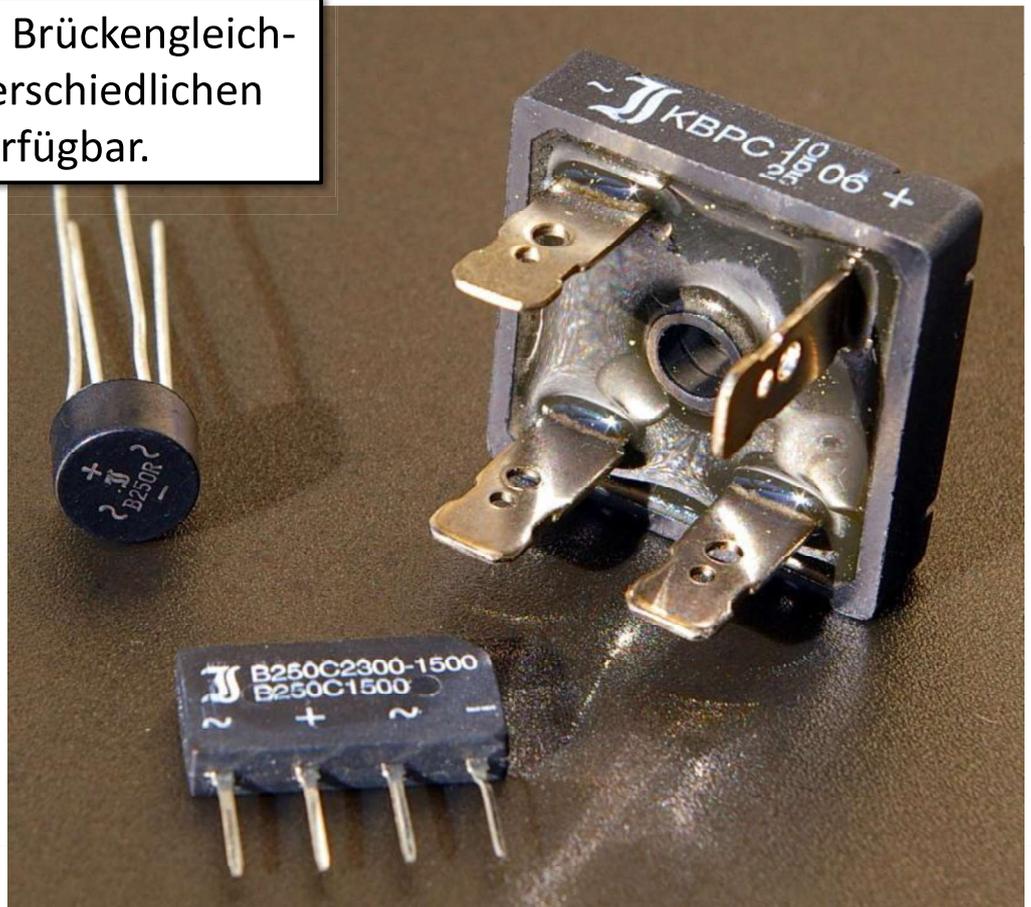
### Mit Glättungskondensator:

Periodische Spannungsdifferenz am Glättungskondensator

Mittelwert der gleichgerichteten Spannung

## Zweipuls-Brückenschaltung (d)

Fertig verschaltete Brückengleichrichter sind in unterschiedlichen Leistungsstufen verfügbar.

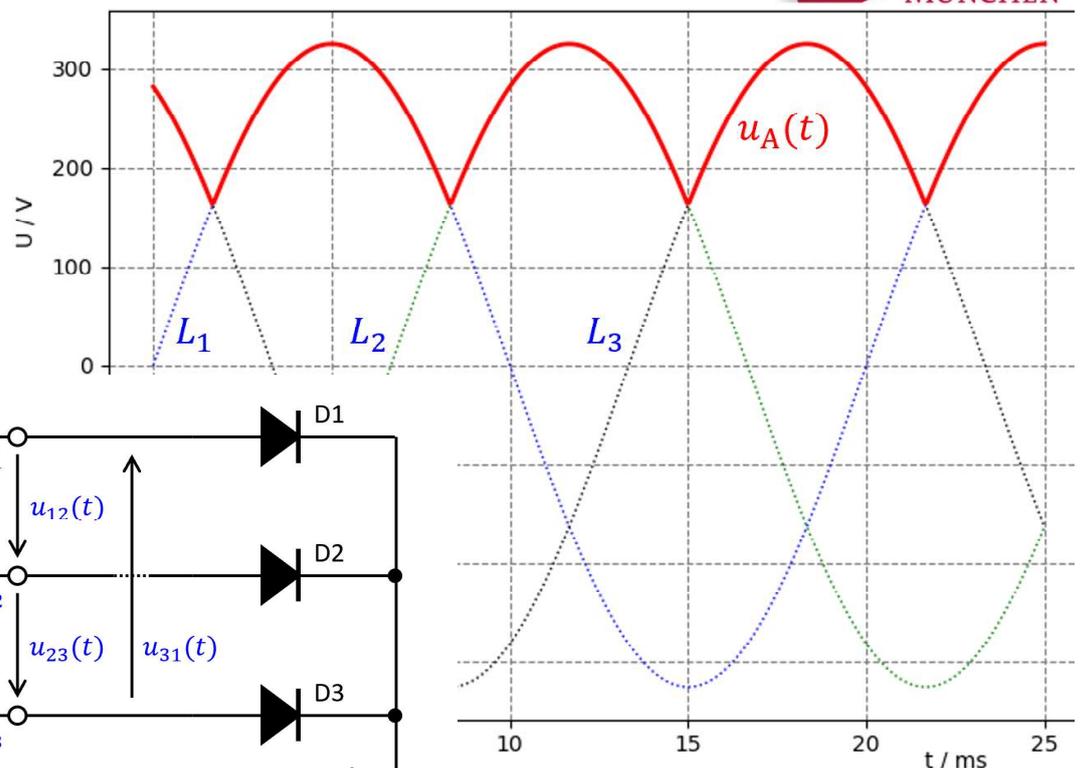
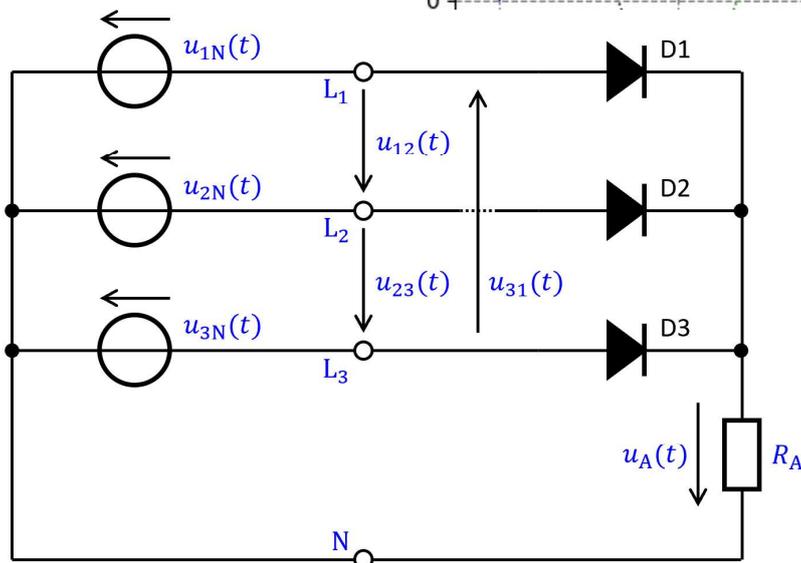


Für mittlere Leistungen ab einigen Kilowatt aufwärts werden **Drehstromgleichrichter** wie die Dreipuls-Mittelpunktschaltung (M3) oder die Sechspuls-Brückenschaltung (B6) eingesetzt:

- Im Vergleich zu den bisher betrachteten Gleichrichterschaltungen für einphasigen Wechselstrom ist die Welligkeit der gleichgerichteten Spannung kleiner.
- Der Aufwand für die Glättung ist aus diesem Grund geringer. Oft kann auf eine Glättung sogar ganz verzichtet werden.
- Eine typische Anwendung dieser Gleichrichterschaltungen findet sich bei Straßenbahnen, die oft mit Gleichspannungen von 500...750 V betrieben werden. Sie werden auch in den heute üblichen KFZ-Drehstromgeneratoren eingesetzt. (In beiden Fällen ohne weitere Glättung).

# Dreipuls-Mittelpunktschaltung (b)

Weitere  
Bezeichnung:  
**M3-Schaltung**

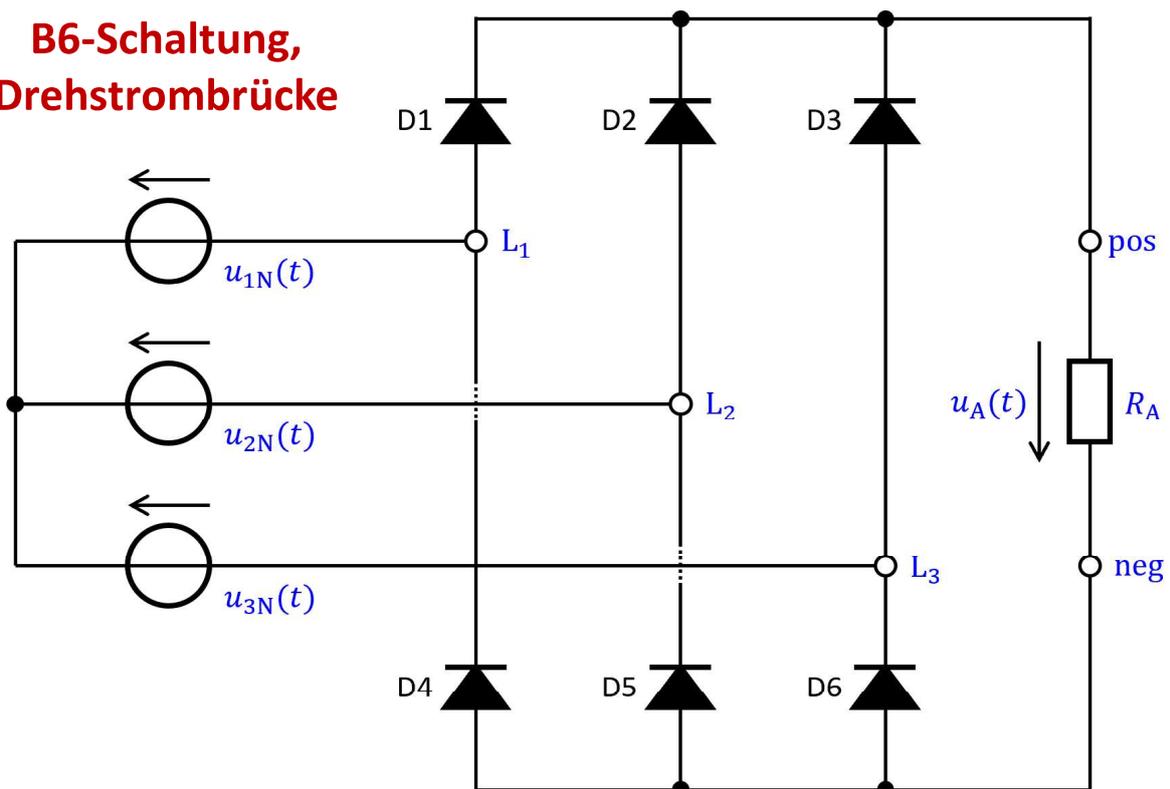


Scheitelwert der gleichgerichteten Spannung	Zeitl. Mittelwert der gleichgerichteten Spannung	Maximale Sperrspannung an den Dioden

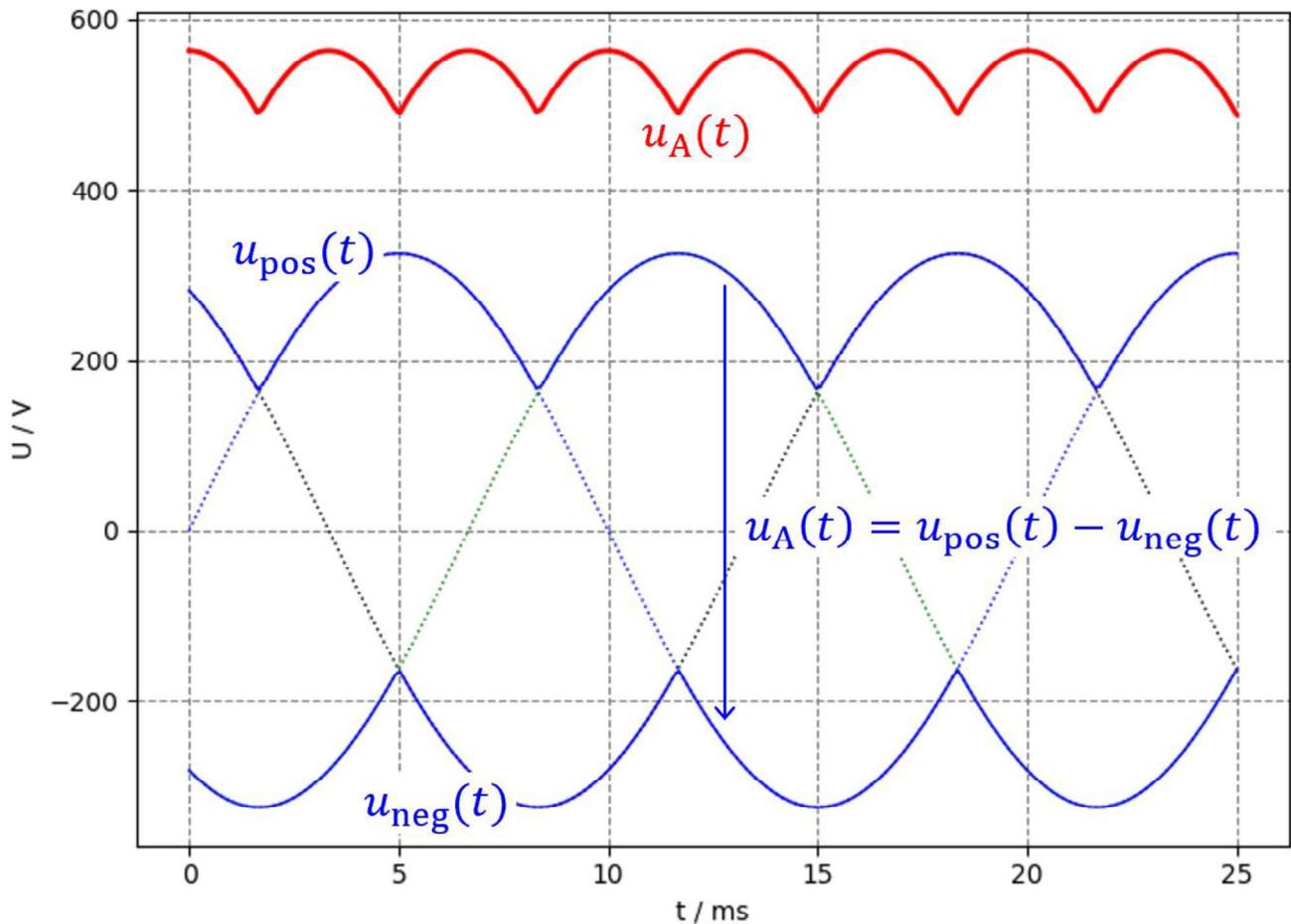
# Sechspuls-Brückenschaltung (a)

Weitere Bezeichnungen:

**B6-Schaltung,  
Drehstrombrücke**



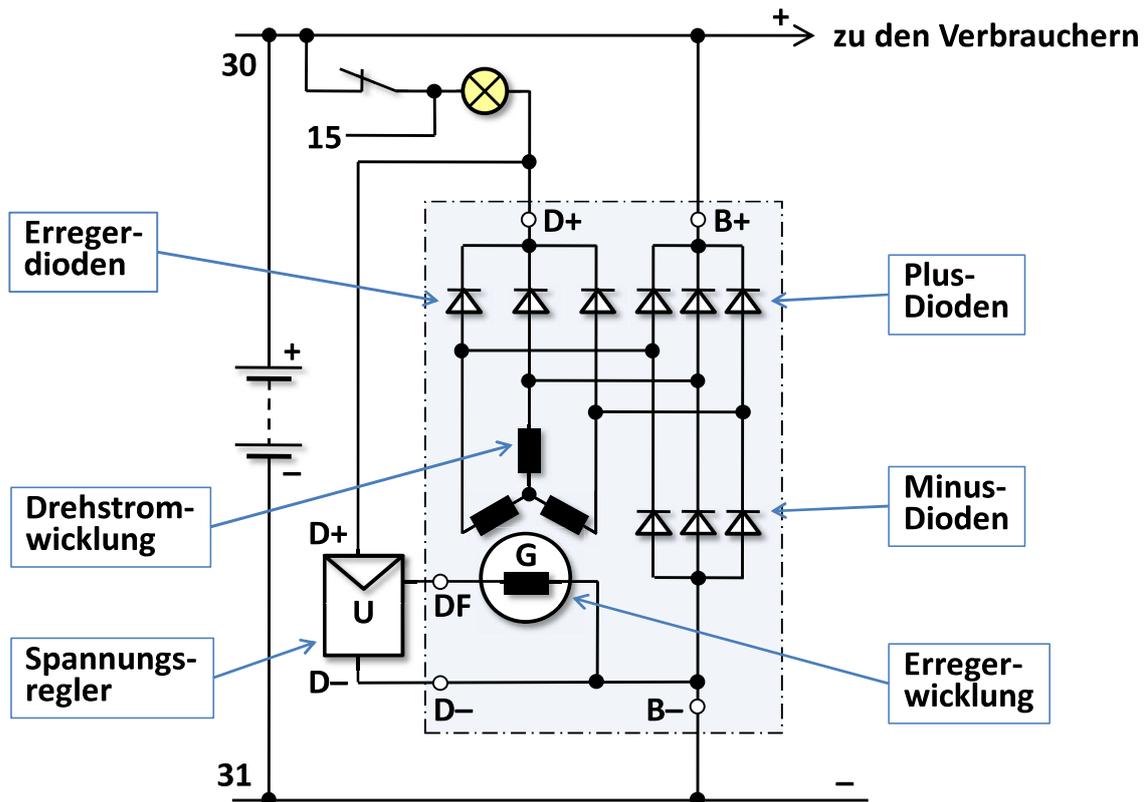
## Sechspuls-Brückenschaltung (b)



15

## Sechspuls-Brückenschaltung (c)

Scheitelwert der gleichgerichteten Spannung	Zeitl. Mittelwert der gleichgerichteten Spannung	Maximale Sperrspannung an den Dioden

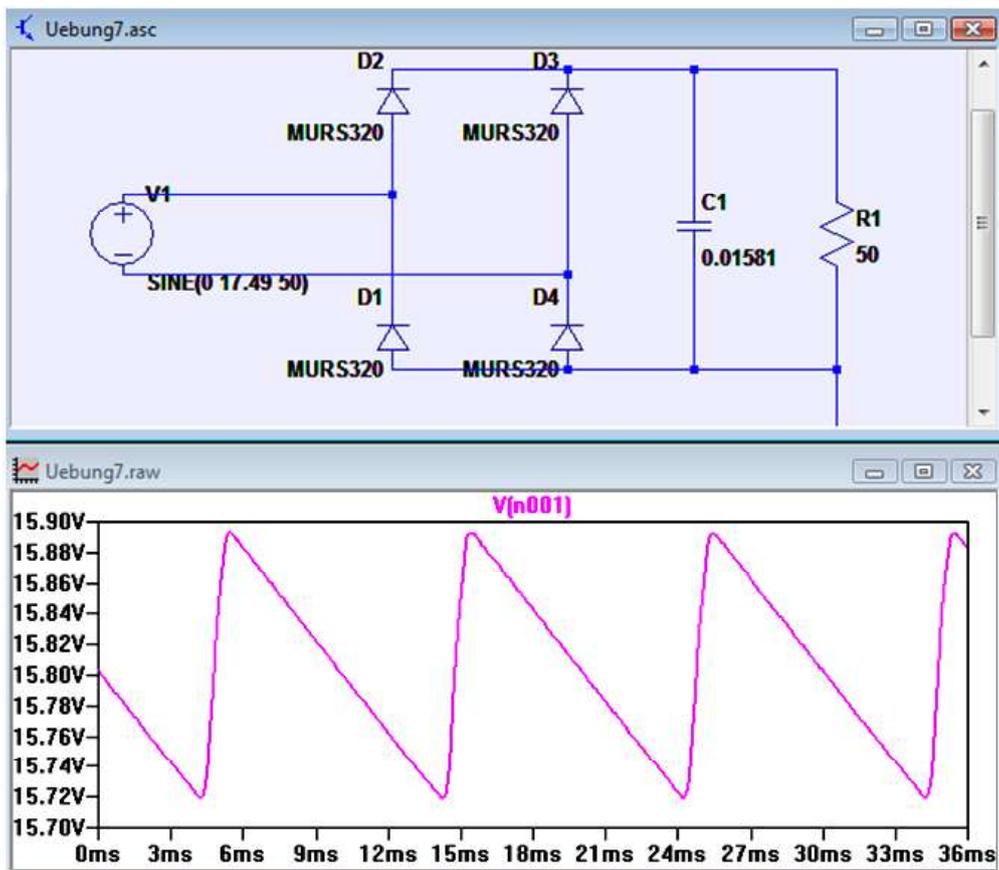


## Übungsaufgabe 5.1

Die Ausgangsspannung einer B2-Schaltung versorgt einen Lastwiderstand  $R_A = 50 \Omega$  und wird mit Hilfe eines Kondensators  $C$  geglättet. Die Wechselspannung am Eingang des Gleichrichters hat eine Frequenz von 50 Hz. Sie wird von einem Transformator geliefert, der Innenwiderstand des Trafos kann vernachlässigt werden. An den Dioden fällt eine Durchlassspannung von 0,75 V ab.

- i) Der Widerstand soll eine mittlere Leistung von  $P = 5 \text{ W}$  aufnehmen. Wie groß muss der Kondensator  $C$  sein, damit die Spannung am Widerstand um maximal  $\pm 0,1 \text{ V}$  schwankt?
- ii) Welchen Effektivwert muss der Trafo liefern, damit sich am Widerstand eine mittlere Gleichspannung von 5 V einstellt?
- iii) Welche Sperrspannung müssen die Dioden aushalten können?

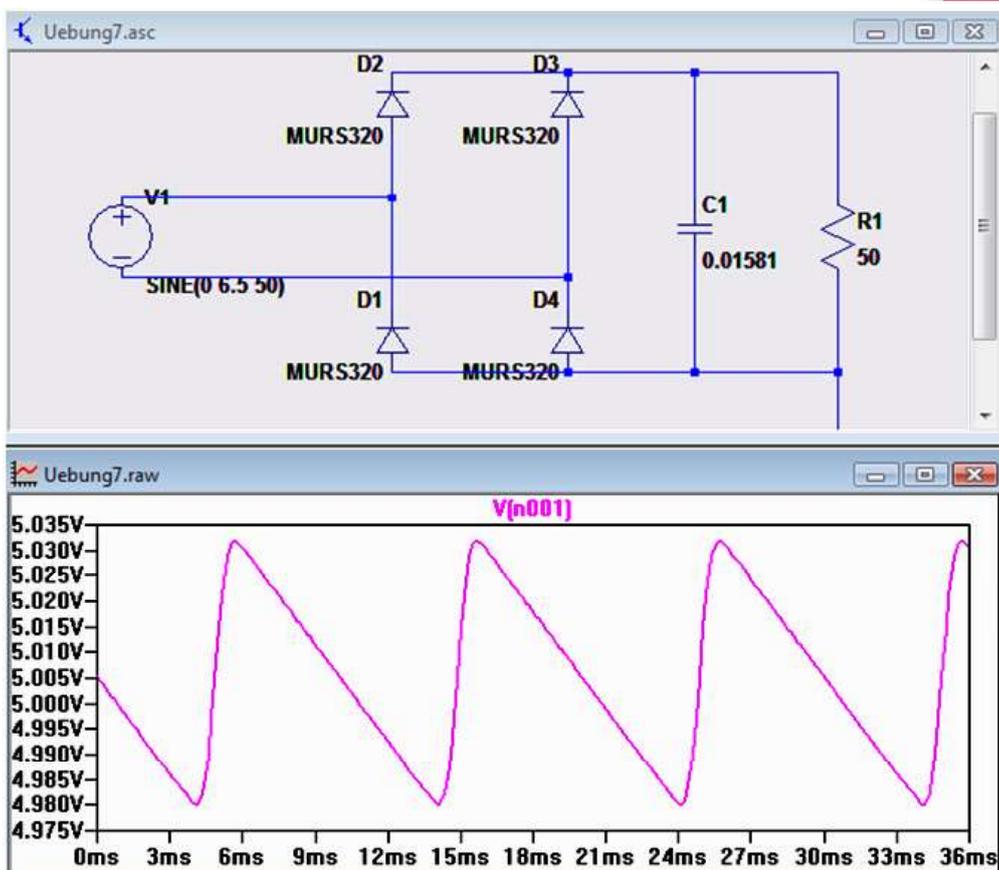
## Übungsaufgabe 5.1, Simulation zu (i)



5. Anwendungen von Dioden

19

## Übungsaufgabe 5.1, Simulation zu (ii)

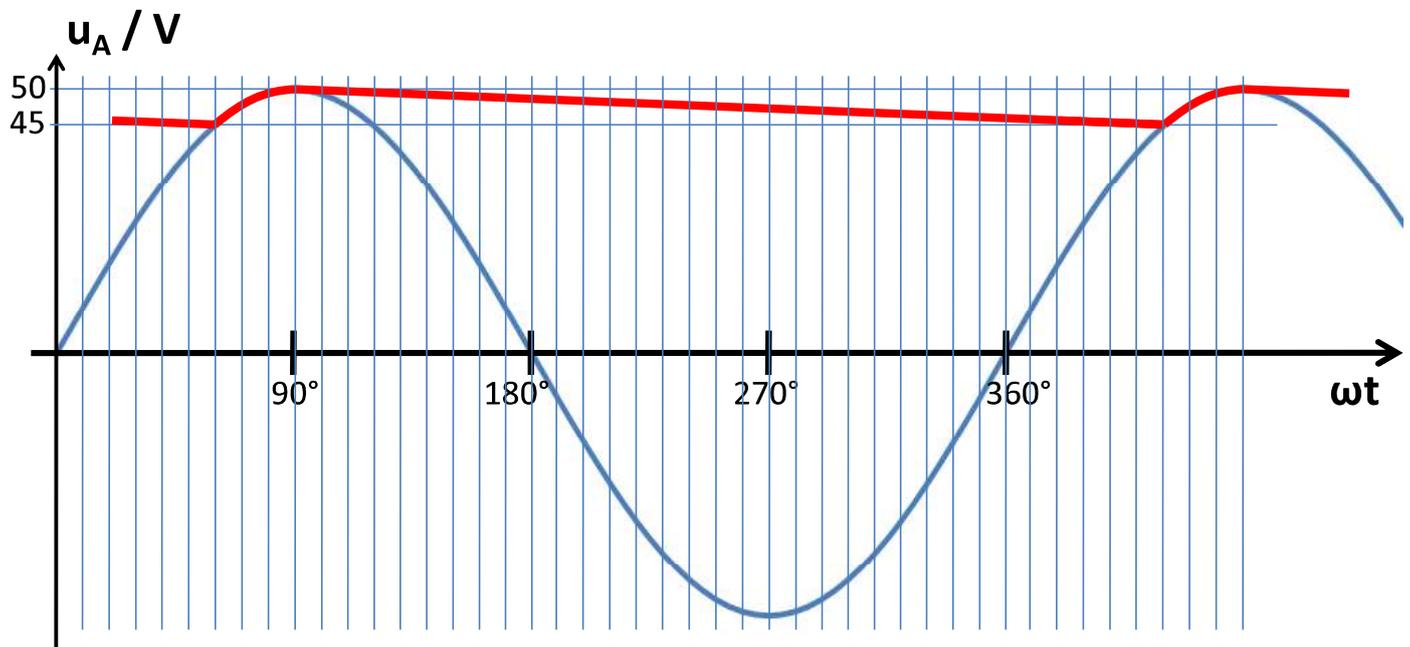


5. Anwendungen von Dioden

20

## Übungsaufgabe 5.2 (a)

Eine Gleichrichterschaltung für Netzspannung mit  $f = 50 \text{ Hz}$  ist als einpulsige Mittelpunktschaltung (M1) mit Lastwiderstand  $R_A$  und Glättungskondensator  $C$  ausgeführt. Auf dem Oszilloskop zeigt sich der folgende Verlauf der Ausgangsspannung:



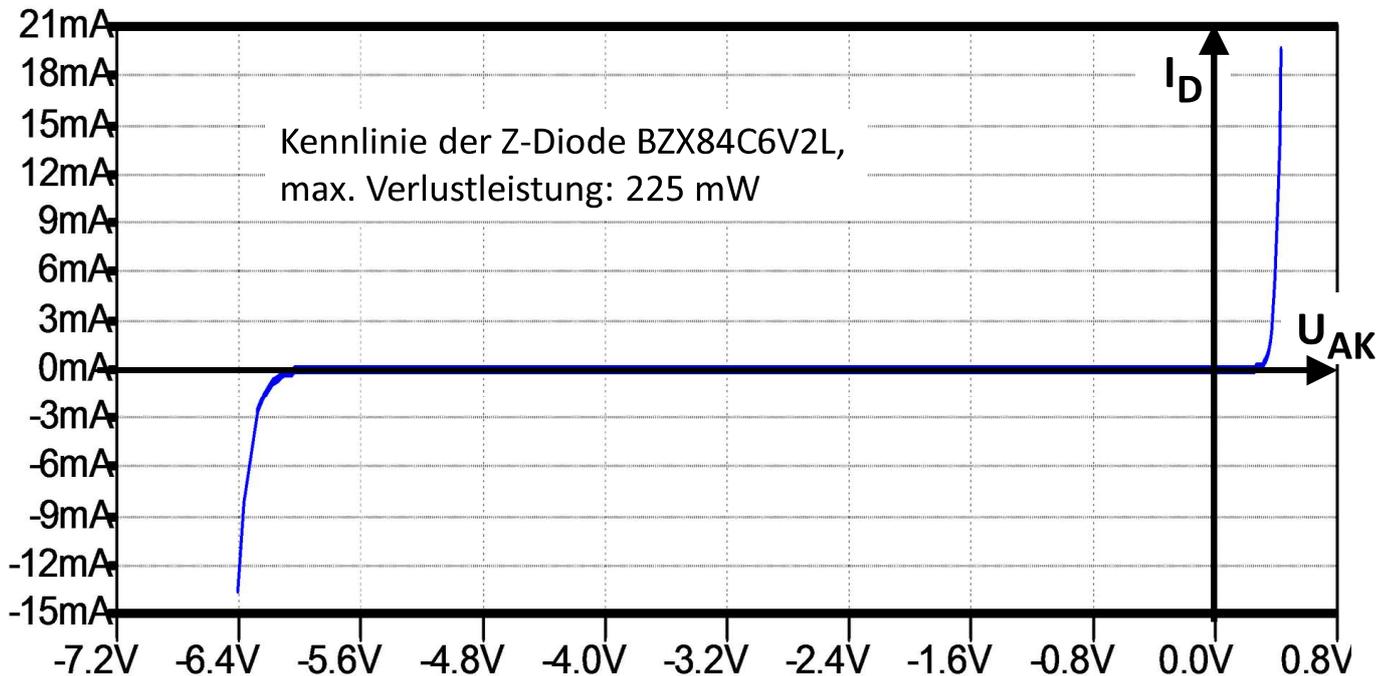
5. Anwendungen von Dioden

21

## Übungsaufgabe 5.2 (b)

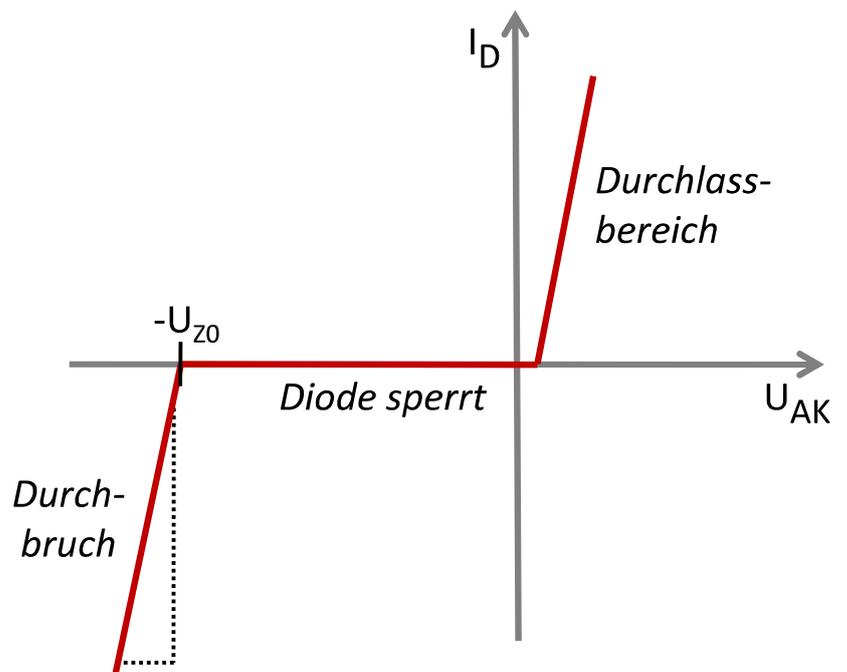
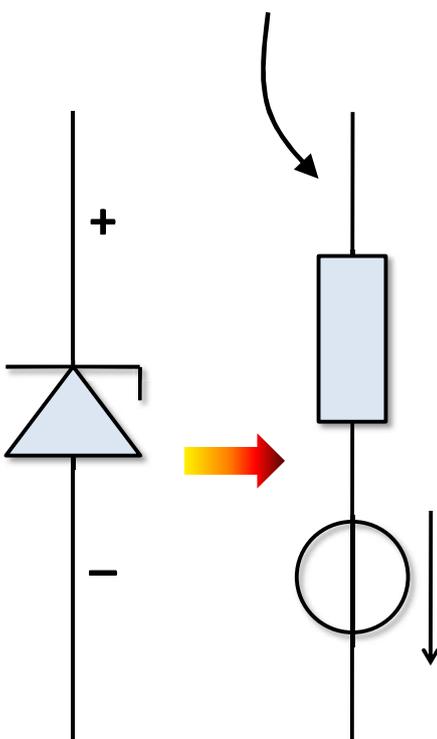
- Bestimmen Sie aus dem Diagramm den Stromflusswinkel  $\Theta$ , die Stromflusszeit  $t_s$  sowie den Mittelwert der gleichgerichteten Spannung am Lastwiderstand  $R_A$ .
- Welche Ladung  $\Delta Q$  wird dem Glättungskondensator  $C = 1000 \mu\text{F}$  während der Stromflussphase zugeführt?
- Bestimmen Sie die Zeitkonstante  $\tau$  des RC-Gliedes und die Größe des Lastwiderstands  $R_A$ .
- Berechnen Sie den mittleren Strom  $I_A$  durch den Widerstand  $R_A$ .

## 5.2. Spannungsstabilisierung mit Z-Diode



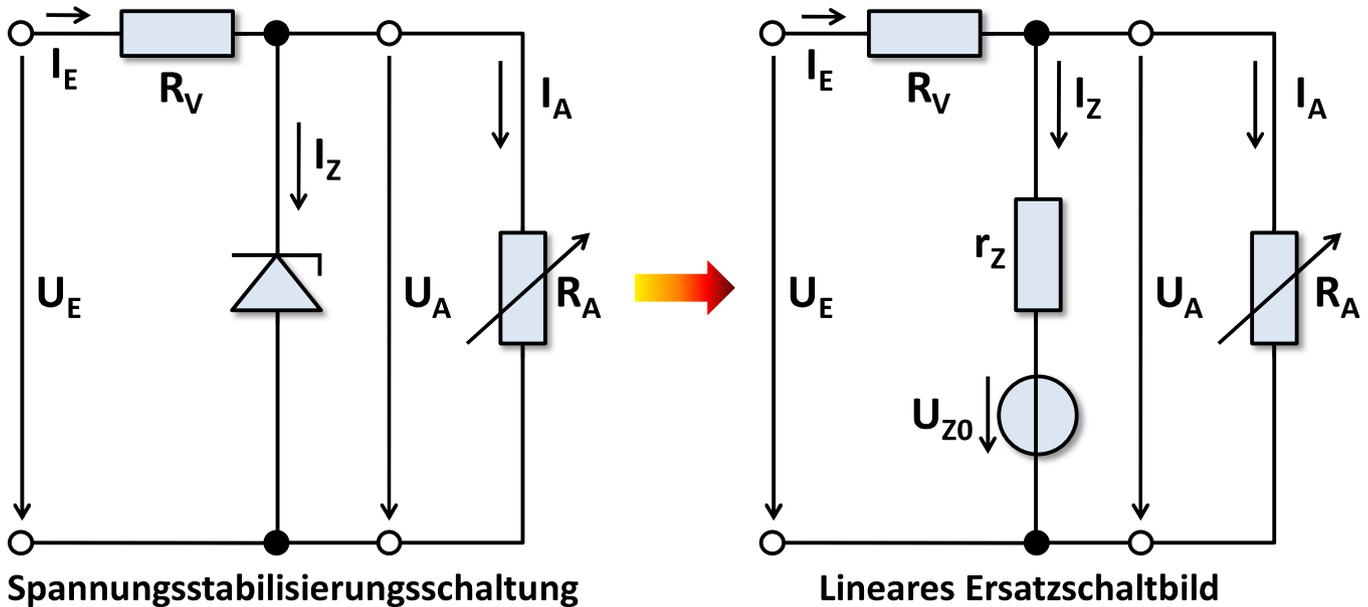
### Spannungsstabilisierung mit Z-Diode (a)

Lineares Ersatzschaltbild  
im Durchbruchbereich



Idealisierte, linearisierte  
Kennlinie einer Z-Diode

Die Abbildung zeigt eine Schaltung zur **Spannungsstabilisierung mit einer Z-Diode**. Trotz schwankender Versorgungsspannung  $U_E$  und wechselnder Last  $R_A$  wird die Spannung  $U_A$  stabil gehalten.



Schwankt die Eingangsspannung im Bereich  $U_{E,\min} < U_E < U_{E,\max}$  und bewegt sich der Ausgangsstrom (Laststrom zum Verbraucher) im Bereich  $I_{A,\min} < I_A < I_{A,\max}$ , ergeben sich folgende Grenzen für  $R_V$ :

- Der größte zulässige Strom durch die Z-Diode ( $I_{Z,\max}$ ) wird durch die max. Verlustleistung der Diode bestimmt.
- Für  $I_{Z,\min}$  gilt näherungsweise:  $I_{Z,\min} \approx 0,1 \cdot I_{Z,\max}$

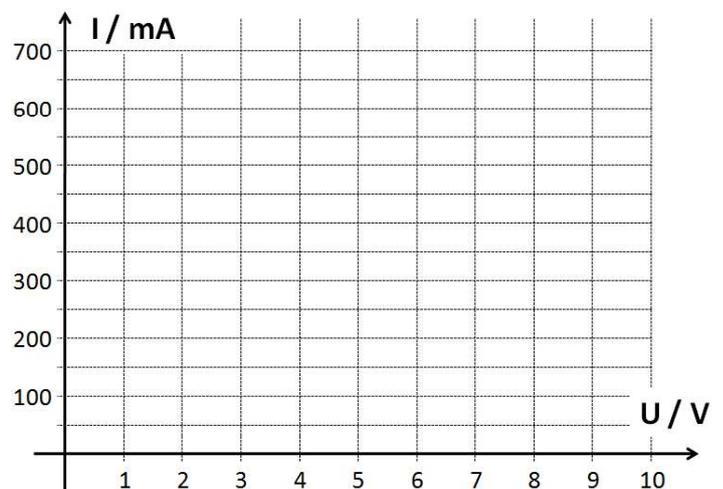
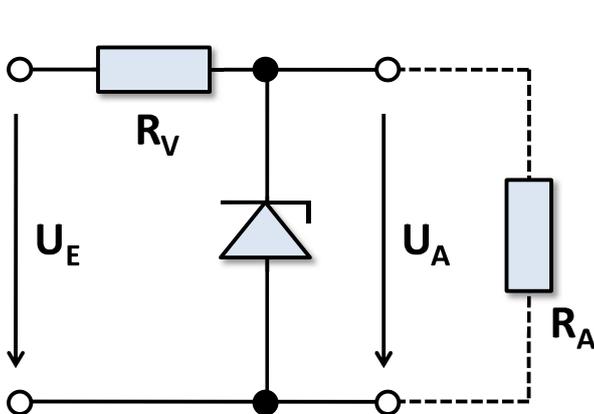
Die Qualität der Spannungsstabilisierung wird durch den Glättungsfaktor  $G$  beschrieben:

Den besten Glättungsfaktor erhält man, wenn man den Vorwiderstand  $R_V$  unter Berücksichtigung der (auf der vorherigen Folie angegebenen) möglichen Grenzen möglichst groß macht.

## Übungsaufgabe 5.3 (a)

WS 2006/07 – FA, A2

Gegeben ist die nachfolgende Stabilisierungsschaltung mit einem Vorwiderstand  $R_V$  und einer Z-Diode ( $U_{Z0} = 5\text{ V}$ ,  $r_Z = 5\ \Omega$ ).

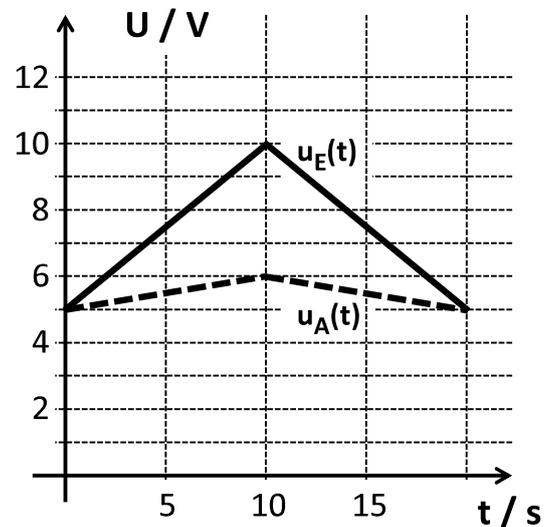


- a) Tragen Sie die linearisierte Kennlinie der Z-Diode in das Diagramm ein.

## Übungsaufgabe 5.3 (b)

Die Schaltung wird in den Aufgabenteilen (b) bis (d) zunächst ohne Lastwiderstand  $R_A$  betrieben!

b) Im folgenden Diagramm ist für die variierende Eingangsspannung  $u_E(t)$  die dazugehörige Ausgangsspannung  $u_A(t)$  gegeben. Ermitteln Sie aus den Verläufen den Glättungsfaktor  $G$ .



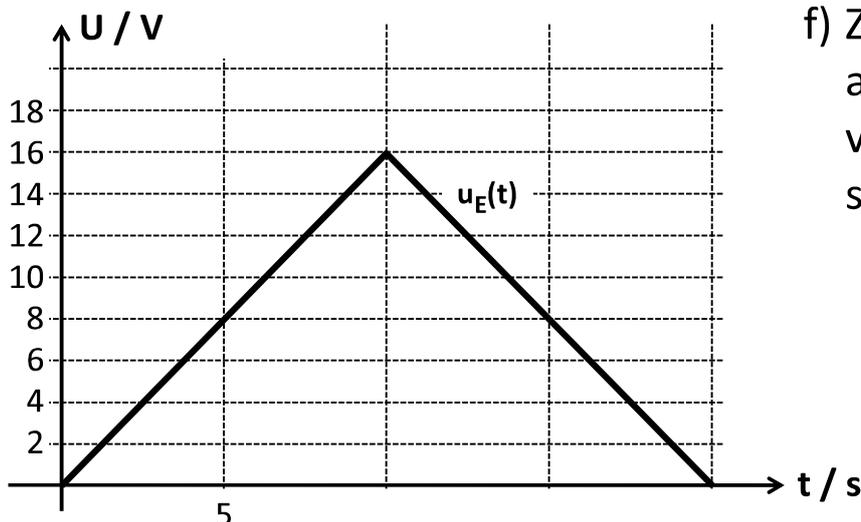
c) Bestimmen Sie die Größe des verwendeten Vorwiderstands  $R_V$ .

d) Tragen Sie die Arbeitsgeraden für  $U_E = 5$  V und  $U_E = 10$  V jeweils in das U-I-Diagramm von Aufgabenteil (a) ein.

## Übungsaufgabe 5.3 (c)

Nun wird die Schaltung mit einem Vorwiderstand  $R_V = 20 \Omega$  und einem Lastwiderstand  $R_A = 20 \Omega$  betrieben. Lösen Sie die folgenden Unterpunkte ohne Verwendung von Näherungen.

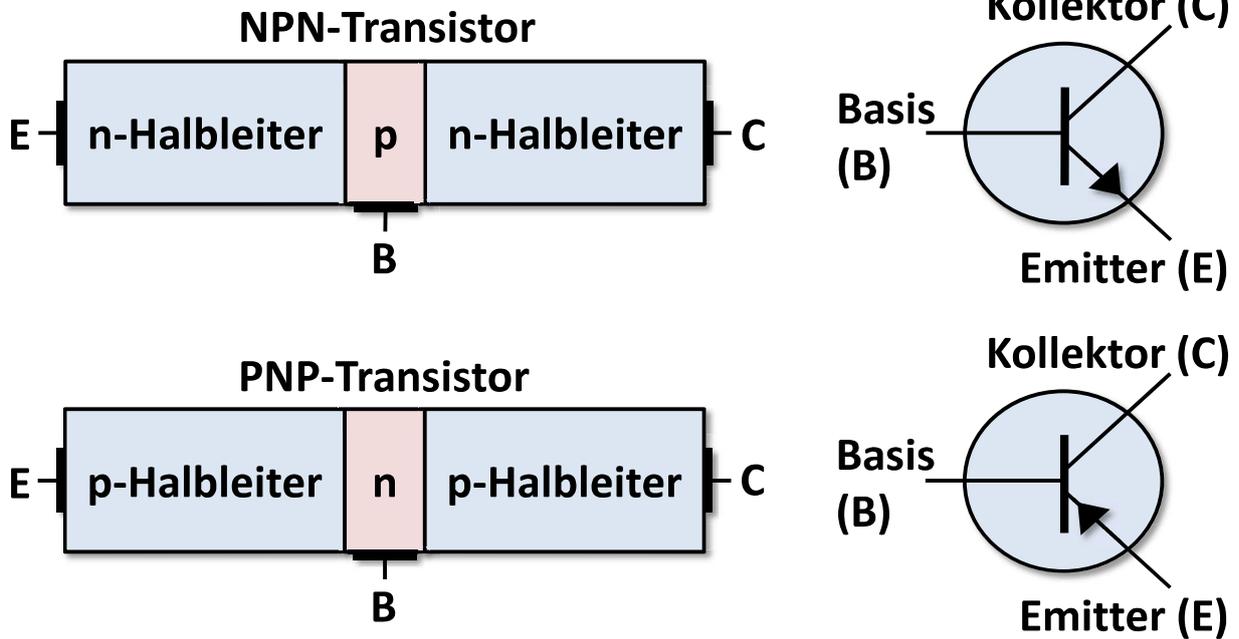
e) Wie groß ist die Eingangsspannung  $U_E$ , wenn die Ausgangsspannung  $U_A = 6$  V beträgt?



f) Zeichnen Sie für den angegebenen Verlauf von  $u_E(t)$  die Ausgangsspannung  $u_A(t)$  ein.

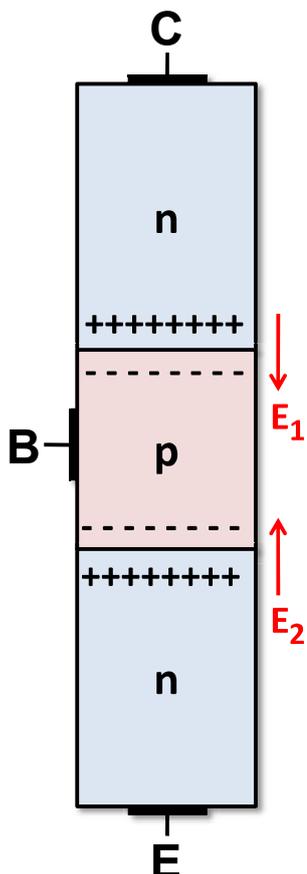
# 6. Bipolare Transistoren

## 6.1. Funktionsweise



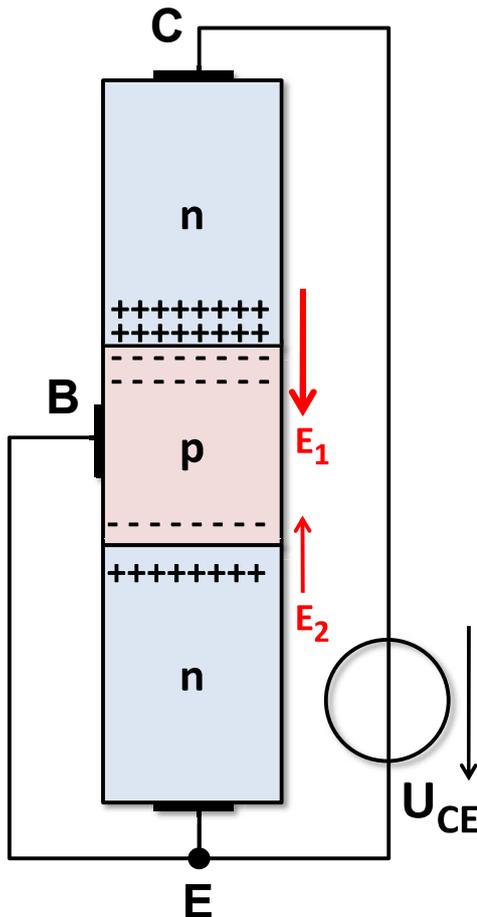
6. Bipolare Transistoren

### Funktionsweise des NPN-Transistors (a)



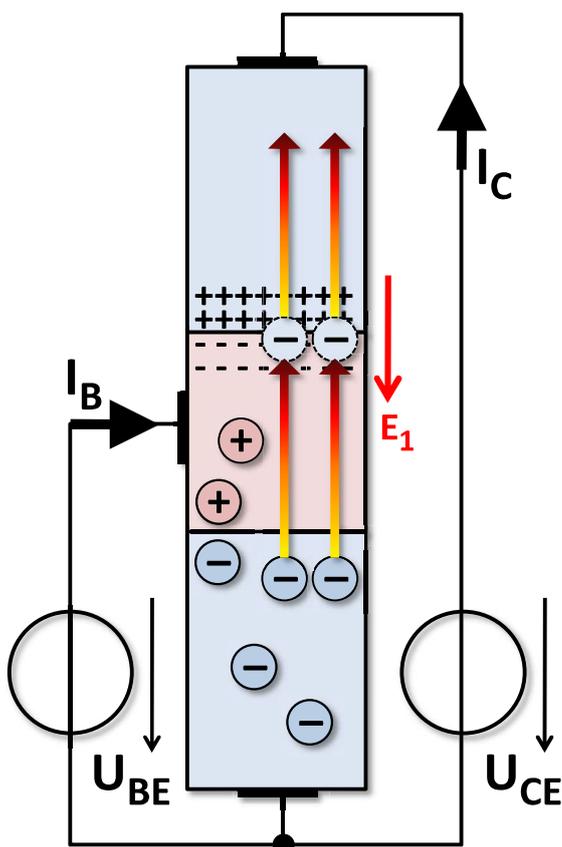
Auf dieser und den folgenden Folien ist die Funktionsweise eines NPN-Transistors in der sog. Emitterschaltung dargestellt. Die in Wirklichkeit sehr dünne Basis ist dabei übertrieben breit gezeichnet.

Die erste Abbildung zeigt, wie sich an den beiden Grenzschichten Raumladungszonen bilden – vergleichbar der Raumladungszone in einer Diode. In diesen beiden Zonen herrschen die elektrischen Feldstärken  $E_1$  und  $E_2$ .



Legt man zwischen Kollektor und Emitter eine Spannung  $U_{CE}$  an und verbindet zugleich die Basis mit dem Emitter, so befindet sich die „Kollektor-Basis-Diode“ in Sperrrichtung. Die Feldstärke  $E_1$  steigt, die Raumladungszone verbreitert sich.

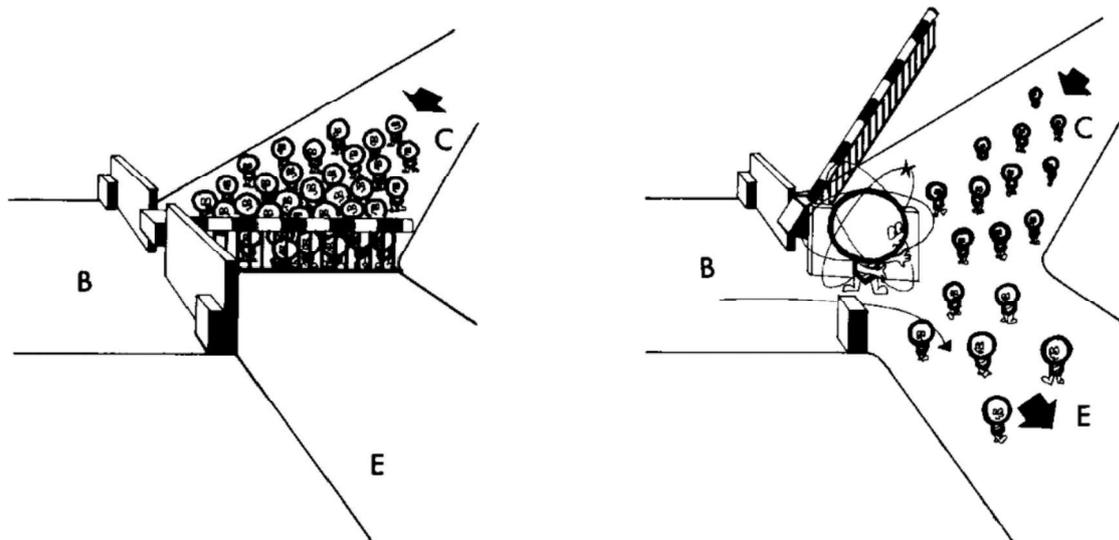
Die Raumladungszone zwischen Basis und Emitter bleibt unverändert. Insgesamt fließt nur ein kleiner Sperrstrom.



Eine zusätzliche Spannung zwischen Basis und Emitter, so dass die „Basis-Emitter-Diode“ in Durchlassrichtung betrieben wird, verkleinert die Raumladungszone zwischen Basis und Emitter.

Nun können die vielen freien Elektronen (Majoritätsträger!) aus dem Emitter in die Basis fließen. Nur sehr wenige Elektronen rekombinieren dort mit Löchern in der Basis. Der überwiegende Anteil der Elektronen diffundiert durch die sehr dünne Basis hindurch, gerät in das elektrische Feld  $E_1$  und wird zum Kollektor hin geradezu „abgesaugt“.

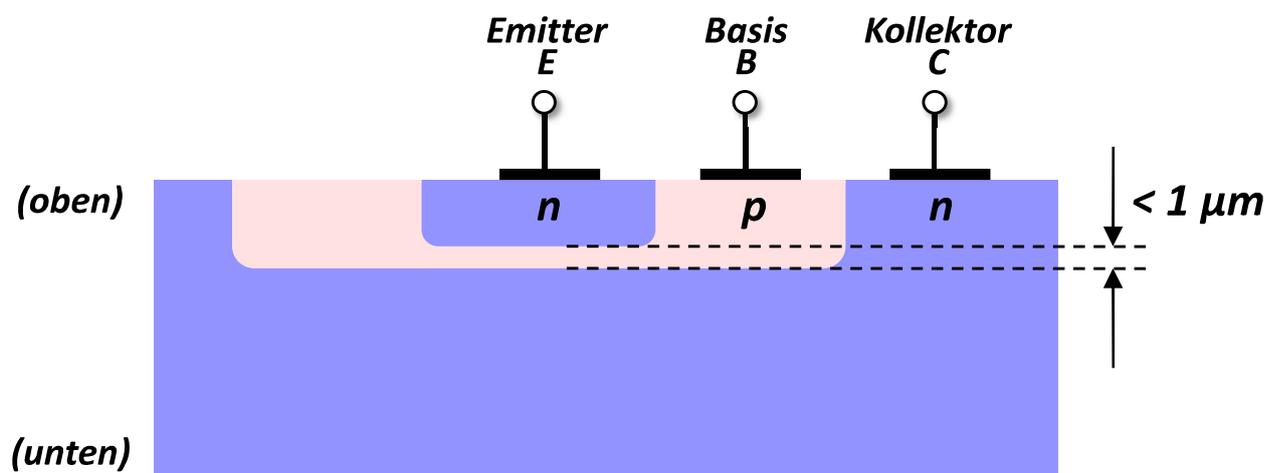
Zur einfacheren Schaltungsberechnung kann man den Transistor „von außen betrachtet“ als Bauelement ansehen, bei dem ein großer Kollektorstrom  $I_C$  (Laststrom) proportional von einem kleinen Basisstrom  $I_B$  (Steuerstrom) abhängt.



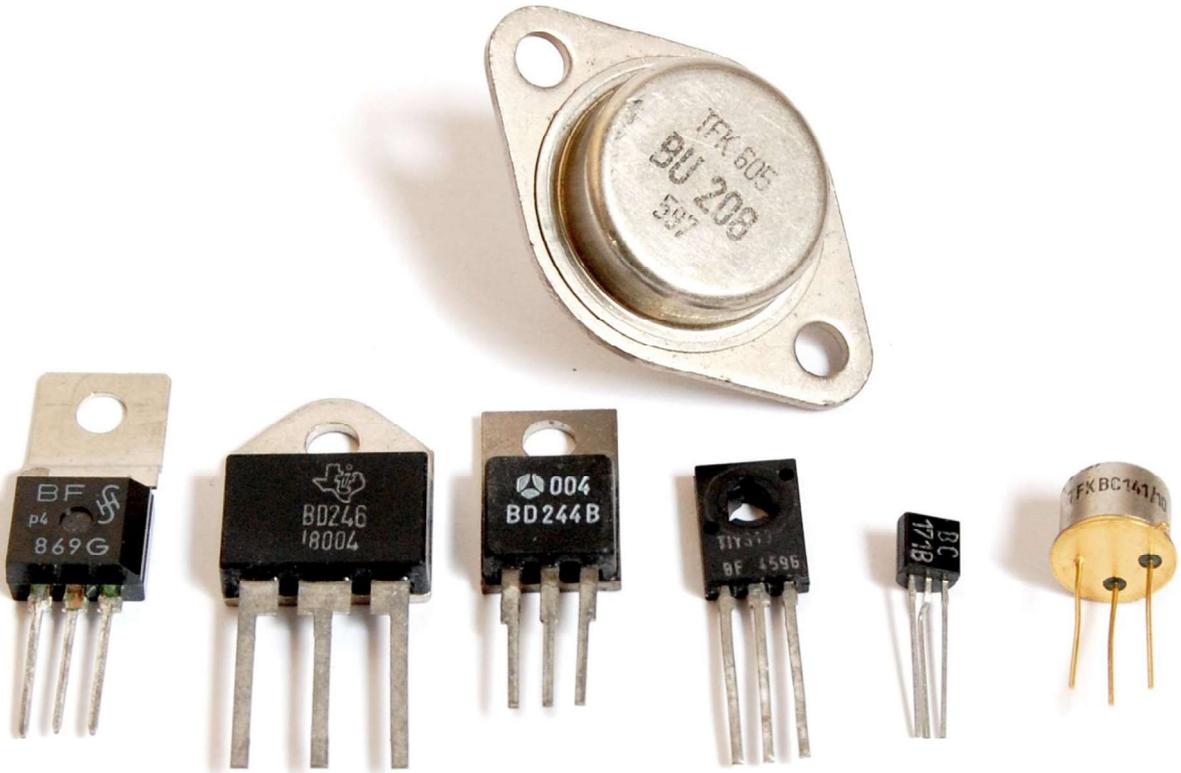
Quelle: Philips, Experimentierkasten EE2040 (1976), siehe auch: <http://ee.old.no>

## Innerer Aufbau eines Transistors

Schematischer Aufbau eines npn-Bipolartransistors in Epitaxie-Planartechnik:

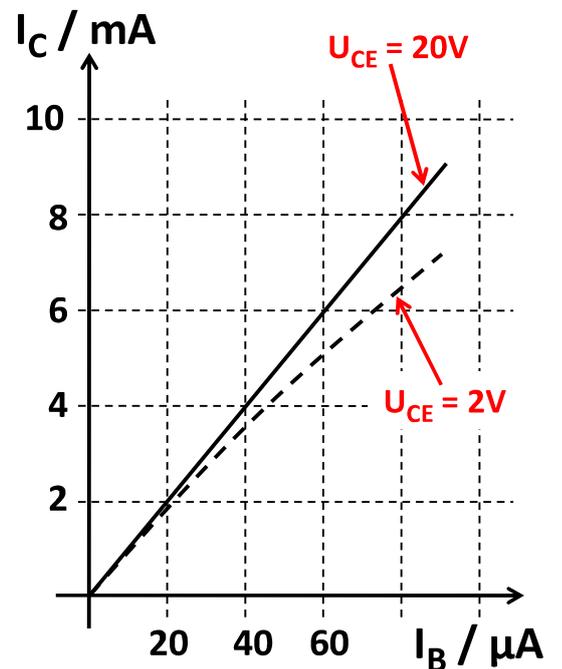
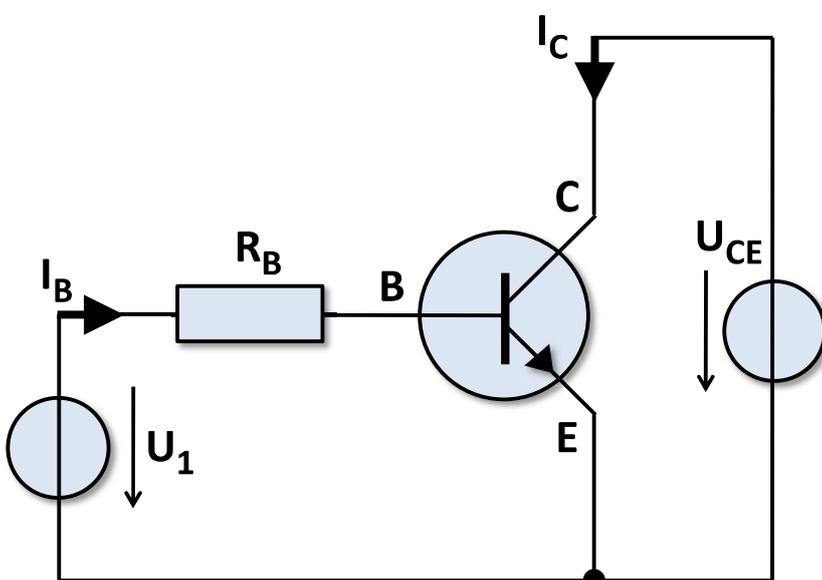


Epitaxie (griech.): Kristallaufbau durch Anlagerung von Atomen oder Molekülen. Dabei wird die Struktur des Ausgangskristalls durch die angelagerten Atome oder Moleküle fortgesetzt.



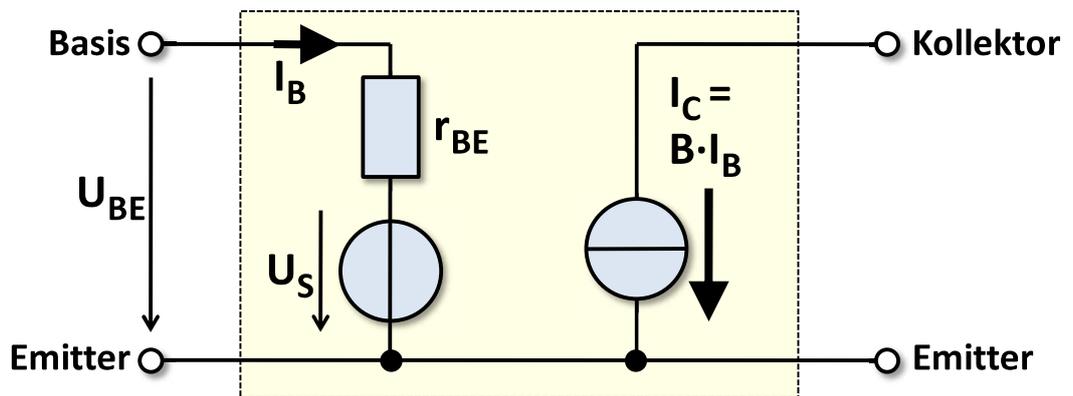
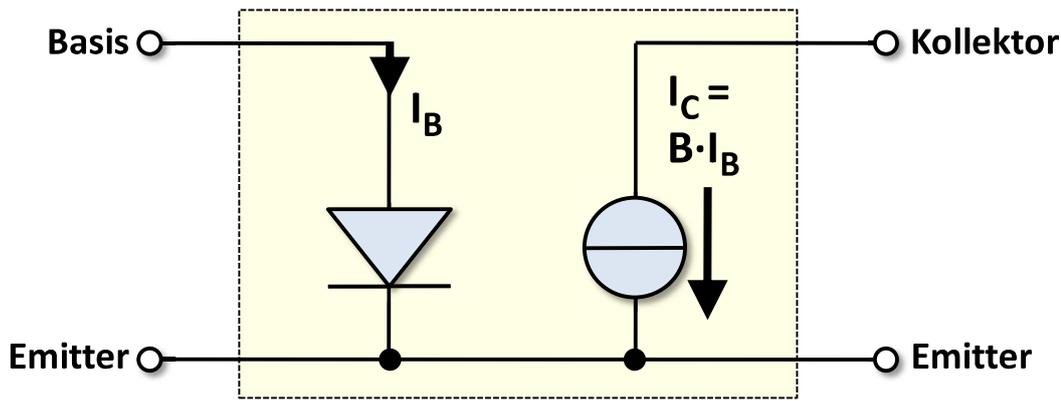
6. Bipolare Transistoren

## 6.2. Ersatzschaltbild



6. Bipolare Transistoren

## Ersatzschaltbild des NPN-Transistors



6. Bipolare Transistoren

9

## Zusammenhang zwischen $I_B$ , $I_C$ und $U_{CE}$

Großsignalverstärkung,  
auch: Gleichstromverstärkung

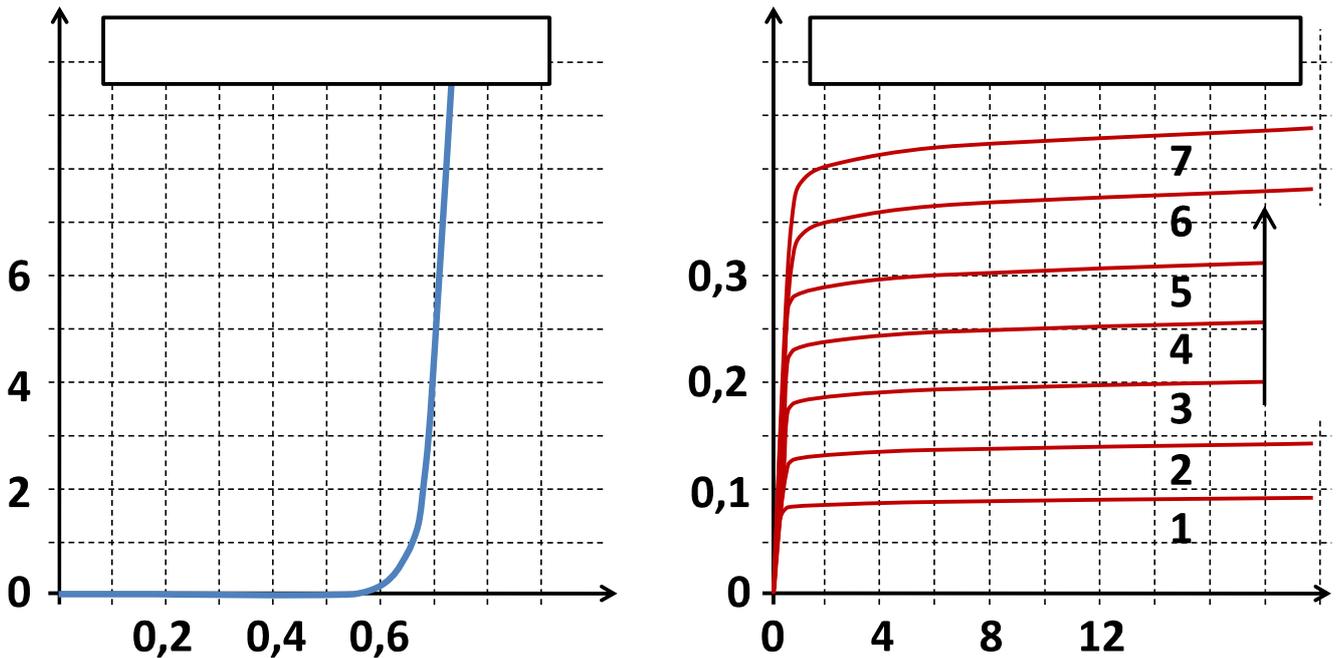
Kleinsignalverstärkung, auch:  
differentielle Stromverstärkung

Steilheit

6. Bipolare Transistoren

10

## 6.3. Kennlinien des NPN-Transistors

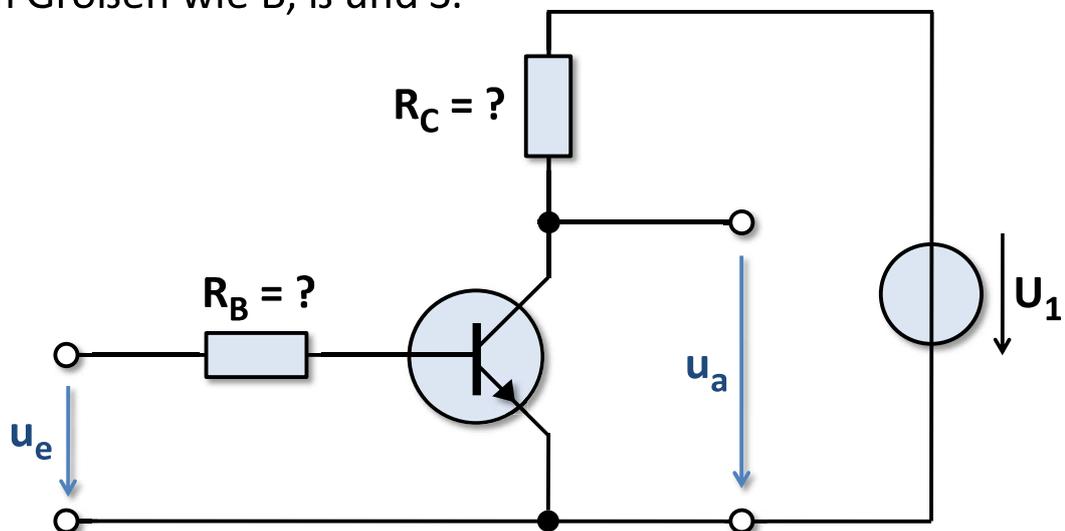


Die Kennlinien sind temperaturabhängig. Insbesondere verschieben sich die Ausgangskennlinien mit zunehmender Temperatur nach oben.

## Berechnung von Verstärkerschaltungen

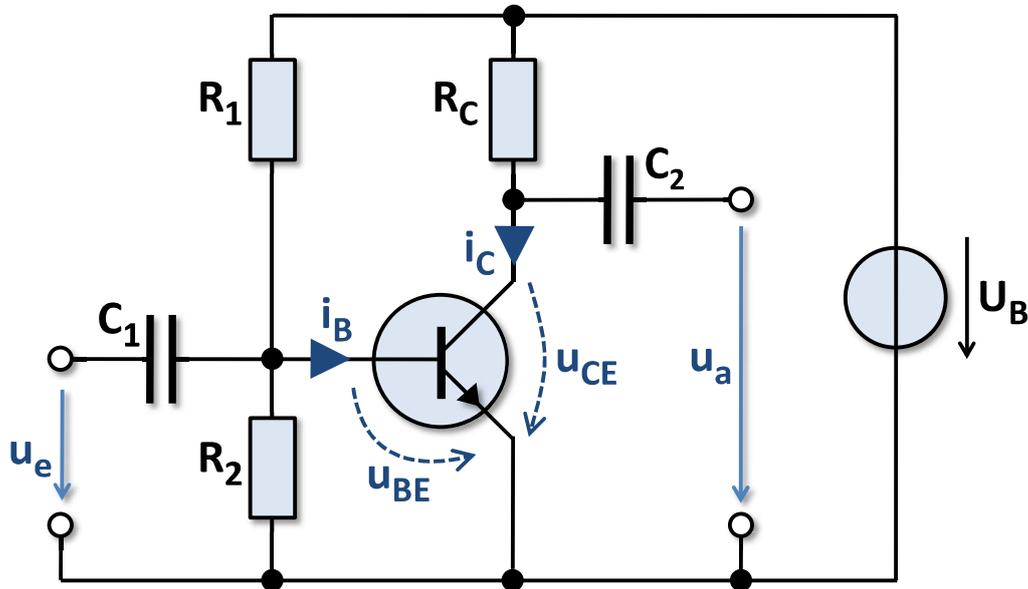
## 6.4. Verstärkerschaltungen

Die Berechnung einer Verstärkerschaltung basiert auf den Eingangs- und Ausgangskennlinien des Transistors und den damit zusammenhängenden Größen wie  $B$ ,  $\beta$  und  $S$ .



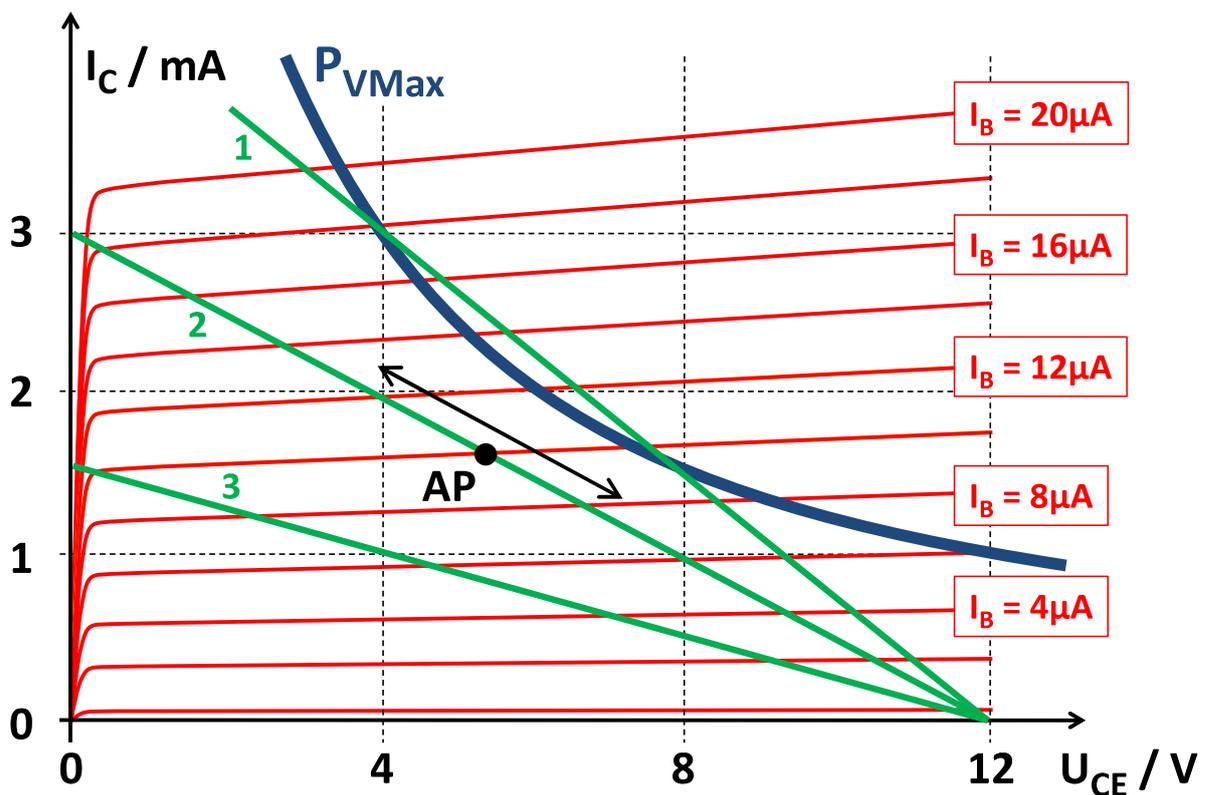
Aber wie berechnet man die Widerstände  $R_B$  und  $R_C$ ?

Die Abbildung zeigt eine Verstärkerschaltung für Wechselspannung (z. B. aus einem MP3-Player) mit einem NPN-Transistor.  $C_1$  dient dazu, alle Gleichspannungsanteile aus der vorhergehenden Stufe abzukoppeln, ebenso sorgt  $C_2$  für eine reine Wechselspannung am Ausgang.



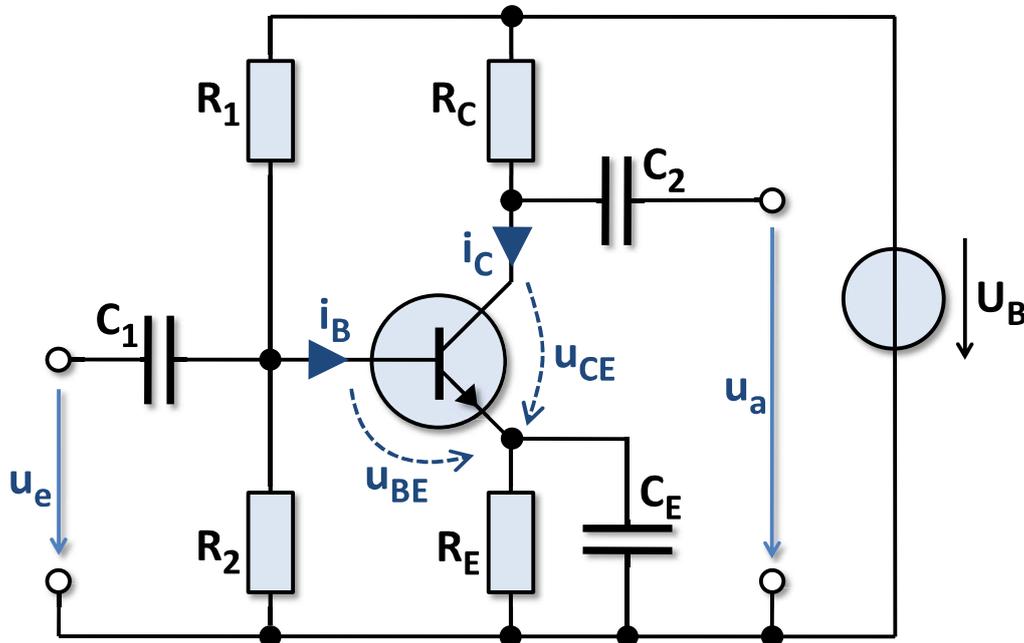
6. Bipolare Transistoren

## Arbeitspunkteinstellung mit Kennlinien



6. Bipolare Transistoren

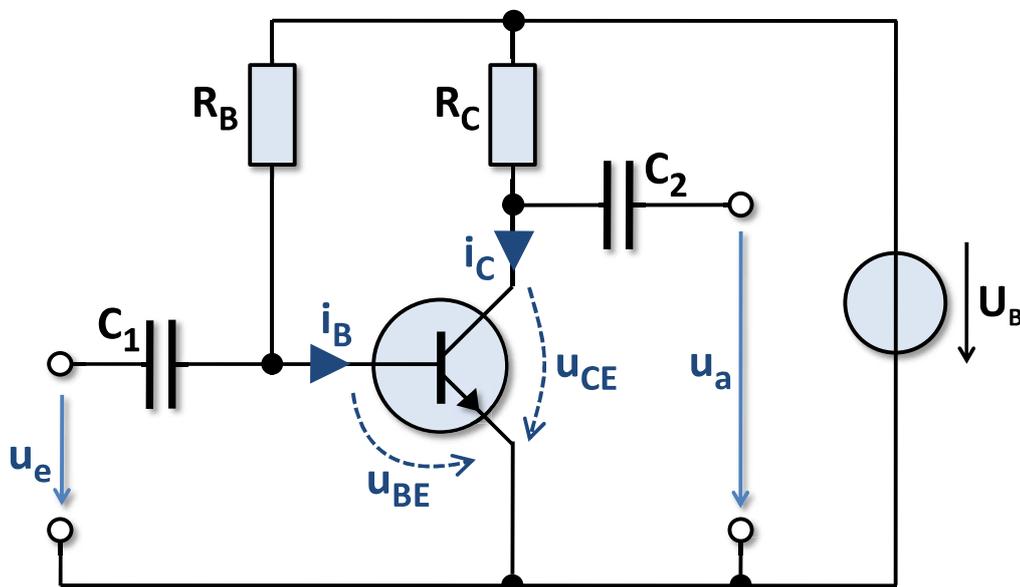
Damit der eingestellte Arbeitspunkt auch bei Temperaturänderungen stabil bleibt, fügt man oft einen Emittorwiderstand („Stromgegenkopplung“) ein. Um dadurch die Verstärkung nicht zu verringern, wird dieser Widerstand für Wechselfspannungen durch einen zusätzlichen Kondensator überbrückt.



6. Bipolare Transistoren

## Übungsaufgabe 6.1 (a)

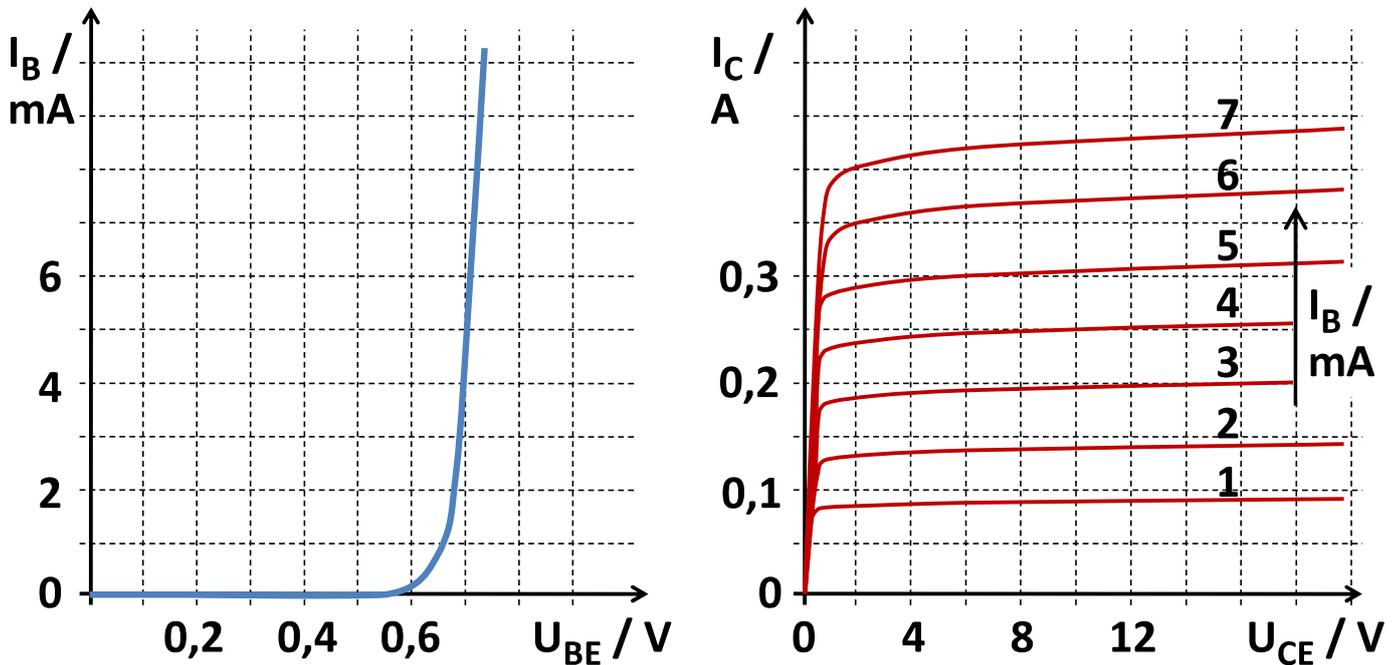
Die abgebildete Verstärkerschaltung soll an einer Betriebsspannung  $U_B = 16\text{ V}$  mit einem Kollektorwiderstand  $R_C = 40\ \Omega$  betrieben werden.



6. Bipolare Transistoren

## Übungsaufgabe 6.1 (b)

- Zeichnen Sie die Arbeitsgerade in das Ausgangskennlinienfeld ein.
- Wählen Sie im Ausgangskennlinienfeld einen sinnvollen Arbeitspunkt.
- Zeichnen Sie den Arbeitspunkt in die Eingangskennlinie ein.



6. Bipolare Transistoren

17

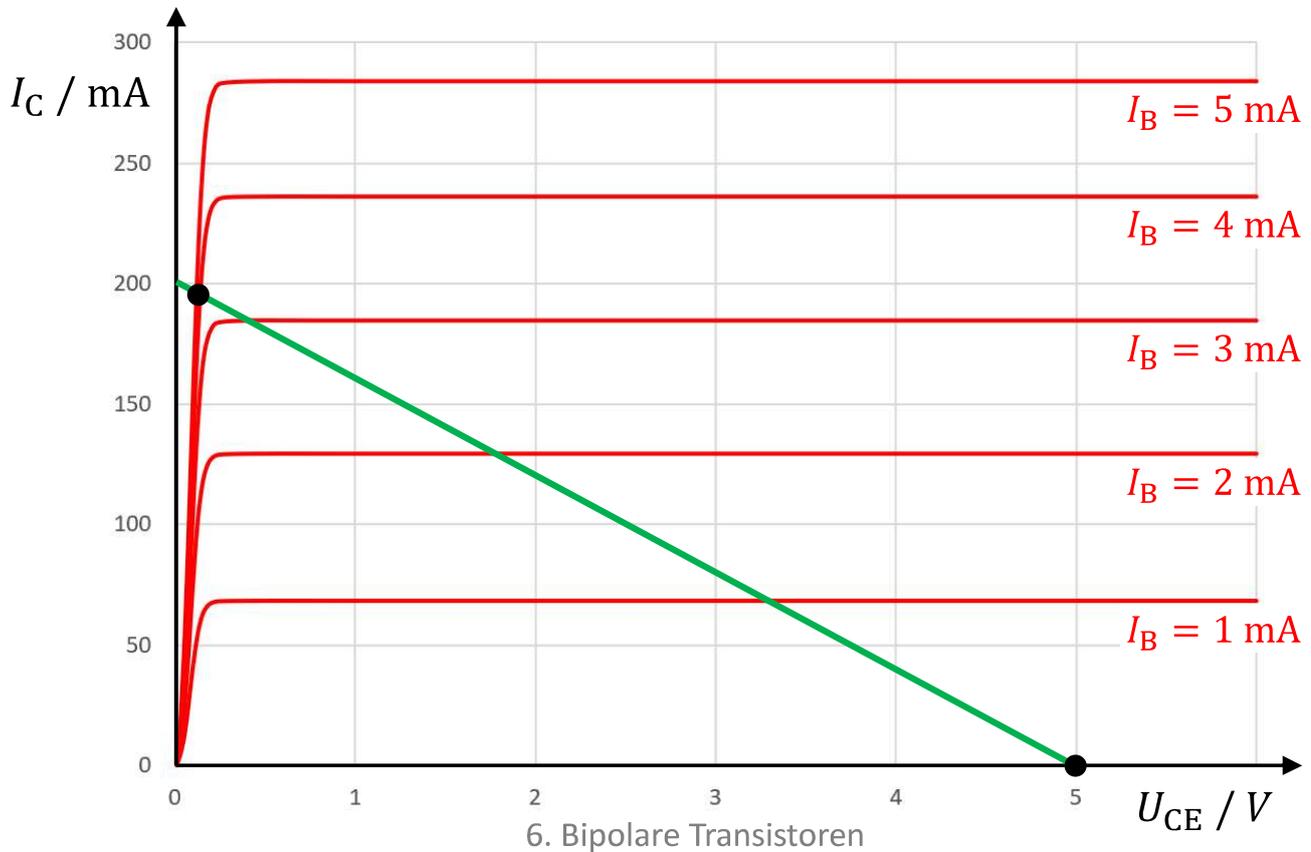
## Übungsaufgabe 6.1 (c)

- Ermitteln Sie den Basis-Emitter-Ersatzwiderstand  $r_{BE}$  grafisch und rechnerisch und dimensionieren Sie den Vorwiderstand  $R_B$  zur Einstellung des Arbeitspunkts.
- Bestimmen Sie den Stromverstärkungsfaktor  $B$ , die Signal-Stromverstärkung  $\beta$  und die Steilheit  $S$  des Transistors im Arbeitspunkt.
- Berechnen Sie den Verstärkungsfaktor  $v$  der Verstärkerstufe.

6. Bipolare Transistoren

18

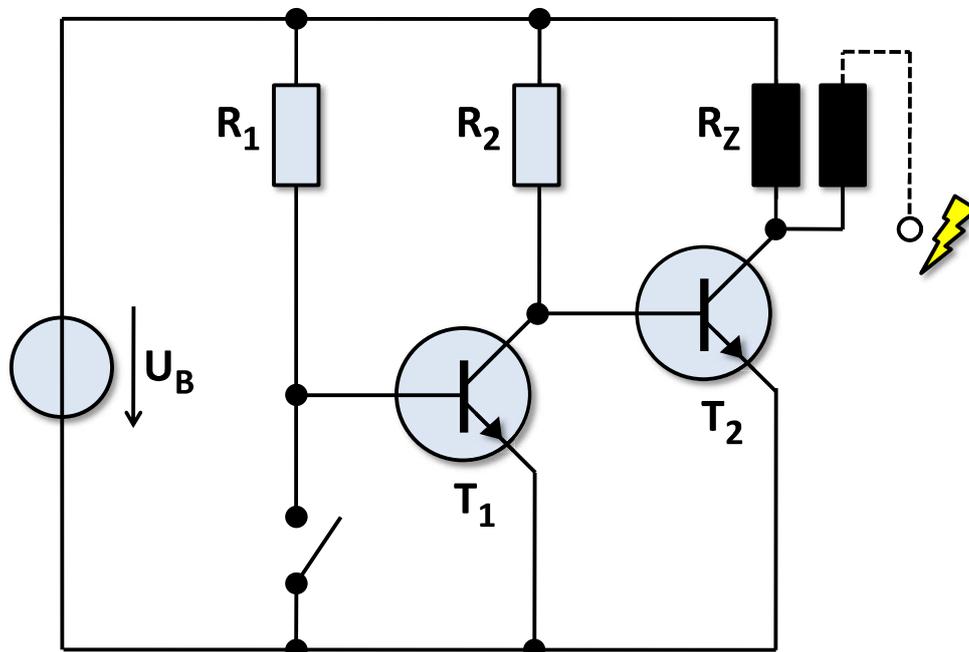
## 6.5. Der Transistor als Schalter



19

### Übungsaufgabe 6.2 (a)

Der Schaltplan zeigt eine kontaktgesteuerte Transistorzündung für Ottomotoren. Dimensionieren Sie die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  so, dass jeder Transistor beim Einschalten 10-fach übersteuert ist!



### Es gelten folgende Daten:

- Betriebsspannung  $U_B = 14 \text{ V}$
- Widerstand der Primärwicklung der Zündspule  $R_Z = 3,5 \Omega$
- Transistor  $T_1$ :  $B_1 = 50$ 
  - $r_{BE1} = 3 \Omega$
  - $U_{CESat1} = 0,4 \text{ V}$
  - $U_{S1} = 0,7 \text{ V}$
- Transistor  $T_2$ :  $B_2 = 30$ 
  - $r_{BE2} = 1 \Omega$
  - $U_{CESat2} = 0,5 \text{ V}$
  - $U_{S2} = 0,6 \text{ V}$

## Übungsaufgabe 6.2 (c)

- Welcher Kollektorstrom  $I_{C2}$  fließt bei eingeschaltetem Transistor  $T_2$  durch die Primärwicklung der Zündspule?
- Welchen Basisstrom  $I_{B2}$  benötigen Sie, um den Transistor  $T_2$  beim Einschalten 10-fach zu übersteuern? Wie groß ist in diesem Fall die Spannung  $U_{BE2}$  an der Basis von  $T_2$ ?
- Berechnen Sie einen geeigneten Widerstand  $R_2$ .
- Wie groß ist der Strom  $I_{B2}$  bei eingeschaltetem Transistor  $T_1$ ? Welcher Kollektorstrom  $I_{C1}$  fließt in diesem Fall?
- Welchen Basisstrom  $I_{B1}$  benötigen Sie, um den Transistor  $T_1$  beim Einschalten 10-fach zu übersteuern? Wie groß ist in diesem Fall die Spannung  $U_{BE1}$  an der Basis von  $T_1$ ?
- Berechnen Sie einen geeigneten Widerstand  $R_1$ .

## 7. Unipolare Transistoren, MOSFETs

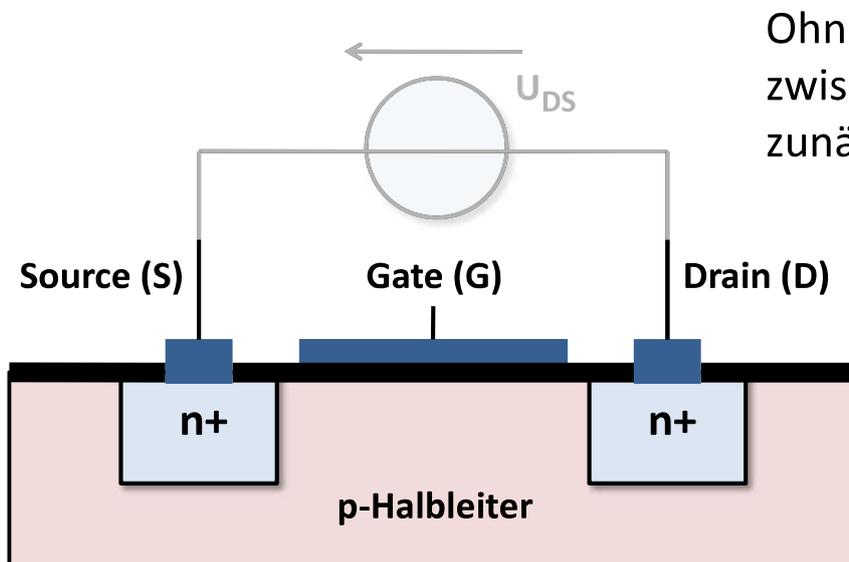
### 7.1. Funktionsweise

Die Bezeichnung **MOSFET** (**M**etal **O**xide **S**emiconductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor) deutet auf den Aufbau dieses Transistors hin:

- Das Halbleiterelement ist mit einer sehr dünnen, isolierenden Oxidschicht bedeckt.
- Auf dieser Schicht ist – isoliert vom Halbleiter – eine Metallschicht aufgebracht, an die eine Spannung angelegt werden kann.
- Dabei entsteht im Bereich der Isolierschicht ein starkes elektrisches Feld, welches den Stromfluss durch das Bauelement steuert.

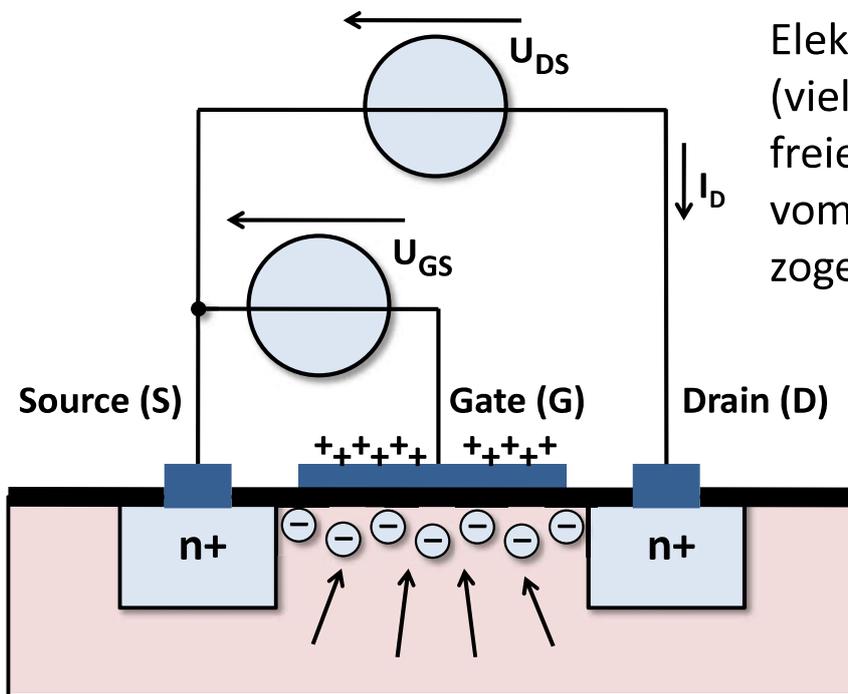
### Funktionsweise (a)

Auf dem Bild ist ein sog. n-Kanal-Anreicherungstyp dargestellt: Dieser Feldeffekttransistor besteht aus einem p-leitenden Substrat mit zwei n-leitenden Inseln (Source und Drain). Über einer isolierenden Siliziumdioxidschicht ist die Gate-Elektrode aufgedampft.



Ohne Gate-Spannung kann zwischen Source und Drain zunächst kein Strom fließen.

Wird zwischen Gate und Source eine positive Spannung angelegt, entsteht im Halbleiter ein elektrisches Feld.

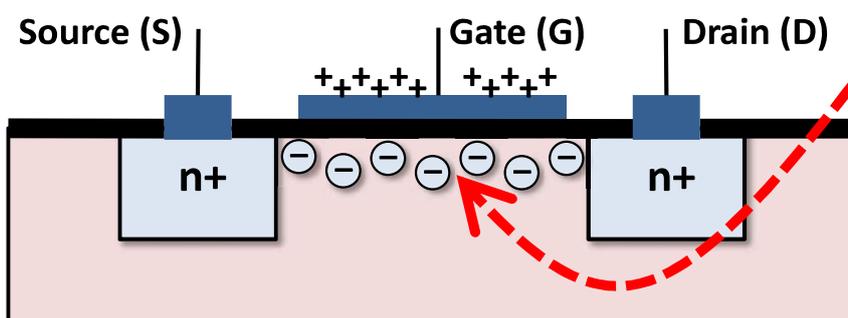


Elektronen im p-Halbleiter (viele Löcher, sehr wenige freie Elektronen) werden vom Gate-Anschluss angezogen, Löcher abgestoßen.

Freie Elektronen

Ab einer bestimmten Schwellspannung  $U_{th}$  (engl. threshold voltage) befinden sich im Bereich der Gate-Elektrode praktisch keine freien Löcher (Majoritätsträger) mehr im p-Halbleiter.

Stattdessen sammeln sich direkt unterhalb der Gate-Elektrode freie Elektronen (Minoritätsträger), wodurch der eigentlich p-dotierte Halbleiter nahe an der Isolierschicht n-leitend wird! Dieser Zustand wird „starke Inversion“ genannt.



Der entstandene dünne n-leitende Kanal verbindet die beiden n-Gebiete Source und Drain, ein Stromfluss  $I_{DS}$  ist nun möglich.

# Arten von MOSFETs

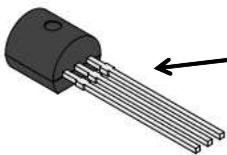
Quelle: Skriptum zur Lehrveranstaltung Grundlagen der Elektronik (Prof. Dr.-Ing. G. Wermuth, HS München)

	Aufbau	Schaltzeichen	Kennlinienfeld und Source-Schaltung
N-Kanal-Verarmungstyp			
N-Kanal-Anreicherungstyp			
P-Kanal-Anreicherungstyp			
P-Kanal-Verarmungstyp			

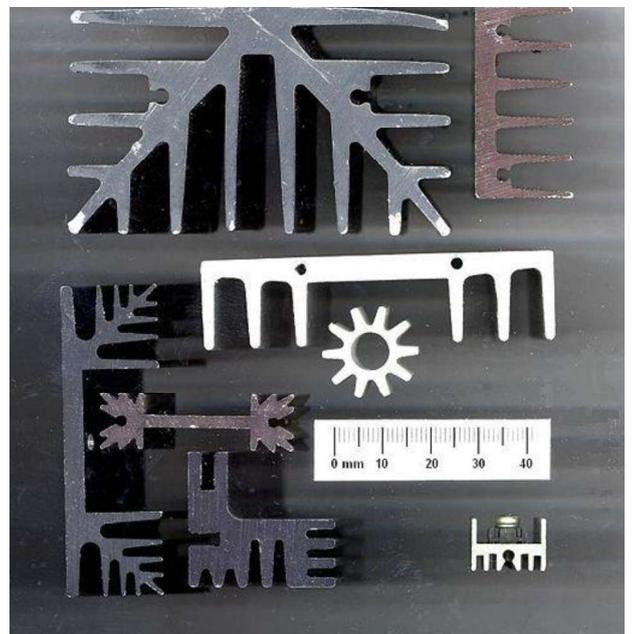
## 7.2. Bauformen und Anwendungen

**2N7000**

N-Kanal-MOSFET  
Anreicherungstyp  
Gehäuse TO-92  
 $P_{VMax} = 0,4 \text{ W}$

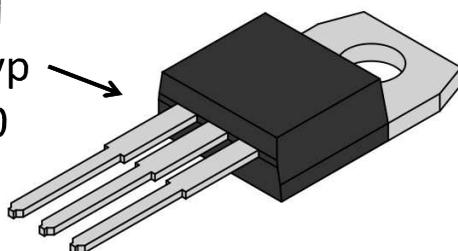


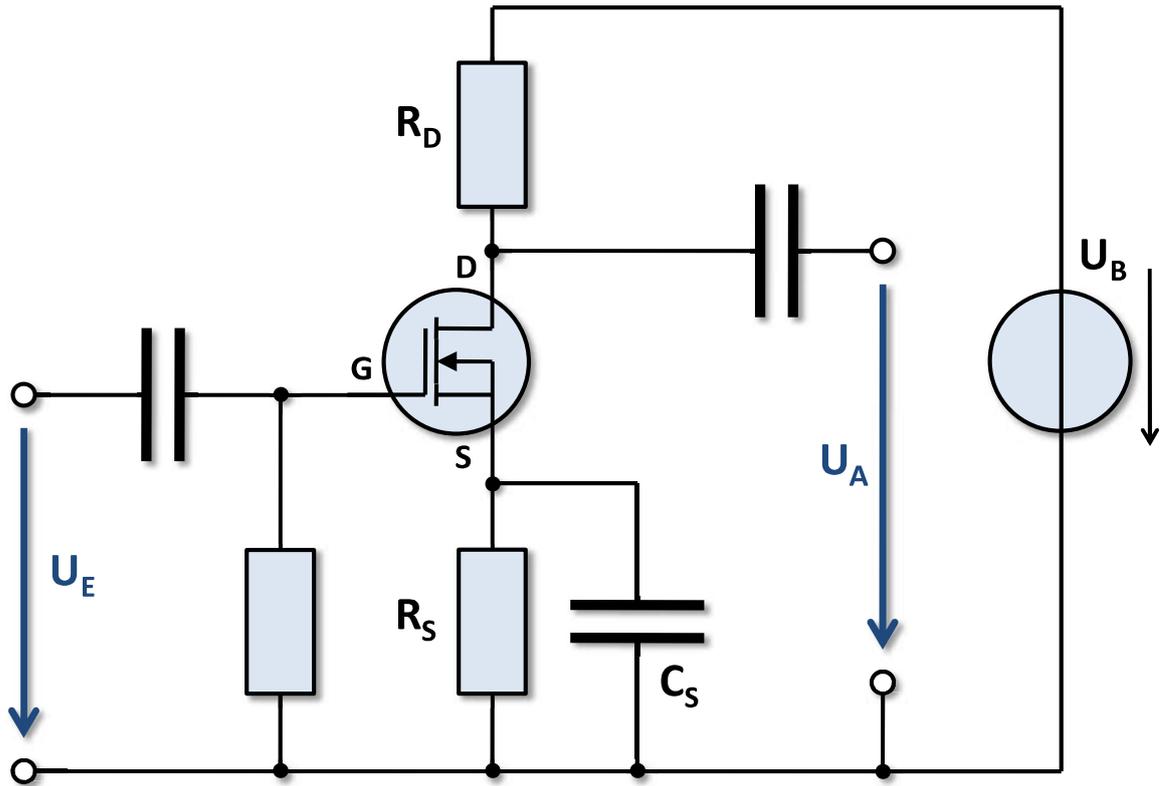
**Kühlkörper für MOSFETs und andere Halbleiterbauelemente**



**IRF9530**

P-Kanal-MOSFET  
Anreicherungstyp  
Gehäuse TO-220  
 $P_{VMax} = 75 \text{ W}$

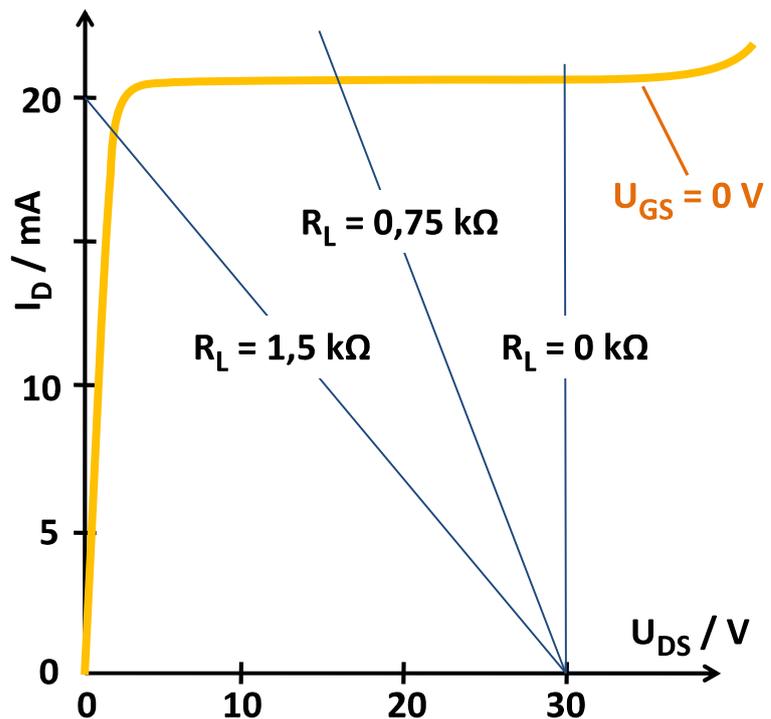
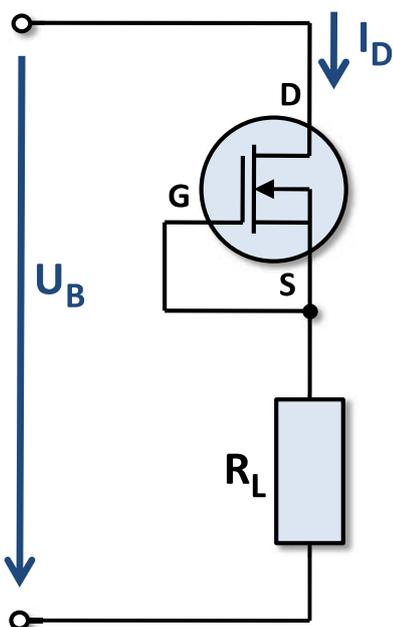




7. Unipolare Transistoren, MOSFETs

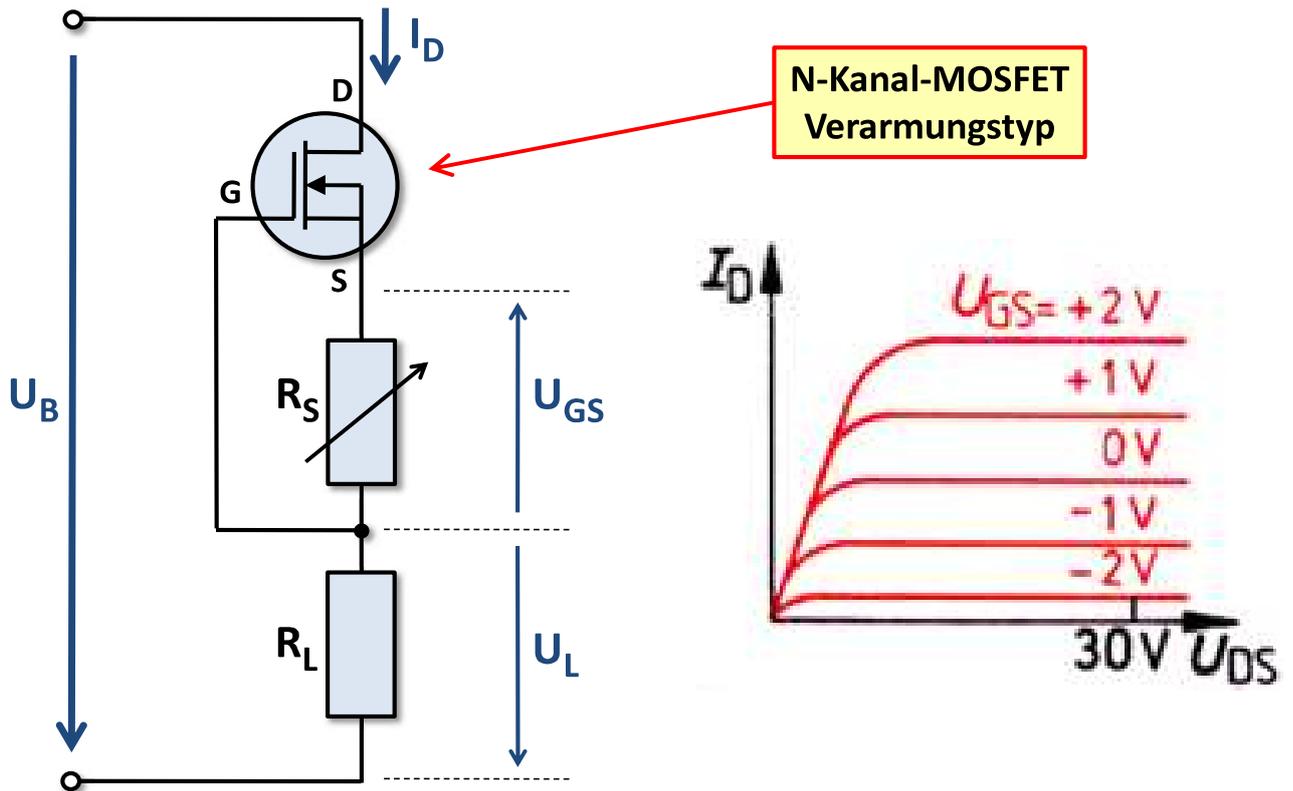
7

# Stromstabilisierung mit MOSFET

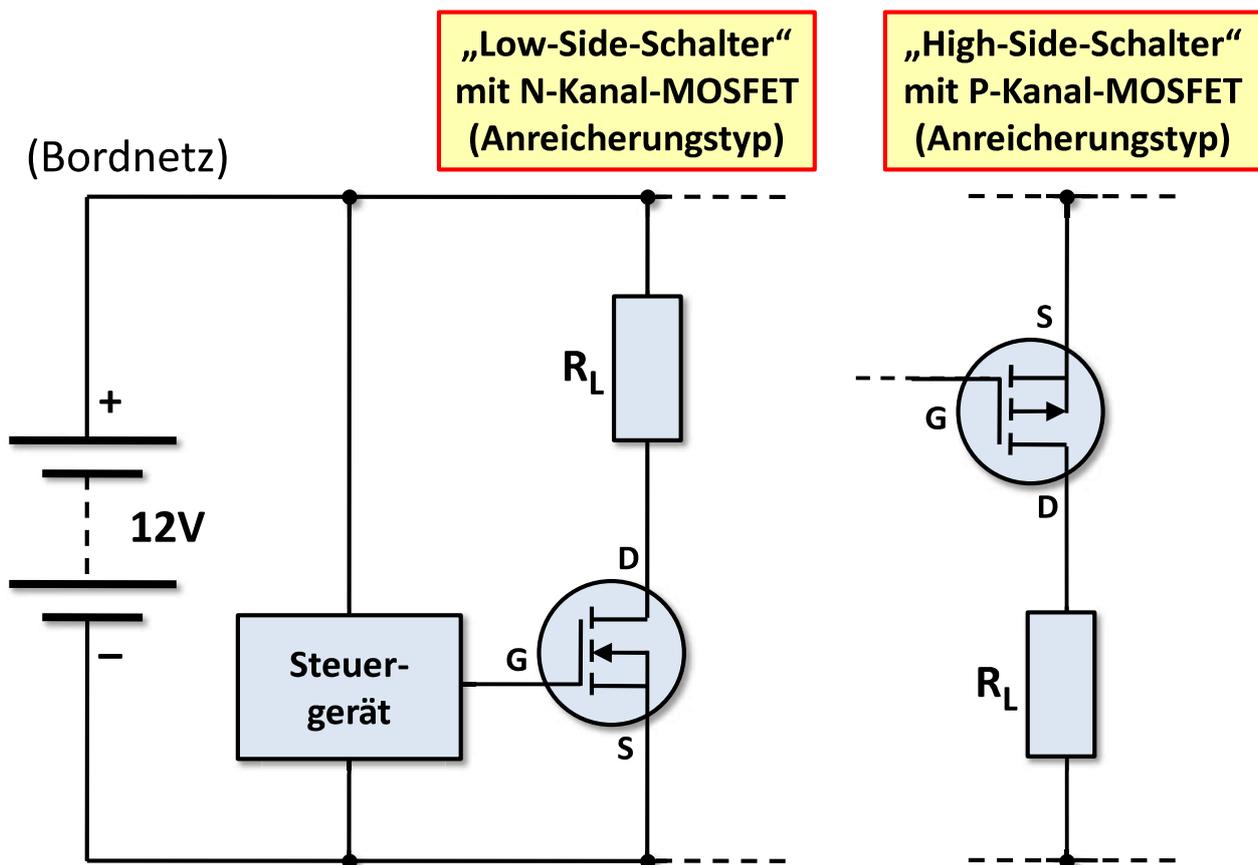


7. Unipolare Transistoren, MOSFETs

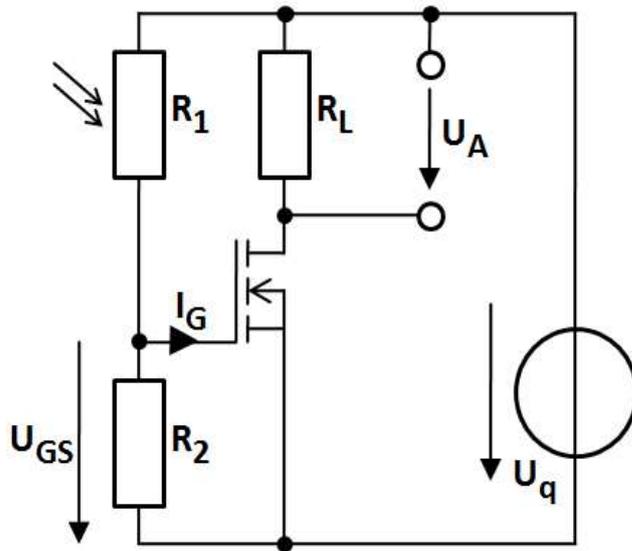
8



# Gleichstromschalter im KFZ



Es werden ein Fotowiderstand (Light Dependent Resistor, LDR) und ein Transistor zur Helligkeitsmessung eingesetzt.



$U_q = 5\text{ V}$   
 $R_2 = 100\ \Omega$   
 $R_L = 20\ \Omega$

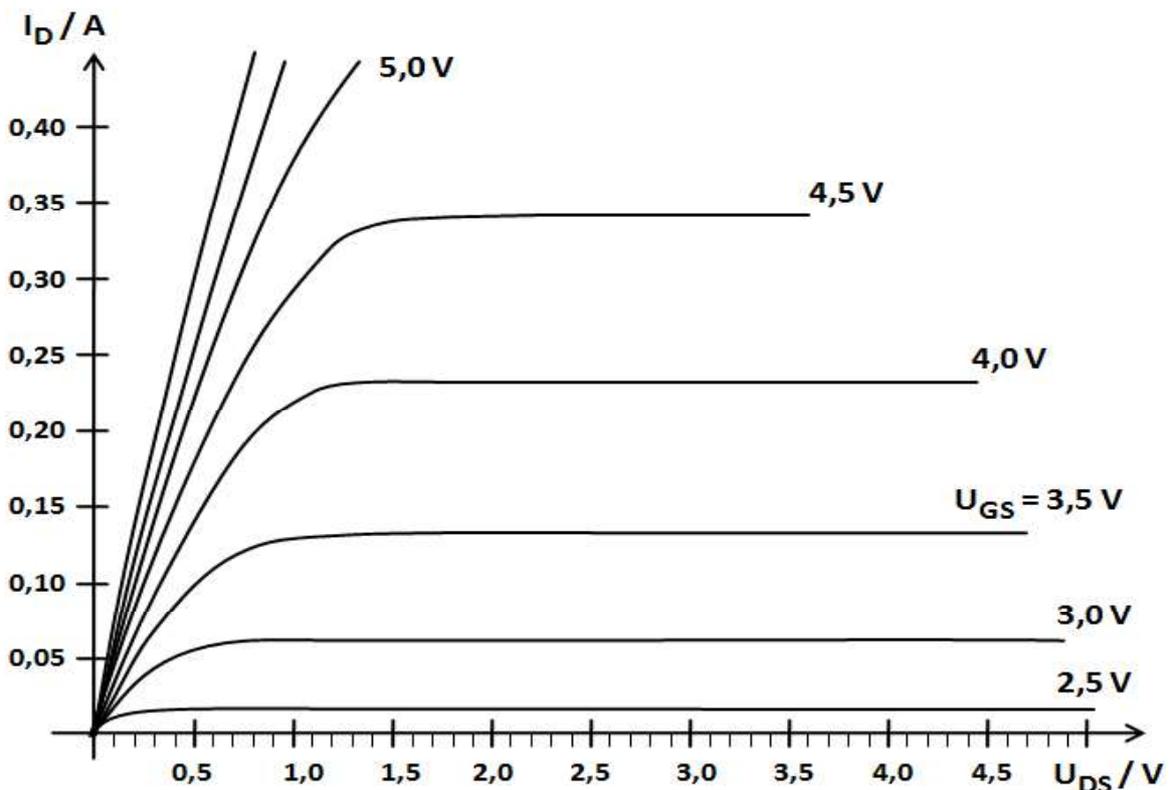
Widerstand  $R_1$  (in Ohm) bei verschiedenen Beleuchtungsstärken  $E$  (in Lux):

$E / \text{lx}$	$R_1 / \Omega$
0,1	100.000
10	1.000
1000	10

- i. Um welchen Transistortyp handelt es sich?
- Bipolar     NPN     PNP     Anreicherungstyp  
 N-Kanal     P-Kanal     MOSFET     Verarmungstyp

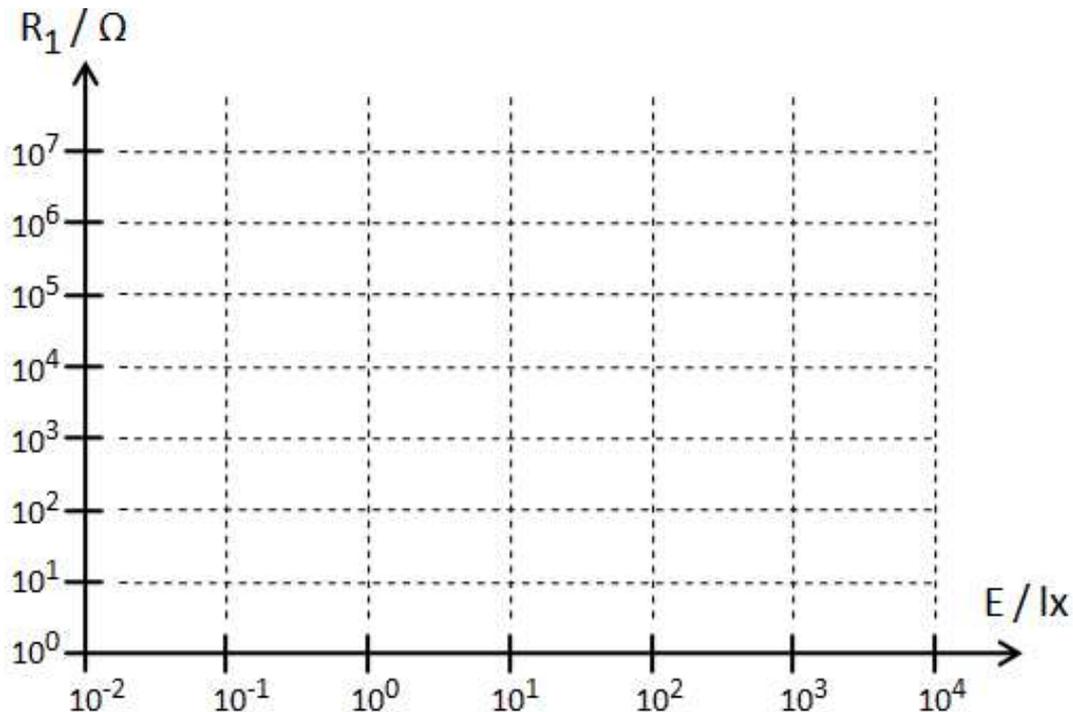
## Übungsaufgabe 7.1 (b)

Ausgangskennlinienfeld des verwendeten Transistors:



## Übungsaufgabe 7.1 (c)

- ii. Zeichnen Sie die Kennlinie des Fotowiderstands in das Diagramm ein.



7. Unipolare Transistoren, MOSFETs

13

## Übungsaufgabe 7.1 (d)

- iii. Wie groß ist der Strom  $I_G$ ? Welche Spannungen  $U_{GS}$  stellen sich bei Beleuchtung mit  $E = 100 \text{ lx}$  bzw.  $E = 1000 \text{ lx}$  ein?
- iv. Zeichnen Sie die Arbeitsgerade der Verstärkerschaltung in das Ausgangskennlinienfeld ein. Welche Spannungen  $U_A$  ergeben sich bei Beleuchtungsstärken von  $E = 100 \text{ lx}$  und  $E = 1000 \text{ lx}$ ?
- v. Welche Leistung wird bei  $E = 1000 \text{ lx}$  am Transistor in Wärme umgesetzt?
- vi. Welche Spannung  $U_{GS}$  kann in der vorliegenden Schaltung auch bei sehr großen Beleuchtungsstärken nicht überschritten werden (nehmen Sie näherungsweise  $R_1 = 0 \text{ Ohm}$  an)?

Wie groß ist in diesem Fall die Ausgangsspannung  $U_A$ ?

7. Unipolare Transistoren, MOSFETs

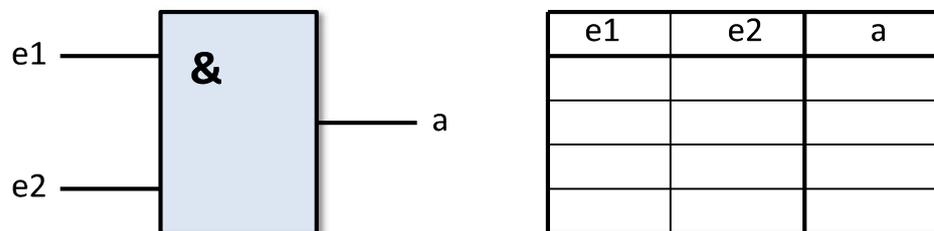
14

## 8. Digitaltechnik

Die Digitaltechnik arbeitet im Gegensatz zur Analogtechnik nicht mit kontinuierlichen sondern mit diskreten Signalen. Die kleinste Informationseinheit ist das **Bit** (1 oder 0, Spannung oder keine Spannung).

Digitale Signale werden mit Logikelementen (sog. **Gattern**) wie NOT, AND, NAND, OR und NOR miteinander verknüpft. Auch komplexere Schaltwerke wie Speicherelemente (sog. **Flipflops**) bis hin zu Prozessoren sind letztlich aus solchen Gattern aufgebaut.

Beispiel:  
**AND-Gatter**



8. Digitaltechnik

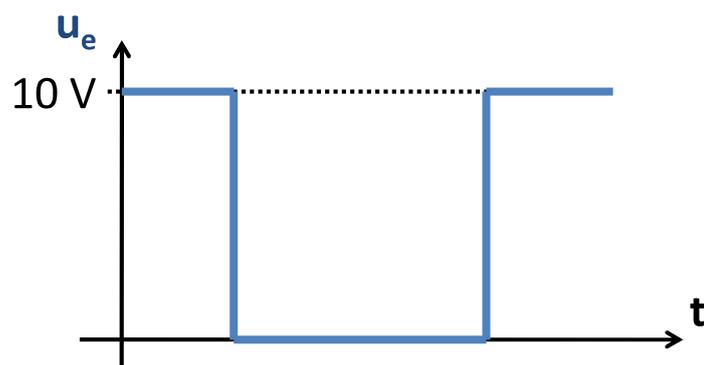
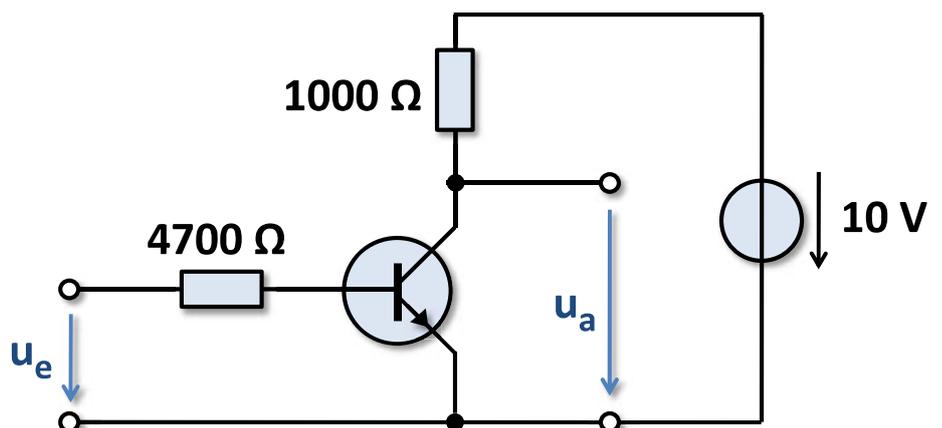
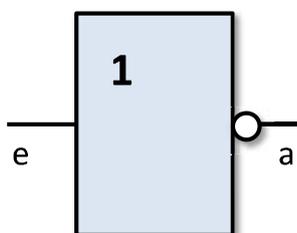
1

## Der Inverter

### Vereinbarung:

$u > 9 \text{ V}$  entspricht „1“

$u < 1 \text{ V}$  entspricht „0“

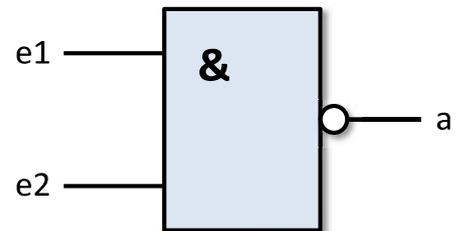
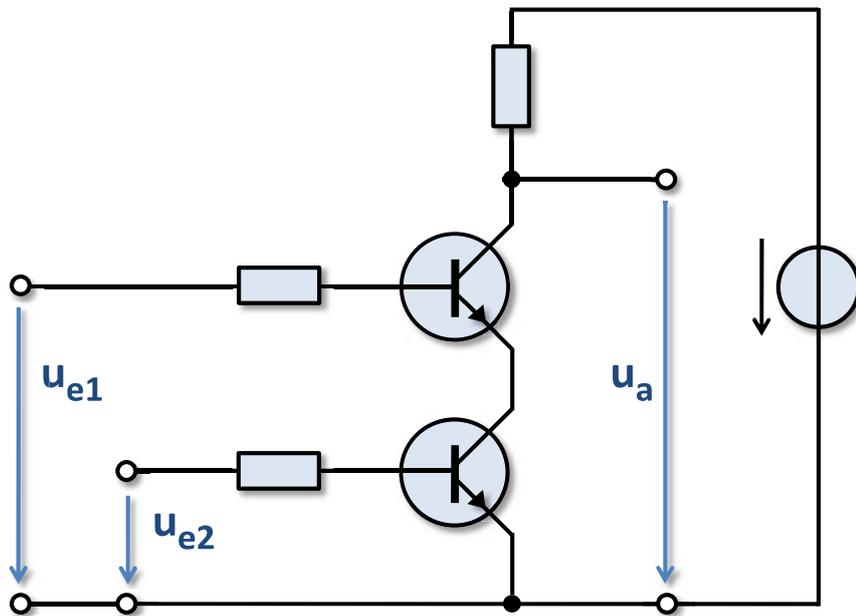


Eingang	Ausgang

8. Digitaltechnik

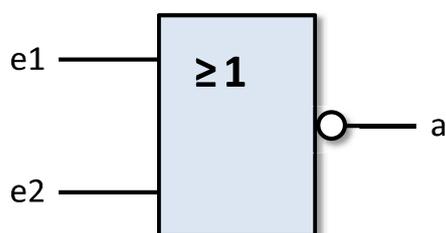
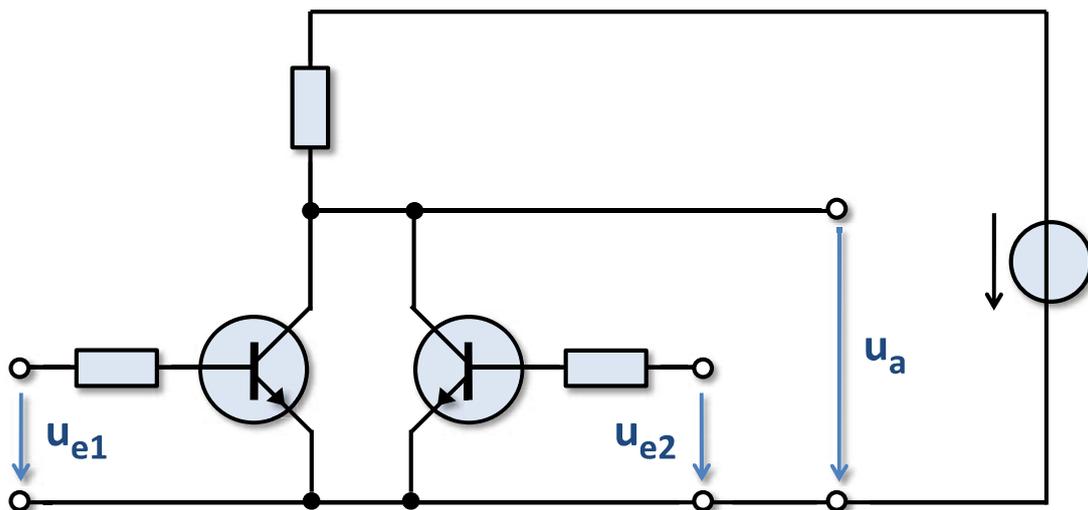
2

# Das NAND-Gatter



e1	e2	a

# Das NOR-Gatter

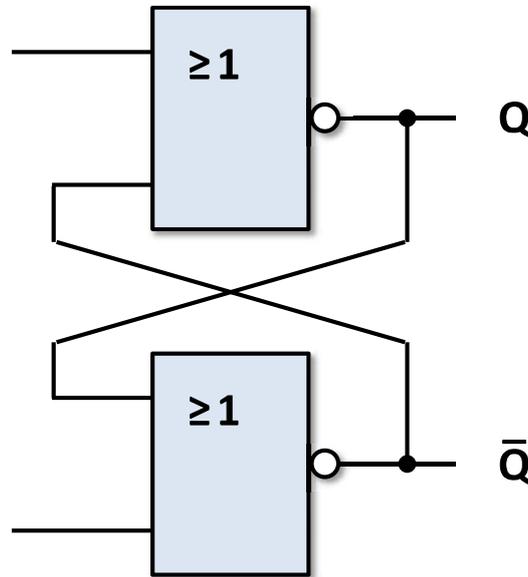


e1	e2	a

## Das RS-Flipflop (a)

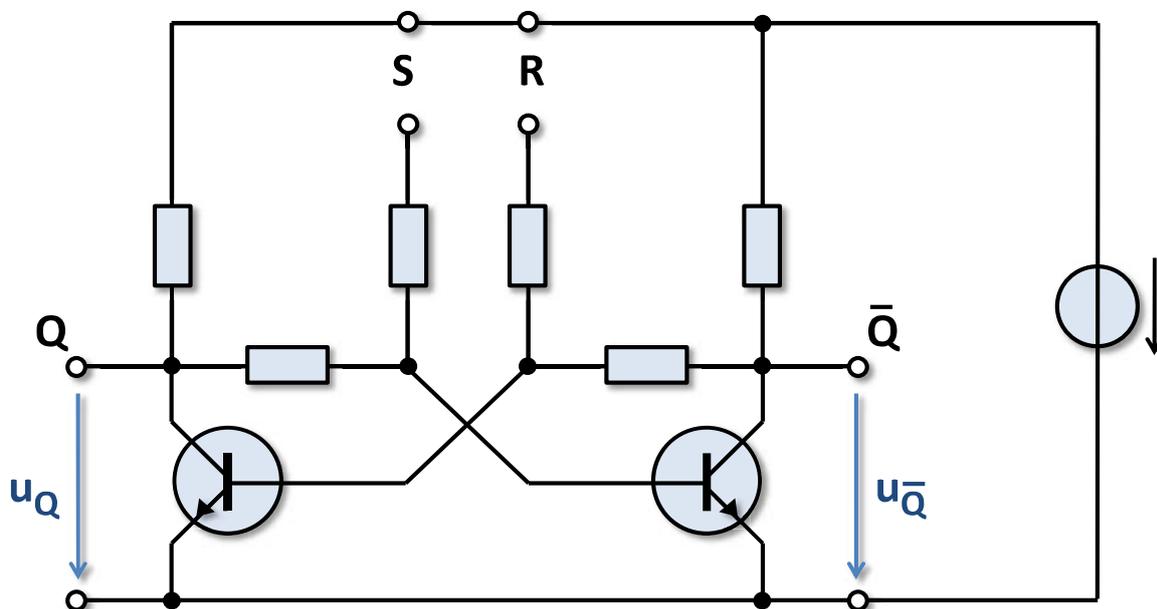
Flipflops (auch „bistabile Kippstufe“) nehmen zwei stabile Zustände ein. Sie sind die Grundbausteine digitaler Speicher.

Das sog. **RS-Flipflop** kann aus zwei NOR-Gattern aufgebaut werden:

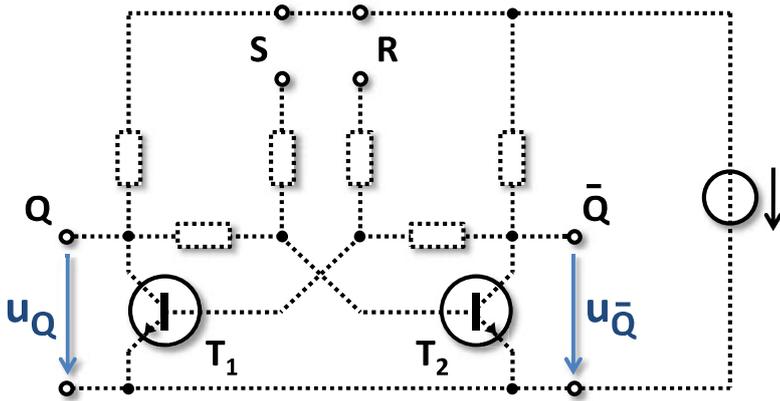


## Das RS-Flipflop (b)

Ein RS-Flipflop kann auch mit zwei Transistoren aufgebaut werden. Die Set-/Reset-Eingänge werden in diesem Fall mit einem mechanischen Tastschalter betätigt:

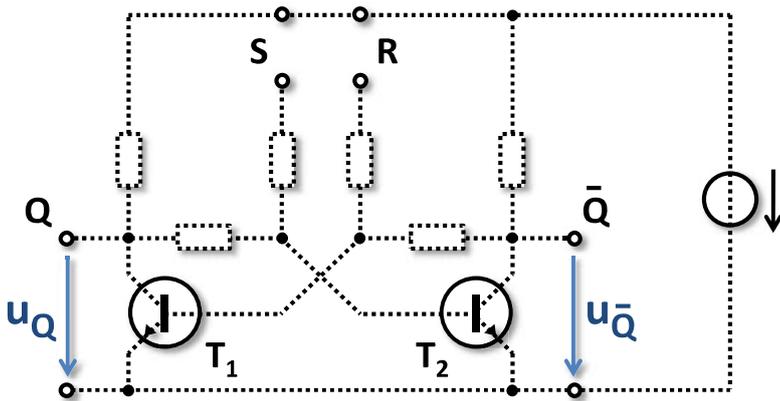


# Das RS-Flipflop (c)



## Zustand 1:

Transistor T1 sperrt,  
Transistor T2 leitet



## Zustand 2:

Transistor T2 sperrt,  
Transistor T1 leitet

# Addition von Dualzahlen

Zahl a: 1 1 0 1 0 0 1 1

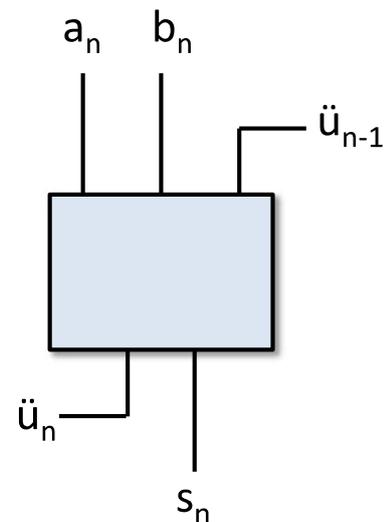
Zahl b: + 0 0 1 0 0 1 1 0

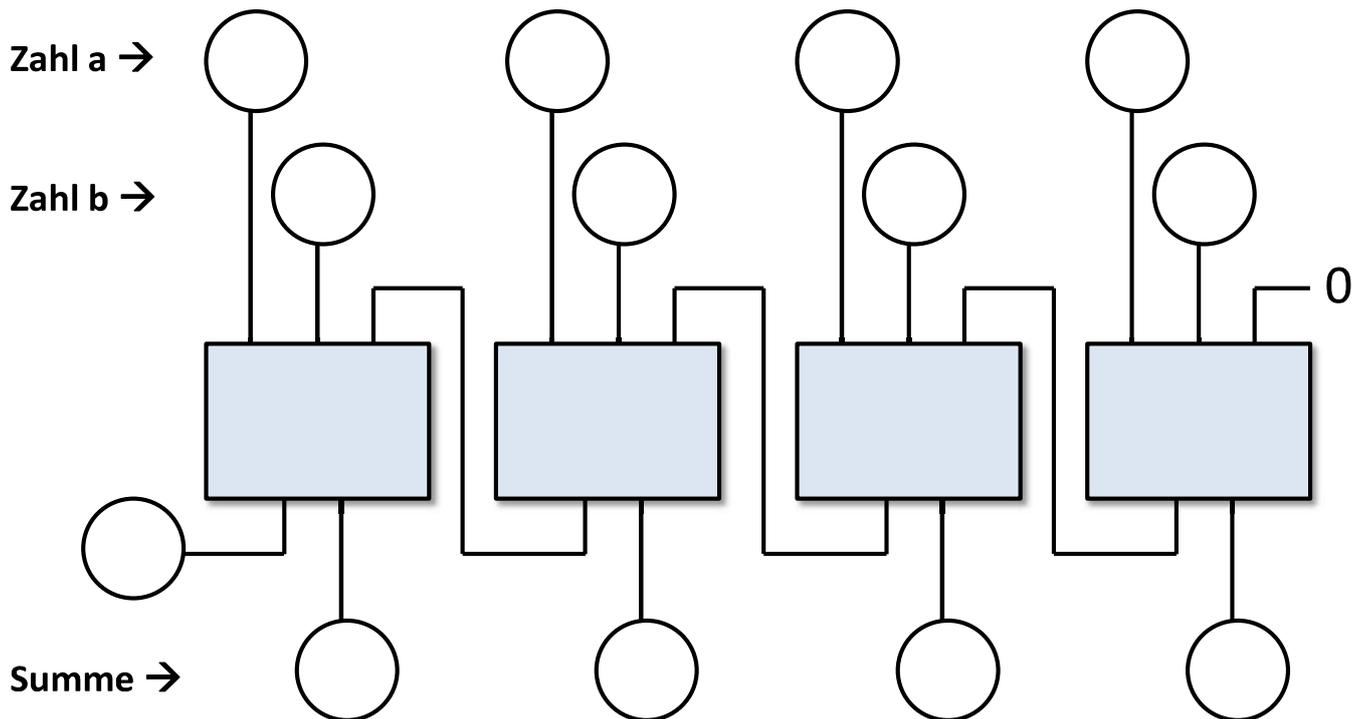
Summe:

Zahl a: 1 1 0 1 0 0 1 1

Zahl b: + 1 0 0 0 0 1 1 0

Summe:





# Subtraktion von Dualzahlen

$$01010011 - 01010010 = ?$$

Zahl a: 0 1 0 1 0 0 1 1

Zahl b: \_\_\_\_\_

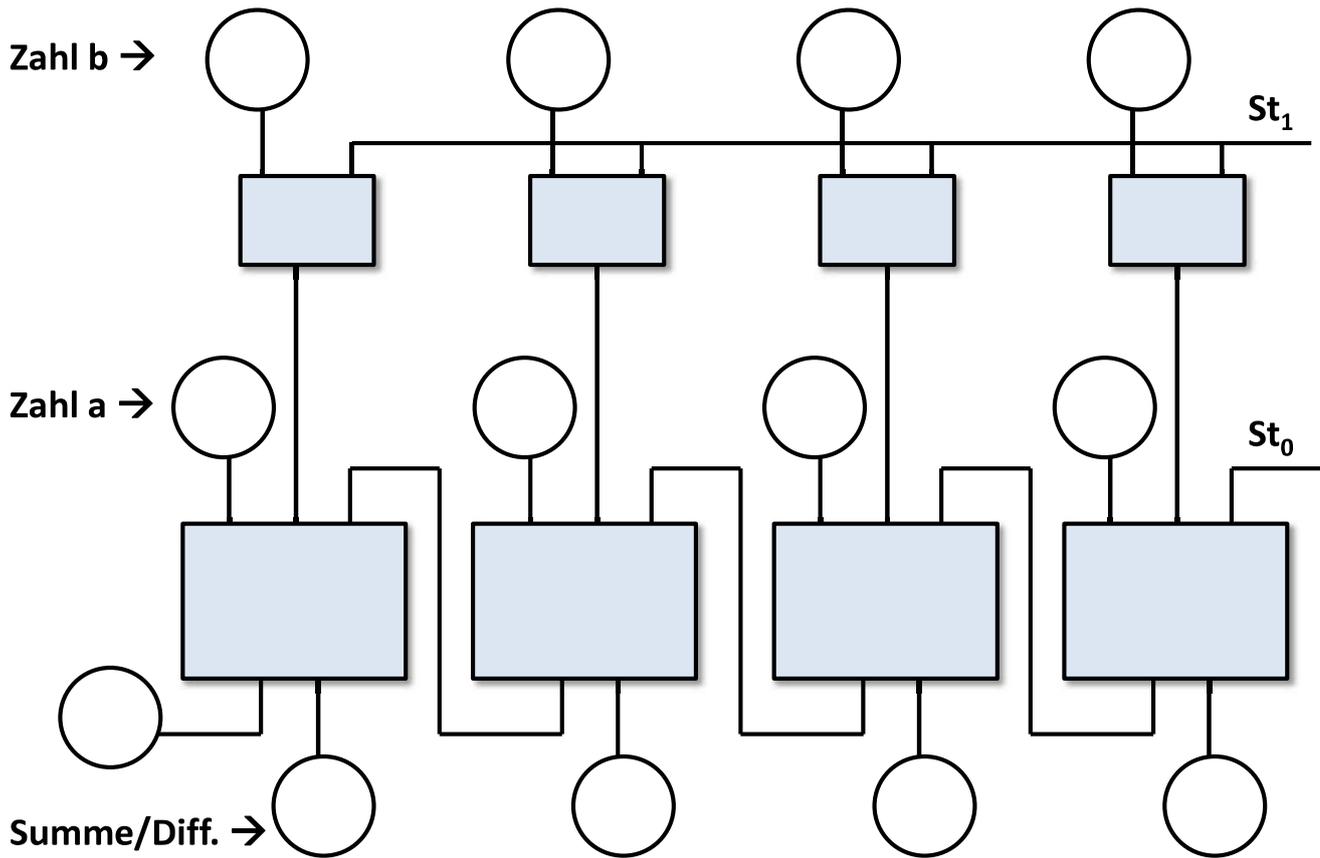
Differenz:

$$01010011 - 01010100 = ?$$

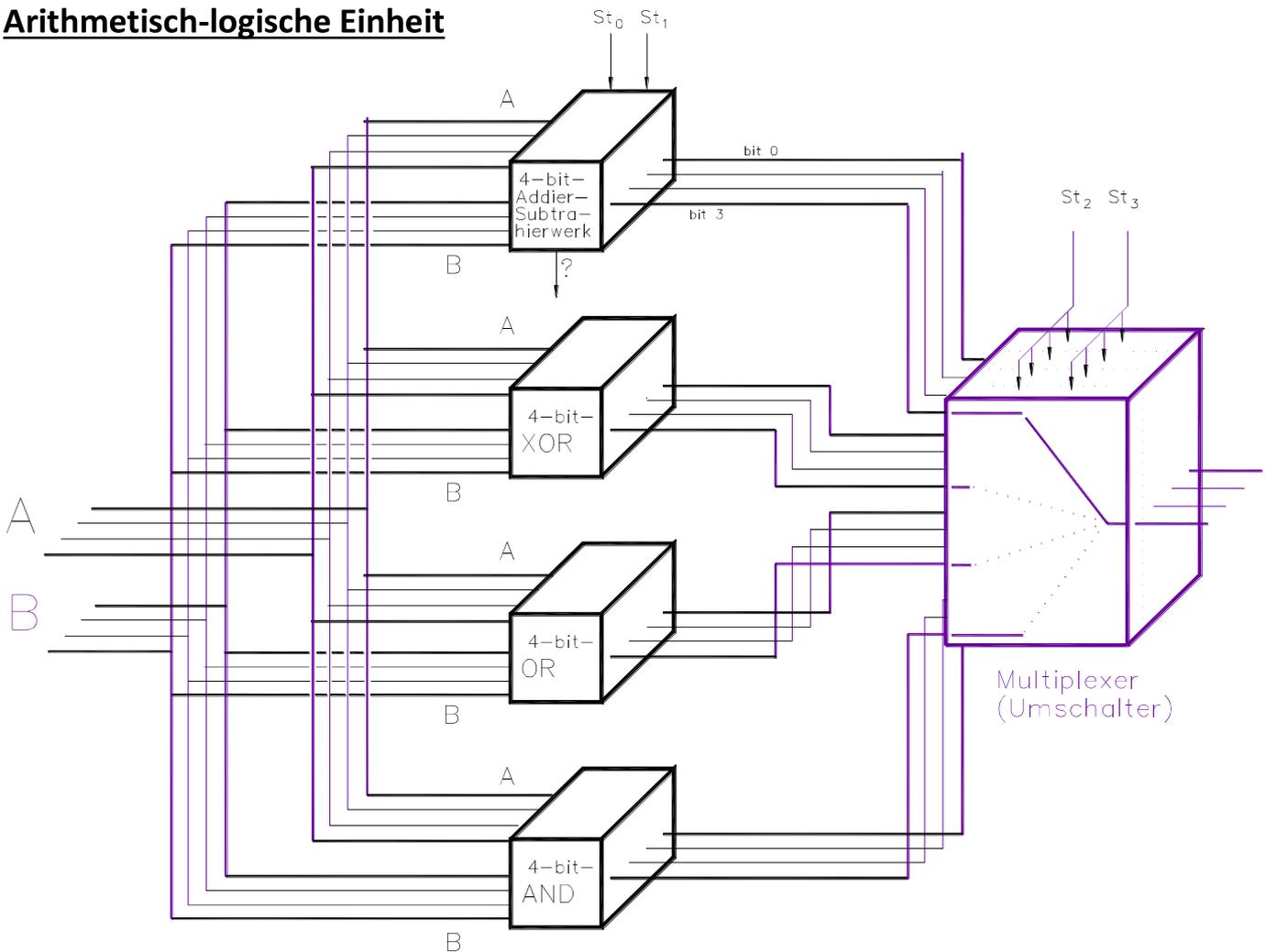
Zahl a: 0 1 0 1 0 0 1 1

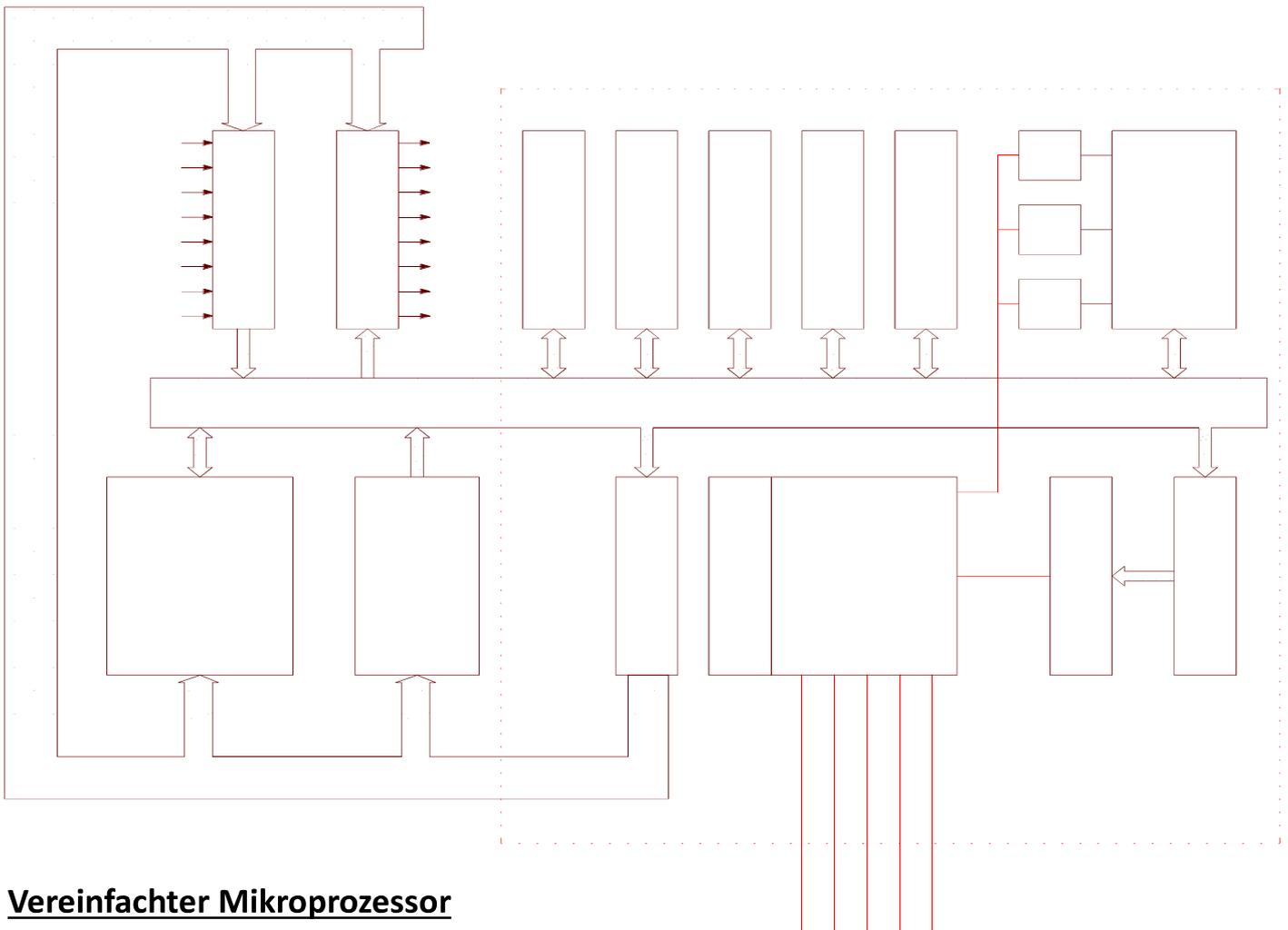
Zahl b: \_\_\_\_\_

Differenz:



## Arithmetisch-logische Einheit





**Vereinfachter Mikroprozessor**

## Übungsaufgabe 8.1 (a)



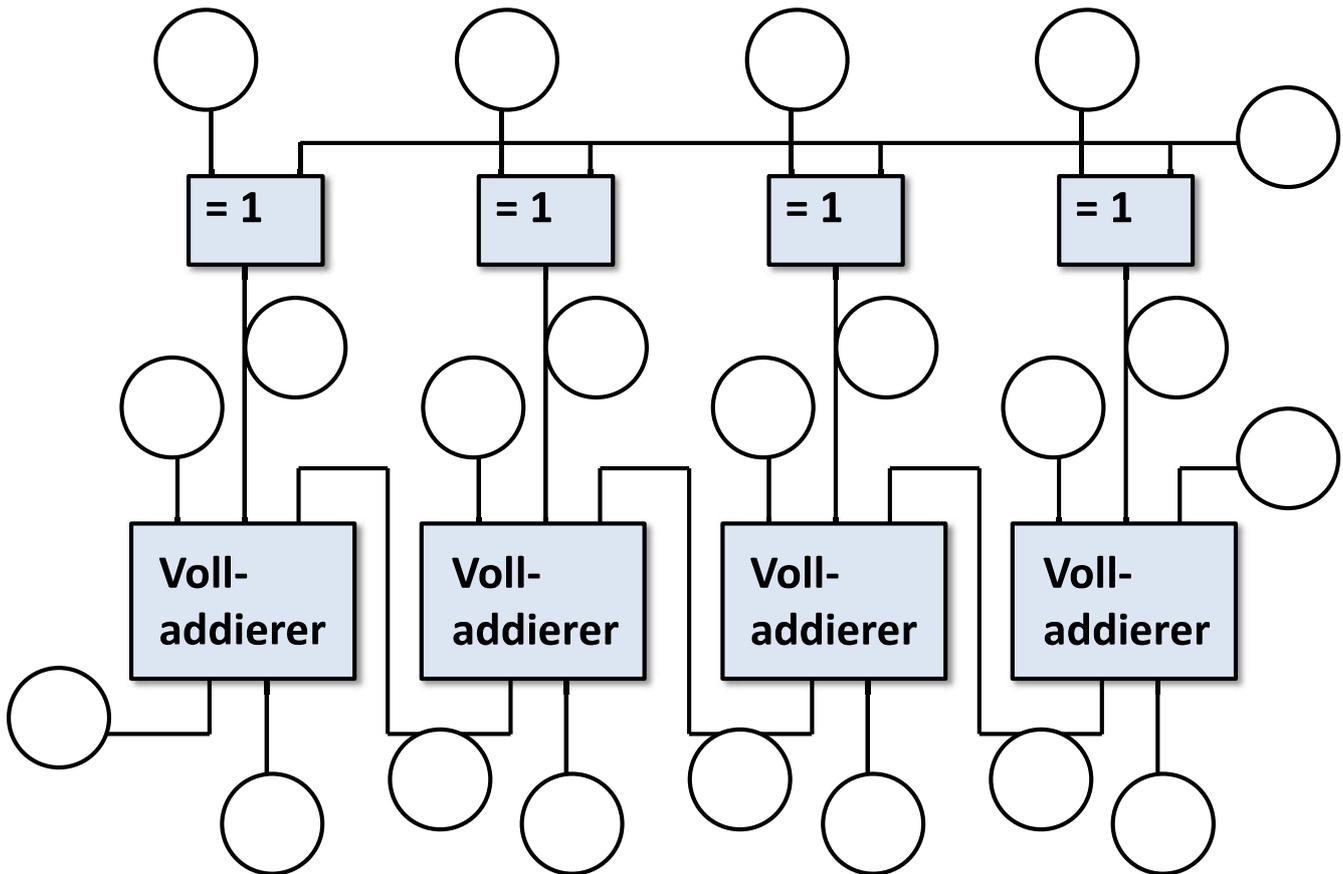
**(WS 08/09 – MB, A3 )**

Mit dem auf der folgenden Folie abgebildeten Addier-/Subtrahierwerk soll von der Zahl 5 die Zahl 3 subtrahiert werden.

- Bilden Sie in zwei Schritten aus der Dualzahl +3 die 4-Bit-Dualzahl -3. Tragen Sie die entsprechenden Dualzahlen in die Tabelle ein.
- Tragen Sie alle diese arithmetische Operation betreffenden logischen Zustände 0 bzw. 1 in die Abbildung auf der folgenden Folie ein.

<i>Dezimal</i>	<i>dual</i>			

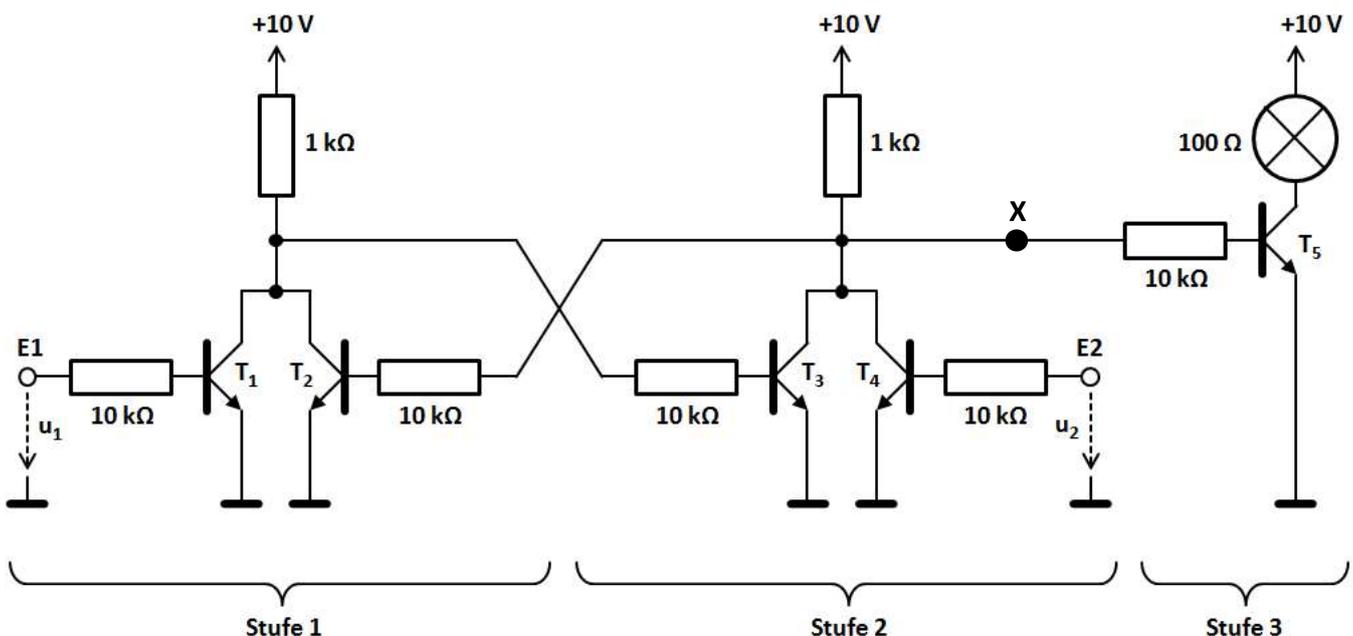
## Übungsaufgabe 8.1 (b)



8. Digitaltechnik

15

## Übungsaufgabe 8.2 (a)



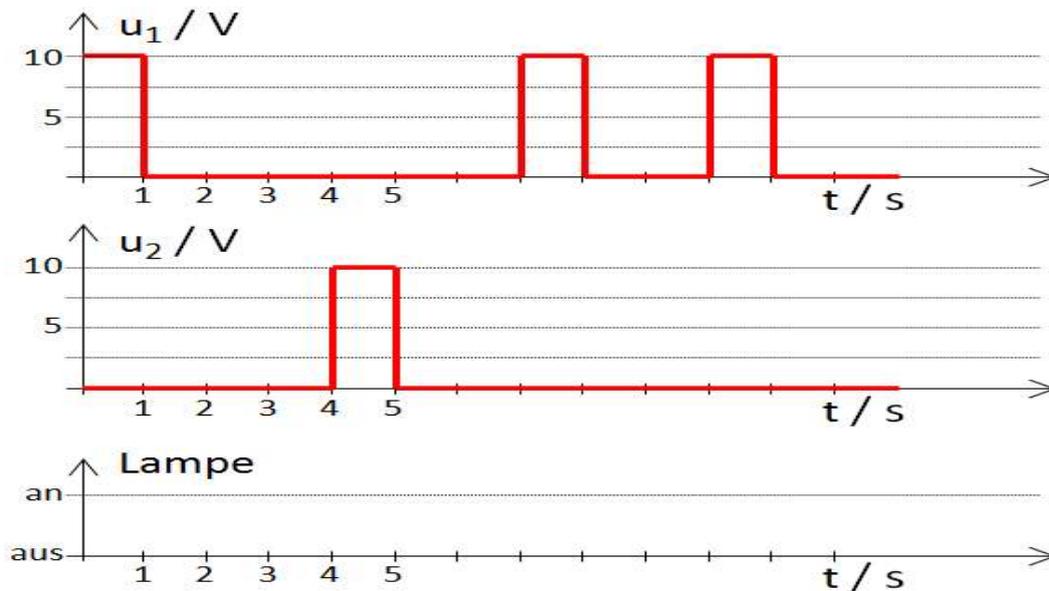
- a) Welche logische Funktion wird in der abgebildeten Digitalschaltung durch die Transistoren  $T_1 / T_2$  (Stufe 1) bzw.  $T_3 / T_4$  (Stufe 2) gebildet?

3. Digitaltechnik

16

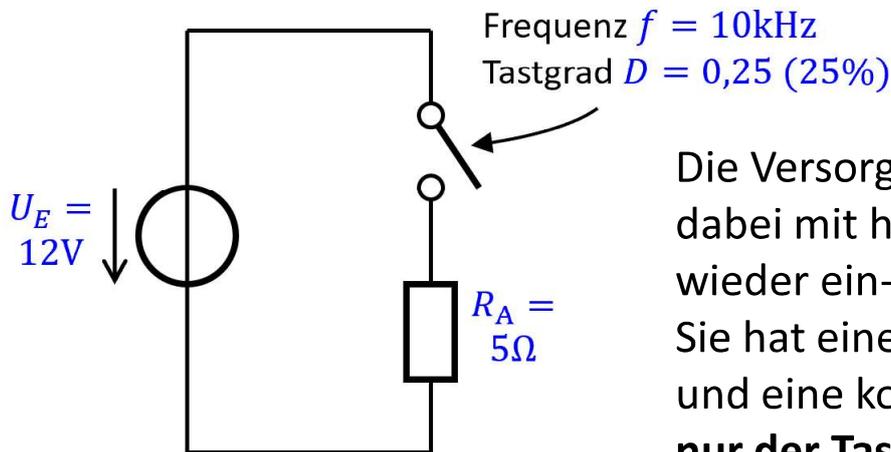
## Übungsaufgabe 8.2 (b)

- b) Zeichnen Sie die Stufen 1 und 2 mit Logikgattern (anstatt mit einzelnen Transistoren und Widerständen). Zeichnen Sie alle erforderlichen Verbindungen zwischen den Gattern und auch die beiden Eingänge E1 und E2. (Stufe 3 soll nicht gezeichnet werden!)
- c)  $T_5$  ist ein einfacher Verstärker – die Lampe leuchtet, falls am Punkt X eine logische 1 anliegt. Vervollständigen Sie das folgende Diagramm!



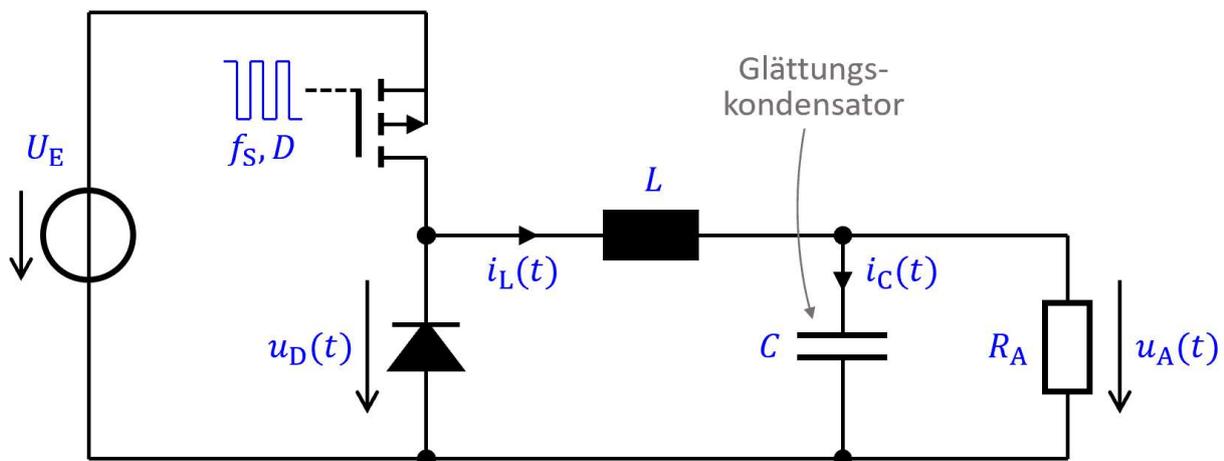
## 9. Schaltungen der Leistungselektronik

Wenn große Lasten (Elektromotoren, Heizungen, Leuchtmittel) stufenlos angesteuert werden müssen, geschieht dies oft mittels **Pulsweitenmodulation, kurz PWM**.



Die Versorgungsspannung wird dabei mit hoher Frequenz immer wieder ein- und ausgeschaltet. Sie hat eine konstante Amplitude und eine konstante Frequenz, **nur der Tastgrad ist variabel**.

Viele Verbraucher funktionieren nicht korrekt, wenn ihre Versorgungsspannung ständig ein- und wieder ausgeschaltet wird.

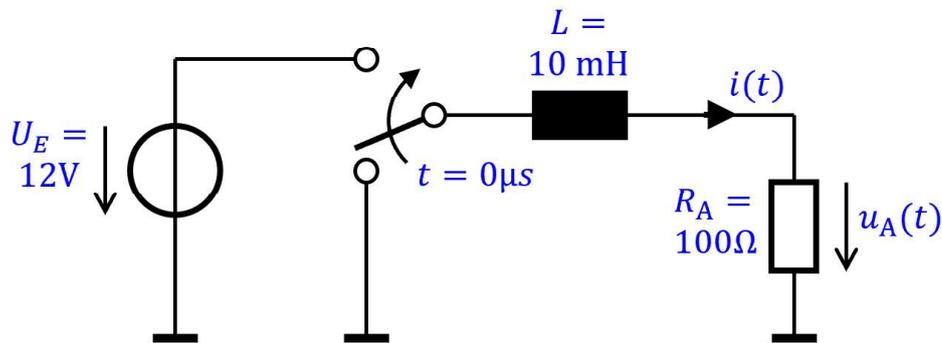


In diesen Fällen kann die Schaltung von Folie 1 um weitere Bauteile, insbesondere um eine Spule, ergänzt werden. Es ergeben sich sog. **Gleichspannungswandler: Aufwärts- und Abwärtswandler**.

Zur Vorbereitung betrachten Sie die abgebildete Schaltung. Wenn der Schalter zum Zeitpunkt  $t = 0\mu\text{s}$  eingeschaltet wird, gilt für  $i(t)$ :

$$i(t) = \frac{U_E}{R_A} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \text{ mit } \tau = \frac{L}{R_A}$$

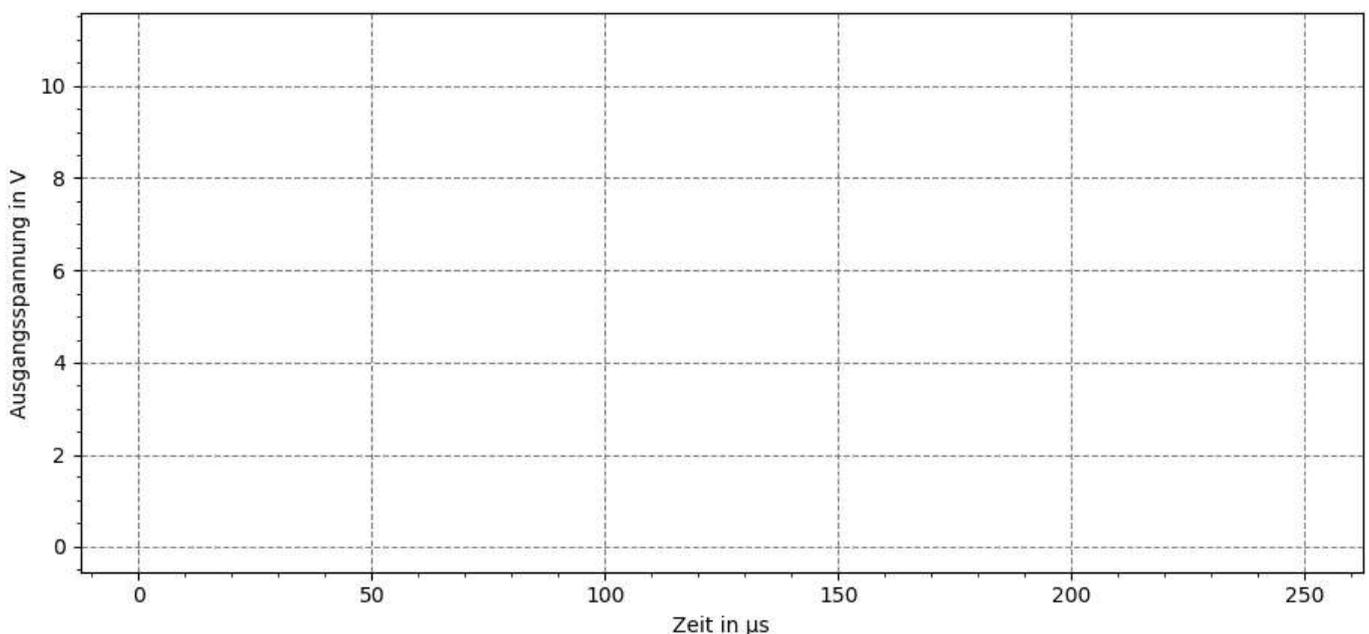
- Wie groß ist die Zeitkonstante  $\tau$ ?
- Wie groß ist der Strom  $i(t)$  nach sehr langer Zeit?
- Wie schnell steigt  $i(t)$  unmittelbar nach dem Einschalten an?
- Stellen Sie eine Formel zur Berechnung der Spannung  $u_A(t)$  auf.



9. Leistungselektronik

3

- Skizzieren Sie die Verläufe von  $i(t)$  und  $u_A(t)$ .
- Wie sehen die zeitlichen Verläufe von  $i(t)$  und  $u_A(t)$  aus, wenn der Schalter bei  $t = 100\mu\text{s}$  wieder ausgeschaltet wird?

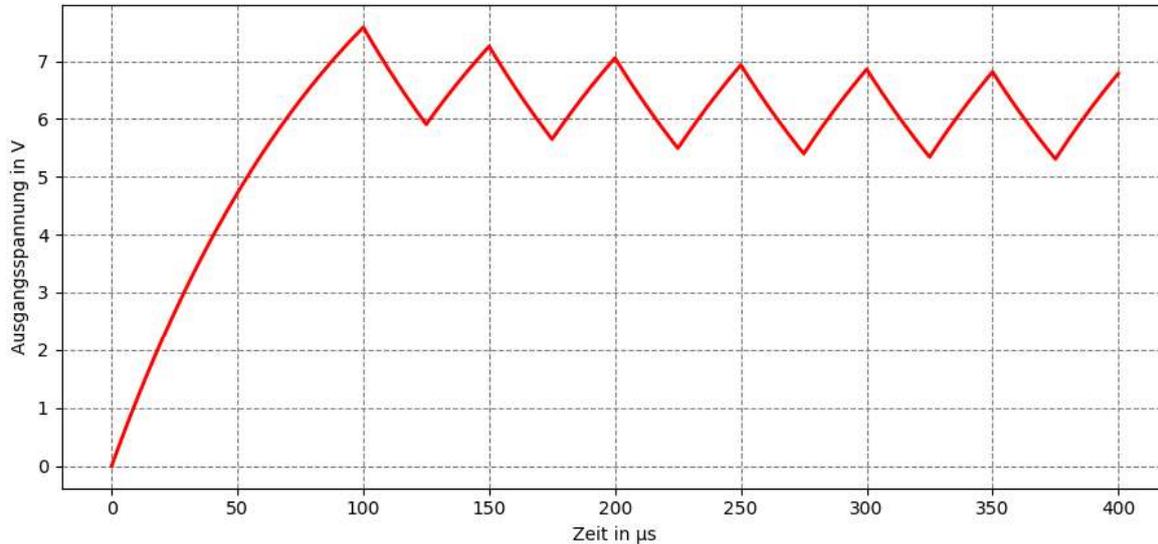


9. Leistungselektronik

4

### 9.1. Der Abwärtswandler

Der Schalter wird bei  $t = 125\mu\text{s}$  wieder ein-, bei  $t = 150\mu\text{s}$  aus-, bei  $t = 175\mu\text{s}$  ein-, bei  $t = 200\mu\text{s}$  wieder ausgeschaltet usw.



Am Ausgang stellt sich eine mittlere Spannung von  $U_A = 6\text{V}$  ein, die durch einen Kondensator weiter geglättet werden kann.

## Abwärtswandler (b)

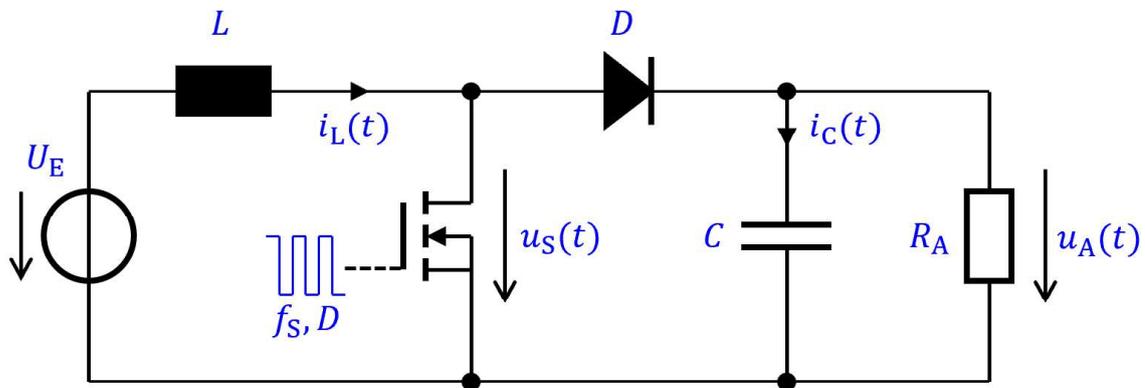
Die auf der Folie 2 gezeigte Schaltung nennt man **Abwärtswandler** (engl. step-down converter, buck converter). Bei idealen Bauelementen (Diode, MOSFET, Spule, Kondensator) kann die mittlere Ausgangsspannung sehr einfach berechnet werden:

$$U_A = U_E \cdot D \text{ mit dem Tastgrad } D = 0 \dots 1$$

Bei realen Bauelementen gilt diese einfache Beziehung nur noch näherungsweise,  $U_A$  ist zudem von der Belastung abhängig. In der Praxis werden daher oft **geregelte Spannungswandler** eingesetzt.

## 9.2. Der Aufwärtswandler

Werden MOSFET, Diode und Spule anders angeordnet, ergibt sich der sog. Aufwärtswandler (engl. step-up converter, boost converter).



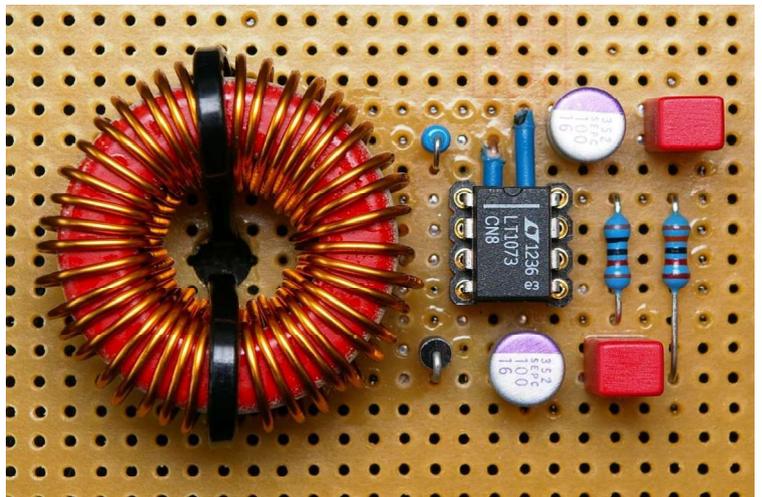
Die mittlere Ausgangsspannung ist nun größer als die Eingangsspannung. Bei idealen Bauelementen gilt wieder eine einfache Beziehung:

$$U_A = U_E / (1 - D) \text{ mit dem Tastgrad } D = 0 \dots 1$$

# Aufwärtswandler (b)

Lasten mit einem Strombedarf oberhalb einiger Hundert Milliampere werden in der Regel durch Schaltwandler versorgt (Abwärts- oder Aufwärtswandler), sofern ein direkter Anschluss an Batterien oder andere geeignete Spannungsquellen nicht möglich ist. Die benötigten Schaltwandler sind für kleinere Leistungen als kompakte Module, für größere Leistungen als fertig bestückte Platinen erhältlich.

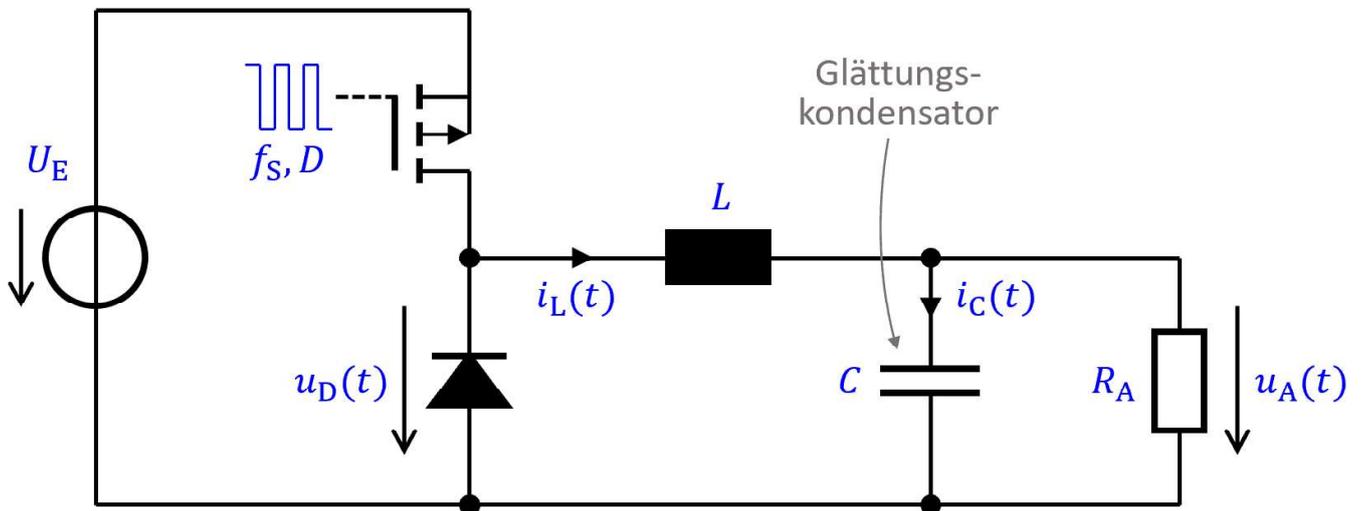
Schaltwandler können auch mit speziellen integrierten Schaltungen aufgebaut werden, in denen der größte Teil der notwendigen Elektronik sowie ein geeigneter Regler enthalten sind. Sie müssen nur noch um wenige externe Bauelemente (insbes. eine geeignete Spule) ergänzt werden.



## Übungsaufgabe 9.1

Skizzieren Sie in der abgebildeten Schaltung eines Abwärtswandlers die Richtung der fließenden Ströme,

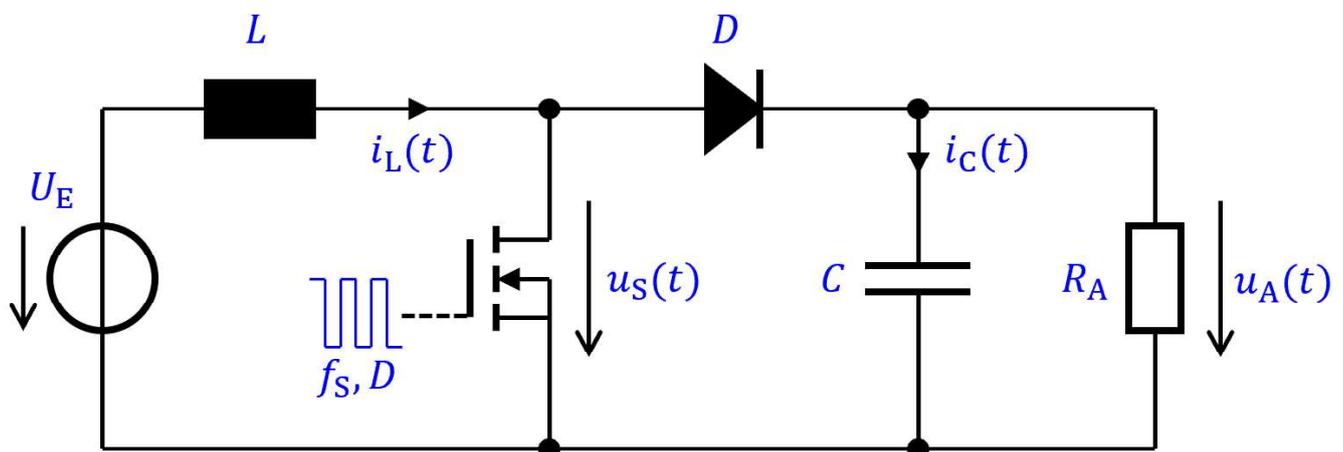
- wenn der MOSFET eingeschaltet ist (in roter Farbe),
- unmittelbar nachdem der MOSFET ausgeschaltet wurde (in blauer Farbe).



## Übungsaufgabe 9.2

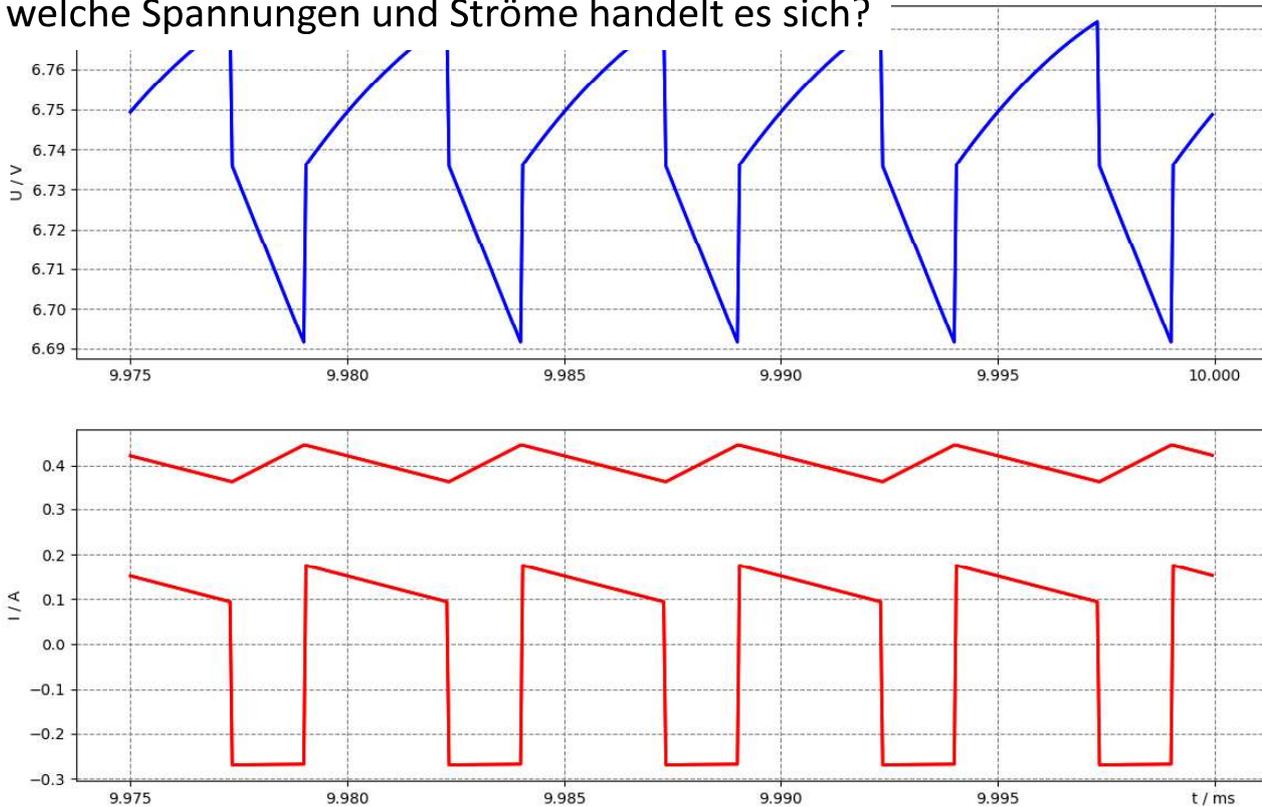
Skizzieren Sie in der abgebildeten Schaltung eines Aufwärtswandlers die Richtung der fließenden Ströme,

- wenn der MOSFET eingeschaltet ist (in roter Farbe),
- unmittelbar nachdem der MOSFET ausgeschaltet wurde (in blauer Farbe).



## Übungsaufgabe 9.3

Betrachten Sie die simulierten Spannungen und Ströme in einem Aufwärtswandler mit realen Bauelementen,  $U_E = 5V$  und  $D = 0,333$ . Um welche Spannungen und Ströme handelt es sich?



# 10. Operationsverstärker

## Digitale ICs:

- Gatter (AND, NAND, OR, NOR, XOR), Zähler
- Speicher
- Prozessoren, Mikrocontroller

## Analoge ICs:

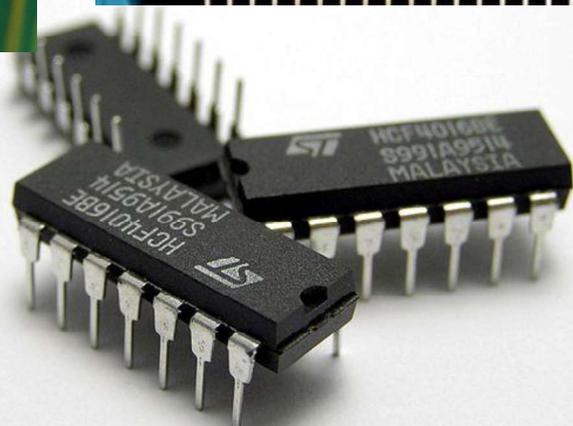
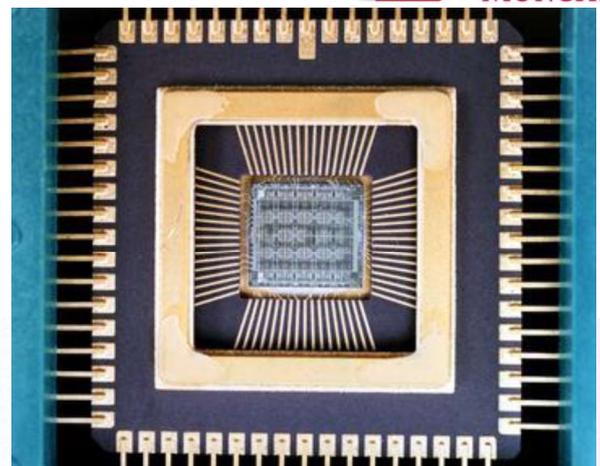
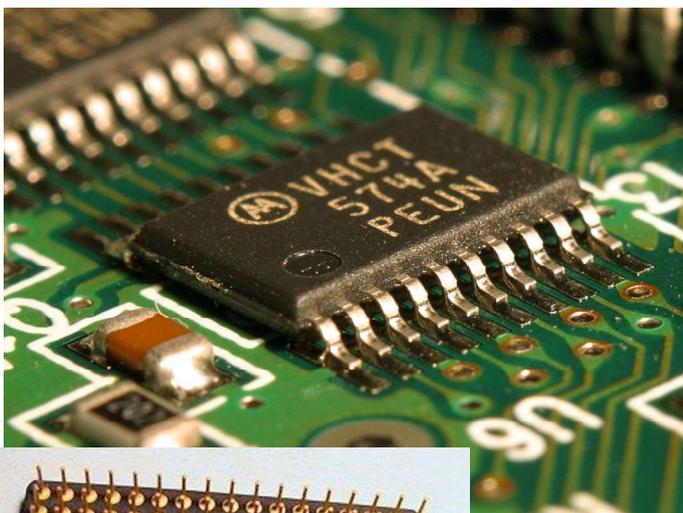
- Audio-Verstärker (Leistungsverstärker)
- HF-Schaltkreise, Oszillatoren
- Stromversorgungen, Spannungsregler
- Operationsverstärker

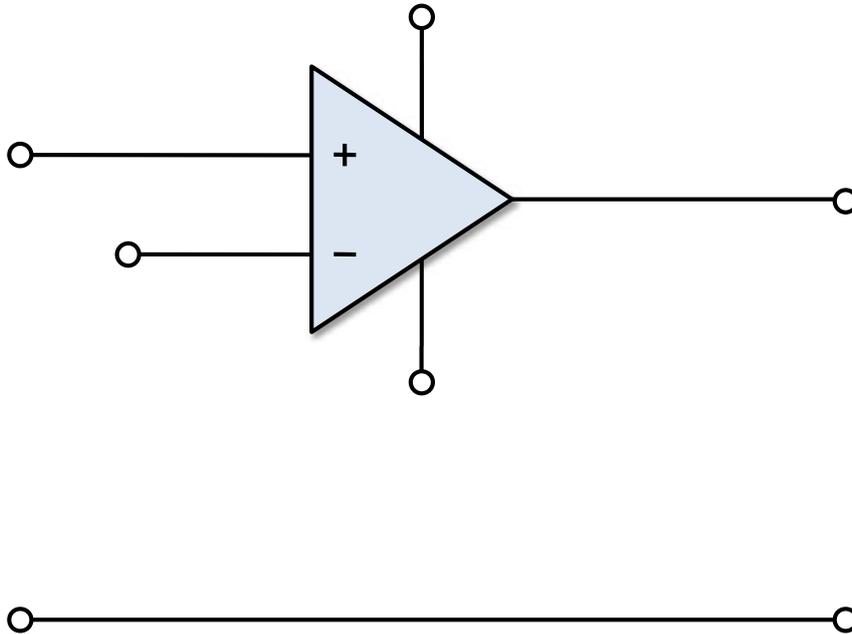
Operationsverstärker sind analoge integrierte Schaltungen (ICs). Sie werden in vielen technischen Bereichen eingesetzt. Mit Operationsverstärkern können z. B. Sensorsignale verstärkt und el. Regler aufgebaut werden.

10. Operationsverstärker

1

## Beispiele für integrierte Schaltungen

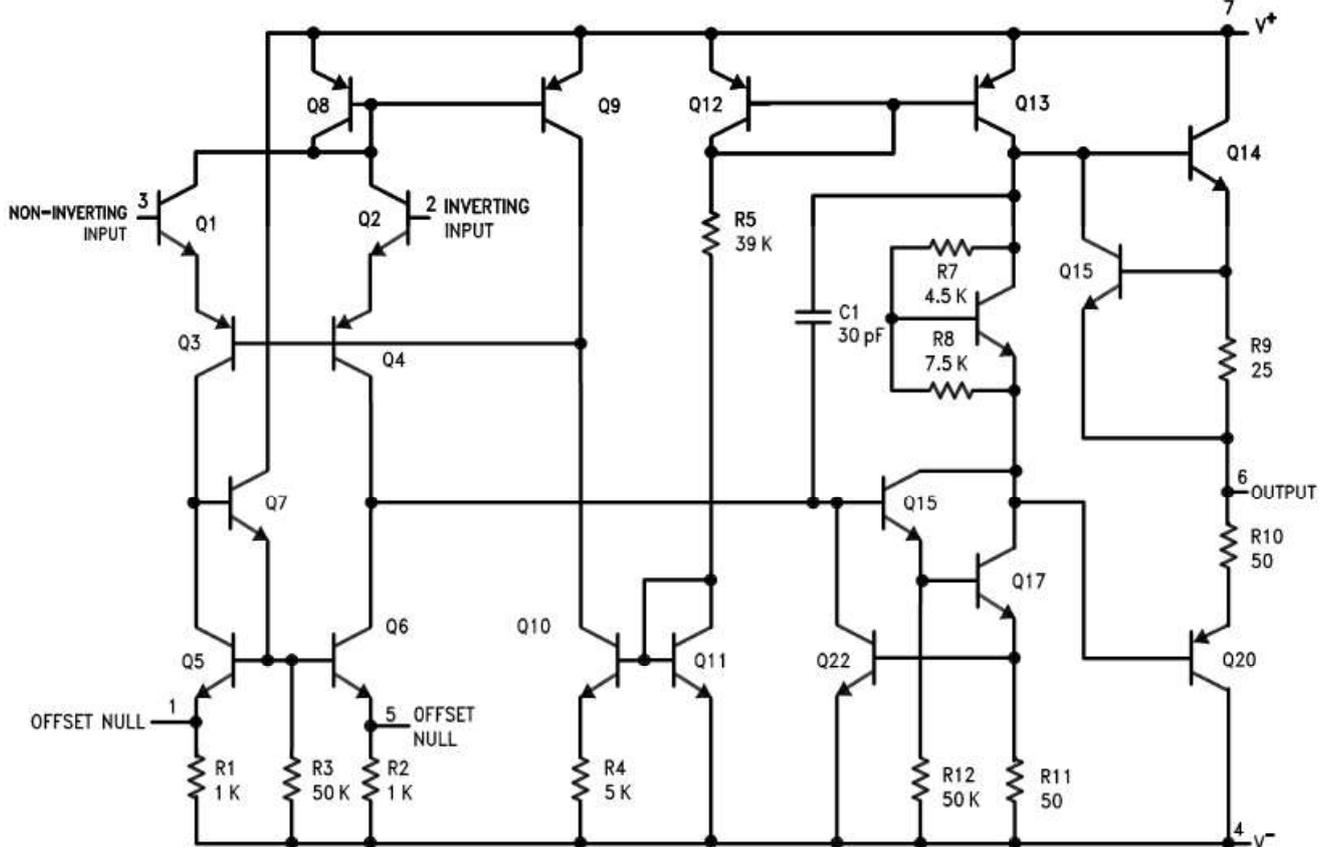




10. Operationsverstärker

3

## Operationsverstärker LM741, interne Schaltung



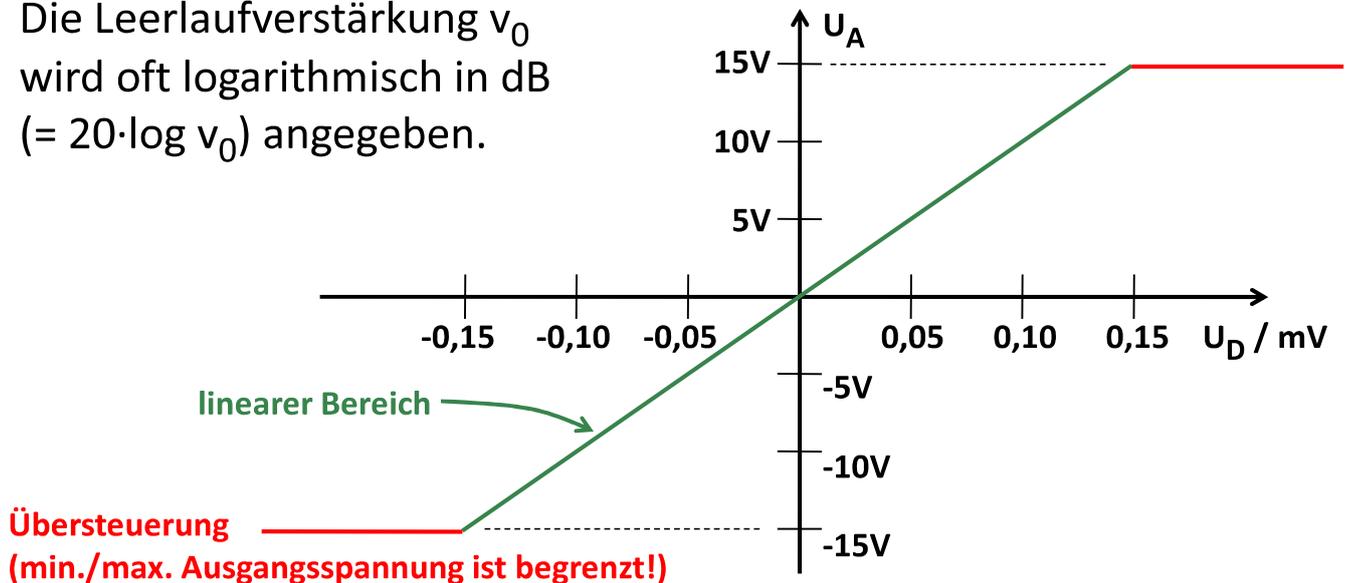
10. Operationsverstärker

4

Die Differenz der beiden Eingangsspannungen erscheint verstärkt am Ausgang. Diese „Leerlaufverstärkung“ ist sehr hoch (Verstärkungsfaktor ca.  $10^4$  bis  $10^5$ ):

$$U_A = U_D \cdot v_0$$

Die Leerlaufverstärkung  $v_0$  wird oft logarithmisch in dB ( $= 20 \cdot \log v_0$ ) angegeben.



10. Operationsverstärker

5

## Gegenkopplung, Mitkopplung

Wenn an die beiden Eingänge des Operationsverstärkers unterschiedliche Spannungen angelegt werden, führt die hohe Leerlaufverstärkung dazu, dass am Ausgang ständig die maximale bzw. minimale Ausgangsspannung ansteht (der OPV ist übersteuert).

In der Regel ist daher eine Außenbeschaltung des Operationsverstärkers notwendig, ein sog. **Rückkopplungsnetzwerk**, wodurch ein Teil der Ausgangsspannung auf einen der Eingänge zurückgeführt wird.

Wird die Ausgangsspannung auf den invertierenden („negativen“) Eingang zurückgeführt, spricht man von **Gegenkopplung**, sonst von **Mitkopplung**.

# Beispiel: Datenblatt LF411

**National Semiconductor**  
August 2000

## LF411 Low Offset, Low Drift JFET Input Operational Amplifier

**General Description**  
These devices are low cost, high speed, JFET input operational amplifiers with very low input offset voltage and guaranteed input offset voltage drift. They require low supply current yet maintain a large gain bandwidth product and fast slew rate. In addition, well matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The LF411 is pin compatible with the standard LM741 allowing designers to immediately upgrade the overall performance of existing designs.  
These amplifiers may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample and hold circuits and many other circuits requiring low input offset voltage and drift, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth.

**Features**

- Internally trimmed offset voltage: 0.5 mV(max)
- Input offset voltage drift: 10  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (max)
- Low input bias current: 50 pA
- Low input noise current: 0.01 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- Wide gain bandwidth: 3 MHz(min)
- High slew rate: 10V/ $\mu\text{s}$ (min)
- Low supply current: 1.8 mA
- High input impedance:  $10^{12}\Omega$
- Low total harmonic distortion:  $\leq 0.02\%$
- Low 1/f noise corner: 50 Hz
- Fast settling time to 0.01%: 2  $\mu\text{s}$

**Typical Connection**

**Connection Diagrams**

**Metal Can Package**

Note: Pin 4 connected to case.

**Dual-In-Line Package**

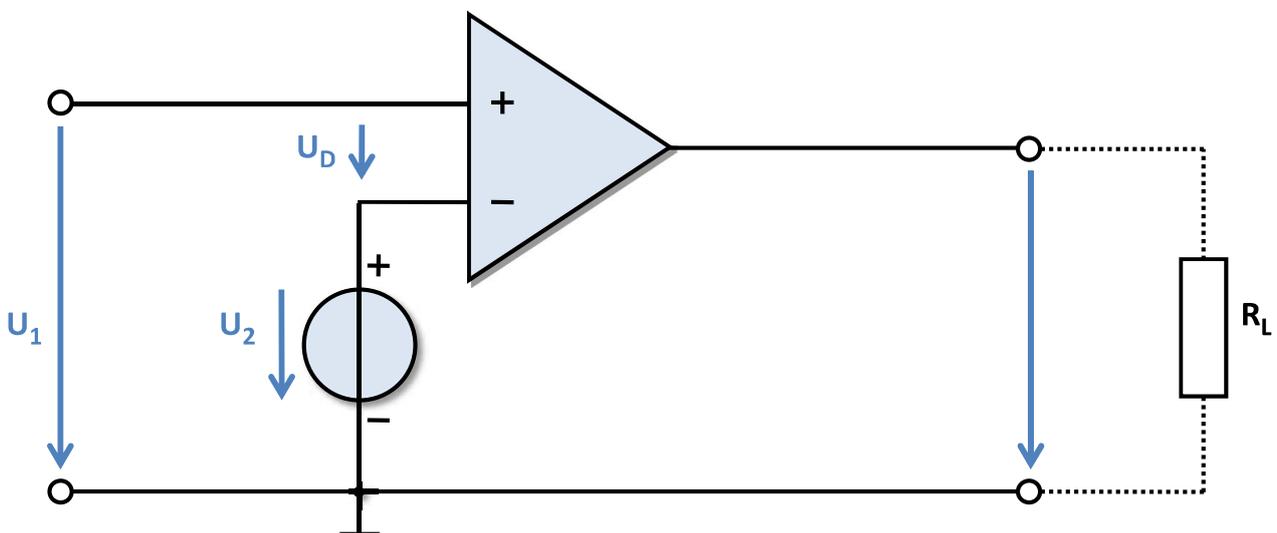
**Ordering Information**  
LF411XYZ  
X indicates electrical grade  
Y indicates temperature range  
"M" for military  
"C" for commercial  
Z indicates package type  
"H" or "N"

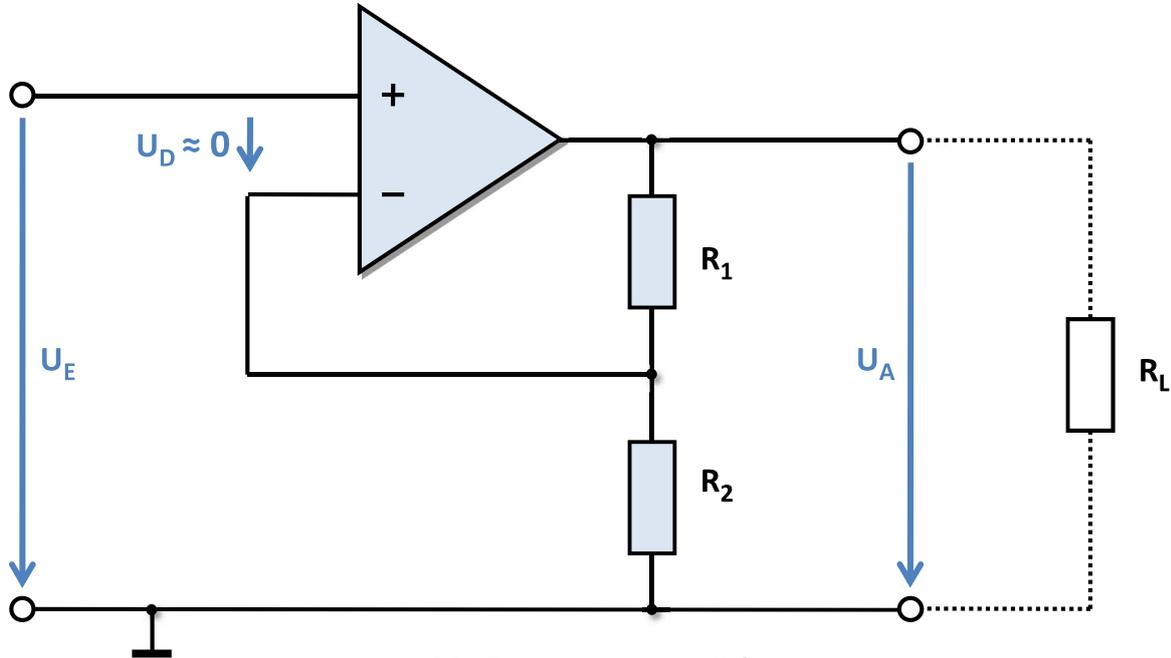
## Features

- Internally trimmed offset voltage: 0.5 mV(max)
- Input offset voltage drift: 10  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (max)
- Low input bias current: 50 pA
- Low input noise current: 0.01 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- Wide gain bandwidth: 3 MHz(min)
- High slew rate: 10V/ $\mu\text{s}$ (min)
- Low supply current: 1.8 mA
- High input impedance:  $10^{12}\Omega$
- Low total harmonic distortion:  $\leq 0.02\%$
- Low 1/f noise corner: 50 Hz
- Fast settling time to 0.01%: 2  $\mu\text{s}$

# Spannungskomparator

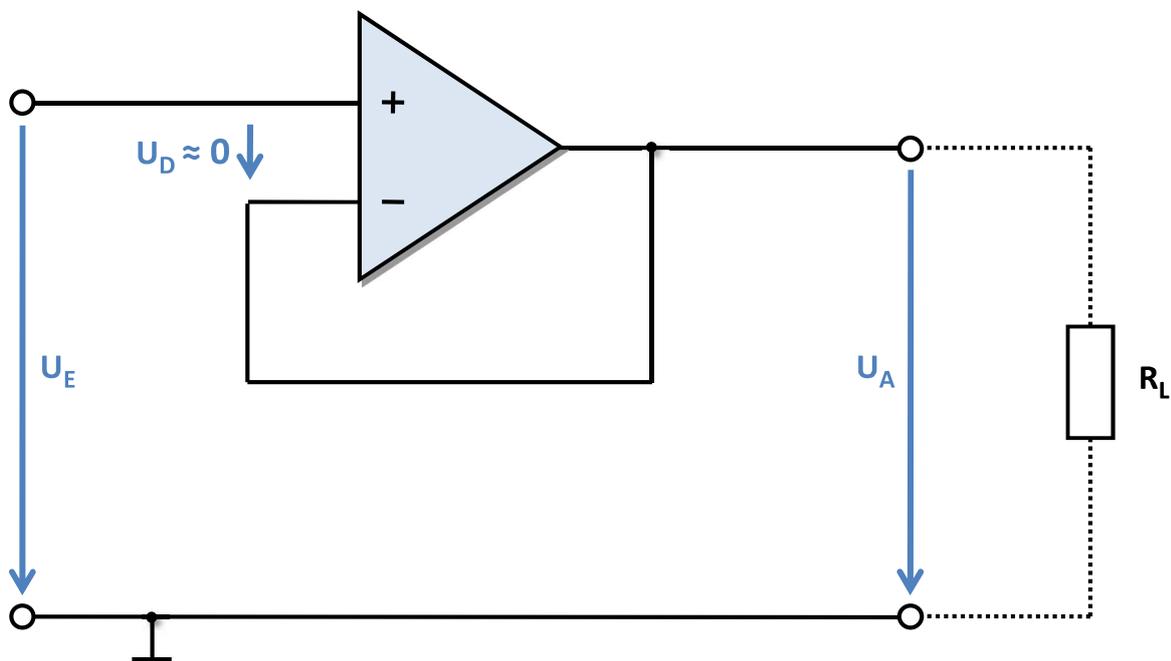
Liegen an den Eingängen des OPV unterschiedliche Spannungen, führt die hohe Leerlaufverstärkung dazu, dass am Ausgang ständig die max. oder min. Ausgangsspannung ansteht (OPV ist übersteuert). Dies kann dazu genutzt werden, Spannungen zu vergleichen („Komparator“).





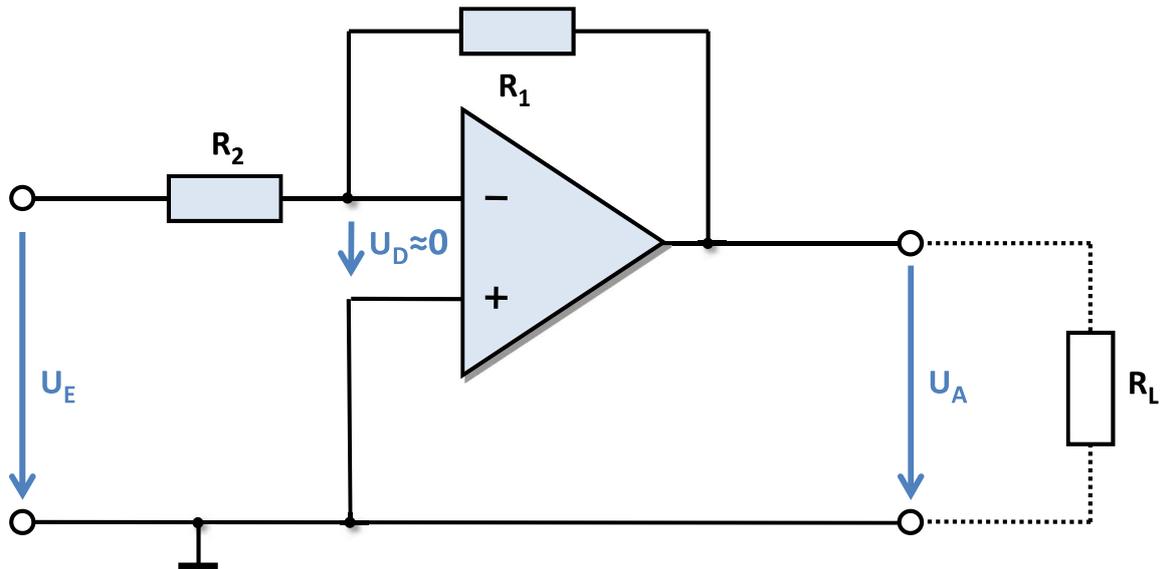
10. Operationsverstärker

9



10. Operationsverstärker

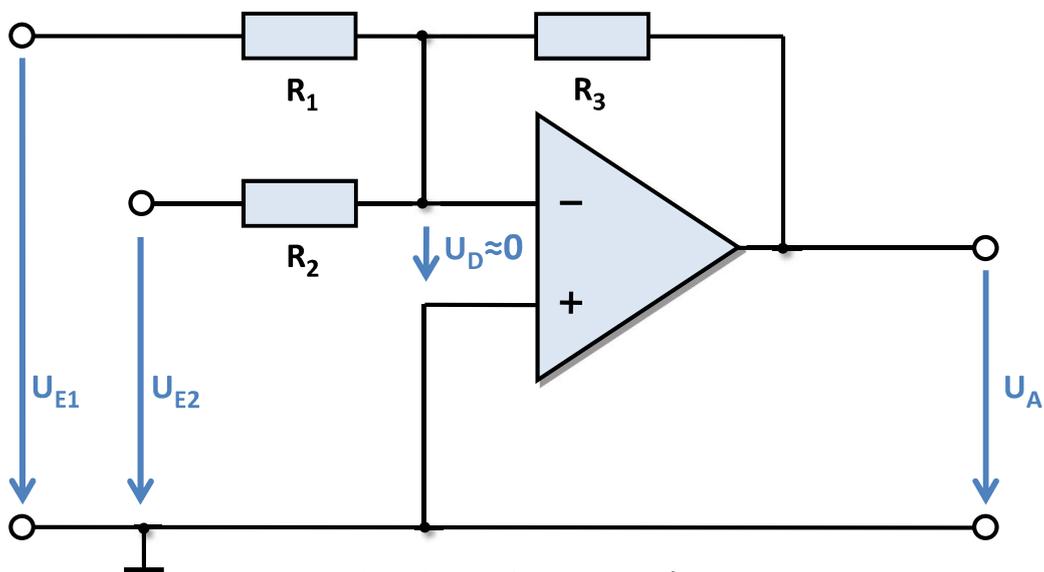
10



10. Operationsverstärker

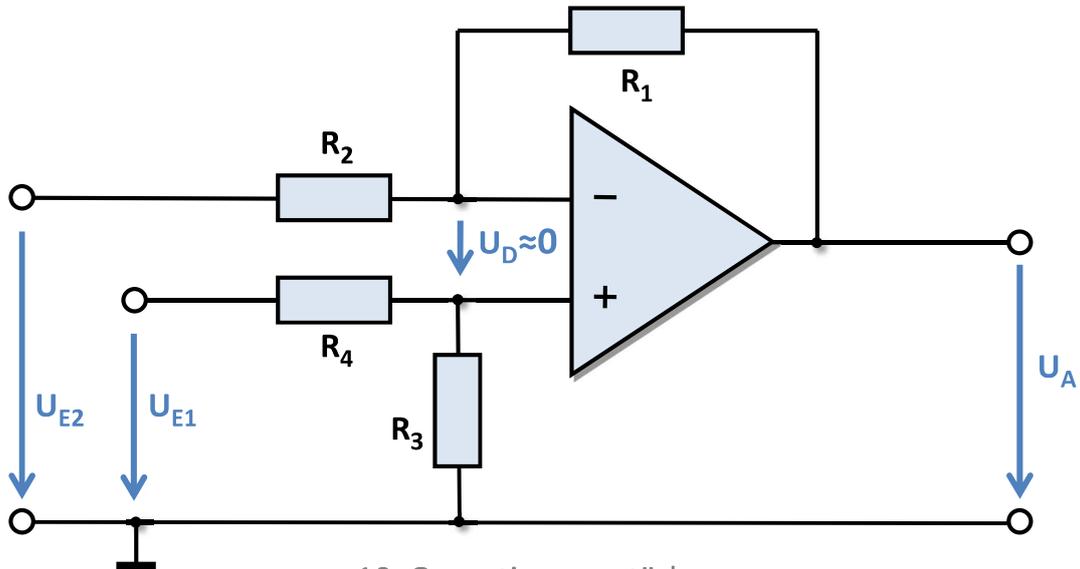
11

# Addierverstärker (invertierend)



10. Operationsverstärker

12



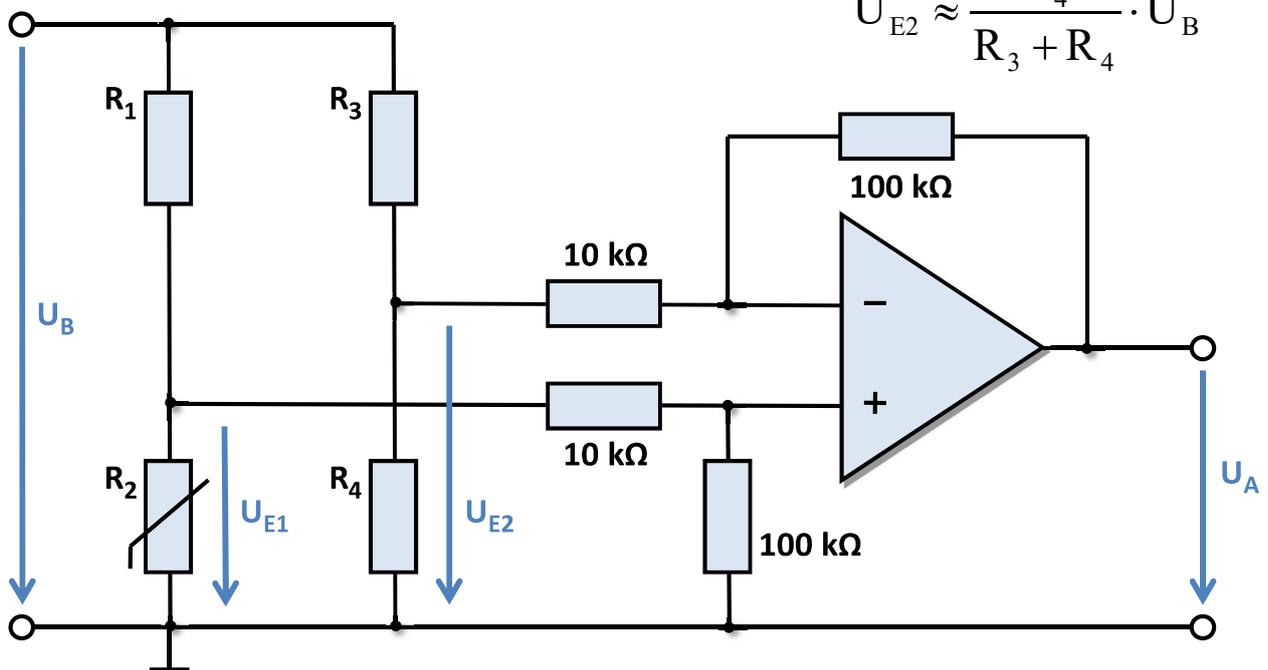
13

## Differenzverstärker (Anwendungsbeispiel)

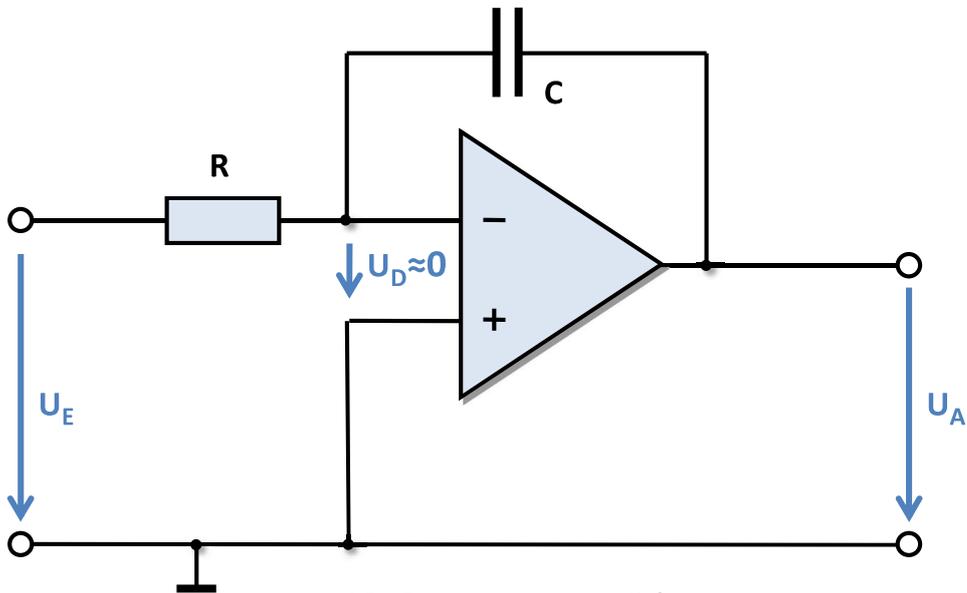
Differenzverstärker mit Brückenschaltung:  
z. B. zur Temperatur-, Strömungsmessung

$$U_{E1} \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_B$$

$$U_{E2} \approx \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot U_B$$



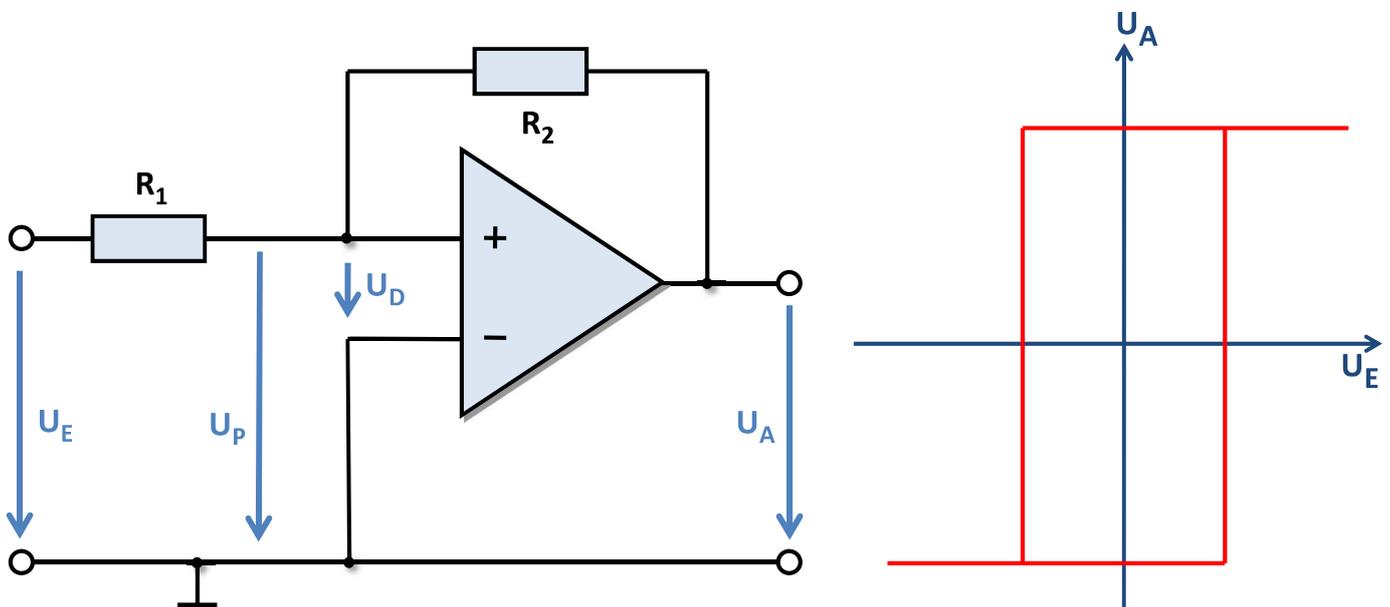
14



10. Operationsverstärker

15

# Komparator mit Hysterese („Schmitt-Trigger“)



10. Operationsverstärker

16

### (SS 2010 – FA, Aufgabe 2)

Auf der folgenden Seite ist ein PI-Regler aus drei idealen Operationsverstärkern abgebildet. Die Reaktion des Reglers auf einen Sprung der Eingangsspannung  $u_E$  soll ermittelt werden („Sprungantwort“).

Alle Operationsverstärker haben eine maximale Ausgangsspannung von  $\pm 10$  Volt. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  ist der Kondensator nicht geladen.

- Geben Sie die genaue Funktion der Verstärkerstufen  $OP_1$ ,  $OP_2$  und  $OP_3$  an. Welche Zusammenhänge bestehen zwischen den Ein- und Ausgangsspannungen bei jeder der drei Teilschaltungen?
- Zeichnen Sie die zeitlichen Verläufe von  $u_1$ ,  $u_2$  und  $u_A$  in das vorbereitete Diagramm.
- Zu welchem Zeitpunkt  $t_1$  erreicht die Ausgangsspannung  $u_A$  den maximal möglichen Wert von 10 Volt?

## Übungsaufgabe 10.1 (b)

