

*CE*

***Elektronisch -  
Physikalische  
Grundlagen der  
Datenverarbeitung***

# Inhaltsverzeichnis

ANALOGE SCHALTUNGEN .....	5
Physikalische Größen und Maßeinheiten .....	6
Grundgrößen der Mechanik .....	6
Ladung und Strom .....	6
Coulomb Gesetz .....	6
Kleinste Ladungsmenge .....	6
Vergrößerungs- und Verkleinerungsfaktoren .....	6
Elemente zur korrekten Stromangabe .....	7
Elektrische Spannung .....	7
Elemente zur korrekten Spannungsangabe .....	7
Leistung und Arbeit .....	7
Beispiele elektrischer Energieerzeuger („Signalquellen“) .....	8
Beispiele elektrischer Energieverbraucher .....	8
Kirchhoff - Gesetze .....	8
Kirchhoffsches Stromgesetz (KIG) .....	8
Verallgemeinerung des KIG auf geschlossenen Hüllflächen .....	9
Kirchhoffsches Spannungsgesetz (KUG) .....	9
Einfache Schaltungselemente .....	9
Der Widerstand .....	10
Ohmsches Gesetz .....	10
Leitwert .....	10
Zugeführte Leistung P .....	11
Bauformen von linearen Widerständen .....	11
Festwiderstände .....	11
Drahtwiderstand .....	11
Massewiderstand .....	12
Schichtwiderstand .....	12
SMD - Widerstand .....	12
Unbelasteter Spannungsteiler .....	12
Nicht lineare Widerstände (Dioden) .....	13
Halbleiterdiode .....	13
Ideale Schalterdiode .....	13
Einstellbare Widerstände .....	13
Wertestufung und Toleranz von Widerständen .....	14
Serienschaltung von Widerständen .....	14
Parallelschaltung von Widerständen .....	14
Signalquellen .....	15
Unabhängige Signalquellen .....	15
Ideale unabhängige Spannungsquelle .....	15
Ideale unabhängige Stromquelle .....	16
Reale Signalquellen .....	16
Kennliniengleichung .....	17
Ersatzschaltbild einer realen Spannungsquelle .....	17
Ersatzschaltbild einer realen Stromquelle .....	17
Thermisch rauschender Widerstand .....	17
Anpassung .....	18
Gesteuerte Signalquellen .....	18
Spannungsgesteuerte Spannungsquelle .....	19
Stromgesteuerte Stromquelle .....	20
Spannungsgesteuerte Stromquelle .....	20
Stromgesteuerte Spannungsquelle .....	20
Schaltungsanalyse .....	21
Knotenanalyse .....	21
KA mit idealen Operationsverstärkern ( $A = \infty$ ) .....	23
Überlagerungssatz .....	24
2 - Pol - Ersatzquellen - Theorem .....	24

Anwendung: Wheatstonsche Brücke .....	25
Substitutionstheorem .....	26
<b>HALBLEITER .....</b>	<b>27</b>
Metalle .....	28
Edelgase .....	28
Halbleiter .....	28
Erhöhen der Leitfähigkeit von Halbleitern .....	28
<b>Licht - Halbleiter - Wechselwirkung .....</b>	<b>28</b>
Licht als elektromagnetische Welle .....	28
Licht als Korpuskel .....	29
Licht - Halbleiter - Wechselwirkung .....	29
<b>Intrinsic - Halbleiter .....</b>	<b>29</b>
Dotieren von Halbleitern .....	30
Donatoren .....	30
Akzeptoren .....	30
Zusammenfassung .....	31
Intrinsic Material .....	31
n - Material .....	31
p - Material .....	31
<b>Die Halbleiterdiode .....</b>	<b>32</b>
Betriebsmodi der Halbleiterdiode .....	32
Thermodynamisches Gleichgewicht .....	32
Durchlaßbetrieb .....	33
Sperrbereich .....	33
Gleichung der Diodenkennlinie I(U) .....	33
Spannungserhöhung für eine Stromver - x - fachung .....	34
Diodenkennlinie im Sperrbereich .....	34
Temperaturverhalten im Sperrbereich .....	34
Temperaturverhalten im Durchlaßbereich .....	34
Diode im Kleinsignalbetrieb .....	35
Durchlaßbetrieb .....	36
Ia = 0 .....	36
Sperrbereich .....	36
<b>Thermische Dimensionierung von Schaltungen .....</b>	<b>36</b>
Die drei Mechanismen der Wärmeabfuhr .....	36
Wärmeleitung .....	36
Wärmestrahlung .....	37
Konvektion .....	37
Wärmewiderstand .....	37
Analogie zum Ohmschen Widerstand .....	37
Thermische Dimensionierung von Bauelementen .....	38
<b>Die Zener-Diode .....</b>	<b>39</b>
Die Betriebsarten der Z-Diode .....	39
UZM < ca. 5 V: Zener- oder Tunnel - Effekt .....	39
UZM > ca. 7 V: Lawinen - Effekt .....	39
UZM = 6 V = ideal .....	39
Anwendungsschaltung .....	40
Ersatzschaltbild .....	40
<b>Der Bipolar - Transistor .....</b>	<b>41</b>
Typen .....	41
Ersatzschaltbild für den Transistor .....	41
Das Transistorersatzschaltbild nach Eberts - Moll .....	42
Sonderfall: Normaler Betrieb .....	43
Die Grundsaltungen des Transistors als Verstärker .....	43
Emitter - Grundsaltung .....	43
Basis - Grundsaltung .....	43
Collector - Grundsaltung .....	43
Die Emittergrundsaltung .....	44
Technisches- oder Pi-Ersatzschaltbild .....	44

---

ANHÄNGE .....	45
Stufung und Toleranz von Widerständen .....	46
Technische Signalquellen .....	47
Eigenschaften einiger Leiterwerkstoffe .....	47
Physikalische Eigenschaften einiger Stoffe .....	48
Großsignal- und Kleinsignalverhalten einiger Schaltelemente .....	49
Index .....	50

# **ANALOGUE** **SCHALTUNGEN**

# Physikalische Größen und Maßeinheiten

## Grundgrößen der Mechanik

Grundgröße	Formelzeichen	Maßeinheiten	Abkürzung
Länge	l	Meter	m
Masse	m	Kilogramm	kg
Zeit	t	Sekunde	s
Strom	i	Ampere	A
Temperatur	T	Kelvin	K

## Ladung und Strom

<b>Grundgröße:</b>	elektrische Ladung
<b>Formelzeichen:</b>	Q, q
<b>Maßeinheit:</b>	Coulomb
<b>Abkürzung:</b>	c
<b>Zusammenhänge:</b>	1 C = 1 As

## Coulomb Gesetz

$$|F| = \left| \frac{Q_1 \times Q_2}{4\pi \times \epsilon_0 \times r^2} \right| \quad \epsilon_0 = \text{absolute Dielektrizitätskonstante} = 8,854187827 \times 10^{-12} \frac{As}{Nm}$$

$r$  = Abstand

<b>Techn. Anwendung:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elektromagnetisches Voltmeter</li> <li>- Oszilloskop</li> <li>- Kondensatormikrofon</li> <li>- Tintenstrahldrucker</li> </ul>
--------------------------	--

## Kleinste Ladungsmenge

Elementarladung  $q = 1,60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$

Proton:  $Q = 1 q$   
Elektron:  $Q = -1 q$

### Definition:

Der elektrische Strom ist die pro Zeiteinheit durch einen Querschnitt hindurchtretende Ladungsmenge:

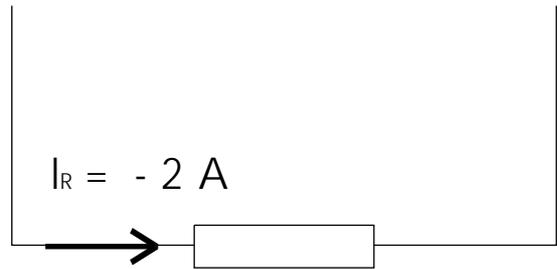
$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt} \quad \text{Maßeinheit: } [I] = \frac{[Q]}{[t]} = \frac{C}{s} = A$$

## Vergrößerungs- und Verkleinerungsfaktoren

Name	Wert	Abkürzung	Name	Wert	Abkürzung
Peta	$10^{15}$	P	Milli	$10^{-3}$	m
Tera	$10^{12}$	T	Mikro	$10^{-6}$	$\mu$
Giga	$10^9$	G	Nano	$10^{-9}$	n
Mega	$10^6$	M	Pico	$10^{-12}$	p
Kilo	$10^3$	k	Femto	$10^{-15}$	f

## Elemente zur korrekten Stromangabe

- Schaltbild
- Stromzählpfeil wird vor Beginn der Rechnung eingetragen
- Formelzeichen, Name
- Einheit
- Vorzeichen
- Zahlenwert



**Definition:** Ein Strom ist positiv, wenn sich in Zählrichtung positive Ladungsträger bewegen.

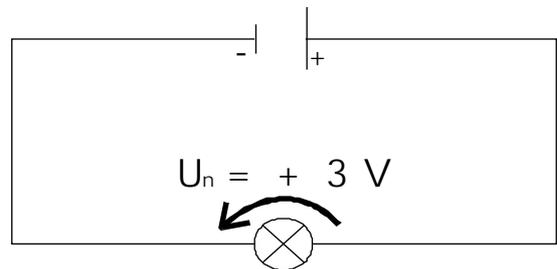
## Elektrische Spannung

= Ursache für das fließen eines Stromes

**Grundgröße:** elektrische Spannung  
**Formelzeichen:**  $U, u$   
**Maßeinheit:** Volt  
**Abkürzung:** V

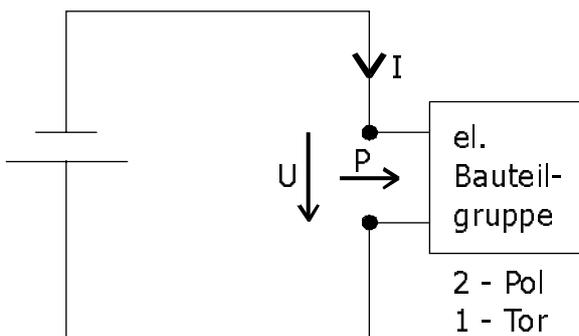
## Elemente zur korrekten Spannungsangabe

- Schaltbild
- Name für Spannung
- Zählpfeil wird vor Beginn der Rechnung eingetragen
- Vorzeichen
- Zahlwert
- Einheit



## Leistung und Arbeit

**Grundgröße:** Leistung  
**Formelzeichen:**  $P, p$   
**Maßeinheit:** Watt  
**Abkürzung:** W  
**Zusammenhänge:**  $1 \text{ W} = 1 \text{ Ws}$



Def.:  $P = U \times I \Rightarrow$  Die dem 2-Pol zugeführte Leistung  $P$

**Definition:**

$$P = \frac{W}{t} \rightarrow P(t) = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

$$P = \frac{dW}{dt} = \text{Momentanleistung}$$

$$dW = P \times dt$$

$$\int P = \frac{dW}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta W}{\Delta t} \right)$$

$$\int dW = W = \int P \times dt$$

$$W(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} P \times dt$$

Für  $P = \text{const}$  (Gleichstrom)

$$W = P \times t$$

$$W(t_1, t_2) = P \times (t_2 - t_1)$$

$$[W] = [P] \times [t] = \text{Ws}$$

<b>Grundgröße:</b>	Energie, Arbeit
<b>Formelzeichen:</b>	$W, w$
<b>Einheit:</b>	Wattsekunde = Joule
<b>Abkürzung:</b>	Ws = J
<b>Zusammenhänge:</b>	1 Ws = 1 AVs = 1 J

**Beispiele elektrischer Energieerzeuger („Signalquellen“)**

- Empfangsantenne
- Mikrofon
- Lesekopf eines Magneterzeuger
- Batterie, Solarzelle, Dynamo

**Beispiele elektrischer Energieverbraucher**

- Widerstand
- Lautsprecher
- LED
- Akku beim laden
- Elektromotor

## Kirchhoff - Gesetze

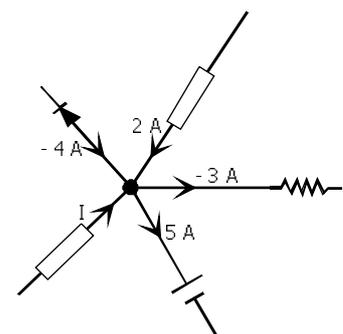
**Kirchhoffsches Stromgesetz (KIG)**

**Satz:** An einem Knoten ist die Summe der Vorzeichenbewerteten Ströme = 0.

Weggerichtete Ströme werden positiv,  
Hingerichtete Ströme werden negativ bewertet.

**Bsp.:**

	Herauslaufende Ströme
-	Hineinlaufende Ströme
=	0



$$0 = -2\text{ A} - (-4\text{ A}) + (-3\text{ A}) + 5\text{ A} - I$$

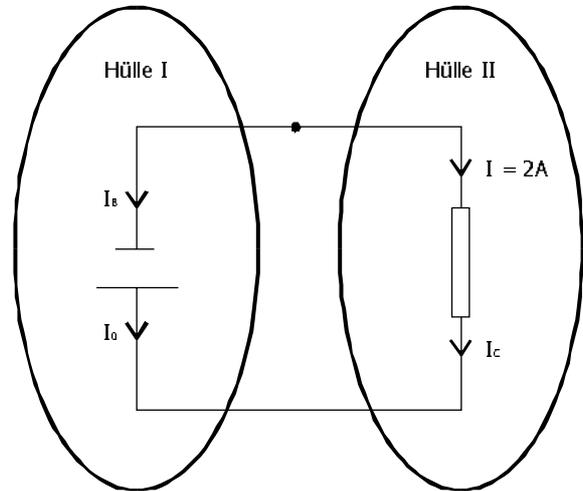
$$I = 4\text{ A}$$

### Verallgemeinerung des KIG auf geschlossenen Hüllflächen

KIG ①:  $I_B + I = 0$   
 $I_B = -I = -2\text{ A}$

KIG Hülle I:  $-I_B + I_0 = 0$   
 $I_0 = I_B$   
 $I_0 = 2\text{ A}$

KIG Hülle II:  $-I + I_C = 0$   
 $I_C = I = 2\text{ A}$



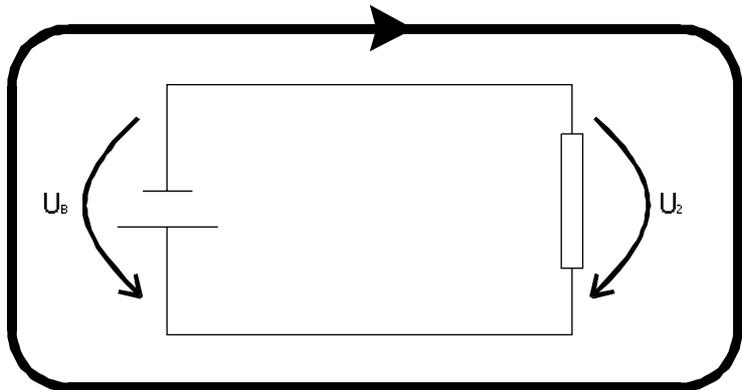
### Kirchhoffsches Spannungsgesetz (KUG)

**Satz:** Längs eines geschlossenen Umlaufs ist die Summe der Vorzeichenbewerteten Spannungen gleich 0.

**! Geschlossener Weg !**

$$+ U_2 - U_B = 0$$

$$U_2 = U_B$$

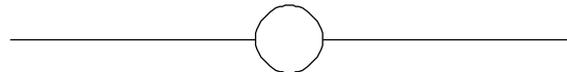


## Einfache Schaltungselemente

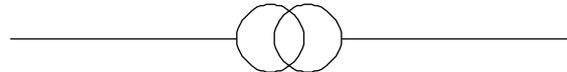
Widerstand



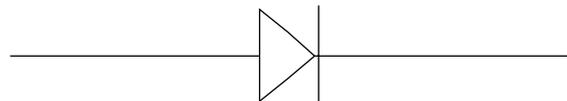
Ideale, unabhängige Spannungsquelle



Ideale, unabhängige Stromquelle

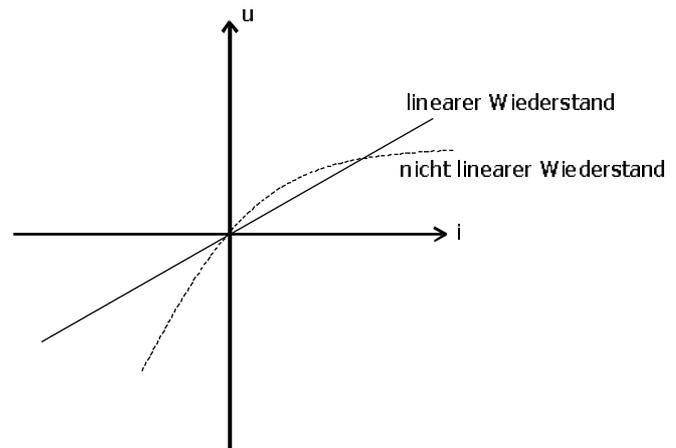


Ideale Schalterdiode



# Der Widerstand

Ein 2-Pol ist ein Widerstand, wenn er durch eine  $U(i)$  - Kennlinie beschreibbar ist, die durch den Nullpunkt geht.



**Grundgröße:** Widerstand  
**Formelzeichen:**  $R$   
**Maßeinheit:** Ohm  
**Einheitenzeichen:**  $\Omega$   
**Zusammenhang:**  $1 \Omega = 1 \frac{V}{A}$

## Ohmsches Gesetz

$$U = R \times I$$

### Schaltsymbol

Normalfall	$R > 0$		$U = R \times I$
Grenzfall	$R = 0$	 (Kurzschluß)	$U = 0$
Leerlauf	$R = \infty$		$I = 0$
Negativer Widerstand	$R < 0$	(selten, z.B. Tummeldiode)	$U = R \times I$

## Leitwert

$$I = \frac{U}{R} = U \times \frac{1}{R} \quad \text{Definition: Leitwert } G = \frac{1}{R}$$

**Einheit:**  $I = G \times U$      $[G] = \frac{1}{[R]} = \frac{1}{\Omega} = \frac{A}{V} = 1 \text{ Siemens} = 1 S$

**Grundgröße:** elektrischer Leitwert  
**Formelzeichen:**  $G$   
**Maßeinheit:** Siemens  
**Abkürzung:** S  
**Zusammenhänge:**  $1 S = 1 \frac{V}{A}$

### **Vorzeichen bei OHM:**

Das Vorzeichen hängt von der Richtung der Zählpfeile ab! Bei entgegengesetzten Zählpfeilen muß ein (-1) in die Gleichung hineinmultipliziert werden.

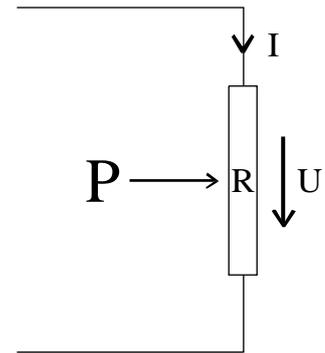
Bei dem Erstellen der Schaltung ist die grundsätzliche Richtung der Zählpfeile irrelevant.

## Zugeführte Leistung P

$$P = U \times I$$

$$P = (R \times I) \times I = R \times I^2$$

Bei einem  $R < 0$  ist  $P < 0$ , d. h. Ein negativer Widerstand gibt Leistung ab.



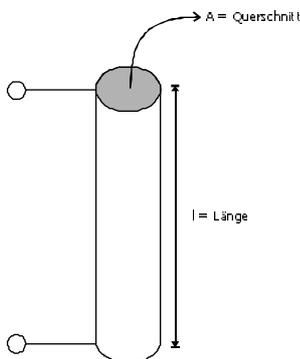
## Bauformen von linearen Widerständen

### Festwiderstände

- Drahtwiderstand
- Massewiderstand
- Schichtwiderstand
- Chipwiderstand (SMD - Widerstand)

### Drahtwiderstand

Drahtwiderstände stellen im Regelfalle aufgewickelte Spulen dar.



$$R = \rho_w \frac{l}{A} \quad [\rho_w] = \left[ \frac{\Omega \times \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$$

$\rho_w$  = spezifischer Widerstand (siehe Tabelle „Eigenschaften einiger Leiterwerkstoffe“)

**Grundgröße:** Spezifischer Widerstand

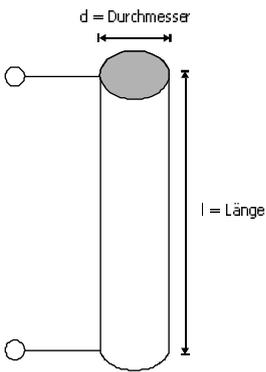
**Formelzeichen:**  $\rho_w$

**Maßeinheit:**  $\frac{\Omega \times \text{mm}^2}{\text{m}}$

**Abkürzung:** keine

**Zusammenhänge:** keine

## Massewiderstand



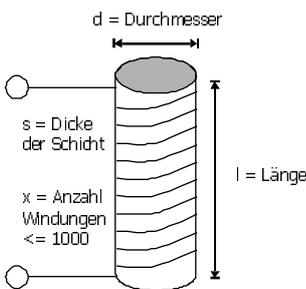
$$R = \rho_w \times \frac{l}{\pi \times d^2 \times \frac{1}{4}}$$

billig herstellbar, aber schlechte Qualität

## Schichtwiderstand

Zylindrischer Keramik - Körper mit leitender Beschichtung. Die leitende Schicht ist spiralförmig um den Körper gelegt, um Wirkung zu erhöhen.

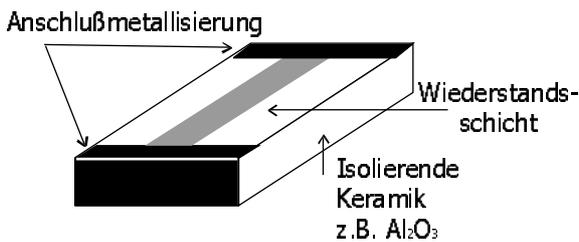
- Zwei Typen:
- Kohleschicht (billig)
  - Metallschichten im atomaren Bereich (hochwertig)



$$R = \rho_w \times \frac{l}{\pi \times s \times d} \times x$$

## SMD - Widerstand

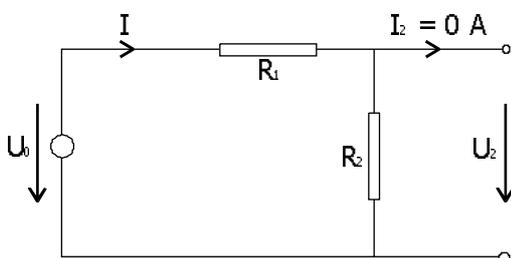
2 bis 5 mal kleiner, Kontaktierung auf Montageseite, 2 bis 5 mal höhere Zuverlässigkeit, bessere Hochfrequenz - Eigenschaften, etwa zehn mal billiger.



Bsp.: Maße für P = 0,1 W: 1,55 x 0,85 x 0,45 mm

## Unbelasteter Spannungsteiler

Gilt für  $I_2 = 0$  A, ansonsten muß eine parallel geschaltete Belastung berücksichtigt werden.



Nach Ohm:  $I = \frac{U_0}{R_1 + R_2}$

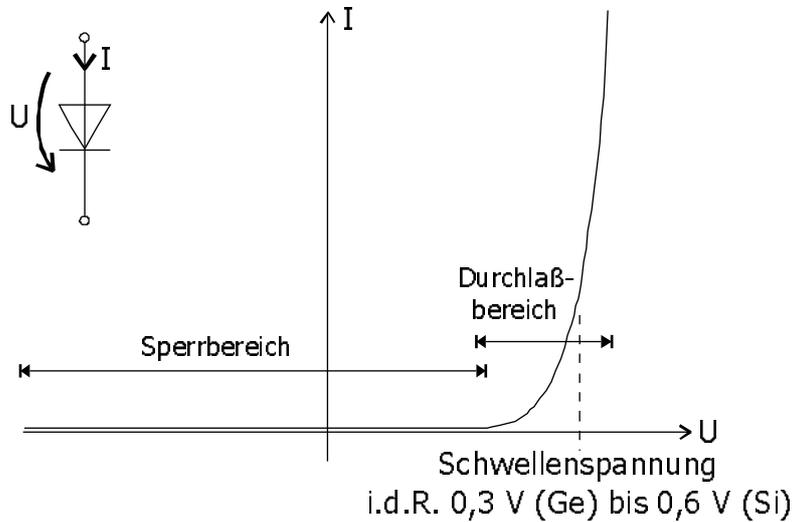
$$U_2 = R_2 \times I \xrightarrow{\text{I einsetzen}} U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U_0$$

$$U_2 = \frac{G_1}{G_1 + G_2} \times U_0$$

# Nicht lineare Widerstände (Dioden)

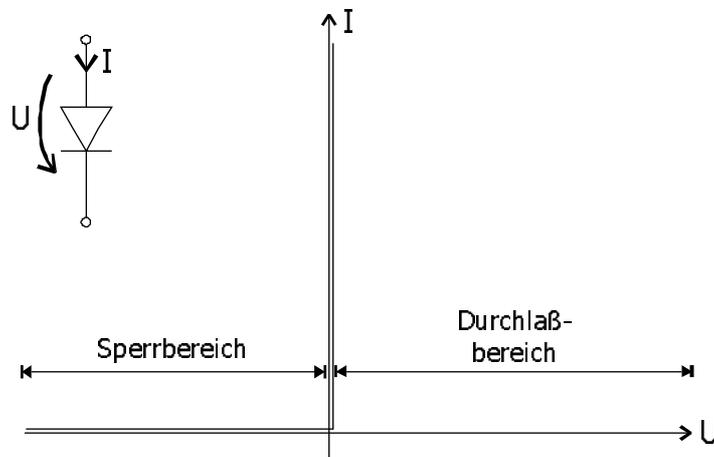
## Halbleiterdiode

Auch „pn“ - Diode genannt:



## Ideale Schalterdiode

Idealisierte Schalterdiode, die als Ersatzschaltbild zur Halbleiterdiode verwendet.

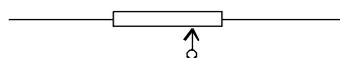


Sperrbereich:  $I = 0$  bei  $U \leq 0 \Rightarrow$  Bei der Analyse müssen also zwei Fälle bearbeitet werden!  
 Durchlaßbereich:  $U = 0$  bei  $I \geq 0$

## Einstellbare Widerstände

**Schaltzeichen:**

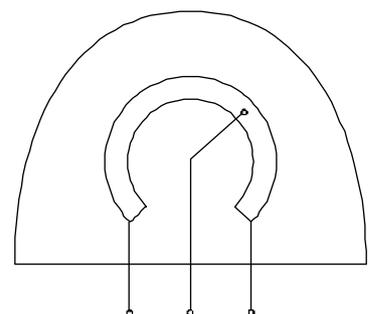
Potentiometer



Einstellpotentiometer



Bauformen sind variabel: Beispiel:



## Wertestufung und Toleranz von Widerständen

Stufung als geometrische Reihe:  $\frac{R_{k+1}}{R_k} = q > 1 \Rightarrow \frac{R_{k+n}}{R_k} = q^n$

Pro Dekade gleiche Anzahl an Widerständen,  $n = \text{Anzahl der Dekaden} \rightarrow q^n = 10$ .

Nach Norm:  $n = 6, 12, 24, 48, \dots \Rightarrow q = \sqrt[n]{10}$

für  $n = 24$  ist  $q = 1,101$ .  $\Rightarrow$  von  $1\Omega$  bis  $10\Omega$  24 verschiedene Widerstände.

Die bei der Herstellung anfallenden Toleranzen werden kleiner, je größer  $n$  gewählt wird.

**n**            **Toleranz**

6            20 %

12          10 %

24          5 %

48          2 %

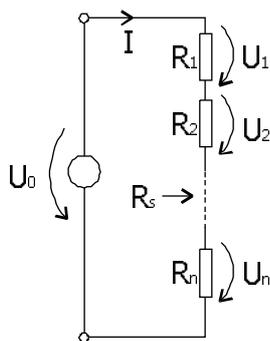
96          1 %

192        0,5 %

USW.

Im Anhang befindet sich hierzu eine Tabelle.

## Serienschaltung von Widerständen



$$U_1 = R_1 \times I$$

$$U_2 = R_2 \times I$$

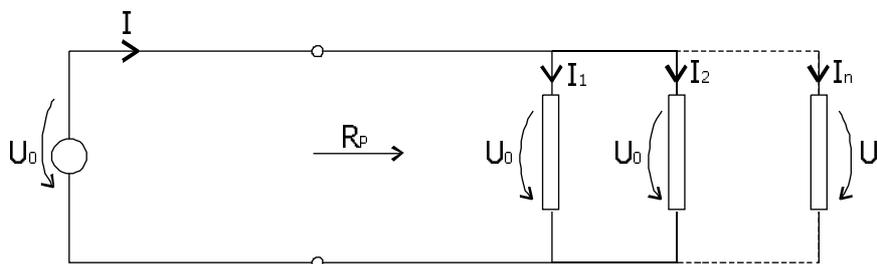
⋮

$$\text{Kirchhoff: } U_0 = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

$$R_s = \frac{U_0}{I} = \frac{R_1 \times I + R_2 \times I + \dots + R_n \times I}{I} \Rightarrow R_s = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

$$R_s = \sum_{k=1}^n R_k$$

## Parallelschaltung von Widerständen



Nach Kirchhoff:  $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$

Nach Ohm:  $I_n = \frac{U_n}{R_n}$

$$I = \frac{U_0}{R_1} + \frac{U_0}{R_2} + \dots + \frac{U_0}{R_n} = U_0 \times \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)$$

$$R_p = \frac{U_0}{I}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

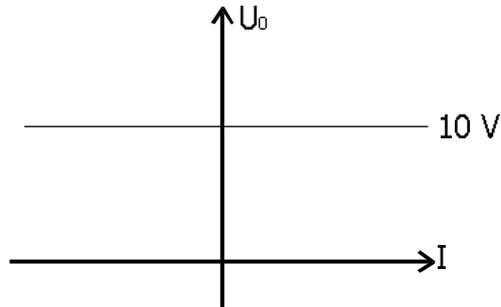
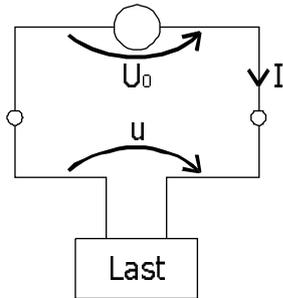
$$\Rightarrow G_p = G_1 + G_2 + \dots + G_n$$

# Signalquellen

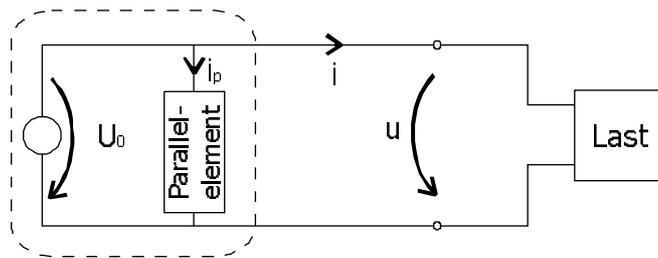
## Unabhängige Signalquellen

### Ideale unabhängige Spannungsquelle

Def.: Spannung  $u = U_0$ . Sie ist unabhängig von der Belastung  $I$ .

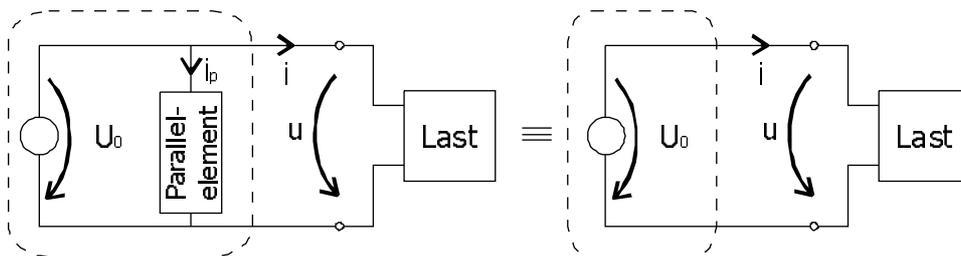


**Satz:** Eine ideale Spannungsquelle mit dem Wert  $U_0 = 0 \text{ V}$  verhält sich wie ein Kurzschluß.

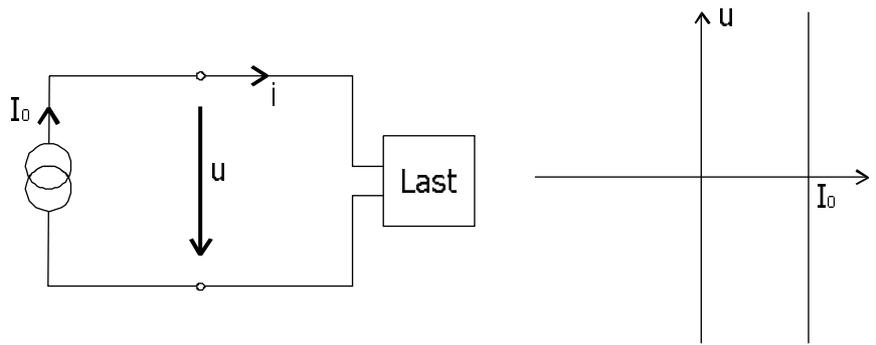


Nach Kirchhoff ist  $u - U_0 = 0 \Rightarrow u = U_0$ , unabhängig von  $i_p, i$ .

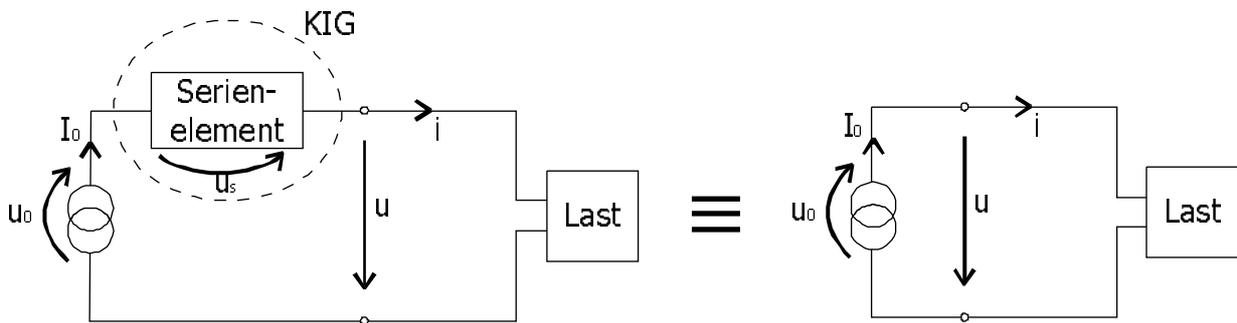
**Satz:** Eine ideale Spannungsquelle mit Parallelement verhält sich elektrisch an ihren Klemmen wie eine Spannungsquelle ohne Parallelement. (Schaltungsvereinfachung)



## Ideale unabhängige Stromquelle



**Satz:** Eine ideale Stromquelle mit  $I_0 = 0$  A verhält sich wie ein Leerlauf.

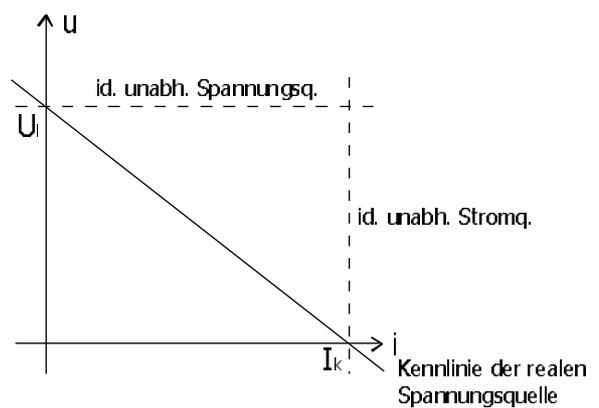
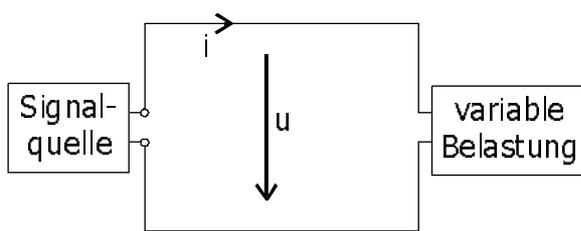


nach Kirchhoff:  $-I_0 + i = 0 \Rightarrow i = I_0$ , unabhängig von  $u_0$ ,  $u$ ,  $u_s$ .

**Satz:** Eine ideale Stromquelle mit Serienelement verhält sich elektrisch an ihren Klemmen wie eine ideale Stromquelle ohne Serienelement. (Schaltungsvereinfachung).

## Reale Signalquellen

**MESSUNG:**



**Definition:**  $U_l$  = Leerlaufspannung  
 $I_k$  = Kurzschlußstrom

$u = U_l$  bei  $i = 0$  A  
 $i = I_k$  bei  $u = 0$  V

## Kennliniengleichung

$$u(i) = i \times \frac{-I_k}{U_l} + U_l$$

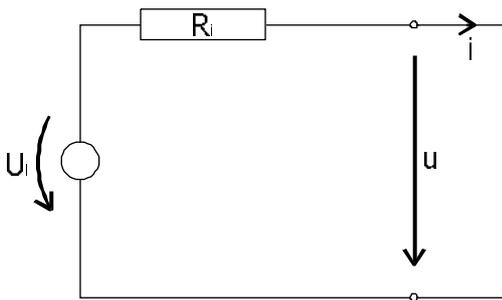
$$i(u) = u \times \frac{-I_k}{U_l} + I_k$$

**Definition:** Innenwiderstand:  $\frac{U_l}{I_k} = R_i \Rightarrow u(i) = i \times (-R_i) + U_l$

Innenleitwert:  $\frac{I_k}{U_l} = G_i \Rightarrow i(u) = u \times (-G_i) + I_k$

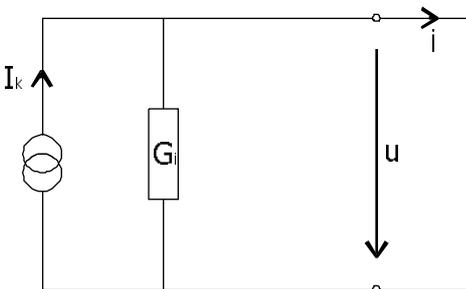
Die gemessene Kennliniengleichung der Signalquelle führt zum Ersatzschaltbildern:

### Ersatzschaltbild einer realen Spannungsquelle



$$U = U_l - R_i \times i$$

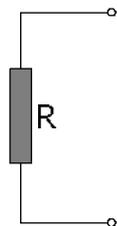
### Ersatzschaltbild einer realen Stromquelle



$$i = I_k - G_i \times u$$

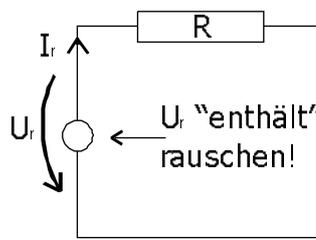
### Thermisch rauschender Widerstand

rauschender  
Widerstand



≡

nicht-rauschender  
Widerstand



k = Boltzmannkonstante

T = Temperatur des Widerstandes in °K

B = Bandbreite des Übertragungskanal

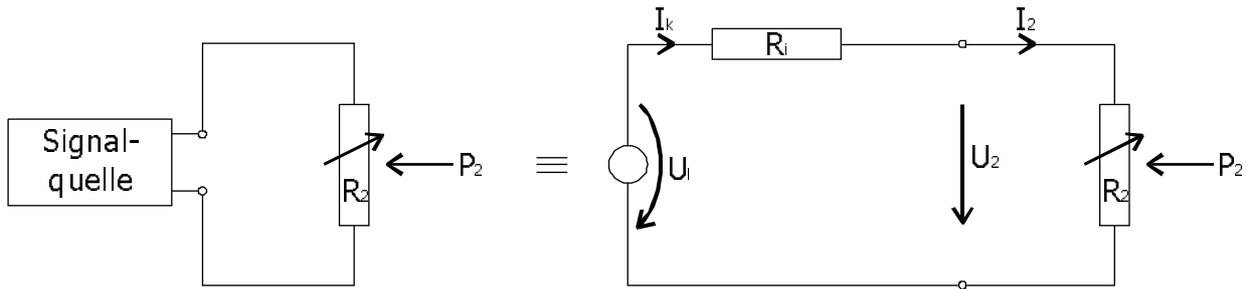
$U_r$  = Effektivität

$$U_r = \sqrt{4 \times k \times T \times R \times B}$$

nach Ohm:

$$I_r = \sqrt{4 \times k \times T \times B \times \frac{1}{R}} = \sqrt{4 \times k \times T \times B \times G}$$

**Anpassung**



Gesucht: Maximales  $P_2 \Rightarrow R_{2opt} \Rightarrow$  maximale Ausgangsleistung

$$P_2 = U_2 \times I_2 \qquad x = \frac{R_2}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{U_1}{R_1 + R_2} = \frac{\frac{U_1}{R_1}}{1 + \frac{R_2}{R_1}} = \frac{I_k}{1 + \frac{R_2}{R_1}} \Rightarrow \frac{I_2}{I_k} = \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1}} \Rightarrow \frac{I_2}{I_k} = \frac{1}{1 + x}$$

$$U_2 = R_2 \times I_2 = R_2 \times \frac{U_1}{R_1} \times \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1}} \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = \frac{\frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_2}{R_1}} \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = \frac{x}{1 + x}$$

Maximale Leistung genau dann, wenn  $P_2$  maximal  $\Rightarrow$  Hochpunkt:

$$P_2 = U_2 \times I_2 = U_1 \times \frac{x}{1+x} \times I_k \times \frac{1}{1+x} = U_1 \times I_k \times \frac{x}{(1+x)^2}$$

$$P'_2 = \frac{dP_2}{dx} = U_1 \times I_k \times \frac{(1+x)^2 - x \times (2x+2)}{(1+x)^4} = U_1 \times I_k \times \frac{(1+x)(1+x-2x)}{(1+x)^4} = U_1 \times I_k \times \frac{1-x}{(1+x)^3}$$

$$1 - x = 0 \Rightarrow x = 1 \qquad \Rightarrow \frac{R_{2opt}}{R_1} = 1 \qquad \Rightarrow R_{2opt} = R_1$$

Maximale Leistung wird erreicht, wenn  $R_{2opt}$  gleich dem Innenwiderstand  $R_1$  der Signalquelle ist. Dies nennt man **Anpassung**.

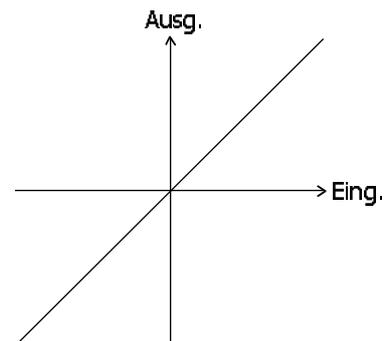
$$P_{2max} = \frac{U_1 \times I_k}{4} \qquad \Rightarrow \frac{P_2}{P_{2max}} = \frac{U_1 \times I_k}{\frac{U_1 \times I_k}{4}} \times \frac{x}{(1+x)^2} \qquad \Rightarrow \frac{P_2}{P_{2max}} = \frac{4x}{(1+x)^2}$$

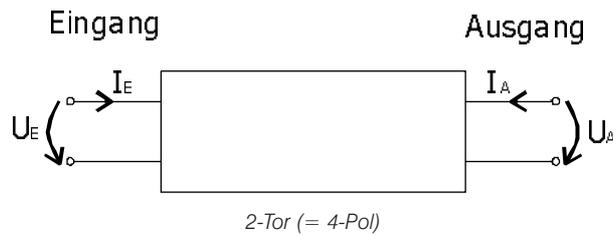
**Gesteuerte Signalquellen**

hier: ideale, lineare gesteuerte Quellen



Kennlinie:  $Ausg. = K \times Eing.$  ;  $k = const =$  Übertragungsparameter





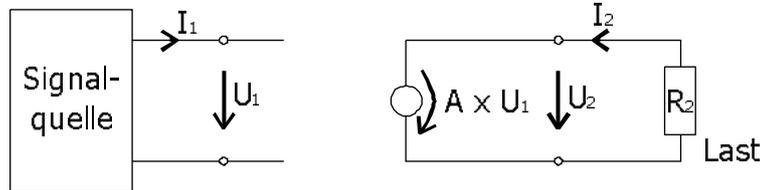
Die der gesteuerten Quelle zugeführte elektrische Leistung  $P = U_E \times I_E + U_A \times I_A$ .

Es gibt vier Arten von gesteuerten Quellen:

- Spannungsgesteuerte Spannungsquelle
- Stromgesteuerte Spannungsquelle
- Spannungsgesteuerte Stromquelle
- Stromgesteuerte Stromquelle

### Spannungsgesteuerte Spannungsquelle

Def.:  $I_1 = 0$ ;  $U_2 = A \times U_1$



$A$  = Spannungsübertragungsfaktor (oder Spannungsverstärkung),  $[A] = 1$

$$P = U_2 \times \left(\frac{-U_2}{R_2}\right) = -\frac{U_2^2}{R_2} = -\frac{A^2 \times R_1^2}{R_2}$$

Ist  $P < 0$ , so handelt es sich um ein aktives Element.

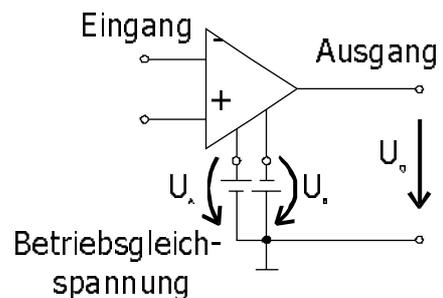
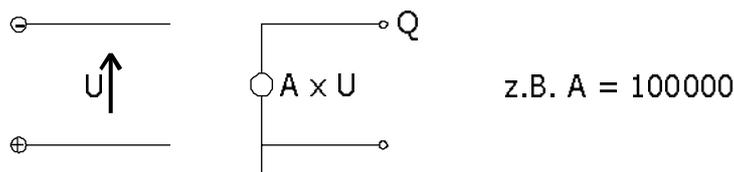
**Beispiel: Operationsverstärker** (Operational Amplifier) = OpAmp, Op, OV ...

$U_A, U_B$  : Entgegengesetzt gepolte Versorgungsspannungen

in der Regel ist  $U_A < U_B$  und  $|U_A| = |U_B|$

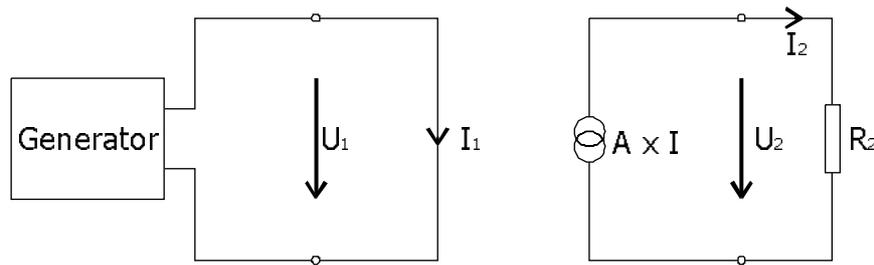
Es ist aber auch möglich, *eine* der beiden Quellen wegzulassen.

solange  $U_A > U_Q > U_B$  gilt folgendes Ersatzschaltbild für den linearen Arbeitsbereich:



*Anmerkung:* Da ein Operationsverstärker in der Regel sehr große Verstärkungen liefert, wird in der Praxis oft mit einer unendlichen Verstärkung gerechnet. Auf Grund dieser Eigenschaft muß die Verstärkung des OV mit einem Spannungsteiler herabgesetzt werden.

## Stromgesteuerte Stromquelle

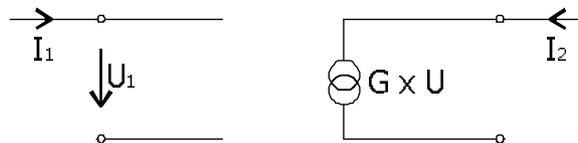


$$I_2 = A \times I_1 \quad A = \frac{I_2}{I_1} \quad A = \frac{I_2}{I_1}$$

A = Stromübertragungsfaktor [B] = 1

Die Stromgesteuerte Stromquelle ist zur Beschreibung des Bipolartransistors notwendig.

## Spannungsgesteuerte Stromquelle



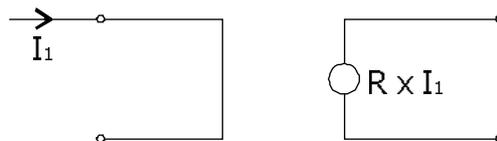
Def.:  $I_1 = 0$

$$I_2 = G \times U_1$$

$$G = \frac{I_2}{U_1} \quad \Rightarrow \quad \text{Übertragungsleitwert}$$

Die Spannungsgesteuerte Stromquelle ist zur Beschreibung des Bipolartransistors / FET / MOSFET.

## Stromgesteuerte Spannungsquelle



Def.:  $R = \frac{U_2}{I_1} \quad \Rightarrow \quad \text{Übertragungswiderstand}$

Die Stromgesteuerte Spannungsquelle ist selten. Sie wird z.B. beim Optokoppler benötigt.

# Schaltungsanalyse

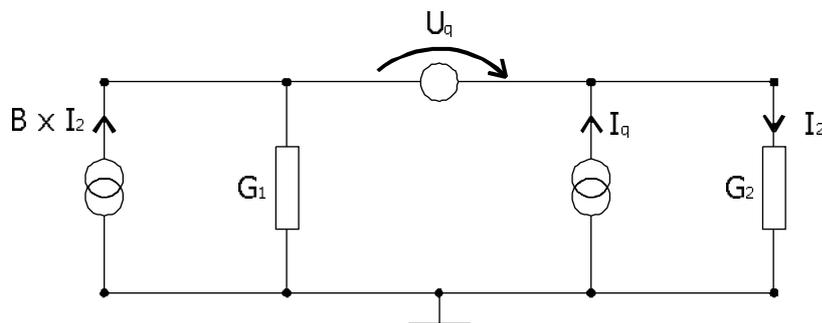
## Knotenanalyse

Die Knotenanalyse dient dazu, die Anzahl der unbekanntes in einer Gleichung herabzusetzen. Dazu werden die verschiedenen Knoten numeriert. Über Kirchhoff werden Knotenströme und -spannungen errechnet. Die Knotenanalyse kann **nur** in Schaltungen mit **ausschließlich linearen Bauelementen** durchgeführt werden.

$k$  = Anzahl der Knoten in der Schaltung

$n_u$  = Anzahl der Spannungsquellen in der Schaltung

### Beispiel:



Bekannt:  $B$ ,  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $U_q$ ,  $I_q$   
 $B \times I_2 \rightarrow$  Strom gesteuerte  
 Stromquelle

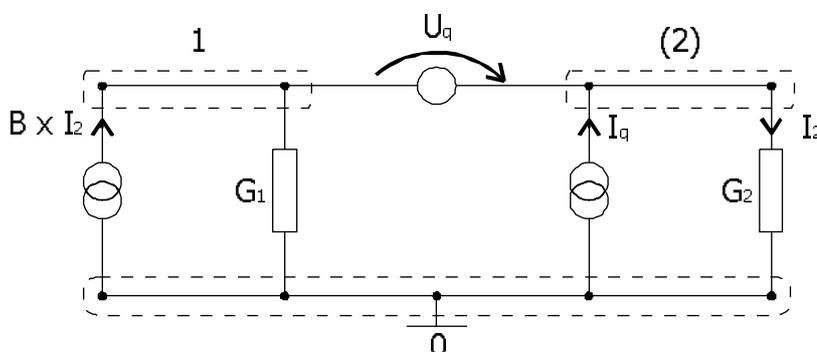
### 1. Bezifferung des Referenzknotens mit 0

Die einzelnen Zweigspannungen, die jeweils als Unbekannte eingeführt werden, werden jeweils vom bezeichneten Knoten (s.u.) zum Referenzknoten geführt. Deshalb ist die Anordnung des Referenzknotens im Regelfalle dort am Sinnvollsten, wo die gesuchte Spannung ist.

### 2. Bezifferung der übrigen Knoten

Die übrigen Knoten werden nun von 1 bis  $k - 1 - n_u$  beziffert. Bei Spannungsquellen wird jedoch nur **ein** möglicher Knoten beziffert, während die anderen Klemmen unbeziffert bleiben.

*Die Knotenbezifferung kann ansonsten frei gewählt werden!*



$k = 3$   
 $k - 1 - n_u = 1$

Die gestrichelt umrahmten Klemmen repräsentieren Schaltungstechnisch jeweils **einen** Knoten, da die inneren Verbindungen jeweils mit Kurzschlüssen verbunden sind. Der geklammerte Knoten 2 wird **nicht** beziffert, da er ein Knoten einer Spannungsquelle ist, von der bereits ein Knoten beziffert wurde.

### 3. Stromzählpfeile von den bezifferten Knoten zum Referenzknoten 0 ziehen

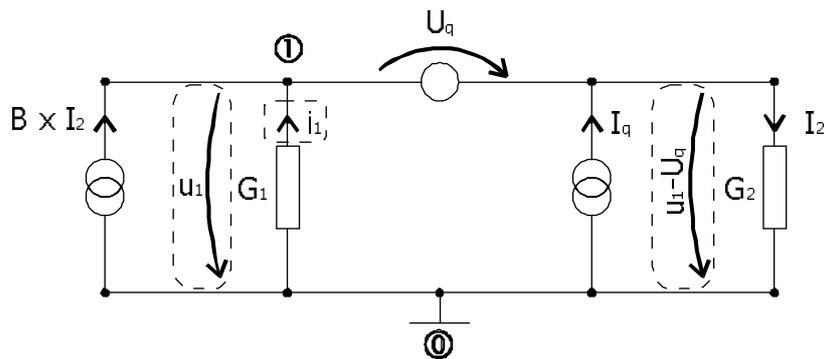
Sind alle benötigten Knoten benannt, werden Knotenspannungen eingeführt, die jeweils vom bezifferten Knoten zum Knoten 0 führen. Diese  $k - 1 - n_u$  Knotenspannungen werden jeweils mit der Knotennummer indiziert.

### 4. Übrige Zweigspannungen mit Hilfe von KUG errechnen

Mittels KUG werden nicht eingetragene Zweigspannungen durch Knotenspannungen und evtl. vorhandenen Spannungsquellen ausgedrückt und mit Zählpfeilen eingezeichnet.

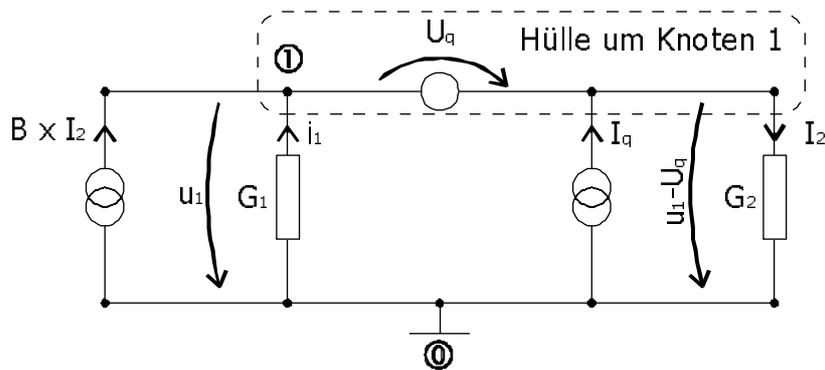
### 5. Zweigströme einzeichnen und benennen

In alle Zweige außer den Spannungsquellenzweigen werden Stromzählpfeile eingezeichnet und benannt.



### 6. Beginnend beim Knoten 1 wird KIG auf alle bezifferten Knoten anwenden

KIG wird **nicht** am Referenzknoten 0 angewandt. Sind an einem Knoten Spannungsquellen angeschlossen, so muß KIG auf die Hülle angewandt werden, die die Spannungsquelle mit ihren bezifferten und unbezifferten Knoten enthält. Dadurch erhält man  $k-1-n_u$  Knotengleichungen.



$$\text{KIG zu Knoten 1:} \quad 0 = -B \times I_2 - i_1 - I_q + i_2$$

$$0 = I_2 \times (1 - B) - i_1 - I_q$$

### 7. Die unbekanntenen Zweigströme mit Hilfe der Zweiggleichungen durch die unbekanntenen Knotenspannungen ersetzen.

Die in 5 eingeführten Zweigströme durch die unbekanntenen Knotenspannungen ersetzen. Dies geschieht meistens mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes. Damit wurde die Zahl der unbekanntenen wieder auf die unbekanntenen Knotenspannungen reduziert.

## 8. Das entstandene lineare Gleichungssystem nach unbekanntem Knotenspannungen auflösen.

## 9. Die restlichen unbekanntem Spannungen und Ströme sind jetzt leicht erreichbar.

$$i_1 = -G_1 \times u_1 \qquad I_2 = G_2 \times (u_1 - U_q)$$

$$0 = G_2 \times (u_1 - U_q) \times (1 - B) - (-G_1 \times u_1) - I_q$$

$$0 = G_2 \times (u_1 - U_q) \times (1 - B) + G_1 \times u_1 - I_q$$

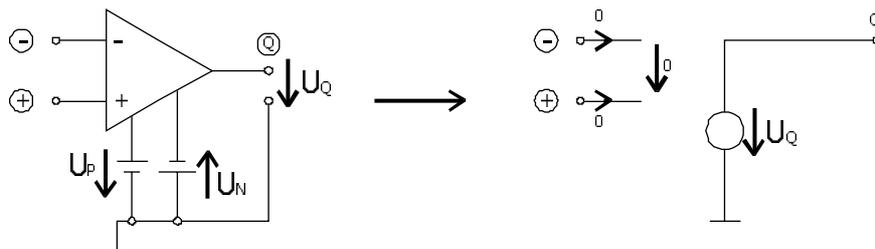
$$(G_1 + G_2 \times (1 - B)) \times u_1 = I_q + G_2 \times (1 - B) \times U_q$$

$$u_1 = \frac{I_q + G_2 \times (1 - B) \times U_q}{(G_1 + G_2 \times (1 - B))}$$

## Kf mit idealen Operationsverstärkern ( $A = \infty$ )

im linearen Betrieb, d.h.  $U_p > U_Q > U_N$ .

### 1. Jeden Operationsverstärker durch sein Ersatzschaltbild ersetzen:



Bei Operationsverstärkern mit  $A < \infty$  muß der Operationsverstärker als Gesteuerte Quelle betrachtet werden!

### 2. Im KS - Ersatzschaltbild der Gesamtschaltung ist

$$\begin{aligned} n_u &= \text{Anzahl der Spannungsquellen} \\ n_{op} &= \text{Anzahl der Operationsverstärker} \\ k &= \text{Anzahl aller Knoten} \end{aligned}$$

### 3. Den Erdknoten mit 0 beziffern, danach alle anderen Knoten beziffern

Bei OP - Schaltungen wird i.d.R. der Erdknoten mit 0 beziffert. Danach die anderen Knoten von 1 bis  $k - 1 - n_u - n_{op}$  durchnummeriert. Jeder virtuelle Nullpunkt und jede Spannungsquelle erhält nur **eine** Ziffer.

### 4. Den Rest der Knotenanalyse läuft nach dem Standardmuster.

## Überlagerungssatz

Die Anwendung des Überlagerungssatzes empfiehlt sich besonders bei Schaltungen mit vielen unabhängigen Signalquellen. Er gilt **nicht** bei Schaltungen mit gesteuerten Signalquellen und nicht - linearen Schaltungen.

**Satz:** Jede Zweigspannung (Zweigstrom) ist gleich der Summe der Teilzweigspannungen (Teilzweigströme), die durch die einzelnen unabhängigen Quellen alleine hervorgerufen werden.

### ANWENDUNG:

#### 1. Alle unabhängigen Quellen bis auf eine nullsetzen.

Signalquellen werden Nullgesetzt, indem man die Stromquellen durch Leerläufe und die Spannungsquellen durch Kurzschlüsse ersetzt.

#### 2. Teilzweigspannung (Teilzweigstrom) errechnen.

Es wird der Teil der Spannung (des Stroms) errechnet, der durch die nicht nullgesetzte Signalquelle verursacht wird, ausgerechnet.

#### 3. 1 und 2 für alle unabhängigen Quellen durchführen.

#### 4. Die Summe der Teilzweigspannung (Teilzweigströme) errechnen.

Diese Summe entspricht der gesuchten, vollständigen Zweigspannung (Zweigstrom).

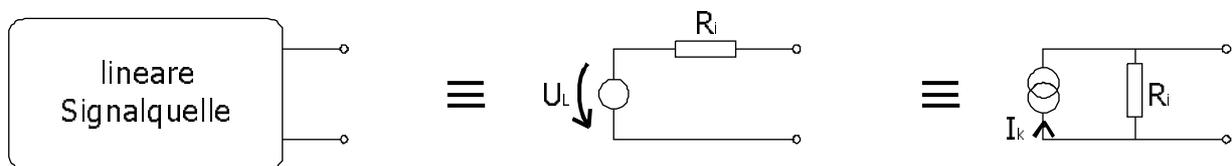
## 2 - Pol - Ersatzquellen - Theorem

Ein *linearer* 2 - Pol N mit beliebig vielen inneren unabhängigen Quellen ist für beliebige äußere Belastung äquivalent

der Reihenschaltung aus Nullquellen - 2 - Pol  $N_0$  und Leerlaufspannungsquelle  $U_L$

oder

der Parallelschaltung von Nullquellen - 2 - Pol  $N_0$  und Kurzschlussstromquelle  $I_K$ .



$N_0$  entsteht durch das *Nullsetzen aller inneren unabhängigen Quellen*,

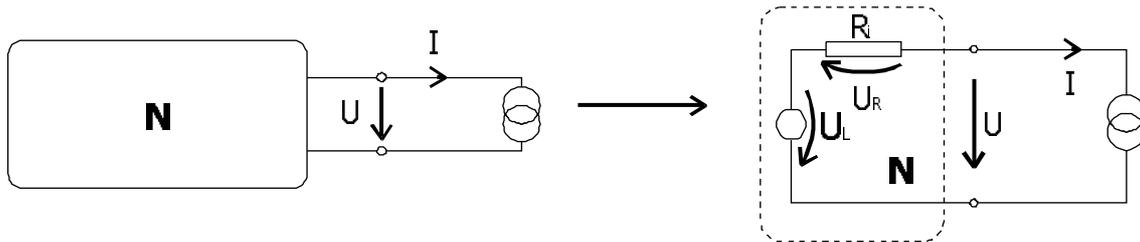
$U_L$  ist die *Leerlaufspannung* des 2 - Pols,

$I_K$  ist der *Kurzschlussstrom* des 2 - Pols.

Enthält der lineare 2 - Pol nur *Quellen und ohmsche Widerstände*, dann ist der Nullquellen-2 - Pol  $N_0$  *gleich dem Innenwiderstand*  $R_i$  des 2 - Pols.

### Bestimmung von $U_L$ , $I_K$ und $R_i$

1. Berechnung von  $U_L$  und  $I_K$  :  $R_i = U_L / I_K$   
„Klassische“ Methode.
2. Berechnung von  $U_L$  und  $R_i = N_0$  :  $I_K = U_L / R_i$   
Günstig bei vielen unabhängigen Quellen.
3. **Belastung des 2 - Pols mit der Laststromquelle  $I$**  und Berechnung der 2 - Pol - Kennliniengleichung  $u(i)$ . Koeffizientenvergleich mit  $U = U_L - R_i \times i$  ergibt  $U_L$  und  $R_i$ . Hieraus läßt sich  $I_K = U_L / R_i$  ableiten:

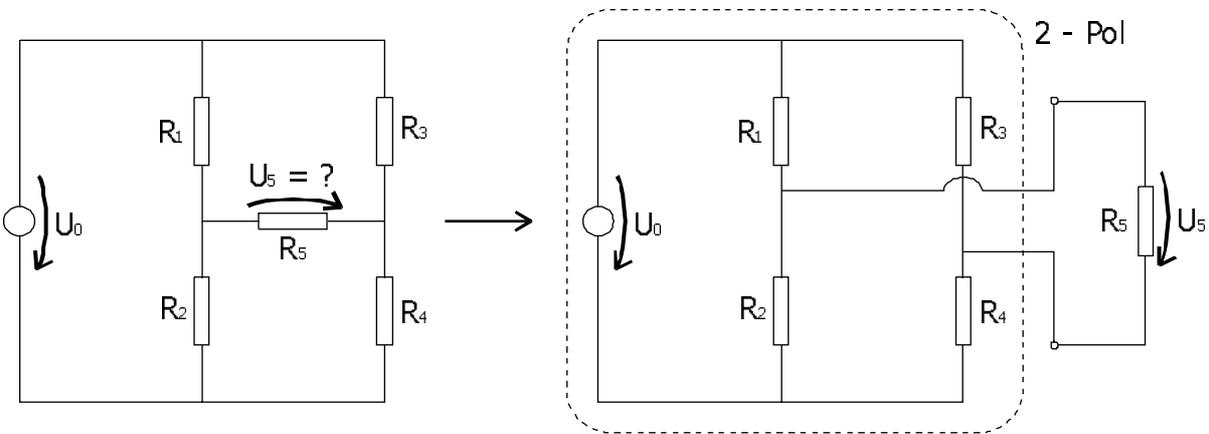


$$U = U_R + U_L \quad U(I) = U_L - R_i \times I$$

$$U_R = -R_i \times I$$

### Anwendung: Wheatstonsche Brücke

Mit einer Wheatstonschen Brücke lassen sich unbekannte Widerstände  $R_x$  errechnen.



Die Spannungsteilerformel ist an dieser Stelle unbrauchbar, da dieser belastet ist. Als mögliche Lösung bietet sich hier neben der Knotenanalyse, die sehr komplex werden würde, das 2 - Pol - Ersatzquellentheorem an.

Man erhält:  $U_5 = \frac{R_3}{R_1+R_3} \times U_L$

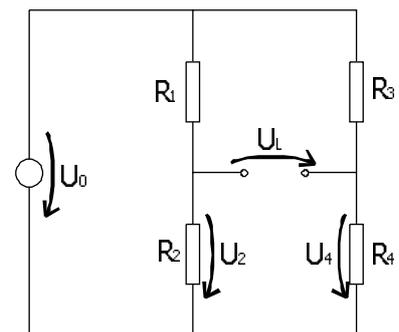
#### 1. Bestimmen von $U_L$ :

$$U_L = U_2 - U_4$$

Formel des unbelasteten Spannungsteilers ergibt:

$$U_2 = U_0 \times \frac{R_2}{R_1+R_2} \quad ; \quad U_4 = U_0 \times \frac{R_4}{R_3+R_4}$$

$$\Rightarrow U_L = U_0 \times \left( \frac{R_2}{R_1+R_2} - \frac{R_4}{R_3+R_4} \right)$$



## 2. Bestimmen von $R_i$ :

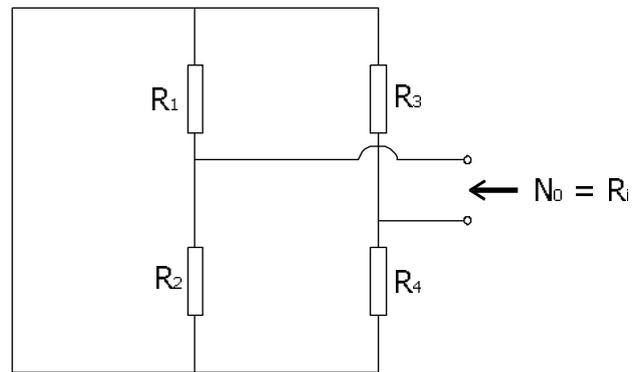
Der Innenwiderstand wird errechnet, indem man alle Widerstände innerhalb des 2 - Pols kombiniert.

Hier sind es zwei Paare parallel geschalteter Widerständen.

Man erhält:

$$R_i = [R_1 \parallel R_2] + [R_3 \parallel R_4] = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)^{-1} + \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right)^{-1}$$

$$R_i = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 \times R_4}{R_3 + R_4}$$



## 3. Einsetzen:

$$U_5 = U_0 \frac{R_5}{\frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 \times R_4}{R_3 + R_4} + R_5} \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$$

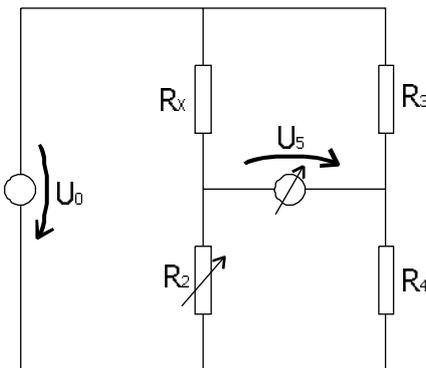
## $U_L = 0$ repräsentiert einen Sonderfall, der die praktische Anwendung der Wheatstonschen Brücke repräsentiert:

Da  $U_L = 0$  sind die beiden Spannungsteiler unbelastet und es gilt:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad \Rightarrow \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Man nennt dies eine abgeglichene Brücke.

Dies wird in folgender Anwendungsschaltung ausgenutzt:



$R_2$ ,  $R_3$  und  $R_4$  sind bekannt. Man justiert das Potentiometer  $R_2$  solange, bis  $U_5 = 0$  ist.

Dann gilt wegen  $\frac{R_x}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ :

$$R_x = \frac{R_2 \times R_3}{R_4}$$

## Substitutionstheorem

Die Spannungs- und Stromverteilung einer beliebigen Schaltung ändert sich nicht,

wenn man einen Zweig der Gleichung mit der bekannten Zweigspannung  $U_z$  bzw. dem bekannten Zweigstrom  $I_z$

durch eine unabhängige Spannungsquelle  $U_z$  oder durch eine unabhängige Stromquelle  $I_z$  ersetzt.

# ***HALBLEITER***

## Metalle

Metalle sind Halbleiter, d.h. je wärmer sie sind, desto größer ist der Widerstand. Dies nennt man PTC (**P**ositive **T**emperature **C**oefficient). Aus Metallen werden herkömmliche Widerstände gefertigt.

## Edelgase

Aufgrund einer komplett gefüllten äußeren Elektronenhülle sind Edelgase ideale Isolatoren.

## Halbleiter

Halbleiter besitzen in reiner Form eine Kristalline Struktur, die der des Diamanten sehr ähnlich ist. Jedes Halbleiteratom besitzt vier Elektronen auf der Außenschale. Jedes dieser Atome hat nun das Bestreben, acht Elektronen auf die Außenschale zu bekommen. Dies geschieht dadurch, daß sich jeweils vier benachbarten Atome sich die Elektronen der Außenschale teilen. Dadurch hat jedes Atom nun acht Elektronen auf der Außenschale. Aufgrund dieser Eigenschaften sind, wie bei Edelgasen, keine freien Elektronen mehr vorhanden. Dadurch wird ein Halbleiter bei 0 °K zu einem Isolator.

Steigt jetzt die Temperatur beginnen die Atome zu schwingen, es wird Energie zugeführt. Je mehr Energie zugeführt wird, desto mehr Bindungen brechen auf. Dadurch bilden sich sowohl frei bewegliche Elektronen wie frei bewegliche Löcher. Löcher entstehen an den Stellen, an denen Elektronen herausgelöst werden. Diese „wandern“ durch das Gitter und dienen ebenfalls als Ladungsträger.

Es gilt:

$$I = |I_{El}| + I_{Loch}$$

Die benötigte Loslöseenergie  $W_G$  läßt sich aus der Bandabstandsspannung  $U_G$  errechnen:

$$W_G = q \times U_G$$

## Erhöhen der Leitfähigkeit von Halbleitern

Dies kann zum einen durch Energiezufuhr geschehen. Dieser Effekt wird bei Opto - Elektronischen Bauteilen wie Photo - Dioden, - Detektoren, Solarzellen, LEDs usw., ausgenutzt. Zum anderen besteht jedoch heute die Möglichkeit, die Leitfähigkeit von Halbleitern gezielt zu beeinflussen. Man nennt diesen Vorgang *Dotieren*. Dabei werden einzelne Atome innerhalb des Kristallgitters durch Fremdatome mit drei oder fünf Atomen auf der Außenschale ersetzt. Durch diesen Vorgang entstehen entsprechend viele freie Ladungsträger.

# Licht - Halbleiter - Wechselwirkung

Licht kann entweder als Welle oder als Korpuskel (Teilchen) gesehen werden:

## Licht als elektromagnetische Welle

Ausbreitungsgeschwindigkeit:  $c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \times f = 299.792.458 \frac{m}{s} \approx 300.000 \frac{km}{s}$

$\lambda$  = Wellenlänge

T = Periodendauer =  $f^{-1}$

f = Frequenz

Diese Betrachtungsweise ist analog zur Radiowelle.

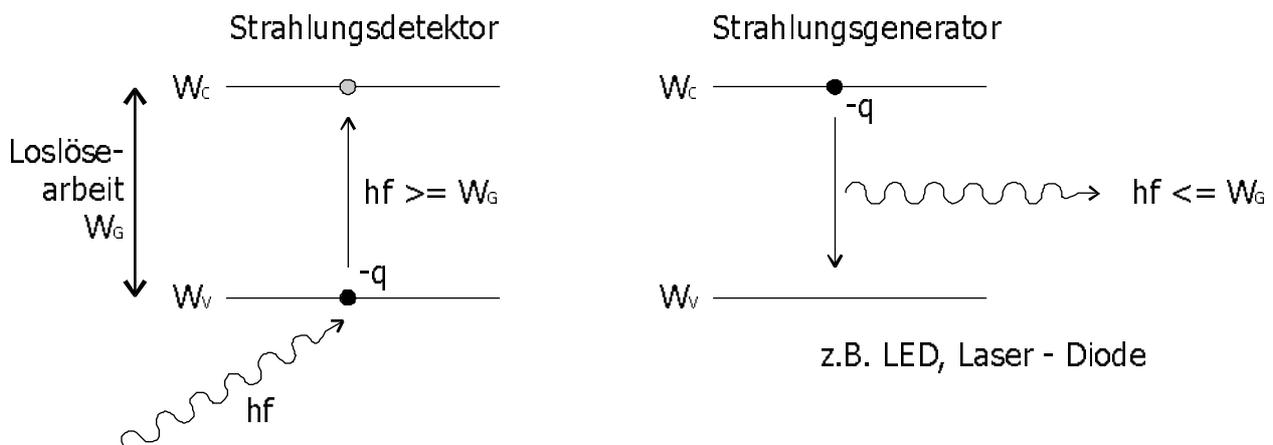
## Licht als Korpuskel

auch „Photonen“ genannt.

<b>Konstante:</b>	Plancksches Wirkungsquantum
<b>Maßeinheit:</b>	Ws <sup>2</sup>
<b>Abkürzung:</b>	h
<b>Größe:</b>	6,6260755 × 10 <sup>-34</sup> Ws <sup>2</sup>

$$W_{\text{Photon}} = h \times f$$

## Licht - Halbleiter - Wechselwirkung



$hf$  muß mindestens die Bandabstandsspannung erreichen, um diese Wirkung zu erzielen:

$$h \times f = W_G = q \times U_G$$

$$\frac{h \times c}{\lambda} = q \times U_G \Rightarrow \lambda = \frac{h \times c}{q \times U_G}$$

$$\frac{\lambda_G}{\mu m} = \frac{1,24}{U_G / V}$$

## Intrinsic - Halbleiter

Einen Halbleiter in reiner Zustandsform nennt man Intrinsic - Halbleiter. Der Reinheitsgrad ist im regelfalle  $< 10^{-9}$  unter der Halbleiter befindet sich in kristallinem Zustand.

- Bei Energiezufuhr bilden sich Paare (freie Elektronen / Löcher)
- bei  $T = 0 \text{ °K} = -273 \text{ °C}$  bilden sich keine Karten und der Intrinsic - Halbleiter bildet einen idealen Isolator. Bei sehr hohen Temperaturen sind alle Bindungen auf - gebrochen.

**bei Si:**

$$\begin{aligned} n_{\text{At}} &= 5,2 \times 10^{22} \text{ Atome/cm}^3 \\ 4 \times n_{\text{At}} &= 2,1 \times 10^{23} \text{ Atome/cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_{\text{At}} &= \text{Atomdichte (pro cm}^3\text{)} \\ &\text{(auf Grund 4er Kristall)} \end{aligned}$$

**Definition: Intrinsic - Dichte  $n_i$**

Die Intrinsic (oder Eigenleitungs-) Dichte entspricht der Zahl der aufgebrochenen Bin-

dungen:  $n_i = \frac{\text{Zahl der aufgebrochenen Bindungen}}{\text{Volumen}}$ .  $n_i$  ist Temperaturabhängig. Bei  $0 \text{ °K}$  ist  $n_i = 0$ .

Daraus folgt:  $0 \leq n_i \leq 4 \times n_{\text{At}}$

Allgemein gilt für  $n_i$ :  $n_i = c \times T^{1,5} \times e^{-\frac{W_G}{2kT}}$

$W_G$  = Loslösearbeit

$k$  = Boltzmannkonstante

$c$  = Konstante, schwach Materialabhängig  $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-1,5}$

$T$  = Temperatur in °K

**Konstante:** Boltzmannkonstante

**Maßeinheit:**  $\frac{W_s}{K}$

**Abkürzung:** k

**Größe:**  $1,380558 \times 10^{-23} \frac{W_s}{K}$

### Definition:

Elektronendichte im Halbleiter:  $n = \frac{\text{Zahl der freien Elektronen}}{\text{Volumen}}$

Löcherdichte im Halbleiter:  $p = \frac{\text{Zahl der freien Löcher}}{\text{Volumen}}$

Im Intrinsic - Halbleiter gilt:  $n_i = n = p$

Daraus läßt sich folgern:  $n \times p = n_i^2$

Dies gilt für auch für dotierte Halbleiter!

### Anmerkung: Rekombination

Rekombination nennt man, wenn ein Loch ein freies Elektron findet, diese vereinigen sich.

## Dotieren von Halbleitern

Während des Dotierens eines Halbleiters werden gezielt Fremdatome in das Kristallgitter eingesetzt. Dadurch läßt sich gezielt die Leitfähigkeit eines Halbleiters verändern. Dies geschieht mit den Atomen, die im Periodensystem in der 3. bzw. 5. Spalte, d.h. neben den Halbleitern stehen. Es gibt dabei zwei Arten:

### Donatoren

Donatoren stammen aus der 5. Spalte, sie haben fünf Atome auf der Außenschale. Es entsteht ein freies Elektron pro dotiertem Fremdatom, wodurch sich n erhöht. Man nennt dies ein n - Material.

Donatoren sind zum Beispiel: N, P, As, Sb.

Die Elektronen sind die „Majoritäts - Träger“, während die Löcher die „Minoritäts - Träger“ sind.

### Akzeptoren

Akzeptoren stammen aus der 3. Spalte, sie haben drei Atome auf der Außenschale. Dadurch entsteht, im Gegensatz zu Donatoren, ein frei bewegliches Loch pro Fremdatom, wodurch sich p erhöht.

Akzeptoren sind zum Beispiel: B, Al, Ga, In

Hier sind die Elektronen die „Minoritäts - Träger“, die Löcher entsprechend die „Majoritäts - Träger“.

## Zusammenfassung

### Intrinsic Material

$$n = p = n_i ; \quad n \cdot p = n_i^2$$

n und p steigen exponentiell zur Temperatur.

### n - Material

Donatordichte  $N_D$  = Anzahl der Fremdatome pro Volumen. Bei einer Temperatur von 300°K ist die Donatordichte deutlich größer als die Intrinsicdichte  $n_i$ , ist jedoch auch deutlich kleiner als die Atomdichte  $n_{At}$ :  $n_i \ll N_D \ll n_{At}$   
Elektronendichte  $n = N_D \gg n_i$

#### **Masse-Wirkungs-Gesetz:**

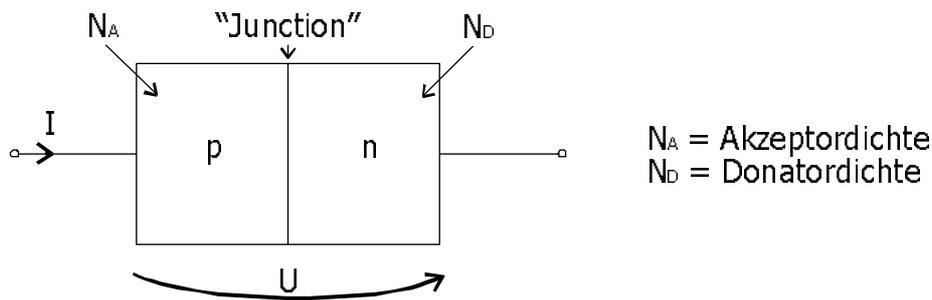
Auch hier gilt:  $n \cdot p = n_i^2 \Rightarrow N_D \cdot p = n_i^2 \Rightarrow p = \frac{n_i^2}{N_D} \ll n_i$

Typische  $N_D$  sind  $10^{14}$  bis  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$

### p - Material

Analog zum n-Material.

# Die Halbleiterdiode



Es handelt sich hier um einen abrupten pn - Übergang. Man nennt dies auch „step junction“, wobei diese die metallurgische Grenzfläche repräsentiert.

**Es sind hier drei Fälle möglich:**

1.  $U = 0; \quad I = 0 \quad \Rightarrow$  Thermodynamisches Gleichgewicht
2.  $U > 0; \quad I > 0 \quad \Rightarrow$  Durchlassbereich
3.  $U < 0; \quad I \text{ sehr klein} \quad \Rightarrow$  Sperrbereich

## Betriebsmodi der Halbleiterdiode

### Thermodynamisches Gleichgewicht

Vorraussetzung:  $U = 0; \quad I = 0$ .

$P_p = \text{Löcherdichte auf der p - Seite} = N_A \quad (= \text{Akzeptordichte})$   
 $N_p = \text{Elektronendichte auf der p - Seite}$

dabei gilt:

$$P_p \cdot N_p = n_i^2 \quad \Rightarrow \quad N_A \cdot N_p = n_i^2 \quad \Rightarrow \quad N_p = \frac{n_i^2}{N_A} \quad \Rightarrow \quad P_p = N_A \gg n_i$$

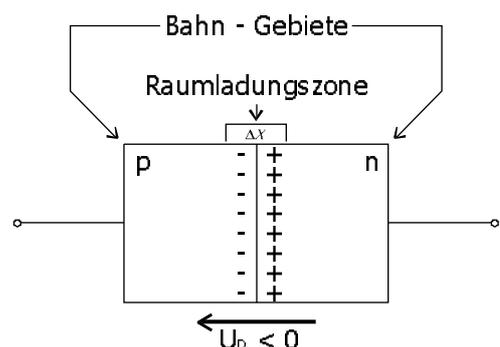
$N_n = \text{Elektronendichte auf der n - Seite}$   
 $P_n = \text{Löcherdichte auf der n - Seite}$

dabei gilt:

$$N_n = N_D \gg n_i \quad \Rightarrow \quad P_n \cdot N_n = n_i^2 = P_n \cdot N_D \quad \Rightarrow \quad P_n = \frac{n_i^2}{N_D} \ll n_i$$

Bei allen beweglichen Stoffen wirkt die Kraft der **Diffusion**, die entlang von z.B. Druckgefällen wirkt. Dies läßt sich bei einer Badenwanne, in die heißes Wasser nachgefüllt wird, sehr gut beobachten: Das heiße und kalte Wasser vermischen sich, ohne daß man umrührt, man muß nur lang genug warten. Diese Kraft wirkt nicht nur bei Flüssigkeiten, sondern auch bei Gasen und frei beweglichen Ladungsträgern. Die Diffusionskraft wirkt immer in Richtung kleiner werdender Konzentration.

Es entsteht so eine Raumladungszone. Da das elektrische Feld entgegenwirkt, stellt sich ein Gleichgewicht ein. Außerhalb der Raumladungszone, die sich an der step junction bildet, entsteht ein gut leitendes „Bahn - Gebiet“, auch bulk - region genannt. Da die Raumladungszone keine frei beweglichen Ladungsträger mehr besitzt, wird sie auch „Verarmungs - Zone“ (depletion region / layer) genannt; es entsteht eine Sperrschicht.



Die Breite der Raumladungszone  $\Delta X$  setzt sich aus zwei Bestandteilen zusammen:  $x_p$  und  $x_n$ . Da Ladungsgleichgewicht herrscht gilt:

$$x_p \cdot N_A = x_n \cdot N_D$$

$$\Delta X = x_p + x_n$$

$$\Delta X = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_R}{q} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right) \cdot U_D}$$

$\epsilon_0$  = Absolute Dielektrizitätskonstante

$\epsilon_R$  = Relative Dielektrizitätskonstante

$U_D$  = Diffusionsspannung

### Temperaturspannung $U_T$ :

$$U_T = \frac{kT}{q}$$

k = Boltzmannkonstante

q = Elementarladung

T = Temperatur in °K

### Diffusionsspannung $U_D$ :

$$U_D = U_T \cdot \ln\left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right)$$

## Durchlaßbetrieb

Im Durchlaßbetrieb ist  $U > 0$ , wodurch ein Strom fließen kann:  $I > 0$

Die Raumladungszone wird kleiner:

$$\Delta X = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_R}{q} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right) \cdot (U_D - U)}$$

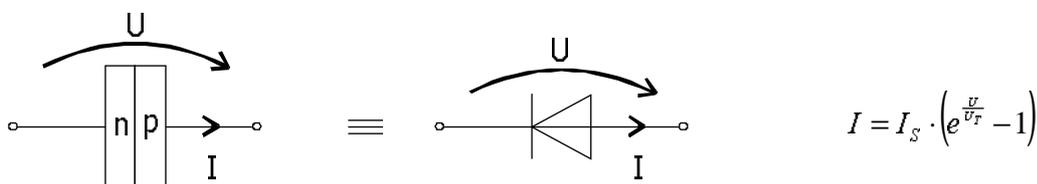
Durch die verkleinerte Raumladungszone überwiegt die Diffusionskraft und es fließt ein Strom.

## Sperrbereich

Im Sperrbereich ist  $U < 0$ , es fließt kein Strom:  $I = 0$

Da sich  $\Delta X$  vergrößert, kann kein Strom fließen. Lediglich durch den Effekt der Thermischen Paarbildung fließt ein sehr kleiner Strom, der Sperrstrom.

## Gleichung der Diodenkennlinie I(U)



Die Temperaturspannung  $U_T$  bezieht sich hier auf die Temperatur der Sperrschicht.

Im Durchlaßbetrieb, wenn  $U$  wesentlich größer als  $U_T$  wird, kann diese Formel vereinfacht

werden:  $I = I_S \cdot e^{\frac{U}{U_T}}$

## Spannungserhöhung für eine Stromver - x - faltung

$$I = I_S \cdot e^{\frac{U_1}{U_T}} \quad x \cdot I_1 = I_S \cdot e^{\frac{U_1 + \Delta U}{U_T}}$$

Transformationen ergeben:  $\Delta U = \ln(x) \cdot U_T$

x	$\Delta U$
2	18 mV
10	60 mV
100	120 mV

Diese Werte sind vom Stromniveau unabhängig.

Der Widerstand der Bahngebiete wurde vernachlässigt.

## Diodenkennlinie im Sperrbereich

Im Sperrbereich ist die Spannung  $U \ll -U_T$ , wodurch die e - Funktion der Diodenkennlinie gegen 0 läuft. Dies führt zu folgender Formel:

$$I = -I_S$$

$I_S$  ist der Sperrsättigungsstrom der Diode. Dies ist eine Herstellerangabe, die von Diode zu Diode unterschiedlich ist.

## Temperaturverhalten im Sperrbereich

Der Sperrstrom  $I_S$  verhält sich proportional zum Verhältnis aus Akzeptordichte und dem Quadrat der Intrinsic - Dichte:

$$I_S = \frac{N_A}{n_i^2} \Rightarrow I_S = a \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{W_G}{kT}} \quad a = \text{Bauformabhängige Konstante}$$

Auch hier läßt sich die Temperaturerhöhung  $\Delta T$  für eine  $I_S$  - Verdoppelung errechnen. Es ergibt sich folgende Näherungsformel:

$$\Delta T \approx \frac{T}{\frac{U_G}{U_T} + 3}$$

Für gebräuchliche Halbleiter errechnen sich diese Werte:

Material	$U_G/V$	$\Delta T/\%K$
Ge	0,67	10,4
Si	1,12	6,5
GaAs	1,42	5,2
SiC	2,80	2,7

## Temperaturverhalten im Durchlaßbereich

Wird eine Diode bei konstanter Spannung betrieben, tritt der Effekt der Thermischen Rückkopplung ein: Auf Grund des Energieflusses erhitzt sich die Diode. Durch die Erwärmung erhöht sich auch der fließende Strom. Da die Spannung konstant ist, erhöht sich auch die Arbeit der Diode. Dies wiederum führt erneut zu einer Temperaturerhöhung. Betreibt man also eine Diode an einer konstanten Spannungsquelle zerstört sie sich selbst. Man nennt dies Thermische Selbstzerstörung.

Auf Grund dieses Effekts dürfen Dioden nur bei konstantem Strom betrieben werden. Sie sind dann thermisch stabil, da bei konstantem I sich U etwas reduziert. Proportional zur Temperatur sinkt U weiter.

Eine Diode kann dadurch als Temperatursensor verwendet werden. Die Spannungsänderung  $\Delta U$  läßt sich aus der Temperaturänderung  $\Delta T$  errechnen:

$$\Delta U = -\frac{U_g - U + 3U_T}{T} \cdot \Delta T$$

Auf Grund dieser Zusammenhänge stellt sich ein Gleichstromarbeitspunkt ein.

## Diode im Kleinsignalbetrieb

Die **Kleinsignaltheorie** geht davon aus, das nicht - lineare Bauelemente bei einem festen Arbeitsstrom und einer festen Arbeitsspannung betrieben werden. Diesen konstanten Werten wird dabei ein wesentlich kleineres Signal überlagert. Für diese kleinen Signale wird dann ein Kleinsignalersatzschaltbild entwickelt, das einen möglichst einfachen Zusammenhang zwischen  $\Delta u$  und  $\Delta i$  liefert. Dabei wird die Erste Ableitung der Großsignalkennlinie gebildet. Diese liefert die Steigung der Kennlinie im Arbeitspunkt. Die daraus resultierende Tangente wird als Kleinsignalkennlinie verwendet.

**Definition:** Arbeitspunkt einer Diode

$$A (U_A; I_A)$$

Nach diesem Prinzip erhält man für die Diode folgende Kleinsignalkennlinie:

$$\Delta i = g \cdot \Delta u$$

**Definition:** Differentieller Leitwert der Diode  $g$

Es handelt sich hierbei um einen Leitwert, den man aus durch Differentiation der Großsignalkennlinie erhält:

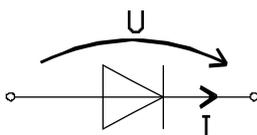
$$g = \frac{dI_A}{dU_A}$$

Mann nennt dies auch das „Ohmsche Gesetz“ für kleine Signale.

**Satz:**

Bezüglich kleiner Signale  $\Delta u$ ,  $\Delta i$  wirkt eine Diode im Arbeitspunkt  $A (U_A; I_A)$  wie ein linearer, konstanter, kleinsignalunabhängiger Ohmscher Leitwert  $g$ . Sein Wert ist gleich der Steigung der Tangente an die Diodenkennlinie im Arbeitspunkt. Kleinsignaletheorie bedeutet also Ersatz der nicht - linearen Kennlinie durch die lineare Tangente im Arbeitspunkt. Das Kleinsignalersatzschaltbild gilt für kleine Signaländerungen  $\Delta u$ ,  $\Delta i$  in der Umgebung des Arbeitspunktes  $A (U_A; I_A)$ . Es enthält nur die Kleinsignale, nicht mehr die Arbeitspunktgrößen. Es besteht bei der Diode aus dem konstanten, linearen Leitwert  $g$ .

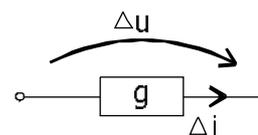
### Großsignalschaltbild



$$U = U_A + \Delta u$$

$$I = I_A + \Delta i$$

### Kleinsignalersatzschaltbild



$$g = \frac{dI_A}{dU_A}$$

Führt man diese Schritte für die Halbleiterdiode aus, so erhält man aus:

$$I = I_S \left( e^{\frac{V}{U_T}} - 1 \right) \quad \Rightarrow \quad g = \frac{I_A + I_S}{U_T}$$

### Durchlaßbetrieb

Da im Durchlaßbetrieb  $I_A$  wesentlich größer ist als  $I_S$ , kann  $I_S$  bei der Berechnung des differentiellen Leitwertes der Diode vernachlässigt werden:

$$g = \frac{I_A}{U_T}$$

$$\underline{I_A = 0}$$

Fließt in der Diode kein Strom ist der Innenleitwert sehr klein, praktisch null:

$$g = \frac{I_S}{U_T}$$

### Sperrbereich

$$I_A = -I_S \quad (\text{sehr klein})$$

$$\Rightarrow g = \frac{-I_S + I_S}{U_T} = 0$$

## Thermische Dimensionierung von Schaltungen

Dies gilt für alle Elektronischen Gegenstände.

**Definition:**

- $\vartheta$  = Temperatur in °C (=  $T - 273,2^\circ$ )
- $T$  = Temperatur in °K
- $T_j$  = Temperatur der Sperrschicht
- $T_u$  = Umgebungstemperatur

**Grundsatz:** Die maximal zulässige Sperrschichttemperatur  $\vartheta_{jmax}$  bzw.  $T_{jmax}$  darf nicht überschritten werden.  
Dabei ist  $T_j$  immer größer als  $T_u$ .

Beispiele für maximale Sperrschichttemperaturen:

Material	$\vartheta_{jmax}$
Ge	75 - 90 °C
Si	150 - 200 °C
GaAs	bis 300 °C

Im Thermisch stationären Endzustand, der sich je nach Anwendung bereits einige Minuten oder erst einige Stunden nach dem Einschalten einstellt, gilt:

**zugeführte elektrische Leistung  $P_{EI}$  = abgegebene Wärmeleistung  $P_{Th}$**

### Die drei Mechanismen der Wärmeabfuhr

#### Wärmeleitung

„Wiedmann - Franz - Gesetz“:

Gute Wärmeleiter sind auch gute elektrische Leiter.

Dies bedeutet, das ein Teil der erzeugten Wärme durch die Anschlußdrähte wieder abgegeben wird.

## Wärmestrahlung

Bestes Beispiel für Wärmestrahlung ist unsere Sonne, die ihre Gesamte Energie über Wärmestrahlung abgibt.

Es gilt das **Stefan - Boltzmann - Gesetz:**

$$P_S = c \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_G^4 - T_U^4)$$

$\sigma$  = Stefan - Boltzmann - Konstante

A = Oberfläche

$T_G$  = Gehäusetemperatur

c = dimensionslose Oberflächen - Konstante, c = 1 bei schwarzer Oberfläche, c <= 1 bei nicht schwarzer Oberfläche.

**Konstante:** Stefan - Boltzmann - Konstante

**Maßeinheit:**  $\frac{W}{cm^2 \cdot K^4}$

**Abkürzung:**  $\sigma$

**Größe:**  $5,67051 \times 10^{-12} \frac{W}{cm^2 \cdot K^4}$

## Konvektion

Konvektion ist der Temperaturengleich zwischen zwei Medien. Im Regelfalle Luft oder Wasser. Die Konvektion findet automatisch statt, kann aber mittels Ventilator usw. forciert werden.

$$P_K = \alpha_K \cdot A \cdot (T_G - T_U)$$

A = Oberfläche

$\alpha_K$  = Konstante, von Medium usw. abhängig. Maßeinheit:  $\frac{W}{cm^2 \cdot K}$

$$\Rightarrow P_{TH} = P_L + P_S + P_K$$

## Wärmewiderstand

Für  $\vartheta_j < 300$  °C gilt eine lineare Annäherung, das lineare Gesetz der Erwärmung:

$$T_j - T_u = R_{thju} \cdot P$$

**Definition:** Wärmewiderstand

**Formelzeichen:**  $R_{th}$

**Maßeinheit:**  $\frac{W}{\circ K}$

**Berechnung:**  $R_{thju} = \frac{T_j - T_u}{P}$

Der Wärmewiderstand ist um so größer, je schlechter die Wärmeabfuhr, vice versa.

## Analogie zum Ohmschen Widerstand

Wärmeübergang	elektrischer Stromkreis
Wärmeleistung P	elektrischer Strom I
Temperaturdifferenz $\Delta T$	Spannungsabfall
Wärmewiderstand $R_{th}$	Ohmscher Widerstand R
$[R_{th}] = K/W$	$[R] = \Omega = V/A$

## Thermische Dimensionierung von Bauelementen

**Grundforderung:** bei  $T_{u_{max}}$  darf  $T_{j_{max}}$  nicht überschritten werden.

Vergleich eines Germanium und eines Silizium Transistors gleicher Bauform (TO-18):

	Ge	Si
$\vartheta_{j_{max}}$	75 °C	200 °C
$\vartheta_{u_{max}}$	60 °C	60 °C
$R_{thju}$	0,3 K/mW	0,3 K/mW
$P_{max}$	$(75-60)/0,3 = 50 \text{ mW}$	$(200-60)/0,3 = 470 \text{ mW}$

$P_{max}$  erhält man aus der Formel für den Wärmewiderstand.

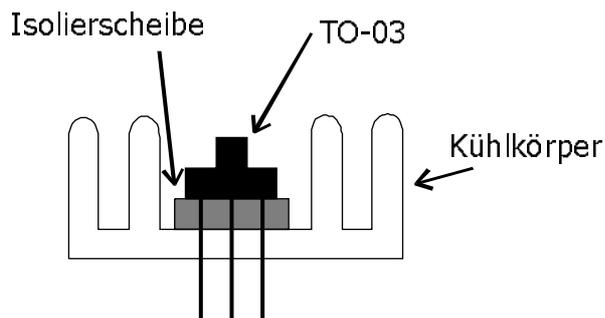
## Thermische Dimensionierung eines Leistungstransistors

Laut Datenblatt besitzt ein TO-03 Transistor folgende Daten:

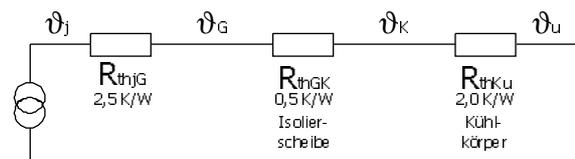
$$\begin{aligned} \vartheta_{j_{max}} &= 150 \text{ °C} \\ R_{thjG} &= 2,5 \text{ K/W} \\ \vartheta_u = \vartheta_G &= 20 \text{ °C} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow P_{tot} = (150 - 20) / 2,5 = 52 \text{ W}$$

Im praktischen Anwendungsfall sind die Werte wesentlich kleiner, da die Werte aus den Datenblättern im Regelfalle unter Laborbedingungen erreicht werden. Eine praktische Thermische Dimensionierung ergibt so wesentlich geringere Werte:



### Wärmeersatzschaltbild:



Es ergibt sich ein gesamter Wärmewiderstand  $R_{thju} = 5 \text{ K/W}$ . Um die Lebensdauer des Gerätes zu erhöhen, werden die Werte für Sperrschicht- und Umgebungstemperatur mit größerem Spielraum gesetzt:

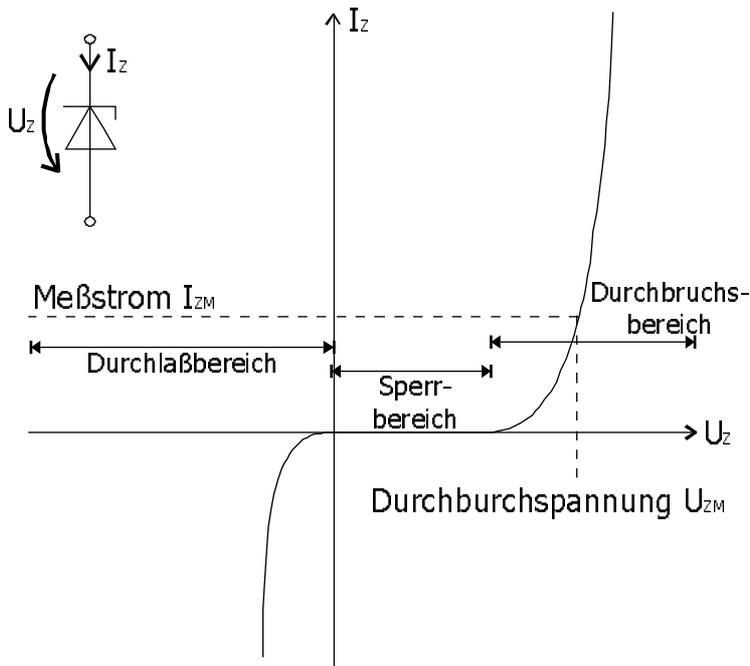
$$\begin{aligned} \vartheta_j &= 130 \text{ °C} \\ \vartheta_u &= 50 \text{ °C} \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich eine praxisnahe Leistung:

$$P_{tot} = (130 - 50) / 5 = 16 \text{ W}$$

# Die Zener-Diode

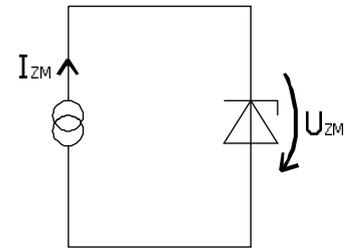
Legt man an die Z-Diode eine negative Spannung an, sperrt sie nur bis zu einer bestimmten Spannung. Wird diese überschritten, „bricht sie durch“. Die bedeutet, das ab einer bestimmten negativen Spannung auch ein großer negativer Strom fließt. Da die Z-Diode meist im Durchbruchsbereich betrieben wird, trägt man die Zählpfeile in umgekehrter Richtung ein, damit Strom und Spannung, wie gewohnt, positiv gerechnet werden können.



## Bestimmung von $U_{ZM}$ :

$U_{ZM}$  ist die Durchbruchspannung bei dem Meßstrom  $I_{ZM}$ .

Meßschaltung:



$I_{ZM} = \text{const z.B.} = 5 \text{ mA}$

Die  $U_{ZM}$  - Werte sind von der Bauform der Diode abhängig. Sie werden, wie Widerstände, mittels der e - Reihen dimensioniert.

## Die Betriebsarten der Z-Diode

### $U_{ZM} < \text{ca. } 5 \text{ V}$ : Zener- oder Tunnel - Effekt

Auf Grund der hohen Feldstärke innerhalb der Sperrschicht brechen Kristallbindungen auf.  $U_{ZM}$  ist proportional zur Temperatur leicht ansteigend (PTC).

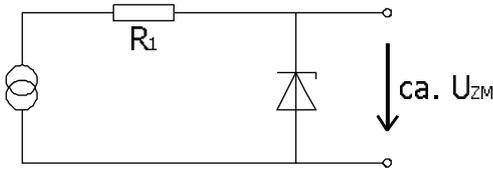
### $U_{ZM} > \text{ca. } 7 \text{ V}$ : Lawinen - Effekt

$U_{ZM}$  sinkt hier leicht mit steigender Temperatur (NTC). Hier sind soviel Elektronen frei, das diese weitere Elektronen aus dem Gitter heraus schlagen.

### $U_{ZM} = 6 \text{ V} = \text{ideal}$

$U_{ZM}$  ist hier von T unabhängig.

# Anwendungsschaltung



$R_1$  begrenzt den fließenden Strom, damit die Diode nicht durch Thermische Rückkopplung beschädigt wird.

Die Kennlinie der Z-Diode wird für Gewöhnlich durch eine Tangente angenähert. Dies gilt wie beide Diode nur für kleine Schwankungen in M:

**Definition:**

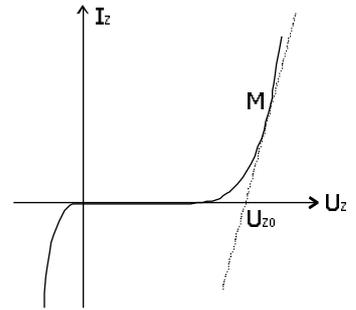
Differentielle Zener Leitwert:  $g_Z = \frac{dI_{ZM}}{dU_{ZM}}$

Differentielle Zener Widerstand:  $r_Z = \frac{1}{g_Z}$

Im Datenblatt der Z - Diode sind  $I_{ZM}$ ,  $U_{ZM}$  und  $r_Z$  angegeben.  $U_{Z0}$  kann aus folgender Formel berechnet werden:

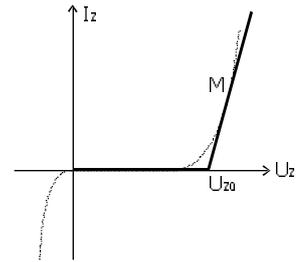
$$g_Z = \frac{1}{r_Z} = \frac{dI_{ZM}}{dU_{ZM}} = \frac{I_{ZM}}{U_{ZM} - U_{Z0}}$$

$$\Rightarrow U_{Z0} = U_{ZM} - I_{ZM} \cdot r_Z$$

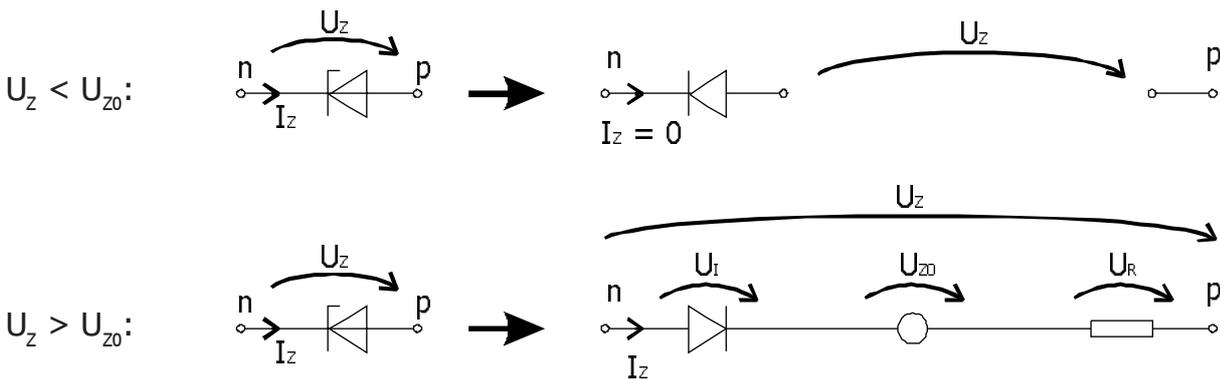


## Ersatzschaltbild

Die Z-Diode wird durch eine stückweise lineare Kennlinie angenähert.



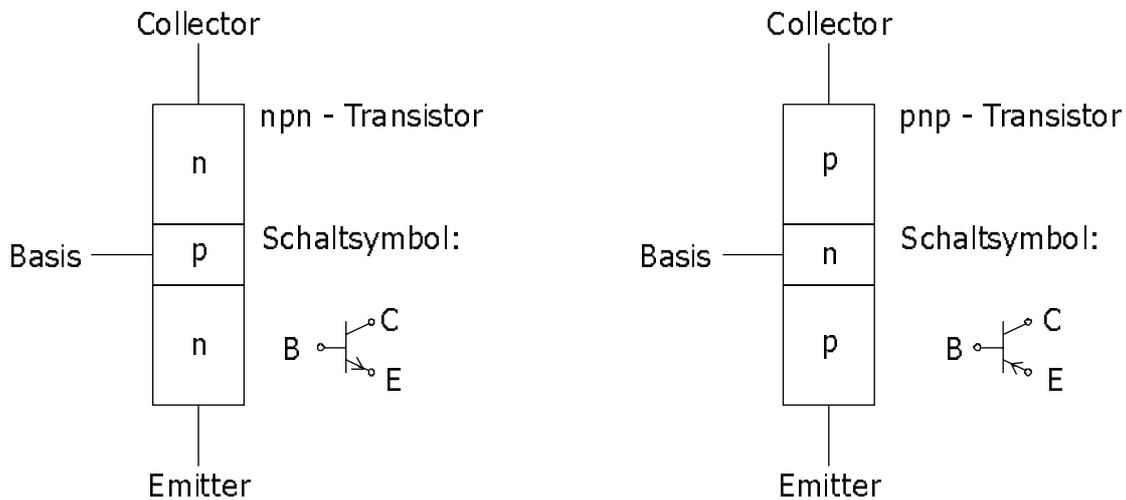
Dies führt zu zwei Ersatzschaltbildern, je nach dem, ob  $U_Z < U_{Z0}$  oder  $U_Z > U_{Z0}$  ist:



# Der Bipolar - Transistor

## Typen

Es gibt zwei komplementäre Typen von Bipolaren Transistoren:



Es gelten dabei folgende Grundregeln:

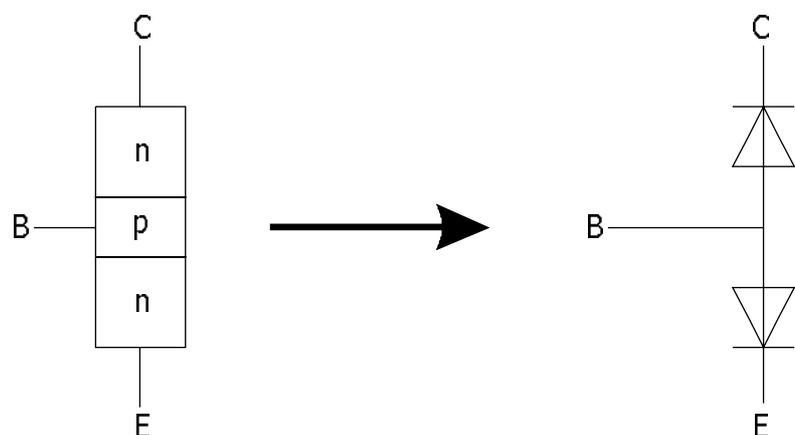
1. Die Basiszone ist wesentlich dünner als die Collector- bzw. Emitterzonen.
2. Emitter und Collector dürfen nicht vertauscht werden. Dies würde zu einer wesentlichen Verschlechterung der elektrischen Eigenschaften des Transistors führen. Dies resultiert aus der technischen Konstruktion des Transistors. Die Emitterzone besitzt eine stärkere Dotierung, während die Wärmeabfuhr der Collectorzone wesentlich besser ist.
3. Es bilden sich zwei Sperrschichten:  
Die emitterseitige Sperrschicht, auch Emitterdiode genannt;  
und die collectorseitige Sperrschicht, auch Collectordiode genannt.

**Hinweis:** Im folgenden wird immer der npn-Transistor behandelt. Für den pnp-Transistor gelten die gleichen Regeln, es ändern sich lediglich die Vorzeichen.

## Ersatzschaltbild für den Transistor

Die Grundidee für ein Transistor - Ersatzschaltbild entsteht aus der physikalischen Konstruktion, den zwei gegenläufigen Dioden. Dies ist allerdings noch **nicht** vollständig, soll uns aber vorläufig als Anhaltspunkt dienen.

Aufbauend auf dieser Grundlage lassen sich die vier möglichen Betriebsmodi des Bipolartransistors herleiten.



### 1. Emitterdiode leitend, Collectordiode sperrt: Normaler Betrieb

Dies stellt den Regelfall dar, der eine hohe Verstärkung zur Folge hat.

### 2. Emitterdiode sperrt, Collectordiode leitet: Inverser Betrieb

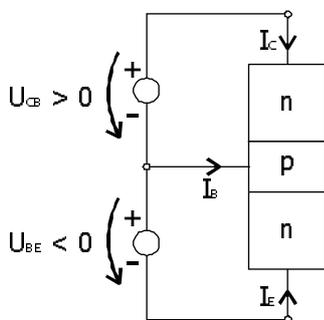
Normalerweise resultiert diese Betriebsart aus einem falschen Einbau. Unter normalen Bedingungen hat sie keine Bedeutung in der analogen Technik, da sie, im Vergleich zum Normalen Betrieb, eine wesentlich kleinere Verstärkung liefert. In der Digitaltechnik kann sie allerdings, beispielsweise bei einer TTL - Logik, sehr wohl von Bedeutung sein.

### 3. Emitterdiode leitet, Collectordiode leitet: Sättigungsbetrieb

In der Digitaltechnik, in der der Transistor als Schalter eingesetzt wird, stellt der Sättigungsbetrieb einen geschlossenen Schalter dar. Der Spannungspegel ist niedrig, weshalb dieser Zustand auch als „low“ bezeichnet wird.

### 4. Emitterdiode sperrt, Collectordiode sperrt: Sperrbetrieb

Analog zum Sättigungsbetrieb wird der Sperrbetrieb nur in der Digitaltechnik genutzt, da er den offenen Schalter darstellt. Hier ist der Spannungspegel hoch, der Zustand wird als „high“ definiert.



Da für uns nur der **Normale Betrieb** interessant ist, werden wir uns hier darauf beschränken:

Im normalen Betrieb wird zwischen Basis und Emitter eine kleine Spannung angelegt, die die Emitterdiode öffnet. Dadurch kann zwischen Collector und Basis ein großer Strom fließen.

Nach KIG gilt:  $I_C + I_B + I_E = 0$ .

## Das Transistorersatzschaltbild nach Eberts - Moll

Das Eberts - Moll Ersatzschaltbild gilt für alle vier Betriebsarten. Dabei sind zwei Werte von Bedeutung:

$A_F$  = Vorwärts - Stromübertragungsfaktor  
(Normalbetrieb)

$A_R$  = Rückwärts - Stromübertragungsfaktor  
(Inverser Betrieb)

Folglich genügen vier Größen, um einen Transistor vollständig zu beschreiben:

$$A_F, A_R, I_{SE}, I_{SC}$$

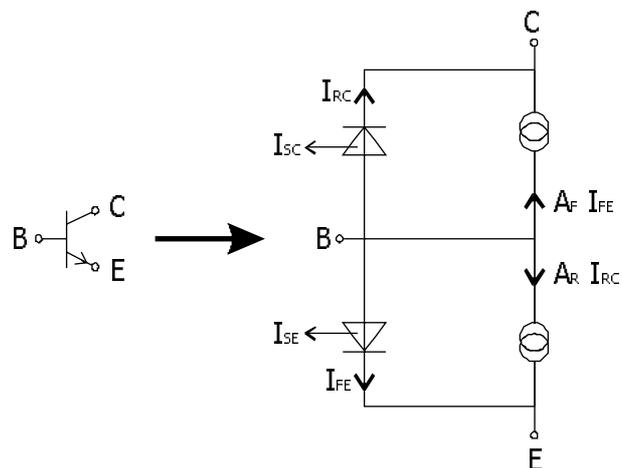
Es besteht ein innerer Zusammenhang zwischen diesen Größen:

$$A_F \cdot I_{SE} = A_R \cdot I_{SC} = I_S$$

Mit Hilfe der Diodenkennliniengleichung lassen sich die Ströme in den einzelnen Zweigen berechnen:

$$I_{RC} = I_{SC} \cdot \left( e^{\frac{U_{BC}}{U_T}} - 1 \right), \quad I_{FE} = I_{SE} \cdot \left( e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right)$$

Auch diese Gleichungen basieren lediglich auf den oben genannten Grundgrößen.

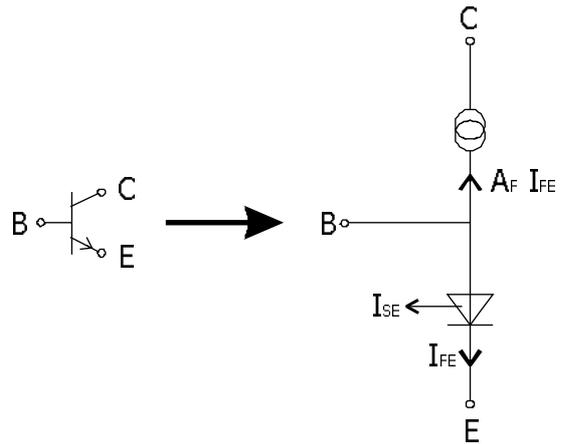


**Sonderfall: Normaler Betrieb**

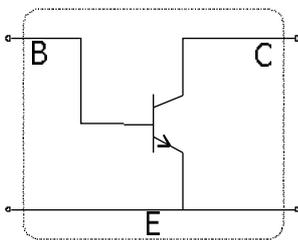
Geht man vom Normalen Betrieb aus, läßt sich das Eberts-Moll Ersatzschaltbild wesentlich vereinfachen. Die sperrende Collectordiode und die davon abhängige Stromquelle können nullgesetzt werden, wodurch sie wegfallen. Somit reduziert sich auch die Anzahl der Parameter:  $I_{SE}$  und  $A_F$ .

Da die Emitterdiode im Durchlaßbetrieb arbeitet, kann hier die einfachere Gleichung der Diodenkennlinie genutzt werden:

$$I_{FE} = I_{SE} \cdot e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$$

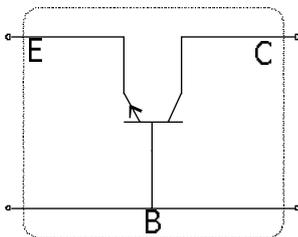


**Die Grundsaltungen des Transistors als Verstärker**



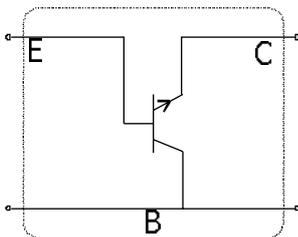
**Emitter - Grundsaltung**

Dies ist die Universalschaltung. Sie besitzt eine hohe Verstärkung für niedrige und mittlere Frequenzen (< 100 MHz) und liefert eine Hohe Verstärkung



**Basis - Grundsaltung**

Die Stromverstärkung der Basis - Grundsaltung ist ungefähr gleich eins. Sie bietet dafür eine hohe Spannungsverstärkung bei gleichzeitig niedrigem Eingangswiderstand und hohem Ausgangswiderstand.

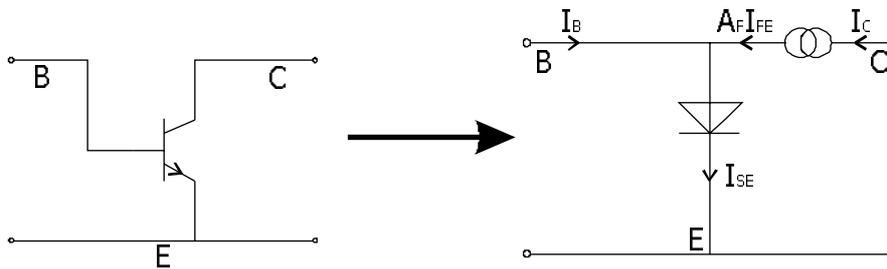


**Collector - Grundsaltung**

Die Spannungsverstärkung der Collector - Grundsaltung ist ungefähr gleich eins. Sie bietet dazu eine hohe Stromverstärkung bei hohem Eingangswiderstand und niedrigem Ausgangswiderstand. Sie wird häufig als Spannungsfolgerer oder Impendanzwandler verwendet.

## Die Emittergrundschaltung

Ersetzt man die Emittergrundschaltung mit dem Großsignal - Ersatzschaltbild nach Eberts - Moll, so erhält man:



Es gilt:

$$I_{FE} = I_{SE} \cdot e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$$

**Definition:**

Vorwärtsstromverstärkung  $B_F = \frac{I_C}{I_B}$

KIG an den Knoten B und C ergibt:

$$I_B = (1 - A_F) \cdot I_{FE}$$

$$I_C = A_F \cdot I_{FE}$$

Wird dies in die Vorwärtsstromverstärkung  $B_F$  eingesetzt, so erhält man:

$$B_F = \frac{A_F}{1 - A_F}$$

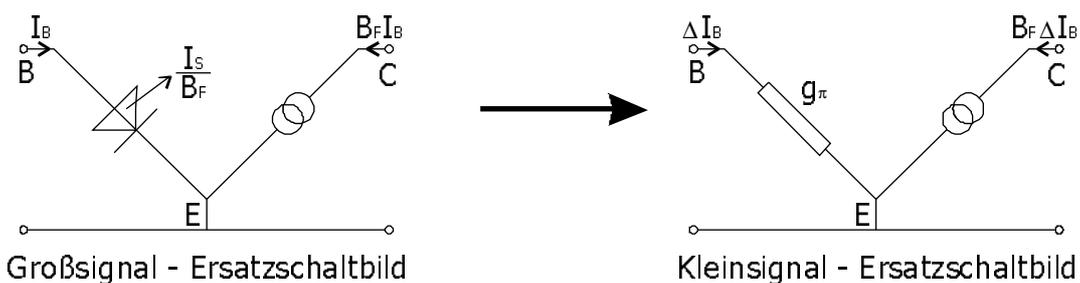
Löst man die Vorwärtsstromverstärkung nach  $I_C$  auf und setzt es in die Diodenkennlinien-gleichung ein, so ergibt sich:

$$I_B = \frac{I_S}{B_F} \cdot e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$$

Daraus läßt sich ein neues Ersatzschaltbild ermitteln:

### Technisches- oder Pi-Ersatzschaltbild

Es werden die technischen Parameter  $B_F$  und  $I_S$  verwendet.



Dabei ist:

$$g_\pi = \frac{|I_{SA}|}{U_T}$$

# **ANHÄNGE**

# Stufung und Toleranz von Widerständen

Die einzelnen Stufungen einer Widerstandsreihe erhält man aufgrund einer geometri-

schsen Folge:  $\frac{R_{k+1}}{R_k} = q$

Dabei werden n verschiedene Werte pro Dekade erzeugt. Dies führt zu:

$$q^n = 10 \Rightarrow q = \sqrt[n]{10}$$

Diese Reihen nennt man E - Reihen. Sie sind normiert:

## Internationale E - Reihen

<b>E - Reihe</b>	<b>E 6</b>	<b>E 12</b>	<b>E 24</b>	<b>E 48</b>	<b>E 96</b>	<b>E 192</b>	
<b>q</b>	$\sqrt[6]{10}$ 1,468	$\sqrt[12]{10}$ 1,212	$\sqrt[24]{10}$ 1,101	$\sqrt[48]{10}$ 1,049	$\sqrt[96]{10}$ 1,024	$\sqrt[192]{10}$ 1,012	
<b>Wert</b>	1,0	1,0	1,0 1,1				
		1,2	1,2 1,3				
			1,5	1,5	1,5 1,6		
	1,8	1,8 2,0					
		2,2		2,2	2,2 2,4		
	2,7		2,7 3,0				
			3,3	3,3	3,3 3,6		
	3,9	3,9 4,3					
		4,7		4,7	4,7 5,1		
	5,6		5,6 6,2				
			6,8	6,8	6,8 7,5		
	8,2	8,2 9,1					
		<b>Toleranz</b>		+/- 20%	+/- 10%	+/- 5%	+/- 2%

# Technische Signalquellen

In der folgenden Tabelle sind einige übliche Technische Signalquellen mit ihren Eigenschaften aufgeführt:

$U_L$	=	Leerlaufspannung in Volt
$I_K$	=	Kurzschlußstrom in Ampere
$R_i$	=	Innenwiderstand in Ohm
$P_{max}$	=	Maximale Leistungsabgabe in Watt

Name	$U_L$	$I_K$	$R_i$	$P_{max}$
Energie - Netz	230 V	2300 A	0,1	
KW - Sender	500 V	10 A	50	1250 W
Auto - Batterie	12 V	200 A	0,06	
Strom - Schnittstelle	20 V	20 mA	1000	0,1 W
Mikrofon	1 mV	1,7 $\mu$ A	600	0,43 nW
Empfangsantenne	10 $\mu$ V	200 nA	50	50 fW
Widerstandsrauschen bei 300°K und 5 MHz Bandbreite	2 $\mu$ V	41 nA	50	21 fW

# Eigenschaften einiger Leiterwerkstoffe

gemessen bei 20 °C

Material	spezifischer Widerstand $\rho_W \left[ \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$	Temperatureinfluß auf Widerstand $\alpha_T^R \left[ \frac{\text{ppm}}{\text{K}} \right]$
AG	0,016	3700
Cu	0,018	4100
Au	0,022	3800
Al	0,027	4300
Fe	0,101	6500
Pt	0,106	3920
Pb	0,206	4200
Konstantan	0,52	-40
C (Kohle)	80	
Ge	$4,7 \times 10^5$	
Si	$2,9 \times 10^9$	
GaAs	$> 10^{12}$	

# Physikalische Eigenschaften einiger Stoffe

bei 300 °K

Material	$W_G$ [eV]	$n_i$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$\lambda_G$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\mu_n$ [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ]	$\mu_p$ [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ]	$m$ [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	$E_R$
HgTe	0,025		49,60	22.000	160	8,20	
InSb	0,170	$1,0 \times 10^{16}$	7,29	80.000	700	5,77	15,90
PbSe	0,260		4,77	1.400	1.400	8,15	
PbTe	0,290		4,28	6.000	4.000	8,16	
Te	0,320		3,88	2.200	1.000	6,24	
InAs	0,360	$8,3 \times 10^{14}$	3,44	33.000	450	5,66	11,70
PbSe	0,370		3,35	600	200	7,50	
HgSe	0,600		2,07	18.500			5,80
Ge	0,670	$2,4 \times 10^{13}$	1,85	3.900	1.900	5,32	16,00
GaSb	0,680		1,82	5.000	1.000	5,60	14,00
Si	1,120	$1,2 \times 10^{10}$	1,11	1.450	500	2,33	11,80
InP	1,270	$1,2 \times 10^8$	0,98	5.300	650	4,78	10,70
GaAs	1,424	$2,0 \times 10^6$	0,87	8.500	400	5,32	13,10
CdTe	1,500		0,83	700	65	5,68	11,00
AlSb	1,600		0,78	900	400	4,26	10,10
CdSe	1,700		0,73	600		5,74	
Se	1,800		0,69	2	17	4,79	
AlSAs	2,160		0,57	1.200	200	3,79	
GaP	2,260	8	0,55	300	150	4,13	10,20
ZnTe	2,260		0,55	530	900	5,70	9,00
CdS	2,590		0,48	340	18	4,84	5,38
ZnSe	2,670		0,46	530	16	5,26	8,40
SiC	2,800		0,44	4.690		3,22	
AlP	3,000		0,41	3.500		2,38	11,60
ZnSe	3,580		0,35	1.200		4,09	5,13
C	5,000		0,20			2,22	
SiO <sub>2</sub>	8,000		0,16			2,20	3,90

$W_G$  [eV] ist die Loslöseenergie, sie entspricht der Loslösespannung  $U_G$  [V]

# Großsignal- und Kleinsignalverhalten einiger Schaltelemente

Großsignalverhalten:

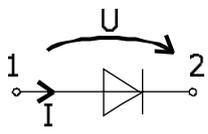
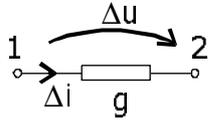
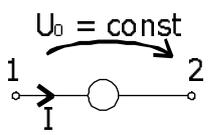
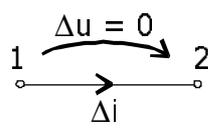
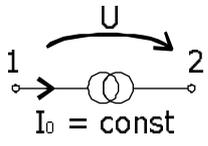
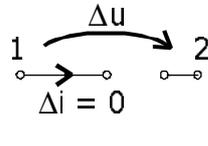
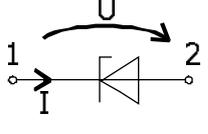
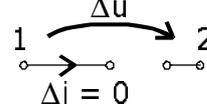
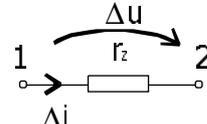
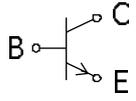
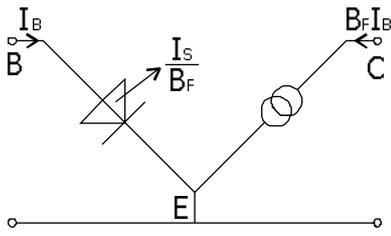
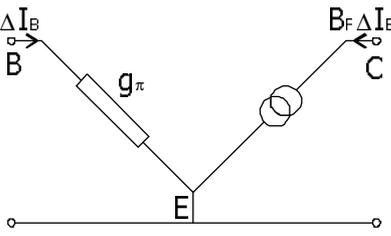
$$I = I_A + \Delta i$$

$$U = U_A + \Delta u$$

Kleinsignalverhalten:

$$\Delta i$$

$$\Delta u$$

	Großsignalverhalten	Kleinsignalverhalten
	$I = I_S \cdot \left( e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$	im Durchlaßbereich:  $g = \frac{I_A}{U_T}$ $\Delta i = g \cdot \Delta u$
	$U_0$ unabhängig von I	
	$I_0$ unabhängig von U	
	2 Fälle:	$U_A < U_{z0}$ :  $U_A > U_{z0}$ : 
		

Zur Berechnung kleiner Signale in einer nicht - linearen Schaltung wird jedes Schaltelement durch sein lineares Kleinsignalersatzschaltbild ersetzt. Hierbei entsteht eine lineare Schaltung, die z.B. mit Knotenanalyse berechnet werden kann.

Zur Bestimmung des Arbeitspunktes können alle Kleinsignalquellen nullgesetzt werden.

# Index

## A

### ANHÄNGE

- Eigenschaften einiger Leiterwerkstoffe 47
- Kleinsignalverhalten einiger Bauelemente 49
- Physikalische Eigenschaften einiger Stoffe 48
- Stufung und Toleranz von Widerständen 46
- Technische Signalquellen 47

## B

- Bipolar - Transistor 41
  - Betriebsmodi 41
    - Inverser Betrieb 42
    - Normaler Betrieb 42
    - Sättigungsbetrieb 42
    - Sperrbetrieb 42
  - Eberts-Moll Ersatzschaltbild 42
  - Eberts-Moll Ersatzschaltbild, Normaler Betrieb 43
  - Technisches- oder Pi-Ersatzschaltbild 44
  - Typen 41
    - nnp - Transistor 41
    - pnp - Transistor 41

## C

- Coulomb Gesetz 6

## D

- Diffusion 32

## E

- Elektrische Spannung 7

## H

- Halbleiter
  - Dotieren 28, 30
    - Akzeptoren 30
    - Donatoren 30
  - Edelgase 28
  - Erhöhen der Leitfähigkeit von Halbleitern 28
  - Halbleiter 28
  - Intrinsic - Halbleiter 29
    - Intrinsic - Dichte 29
  - Licht - Halbleiter - Wechselwirkung 28, 29
    - Licht als elektromagnetische Welle 28
    - Licht als Korpuskel 29
  - Metalle 28
  - Rekombination 30
- Halbleiterdiode 32
  - Betriebsmodi 32
    - Durchlaßbetrieb 33
    - Sperrbereich 33
    - Thermodynamisches Gleichgewicht 32
  - Diffusionsspannung 33
  - Gleichung der Diodenkennlinie 33
    - Diodenkennlinie im Sperrbereich 34

- Kleinsignalbetrieb 35
  - Arbeitspunkt 35
  - Differentieller Leitwert 35
- Raumladungszone 32
- Temperaturspannung 33
- Temperaturverhalten 34
  - Durchlaßbereich 34
  - Sperrbereich 34
  - Thermischen Rückkopplung 34

## K

- Kirchoff - Gesetze 8
  - Spannungsgesetz 9
  - Stromgesetz 8
- Kleinsignaltheorie 35
- Konstanten
  - absolute Dielektrizitätskonstante 6
  - Elementarladung 6

## L

- Ladung und Strom 6
  - Coulomb Gesetz 6
- Leistung und Arbeit 7

## O

- Ohmsches Gesetz 10
  - Leitwert 10
  - spezifischer Widerstand 11, 47
- Operationsverstärker 19

## P

- Physikalische Größen und Maßeinheiten 6
  - Boltzmannkonstante 30, 37
  - Elektrische Spannung 7
  - Elektrische Ladung 6
  - Elektrischer Leitwert 10
  - Energie, Arbeit 8
  - Grundgrößen der Mechanik 6
    - Länge 6
    - Masse 6
    - Strom 6
    - Temperatur 6
    - Zeit 6
  - Leistung 7
  - Plancksches Wirkungsquantum 29
  - Spezifischer Widerstand 11
  - Stefan - Boltzmann - Konstante 37
  - Widerstand 10

## S

- Schaltungsanalyse 21
  - 2 - Pol - Ersatzquellen - Theorem 24
    - Wheatstonsche Brücke 25
  - Knotenanalyse 21
  - Knotenanalyse mit Operationsverstärkern 23
  - Substitutionstheorem 26
  - Überlagerungssatz 24
- Signalquellen 15, 47
  - Gesteuerte Signalquellen 18
  - Operationsverstärker 19

- Spannungsgesteuerte Spannungsquelle 19
- Spannungsgesteuerte Stromquelle 20
- Stromgesteuerte Spannungsquelle 20
- Stromgesteuerte Stromquelle 20
- Übertragungsparameter 18
- Reale Signalquellen 16
  - Anpassung 18
  - Innenleitwert 17
  - Innenwiderstand 17
  - Kennliniengleichung 17
  - Spannungsquellen - Ersatzschaltbild 17
  - Stromquellen - Ersatzschaltbild 17
  - Thermisch rauschender Widerstand 17
- Unabhängige Signalquellen 15
  - Ideale unabhängige Spannungsquelle 15
  - Ideale unabhängige Stromquelle 16
- Spannungsteiler, unbelasteter- 12
- Stefan - Boltzmann - Gesetz 37

## T

- Thermische Dimensionierung 36
  - Konvektion 37
  - Wärmeleitung 36
  - Wärmestrahlung 37
  - Wärmewiderstand 37

## V

- Vergößerungs- und Verkleinerungsfaktoren 6

## W

- Widerstände 10
  - Bauformen 11
    - Drahtwiderstand 11
    - Halbleiterdiode 13
    - Ideale Schalterdiode 13
    - Massewiderstand 12
    - Schichtwiderstand 12
    - SMD - Widerstand 12
  - Ohmsches Gesetz 10
    - Zugeführte Leistung P 11
  - Parallelschaltung 14
  - Serienschaltung 14
  - thermisch rauschender 17
  - Wertestufung und Toleranz 14, 46

## Z

- Zener-Diode 39
  - Anwendungsschaltung 40
  - Betriebsarten 39
    - $U < \text{ca. } 5 \text{ V}$  39
    - $U = 6 \text{ V}$  39
    - $U > \text{ca. } 7 \text{ V}$  39
  - Ersatzschaltbild 40

This page was intentionally left blank...

PS: Man danke dem Pizza - Service, der dieses Skript erst ermöglichte! :-)