

# I Grundlagen der Elektronik

## 1 Physikalische und mathematische Grundlagen

### 1.1 Allgemeines/Einführung

IT ← Microelektronik ← Elektronik ← Elektrotechnik ← Elektrotechnik ←

Elektrizitätslehre (Teilgebiet der Physik) ← Physik

### 1.2 Physikalische Grundbegriffe

physikalische Größe ↔ - messbare Eigenschaften von Körpern  
 - messbare Eigenschaften von physikalischen Vorgängen  
 physikalische Größe = Produkt aus Zahlenwert und Einheit  
 (skalare Größe)  
 physikalische Einheit ⇒ Abkürzungen  
 (SI - System)  
 Rechnen mit physikalischen Größen ⇒ Einheiten immer berücksichtigen

#### 1.2.1 Bewegung und Geschwindigkeit

- physikalischer Körper, der seine Lage ändert, befindet sich in Bewegung
- physikalischer Körper, der seine Lage nicht ändert, ruht  
 ~> relativ betrachtet zum Bezugspunkt

Bewegung eines Körpers von A nach B

Strecke  $s$   
 Zeit  $t = t_2 - t_1$

Geschwindigkeit  $V = \dot{s}$   
 Beschleunigung  $a = \dot{V} = \ddot{s}$  } erste/zweite Ableitung

- ~> Gleichförmige Bewegung liegt vor, wenn in gleichen Zeitabschnitten, gleiche Teilstrecken zurückgelegt werden d.h. die Geschwindigkeit ist konstant; die Beschleunigung gleich Null ( $=\emptyset$ )
- ~> ungleichförmige Bewegung liegt vor, wenn in gleichen Zeitabschnitten, ungleiche Teilstrecken zurückgelegt werden ⇒ (beschleunigte Bewegung) d.h. die Geschwindigkeit ist nicht konstant; Beschleunigung ungleich Null ( $\neq \emptyset$ )

$$\boxed{\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Wegänderung}}{\text{Zeitänderung}}}$$

$$\boxed{V = \dot{s} = \frac{ds}{dt} = \frac{\Delta s}{\Delta t}}$$

$$\boxed{V = \frac{s}{t}} \quad \text{für gleichförmige Bewegung}$$

$$\text{Beschleunigung} = \frac{\text{Geschwindigkeitsänderung}}{\text{Zeitänderung}}$$

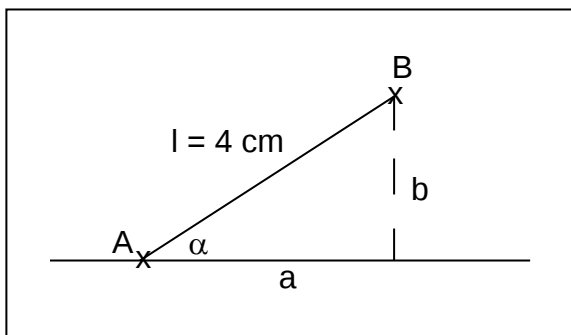
$$a = \dot{V} = \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

$$a = \frac{V}{t}$$

bei gleichmäßig beschleunigten Bewegungen

Wir unterscheiden zwei Arten von physikalischen Größen.

1. **Skalare Größe** = ungerichtete Größe  
physikalische Größe, die eindeutig durch die Angabe eines Zahlenwertes und einer Einheit definiert ist (Zeit, Temperatur, Lichtstärke, elektrischer Strom, Arbeit,...)
2. **Vektorgröße** = gerichtete Größe  
oder einfach Vektor  
physikalische Größe, die zusätzlich noch durch eine Richtung (Wirkrichtung) bestimmt ist (Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft)



Festlegung:

1. Zahlenwert (4)
2. Einheit (cm)
3. Richtung (kartesisch, beide Katheten Winkelkoordinaten Winkel  $\alpha$ )
4. Ausgangs-/Angriffs-/Bezugspunkt (A)

Berechnung von Vektorgrößen

- (a) mit Hilfe der Vektorrechnung
- (b) mit Hilfe der geometrischen Addition (Kräfteparallelogramm)

$$F_R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos(\alpha)}$$

~> bei senkrecht aufeinander stehenden Vektoren ( $\alpha=90^\circ$ )

gilt:  $F_R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$

### 1.2.2 Masse

Jeder Körper verhaart solange im Zustand der Ruhe (oder gleichförmiger Bewegung), bis er durch von außen auf ihn einwirkende Einflüsse gezwungen wird, diesen Zustand zu verlassen. Der Körper ist träge.

Trägheit der Körpers = Masse [m] = kg

### 1.2.3 Kraft

Ermöglicht eine Geschwindigkeitsänderung der trägen Masse.

$$\text{Kraft} = \text{Masse} * \text{Beschleunigung}$$

$$F = m * a$$

$$[F] = N = kg * \frac{m}{s^2}$$

### 1.2.4 Gewichtskraft

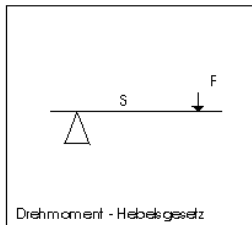
Masse eines Körpers auf der Erde wird von der Erde angezogen.

$$G = m * g \quad g \dots \text{Beschleunigung}$$

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

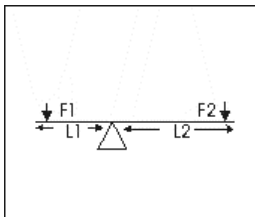
### 1.2.5 Drehmoment

Hebelgesetz



$$M = F * s$$

$$[M] = \frac{kg * m}{s^2} * m = \frac{kg * m^2}{s^2} = Nm$$



wenn  $M_1 = M_2 \Rightarrow$  Waage

### 1.2.6 Arbeit

Kraft wirkt auf einen Körper  $\sim \rightarrow$  Körper bewegt sich  $\sim \rightarrow$  Arbeit

$$W = Fs$$

$$[W] = Nm = J$$

$$1 \text{ kcal} = 4187 \text{ J}$$

$$1 \text{ J} = 2,39 * 10^4 \text{ kcal}$$

## 1.2.7 Energie

Energie ist gespeicherte Arbeit = Fähigkeit eines Körpers Arbeit zu verrichten

- ↪ 2 Arten:
- |                     |   |                                          |
|---------------------|---|------------------------------------------|
| 1. Lageenergie      | = | potentielle Energie ( $W_{\text{pot}}$ ) |
| 2. Bewegungsenergie | = | kinetische Energie ( $W_{\text{kin}}$ )  |

### 1.2.7.1 Lageenergie bzw. potentielle Energie

⇒ auch Hubarbeit

$$\text{Hubarbeit} = \text{Kraft} * \text{Höhe}$$

$$W_{\text{pot}} = F * h$$

Die aufgewendete Hubarbeit ist im Körper gespeichert.

### 1.2.7.2 Bewegungsenergie bzw. kinetische Energie

Durch Bewegung nimmt ein Körper Energie auf!

$$\text{Bewegungsarbeit} = \frac{1}{2} \text{Masse} * \text{Geschwindigkeit}^2$$

$$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m V^2$$

### 1.2.7.3 Energieumwandlungen

Energie kann nicht von selbst entstehen.

Energie kann weder gewonnen werden noch verloren gehen.

Energie kann nicht verbraucht werden.

Energie kann immer nur von einer in eine andere Energieform umgewandelt werden.

~> bei mechanischer Energie:

$$W_{\text{pot}} \leftrightarrow W_{\text{kin}}$$

~> bei Verwendung elektrischer Energie:

elektrischer Strom ↔ Wärmeenergie  
→ mech. Energie  
→ Licht

## 1.2.8 Leistung

$$\text{Leistung} = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}}$$

$$P = \frac{W}{t}$$

$$[P] = \frac{J}{s} = \frac{Nm}{s} = W$$

## 1.2.9 Wirkungsgrad

Es treten bei jeder Energieumwandlung „Verluste“ auf, d.h. ein Teil der eingesetzten Energie wird nicht in die gewünschte Energieform umgewandelt. Oft sind diese „Verluste“ Wärmeverluste (Wärmeenergie).

$$\eta = \frac{W_{\text{ab}}}{W_{\text{zu}}} = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}}$$

→ gleiche Zeit

Die Angabe ist auch in Prozent möglich.

Verlustleistung:

$$P_V = P_{\text{zu}} - P_{\text{ab}}$$

Verlustenergie:

$$W_V = W_{\text{zu}} - W_{\text{ab}}$$

## **1.3 Einheiten und mathematische Zeichen**

### **1.3.1 Das SI (Système International d'Unités) - Einheitensystem**

- internationale Einigung über die formale Darstellung physikalischer Größen
- 6 Grundgrößen
- alle anderen physikalischen Größen können aus den 6 Grundgrößen abgeleitet werden

### **1.3.2 Dezimale Vielfache und Teile von Einheiten**

- ~> SI – System
- ~> (Dtschl.) DIN 1301

Mathematische Zeichen

~> (Dtschl.) DIN 1302

zusätzlich: Betragssymbol

## **1.4 Gleichungen und Formelstellungen**

Wert (linke Seite) = Wert (rechte Seite)

### **1.4.1 Wichtige Rechenregeln**

- Grundrechenarten
- Potenzen und Wurzeln

### **1.4.2 Klammerregelungen**

## **1.5 Grafische Darstellungen**

### **1.5.1 Rechtwinkliges Koordinatensystem**

### **1.5.2 Funktionen**

$$y = f(x)$$

### **1.5.3 Lineare Funktionen**

$$y = mx + n$$

m... Anstieg

n... Verschiebung aus dem Ursprung

### **1.5.4 Quadratischen Funktionen und Funktionen höherer Ordnung**

(Potenzfunktionen)

Viele Zusammenhänge in der Technik stehen im quadratischen Verhältnis  
(Lautstärke/ Lichtstärke/ Tonhöhe empfinden)

### 1.5.5 Weitere Funktionen (Übersicht)

## 2 Elektrotechnische Grundlagen (der Elektrotechnik)

### 2.1 Allgemeines/ Einleitung

- Wo kommt Elektrizität her?
- Leitungsvorgänge
- Materie
- Wärme ~> Wärmeabführung

### 2.2 Materie und Wärme

#### 2.2.1 Materie

- alles gegenständliche, das den Menschen umgibt und das er mit seinen „Sinnen“ wahrnehmen kann.
  - sie hat eine Masse und nimmt Raum ein
  - sie besteht aus 103 chemischen Grundstoffen (PSdE)  
~> durch Kombination dieser Elemente entstehen die Unterstoffe
  - hat Materie eine bestimmte Form und eine begrenzte Ausdehnung sowie eine Masse, so wird sie auch als Körper bezeichnet
  - jede Materie kann durch die Angabe seiner chemischen, physikalischen und sonstigen technischen Eigenschaften beschrieben werden
- ~> Stoff  
Dichte eines Stoffes

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$[\rho] = \frac{kg}{m^3} = \frac{g}{cm^3}$$

weitere charakteristische Eigenschaften von Stoffen:

- Schmelzpunkt
- elektrische Leitfähigkeit
- Wärmeleitfähigkeit
- spezifische Wärmekapazität

drei Zustandsformen der Materie (Aggregatzustände)

- BEC (Bose-Einstein-Kondensation bei ca. 0K)  
siehe auch [http://www.iap.uni-bonn.de/P2K/bec/what\\_is\\_it.html](http://www.iap.uni-bonn.de/P2K/bec/what_is_it.html)
- fest
- flüssig
- gasförmig
- (Plasma)

Jeder Stoff kann in Abhängigkeit von seiner Temperatur jeden Aggregatzustand erreichen!

## 2.2.2 Temperatur und Wärme

Temperatur ist ein Maß für den Wärmezustand eines Körpers.

Wärme wird durch Teilchenbewegung charakterisiert.

~> 2 Maßsysteme: °C - Skale → richtet sich nach dem Verhalten von Wasser  
 0 °C → Erstarrungspunkt  
 100 °C → Siede- oder Verdampfungspunkt  
 (abhängig von der Höhe/Druck)  
 K – Skale → geht vom absoluten „Nullpunkt“ aus  
 (keine Teilchenbewegung → Eigenbewegung)  
 K = - 273,15 °C

Temperaturdifferenzen ( $T_1 - T_2$ ) werden immer in Kelvin angegeben.

Bsp.: 18 °C - 8 °C = 10 K

Zustandsänderungen und Wärmeenergie

(a) Zufuhr von Wärme  $\Rightarrow$  „fest“  $\rightarrow$  „flüssig“  $\rightarrow$  „gasförmig“

(b) Entzug von Wärme  $\Rightarrow$  „gasförmig“  $\rightarrow$  „flüssig“  $\rightarrow$  „fest“

Es gilt: zugeführte oder entzogene Wärmeenergie verhält sich proportional zur Temperaturänderung

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Q... Wärmemenge

[Q]=J

m... Masse

[m]=kg

c... spez. Wärmekapazität

[c]=J/kg\*K

$\Delta T$ ... Temperaturdifferenz

[ $\Delta T$ ]=K

### 2.2.2.1 Wärmeübertragung

- Abführung von Verlustwärme (Elektrotechnik / Elektronik)

- 3 Arten:
- Wärmeleitung
  - Konvektion
  - Wärmestrahlung

- Wärmeleitung:

direkte Fortleitung der Wärme durch Berührung  
 (Voraussetzung: gutes Wärmeleitvermögen des Stoffes)  
 z. B. Lötvorgang, Kühlung

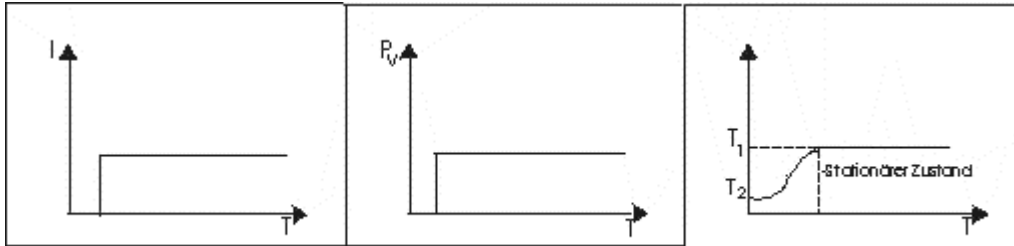
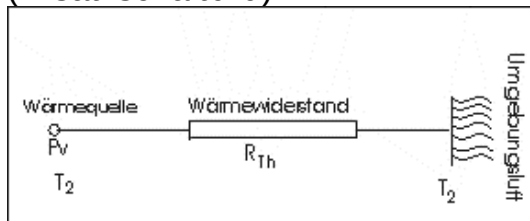
- Konvektion: (Wärmeströmung)

Wärme wird zunächst von gasförmiger oder flüssiger Materie, die den warmen Körper umgibt, aufgenommen und abgeleitet  
 (Luft- oder Wasserkühlung)

- Wärmestrahlung:

Ursachen sind elektromagnetische Schwingungen  
 (Infrarotstrahlung)

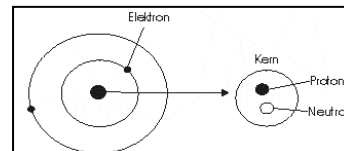
## Wärmeberechnungen (ohmsches Gesetz des thermischen Kreises) (Ersatzschaltbild)



## 2.3 Aufbau der Materie

### 2.3.1 Atomaufbau

- Elektronen umkreisen den Kern auf unterschiedlichen Bahnen
  - ~> Bahnen kennzeichnen Energieniveaus
  - ~> 7 solcher Schalen (k-q)
  - ~> auf jeder dieser Schalen kann sich immer eine bestimmte Anzahl von Elektronen befinden
  - ~> Besetzung der ersten 4 Schalen:
    - k- Schale: max. 2
    - l- Schale: max. 8
    - m- Schale: max. 18
    - n- Schale: max. 32



### 2.3.2 Elektrische Ladungen

Elementarladung =  $1,6 \cdot 10^{19}$  As [C]

$e^-$  ... Ladung eines Elektrons

$e^+$  ... Ladung eines Protons

- Teilchen oder Körper mit unterschiedlichen Ladungen ziehen sich an
- Teilchen oder Körper mit gleichen Ladungen stoßen sich ab

### 2.3.3 Ionen

- vollständige Atome haben gleiche Anzahl von Protonen und Elektronen
  - ~> nach außen neutral
- Atome können unter bestimmten Bedingungen Elektronen aufnehmen oder abgeben
  - ~> sie sind dann nicht mehr neutral
  - ~> werden als Ion bezeichnet

- Ionen mit Elektronenüberschuß → Kation (negativ)
- Ionen mit Protonenüberschuß (Elektronenmangel) → Anion (positiv)

### 2.3.4 Chemische Bindungen

Atome haben das Bestreben, ihre äußeren Schalen mit Elektronen aufzufüllen.  
 ~> „Wunsch“ nach Verbindungen mit benachbarten Atomen (gleiches oder ungleiches Element)

3 Bindungsarten:

- Ionenbindung
- Atombindung
- Metallbindung

#### 2.3.4.1 Ionenbindung

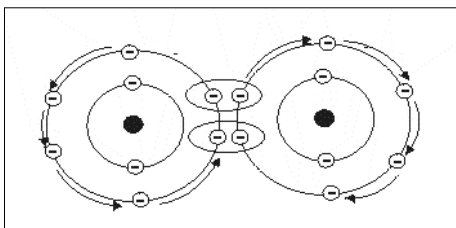
- tritt auf zwischen Atomen unterschiedlicher Elemente
  - Atome mit wenigen Außenelektronen
    - ~> gibt diese „Gene“ ab
    - ~> positive Ion (Anion)
  - Atome mit vielen Außenelektronen
    - ~> Bestreben diese Außenschale zu füllen
    - ~> ziehen Elektronen an
    - ~> negatives Ion (Kation)
- Anziehen beider Ionentypen → Eingeben einer chem. Bindung (Moleküle nach außen elektrisch neutral)

⇒ neuer Stoff wird geboren!

#### 2.3.4.2 Atombindungen

-tritt zwischen Atomen Elementen auf

- Bsp: -Sauerstoff  $O_2$  [8 Elektronen, Wertigkeit: 6 ~> 6 Außenelektronen]  
 -Si, Ge (Gitterstrukturen)

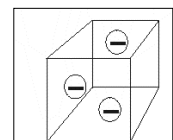


Zwischenzeitlich (virtuell) besitzt jedes Sauerstoffatom 8 Außenelektronen, d.h. die Außenschale ist gefüllt!  
 → stabile Bindung!

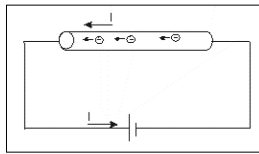
#### 2.3.4.3 Metallbindungen

Metalle sind gute Leiter ~> große Bedeutung für die Elektrotechnik

- Metallatome besitzen nur wenige Außenelektronen (  $Cu \Rightarrow 1$  Valenzelektron  
 $Al \Rightarrow 3$  Valenzelektronen)
- Außenelektronen werden leicht abgegeben
- Die übrig gebliebenen Metallionen bilden einen festen Gitterverband (Raumgitter, Metallgitter)



- die abgegebenen Elektronen bewegen sich frei im Gitter  $\rightarrow$  es entstehen „Ministröme“, die in ihrer Summe (nach außen hin) Null ergeben.



- unter Einfluß eines äußeren Feldes ordnen sich die freien Elektronen dieser Kraft unter  $\rightarrow$  es entsteht ein resultierender Strom

## 2.4 Elektrotechnische Grundbegriffe

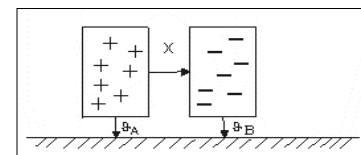
### 2.4.1 Potential und elektrische Spannung

- Voraussetzung: 2 Stoffe mit unterschiedlicher elektrischer Ladung  
 $\rightarrow$  Ladungsträgertrennung!

Potentialdifferenz  $\Delta\varphi \leftrightarrow$  elektrische Spannung  $U_{ab}$

$$\Delta\varphi_{ab} = U_{ab}$$

Die Richtung der Spannung  $u$  wird entsprechen der Indexe angegeben!

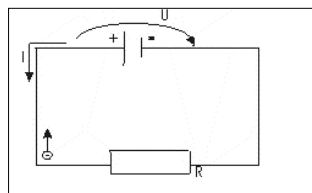


$$\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_B$$

### 2.4.2 Elektrischer Strom

- Besteht zwischen 2 Punkten eine elektrische Spannung (Vorhandensein eines elektrischen Feldes), so finden wir vor, dass sich die Ladungen ausgleichen möchten
- Erforderlich ist ein entsprechender Weg (elektrisch leitfähiger Stoff: Leiter Widerstände)

$\rightarrow$  Es fließt ein elektrischer Strom  $I$   $[I]=A$

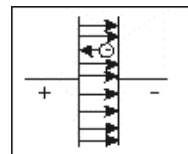


- technische Stromrichtung von „+“  $\rightarrow$  „-“ (historisch gewachsen)  
 $\rightarrow$  tatsächlich haben wir es i.d.R. mit Elektronenströmen zu tun, die sich von „-“ nach „+“ bewegen (physikalische Stromrichtung)

### 2.4.3 Das elektrische Feld

$$F_{\text{elek.}} \sim \frac{Q_1 \cdot Q_2}{l^2} \quad \text{COULOMBSches Gesetz}$$

$$E = \frac{U}{l} \quad [E] = \frac{V}{m}$$

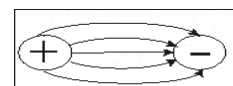


Bsp: elektrischer Schalter

$a = 2 \text{ mm}$ ,  $U = 1000 \text{ V}$

$\rightarrow E = U/a = 500 \text{ kV/m}$

- elektrische Feldlinien treten senkrecht aus und senkrecht wieder ein



- Überlagerung von elektrischen Feldern führt zur Verstärkung, Verminderung oder zum Auslösen der Feldwirkung
- Elektronen bewegen sich entgegengesetzt zur Feldrichtung ("+" nach "-")

$$W = F \cdot s$$

$$F_{\text{el.}} = Q \cdot E$$

$$W = Q \cdot E \cdot s$$

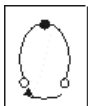
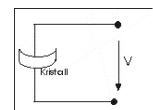
- ein sich im elektrischen Feld bewegendes Elektron nimmt Energie auf ( $W_k$ )  
~> Anwendung z.B. Elektronenstrahlröhre (Erzeugung von Leuchtpunkten)
- jede gerichtete Elektronenbewegung ist gleichbedeutend mit einem Stromfluß  $I$   
~> Ströme fließen auch im Vakuum, in Flüssigkeiten, in Gasen und Isolatoren

## 2.5 Erzeugung elektrischer Spannungen

-Voraussetzung zum Entstehen von Spannungen sind Potentialdifferenzen, die ihrerseits eine Ladungstrennung voraussetzen

### Prinzipien:

1. Zufuhr mechanischer Energie unter Anwendung der Gesetze des Magnetismus  
→ Generationen (Dynamoprinzip) ⇒ Wasserkraft, Windkraft  
⇒ Wärmekraftwerke (Antrieb über Dampfturbinen)  
⇒ Kohle, Öl-, Gas, Atom)
2. Zufuhr von chemischer Energie (galvanische Elemente)  
Aufspaltung von Ladungen
  - a) Primärelemente (Batterien, Monozellen,...)  
⇒ Chemischer Vorgang ist nicht umkehrbar
  - b) Sekundärelemente (wiederaufladbare Batterien, Akkumulatoren)  
⇒ Chemischer Vorgang ist umkehrbar
3. weitere Verfahren zur Spannungserzeugung (Einschränkung auf relativ kleine Energiemengen)
  - mechanischer Druck auf einen Kristall → Piezoeffekt  
~> Verwendung: Messtechnik, Gasanzünder
  - Thermoelement: Wärmeenergie wird direkt in eine Spannung umgesetzt (mV-Bereich) ~> Verwendung: Messtechnik
  - Fotoelemente → Ladungsträgertrennung durch Einwirkung von Licht  
⇒ Solartechnik (Fotovoltaik)



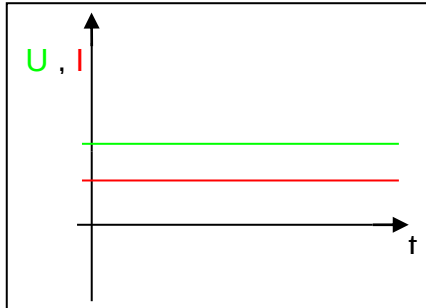
## 2.6 Wirkungen des elektrischen Stroms

- Mensch besitzt keinen Sinn für elektrische Größen. Er kann nur die Wirkungen wahrnehmen.
  1. thermische Wirkung → Heizgeräte, Glühlampe (Licht)
  2. Lichtwirkung → Anhebung von Elektronen auf ein höheres Energieniveau  
~> beim Rücksprung wird Energie in Form von Lichtwellen abgegeben  
~> LED (Leuchtdioden)

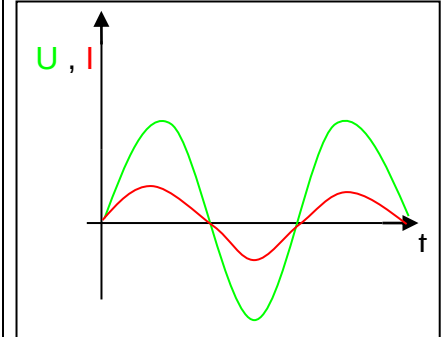
- Glühemission
- Leuchtstofflampen (Ionisierung von Edelgasen)
- 3. chemische Wirkung → Zersetzung von Flüssigkeiten (Elektrolyse)  
Bsp.:   
→ weitere Anwendung → Oberflächenveredelung
  - ↳ Transport von Metallionen, die sich auf die Oberfläche niederlassen
- 4. magnetische Wirkungen → jeder Stromfluß erzeugt ein magnetisches Feld
  - ↳ Anwendung: Elektromotoren  
Elektromagneten
- 5. physiologische Wirkung → (auf Lebewesen)
  - ↳ Muskelbewegung (Verkrampfungen)
    - ↳ Gefährdung durch elektrischen Strom
      - ↳ bei Wechselstrom → Herzkammerflimmern

## 2.7 Spannungs- und Stromarten

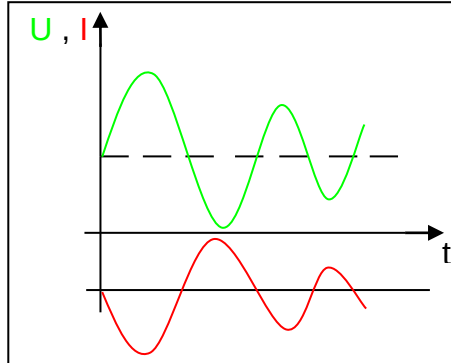
### Gleichgrößen (zeitunabhängig)



### Wechselgrößen (zeitabhängig)

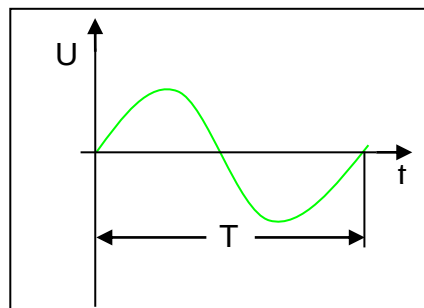


### Mischgrößen



#### periodische

- Sinus
- Rechteck/Puls
- Sägezahn
- Dreieck



$$f = \frac{1}{T}$$

#### aperiodische

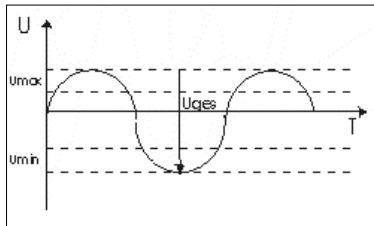
Einmalige Vorgänge  
(Burst o. Transienten)  
Bild

Rauschen  
(statistische bzw.  
stochastische Signale)

Weißes Rauschen  
→ enthält alle  
Frequenzen zu  
gleichen Teilen

Rosa Rauschen  
→ enthält Frequenzen  
des hörbaren  
Bereiches (Frequenz =  
max. 20 kHz)

## Definition einiger wichtiger Größen:

 $U_{\max}$ ... Maximalwert $U_{\min}$ ... Minimalwert

$$U_{ss} = \hat{U} = U_{\max} - U_{\min}$$

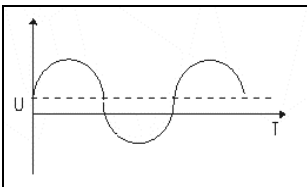
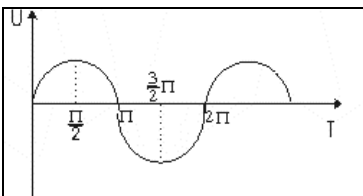
$$U_s = |U_{\max}| = |U_{\min}| \text{ (nur bei reinen Wechselgrößen)}$$

$$U_s = \hat{U}$$

## Effektivwert (bei reinen Wechselgrößen)

$$U = \frac{U_s}{\sqrt{2}}$$

U... Momentanwert

 $U_{-}$  ... Gleichspannungswert/-anteil (arithmetischer Mittelwert)

$$f = \frac{1}{T}$$

$$\omega = 2\pi \frac{1}{T}$$

### 3 Der einfache Stromkreis

#### 3.1 Allgemein

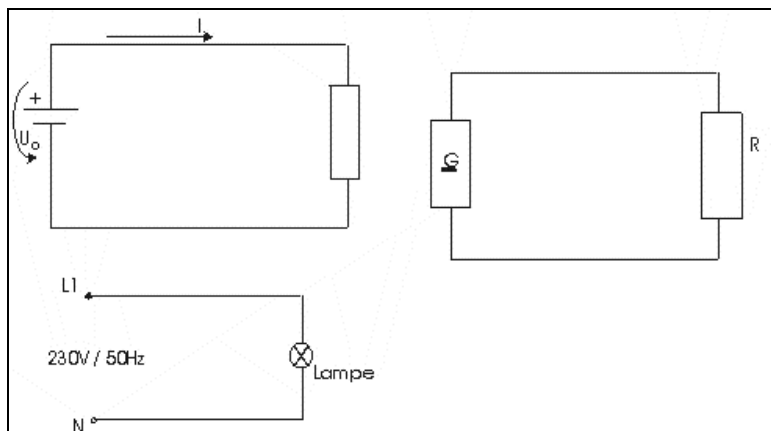
- Nutzung elektrischer Energie erfordert das Zusammenwirken von Spannung und Strom
- Elektrischer Strom fließt nur in einem geschlossenen Stromkreis
  - ↳ Spannungsquelle → Zuleitung → „Verbraucher“  
oder
  - ↳ Stromquelle → Zuleitung → „Verbraucher“
    - ↳ i.d.R. Ohmscher Widerstand  
(Energie wird in Wärme umgesetzt)
- Ohmsches Gesetz  

$$R = \frac{U}{I}$$
 ... elementare Beziehungen zwischen U, I und R
- Die gespeicherte Energie einer Spannungsquelle wird umgewandelt!  
 ~> dabei wird Arbeit verrichtet

$$W = U * I * t$$

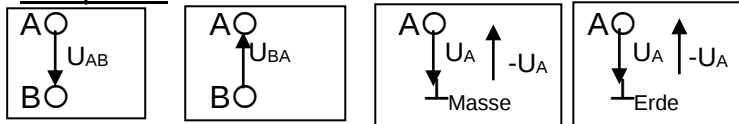
~> elektrische Leistung  $P = U * I$

#### 3.2 Aufbau eines einfachen Stromkreises



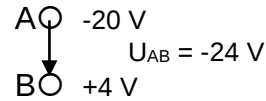
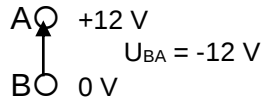
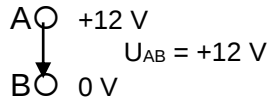
#### 3.3 Kennzeichnung von Spannungen und Strömen

| Gleichstromkreis                                                                               | Wechselstromkreis                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><math>U_0 \dots U_r</math> - oder Quellspannung (Spannung bei unbelasteter Stromquelle)</p> | <p><math>U_G \dots</math> Effektivwert der Generatorspannung<br/> <math>I \dots</math> Effektivwert des Wechselstroms</p> |

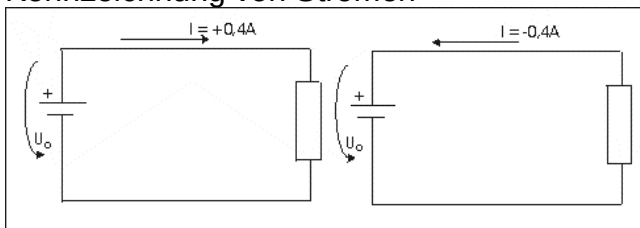
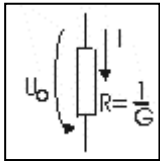
Zählpfeile:

## Bezeichnung von Spannungswerten

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$$



## Kennzeichnung von Strömen

**3.4 Das Ohmsche Gesetz**

$$I = G * U = \frac{1}{R} * U = \frac{U}{R}$$

G... Leitwert

$$[I] = S * V = A = \frac{V}{\Omega}$$

Einheit S ... Siemens

$$U = \frac{I}{G} = I * R$$

$$R = \frac{U}{I}$$

$$G = \frac{I}{U}$$

Bsp.: Welcher Strom fließt zur Spitzenspannung im Stromkreis?

geg.:  $R = 100\Omega$   $U = 230V$ ges.:  $i_{\max} = i_s$ 

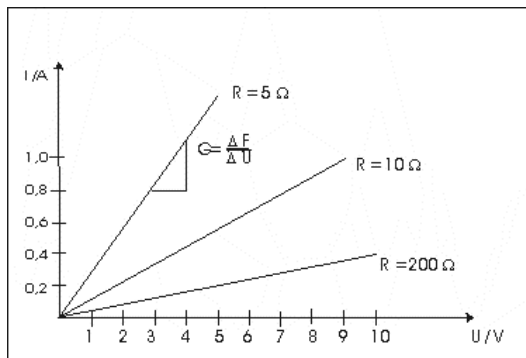
$$\text{Lösung: } i_s = \frac{U_i}{R} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{R} = \frac{1,41 \cdot 230V}{100\Omega} = 3,25A$$

Bsp.: An welche Spannung muss dieser Widerstand angeschlossen werden?

geg.:  $R=8,2\Omega$   $I=410\mu A$ ges.:  $U$ 

$$\text{Lösung: } U = I \cdot R = 3,36V$$

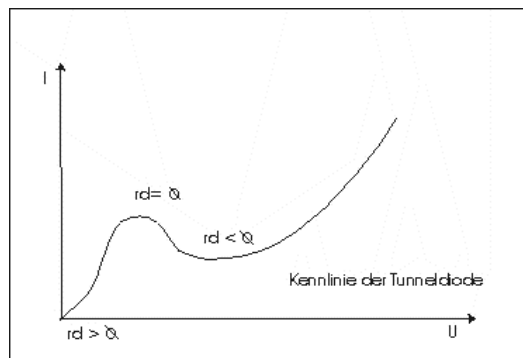
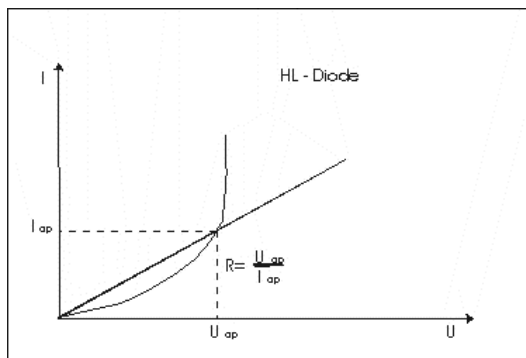
## Grafische Darstellung (I-U-Kennlinie[KL])



$$I = G \cdot U$$

$$G = \frac{1}{R}$$

$$I = f(U)$$



$$\gamma_d = \frac{dU}{dI} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

## 3.5 Elektrische Arbeit, Energie, Leistung

### 3.5.1 Elektrische Arbeit und Energie

$$W_{(elekt.)} = U \cdot Q$$

elektrischer Stromkreis:

$$W = U \cdot I \cdot t$$

$$Q = I \cdot t$$

$$[W] = V \cdot A \cdot s = W \cdot s = J$$

$$1kWh = 3,6 \cdot 10^6 Ws$$

Bsp.: geg.: Heizgerät U=220V

t=4h 20 min

I=8,2 A

ges.: Welche elektrische Arbeit wird verrichtet?

Lsg.:  $W = U \cdot I \cdot t$

$W = 7,81 kWh$

### 3.5.2 Elektrische Leistung

$$P_{(elekt.)} = \frac{W_{(elekt.)}}{t}$$

$$P = U * I$$

$$[P] = V * A = W$$

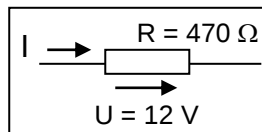
elektrischer Stromkreis:

$$P = \frac{U^2}{R} = I^2 * R$$

Bsp.: geg.:  $R = 470 \, \Omega$  ;  $U = 12 \, V$

ges.: Welche Leistung wird der Spannungsquelle entnommen?

Lsg.:

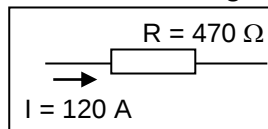


$$P = U^2/R = \underline{306 \, mW}$$

geg.:  $I = 120 \, A$  ;  $R = 2,3 \, \Omega$

ges.: Welche Leistung wird von der Schaltanlage aufgenommen?

Lsg.:



$$P = I^2 * R = \underline{33,12 \, kW}$$

### 3.5.3 Umwandlung elektrischer Energie

- elektrische Energie ist nur in Ausnahmefällen direkt nutzbar!
- sie hat jedoch den Vorteil, leicht transportierbar zu sein.
- sie lässt sich in andere Energieformen umwandeln; allerdings unter „Verlusten“ (Wärmeenergie)

Verlustleistung:

$$P_V = P_{zu} - P_{ab}$$

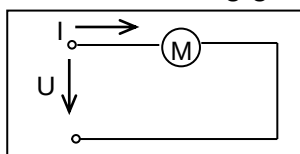
Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_{zu} - P_V}{P_{zu}}$$

Bsp.: geg.: Elektromotor  $\eta = 0,8$  (80%)  $U_M = 220 \, V$   $I_M = 1,8 \, A$

ges.: Welche Leistung gibt der Motor ab?  $P_{ab}$

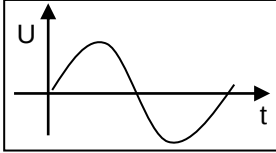
Lsg.:



$$P_{ab} = \eta * P_{zu} = \eta * U_M * I_M = \underline{316,8 \, W}$$

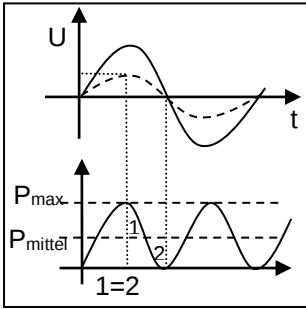
### 3.5.4 Effektivwerte von Spannung und Strom

bei Wechselstrom:



$$U = U_{eff} = \frac{U_s}{\sqrt{2}} = 0,707 * U_s$$

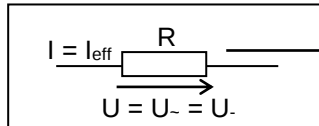
$$I = I_{eff} = \frac{I_s}{\sqrt{2}} = 0,707 * I_s$$



$$P = p_m = \frac{1}{2} * p_s$$

$$P = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} * U_s\right) * \left(\frac{1}{\sqrt{2}} * I_s\right) = \frac{1}{2} * U_s * I_s = \frac{1}{2} p_s$$

$$P = U_{eff} * I_{eff}$$



$$P = P_- = P_.$$

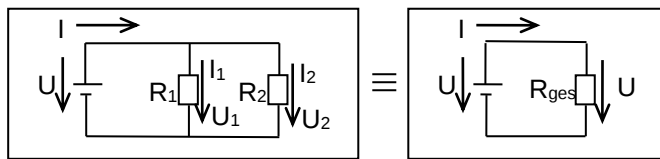
## 4 Der erweiterte Stromkreis

### 4.1 Allgemeines

- Zusammenschaltung von Widerständen (parallel, in Reihe, gemischt)
- KIRCHHOFFsche Sätze (Knotenpunktsatz / Stromteiler ; Maschensatz)
- Spannungsteiler – Regel

### 4.2 Parallelschaltung von Widerständen

#### 4.2.1 Parallelschaltung von 2 Widerständen



$$U = U_{R_1} = U_{R_2} \quad I_{R_1} = \frac{U_{R_1}}{R_1} \quad I_{R_2} = \frac{U_{R_2}}{R_2} \quad I = \frac{U}{R_{ges}}$$

$$I = I_{R_1} + I_{R_2}$$

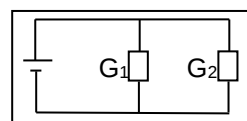
1. KIRCHHOFFsches Gesetz

Summe aller Ströme in einem Knoten gleich Null  $\Sigma I = 0$

$$I = I_{R_1} + I_{R_2} \quad \frac{U}{R_{ges}} = \frac{U_{R_1}}{R_1} + \frac{U_{R_2}}{R_2} \quad \frac{U}{R_{ges}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} \quad \frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

allgemein:

$$\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$



$$G = \frac{1}{R}$$

$$G_{ges} = G_1 + G_2$$

allgemein:  $G_{ges} = G_1 + G_2 + \dots + G_n$

Spezialfall für 2 Widerstände:

$$R_{ges} = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}$$

Spezialfall für „Parallelschaltung“ von gleichgroßen Widerständen:

(a) 2 Widerstände:

$$R_{ges} = \frac{R}{2}$$

(b) n Widerstände

$$R_{ges} = \frac{R}{n}$$

- Verlustleistungen bei parallel geschalteten Widerstände

$$P_{ges} = P_{R_1} + P_{R_2} \quad U * I = U * I_{R_1} + U * I_{R_2}$$

$$\frac{U^2}{R_{ges}} = \frac{U^2}{R_1} + \frac{U^2}{R_2} \quad I^2 * R_{ges} = I_{R_1}^2 * R_1 + I_{R_2}^2 * R_2$$

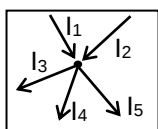
$$\sum P = const = P_{ges}$$

## 4.2.2 1. KIRCHHOFFsches Gesetz

„Knotenpunktssatz“

Parallelgeschaltete Widerstände führen zu Stromteilungen

$$\sum I = 0$$



$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 - I_5 = 0$$

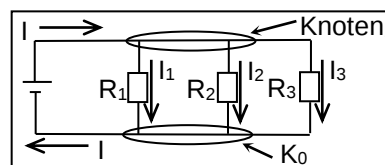
$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$$

zufließende Ströme

abfließende Ströme

$$k_1: +I_{ges} - I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$I_{ges} = I_1 + I_2 + I_3$$



$$k_0: -I_{ges} + I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

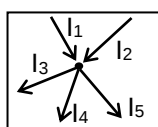
$$-I_{ges} = -I_1 - I_2 - I_3$$

$$I_{ges} = I_1 + I_2 + I_3$$

$$k_1 = k_0$$

~> Anzahl der unabhängigen Knoten = (K-1)

Bsp.: geg.:  $I_1 = 100 \text{ mA}$   $I_2 = 150 \text{ mA}$   $I_3 = 50 \text{ mA}$   $I_5 = 300 \text{ mA}$   $I_6 = 50 \text{ mA}$



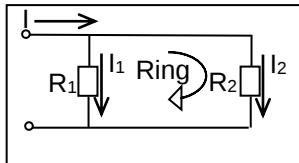
ges.:  $I_4$

Lsg.:  $\sum I = \text{leer}$

$$I_1 + I_2 - I_3 + I_4 - I_5 + I_6 = 0$$

$$I_4 = -I_1 - I_2 + I_3 + I_5 - I_6 = -50 \text{ mA}$$

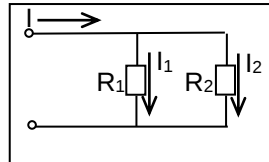
### Stromteiler – Regel



geg.:  $I_{\text{ges}}$  ;  $R_1$  ;  $R_2$

ges.:  $I_1$  (Teilstrom)

$$\text{Lsg.: } \frac{I_1}{I_{\text{ges}}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



geg.:  $I_1$  ;  $R_1$  ;  $R_2$

ges.:  $I_{\text{ges}}$

$$\text{Lsg.: } \frac{I_{\text{ges}}}{I_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Ein Teilstrom verhält sich zum Gesamtstrom wie der nicht von diesem Teilstrom durchflossene Widerstand zum Gesamtwiderstand im Ring!

Bsp.: geg.:  $R_1 = 820 \, \Omega$  ;  $R_2 = 560 \, \Omega$  ;  $U = 6,0 \text{ V}$

ges.:  $I_1$  über  $I_{\text{ges}}$  (Stromteiler)

Lsg.:  $I_{\text{ges}} = U/R_{\text{ges}}$

$$R_{\text{ges}} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 330 \, \Omega$$

$$I_{\text{ges}} = 18,02 \text{ mA}$$

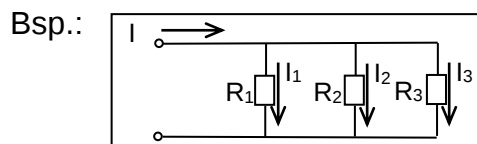
Stromteiler:

$$I_1 = R_2 / (R_1 + R_2) \cdot I_{\text{ges}}$$

$$I_1 = 7,3 \text{ mA}$$

Probe:

$$I_1 = U/R_1 = 6 \text{ V} / 820 \, \Omega = 7,32 \text{ mA}$$



$$I_1/I_{\text{ges}} = R_{2,3} / (R_1 + R_{2,3})$$

$$R_{2,3} = R_2 \parallel R_3$$

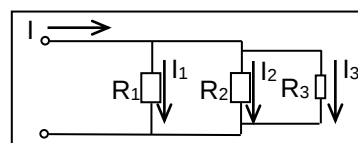
$$(R_{2,3} = R_2 \cdot R_3 / (R_2 + R_3))$$

$$\frac{I_1}{I_{\text{ges}}} = \frac{\frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}}{R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}}$$

geg.:  $I_{\text{ges}}$  ;  $R_1$  ;  $R_2$  ;  $R_3$

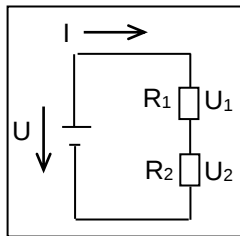
ges.:  $I_1$

Lsg.:



## 4.3 Reihenschaltung von Widerständen

### 4.3.1 Reihenschaltung von 2 Widerständen



$$I = I_1 = I_2 \Rightarrow I \cdot R_{ges} = I \cdot R_1 + I \cdot R_2$$

$$U = U_{1_1} + U_{2_2} \quad R_{ges} = R_1 + R_2$$

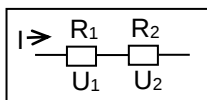
Leistung:  $U \cdot I = U_{1_1} \cdot I + U_{2_2} \cdot I$

$$P_{ges} = P_{R1_1} + P_{R2_2}$$

für 2 Widerstände gilt:

$$R_{ges} = R_1 + R_2$$

~> Spezialfall: 2 gleich große Widerstände ( $R_1 = R_2$ )



$$R_{ges} = 2R$$

$$U_R = \frac{U}{2}$$

Reihenschaltung von n Widerständen

$$R_{ges} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_{n_n}$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

Spezialfall: (alle  $R_n = R$ )

$$R_{ges} = n \cdot R$$

$$U = n \cdot I \cdot R$$

$$U_R = \frac{U}{n}$$

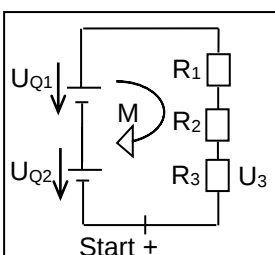
### 4.3.2 2. KIRCHHOFFSches Gesetz

„Maschensatz“

$$\sum U = 0 \quad \text{innerhalb eines Maschenumlaufs}$$

$$\sum U_q = \sum U_R$$

↑  
Quellenspannung    Verbrauchspannung



M:

$$-U_{Q1_2} - U_{Q2_1} + U_{R1_1} + U_{R2_2} + U_{R3_3} = 0$$

$$U_{Q1_2} + U_{Q2_1} = U_{R1_1} + U_{R2_2} + U_{R3_3} \quad \sum U_Q = \sum U_R$$

Bsp.: geg.:  $U_{Q1} = 10 \text{ V}$  ;  $U_{Q2} = 20 \text{ V}$  ;  $U_{R1} = 5 \text{ V}$  ;  $U_{R3} = 10 \text{ V}$

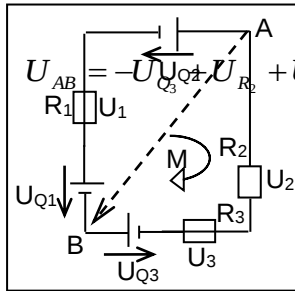
ges.:  $U_{R2}$

Lsg.: M:  $-U_{Q1_2} - U_{Q2_1} + U_{R1_1} + U_{R2_2} + U_{R3_3} = 0$

$$U_{R2_2} = (U_{Q1_2} + U_{Q2_1}) - (U_{R1_1} + U_{R3_3})$$

$$U_{R2} = 30 \text{ V} - 15 \text{ V} = 15 \text{ V}$$

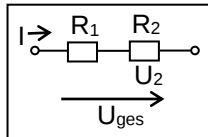
Bsp. :



M:  $-U_{AB} + U_2 + U_3 - U_{Q3} = 0$

$$U_{R3} = -U_{Q3} + I(R_2 + R_3)$$

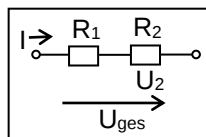
### Spannungsteiler – Regel (unbelasteter Spannungsteiler)



(a)

geg.:  $U_{ges}$  ;  $R_1$  ;  $R_2$

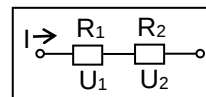
ges.:  $U_2$



(b)

$U_2, R_1, R_2$

$U_{ges}$



(c)

$U_2, R_1, R_2$

$U_1$

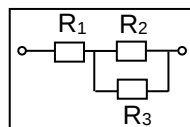
Alle Spannungen verhalten sich proportional zueinander wie die zugehörigen Widerstände.

(a)  $\frac{U_2}{U_{ges}} = \frac{R_2}{R_{ges}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$     (b)  $\frac{U_{ges}}{U_2} = \frac{R_{ges}}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$     (c)  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$

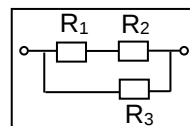
## 4.4 Gemischte Schaltungen

Kombination aus Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen

→ erweiterte Reihenschaltung



→ erweiterte Parallelschaltung



### 4.4.1 Unbelasteter Spannungsteiler

→ Anwendung der Spannungsteiler – Regel

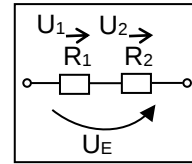
#### 4.4.1.1 mit Festwiderständen

Bsp.: geg.:  $U_E = 10 \text{ V}$ ,  $R_1 = 2,2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 8,2 \text{ k}\Omega$   
 ges.:  $U_{R1}$ ,  $U_{R2}$

Lsg.: 
$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_E$$

$$U_1 = 2,12 \text{ V}$$

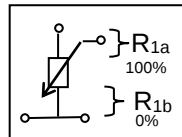
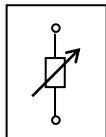
$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_E = U_E - U_1$$



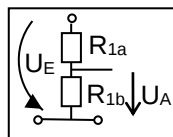
→ Vorsicht weil Teilergebnisse verwendet werden!

$$U_2 = 7,88 \text{ V}$$

#### 4.4.1.2 mit veränderlichen Widerständen



≡

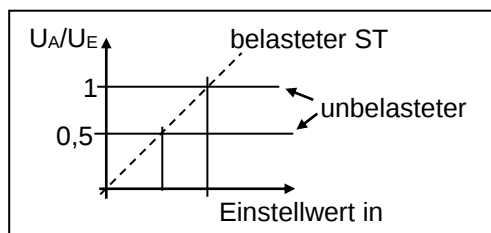


Einstellwiderstand „Potentiometer“

$U_E$  ... Eingangsspannung  
 (Gesamtspannung  $U_{ges}$ )  
 $U_A$  ... Ausgangsspannung  
 (Teilspannung  $U_{R1b}$ )

$$\phi V \leq U_A \leq U_E$$

→ bei gleichmäßiger Widerstandsänderung über dem Drehwinkel bedeutet das:



Bsp.: geg.: Poti  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $U_E = 20 \text{ V}$   
 ges.:  $U_A$  (0%, 10%, 50%, 100%)  
 Lsg.:

$$U_A = \frac{R_{1b}}{R_1(\text{Einstellwert})} \cdot U_E = E \cdot U_E$$

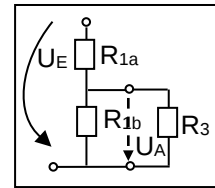
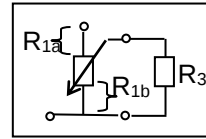
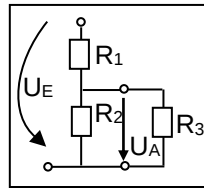
$$U_A(0\%) = 0\text{V}, U_A(10\%) = 2\text{V}, U_A(50\%) = 10\text{V}, U_A(100\%) = 20\text{V}$$

### 4.4.2 Belasteter Spannungsteiler

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R_{2,3}}{R_1 + R_{2,3}}$$

$$R_{2,3} = R_2 \parallel R_3$$

$$R_{2,3} = \frac{R_2 * R_3}{R_2 + R_3}$$



Bsp.: geg.: Poti  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$  (linear)  
 $U_E = 20 \text{ V}$   
 ges.:  $U_A$  bei (0%, 10%, 50%, 100%)  
 Lsg.: 
$$U_A = \frac{R_{1b} \parallel R_3}{R_{1a} + R_{1b} \parallel R_3} * U_E$$

für 0%:  $U_A = 0 \text{ V}$   
 $R_{\text{ges}} = 0 \Omega$   
 für 100%:  $U_A = U_E$   
 für 10%:  $R_{1a} = 9 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{1b} = 1 \text{ k}\Omega$   
 $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$

$$U_A = \frac{1 \text{ k}\Omega \parallel 10 \text{ k}\Omega}{9 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega \parallel 10 \text{ k}\Omega} = 20 \text{ V}$$

$$U_A = \frac{0,9 \text{ k}\Omega}{9,9 \text{ k}\Omega * 20 \text{ V}} = 1,8 \text{ V}$$

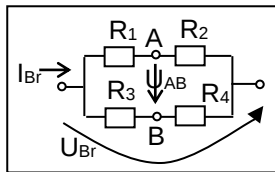
für 50 %:  $R_{1a} = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{1b} = 5 \text{ k}\Omega$   
 $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$

$$U_A = \frac{5 \text{ k}\Omega \parallel 10 \text{ k}\Omega}{5 \text{ k}\Omega + 5 \text{ k}\Omega \parallel 10 \text{ k}\Omega} = 20 \text{ V}$$

$$U_A = \frac{3,3 \text{ k}\Omega}{8,5 \text{ k}\Omega * 20 \text{ V}} = 8,0 \text{ V}$$

## 4.5 Widerstandsnetzwerke

### 4.5.1 Widerstandsbrücke oder Brückenschaltung



(a) → 2 unbelastete Spannungsteiler

$$U_{AB} = 0, \text{ wenn } U_{R1} = U_{R3} \text{ und } U_{R2} = U_{R4}$$

$$, \text{ wenn } \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \text{ Abgleichbedingung}$$

$$I_{Br} = \frac{U_{Br}}{R_{ges}}$$

$$R_{ges} = (R_1 + R_2) \parallel (R_3 + R_4)$$

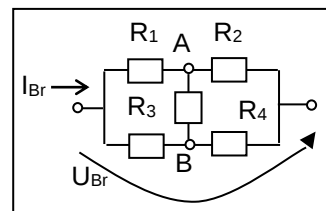
(b)

Fall A: Abgleichbedingung erfüllt ( $\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$ )

$$\leadsto I_{AB} = 0$$

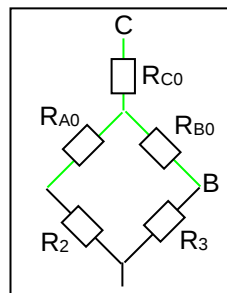
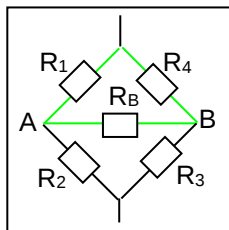
→ Ersatzschaltung (siehe a)

$$R_{ges} = (R_1 + R_2) \parallel (R_3 + R_4)$$



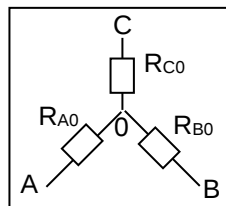
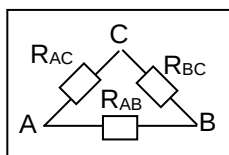
Fall B: Brücke nicht im Gleichgewicht, d.h.  $R_B$  wird von Strom  $I_{AB}$  durchflossen und lässt sich (folglich) nicht „herauslösen“

→  $R_{ges}$ ?



$$R_{ges} = R_{C0} + [(R_{A0} + R_2) \parallel (R_{B0} + R_4)]$$

- Methode der Umwandlung von  $\Delta$  - in  $\lambda$  - Schaltung

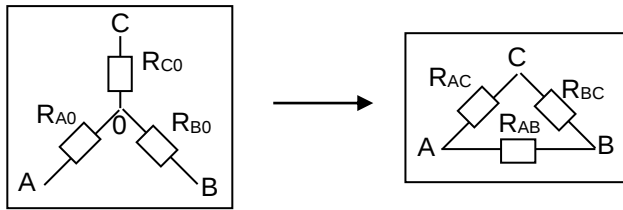


$$R_{A0} = \frac{R_{AC} \cdot R_{AB}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}$$

$$R_{B0} = \frac{R_{AB} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}$$

$$R_{C0} = \frac{R_{AC} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}$$

- Methode der Umwandlung von  $\lambda$  – in  $\Delta$  - Schaltung

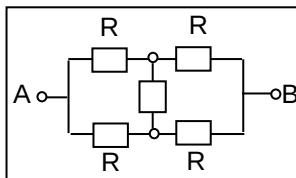


$$R_{AB} = R_{B0} + R_{A0} + \frac{R_{B0} \cdot R_{A0}}{R_{C0}}$$

$$R_{AC} = R_{A0} + R_{C0} + \frac{R_{A0} \cdot R_{C0}}{R_{B0}}$$

$$R_{BC} = R_{B0} + R_{C0} + \frac{R_{B0} \cdot R_{C0}}{R_{A0}}$$

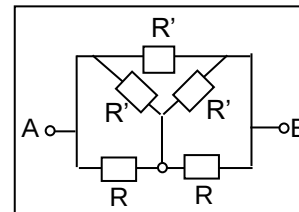
Bsp.:  $R = 100 \, \Omega$



ges.:  $R_{AB}$

Lsg.:  $R' = R + R + \frac{R \cdot R}{R}$

$R' = 3 R = 300 \, \Omega$



Bsp.:

$$R_{AB} = 300 \, \Omega \parallel [(100 \, \Omega \parallel 300 \, \Omega) + (100 \, \Omega \parallel 300 \, \Omega)]$$

$$R_{AB} = 300 \, \Omega \parallel (75 \, \Omega + 75 \, \Omega)$$

$$R_{AB} = 300 \, \Omega \parallel 150 \, \Omega$$

$$\underline{R_{AB} = 100 \, \Omega}$$

