



# **Elektronik**

## **Vorlesungsskript**

Mitschrift von Falk-Jonatan Strube

Vorlesung von Prof. Dr.-Ing. Flach

15. Januar 2016

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Anliegen der Lehrveranstaltung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Elektrotechnik</b>	<b>1</b>
2.1	Grundgrößen und Grundbeziehungen . . . . .	1
2.2	Potential und Spannung . . . . .	2
2.3	Stromfluss, Ladungsausgleich . . . . .	3
2.4	Widerstand . . . . .	3
2.5	Zusammenschaltung von Widerständen . . . . .	4
2.6	Leistung und Energie . . . . .	6
2.7	Stromkreise und Schaltbilder . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Berechnung von Stromkreisen</b>	<b>7</b>
3.1	Spannungsteiler . . . . .	7
3.2	Stromteiler . . . . .	8
3.3	Strom-Spannungskennlinie . . . . .	9
3.4	Spannungsquelle . . . . .	10
3.5	Grundstromkreis . . . . .	10
3.5.1	Betrachtung der Leistung im Grundstromkreis . . . . .	11
3.6	Spannungszeitfunktion . . . . .	12
3.7	Kondensator, Kapazität . . . . .	13
3.7.1	Strom-Spannungs-Beziehung am Kondensator . . . . .	13

## Einführung

Passwort Materialien: lvf\_ws2015

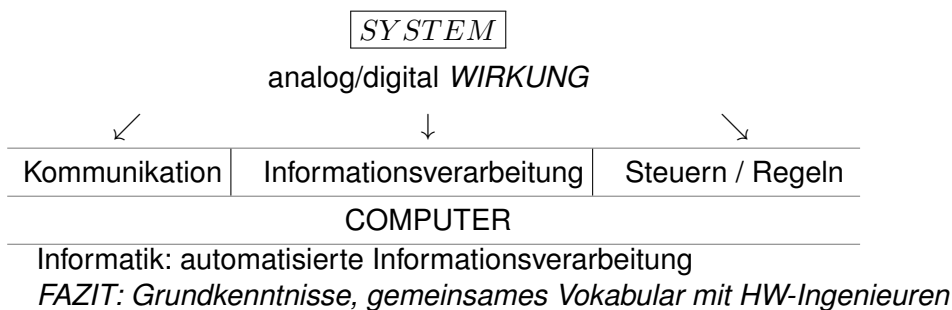
Prüfung: 1 Blatt A4 hanbeschrieben, doppelseitig beschrieben

## 1 Anliegen der Lehrveranstaltung

Analyse/Synthese

- Modellbildung
- unterschiedliche Anregungen

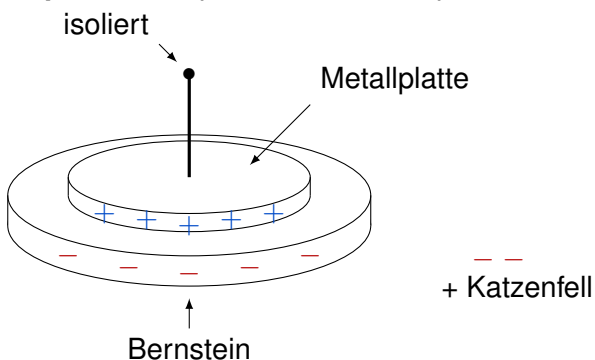
- Bauelemente  
aktiv, passiv, Halbleiter
- Netzwerke (linear, nichtlinear)
- Schaltungen (analog, digital)



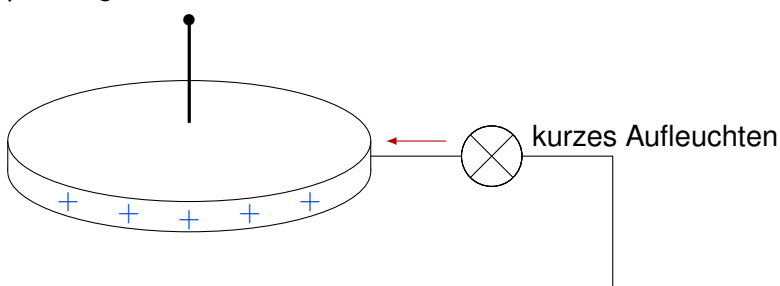
## 2 Grundlagen der Elektrotechnik

### 2.1 Grundgrößen und Grundbeziehungen

**Bsp.:** Elektrophor mit Bernsteinplatte und Katzenfell



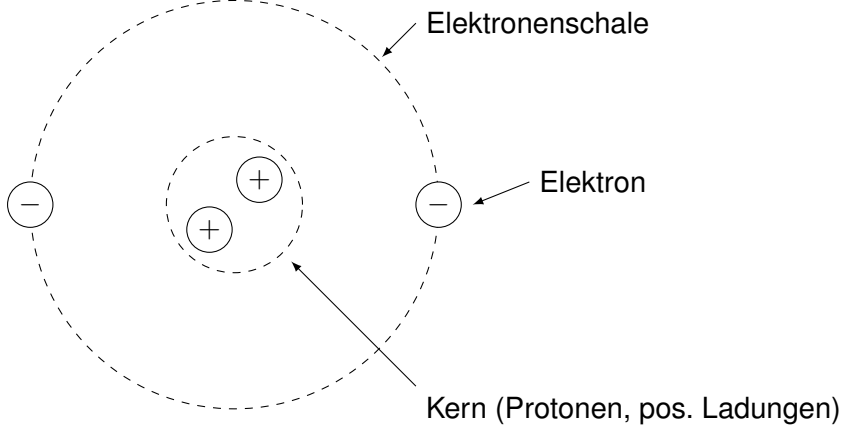
Bernstein mit Katzenfell einreiben, dann Metallplatte anfassen: Elektronen fließen ab, Bernstein ist positiv geladen.



**Modellbildung:** Erklärung für beobachteten Sachverhalt

- möglichst einfaches Modell
- vollständige widerspruchsfreie Definition
- Beschreibung über mathematische Gleichung

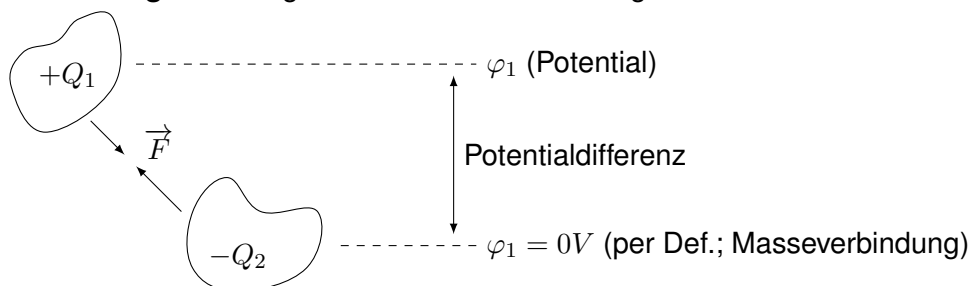
**Bohr-Sommerfeldsches Atommodell:**



Atommodell ist elektrisch neutral. Aber:

- unter bestimmten Bedingungen entstehen positive und negative Ladungen (Energiezufuhr)
- Elementarladung  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$

**Beobachtung:** Ladungen ziehen sich an / Ladung stoßen sich ab.



Kraftwirkung

$$F \sim Q_1 \cdot Q_2$$

$$F \sim \frac{1}{r^2}$$

$$F = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

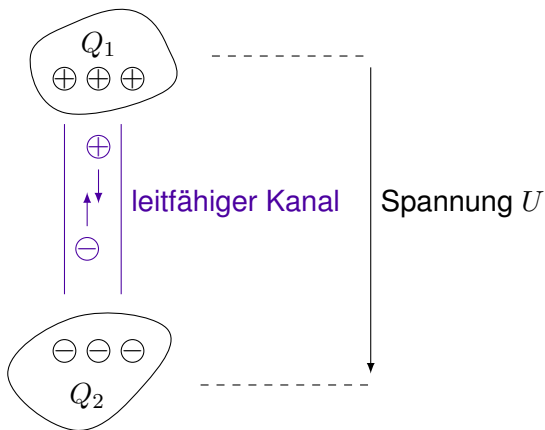
## 2.2 Potential und Spannung

- Ladungen im elektrischen Feld haben unterschiedliche Potenziale.
- Einheit des Potenzial: Volt [V]
- Spannung ist Potentialdifferenz
- Einführen eines Bezugspotentials  $\varphi = 0V$

### Beispiele für Spannungen:

- Antennen ...  $\mu V$
- Microfon ...  $mV$
- Batterie (AA) ...  $1,2V$
- Netzteile ...  $\pm 5V, \pm 12V$
- Haushalt ...  $230V$
- Freileitungen ...  $380kV$

## 2.3 Stromfluss, Ladungsausgleich



- Strom  $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ ,  $i(t) = \frac{dQ}{dt}$
- Ursache: Potentialdifferenz
- Voraussetzung: leitfähiger Kanal, bewegliche Ladungen
- „Fließgeschwindigkeit“ bestimmt Größe des Stroms

Analogie: Fluß

Höhenunterschied - Potential

Flussbett - Leitung

Wasser - Leiter

## 2.4 Widerstand

**Beobachtung:**  $I \sim U$ ,  $I = G \cdot U$  mit  $G \dots$  Leitwert

je größer der Leitwert, desto kleiner der Widerstand  $\Rightarrow G = \frac{1}{R}$  mit  $R \dots$  ohmscher Widerstand

**Ohmsches Gesetz:**  $R \left( = \frac{U}{I} \right) = \text{const.}$   $U = R \cdot I$   $I = \frac{U}{R}$

mit  $[I] = A$  (Ampere)  $[U] = V$  (Volt)  $[R] = \frac{V}{A} = \Omega$  (Ohm)  $[G] = \frac{A}{V} = S$  (Siemens)

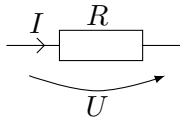
Widerstand ist eine Materialeigenschaft.

$R \sim l$   $R \sim \frac{1}{A}$   $R = k \cdot \frac{l}{A}$  mit  $k = \varrho \dots$  spezifischer Widerstand  $[\varrho] = \Omega \cdot m = \Omega \frac{mm^2}{m}$

$$G = \frac{1}{R} = \frac{A}{\varrho \cdot l} = \frac{\kappa A}{l} \text{ mit } \kappa = \frac{1}{\varrho}$$

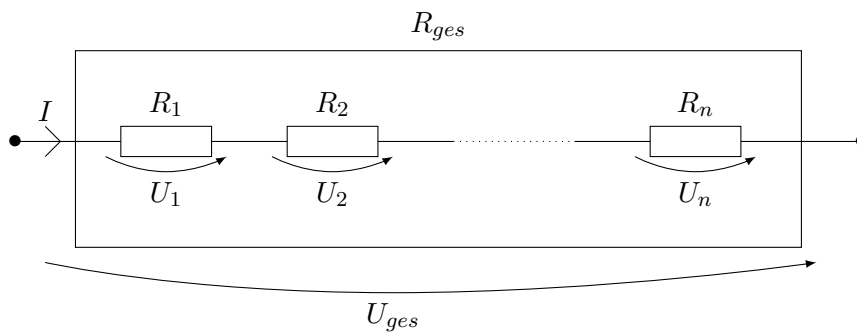
Widerstand ist ...

- Materialeigenschaft
- Bauelement



## 2.5 Zusammenschaltung von Widerständen

### a) Reihenschaltung



$$\text{Maschensatz: } \sum_{\bigcirc} U = 0$$

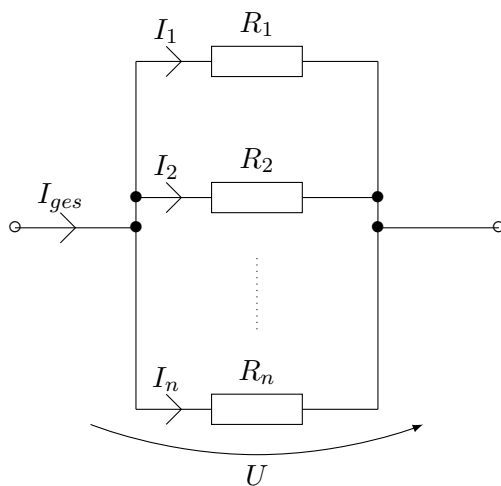
$$U_{ges} = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

$$U_{ges} = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n$$

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

$$R_{ges} = \sum_{i=1}^n R_i$$

### b) Parallelschaltung



Knotensatz:  $\sum I = 0$

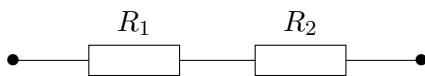
$$I_{ges} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

$$I_{ges} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n}$$

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

$$\frac{1}{R_{ges}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

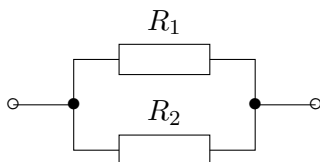
Beispiele:



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

$$R_1 = R_2 = R \Rightarrow R_{ges} = 2R$$

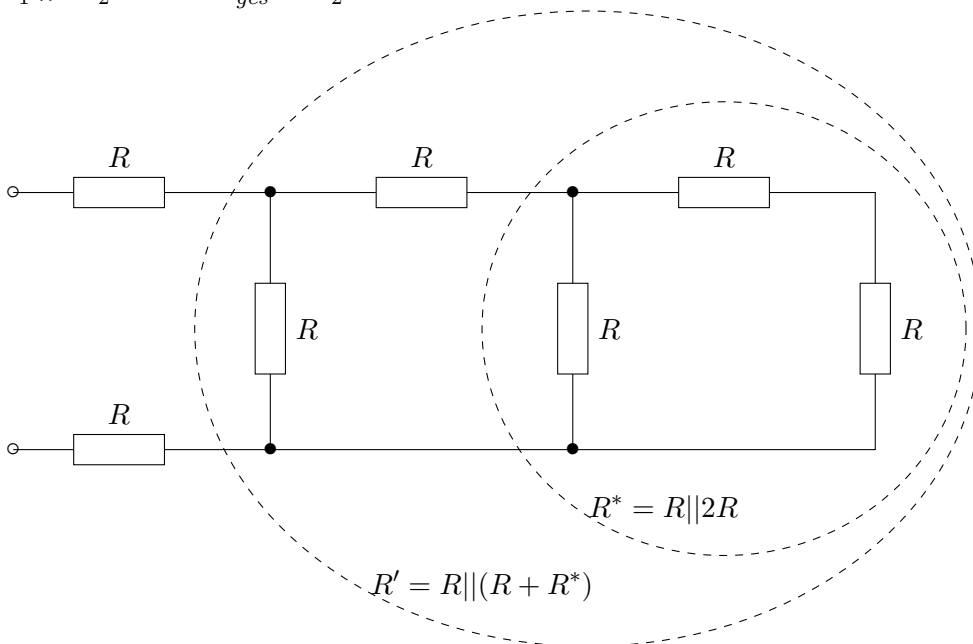
$$R_1 \gg R_2 \Rightarrow R_{ges} \approx R_1$$



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

$$R_1 = R_2 = R \Rightarrow R_{ges} = \frac{R}{2}$$

$$R_1 \gg R_2 \Rightarrow R_{ges} \approx R_2$$

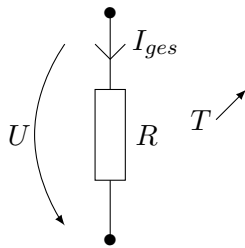


$$R^* = R \parallel 2R = \frac{2R \cdot R}{3R} = \frac{2}{3}R$$

$$R' = R \parallel (R + R^*) = \frac{R \cdot \frac{5}{3}R}{\frac{8}{3}R} = \frac{5}{8}R$$

$$R_{ges} = R + R' + R = 2R + \frac{5}{8}R = \frac{21}{8}R$$

## 2.6 Leistung und Energie



$$P = U \cdot I \stackrel{U=RI}{=} I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$$

$$W = P \cdot t = U \cdot I \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t$$

## 2.7 Stromkreise und Schaltbilder

- Modellierung elektronischer Erscheinungen
- Berechnung von Stromkreisen

ohmscher Widerstand

ideales Leiter

Kreuzung zweier Leiter (keine Verbindung)

Knoten / Verbindung von Leitern

offener Schalter ( $R=\infty$ )

geschlossener Schalter ( $R=0$ )

Masse (0-Potential)

ideale Spannungsquelle

ideale Stromquelle

Kondensator

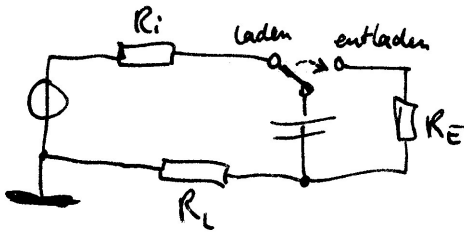
Spule

Klemme

**Bsp.:** Ein Kondensator wird zum Aufladen an eine Spannungsquelle mit dem Innenwiderstand  $R_i$  angeschlossen und zum Entladen an einen Widerstand  $R_E$ . Das Laden erfolgt über den Strombegrenzungswiderstand  $R_L$ .

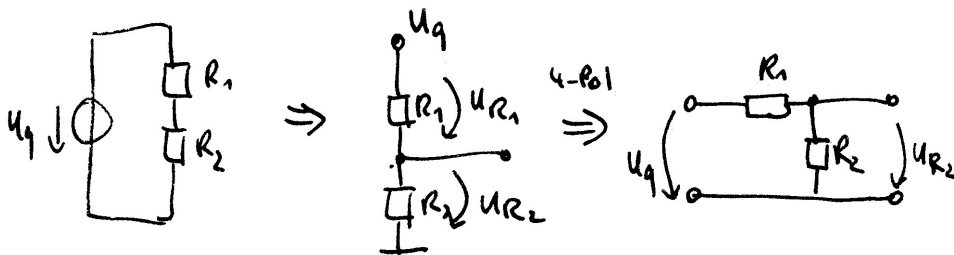
- Umschalter
- Kondensator  $C$ , Widerstand  $R_i$ ,  $R_E$ ,  $R_L$
- Spannungsquelle





### 3 Berechnung von Stromkreisen

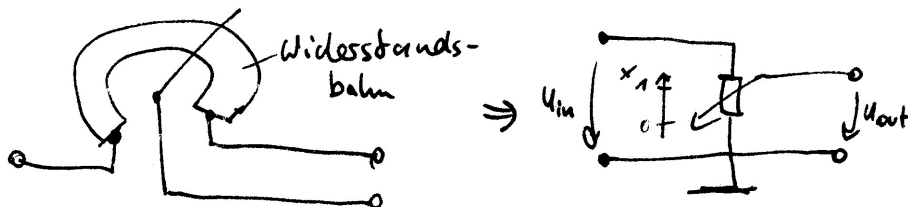
#### 3.1 Spannungsteiler



unbelasteter Spannungsteiler  
Voraussetzung: gleicher Strom durch betrachtete Widerstände

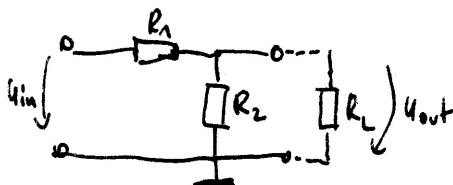
$$\begin{aligned} U_{R1} &= IR_1 & U_{R2} &= IR_2 & U_q &= I(R_1 + R_2) \\ \frac{U_{R2}}{U_q} &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} & \frac{U_{R1}}{U_{R2}} &= \frac{R_1}{R_2} \end{aligned}$$

Anwendungsbeispiel: Potenziometer



$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{x \cdot R_{Pot}}{R_{Pot}} \Rightarrow U_{out} = x \cdot U_{in}$$

belasteter Spannungsteiler:



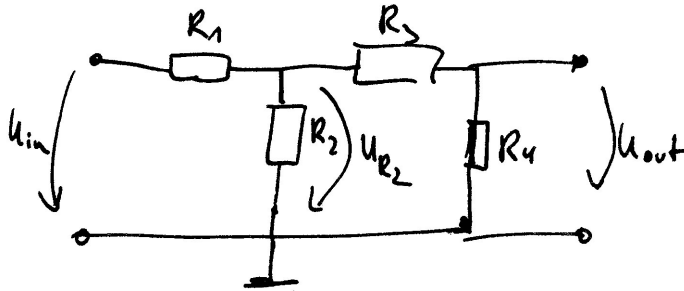
$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{R_2 || R_L}{R_1 + R_2 || R_L}$$

Bspw.:  $R_1 = 5\Omega$ ,  $R_2 = R_L = 5\Omega$

$$\text{unbelasteter Fall: } \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{5\Omega}{10\Omega} \Rightarrow U_{out} = 5V$$

$$\text{belasteter Fall: } \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{2,5\Omega}{7,5\Omega} \Rightarrow U_{out} = 3,33V$$

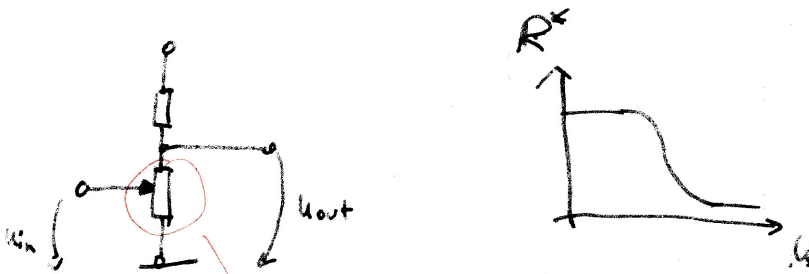
### doppelter Spannungsteiler



$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{R_2 \parallel (R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 \parallel (R_3 + R_4)} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

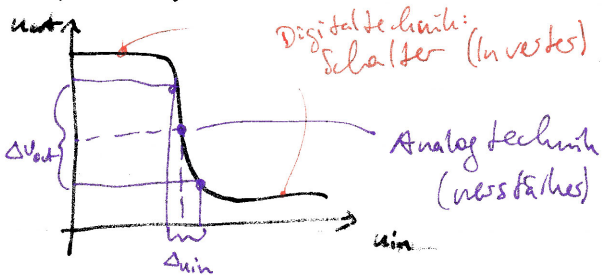
$\underbrace{\frac{R_2 \parallel (R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 \parallel (R_3 + R_4)}}_{\frac{U_{R2}}{U_{in}}} \cdot \underbrace{\frac{R_4}{R_3 + R_4}}_{=\frac{U_{out}}{U_{R2}}}$

### gesteuerter Spannungsteiler

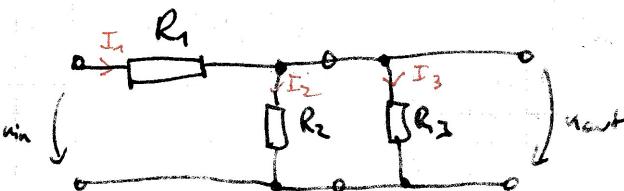


Spannungsgesteuerter  
Widerstand  $R^*$

Spannungsübertragungskennlinie



### 3.2 Stromteiler

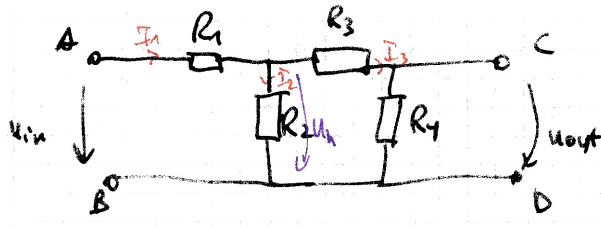


$$U_{out} = I_3 \cdot R_3 = I_2 \cdot R_2 = I_1 \cdot (R_2 \parallel R_3)$$

$$\frac{I_3}{I_1} = \frac{R_2}{R_3}$$

$$\frac{I_2}{I_3} = \frac{R_3}{R_2 \parallel R_3} = \frac{R_2 \cdot R_3}{(R_2 + R_3) \cdot R_3} = \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_2 || R_3}{R_2} = \frac{R_3}{R_2 + R_3}$$



**Beispiel:** geg.:

ges.:  $R_{AB}$ ,  $R_{CD}$ ,  $u_{out}$ , alle Ströme

$$R_{AB} = R_1 + R_2 || (R_3 + R_4)$$

$$R_{CD} = R_4 || (R_3 + R_2)$$

$$\frac{U_{out}}{U_h} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \frac{U_{in}}{U_h} = \frac{R_2 || (R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 || (R_3 + R_4)}$$

$$U_{out} = U_{in} \frac{R_2 || (R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 || (R_3 + R_4)} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

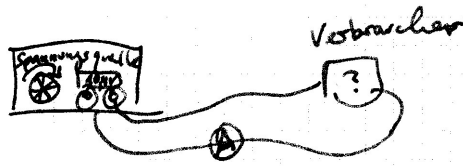
$$I_1 = \frac{U_{in}}{R_{AB}}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_3 + R_4}{R_2 + R_3 + R_4} \Rightarrow I_2 = \frac{U_{in}}{R_{AB}} \cdot \frac{R_3 + R_4}{R_2 + R_3 + R_4}$$

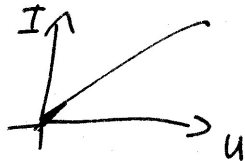
$$\frac{I_3}{I_1} = \frac{R_2}{R_2 + R_3 + R_4} \Rightarrow I_3 = \frac{U_{in}}{R_{AB}} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3 + R_4}$$

### 3.3 Strom-Spannungskennlinie

Ziel: anschauliche Beschreibung des Klemmverhaltens von Bauelementen

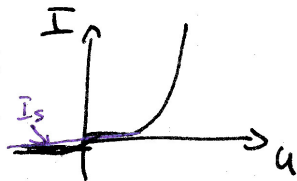


- Verbraucher: ohmscher Widerstand



$$R = \frac{U}{I} \quad I = f(U) = \frac{1}{R} \cdot U = G \cdot U$$

- Verbraucher: Diode



?  $\Rightarrow$  nichtlinear

$$I = f(U) = I_s \left( e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$$

$I_s$  ... Sperrstrom

$U_T$  ... Temperaturspannung

### 3.4 Spannungsquelle

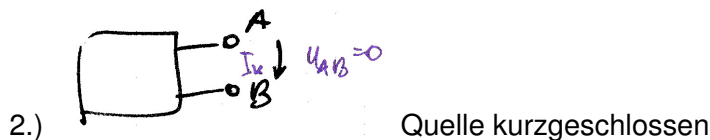
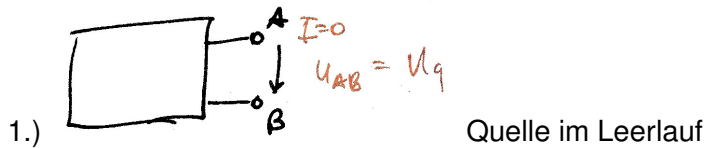
Was ist eine Spannungsquelle?

Batterie, Netzteil, Antenne, Mikrofon, Steckdose, ...

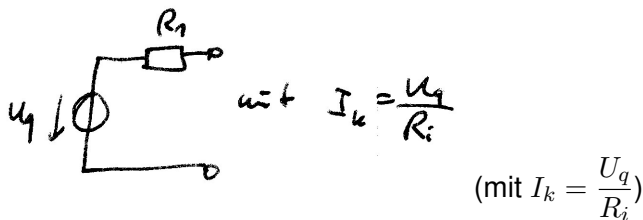
Unterteilung in:

- Signalquellen (irgendein  $u(t)$ , wenig Energie)
- Spannungsquellen (Gleichspannung/Wechselspannung)

Modell:



Ersatzschaltbild einer realen Quelle:



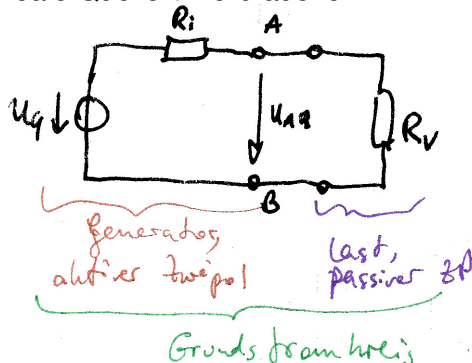
$U_q$  ... Leerlaufspannung

$R_i$  ... Innenwiderstand

$I_k$  ... Kurzschlussstrom

### 3.5 Grundstromkreis

reale Quelle + Verbraucher

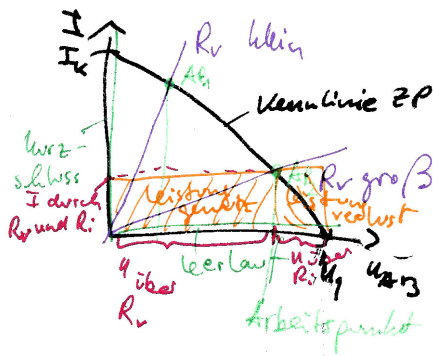


Strom-Spannungs-Kennlinienfeld des Grundstromkreises

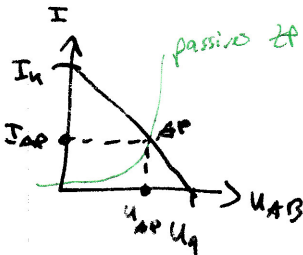
Last:  $I = f(U) = \frac{U_{AB}}{R_V}$

Quelle:  $I = f(U)$

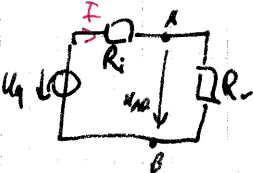
(mit Maschensatz:  $I \cdot R_i + U_{AB} - U_q = 0$ )  $I = \frac{1}{R_i}(U_q - U_{AB}) = -\frac{1}{R_i}U_{AB} + I_k$



Grundstromkreis mit nichtlinearem Verbraucher



Leistung am Lastwiderstand



$$\rightarrow P_V = I \cdot U_{AB} \quad \text{mit } U_{AB} = U_q - I \cdot R_i \quad I \cdot R_i + U_{AB} - U_q = 0$$

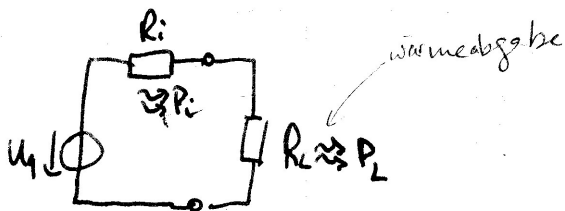
$$P_V = U_q \cdot I + I^2 \cdot R_i \quad I = \frac{U_{AB}}{R_V}$$

$$P_V = f(R_V)$$

$$\text{maximale Leistung am Verbraucher: } \frac{dP_V}{dR_V} = 0 \Rightarrow P_{V,max} \text{ f\"ur } R_V = R_i \text{ (dann } P_{V,max} = \frac{I_k \cdot U_q}{4} \text{)}$$

### 3.5.1 Betrachtung der Leistung im Grundstromkreis

ABB 41:



Generator

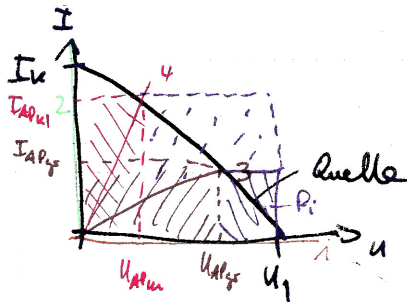
Verbraucher

- soll sich nicht erwärmen
- $P_L$  möglichst groß
- $P_i$  möglichst klein
- Wirkungsgrad groß

Leistung am Lastwiderstand:

$$P_L = U_{AB} \cdot I = \frac{U_{AB}^2}{R_L} = I^2 \cdot R_L$$

mögliche Lastfälle:



Flächeninhalt  $\hat{=}$  Leistung

• Leistung Innenwiderstand  
 $\Rightarrow$  Verlustleistung

$\hookrightarrow$  Fall 3: Wirkungsgrad gut

Fall 4: Wirkungsgrad schlecht

1.) Leerlauf:  $R_L \rightarrow \infty$

$$AP_{\text{Leerlauf}}: U_{AP} = U_q, I_{AP} = 0, P_{AP} = 0$$

2.) Kurzschluss:  $R_L = 0$

$$AP_{\text{Kurzschluss}}: U_{AP} = 0, I_{AP} = I_K, P_{AP} = 0$$

3.) großer Lastwiderstand:

$$AP_{gr}: U_{AP} = U_{AP,gr}, I_{AP} = I_{AP,gr}, P_{AP,gr} > 0$$

4.) kleiner Lastwiderstand:

$$AP_{kl}: U_{AP} = U_{AP,kl}, I_{AP} = I_{AP,kl}, P_{AP,gr} > 0$$

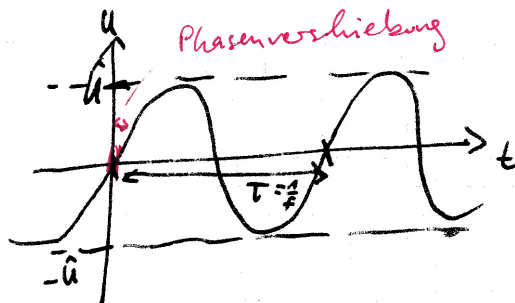
Zwei realistische Betriebsfälle:

- Wirkungsgrad groß, dafür nicht maximale Leistung
- Wirkungsgrad bei 50% und maximale Leistung

### 3.6 Spannungszeitfunktion

Verlauf einer Spannung über der Zeit.

- Gleichspannung  $U = \text{const} \neq f(t)$  (Batterien, Stromversorgung für elektrische Geräte)
- Wechselspannung (Steckdose)



Kenngrößen:  $\hat{U} = 325V$  (Spitzenwert),  $U = 230V$  (Effektivwert),  $f = 50Hz$  ( $T = \frac{1}{f} = 20ms$ ),

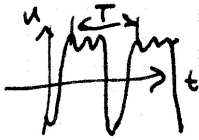
$\omega = 2\pi f$  [Kreisfrequenz],  $\varphi_0$  Phasenverschiebung/Nullphasenwinkel

$$u(t) = \hat{U} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$$

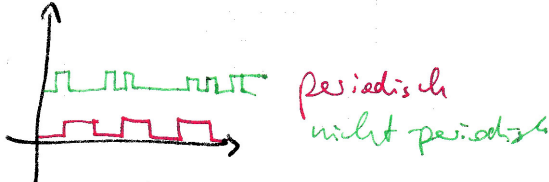
- zur Informationsübertragung können  $\hat{U}$ ,  $\omega$  und  $\varphi_0$  variiert werden.
- unterschiedliche Wechselspannungen können gemischt werden.
- harmonische Spannungen (bestehen aus Sinussschwingungen).

## Grundtypen von Spannungszeitfunktionen

- periodische Spannungen



- impulsförmige Spannungen



## 3.7 Kondensator, Kapazität

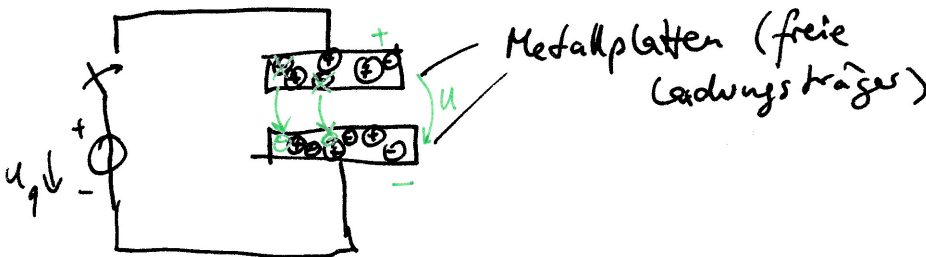
Kapazität

→ Fähigkeit, Ladungen zu speichern

→ konkretes elektrisches Bauelement (kann Ladungen speichern) ⇒ Kondensator

Einsatz: Energiespeicherung, Ausnutzung des frequenzabhängigen Verhaltens

Wirkungsweise:



Beobachtung:  $Q \sim U \Rightarrow Q = C \cdot U$

mit  $C$  = Proportionalitätsfaktor ⇒ Kapazität  $C$  mit  $[C] = \frac{[Q]}{[U]} = \frac{As}{V} = F$  (Farrad)

relevante Werte: zwischen  $10^{-6} \dots 10^{-9} \dots 10^{-6} F$   
 $\mu \quad n \quad p$

**Bemessungsgleichung** (für  $C$ )

$$C \sim A, C \sim \frac{1}{d}, C \sim \frac{A}{d} \Rightarrow C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d}$$

( $\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \dots \varepsilon_0$ : Dielektrizitätskonstante des Vakuums =  $8,856 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$ )



Symbol:

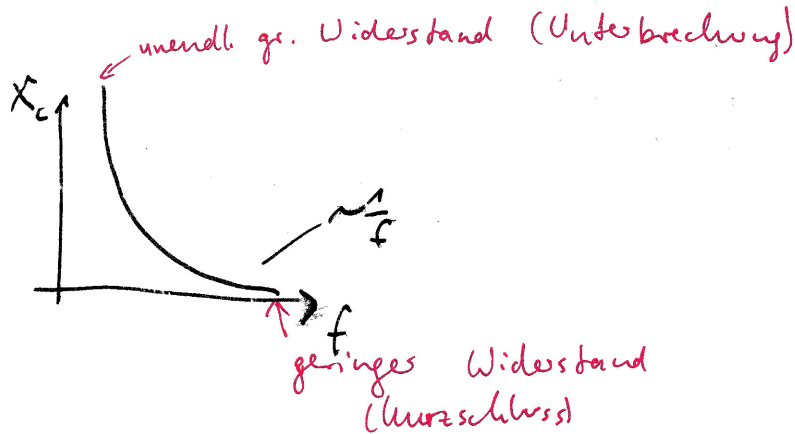
### 3.7.1 Strom-Spannungs-Beziehung am Kondensator

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt$$

$$i_C(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt}$$

Konsequenzen:  $u(t) = \hat{U} \cdot \sin(\omega t) \Rightarrow i_C(t) = \underbrace{\hat{U} \cdot \omega C}_{=\hat{I}} (\sin(\omega t) + 90^\circ)$

Scheinwiderstand des Kondensators:  $X_C = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} = \frac{\hat{U}}{\hat{U} \omega C} = \frac{1}{\omega C}$



Anwendung des frequenzabhängigen Verhaltens:

