

Physikalisches Experimentieren 1 (PE-1)

Elektronikpraktikum

Dozent: Dr. Michael Krieger
Lehrstuhl für Angewandte Physik
Universität Erlangen-Nürnberg

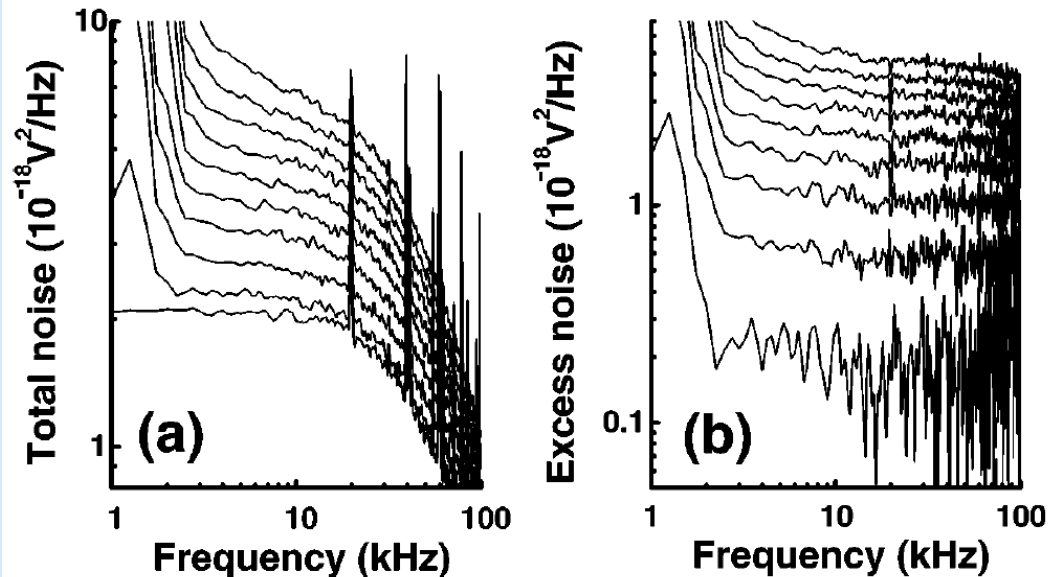
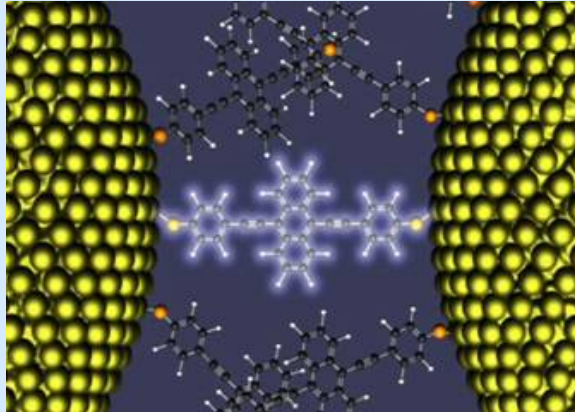
Elektronik für Physiker?

Beispiele:



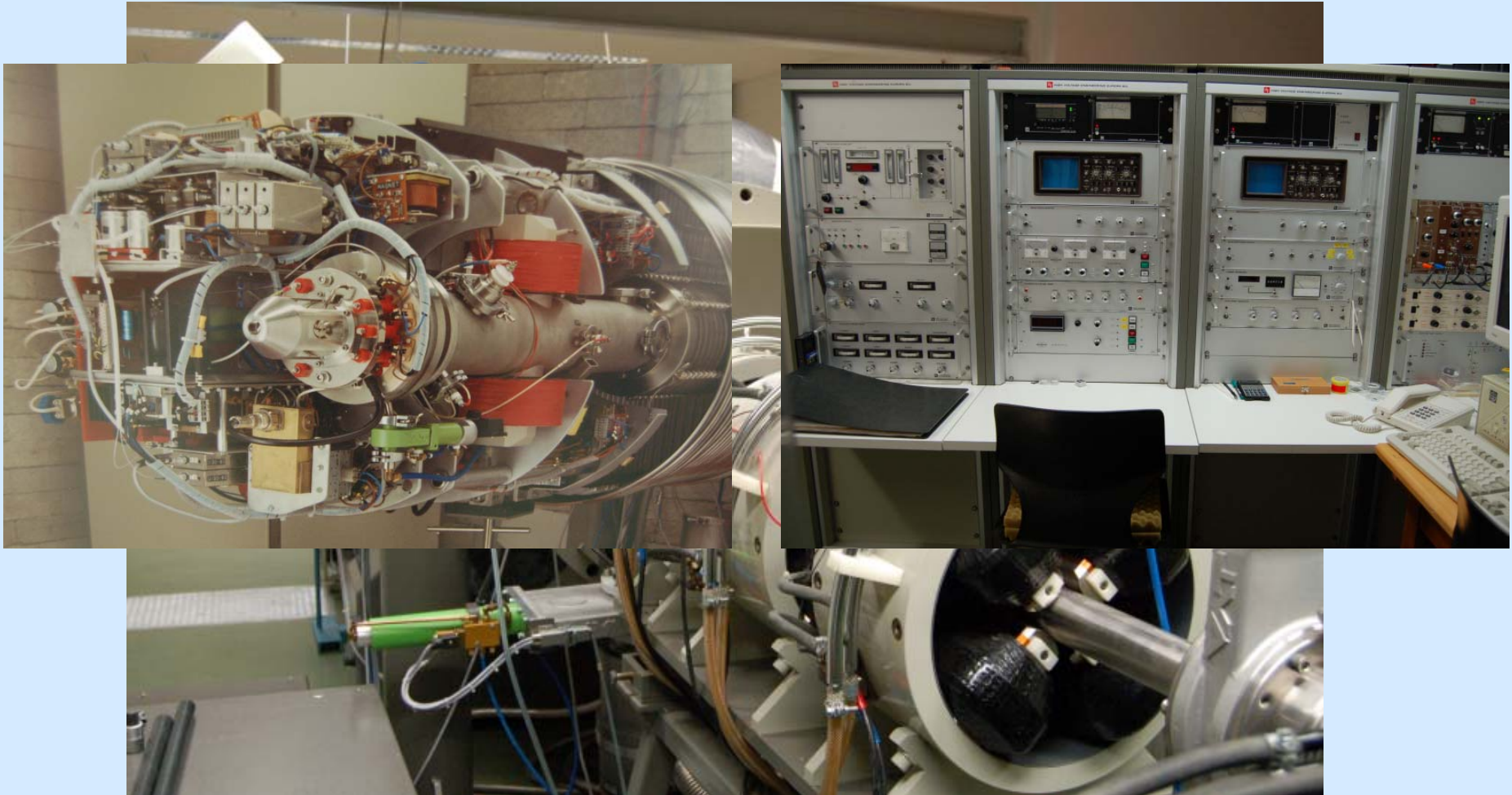
Elektronik für Physiker?

Beispiele:



Elektronik für Physiker?

Beispiele:



Elektronik für Physiker?

Elektronik steckt in jedem Physiklabor

Verständnis der Messelektronik wichtig bei

- Planung
- Durchführung
- Verständnis

empfindlicher (elektrischer) Messungen

häufig "Selbstbauapparaturen"



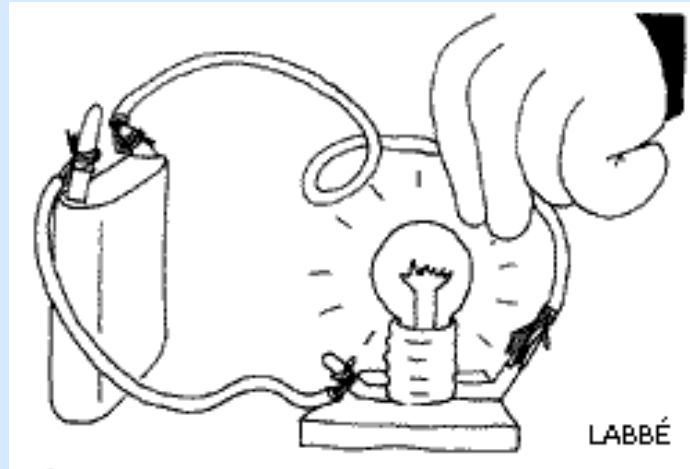
Überblick

- Grundlagen: Spannung, Strom, Widerstand, IV-Kennlinien
- Elektronische Messgeräte im Elektronikpraktikum
- Passive Filter
- Signaltransport im Kabel
- Transistor
- Operationsverstärker
- Sensorik
- PID-Regler
- Lock-In-Verstärker
- Digitalelektronik
- Digital-Analog- / Analog-Digital-Wandlung
- Mikrocontroller
- Labview und Virtual Instruments

Überblick

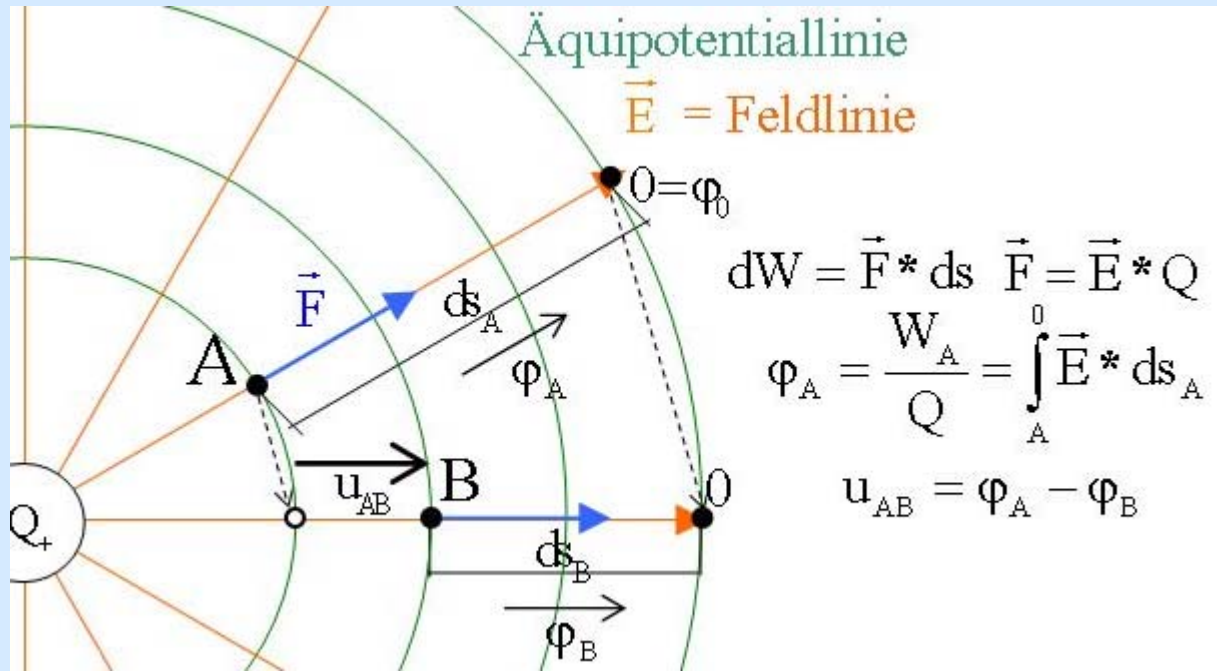
- Grundlagen: Spannung, Strom, Widerstand, IV-Kennlinien
- Elektronische Messgeräte im Elektronikpraktikum
- Passive Filter
- Signaltransport im Kabel
- Transistor
- Operationsverstärker
- Sensorik
- PID-Regler
- Lock-In-Verstärker
- Digitalelektronik
- Digital-Analog- / Analog-Digital-Wandlung
- Mikrocontroller
- Labview und Virtual Instruments

Spannung, Strom und Widerstand



Stromkreis: Zusammenschaltung von Strom- und Spannungsquellen sowie von elektrischen Bauelementen

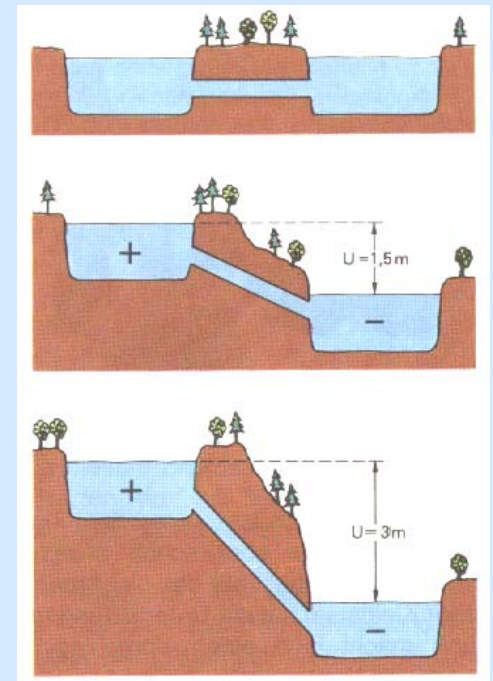
Spannung und Potential



$$U_{AB} = \Phi_A - \Phi_B = \frac{W_{AB}}{Q} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}_{AB}$$

Spannung = Potentialdifferenz

Wassersmodell
 (nur für Ihre Intuition)

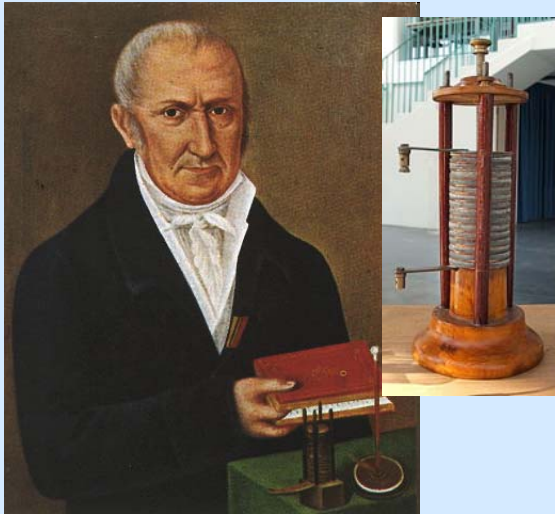


Spannung und Potential

Spannung:

Symbol: U oder V (international)

Einheit: Volt (abgekürzt V)



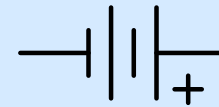
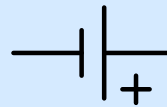
Alessandro Volta
(1745 – 1827)

Potential:

Symbol: Φ

Einheit: Volt (abgekürzt V)

Schaltzeichen einer Spannungsquelle:



DIN EN 60617-2



15 V=

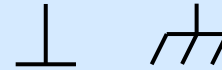


Elektrische Spannung wird immer zwischen
2 Punkten gemessen (Potentialdifferenz)!

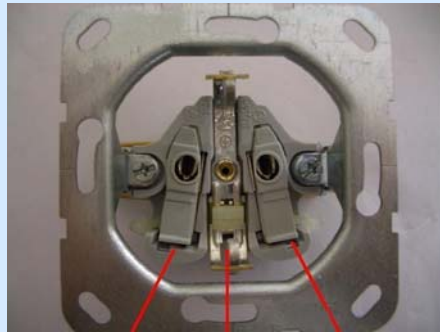
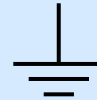
Spannung und Potential

Besondere Potentiale:

Masse oder Bezugspotential (0 V)



Erde oder Erdpotential



Spannung und Potential

Kleine Farbenlehre:

schwarz:

rot:

blau:

Masse oder Bezugspotential

positives Potential

negatives Potential



Farben in der Hausinstallation:

braun oder schwarz:

blau:

gelb/grün:

Phase, Lichtleiter, live wire, 230V~

Neutralleiter, „Nullleiter“ (i.d.R. Erdpotential)

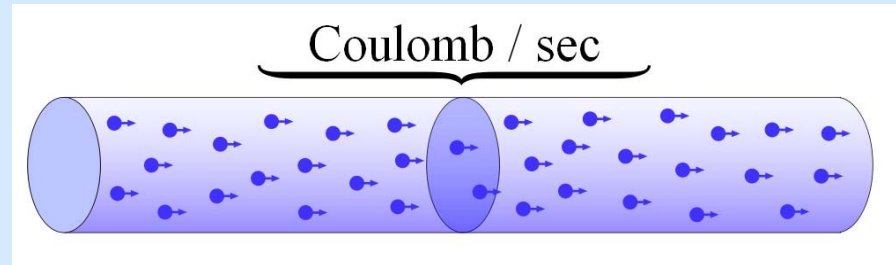
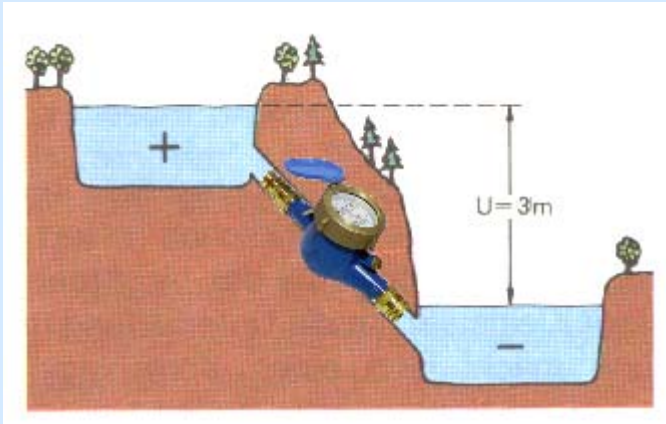
Schutzleiter, Erdkontakt



Elektrischer Strom

Strom = Ladung pro Zeit:

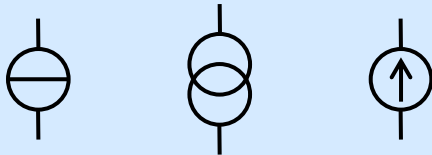
$$I = \frac{dQ}{dt}$$



Symbol: I

Einheit: Ampere (abgekürzt A)

Schaltzeichen von Stromquellen:



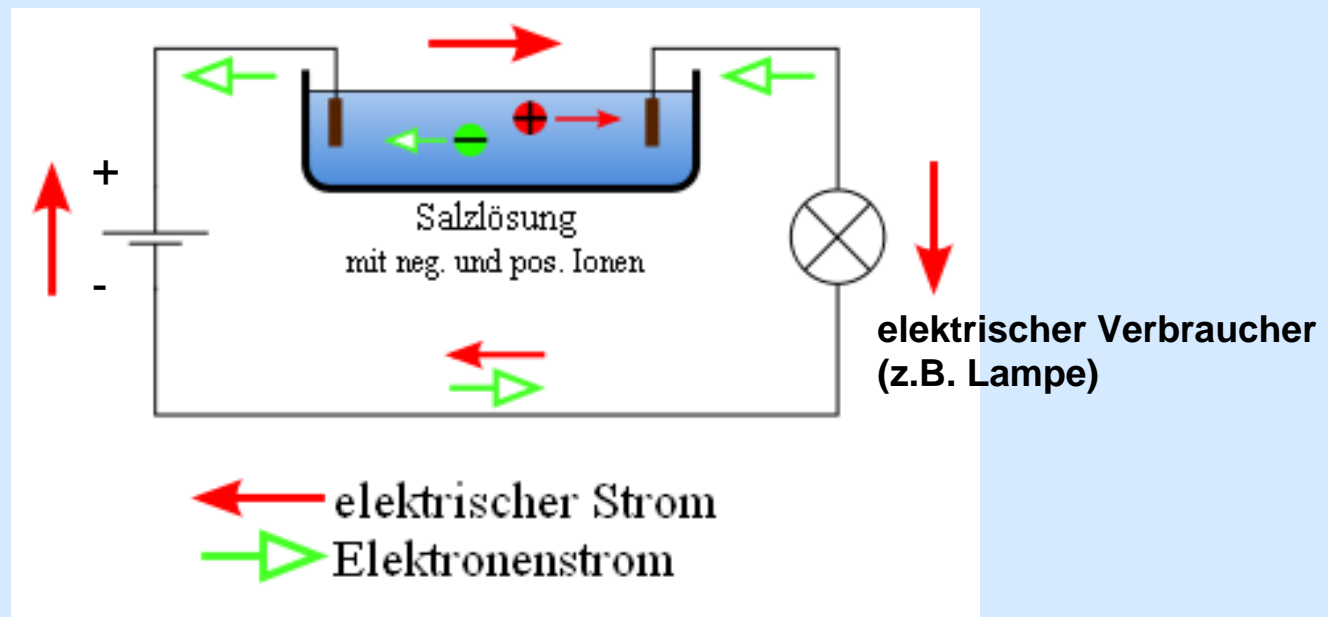
DIN EN 60617-2



André-Marie Ampère
(1775 – 1836)

Elektrischer Strom

In welche Richtung fließt der elektrische Strom?



Technische Stromrichtung: plus nach minus

Gefahren durch Strom und Spannung

Körperdurchströmung

Gefährlichkeit hängt ab von

- Höhe des Stroms
- Dauer des Stromflusses
- dem Strompfad (Herz?)



Sekundärurfälle

- Sturz oder Absturz
- Verletzungen (Schnitte, Stiche, Quetschungen)
- herabfallende Teile

Kurzschluss

- akustische Auswirkungen
- thermische Auswirkungen
- Blenden / Verblitzen der Augen
- elektrodynamische Kräfte



Gefahren durch Strom und Spannung

ab 5 μ A	Wahrnehmbarkeitsgrenze mit der Zungenspitze
ab 1mA	Nervenerschütterungen in den Fingerspitzen, aber noch kein Einfluss auf den Herzschlag
ab 10mA	Verkrampfungen, die aus eigener Kraft gerade noch lösbar sind.
ab 20mA	Verkrampfungen, die aus eigener Kraft nicht mehr lösbar sind
ab 50mA	reversibler Herzstillstand, eventuell Bewusstlosigkeit
ab 80mA	Herzkammerflimmern bei Einwirkung >0,2s, Benommenheit/Bewusstlosigkeit
ab 300mA	Herzkammerflimmern, Bewusstlosigkeit, Herztod, wenn nicht sofortige medizinische Versorgung stattfindet.

aus EAM 6/89 S. 23

Gefahren durch Strom und Spannung

Höchstzulässige Berührspannung (VDE 0100)

50 V~ Wechselspannung

120 V= Gleichspannung

Übliche Spannungen:

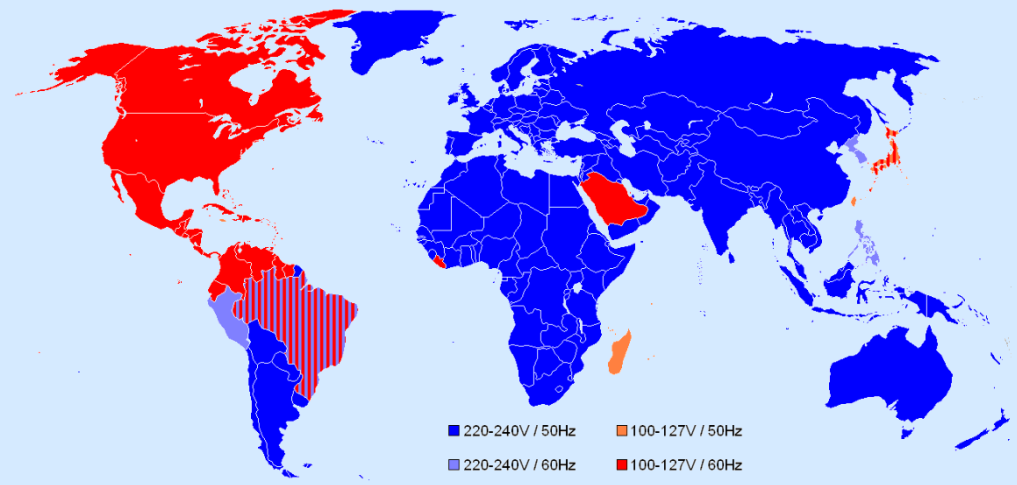
1,5 V= ... 12 V= Batterie, Akku

8 V~ Klingeltrafo

60 V=, 60 V~ Analogtelefon

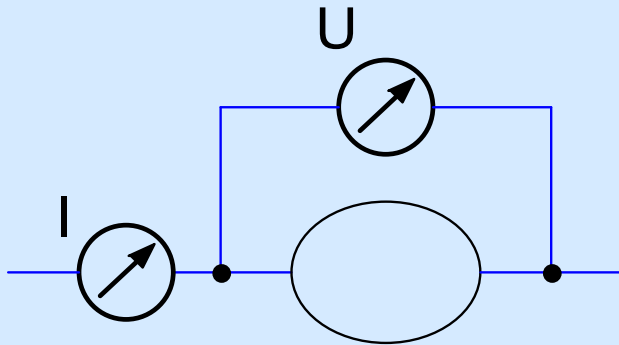
230 V~ Netzspannung

ca. 9 kV gepulst Weidezaun

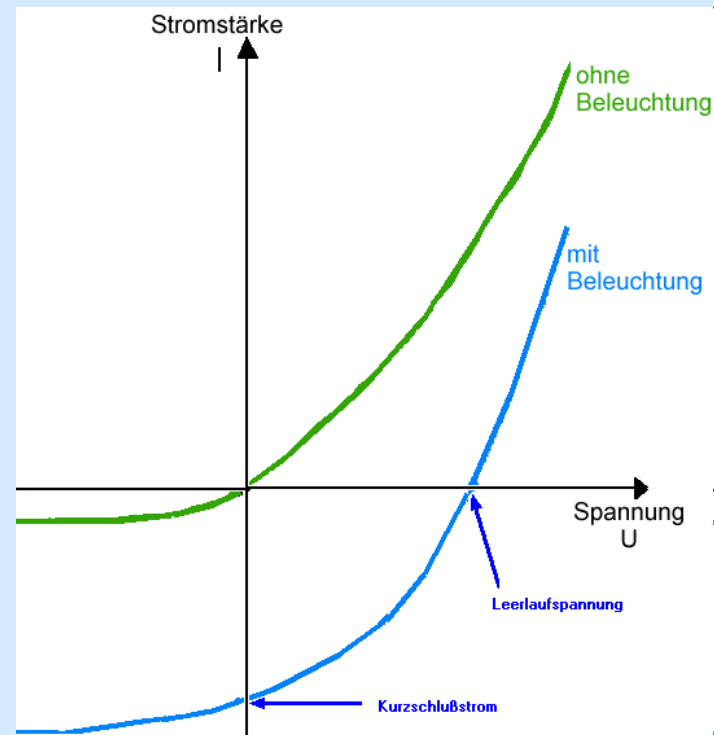


IV-Kennlinien

Zusammenhang zwischen Spannung und Strom durch ein elektronisches Bauelement (2-Pol): IV-Kennlinie

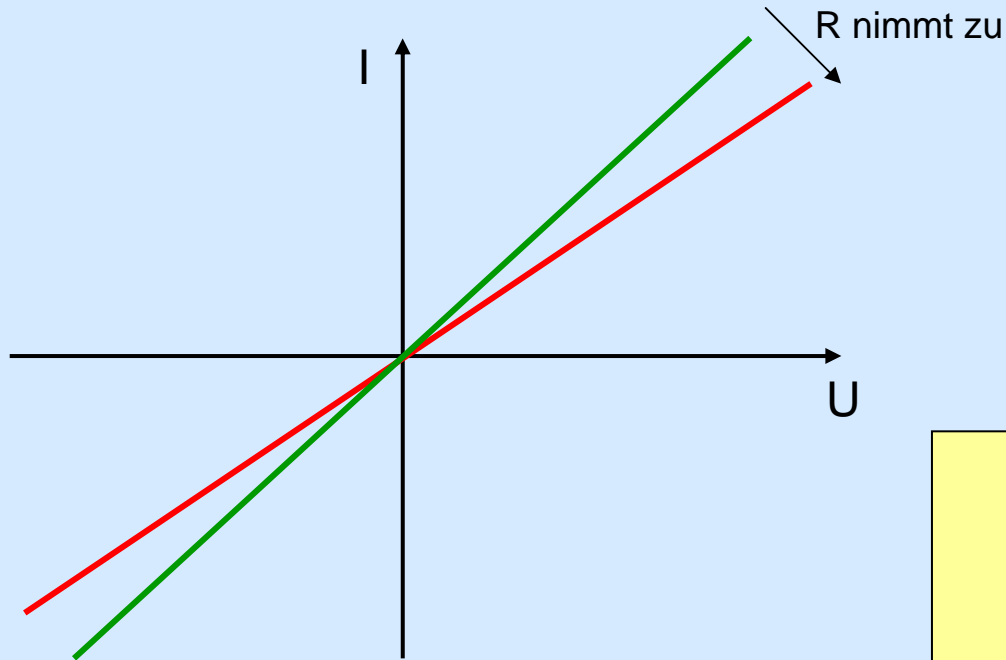


Beispiel: Solarzelle



Ohmsches Gesetz

Bauelement mit einfachster IV-Kennlinie: (ohmscher) Widerstand



$$I \sim U$$



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

Ohmsches Gesetz gültig für metallische Leiter (z.B. Drähte, Kohleschichten)

Elektrischer Widerstand

Symbol: R (engl. resistor)

Einheit: Ohm (abgekürzt Ω)

$$1 \Omega = 1 \text{ V/A}$$

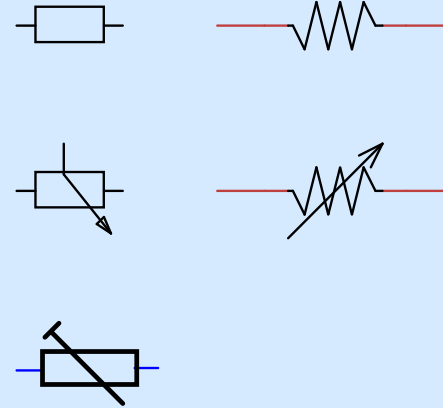


Georg Simon Ohm
(1789 – 1854)

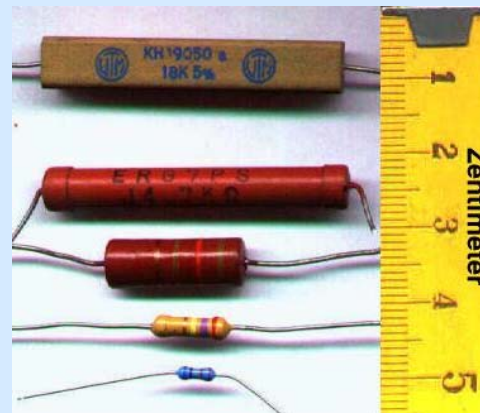
geboren in Erlangen

Studium und Promotion an der FAU

Schaltzeichen von Widerständen:



Beispiele von Widerständen:



Elektrischer Widerstand

Symbol: R (engl. resistor)

Einheit: Ohm (abgekürzt Ω)

$$1 \Omega = 1 \text{ V/A}$$

Schaltzeichen von Widerständen:



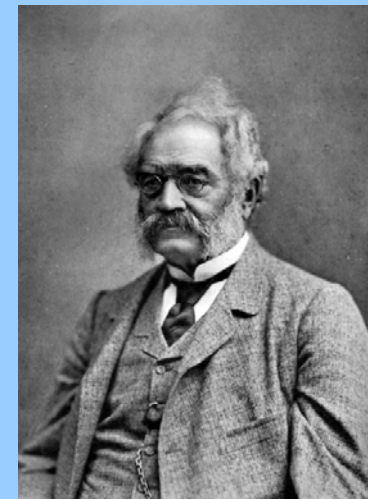
Georg Simon Ohm
(1789 – 1854)

Leitwert: G (engl. conductance)

Einheit: Siemens (S)
bzw. mho (\oslash)

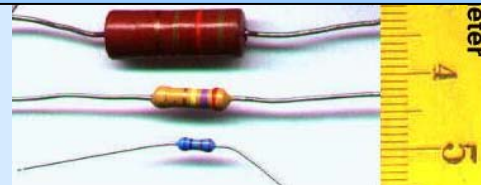
$$G = \frac{1}{R}$$

$$[G] = 1 \text{ S} = 1 \Omega^{-1} = 1 \frac{\text{A}}{\text{V}}$$



Werner von Siemens
(1816 – 1892)

geboren in Erlangen
Studium und Promotion an der FAU



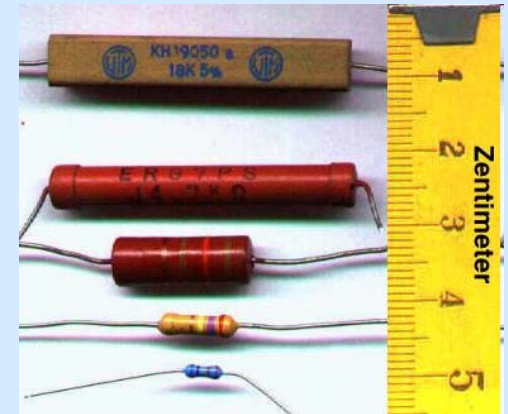
Elektrischer Widerstand

Aufbau von Widerständen:



$$R = \rho \frac{L}{A}$$

ρ = spezifischer Widerstand (Materialkonstante)



Kommerzielle Widerstände:

- Kohleschichten
- Metallschichten
- Draht
- Halbleiter

Bereich: $0.01 \, \Omega \dots 10^{12} \, \Omega$
Leistung: $1/8 \, \text{W} \dots 250 \, \text{W}$

Immer beachten:

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

Elektrischer Widerstand



Farbkodierung von Widerständen mit 4 Ringen

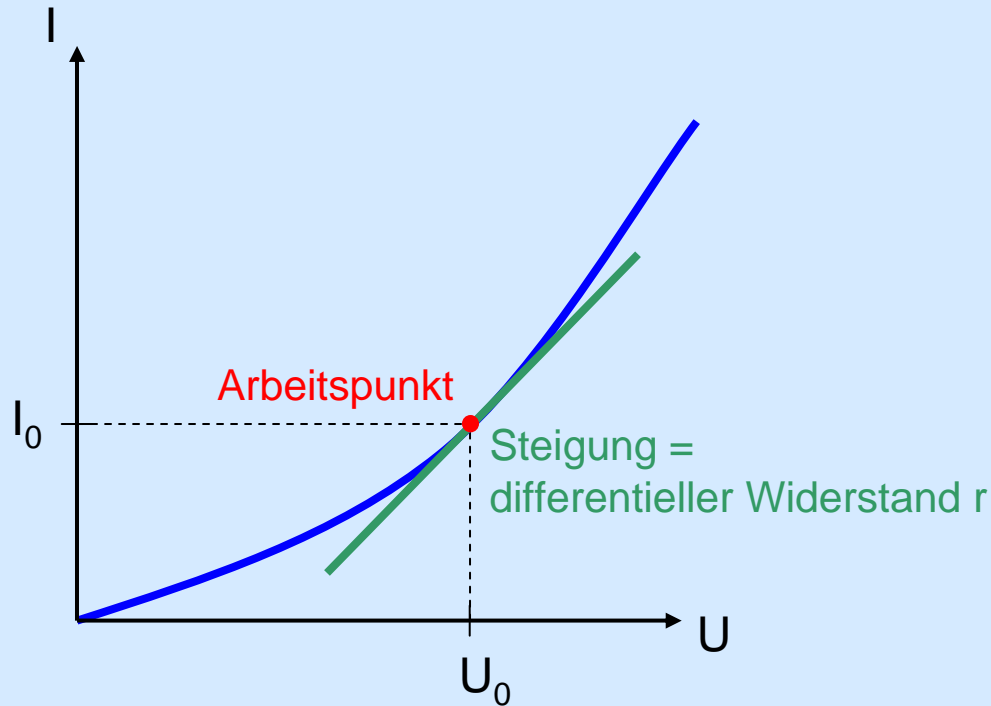
Farbe		Widerstandswert in Ω			Toleranz
		1. Ring (1. Ziffer)	2. Ring (2. Ziffer)	3. Ring (Multiplikator)	4. Ring
„keine“	✗	—	—	—	$\pm 20\%$
silber		—	—	$10^{-2} = 0,01$	$\pm 10\%$
gold		—	—	$10^{-1} = 0,1$	$\pm 5\%$
schwarz		—	0	$10^0 = 1$	—
braun		1	1	$10^1 = 10$	$\pm 1\%$
rot		2	2	$10^2 = 100$	$\pm 2\%$
orange		3	3	$10^3 = 1.000$	—
gelb		4	4	$10^4 = 10.000$	—
grün		5	5	$10^5 = 100.000$	$\pm 0,5\%$
blau		6	6	$10^6 = 1.000.000$	$\pm 0,25\%$
violett		7	7	$10^7 = 10.000.000$	$\pm 0,1\%$
grau		8	8	$10^8 = 100.000.000$	—
weiß		9	9	$10^9 = 1.000.000.000$	—

Farbkodierung von Widerständen mit 5 oder 6 Ringen

Farbe	1. Ring (1. Ziffer)	2. Ring (2. Ziffer)	3. Ring (3. Ziffer)	4. Ring (Multiplikator)	5. Ring (Toleranz)	6. Ring (Temp. Koeffizient)
silber				10^{-2}		
gold				10^{-1}		
schwarz		0	0	10^0		$200 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
braun	1	1	1	10^1	$\pm 1\%$	$100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
rot	2	2	2	10^2	$\pm 2\%$	$50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
orange	3	3	3	10^3		$15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
gelb	4	4	4	10^4		$25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
grün	5	5	5	10^5	$\pm 0,5\%$	
blau	6	6	6	10^6	$\pm 0,25\%$	$10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
violett	7	7	7		$\pm 0,1\%$	$5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
grau	8	8	8		$\pm 0,05\%$	
weiß	9	9	9			

Wikipedia: Widerstand (Bauelement)

Differentieller Widerstand



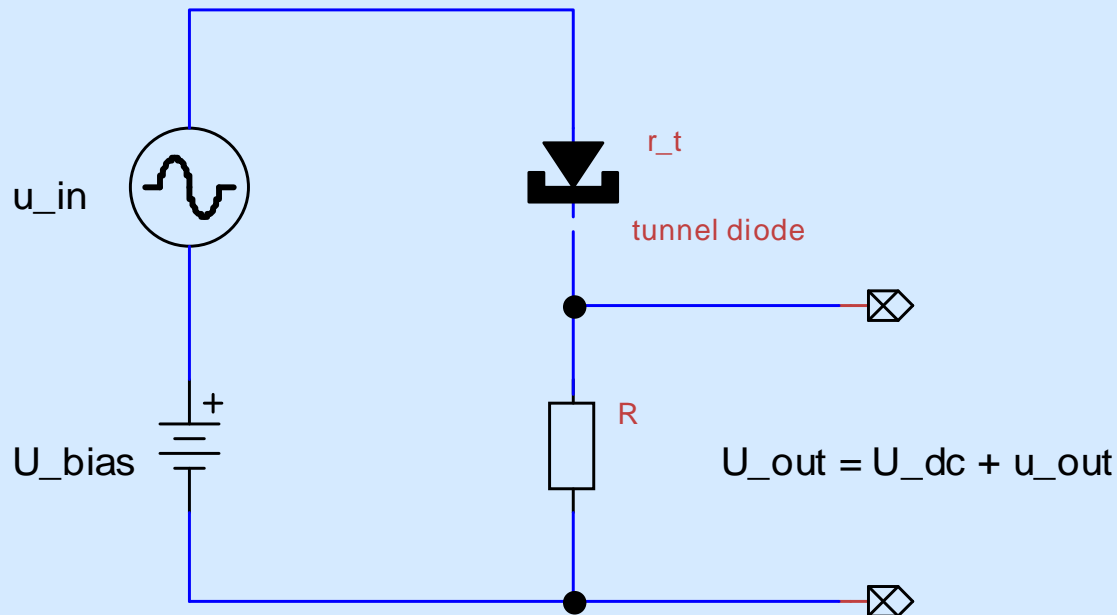
absoluter Widerstand: $R = \frac{U_0}{I_0}$

differentieller Widerstand: $r = \left. \frac{dU}{dI} \right|_{U=U_0}$

Differentieller Widerstand

Beispiel: Tunneldiode

Datenblatt 1N3716



$$u_{out} = \frac{R}{R + r_t} u_{in}$$

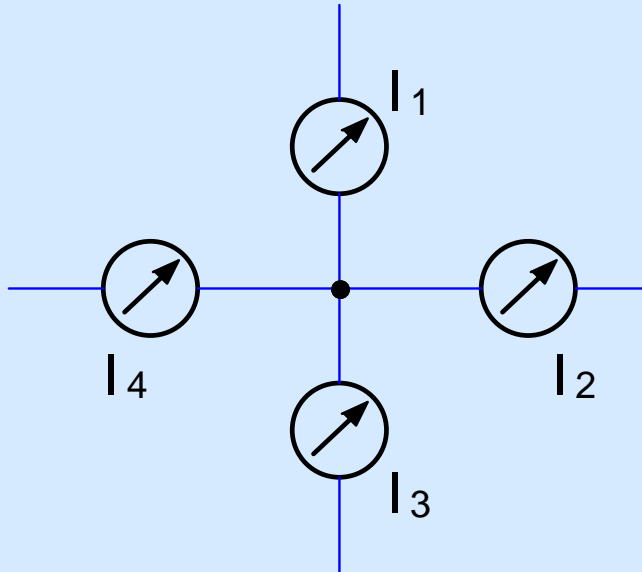
mit $r_t < 0$

$$\Rightarrow u_{out} > u_{in}$$

Kirchhoffsche Regeln

1. Kirchhoff'sche Regel (Knotenregel)

„Die Summe aller Ströme in einen und aus einem Knoten von elektrischen Verbindungen ist 0.“ (Ladungserhaltung)

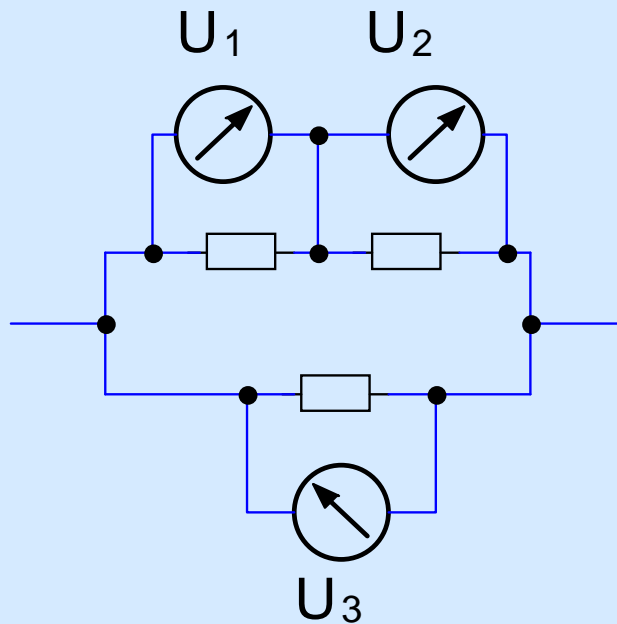


$$\sum_i I_i = 0$$

Kirchhoffsche Regeln

2. Kirchhoff'sche Regel (Maschenregel)

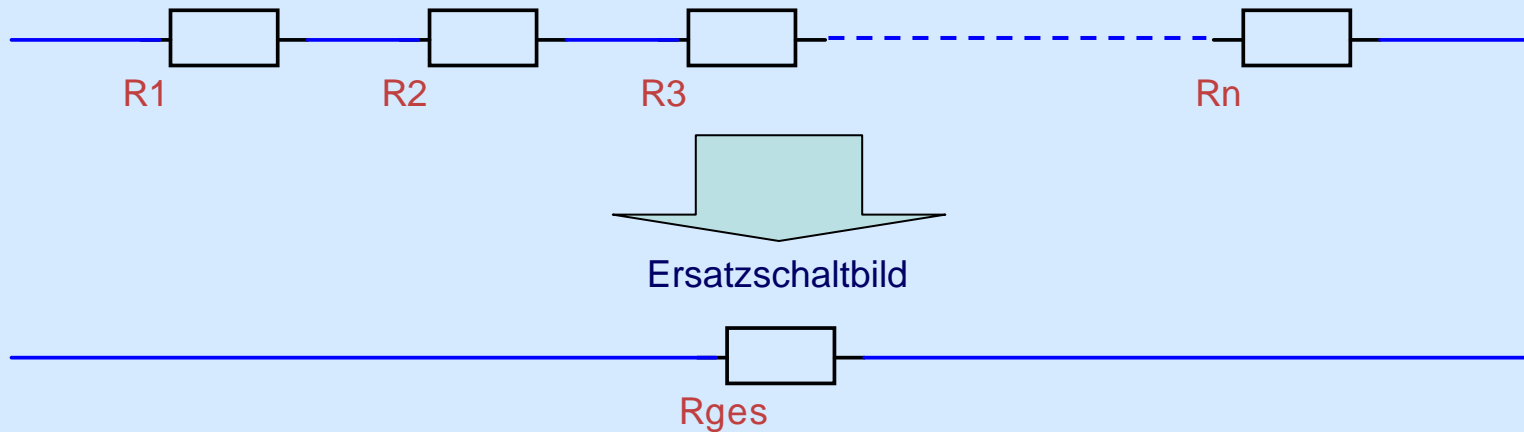
„Die Summe aller Spannungen entlang eines geschlossenen Stromkreises (Masche) ist 0.“



$$\sum_i U_i = 0$$

Schaltungen mit Widerständen

Reihenschaltung (Serienschaltung)

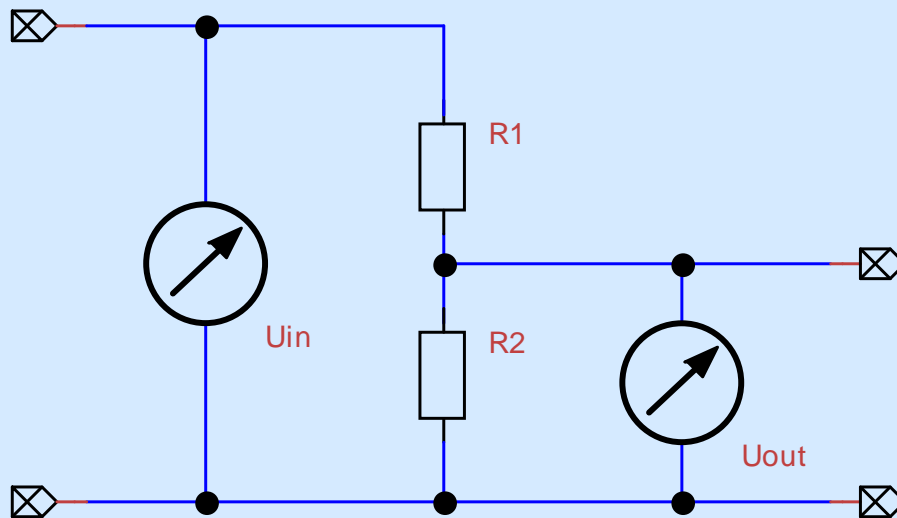


$$R_{ges} = \frac{U_{ges}}{I} = \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{I} = \sum_{i=1}^n R_i$$

(folgt aus Kirchhoffschen Regeln)

Schaltungen mit Widerständen

Häufige Anwendung von Serienschaltungen: Spannungsteiler

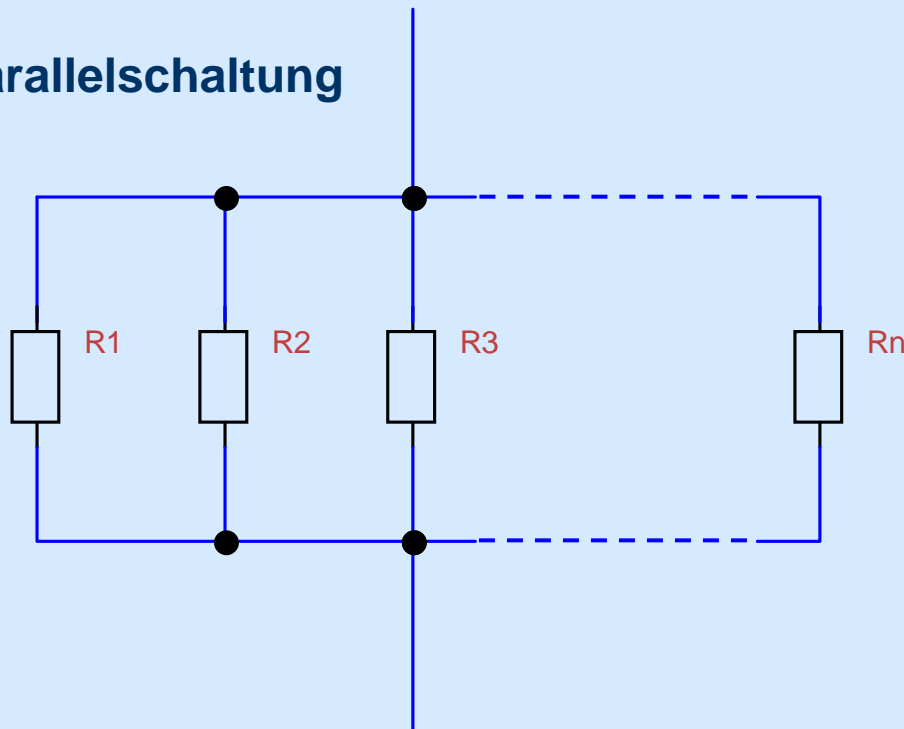


$$I = \frac{U_{in}}{R_1 + R_2} \quad \text{und} \quad U_{out} = R_2 \cdot I \quad \Rightarrow$$

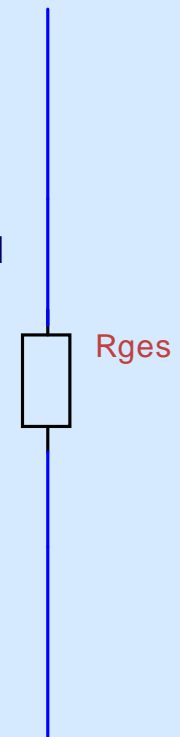
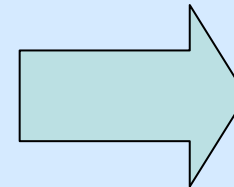
$$U_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{in}$$

Schaltungen mit Widerständen

Parallelschaltung



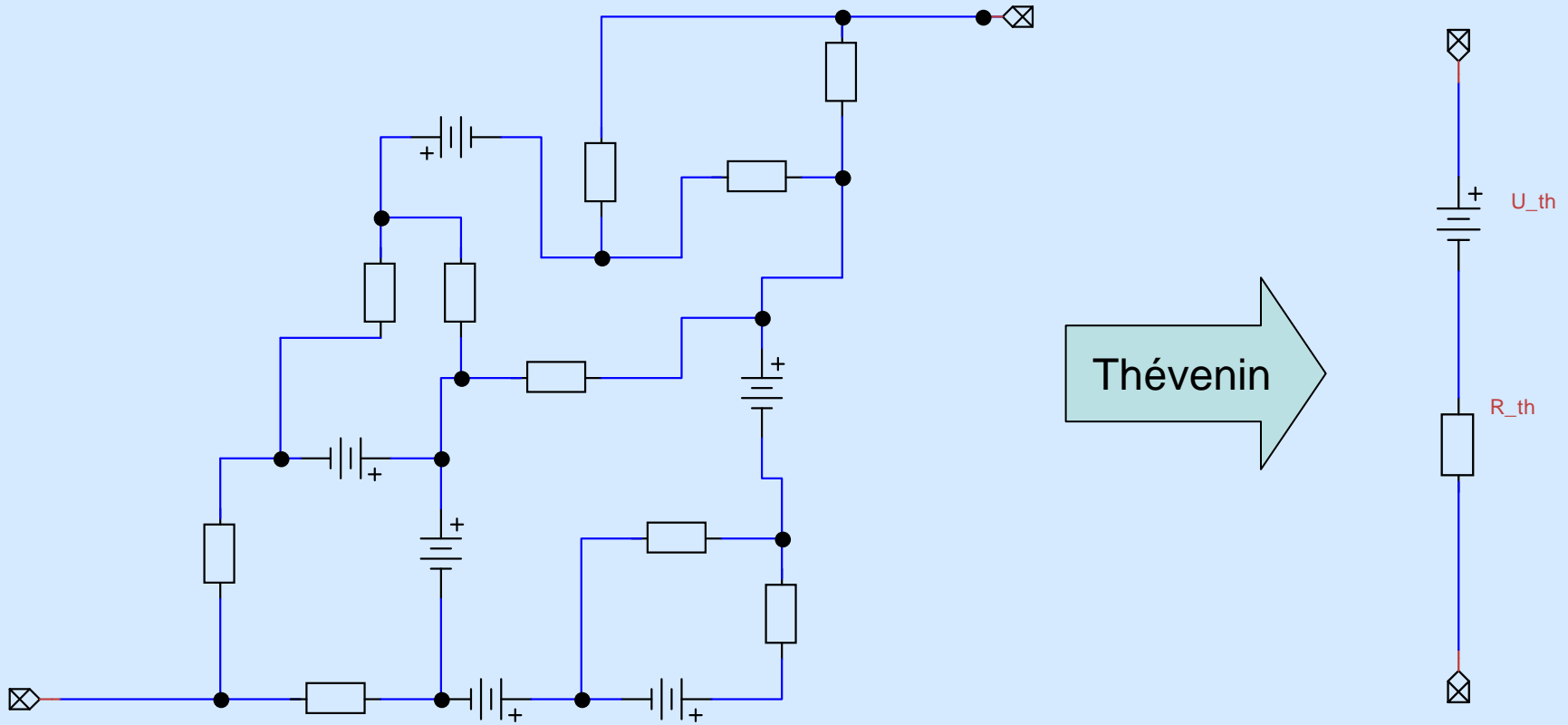
Ersatzschaltbild



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

(folgt aus Kirchhoffschen Regeln)

Helmholtz-Thévenin-Theorem



Jedes Netzwerk mit 2 Anschlüssen bestehend aus Widerständen und Spannungsquellen ist äquivalent zu einem Widerstand R_{th} in Reihe mit einer Spannungsquelle U_{th} .

Helmholtz-Thévenin-Theorem

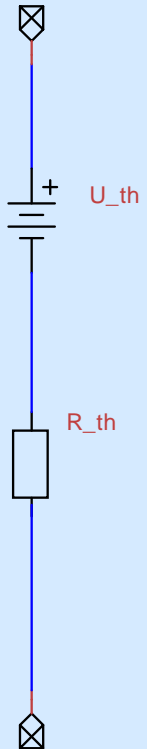
Wie findet man R_{th} und U_{th} ?

U_{th} : Leerlaufspannung des Netzwerkes, d.h. bei offenen Anschlüssen

R_{th} : 1. Theoretisch: alle Spannungs- und Stromquellen „abschalten“ (Spannungsquellen durch "Drahtbrücken" ersetzen; Stromquellen "entfernen"), dann ist R_{th} der Ersatzwiderstand des verbleibenden Widerstandsnetzwerkes

2. Bestimmung des Kurzschlussstromes I_{sc} , dann $R_{th} = U_{th} / I_{sc}$

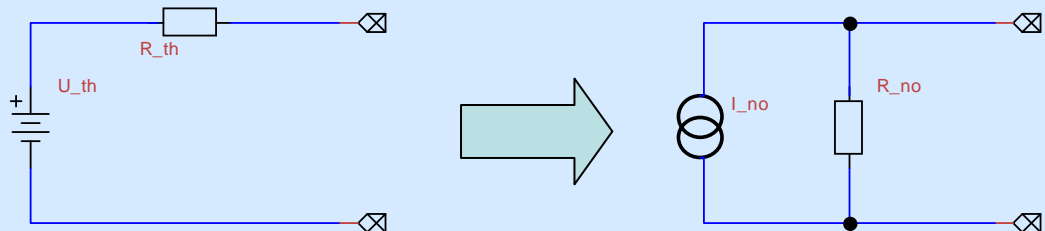
3. Halb-Spannungs-Methode: veränderbaren Widerstand R_{var} (Potentiometer) anschließen und Spannung U_{out} messen, dann ist $R_{th} = R_{var} \Leftrightarrow U_{out} = U_{th} / 2$



Norton-Theorem:

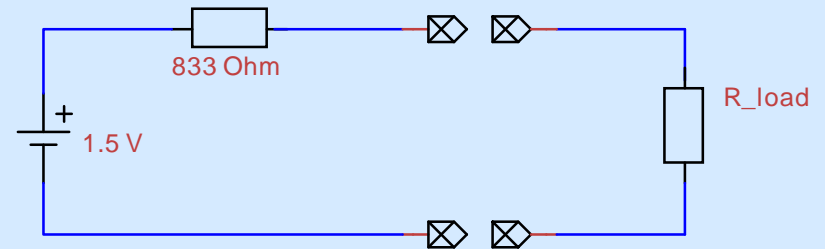
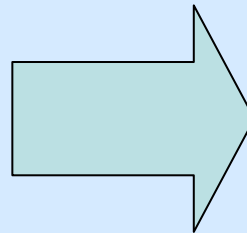
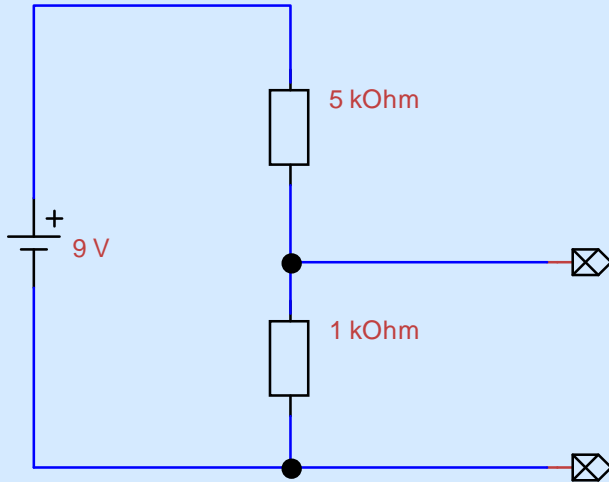
$$R_{no} = R_{th}$$

$$I_{no} = U_{th} / R_{th}$$



Helmholtz-Thévenin-Theorem

Beispiel: Spannungsteiler



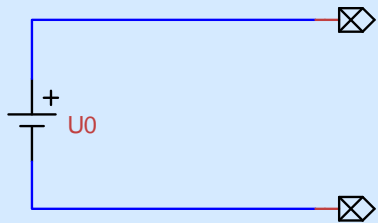
Welche Spannung liegt am Verbraucher an? → Spannungsteiler !!!

z. B. Taschenlampe $R_{\text{bulb}} \approx 15 \Omega$

$$\Rightarrow U_{\text{bulb}} = 1.5 \text{ V} \cdot \frac{15 \Omega}{833 \Omega + 15 \Omega} = 0.027 \text{ V}$$

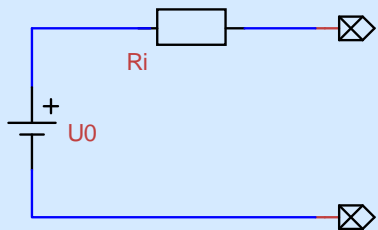
Spannungs- und Stromquellen

Ideale Spannungsquelle



$$U_{kl} = U_0 = \text{const}$$

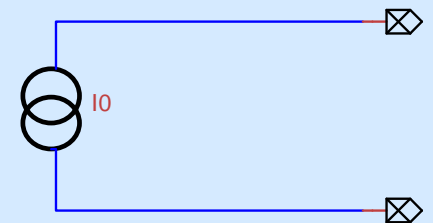
Reale Spannungsquelle



$$U_{kl} = U_0 - R_i \cdot I_{load}$$

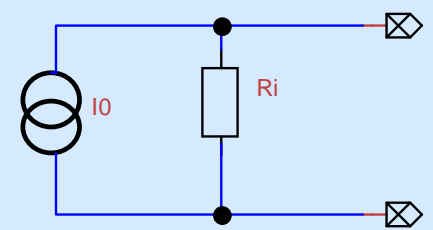
$$I_{max} = U_0 / R_i$$

Ideale Stromquelle



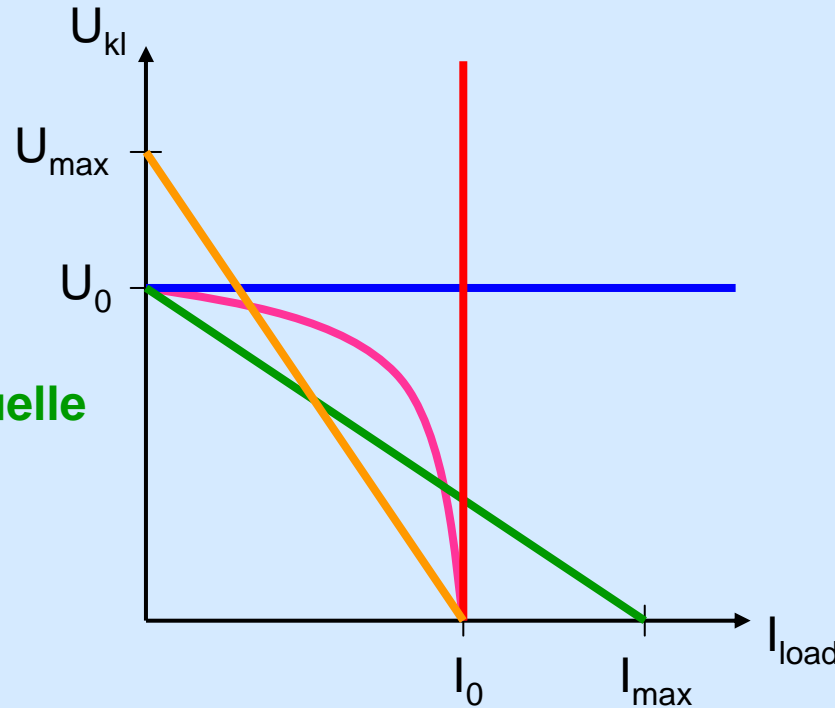
$$I_{load} = I_0 = \text{const}$$

Reale Stromquelle



$$I_{load} = I_0 - \frac{U_{kl}}{R_i}$$

$$U_{max} = R_i \cdot I_0$$



**Nicht-lineare Spannungsquelle
(oder Stromquelle)
z.B. Solarzelle, Ausgang eines OpAmp**

Spannungs- und Stromquellen

Wie bestimmt man R_i , U_0 bzw. I_0 ? → Thévenin

U_0 bzw. U_{\max} : Leerlaufspannung, d.h. bei offenen Anschlüssen ($R_{\text{load}} = \infty$)

I_0 bzw. I_{\max} : Kurzschlussstrom, d.h. bei gebrückten Anschlüssen ($R_{\text{load}} = 0$)

R_i : 1. $R_i = U_0 / I_{\max}$ bzw. $R_i = U_{\max} / I_0$

2. Halb-Spannungs-Methode: veränderbaren Widerstand R_{var} (Potentiometer) anschließen und Klemmenspannung U_{kl} bzw. Laststrom I_{load} messen, dann ist
 $R_i = R_{\text{var}} \Leftrightarrow U_{\text{kl}} = U_0 / 2$ bzw. $I_{\text{load}} = I_0 / 2$

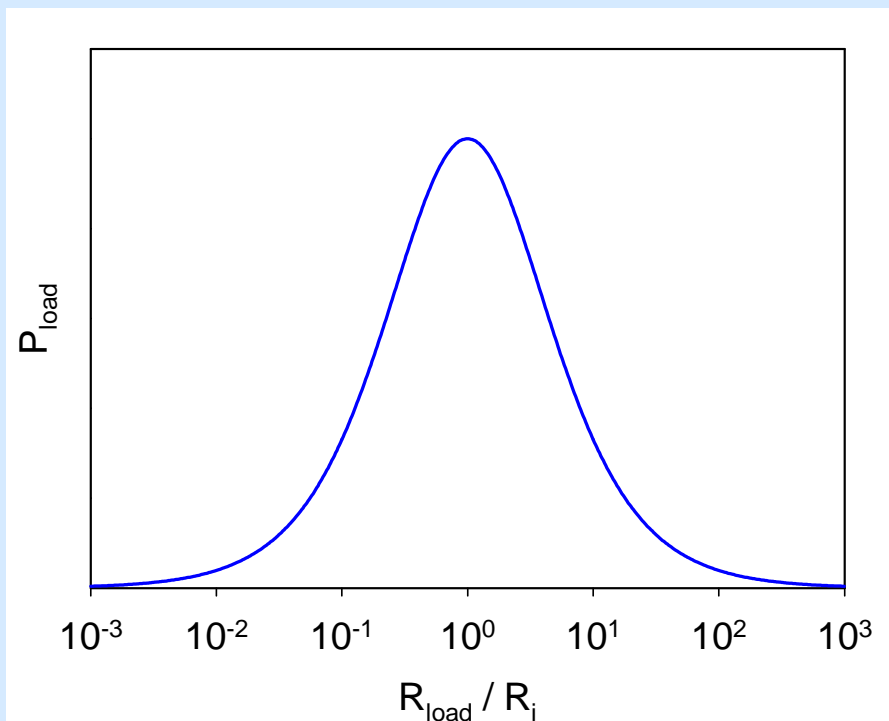


Spannungs- und Stromquellen

Für welchen Lastwiderstand R_{load} erhält man maximale Leistung?

an den Verbraucher abgegebene Leistung:

$$P_{\text{load}} = U_{\text{kl}} \cdot I_{\text{load}} = \frac{U_{\text{kl}}^2}{R_{\text{load}}} = U_0^2 \frac{R_{\text{load}}}{(R_{\text{load}} + R_i)^2} \quad \text{bzw.} \quad I_0^2 R_i^2 \frac{R_{\text{load}}}{(R_{\text{load}} + R_i)^2}$$



Leistungsanpassung:

$$R_{\text{load}} = R_i$$

$$P_{\text{load, max}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{U_0^2}{R_{\text{load}}} = \frac{1}{4} \cdot I_0^2 R_{\text{load}}$$

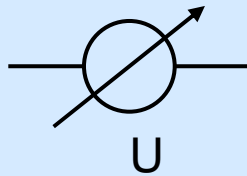
allerdings ist i.d.R.

$R_{\text{load}} \gg R_i$ (Spannungsquelle)

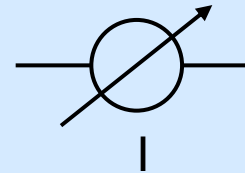
$R_{\text{load}} \ll R_i$ (Stromquelle)

Messung von Spannung und Strom

Voltmeter:



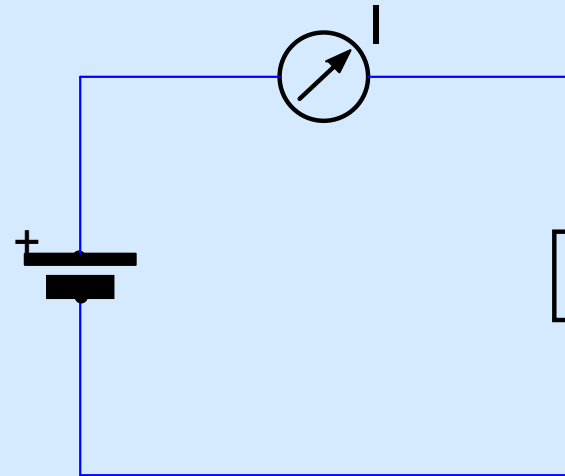
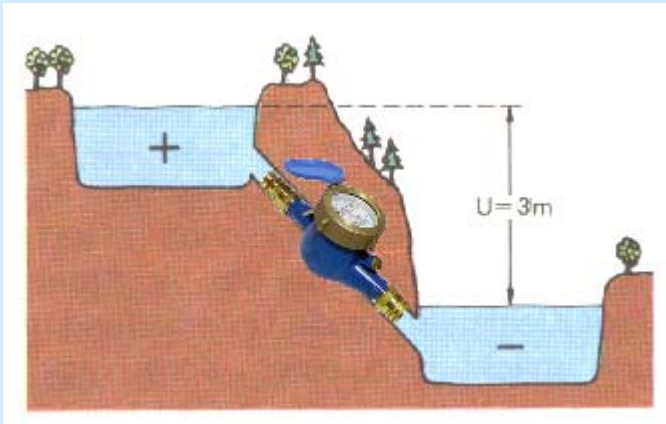
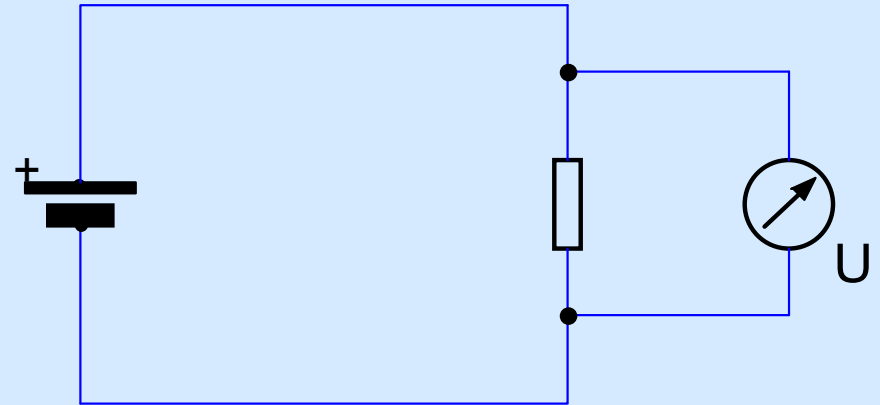
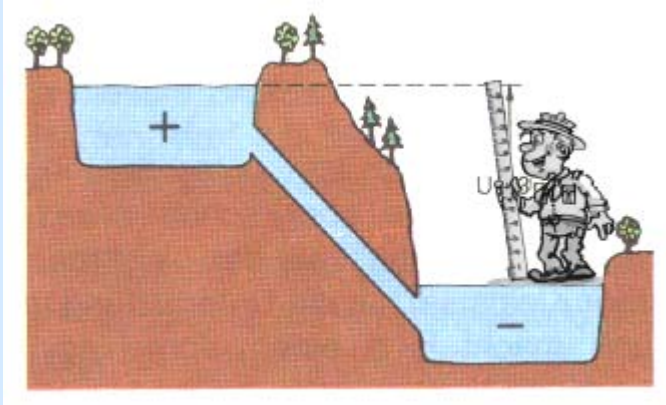
Amperemeter:



Multimeter:



Messung von Spannung und Strom

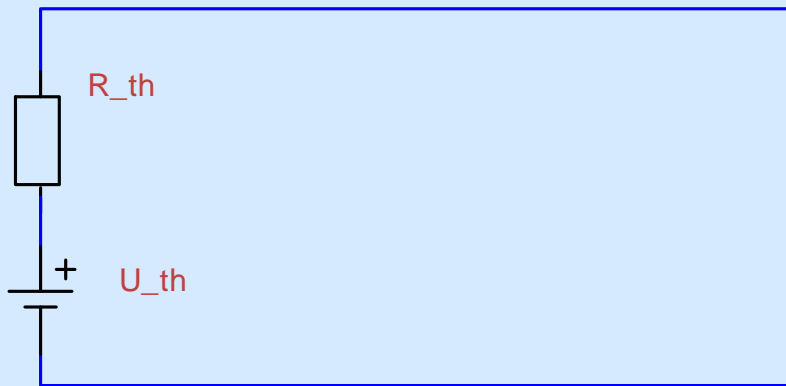


Messung von Spannung und Strom

Reales Voltmeter:

Innenwiderstand: R_i

$$U_{kl} = U_{th} - I \cdot R_{th}$$

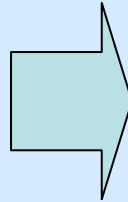


Messung von Spannung und Strom

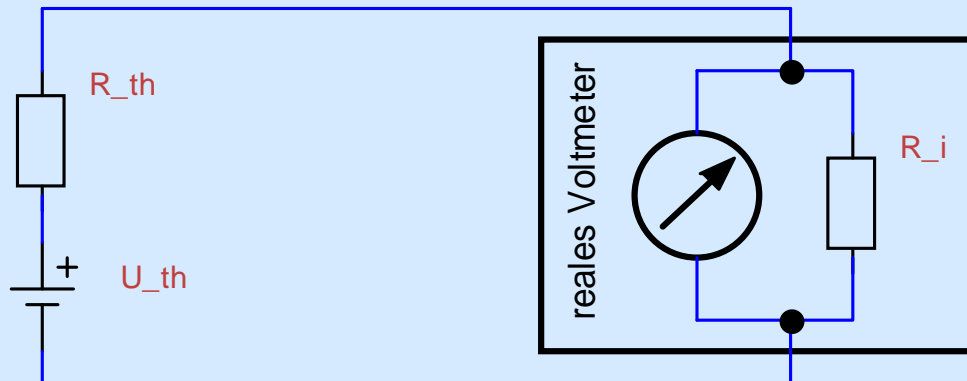
Reales Voltmeter:

Innenwiderstand: R_i

$$U_{kl} = U_{th} - I \cdot R_{th}$$



$$U_{\text{gemessen}} = U_{th} \frac{R_i}{R_{th} + R_i}$$



Relativer Fehler:

$$\frac{\Delta U}{U_{th}} = \frac{1}{1 + R_i / R_{th}}$$

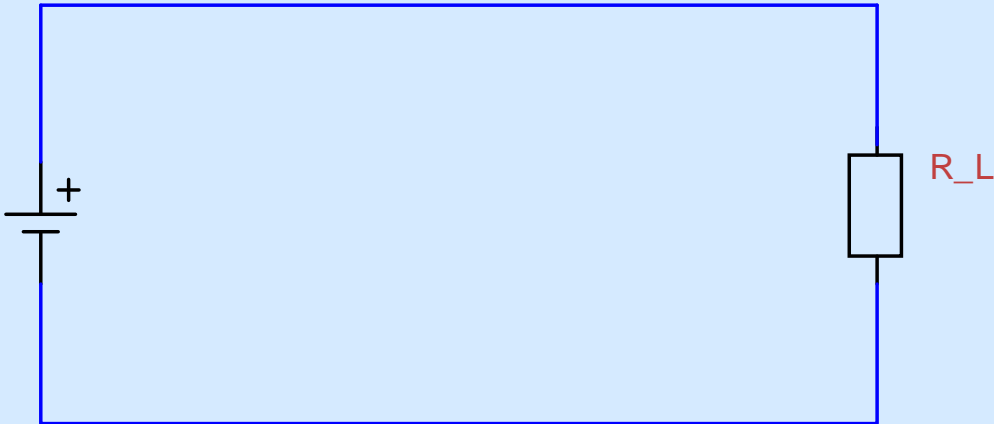
Spannungsmessung: $R_i \gg R_{th}$

Ideales Voltmeter: $R_i \rightarrow \infty$

Messung von Spannung und Strom

Reales Amperemeter:

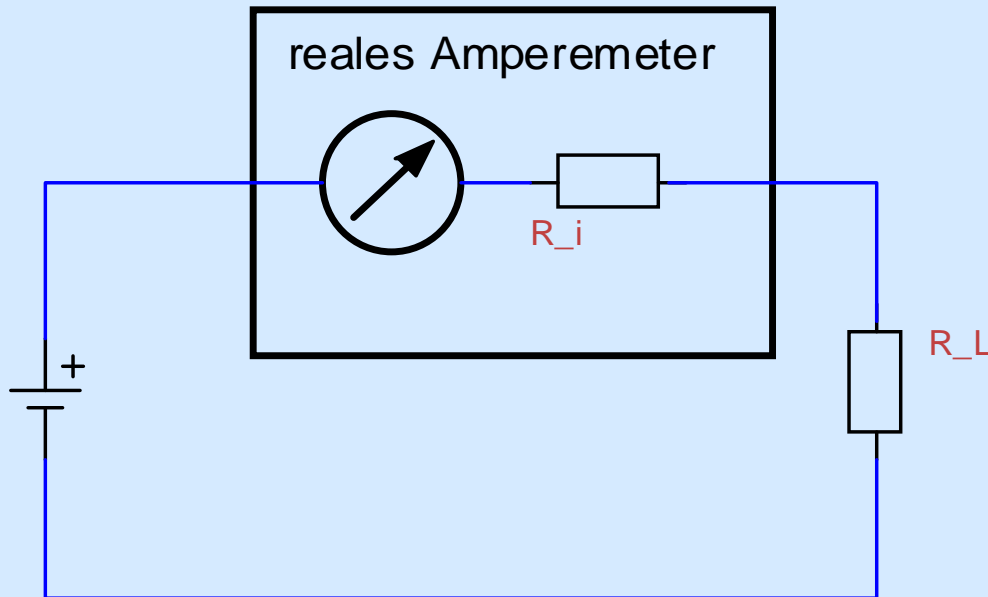
$$I_{\text{ungestört}} = \frac{U}{R_L}$$



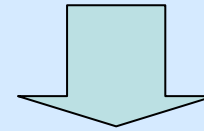
Messung von Spannung und Strom

Reales Amperemeter:

Innenwiderstand: R_i



$$I_{\text{ungestört}} = \frac{U}{R_L}$$



$$I_{\text{gemessen}} = \frac{U - U_i}{R_L} = \frac{U}{R_L + R_i}$$

Relativer Fehler:

$$\frac{\Delta I}{I_{\text{ungestört}}} = \frac{1}{1 + R_L / R_i}$$

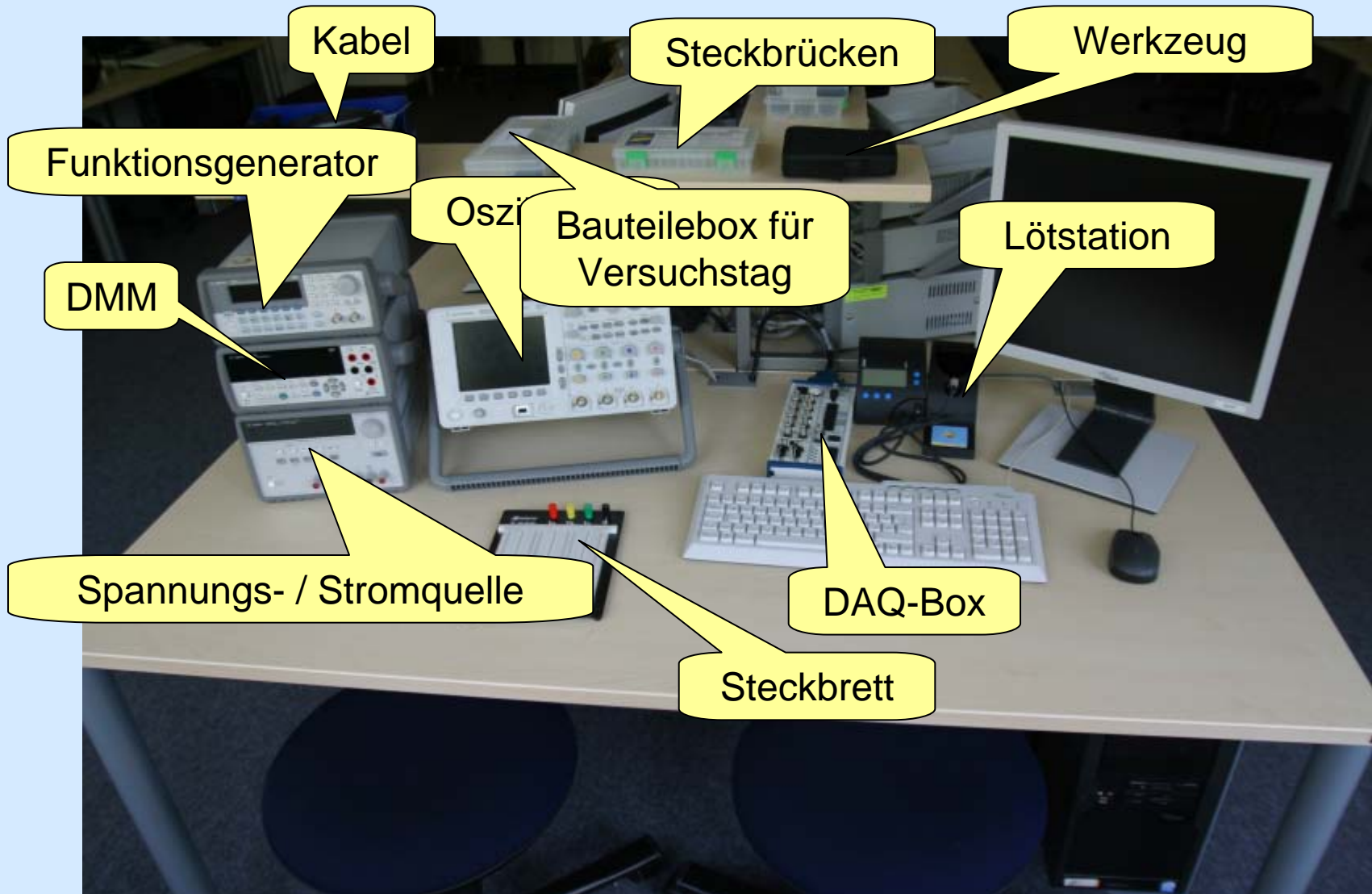
Strommessung: $R_i \ll R_L$

Ideales Amperemeter: $R_i = 0$

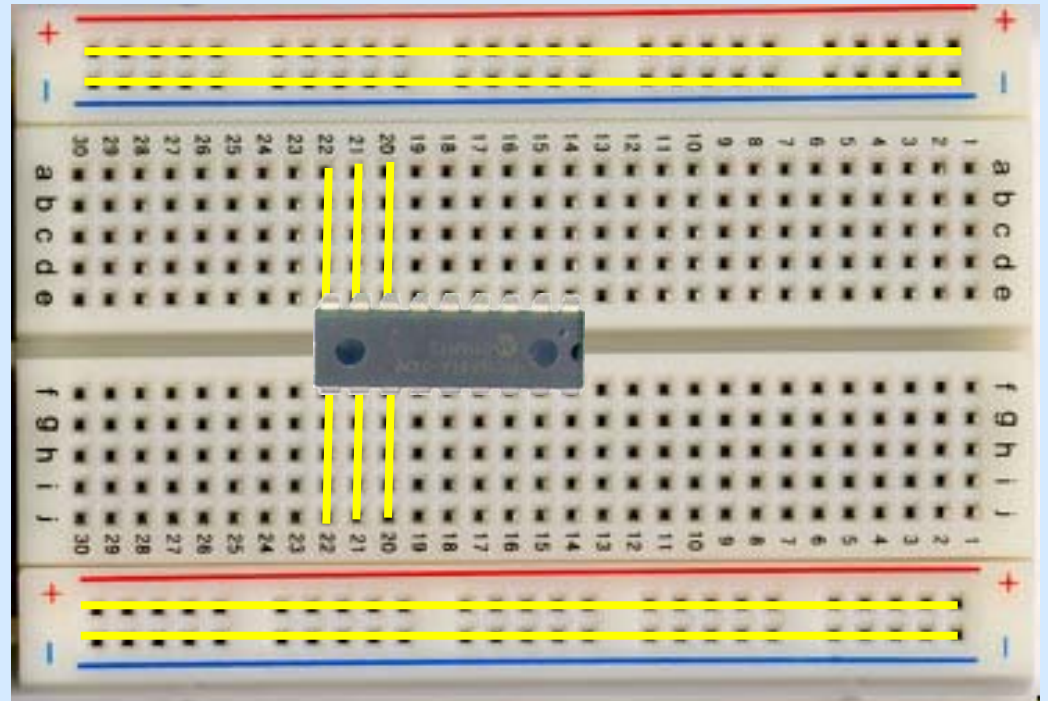
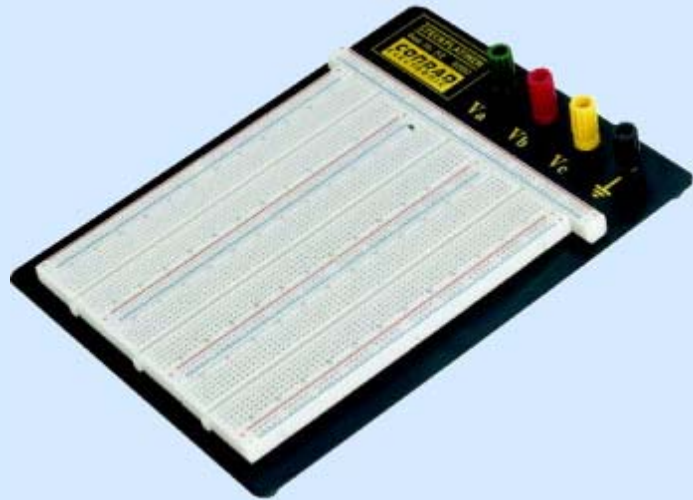
Überblick

- Grundlagen: Spannung, Strom, Widerstand, IV-Kennlinien
- **Elektronische Messgeräte im Elektronikpraktikum**
- Passive Filter
- Signaltransport im Kabel
- Transistor
- Operationsverstärker
- Sensorik
- PID-Regler
- Lock-In-Verstärker
- Phase-Locked Loop
- Digitalelektronik
- Digital-Analog- / Analog-Digital-Wandlung
- Mikrocontroller
- Labview und Virtual Instruments
- Physik in der Elektronik: Ausblick zur Festkörperphysik

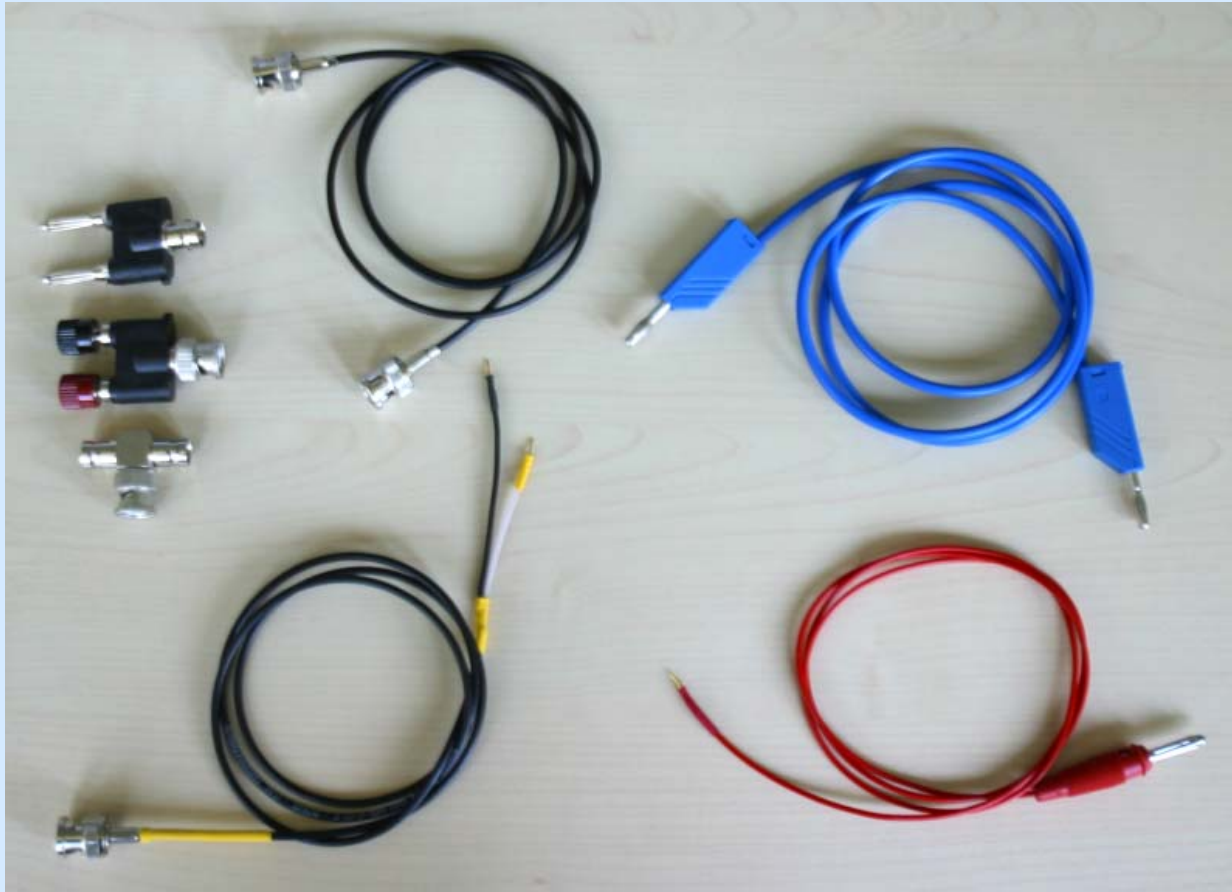
Arbeitsplatz



Steckbrett



Kabel und Bauelemente



Spannungs- / Stromquelle (Power Supply)

Agilent E3631A

3-faches programmierbares
Labornetzteil:

- (0 - 25) V, 1 A (2x)
- (0 - 6) V, 5 A (1x)
- GPIB-Schnittstelle



Grundsätzlich Strom-
begrenzung verwenden:

$$I_{\max} = 100 \text{ mA}$$

DMM (Digital-Multimeter)

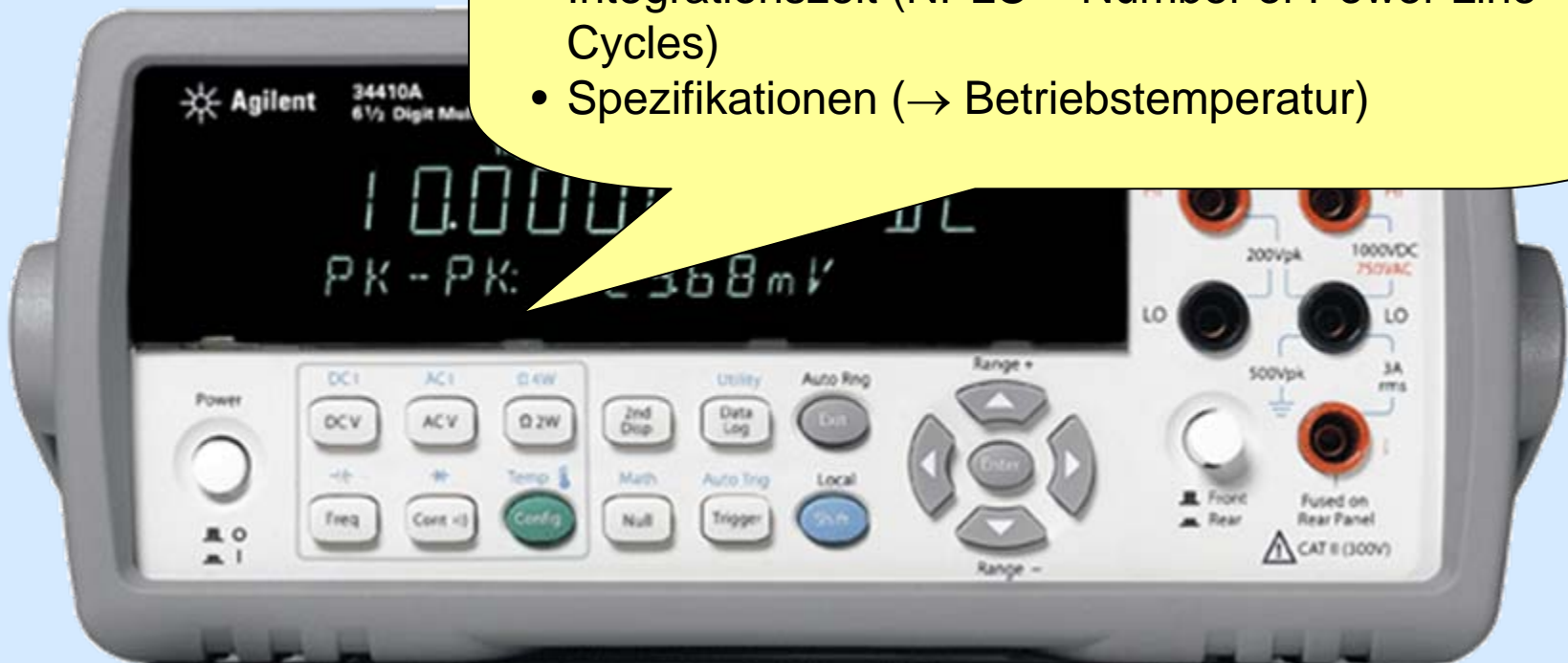
Agilent 34410A

Labor-Digitalmultimeter

- 6½ Stellen
- USB-Schnittstelle
- Messen von Spannung

Zu berücksichtigende Eigenschaften bzw. Parameter eines Labor-Digital-Multimeters (→ 1. Versuchstag):

- Innenwiderstand
- Integrationszeit (NPLC = Number of Power Line Cycles)
- Spezifikationen (→ Betriebstemperatur)



Funktionsgenerator

Agilent 33220A

Funktions-/Arbiträrsignalgenerator

- 20 MHz, 14 bit
- Sinus, Rechteck, Dreieck, Rauschen, ...
- programmierbare Signale



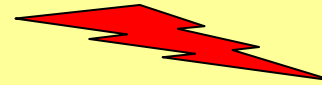
Digitales Speicheroszilloskop

Agilent MSO6014A

Digitales (mixed signal) Speicheroszilloskop

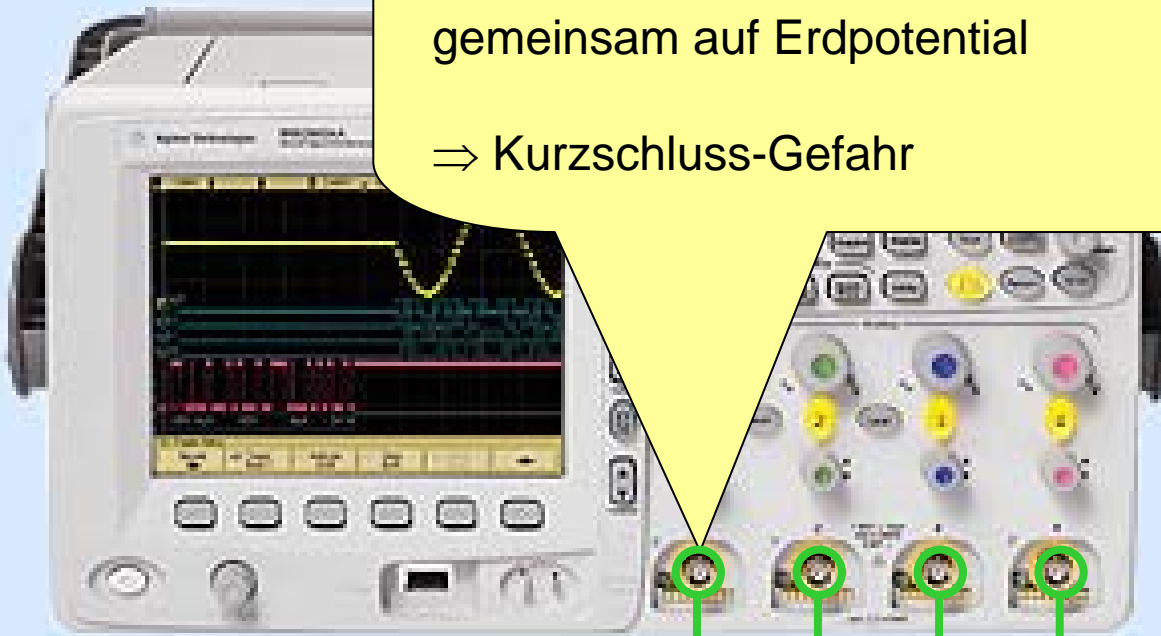
- 4 analoge + 16 digitale Kanäle
- 100 MHz, 2 GSa/s
- großer Speicher mit Zoom-Funktion
- USB-Anschluss (auch für Speicher)

ACHTUNG !!!



Masse-Anschlüsse aller BNC-Buchsen liegen gemeinsam auf Erdpotential

⇒ Kurzschluss-Gefahr

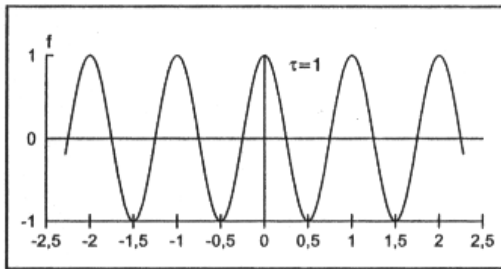


Digitales Speicheroszilloskop

Exkurs: Fouriertransformation und FFT einer zeitabhängigen Funktion $f(t)$:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{-i\omega t} d\omega$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{i\omega t} dt$$



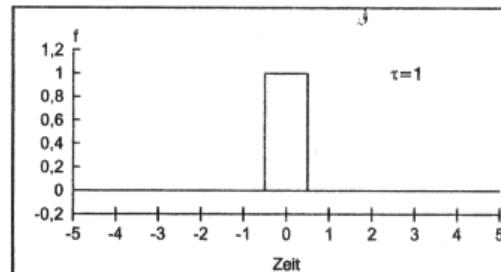
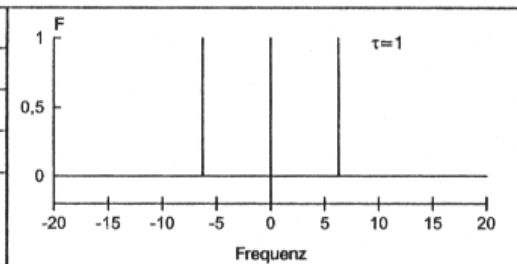
6. Unendliche cosinus-Funktion

$$f(t) = \cos(2\pi t/\tau)$$



symmetrische δ -Funktion

$$F(\omega) = \pi \{ \delta(\omega - 2\pi/\tau) + \delta(\omega + 2\pi/\tau) \}$$



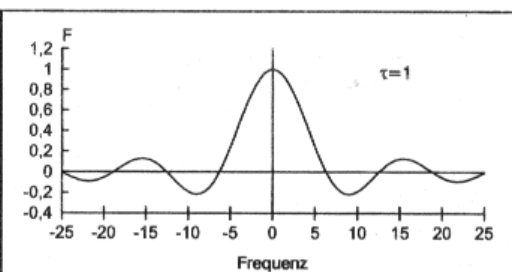
5. Rechteckfunktion

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } |t| > \tau/2 \\ 1 & \text{für } |t| < \tau/2 \end{cases}$$



sinc-Funktion

$$F(\omega) = \tau \frac{\sin(\omega\tau/2)}{(\omega\tau/2)} = \tau \operatorname{sinc}(\omega\tau/2)$$

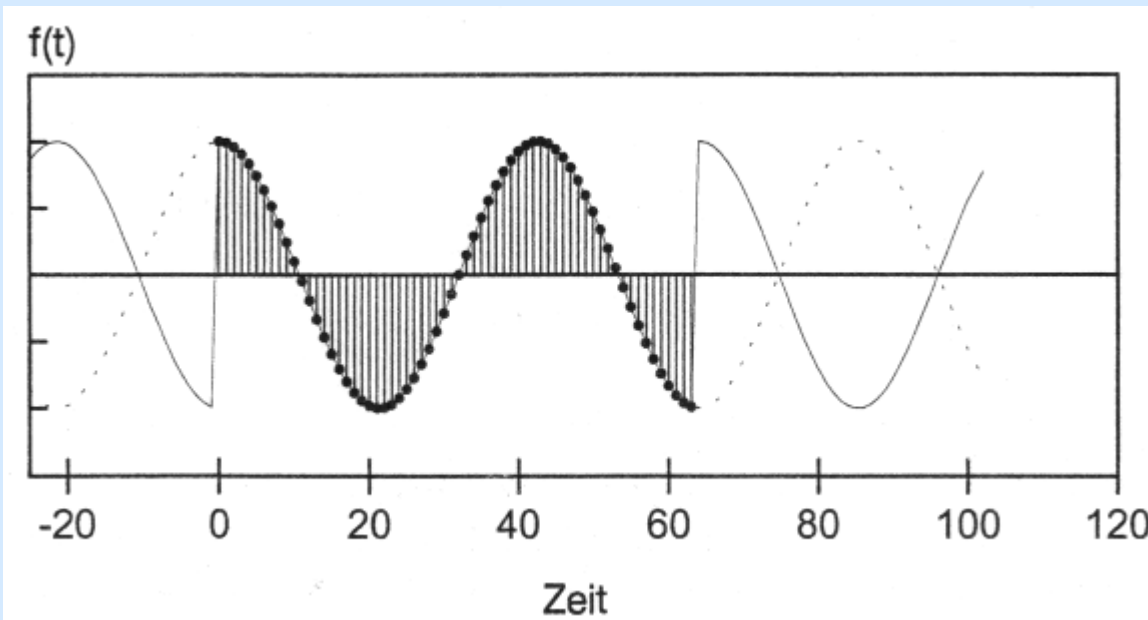


Digitales Speicheroszilloskop

Exkurs: Fouriertransformation und FFT einer zeitabhängigen Funktion $f(t)$:

Einschränkung für real gemessene Signale:

1. Messung nur in beschränktem Zeitintervall $t = 0 \dots T$ möglich
2. Abtastung des Messsignals nur an diskreten Punkten möglich $f_n = f(n \cdot \Delta t)$
3. Periodische Fortsetzung des Messintervalls

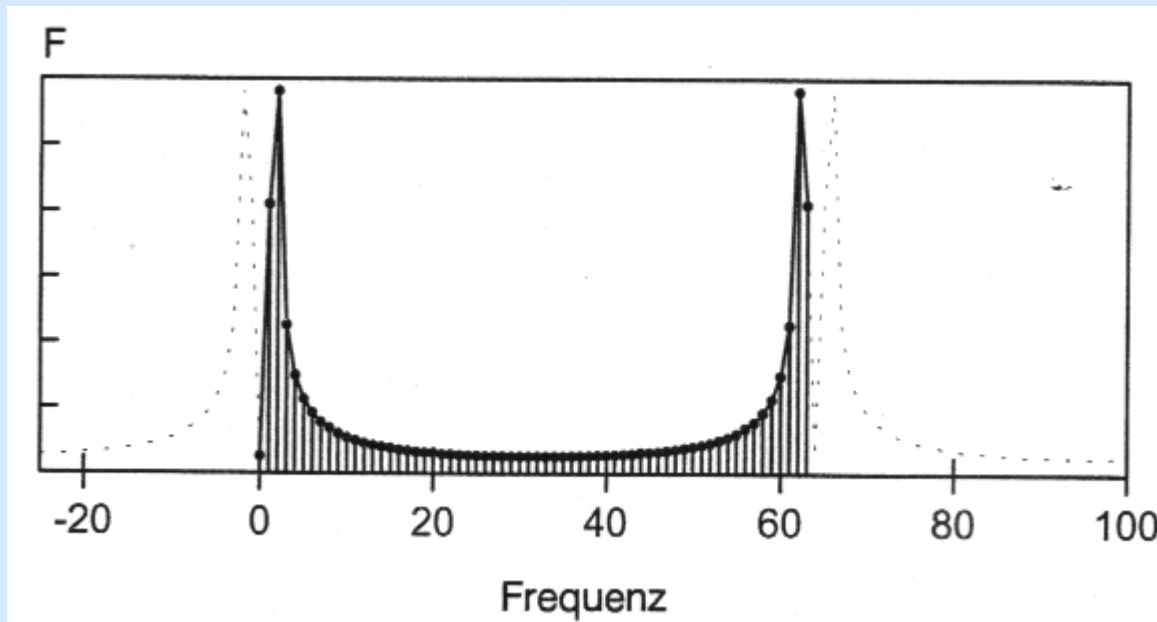


$$\Delta\omega \sim \frac{1}{T}$$
$$\omega_{\max} \sim \frac{1}{\Delta t}$$

Digitales Speicheroszilloskop

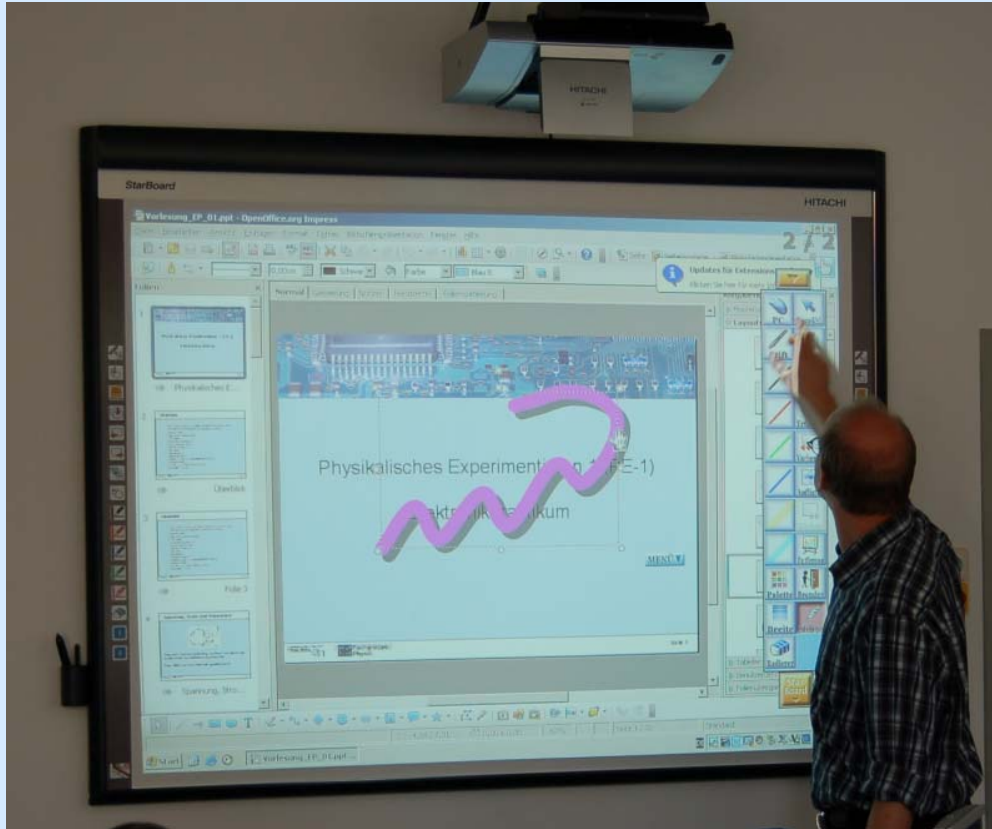
Exkurs: Fouriertransformation und FFT einer zeitabhängigen Funktion $f(t)$:

Folgen für die Fouriertransformierte: $\Delta\omega \sim \frac{1}{T}$ $\omega_{\max} \sim \frac{1}{\Delta t}$



FFT (Fast Fourier Transform): schneller mathematischer Algorithmus zur Berechnung der diskreten Fouriertransformation (nach Cooley und Tukey)

Präsentationsmöglichkeiten



StarBoard:

Präsentation PDF / Powerpoint
(wie gewohnt)

StarBoard-Software: Tafelfunktion

Übertragung von den Arbeitsplätzen:

PC-Bildschirm → VNC

USB-Kamera mit Schwanenhals

