



Technische Grundlagen der Informatik

WS 2023/24

Teil 1: Elektrotechnik

1- Grundbegriffe der Elektrotechnik

Dr. Solveig Schüßler



1. Grundbegriffe der Elektrotechnik
2. Stromkreis-(gesetze) und Arbeit und Leistung
3. Elektrisches Feld und Kondensator
4. Magnetisches Feld und Spule
5. Wechselspannung und Wechselstrom
6. Leitungsmodell für Halbleiter und pn-Übergang / Diode
7. Transistor und Klausurvorbereitung



- [Bü1] Büttner, Wolf-Ewald: *Grundlagen der Elektrotechnik 1*; Oldenbourg-Verlag, ISBN 3-486-27295-0
- [Bü2] Büttner, Wolf-Ewald: *Grundlagen der Elektrotechnik 2*; Oldenbourg-Verlag, ISBN 3-486-27296-9
- [Mei] Meister, Heinz: *Elektronische Grundlagen*; Vogel Buchverlag; ISBN 3-8023-1519-7
- [Schü] Schütt, Reiner Johannes: *Elektrotechnische Grundlagen für Wirtschaftsingenieure*; Springer Vieweg
- [Pla] Pläßmann, Wilfried und Schulz, Detlef: *Handbuch Elektrotechnik*; Springer Vieweg

- [Beu] Beuth, Klaus und Beuth, Olaf: *Elementare Elektronik*; Vogel Buchverlag; ISBN 3-8023-1536-7



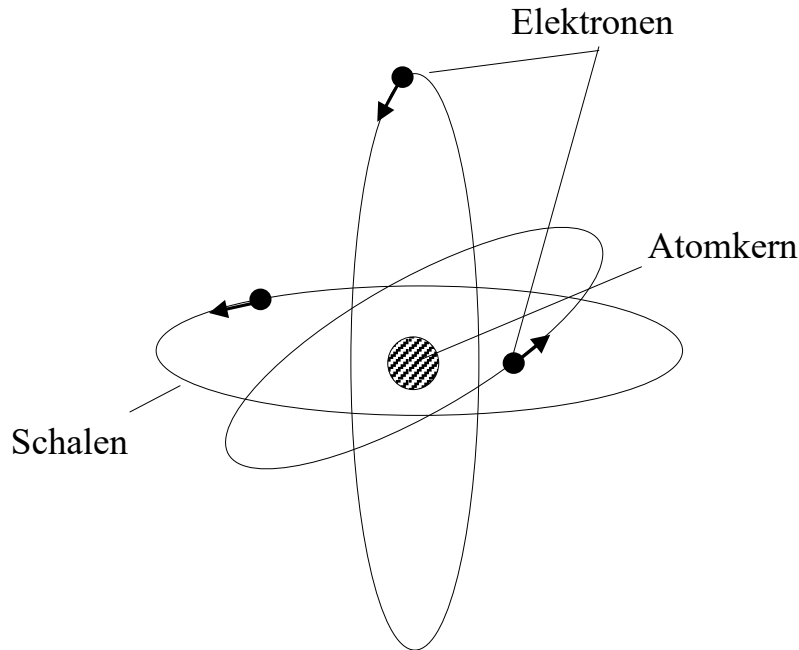
1. Grundbegriffe der Elektrotechnik



- Elektrische Ladung
- Elektrische Stromstärke
- Stromdichte
- Elektrische Spannung
- ...



Atome und Elektronen – Ein einfaches Atommodell



- Atomkern und Elektronen ziehen sich an: es wirken elektrische Kräfte

Valenzelektronen:

- sind die Elektronen der äußeren Schale
- Bestimmen das elektrische und chemische Verhalten des Stoffes



Elektrische Ladung Q

- Ursache für die elektrischen Kräfte sind elektrische Ladungen (und das Feld, das diese Ladung aufbaut)
- ! Es gibt zwei entgegengesetzte Ladungen
- Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab
- Ungleichnamige Ladungen ziehen sich an

Definition:

- Ladung des Atomkerns: positiv
- Ladung der Elektronen: negativ



Elektrische Ladung Q

- Kleinste Ladung:
Elementarladung $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$
- Ladung eines Elektrons
 $Q_{\text{Elektron}} =$
- Ladung eines Protons:
 $Q_{\text{Proton}} =$



Eigenschaften: Elektrische Ladung Q

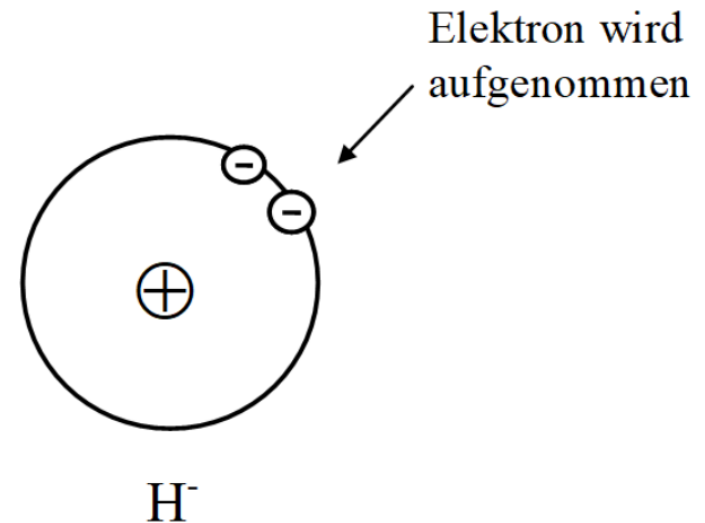
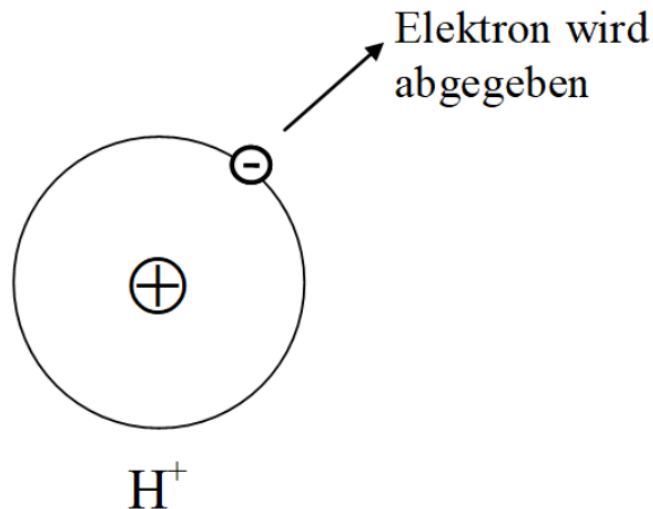
- Formelzeichen Q
- $[Q] = \text{C (Coulomb)} = \text{A} \cdot \text{s}$
- $Q = N \cdot e$
- $Q = 1\text{C}$ entspricht ungefähr der Ladung von $6,25 \cdot 10^{18}$ Elementarladungen e
- Die Ladung Q ändert sich nur durch Ladungszufluss oder -abfluss
- Die Ladung ist stetig und springt nicht



Erinnerung / Begriffe

Ionen:

- positiv oder negativ geladene „Atome“ (sie haben eine bestimmte Ladung Q)
- sie entstehen durch Abgabe oder Aufnahme von Elektronen





Elektrischer Strom

- Elektrischer Strom = gerichtete Bewegung von Ladungen
- In Elektrotechnik meist Bewegung von Elektronen
- Damit elektrischer Strom fließen kann, müssen genügend **frei bewegliche Ladungsträger** vorhanden sein!



Leitertypen

(nach Dichte der frei beweglichen Ladungsträger)

Leiter

Hohe Dichte
frei beweglicher
Ladungsträger

Ionenleiter:
 Elektrolyte
Elektronenleiter:
 Metalle

Halbleiter

Leiten nur unter
bestimmten
Bedingungen
Valenzelektronen durch
Energiezufuhr (Licht,
Wärme, El. Energie...)
frei

Bsp: Si, Se, Ge, GaAs

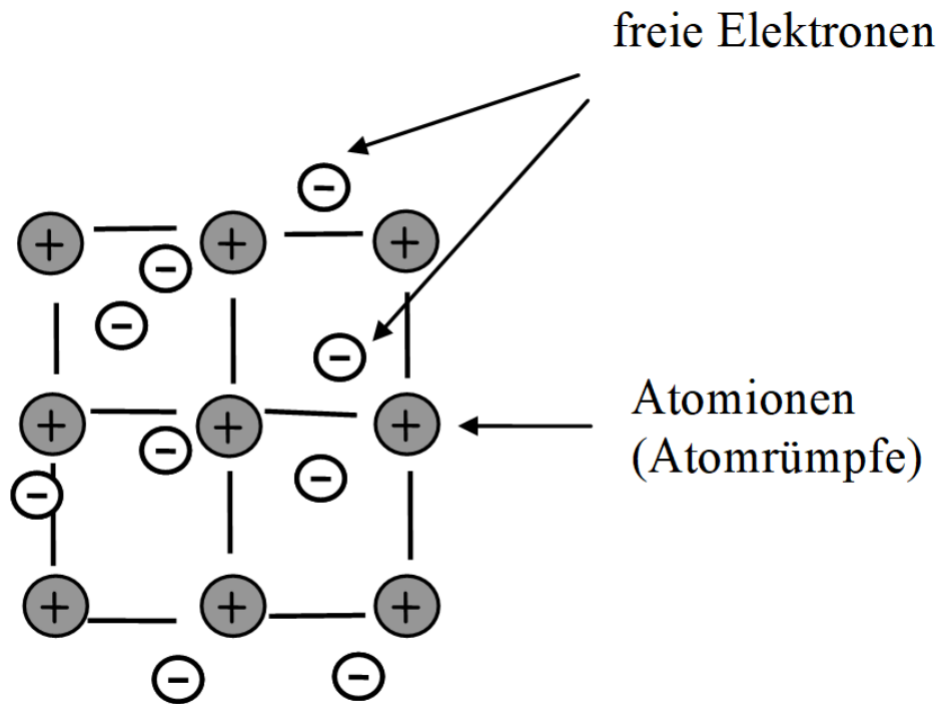
Nichtleiter

Nur wenige frei
bewegliche
Ladungsträger

Bsp: Kunststoffe,
Gummi, Glas,
Porzellan, reines
Wasser, bestimmte
Gase



Metallbindung



Viele freie/frei bewegliche Elektronen ermöglichen

- gute elektrische Leitfähigkeit
- gute Wärmeleitfähigkeit

Wärmeleitfähigkeit wird zudem auch durch die Schwingungen des Metallgitters ermöglicht

Nur durch eine äußere Kraft (Spannung) werden die **frei beweglichen Elektronen in eine bestimmte Richtung bewegt**
→ **elektrischer Strom**



Elektronenleiter (Bemerkungen)

(1) Elektronengeschwindigkeit in Metallen $\approx 3\text{mm/s}$

Aber Ausbreitung des Anstoßimpulses:

Lichtgeschwindigkeit $c \approx 300.000\text{km/s} = 30\text{cm/ns}$



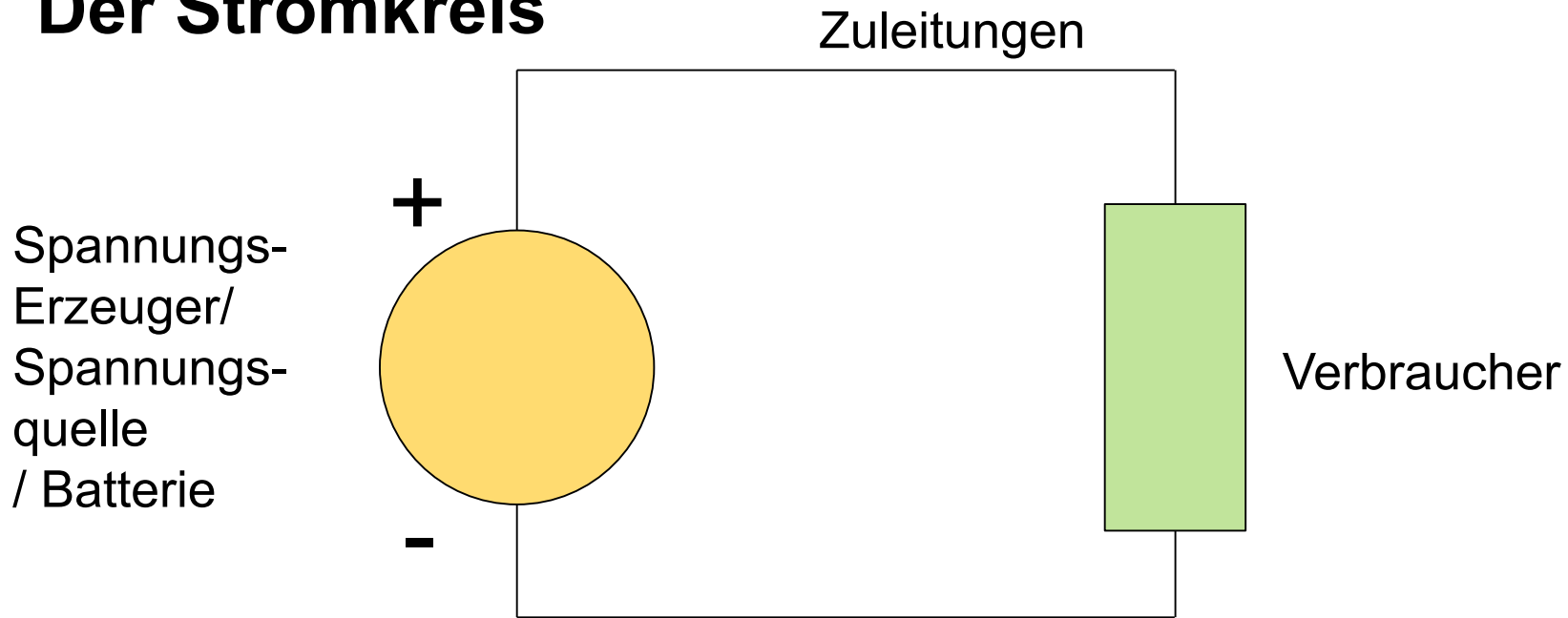
Elektronenleiter (Bemerkungen)

(2) Anzahl beweglicher Ladungsträger in 10cm
Kupferdraht mit 2,5mm² Querschnitt

$(\rho_{Cu} = 8,96 \text{ g/cm}^3, M = 64 \text{ g/mol}, N_A = 6,022 \cdot 10^{22} \text{ 1/mol})$
Kupfer kann 1 Valenzelektron abgeben)



Der Stromkreis

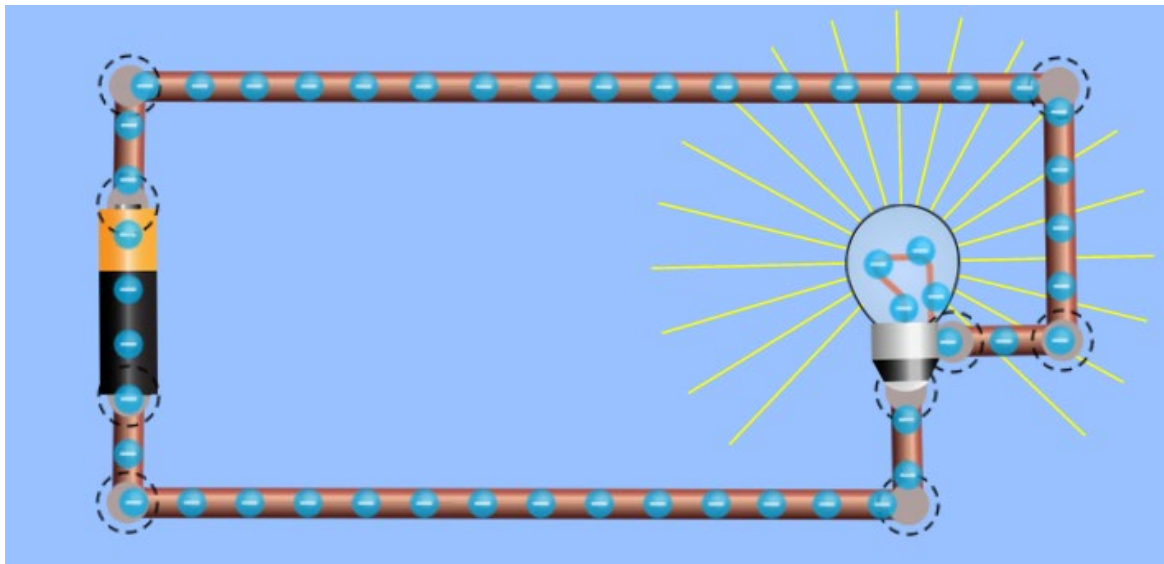


Damit ein Stromfluss zustande kommt, sind folgende Bedingungen notwendig:

- Es muss eine Kraft geben, die die gerichtete Bewegung der freien Ladungsträger verursacht.
- Der Stromfluss kommt nur bei einem **geschlossenen Stromkreis** zustande.



<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/einfache-stromkreise/downloads/stromkreise-simulation>





Stromkreis – Technische Stromrichtung/ Physikalische Stromrichtung

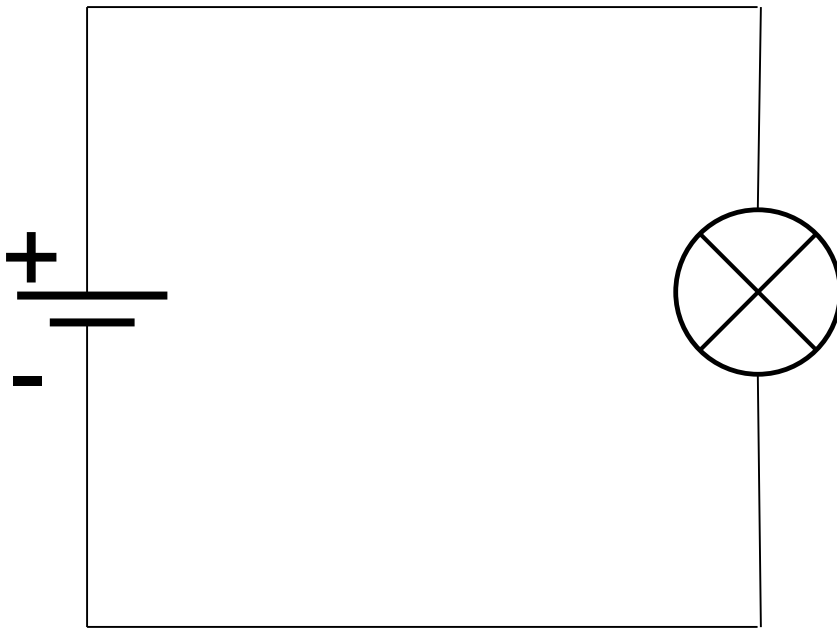
Warum diese Verwirrung?

- Die Stromflussrichtung wurde definiert, bevor die physikalische Ursache des Stromflusses bekannt war (nur Effekte bekannt).
- André-Marie Ampère legte die Stromrichtung willkürlich von fest (von Plus zu Minus)
→ Dies wird als Technische Stromflussrichtung bezeichnet
- Erst später stellte man fest, dass der Stromfluss eine Bewegung von Elektronen in die entgegengesetzte Richtung ist.

Trotzdem wird weiterhin zur Analyse elektrischer Schaltungen die **technische Stromrichtung** verwendet!



Stromkreis – Technische Stromrichtung



Willkürliche Festlegung!
Deshalb merken und beachten!

Merke:

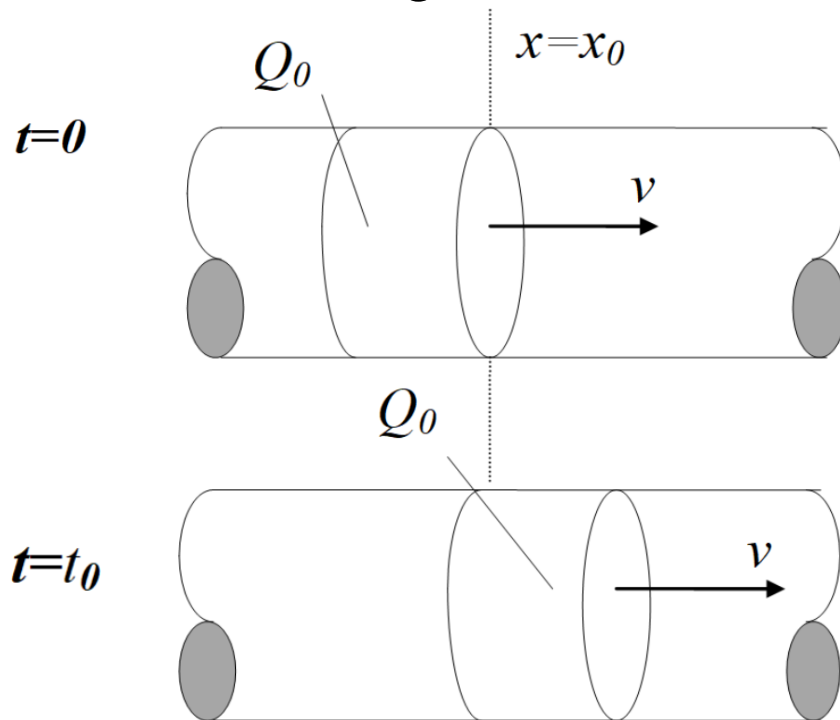
Die Elektronenstromrichtung
und die technische Stromrichtung
sind entgegengesetzt!

Falls nichts anderes angegeben ist ,
ist i.d.R. die technische Stromrichtung
gemeint!



Elektrische Stromstärke I

- Annahme: Die Elektronen bewegen sich mit konstanter Geschwindigkeit v durch den Leiter





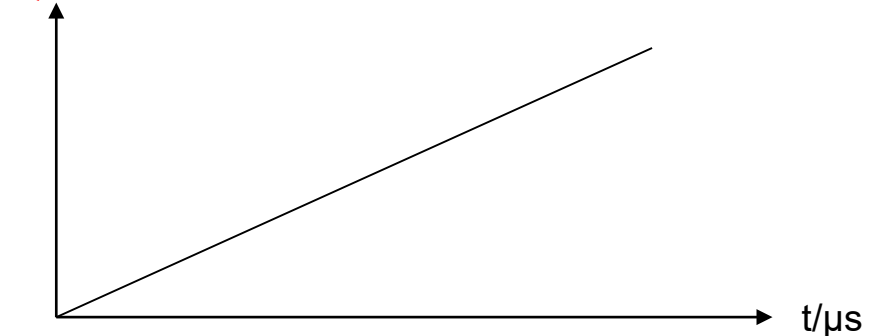
Elektrische Stromstärke I

Annahme: Die Elektronen bewegen sich mit konstanter Geschwindigkeit v durch den Leiter

- In der Zeit Δt wird dann eine bestimmte Ladung ΔQ verschoben
- Es fließt ein konstanter Strom mit der konstanten Stromstärke

$$I(t) = I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Die Ladung Q , die den Punkt x passiert
 Q / C





Elektrische Stromstärke /

Allgemeiner Fall:

kein konstanter Stromfluss / kein konstanter Ladungstransport

➤ $\Delta t \rightarrow dt$ $I(t) = \dot{q}(t) = \frac{dq(t)}{dt}$ 1. Ableitung \triangleq
Anstieg der Funktion $q(t)$

Q / C

t/us

* Die Ladung Q, die den Pkt x_0 passiert

Einschub

1. Ableitung und Anstieg





Elektrische Stromstärke /

Allgemeiner Fall:

kein konstanter Stromfluss / kein konstanter Ladungstransport

➤ $\Delta t \rightarrow dt$ $I(t) = \frac{dq(t)}{dt}$ 1. Ableitung \triangleq
Anstieg der Funktion $q(t)$

- *Die Ladungsmenge Q_0 , die in der Zeit t_1 bis t_2 die Ort x_0 passiert, errechnet sich damit zu:*

$$Q_0 = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt$$



Elektrische Stromstärke

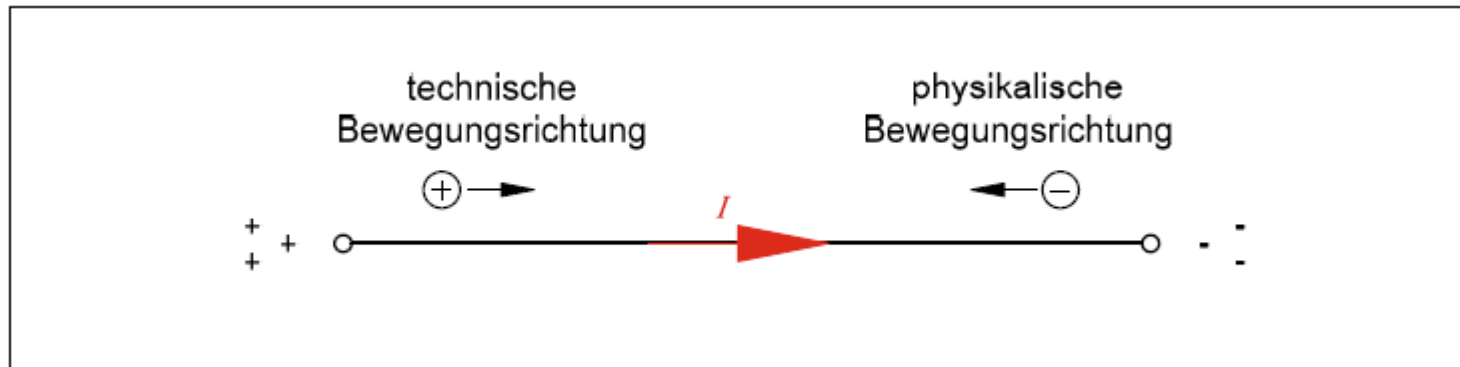
- Formelzeichen: I
- Einheit: $[I] = \frac{[Q]}{[t]} = \frac{1\text{C}}{1\text{s}} = 1\text{A}$ A - Ampere
- **GLEICHSTROM** (zeitlich konst. Verschiebung der Ladung)

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{Q_0}{t_0}$$

- Beliebige Stromverläufe $i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$
- I hat eine Richtung!
- Im unverzweigten Stromkreis ist I konstant



Elektrische Stromstärke (Strom)



Größenordnung typ. Ströme

Beispiel	Größenordnung
Blitzstrom	einige kA
PKW-Startermotoren	einige $10A$
Bemerkbarer Strom durch einen Menschen	einige mA
LCD-Quarzuhr	einige μA



Gemeinsame Übung (ähnlich Aufgabe 1)

In 1 h wird eine Ladung von 360C über eine Leitung transportiert.

- a) Wie groß ist die Stromstärke, wenn von einem gleichmäßigen Ladungstransport ausgegangen werden kann?
- b) Wie viele Elektronen wurden in der Zeit insgesamt bewegt?



Stromdichte J

- Stromstärke pro durchströmter Flächeneinheit
- Formelzeichen: J
- Einheit: $[J] = \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$
- $J = \frac{I}{A}$
- Wichtigste Belastungsgröße für elektrische Leiter.



Durch einen Kupfer-Leiter mit dem Querschnitt $1,5\text{mm}^2$ fließt ein Strom von $I=12\text{A}$. (ähnlich Aufgabe 3)

- a) Bestimmen Sie die Stromdichte im Leiter.

- b) Welchen Querschnitt müsste der Leiter haben, um eine zulässige Stromdichte von $J = 7,5 \text{ A/mm}^2$ nicht zu überschreiten? Welchen Durchmesser hat dann der Kupferdraht?



Stromdichte J

Zu große Stromdichten führen zu unzulässig hoher Erwärmung von Leiter und Isolationsmaterial und u.U. zur Zerstörung.

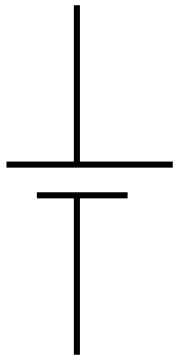
- Mehradrige Kupferleitungen müssen folgendermaßen geschützt sein (nach VDE 0100 Teil 430.6.81):
10 A bei Leiterquerschnitt $1,5 \text{ mm}^2$,
20 A bei $2,5 \text{ mm}^2$.



Aufgabe 2 und 3 – Hausaufgabe



Elektrisches Potential φ / Elektrische Spannung U

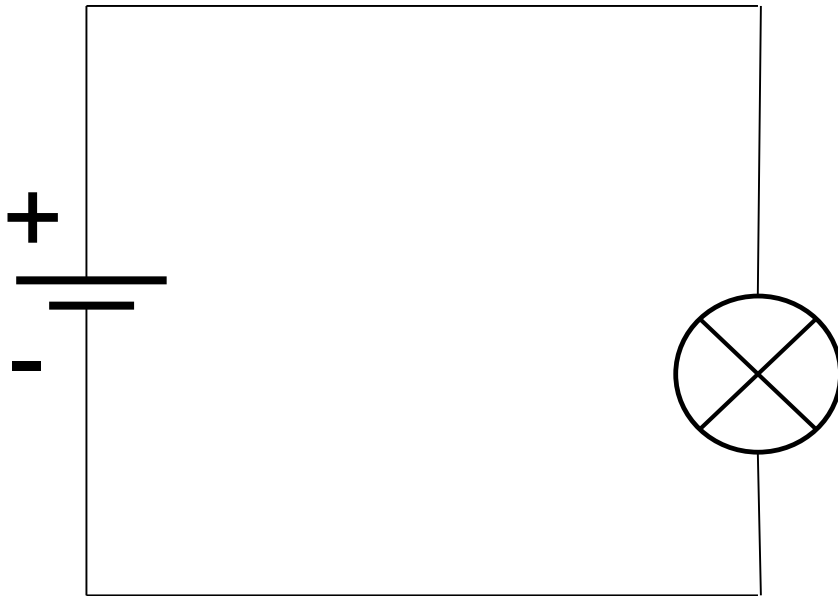


Es gilt z.B.: $\varphi_{10} = \frac{W_{10}}{Q}$

$$U_{21} = \varphi_{20} - \varphi_{10} = \frac{W_{21}}{Q}$$



Elektrisches Potential φ / Elektrische Spannung U





Elektrische Spannung U

- zwischen 2 Punkten ist gleich der Differenz ihrer Potentiale
- ist die Ursache für den elektrischen Strom
- Entspricht einem Unterschied in Elektronenkonzentration („elektrische Druck“)
- $U = \frac{W}{Q}$ Die Spannung gibt an, wieviel Arbeit pro Ladung Q für die Trennung aufgebracht wurde bzw. wieviel Arbeit pro Ladung geleistet wird



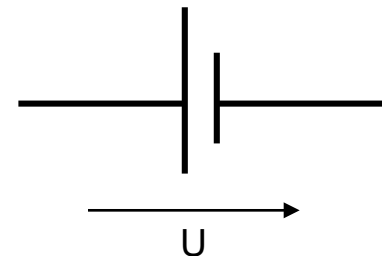
Elektrische Spannung U

- Formelzeichen: U
- Einheit:

$$[U] = \frac{[W]}{[Q]} = 1 \frac{J}{C} = 1 \frac{W * s}{A * s} = 1 \frac{N * m}{A * s} = 1 \frac{kg * m^2}{A * s^3}$$

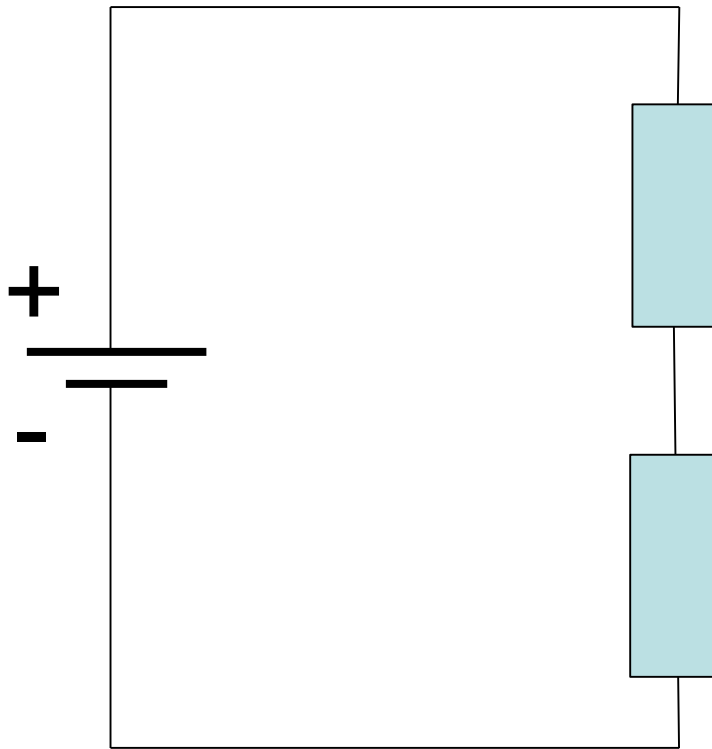
$$[U] = 1V$$

- U hat eine Richtung (+ \rightarrow -)
(vom größeren zum kleineren Potential)





- Spannungen im Stromkreis



Spannung der Quelle
bewirkt Spannung an
Verbrauchern →
Spannungsabfall am
Verbraucher

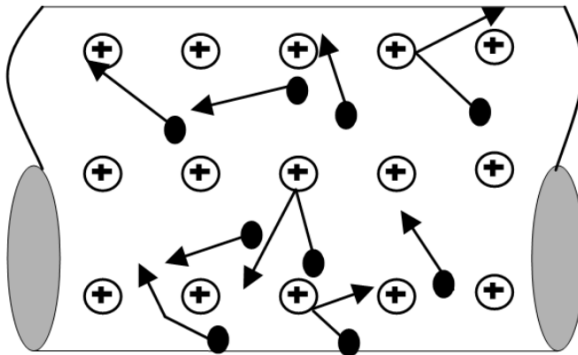


Größenordnungen typischer Spannungen (aus (2))

Beispiel	Größenordnung	Hinweis
Eingangsspannung Empfangsantenne	<i>einige</i> $10 \mu V$	Hochfrequenzspannung
Monokristalline Solarzelle	$0,5 V =$	Gleichspannung
Autobatterie	$12 V =$	Gleichspannung
Typische zulässige Berührungsspannung	$50 V \sim$	Wechselspannung
Netzspannung (Haushalt)	$1 \times 230 V \sim$	Einphasige Wechselspannung
Niederspannung	$3 \times 400 V \sim$	Dreiphasige Wechselspannung
Mittelspannung	$3 \times 20 kV \sim$	Dreiphasige Wechselspannung
Hochspannung	$3 \times 110 kV \sim$	Dreiphasige Wechselspannung
Höchstspannung	$3 \times 380 kV \sim$	Dreiphasige Wechselspannung
Elektrostatische Aufladung bei einem Gewitter	<i>bis zu einigen</i> $100 MV$	Gleichspannung

Elektrischer Widerstand

- Ladungsträger können Leiter nicht ungehindert durchströmen



Elektronenbewegung
im Metall

- ist ein Maß dafür, wie stark die Bewegung der Ladungsträger gehemmt wird
- Ist abhängig von Materialeigenschaften und Geometrie des Leiters

https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/mathematisch-naturwissenschaftliche-faecher/physik/unterrichtsmaterialien/e_lehre_1/ohm/spezwider.htm



Elektrischer Widerstand R

- Bestimmung aus Geometrie- und Materialeigenschaften
(für einen Metalldraht)

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{l}{A}$$

l – Länge des Drahtes

A – Querschnittsfläche

κ – spezifischer Leitwert

ρ – spezifischer Widerstand

(κ, ρ – Materialkonstanten)

	spezifischer Widerstand ρ $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ $= \mu\Omega \cdot \text{m}$	Leitfähigkeit κ $\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$ $= 1\text{M} / \Omega \cdot \text{m}$ $= 1\text{MS/m}$
Silber	0,016	62
Kupfer	0,018	56
Gold	0,022	44
Aluminium	0,028	36
Zink	0,06	16,7
Messing	0,07	14,3
Eisen	0,1	10
Platin	0,106	9,4
Zinn	0,11	9,1
Blei	0,208	4,8
Kohle	66,667	0,015



Elektrischer Widerstand

- Formelzeichen: R
- $[R] = 1\Omega$ (1 Ohm) = $1V / 1 A$
- Elektrische Definition:
Der elektrische Widerstand R beträgt 1Ω , wenn bei einer Spannung von $1V$ genau $1A$ durch den Leiter fließt.
- Schaltsymbol des elektrischen Widerstandes:

$R \geq 0\Omega$!!! Der Widerstand ist NIE negativ!



Beispielrechnung



Temperaturabhängigkeit des Elektrischen Widerstands

- Der elektrische Widerstand eines Materials ist temperaturabhängig!
- Der spezifische Widerstand ρ wird daher für eine Normtemperatur angegeben.
- Angabe der relativen Änderung des elektrischen Widerstandes eines Materials bei Änderung der Temperatur: linearer Widerstands-Temperaturkoeffizient α
- α ist materialabhängig, z.B.
 - $\alpha_{cu} \sim 3,9 \cdot 10^{-3} K^{-1}$
 - $\alpha_{Konstantan} \sim 0,01 \cdot 10^{-3} K^{-1}$
 - $\alpha_{Si} \sim -75 \cdot 10^{-3} K^{-1}$



Temperaturabhängigkeit des Elektrischen Widerstands

- Für metallische Leiter gilt näherungsweise:

$$R(T) = R_{20}(1 + \alpha \cdot (T - 20 \text{ °C}))$$

oder

$$R(T) = R_{20}(1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

(ΔT – Temperaturänderung zu 20 °C)

Vorgehen:

1. Bestimmen des Widerstand bei $T=20^\circ \text{ C} \rightarrow R_{20}$
2. Berechne auf Basis dieses Widerstandes R_{20} den Widerstand bei der gegebenen Temperatur $R(T)$



Temperaturabhängigkeit des Elektrischen Widerstands

- Kaltleiter (PTC): $\alpha > 0$
 - Leiten im kalten Zustand besser
 - Widerstand steigt mit steigender Temperatur
 - z.B.: alle Metalle, verschiedene Verbindungshalbleiter
- Heißleiter (NTC): $\alpha < 0$
 - Leiten im heißen Zustand besser
 - Widerstand sinkt mit steigender Temperatur
 - z.B. reine Halbleiter, verschiedene Verbindungshalbleiter, verschiedene metallische Legierungen



Elektrischer Leitwert

- Umkehrwert des Widerstandes R
- Gibt an, wie gut die Ladungsträger das Material „durchqueren“ können
- Formelzeichen: G
- $G = \frac{1}{R}$
- Einheit: $[G] = 1S = \frac{1}{1\Omega} = 1 \frac{A}{V}$ S – *Siemens*



Aufgabe 4 a-c