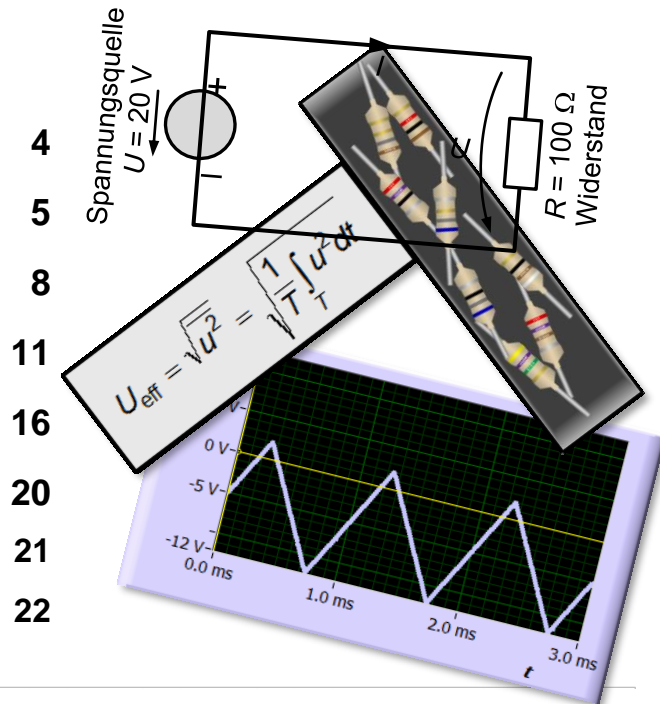


# Elektrische Grundgrößen

## Inhalt dieses Kapitels:

- Ladung
- Spannung
- Strom
- Widerstand
- Elektrische Leistung und Energie
- Wechselspannung –und strom
  - Rechnung mit Effektivwerten
  - Pegelrechnung



## Lernziele dieses Kapitels:

Elektrotechnik ist eine wichtige Grundlage der Informatik. Oft werden Begriffe wie *Spannung*, *Strom*, *Leistung*, *Energie* verwendet, ohne deren Zusammenhang zu kennen. Dieses Kapitel klärt ☺

Taxonomie Kompetenzart	Kennen	Können	Verstehen
<b>Fachkompetenz</b>	Unterschied zwischen elektr. Strom und elektr. Spannung; Unterschied zwischen Leistung, Energie, Arbeit & Wirkungsgrad Elektrischer Widerstand, Ohm'sches Gesetz; logarithm. Pseudoeinheit „dB“	Einheit physikalischer Größen & plausible Abschätzung deren Größenordnung; Berechnen der links genannten Größen in einfachen Gleich- und Wechselstromkreisen. Umrechnung von elektrischer in mechanische Leistung & Energie	Strom-Spannungs-Kurve eines nicht-ohmschen Widerstandes (d.h. der sich mit der Spannung ändert); Beurteilung, ob von einer Spannungsquelle Lebensgefahr ausgeht – oder nicht
<b>Methodenkompetenz</b>	Messen von Strom, Spannung und Widerstand in elektrischen Stromkreisen; Routinierter Umgang mit dem Taschenrechner; Anwendung der Widerstandsreihen E12 und E24		
<b>Persönliche &amp; soziale Kompetenz</b>	Pünktlicher Start der Vorlesung! Literaturhinweise, Standort der Bücher in der Bibliothek	Aktiv. Einbringen in die Vorlesung: o Eigene Verständnisfragen o Antwort auf „Klickerfragen“ o Hinweis auf eventuelle Fehler im Skript oder an der Tafel	Freiwilligkeit des Vorlesungsbesuchs;

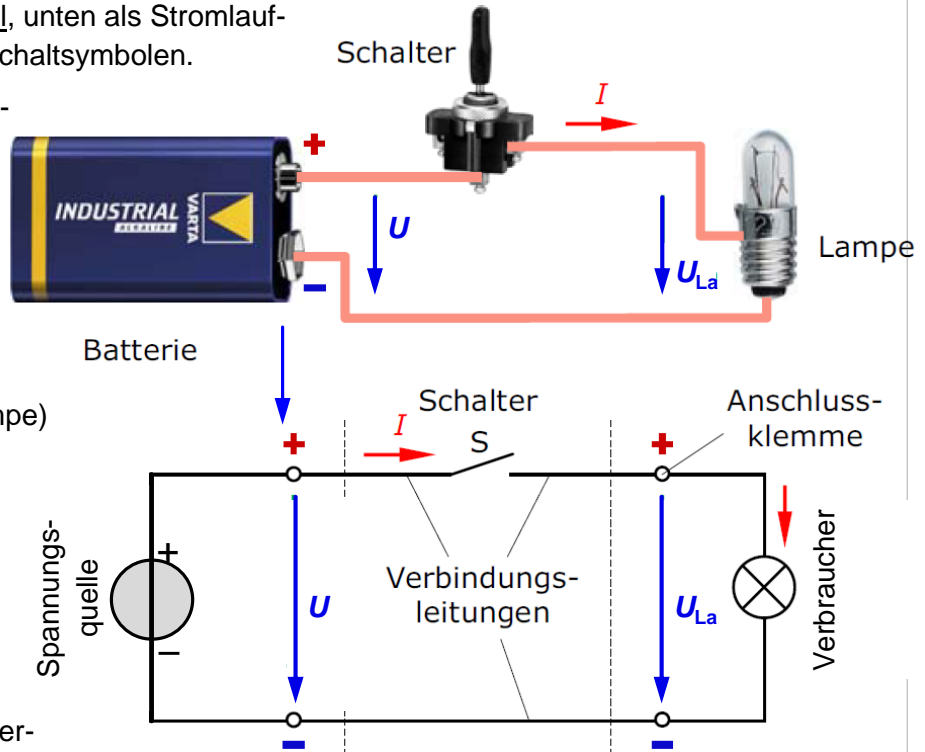
## Elektrischer Stromkreis – real und symbolisch

### ■ Überblick: Elektrische Grundgrößen, die in diesem Kapitel eingeführt werden:

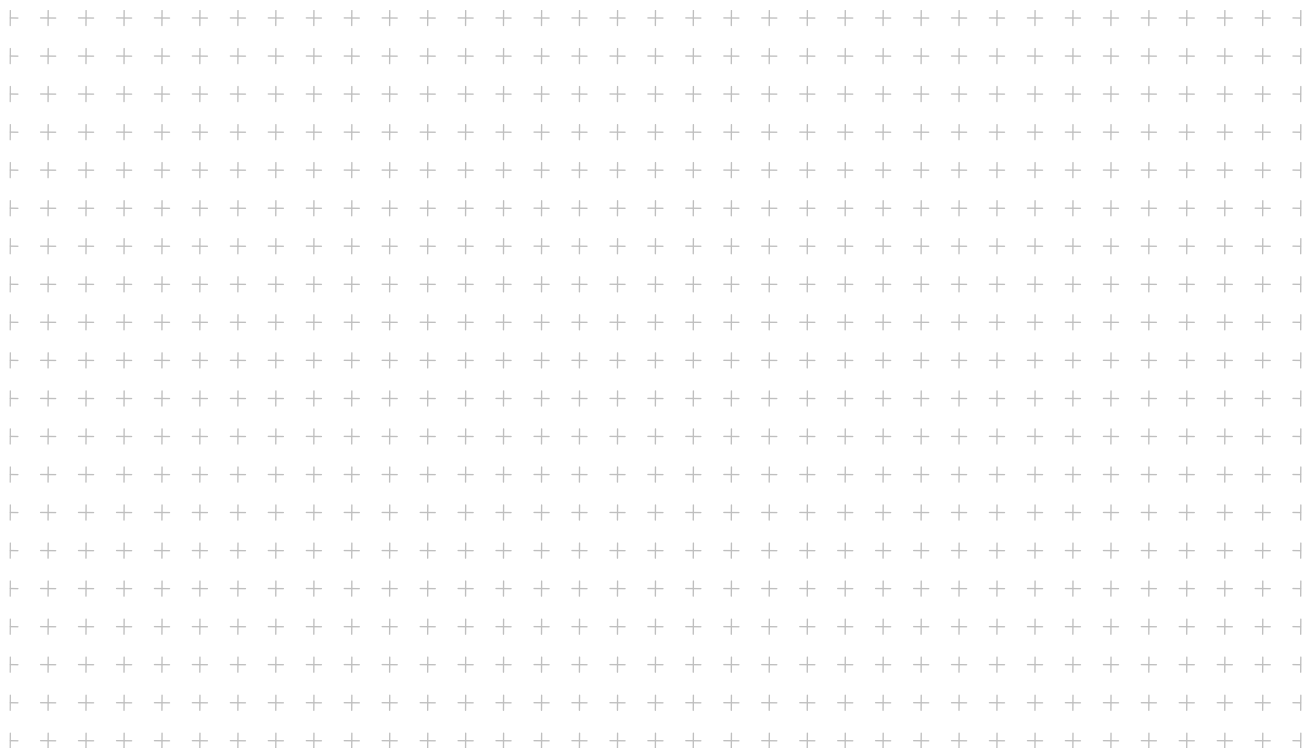
Rechts im **Bild** dargestellt ist ein Stromkreis mit Batterie und Lämpchen – oben real, unten als Stromlaufplan mit den entsprechenden Schaltsymbolen.

Alle Größen, die auf den folgenden Seiten eingeführt werden, sind in diesem einfachen Stromkreis bereits enthalten:

- Die **Spannungen**
  - ⇒  $U$  an der Quelle, und
  - ⇒  $U_{La}$  am Verbraucher (Lampe)
- Der **Strom  $I$**
- Der elektrische **Widerstand** des Verbrauchers
- Die **Ladung** der Batterie
- Die **Energie** der Batterie
- Die von der Quelle an den Verbraucher übertragene elektrische **Leistung**



■ nach [KläEF], mit freundlicher Genehmigung





## Genereller Umgang mit naturwissenschaftlichen Größen in Formeln

### ■ Physikalische Größe = Zahlenwert · Vorsatzfaktor · Einheit

Naturwissenschaftliche (und damit auch elektrische) Phänomene werden mit Hilfe physikalischer Größen dargestellt. Alle Größen bestehen aus einem *Zahlenwert* und der dazugehörigen *Einheit*, die mit dem Einheitenzeichen ausgedrückt wird. Die jeweils zu verwendenden Einheiten legt das sog. *internationale SI-Einheitensystem* fest. Beispielsweise ist die Grundeinheit für die Entfernung der Meter, kurz ‚m‘. Die Entfernung  $d$  von Rosenheim nach Flensburg beispielsweise lässt sich damit schreiben als:

$$\text{Formelzeichen} \quad d = 1002000 \cdot \text{Einheit} \quad \text{m} = 1002 \cdot 10^3 \cdot \text{Vorsatzfaktor} \quad \text{m}$$

Zahlenwerte mit sehr vielen Ziffern sind nicht nur unübersichtlich, sondern erfordern, wenn sie in verschiedenen Gleichungen für die Berechnung anderer Größen Verwendung finden, sehr viel Schreib- bzw. Tipparbeit. Bei sehr großen oder sehr kleinen Größen werden hier üblicherweise *Vorsatzfaktoren* in  $10^{\text{er}}$ -Potenzen genutzt.

### ■ SI-Präfixe

Anstelle der *Vorsatzfaktoren* werden auch *Vorsatzzeichen* benutzt, die jeweils eine bestimmte Zehnerpotenz repräsentieren. Die oben dargestellte Entfernung  $d$  lässt sich so beispielsweise auch wie folgt ausdrücken:

$$d = 1002000 \cdot \text{m} = 1002 \cdot \text{km} = 1,002 \text{ Mm} = 1002000000 \cdot \text{mm}$$

Im internationalen SI-Einheitensystem sind nicht nur die Einheiten genormt, sondern auch die Vorsatzzeichen, *SI-Präfixe* genannt. Die gebräuchlichsten finden Sie in folgenden **Tabellen**:

Präfix	Kurzform	Faktor	
Tera	T	1000 000 000 000	$10^{12}$
Giga	G	1000 000 000	$10^9$
Mega	M	1000 000	$10^6$
Kilo	k	1000	$10^3$

Präfix	Kurzform	Faktor	
Dezi	d	0,1	$10^{-1}$
Zenti	c	0,01	$10^{-2}$
Milli	m	0,001	$10^{-3}$
Mikro	$\mu$	0,000 001	$10^{-6}$
Nano	n	0,000 000 001	$10^{-9}$
Piko	p	0,000 000 000 001	$10^{-12}$

### Übungsaufgabe Geben Sie folgende Größen mit SI-Präfixen an (Taschenrechner!):

- a) Kraftwerksleistung (Einheit Watt (W))  $P = 3 \cdot 10^3 \text{ kW}$
- b) Elektr. Widerstand (Einheit Ohm ( $\Omega$ ))  $R = 10 \text{ V} / 2 \text{ mA}$
- c) Elektrische Kapazität (Einh. Farad (F))  $C = 0,02 \text{ ms} / 100 \text{ k}\Omega$
- d) Lichtgeschwindigkeit (Einheit m/s)  $c = 300 \text{ m} / \mu\text{s}$

# Positive und negative Ladungen im Atommodell

## Elektrische Ladung

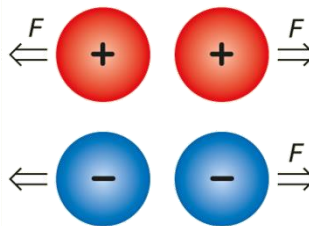
Im Alltag kommt es gelegentlich vor, dass sich Gegenstände (oder Personen!) elektrisch aufladen. Beispielsweise entsteht beim Reiben von Kunststoffen mit Wolle oder Haaren eine elektrische Ladung, die sich durch elektrische Entladungen (Knistern beim Ausziehen eines Pullovers) oder durch Anziehungskräfte (zu Berge stehende Haare) bemerkbar macht.

Dabei macht es einen Unterschied, ob Sie **negative** oder **positive** Ladungen erzeugt haben. Wie im **Bild** rechts illustriert, stoßen sich gleichartige Ladungen ab, ungleichartige hingegen ziehen sich an.

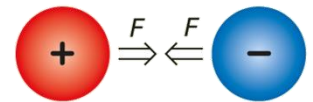
Die **elektrische Ladung** wird durch das Formelzeichen **Q** beschrieben, die Einheit ist

$$[Q] = C \text{ (Coulomb}^1\text{)}$$

Abstoßung zwischen gleichartigen Ladungen



Anziehung zwischen ungleichartigen Ladungen



■ aus [BumilFE], mit freundl. Genehmigung

## Aufbau der Atome aus (geladenen) Teilchen

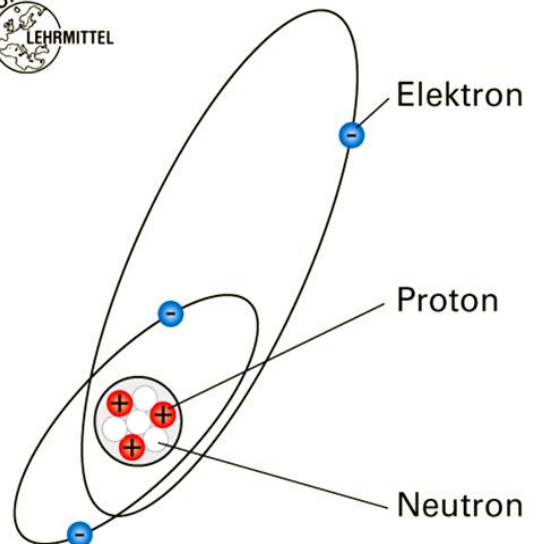
Das Bohr'sche<sup>2)</sup> Atommodell beschreibt den Aufbau der Atome aus einem Kern und einer Hülle, aus folgenden nicht-teilbaren Elementarteilchen:

- Der **Kern** besteht aus positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen.
- Die **Hülle** besteht aus negativ geladenen Elektronen, die um den Atomkern rotieren. Die elektrische Anziehungskraft des positiv geladenen Kerns wirkt dabei entgegen der Fliehkraft.

Protonen und Elektronen stellen die kleinsten möglichen Ladungen dar: Diese sog. **Elementarladung** beträgt

$$e = \pm 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

Die Atomhülle kann man sich aus verschiedenen Schalen (Elektronenbahnen) zusammengesetzt denken, die grundsätzlich von innen nach außen aufgefüllt werden. Beispielsweise enthält das Lithium-Atom (im **Bild** rechts) zwei Elektronen auf der innersten Schale und eines auf der äußersten Schale. Da diese äußerste Schale nicht vollständig gefüllt ist, nennt man dieses **Valenzelektron**. Nach außen wirkt das Atom elektrisch neutral, weil sich die Ladungen der drei Protonen und Elektronen kompensieren.



■ Isotop  $Li^7$  mit 4 Neutronen, aus [BumilFE], mit freundlicher Genehmigung

## Ladung durch Ionen

Atome, deren Anzahl Protonen und Elektronen sich unterscheiden, nennt man **Ionen** – je nachdem, welche Teilchenart überwiegt spricht man von positiven und von negativen Ionen.

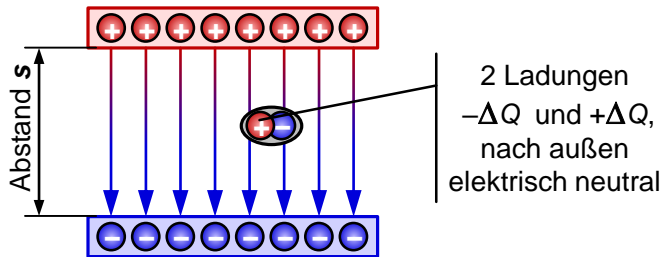
<sup>1)</sup> Charles Coulomb (1736-1806), franz. Physiker

<sup>2)</sup> Niels Bohr (1885-1962), dänischer Physiker

# Spannung = zur Trennung aufgewandte Arbeit pro Ladung

## Definition der Spannung

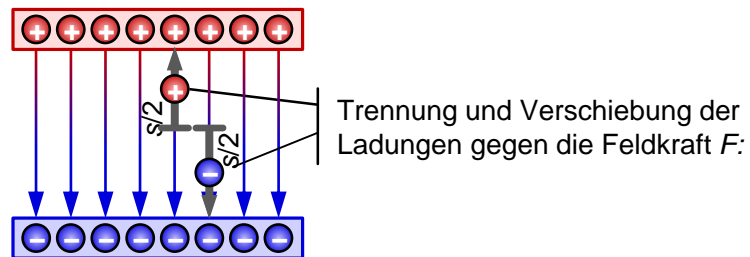
In Spannungsquellen werden positive und negative Ladungen  $\Delta Q$  voneinander getrennt, siehe folgendes Bild mit einem veranschaulichenden Gedankenexperiment:



- Zwei Probeladungen  $-\Delta Q$  und  $+\Delta Q$  liegen in einem elektrischen Feld. Solange sie zusammengehalten werden, wirken Sie nach außen elektrisch neutral – es wirkt insgesamt keine Kraft auf sie. Alternativ lässt sich das auch so erklären, dass die auf die beiden Ladungen wirkenden Kräfte gleich groß sind, aber entgegengesetztes Vorzeichen haben.



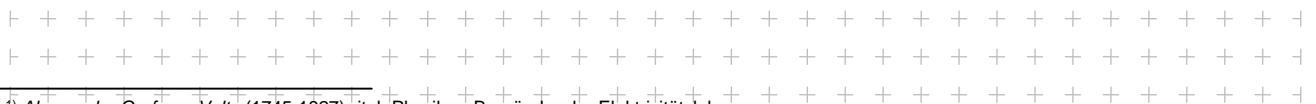
- Werden die beiden Ladungen nun entgegen der im Feld auf sie wirkenden Kräfte voneinander getrennt, bis sie auf der jeweiligen Platte ankommen, so muss insgesamt die **mechanische Arbeit**  $W = F \cdot s$  aufgebracht werden. Die im elektrischen Feld gespeicherte **potentielle Energie** wurde somit um einen kleinen Beitrag  $\Delta E_{\text{pot}} = W$  erhöht!



- Das Maß für die pro Ladung  $\Delta Q$  aufgebrachte Arbeit  $W$  ist die **elektrische Spannung**  $U$ :

$$U = W / \Delta Q$$

mit der Einheit  $[U] = \text{J/C} = \text{Nm/C} = \text{Ws/C} = \text{V (Volt}^1\text{)}$



<sup>1)</sup> Alessandro Graf von Volta (1745-1827), ital. Physiker, Begründer der Elektrizitätslehre



Ladung

Spannung

Strom

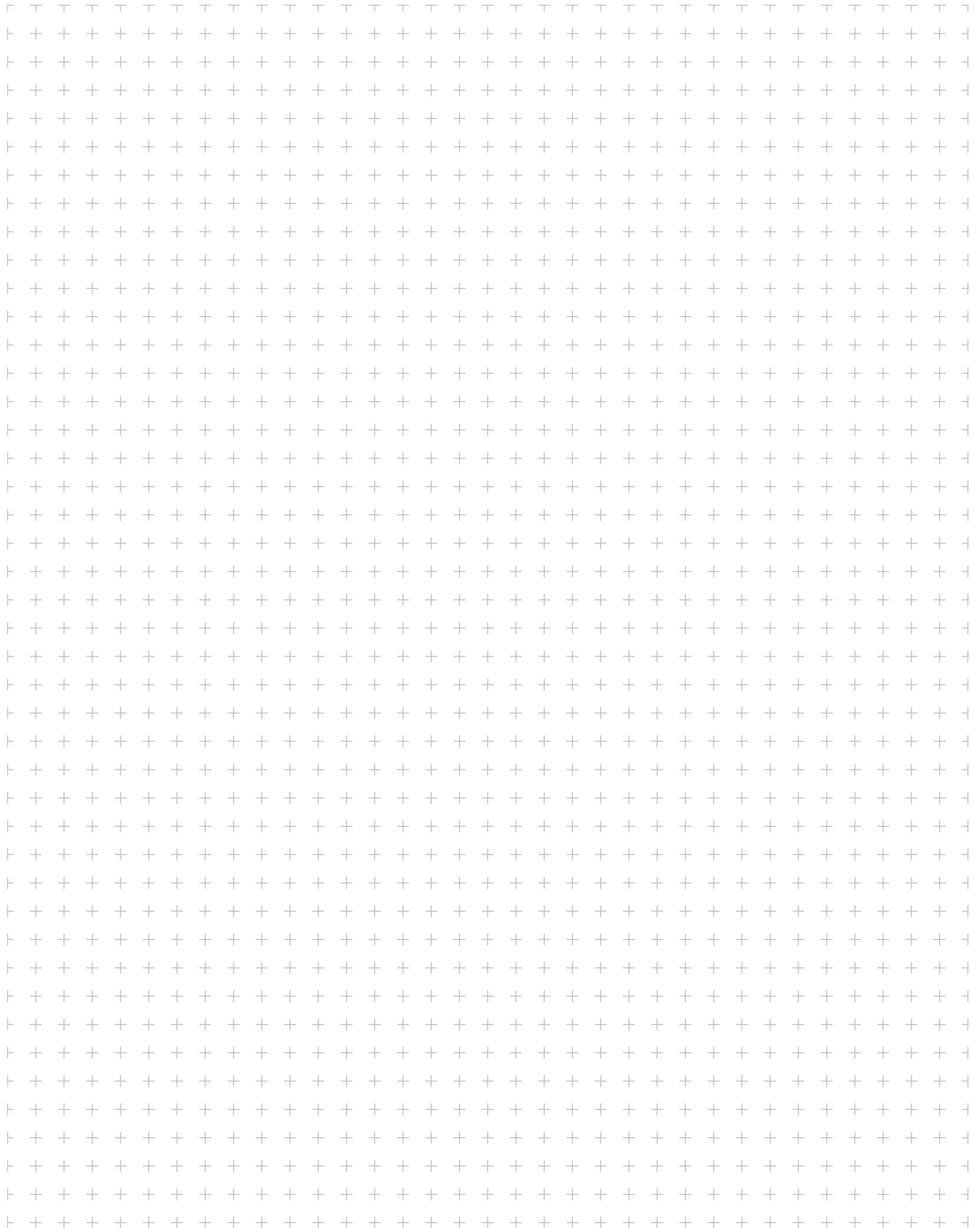
Widerstand

Elektrische Leistung & Energie

Wechselspannung & -strom

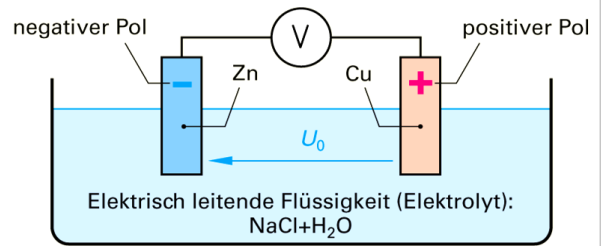
Pegel

## Arten der Ladungstrennung (= Spannungserzeugung) in der Praxis



## Galvanische Elemente als Spannungsquellen

Ein *galvanisches Element* (auch *Zelle* genannt) gewinnt elektrische Energie aus chemischer Energie. Zwischen verschiedenen Metallen, die gemeinsam durch ein leitendes *Elektrolyt* verbunden sind, findet Ladungstrennung mittels chemischer Reaktion statt, siehe **Bild**:





aus [BumilFE], mit freundlicher Genehmigung

Man unterscheidet *Primär*- und *Sekundärelemente*:

### Primärelemente

Die chemische Energie im Element kann nur ein einziges Mal in elektrische umgewandelt werden, danach ist die Zelle verbraucht. Systeme aus mehreren Zellen nennt man *Batterie*, s. **Bild** unten:

**Tabelle: Handelsnamen- und Normbezeichnungen von Primärelementen (Auswahl)**

Handels- name	Bemes- sungs- span- nung	IEC <sup>2</sup> -Nr.	Andere Bezeichnung			Abmessungen in mm				Größenvergleich
						Durch- messer	Länge	Breite	Höhe	
LADY	1,5 V	LR1	AM5	UM5	N	12,0	–	–	30,2	
MINI	1,5 V	LR61	–	–	AAAA	8	–	–	42,0	
MICRO	1,5 V	LR03	AM4	UM4	AAA	10,5	–	–	44,5	
MIGNON	1,5 V	LR6	AM3	UM3	AA	14,5	–	–	50,5	
BABY	1,5 V	LR14	AM2	UM2	C	26,2	–	–	50,0	
MONO	1,5 V	LR20	AM1	UM1	D	34,2	–	–	61,5	
NORMAL	4,5 V	3LR12	–	–	–	–	62,0	22,0	67,0	
ENERGIE- BLOCK	9 V	6LR61	6AM6	–	PP3	–	26,5	17,5	48,5	

Abkürzungen nach IEC: R = Rundzelle, L = Alkali-Mangan-Zelle

<sup>2</sup> IEC, Abk. für International Electrotechnical Commission (engl.)

aus [BumilFE], mit freundlicher Genehmigung

### Sekundärelemente

Galvanische Elemente, die wiederholt ge- und entladen werden können, heißen *Sekundärelemente* oder *Akkumulatoren*. Akkus nehmen je nach Betriebszustand zwei unterschiedliche Rollen in einem Stromkreis ein:

- Beim Entladen stellen sie die Spannungsquelle dar,
- beim Aufladen sind sie der „Verbraucher“, der von einer anderen Quelle gespeist wird, s. Seite 18.

Das **Bild** rechts zeigt Spannungswerte typischer Akkus.

**Tabelle 2: Wichtige Spannungswerte von Akkumulatoren**

Zellenart	Pb	NiMH	Li-Ion
Bemessungsspannung einer Zelle in Volt	2,0	1,2	3,2 bis 3,7
Ladeschlussspannung einer Zelle in Volt	2,42	1,45	4,2
Entladeschlussspannung einer Zelle in Volt	1,60 bis 1,90	1,0	2,5
Gasungsspannung einer Zelle in Volt	2,40 bis 2,45	–	–

aus [BumilFE], mit freundlicher Genehmigung

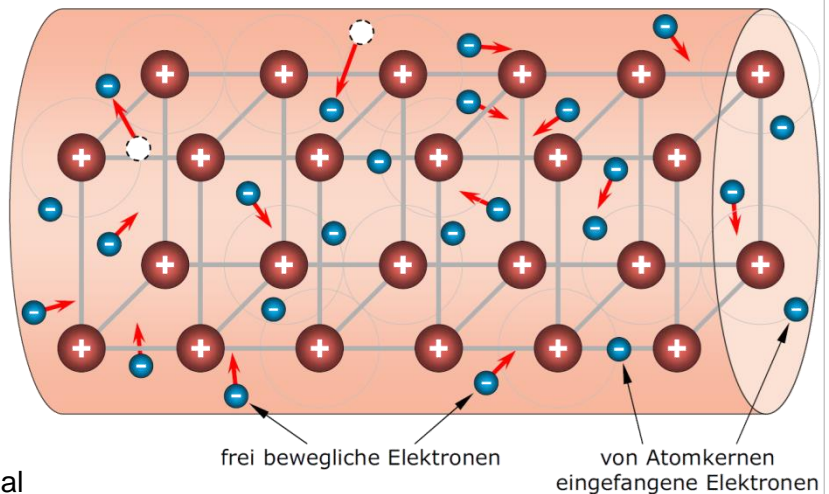


# Leiter oder Nichtleiter? Mechanismus der Stromleitung

## Frei bewegliche Elektronen in Metallen

Metalle haben die Eigenschaft, dass sie nur wenige Elektronen auf der äußeren Schale im Atommodell haben (z.B. ein Elektron bei dem auf Seite 4 dargestellten Lithium-Atom). Aus diesem Grund verbinden sich Metallatome untereinander nicht zu Molekülen, sondern formieren sich stattdessen zu einer Gitterstruktur mit sehr enger Packungsdichte, s. **Bild** unten:

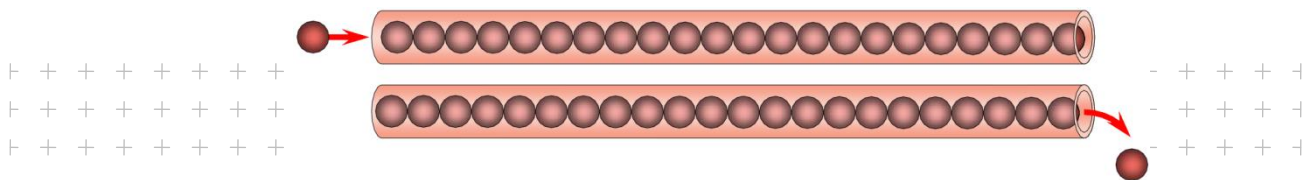
In diesem sog. *Metallgitter* sind die positiv geladenen Atomrümpfe so dicht beieinander, dass immer wieder Valenzelektronen die Chance haben, vom Kern des Nachbaratoms eingefangen zu werden. Solche vagabundierenden Elektronen werden *frei bewegliche Elektronen* genannt, die man sich statistisch über das gesamte Gitter verteilt vorstellen kann. Deren relativer Anteil der zu einem bestimmten Zeitpunkt ist im Mittel konstant, er wird nur durch das Material und durch die Temperatur bestimmt.



■ aus [KlāEF], mit freundlicher Genehmigung

## Ladungstransport durch frei bewegliche Elektronen

Wird zusätzliche Ladung auf ein Stück Metall aufgebracht, kann sich diese mit Hilfe der frei beweglichen Elektronen sofort verteilen, oder auch an einer anderen Stelle des Metalls wieder entnommen werden: Aus diesem Grund werden Metalle als *Leiter für elektrischen Strom* bezeichnet – *Strom* ist Ladungstransport. Das folgende **Bild** veranschaulicht den Mechanismus des Ladungstransportes: Damit eine von links eingebrachte Ladung rechts entnommen werden kann, muss sie gar nicht selbst durch den kompletten Leiter wandern – vielmehr schiebt sie die vorhandenen *frei beweglichen Ladungsträger* durch den Leiter, wie in einem mit Kugeln dicht gefüllten Rohr:



■ aus [KlāEF], mit freundlicher Genehmigung

## Nichtleiter

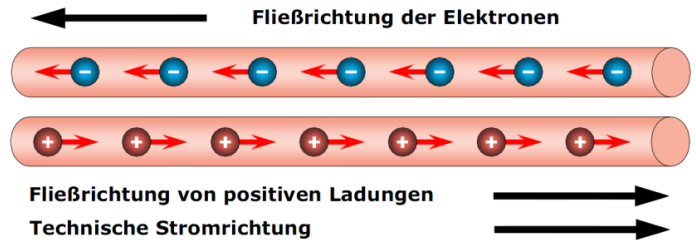
Im Gegensatz zu leitenden Materialien sind die Elektronen eines Nichtleiters (auch *Isolator* oder *Dielektrikum* genannt) an ihren Atomkern gebunden, und damit nicht frei beweglich. Daher lassen sie sich beispielsweise verwenden, um zwei Stromleiter voneinander zu trennen (Platine) oder sie gegen Berührung zu schützen (Kabelisolierung).



## Strom = Bewegte Ladung pro Zeit

### Physikalische und technische Stromrichtung

Der Ladungstransport in Metallen basiert physikalisch auf **negativ** geladenen Elektronen. Von außen gesehen lässt sich völlig analog jedoch auch der Transport von **positiven** Ladungen plausibel erklären: Ein „Absaugen“ von Elektronen einer Seite des Leiters (= Einbringen **positiver** Ladung) führt zum Elektronenmangel und damit zu einer „Saugkraft“ für Elektronen an einer anderen Stelle des Leiters. Für die Bezeichnung der Stromrichtung in technischen Anwendungen gilt die Konvention, dass ausschließlich positive Ladungsträger betrachtet werden, siehe **Bild** rechts:



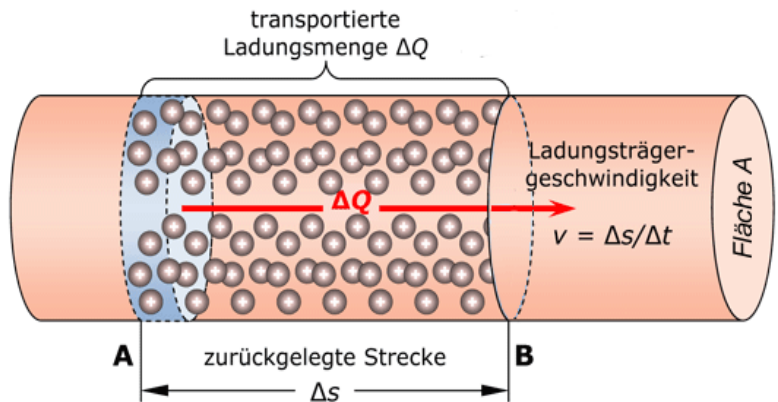
■ aus [KlāEF], mit freundlicher Genehmigung

### Definition des Stromes

Die Stärke **I** des **elektrischen Stromes** ist definiert als die pro Zeiteinheit durch den Leiterquerschnitt hindurch fließende Ladungsmenge, siehe **Bild** rechts:

$$I = \Delta Q / \Delta t$$

Die Einheit des Stromes ist  $[I] = \text{A}$  (Ampere<sup>1)</sup>).



■ nach [KlāEF], mit freundlicher Genehmigung

### Geschwindigkeit des elektrischen Stroms

Zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Stromes gibt es zwei mögliche Betrachtungsweisen:

⇒ Die Driftgeschwindigkeit v der Ladungsträger ist die zurückgelegte Strecke  $\Delta s$  pro Zeit  $\Delta t$ :

$$v = \Delta s / \Delta t = \frac{\text{Anzahl transportierter Ladungsträger}}{\text{Ladungsträgerdichte} \cdot \text{Querschnittsfläche} \cdot \Delta t} = \frac{\Delta Q / e}{n \cdot A \cdot \Delta t} = \frac{I \cdot \Delta t / e}{n \cdot A \cdot \Delta t} = \frac{I}{n \cdot A \cdot e}$$

Die Ladungsträgerdichte **n** gibt die Zahl der Ladungsträger pro Volumen an, sie ist Material spezifisch. Für Kupfer beispielsweise gilt:  $n = 8,47 \cdot 10^{19} \text{ mm}^{-3}$ .



⇒ Die eigentliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Stroms (also das, was beispielsweise der „Nutzer“ einer Energieversorgungs- oder Datenleitung wahrnimmt) liegt – je nach Beschaffenheit des Kabels oder der Leitung – bei etwa 2/3 der Lichtgeschwindigkeit.

<sup>1)</sup> André Ampere (1775-1836), franz. Physiker



## Wirkungen des elektrischen Stromes

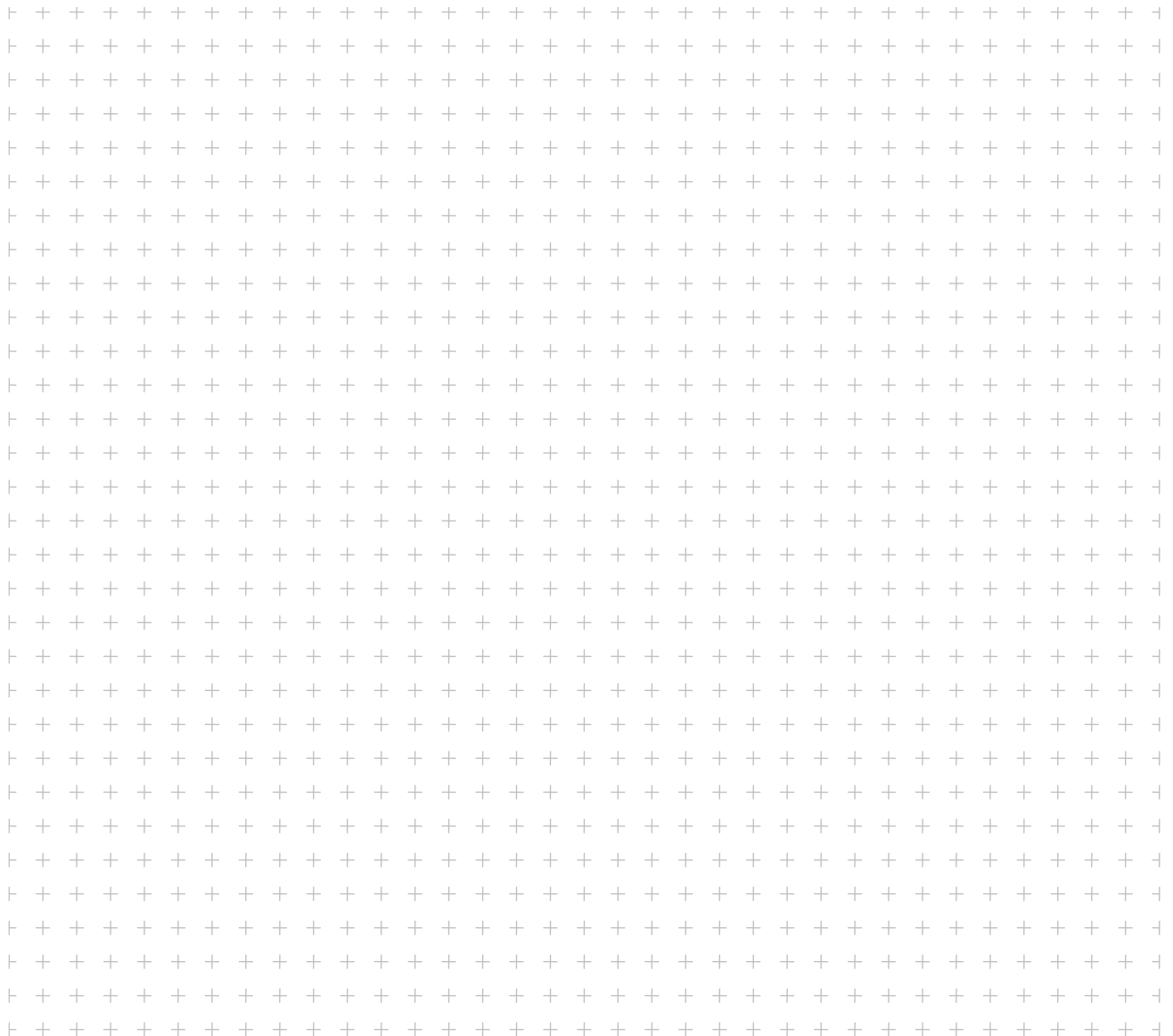
Zu Beginn dieses Kapitels wurde gezeigt, dass der elektrische Stromfluss eine Glühlampe zum Leuchten bringen kann. Das Leuchten ist dabei keine unmittelbare Wirkung des Stromes, sondern eine Folge der Aufheizung des Wolframdrahtes bis zur Weißglut. Die Wärmewirkung im Draht ist eine der möglichen Wirkungen des elektrischen Stromes;

### ■ Stromwirkungen

□ Wärmewirkung (z.B. im Bild rechts):

⇒ Elektrischer Strom erwärmt einen Leiter

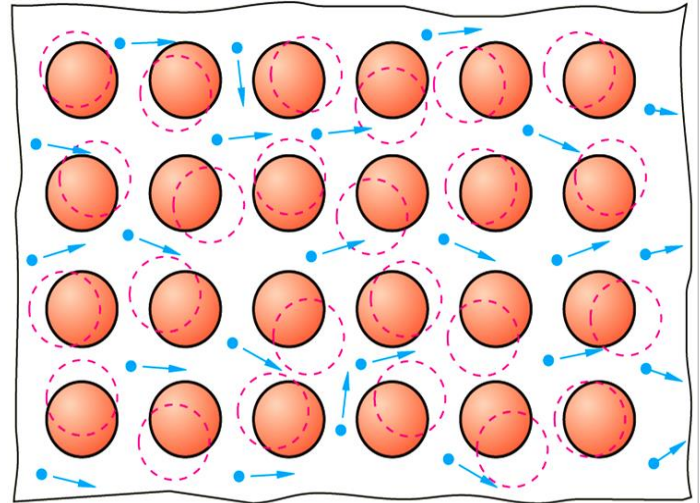
⇒ Auftreten: Grundsätzlich in jedem Leiter!



# Elektrischer Widerstand & Ohm'sches Gesetz

## Gebremste Elektronenbewegung

Die Atome im Gitter eines metallischen Leiters (siehe Seite 8 ) befinden sich nicht in Ruhe, sondern in ständiger Bewegung. Durch diese ungeordnete Wärmebewegung werden die frei beweglichen Elektronen und damit der Strom durch den Leiter behindert. Um den Strom entgegen dieses *Widerstandes* trotzdem fließen zu lassen, muss eine elektrische Spannung angelegt werden. In Metallen sind Strom und Spannung proportional zueinander!

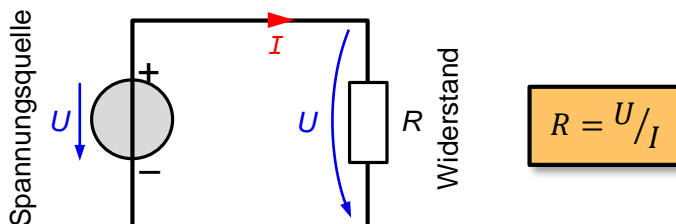


■ aus [BumilFE], mit freundlicher Genehmigung

## Das Ohm'sche Gesetz

Die Proportionalitätskonstante zwischen dem Strom und der Spannung heißt **elektrischer Widerstand**  $R$ , die Einheit ist:  $[R] = \Omega$  (Ohm<sup>1)</sup>)

Schaltzeichen und Formel – das Ohm'sche Gesetz – sind nachfolgend im **Bild** gezeigt:



## Übungsaufgabe zum elektrischen Widerstand

- Ein LötKolben nimmt an 230 V den Strom 0,22 A auf. Welchen Widerstand hat die Heizwicklung?
- Eine Stromstärke von 40 mA durch den menschlichen Körper gilt als tödlich – der Widerstand des Körpers kann unter ungünstigen Bedingungen (feuchte Hände, Föhn in Badewanne) 1 kΩ betragen. Welche Spannung wäre demnach tödlich?

<sup>1)</sup> Georg Simon Ohm (1789-1854), deutscher Physiker

## Berechnung des Widerstandes eines Leiters

### ■ Spezifischer Widerstand

Der Widerstand eines Leiters hängt von seinem Material und seinen geometrischen Abmessungen ab. Nachstehende **Tabelle** verdeutlicht die Zusammenhänge und Formeln für einen Leiter konstanten Querschnitts. Der Werkstoff geht dabei mit seinem **spezifischen Widerstand**  $\rho$  (rho) ein. Er hat die Einheit  $[\rho] = \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  und gibt den Widerstand bei  $1 \text{ mm}^2$  Querschnitt und  $1 \text{ m}$  Länge an:

Material	Leiterlänge	Leiterquerschnitt
<p>Kupfer viele freie Elektronen ↓ geringer Widerstand</p> <p>Konstantan wenig freie Elektronen ↓ hoher Widerstand</p>	<p>doppelte Leiterlänge ↓ doppelter Widerstand</p>	<p>großer Querschnitt ⇒ kleiner Widerstand</p> <p>kleiner Querschnitt ⇒ großer Widerstand</p>
Der Leiterwiderstand ist umso größer, je größer der spezifische Widerstand $\rho$ ist.	Der Leiterwiderstand ist umso größer, je größer die Leiterlänge $l$ ist.	Der Leiterwiderstand ist umso größer, je kleiner der Leiterquerschnitt $A$ ist.
$R \sim \rho$	$R \sim l$	$R \sim \frac{1}{A}$
Leiterwiderstand $[R] = \frac{\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \text{m}}{\text{mm}^2} = \Omega$	$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$	$R$ Leiterwiderstand $\rho$ spezifischer Widerstand $l$ Leiterlänge $A$ Leiterquerschnitt

■ aus [BumilFE], mit freundlicher Genehmigung

- Die **Tabelle** rechts listet den Wert des spezifischen Widerstandes für die vier gebräuchlichsten Leiter auf:

Material	$\rho / \Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$ bei $\vartheta = 20^\circ\text{C}$
Aluminium (Al)	0,0278
Gold (Au)	0,0220
Kupfer (Cu)	0,0178
Silber (Ag)	0,0167

### Beispiel Widerstand einer Verlängerungsleitung

Ein 50 m langes, aufrollbares Verlängerungskabel enthält Kupferadern mit  $1,5 \text{ mm}^2$  Querschnitt:

- Geben Sie den Widerstand an, den ein angesteckter Verbraucher bis zur Steckdose „sieht“ !

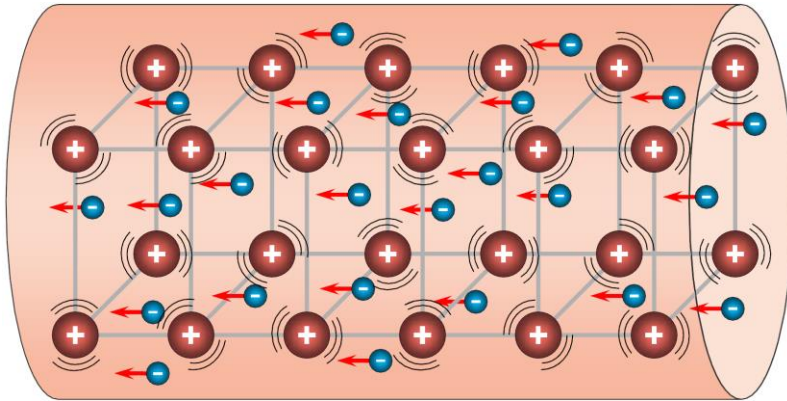
### Übungsaufgabe Maximale Länge einer Telefon-Leitung

- a) Der Widerstand einer 2-adrigen Telefonleitung (Material: Kupfer) mit einem Leiterquerschnitt von  $0,6 \text{ mm}^2$  soll  $50 \Omega$  nicht überschreiten. Wie lang darf die Telefonleitung maximal werden?

## Temperaturabhängigkeit des Widerstands

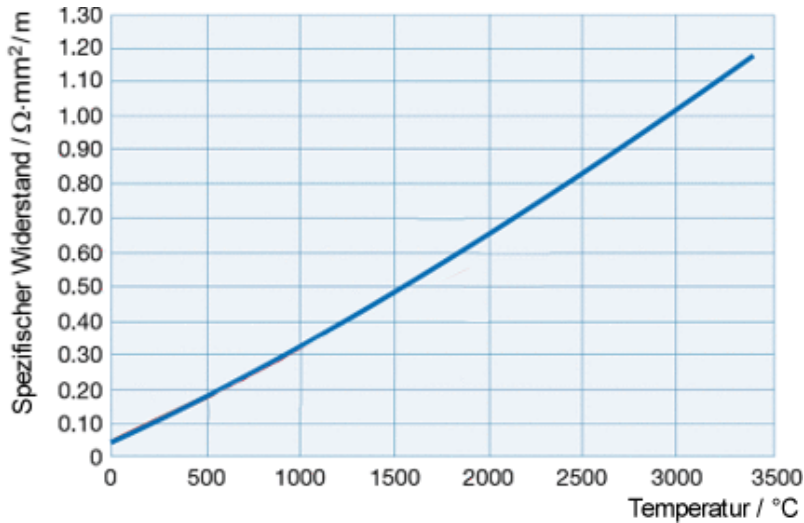
### ■ In Metallen behindert die thermische Bewegung der Atome den Stromfluss

Stromleitung bedeutet Ladungstransport durch freie Ladungsträger - in Metallen sind dies Elektronen. Wie auf Seite 11 beschrieben, bremst die thermische Bewegung der Atomrümpfe die Bewegungsfreiheit der Elektronen. Dieser Widerstand steigt mit zunehmender Temperatur an:



■ [KläEF], mit freundlicher Genehmigung

- Metalle sind somit „Kaltleiter“, d.h. sie leiten in kaltem Zustand besser als in warmem Zustand. Folgende Kurve zeigt die Abhängigkeit des spezifischen Widerstands von der Temperatur für das Metall Wolfram:



### Beispiel Widerstandsänderung einer Glühlampe

Wolfram hat einen sehr hohen Schmelzpunkt von rund 3.400°C und wird daher als Material für den Glühfaden in Glühlampen verwendet. Je nach Glühlampe beträgt die Temperatur des Drahtes im Betrieb 2.500°C – 3.000°C.

- Wie ändert sich der Strom einer Glühlampe nach dem Einschalten?  
Wird er größer oder kleiner?
- Um welchen Faktor ändert sich der Strom nach dem Einschalten?



## Widerstände als Bauelemente

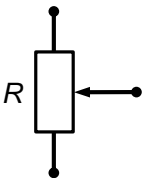
Der Begriff *Widerstand* wird nicht nur für die physikalische Größe verwendet, sondern bezeichnet ebenfalls eine Klasse elektronischer Bauelemente, die einen definierten Widerstandswert haben. Sie unterscheiden sich durch ihre Bauform und Belastbarkeit; manche sind einstellbar (Potentiometer):

### ■ Bauformen von Festwiderständen

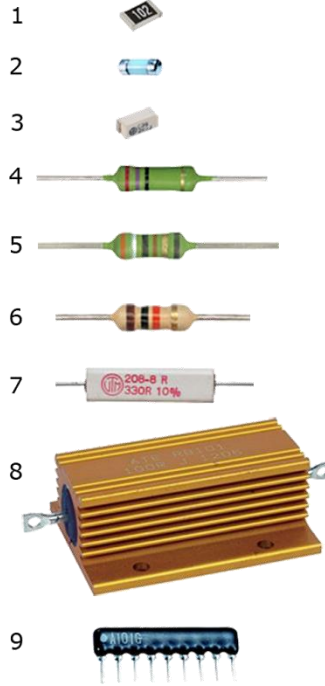
- Chip-Widerstände werden für die Oberflächenmontage (SMD-Technik) auf Baugruppen hergestellt.
- Schichtwiderstände in Standard-Bauform haben auf einem Keramikkörper eine dünne Widerstandsschicht aus Kohle, Metalloxid oder Edelmetall. Ihre Anschlussbeinchen aus Draht eignen sie sich für konventionelle Montage-technik (Bauteil oben, Lötzinn unten).
- Drahtwiderstände bestehen aus einem Widerstandsdraht (meist aus der Legierung *Konstantan*), der auf einen Keramikkörper aufgewickelt ist. Drahtwiderstände sind besonders für hohe Verlustleistungen geeignet.

### ■ Potentiometer...

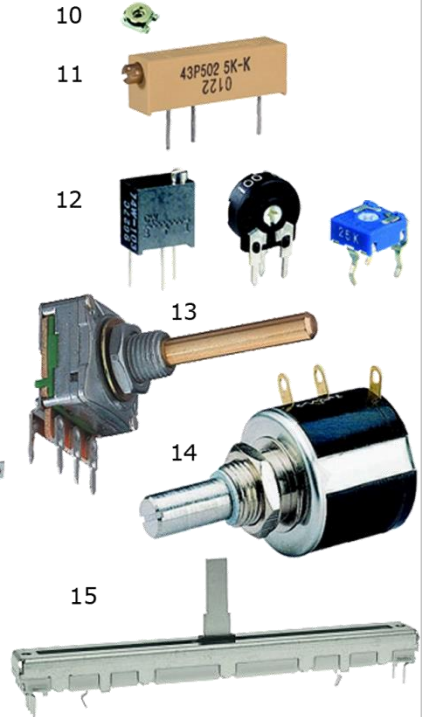
... sind mechanisch einstellbare Widerstände. Sie bestehen aus einem Kohle- oder Drahtwiderstand, den ein Schleifkontakt abgreift, und so in eine Serienschaltung zweier Widerstände unterteilt:



Festwiderstände



einstellbare Widerstände



#### Festwiderstände:

- 1: SMD-Präzisionswiderstand, 2: Leistungs-SMD-Widerstand (Metallschicht)  
 3: Zementierter SMD-Drahtwiderstand mit hoher Nennlast, 4: Metalloxid-Widerstand, 5: Metallfilm-Widerstand, 6: Kohleschicht-Widerstand,  
 7: Zementierter Drahtwiderstand, 8: Drahtwiderstand 100 W,  
 9: Widerstandsnetzwerk (enthält 8 identische Metallschicht-Widerstände mit einem gemeinsamen Anschluss).

#### Einstellbare Widerstände:

- 10: SMD-Trimpotentiometer, 11: Spindeltrimmer, 12: Trimmer in unterschiedlichen Bauformen für Printmontage, 13: Standardpotentiometer für Printmontage, 14: 10-Gang (10 Umdrehungen) Wendepotentiometer, 15: Schiebepotentiometer (für Mischpulte).

SMD → *Surface-Mounted Device*, Bauelement für die Oberflächenmontage

■ aus [KläEF], mit freundlicher Genehmigung

Mehr zum sog. *Spannungsteiler* finden Sie im nächsten Kapitel *Einfache elektrische Netzwerke*.

### ■ Belastbarkeit von Widerständen

Im Widerstand wird **elektrische Leistung**  $P = U \cdot I$  (mehr dazu auf Seite 18) in Wärme umgesetzt, die an die Umgebung abgeführt werden muss. Jeder Widerstand hat eine maximale Belastbarkeit, die vom Material und (vor allem) von seiner Größe bestimmt wird. Diese sog. Bemessungsleistung ist jeweils angegeben und auf eine bestimmte Umgebungstemperatur (typ. 70°C) bezogen.



## Codierung von Widerstandswerten

### ■ Ringe in Regenbogenfarben:

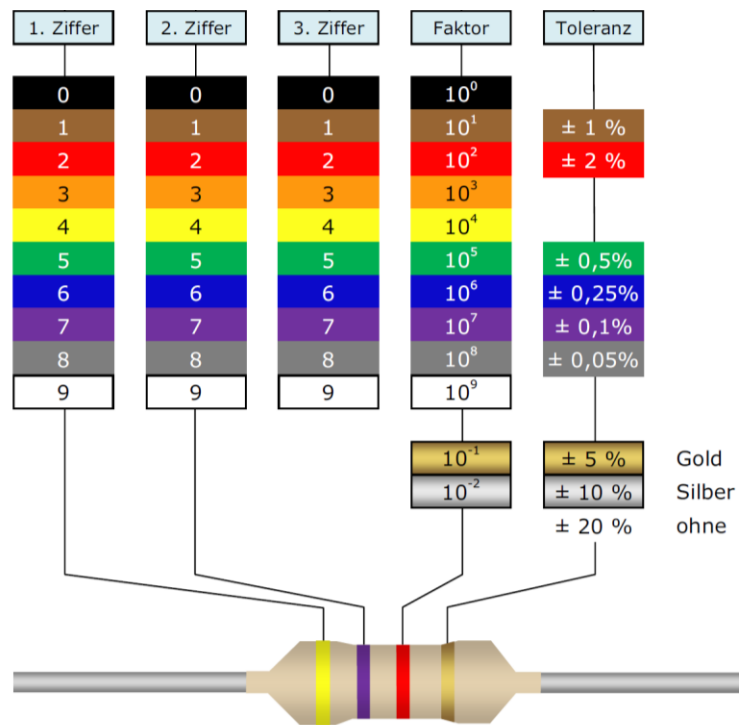
Bei Festwiderständen in der Standard-Bauform (mit axialen Anschlussdrähten) ist der Widerstandswert mit Farbringen auf dem Widerstandskörper codiert, dargestellt im **Bild** unten rechts:

- ⇒ In Abhängigkeit der Toleranz (Genauigkeit) des Widerstandes bestimmen die ersten beiden oder die ersten drei Farbringe den Zahlenwert des Widerstandes. Ab einer Genauigkeit von  $\pm 2\%$  spezifizieren drei Farbringe den Zahlenwert.
- ⇒ Der vorletzte Ring gibt die Zehnerpotenz an, mit der der Zahlenwert zu multiplizieren ist.
- ⇒ Der vierte bzw. fünfte Ring bestimmt den Toleranzbereich, den ein Widerstand aufgrund seiner Fertigung hat. Der erste Farbring ist leicht zu erkennen, da er näher an einem Anschlussbein liegt als der Toleranzring.

### ■ Toleranzreihen

Je nach Toleranz existieren genormte Zahlenreihen für mögliche Widerstandswerte, die sich über alle Zehnerpotenzen wiederholen. Die **Tabelle** rechts zeigt die beiden gebräuchlichsten Normreihen E12 ( $\pm 10\%$ ) und E24 ( $\pm 5\%$ ):

E12	E24
1,0	1,0
	1,1
1,2	1,2
	1,3
1,5	1,5
	1,6
1,8	1,8
	2,0
2,2	2,2
	2,4
2,7	2,7
	3,0
3,3	3,3
	3,6
3,9	3,9
	4,3
4,7	4,7
	5,1
5,6	5,6
	6,2
6,8	6,8
	7,5
8,2	8,2
	9,1



Kohleschicht-Widerstand 4,7 k $\Omega$   $\pm 5\%$  (E24)

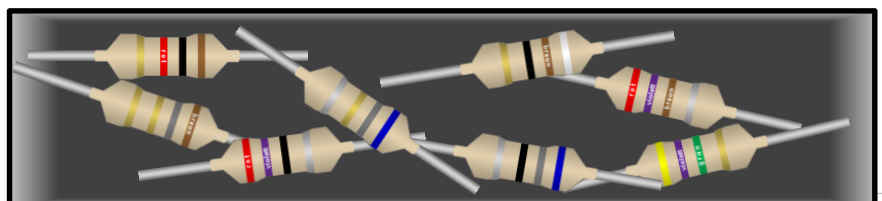
■ aus [KläEF], mit freundlicher Genehmigung

### Übungsaufgabe Widerstandswerte

Für eine Schaltung werden folgende Widerstandswerte benötigt: **7 $\Omega$ , 90 $\Omega$ , 250 $\Omega$  und 5 M $\Omega$ .**

a) Welches sind jeweils die nächsten Werte aus der E12 & E24-Reihe?

b) In der Bastelkiste liegen die rechts gezeigten Widerstände:  
Markieren Sie die Passenden!



## Energie und Arbeit

### ■ Elektrische Energie

Zur Definition der elektrischen Spannung  $U$  wurden auf der Seite 5 dieses Kapitels zwei aufgeladene Platten betrachtet, in deren Feld die zwei Probeladungen  $\pm \Delta Q$  mit entgegengesetzter Polarität getrennt wurden. Es wurde so die elektrische Spannung  $U = W/\Delta Q$  definiert:

Wird die frisch getrennte Probeladung  $\Delta Q$  als elektrischer Strom von den geladenen Platten abgeleitet, so stellt das elektrische **Arbeit** (oder Energiefluss)  $W$  dar:

$$\Delta E_{\text{el}} = W_{\text{el}} = U \cdot \Delta Q = U \cdot I \cdot \Delta t$$

Allgemein gilt, dass unter der Berücksichtigung des 1. Hauptsatzes der Thermodynamik (*Energieerhaltungssatz*) **Energie**  $E$  von einer Energieform in eine andere und/oder in *Arbeit*  $W$  umgewandelt werden kann und umgekehrt.

Die Einheit von Energie und Arbeit ist:  $[E_{\text{el}}] = [W_{\text{el}}]$   
 $= \text{J}(\text{Joule}^1) = \text{Nm}(\text{Newtonmeter}) = \text{Ws}(\text{Wattsekunde})$ .

### Beispiel Batteriegetriebene elektrische Seilwinde

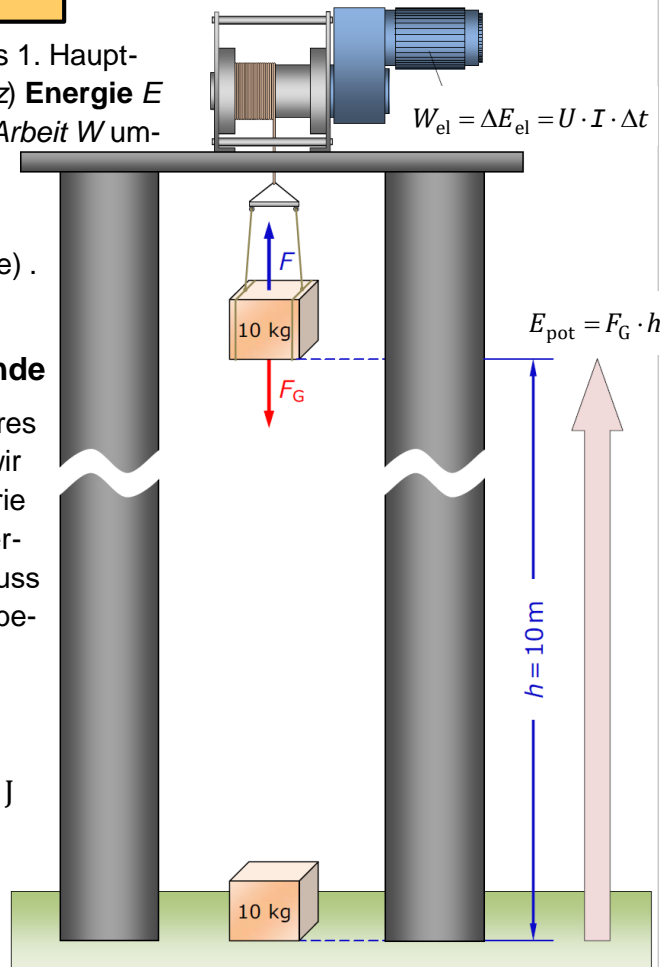
Die Seilwinde im **Bild** rechts hebt ein 10 kg schweres Gewicht um  $h = 10\text{m}$  an. Vereinfachend nehmen wir an, dass der Motor in der Lage ist, die in der Batterie gespeicherte Energie vollständig in potentielle Energie umzuwandeln. Welche Ladung („Kapazität“) muss die 12-V-Batterie gespeichert haben, um diese Hebearbeit zu leisten?

Mechanische Arbeit:

$$W_{\text{mech}} = F \cdot h = F_G \cdot h = 10 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10 \text{ m} = 981 \text{ J}$$

Elektrische Ladung:

$$Q = \frac{E_{\text{pot}}}{U} = \frac{W_{\text{mech}}}{U} = \frac{981 \text{ J}}{12 \text{ V}} = 81,75 \text{ C}$$



■ aus [KläEF], mit freundlicher Genehmigung

### Übungsaufgabe Energiewerte einiger Alltagsgegenstände

Recherchieren Sie typische Werte für den Energiegehalt folgender Speicher, jeweils in ‚Wh‘:

- Primärzelle (Alkaline „AA“) Varta High Energy 4906
- eBike-Akku
- Akku eines Tesla Model S
- Tankinhalt eines VW Golf Diesel (Heizwert des Treibstoffs)

<sup>1)</sup> James Joule (1818-1889), engl. Physiker

**Zur Diskussion mit Ihren Kommilitonen:**

⇒ Welche der aufgelisteten Größen könnte die Leistung eines FritzBox-Routers angeben?

- 40 Mbit/s
- 100 kWh
- 12 W

## ■ Zusammenhang Leistung, Energie und Arbeit

Wird eine bestimmte Arbeit  $W$  in einer gewissen Zeit  $\Delta t$  verrichtet, so muss dazu die **Leistung  $P$**  aufgebracht werden. Die Leistung ist also ein Maß für die pro Zeiteinheit übertragene Energie:

$$P = W / \Delta t$$

Die Energieübertragung kann dabei beispielsweise auf mechanischem (= mechanische Arbeit), thermischem oder elektrischem Wege erfolgen. Die Leistung hat die Einheit  $[P] = \text{Watt}$ .

## ■ Elektrische Leistung

Eingesetzt in die Formel zur Definition des Stromes (s. Seite 9) ergibt sich folgender Ausdruck für die Leistung  $P_{\text{el}}$  die ein elektrischer Verbraucher an der Klemmenspannung  $U$  umsetzt:

$$P = \frac{W_{\text{el}}}{\Delta t} = \frac{\Delta E_{\text{el}}}{\Delta t} = \frac{\Delta Q \cdot U}{\Delta t} = U \cdot I$$

### Beispiel Seilwinde

Die Seilwinde aus dem Bild der vorherigen Seite benötigt für das Heben des Gewichtes eine Zeit von 100 s. Welche Leistung muss der Motor dazu haben?

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{981 \text{ J}}{100 \text{ s}} = 9,81 \text{ W}$$

### Übungsaufgabe Leistungswerte im Alltag

Recherchieren Sie die Leistung folgender „Arbeiter“:

- a) Elektrische Leistung eines Fahrrad-Dynamos
- b) Mechanische Leistung eines menschlichen Radfahrers
- c) Antrieb eines eBike
- d) Antriebsleistung eines *Tesla Model S*

### Übungsaufgabe Stromkosten

Ein Desktop-PC mit Monitor nimmt eine durchschnittliche Leistung von 273 W auf, er wird täglich 6 Stunden genutzt. Berechnen Sie die jährlichen Stromkosten bei einem Preis von 0,25 €/kWh.

### Übungsaufgabe Fauler eBike-Fahrer

Ein eBike-Fahrer (Gesamtgewicht mit Gerät 100 kg) möchte von Brannenburg (475 m ü.M.) auf die Schuhbräualm (1161 m ü.M.) fahren – nur mit elektrischer Energie – ohne eigene Arbeit! Gehen Sie dabei wieder vereinfachend davon aus, dass die Energie des Akkus ideal und verlustfrei in Höhengewinn umgesetzt werden kann.

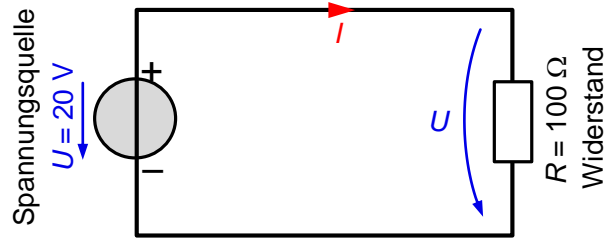
- a) Welche Energie (in 'Wh') muss der Akku mindestens gespeichert haben, damit das möglich ist?
- b) Wie lange dauert die Auffahrt, wenn der Antrieb (StVO-konform) 250 W Dauerleistung abgibt?

## Elektrische Leistung in Stromkreisen

### ■ Unterscheidung von Quelle und Verbraucher in einem Stromkreis

Nachfolgendes **Bild** zeigt wieder den einfachen Stromkreis, mit einer Spannungsquelle und einem Widerstand als Verbraucher.

Anhand der Vorzeichen der Spannungen und Ströme lässt sich erkennen, ob ein Element im Stromkreis elektrische Leistung abgibt oder aufnimmt:



- Quelle: Spannung und Strom zeigen in verschiedene Richtungen.
- Verbraucher: Spannung und Strom zeigen in dieselbe Richtung.

### ■ Verlustleistung in Abhängigkeit des Stromes und der Spannung

Die an einem Widerstand abfallende Leistung lässt sich alternativ auch berechnen, wenn nur die Spannung  $U$  oder der Strom  $I$  bekannt ist (Berechnung des anderen Teils mit *Ohmschen Gesetz*):

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

oder

$$P = U \cdot I = I \cdot R \cdot I = I^2 \cdot R$$

### Übungsaufgabe Ein Experiment, das Sie nur theoretisch rechnen sollten...

Was passiert, wenn Sie einen Föhn aus USA (Netzspannung 120 V) am EU-Stromnetz betreiben?

### ■ Verlustleistungshyperbel

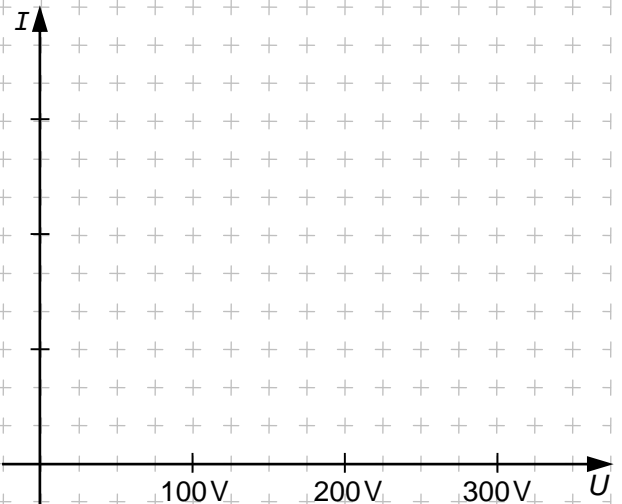
Bauelemente (z.B. Widerstände) sind für eine maximale Verlustleistung  $P_{\max}$  ausgelegt. Ein dauerhaftes Überschreiten im Betrieb würde zum Hitzetod führen. Die Kurve

$$I = \frac{P_{\max}}{U}$$

wird *Verlustleistungshyperbel* genannt.

### Beispiel Widerstand, Aufdruck „10kΩ/5W“

- a) Zeichnen Sie die Kurve  $I = U/R$  ins **Bild**.
- b) Zeichnen Sie Verlustleistungshyperbel.
- c) Darf der Widerstand an Netzspannung (230V) angeschlossen werden?





## Wirkungsgrad

### Definition des Wirkungsgrades

Die Umwandlung einer Energieform in eine andere (oder in Arbeit) kann im Allgemeinen nicht vollständig durchgeführt werden, es geht immer ein Teil in einer anderen – meist unerwünschten – Energieform verloren. Den relativen Anteil der Leistung, der in die gewünschte Form umgewandelt wird, bezeichnet man als *Wirkungsgrad*  $\eta$  :

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

### Beispiel Wirkungsgrad einiger elektrischer Alltagsgeräte

Verbraucher	Wirkungsgrad
Schaltnetzteil	80...90%
Drehstrommotor	75%
Wasserkocher	95%
Glühlampe	15%
LED	85%

### Beispiel Computernetzteil

- a) Betrachten Sie das unten abgebildete Datenblatt eines Computernetzteils. Können Sie danach eine Aussage bzgl. des Wirkungsgrades machen?



Output Table								
AC Input	90~265V, 3.5A~2A, 47~63Hz							
DC Output	+3.3V	+5V	+12V1	+12V2	+12V3	+12V4	12V	+5Vsb
Max Output Current	20A	22A	14A	19A	-	-	0.5A	3A
Max Combined Power	125W		228W					
Total Power	300W							

■ Bild und Datenblatt von [conrad.de]

- b) Eine aktuelle Messung ergibt 100 W Eingangs(wirk-)leistung, 2 A am 12-V-Ausgang und 10 A am 5-V-Ausgang. Bestimmen Sie den Wirkungsgrad!

#### Zur Diskussion mit Ihren Kommilitonen:

⇒ Wie groß ist die typische Verlustleistung eines Laptop-Netztes

- 5 W
- 10 W
- 50 W

#### Zur Diskussion mit Ihren Kommilitonen:

⇒ Wie groß ist die typische Verlustleistung eines Smartphone-Netztes

- 1 W
- 5 W
- 10 W

### Übungsaufgabe Darf dieser eBike-Fahrer faul sein?

Ein eBike hat einen Akku, der mit 36 V/10 Ah (typische Akkugröße) spezifiziert ist.

- a) Wie viel Energie (in 'Wh') hat dieser Akku gespeichert?
- b) Der Gesamtwirkungsgrad des Antriebs beträgt 70%, das Gesamtgewicht des Fahrrads 120 kg. Muss der Fahrer mit treten, um von Brannenburg auf die Schuhbräualm zu kommen?

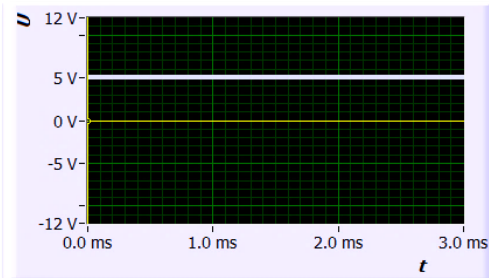


## Periodische Wechsel- und Mischspannungen

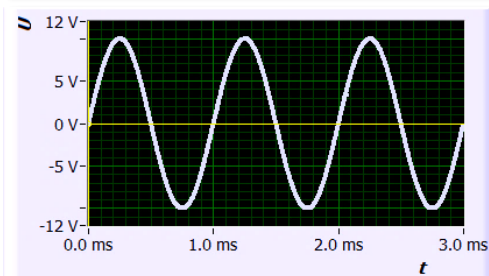
### Spannungsarten

Bisher wurden Spannungen und Ströme statisch und konstant betrachtet. In der Praxis jedoch bestehen Spannungen und Ströme immer aus einer Mischung aus einem sog. Gleichanteil und einem Wechselanteil, wie folgende **Bilder** im Falle von periodischen Spannungen verdeutlichen:

#### Gleichspannung



#### Wechselspannung



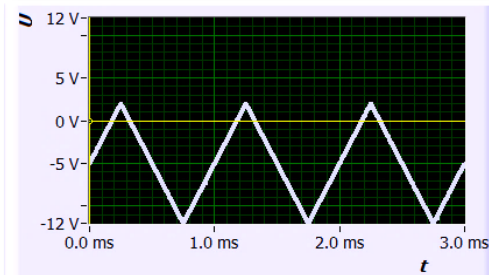
#### Mischspannung

besteht aus einem

⇒ Gleichanteil  $U_{\text{offs}}$

und einem

⇒ Wechselanteil



Der Gleichanteil  $U_{\text{offs}}$  repräsentiert den Mittelwert der Kurve,  
der Scheitelwert  $\hat{U}$  den maximalen Betrag.

### Übungsaufgabe Weitere Kurven

Verifizieren Sie alle Ihre Lösungen mit dem Programm **0\_SpannungsartenMessung.exe**.

- Skizzieren Sie eine Rechteckkurve mit  $U_{\text{offs}} = -10 \text{ V}$  und  $\hat{U} = 10 \text{ V}$
- Skizzieren Sie eine Dreieckkurve mit  $U_{\text{offs}} = -0 \text{ V}$  und  $\hat{U} = 12 \text{ V}$
- Skizzieren Sie eine Sinuskurve mit  $U_{\text{offs}} = 10 \text{ V}$  und  $\hat{U} = 5 \text{ V}$ . Warum wird das Programm diese Kurve nicht akzeptieren (bitte erst nachdenken, dann die Fehlermeldung lesen :-)?





Ladung

Spannung

Strom

Widerstand

Elektrische Leistung &amp; Energie

Wechselspannung &amp; -strom

Pegel

## Mittel- und Effektivwert einer periodischen Mischspannung

- Die Amplitude von Wechsel- oder Mischspannungen wird häufig als einer von zwei Mittelwerten beschrieben und auch gemessen:

- Der **arithmetische Mittelwert**  $\bar{u}$  eines periodischen Spannungsverlaufes  $u(t)$  entspricht dem Gleichanteil  $U_{\text{offs}}$ . Er gibt den zeitlichen Durchschnittswert der Mischspannung  $u(t)$  an.

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_T u dt$$

mit  $T$ : Periodendauer von  $u(t)$

- Der quadratische Mittelwert  $\sqrt{u^2}$  (engl. RMS, *Root Mean Square*) wird auch **Effektivwert**  $U$  oder  $U_{\text{eff}}$  genannt. Er bezeichnet die äquivalente Gleichspannung, die in einem ohmschen Widerstand im zeitlichen Mittel dieselbe Verlustleistung umsetzen würde, wie die Mischspannung  $u(t)$ :

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{u^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T u^2 dt}$$

**Beispiel** Effektivwert einer sinusförmigen Wechselspannung (Scheitelwert  $\hat{U}$ ):

$$U_{\text{eff}} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$$

### Übungsaufgabe Mittel- und Effektivwerte

Verifizieren Sie Ihre Lösungen mit dem Programm `0_SpannungsartenMessung.exe`:

- Berechnen Sie den *Effektivwert*  $U_{\text{eff}}$  einer reinen Rechteckspannung mit dem Scheitelwert  $\hat{U}$ !
- Wie groß sind Mittel- und Effektivwert einer Rechteckspannung mit  $\hat{U} = 10 \text{ V}$  und  $U_{\text{offs}} = 5 \text{ V}$ ?



Ladung

Spannung

Strom

Widerstand

Elektrische Leistung &amp; Energie

Wechselspannung &amp; -strom

Pegel

## Pegelrechnung – Definitionen

### ■ Einführung der Einheit *Dezibel* ('dB')

In der Audio- und Übertragungstechnik muss oft mit extrem großen oder extrem kleinen Amplituden, Leistungen oder Verstärkungsfaktoren umgegangen werden:

- Anstelle dieser großen/kleinen Zahlen arbeiten wir mit deren Logarithmus.
- Multiplikationen und Divisionen werden durch Additionen und Subtraktionen ersetzt.

### 1. Logarithmische Darstellung von Verhältnissen (z.B. Verstärkung, Kabel-Dämpfung):

#### Leistungsverhältnis in 'dB'

$$\frac{P_2}{P_1} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \text{ dB}$$

#### Amplituden (z.B. Spannungs-) Verhältnis in 'dB'

$$\frac{U_2}{U_1} = 20 \cdot \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right) \text{ dB}$$

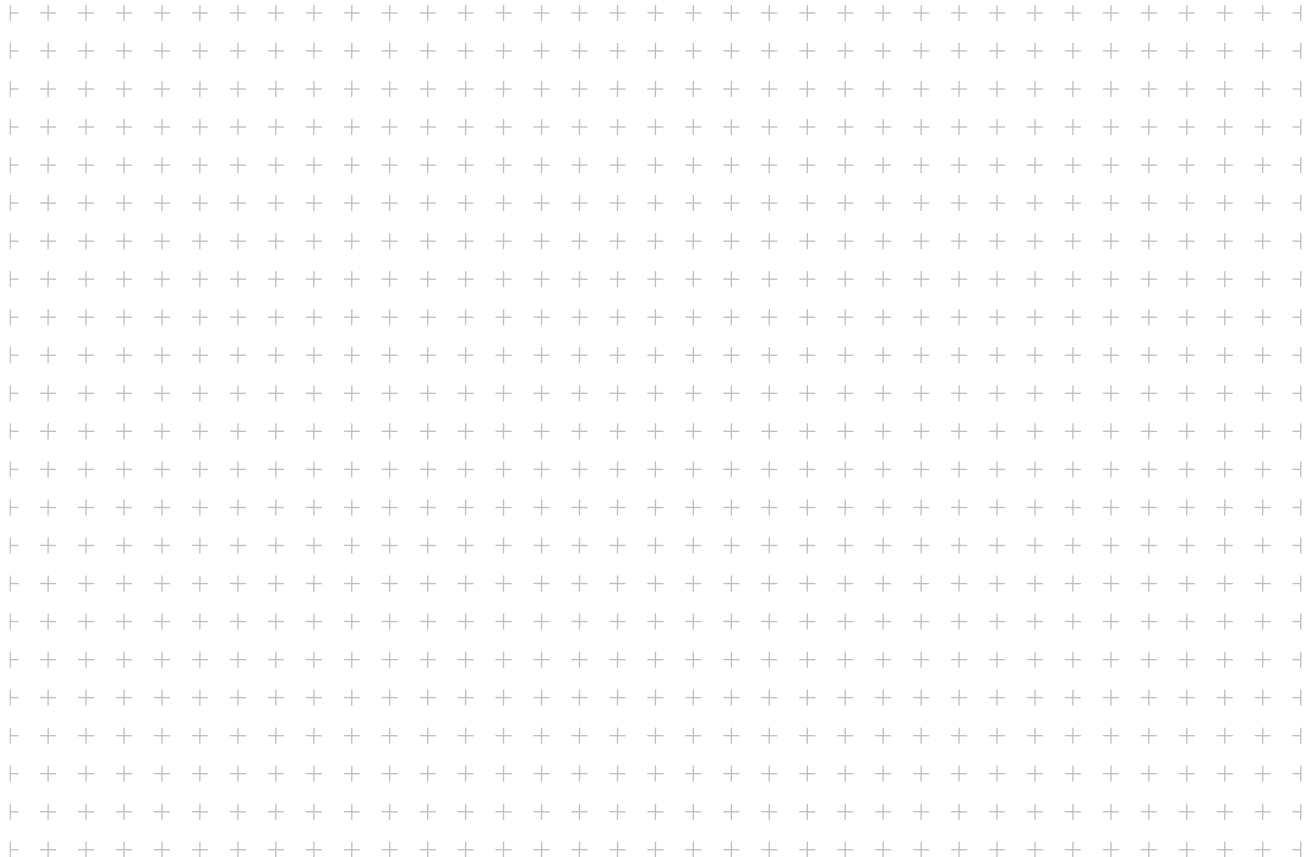
### 2. Logarithmische Darstellung absoluter Werte für Leistung oder Amplitude

#### Leistung in 'dBm'

$$P = 10 \cdot \log\left(\frac{P}{\text{mW}}\right) \text{ dBm}$$

#### Amplitude in 'dBV'

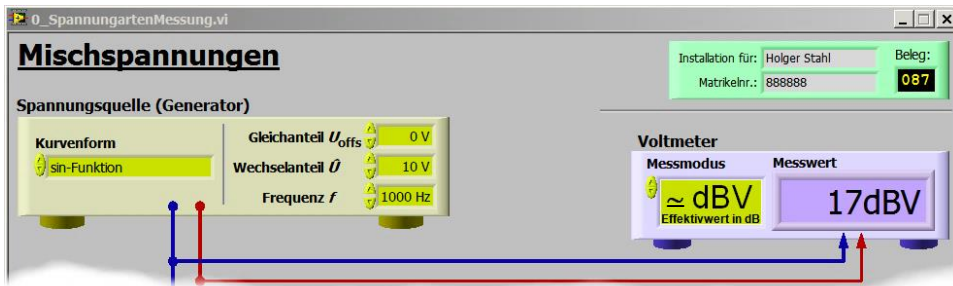
$$U = 20 \cdot \log\left(\frac{U}{\text{V}}\right) \text{ dBV}$$





## Pegelrechnung – Anwendung

### Übungsaufgabe Mit dem Programm 0\_SpannungsartenMessung.exe:



- Warum liefert ein Sinus-Signal mit  $\hat{U} = 10\text{V}$  eine Effektivwertanzeige von 17 dBV ?
- Warum liefert ein Rechtecksignal 3 dB mehr?
- Welche Spannung und Kurvenform ergibt (erst überlegen, dann testen) den Messwert -3 dBV ?
- Welche Spannung und Kurvenform ergibt den Messwert 20 dBV ?

### Beispiel für die Berechnung einer Übertragungskette

Eine W-LAN-Karte soll mit einer externen Antenne versehen werden. Diese wird über ein 15 m langes Kabel (Dämpfung 1dB/m) mit dem Antennenanschluss der W-LAN-Karte verbunden. Sende- und Empfangsbetrieb werden über dieselbe Antenne abgewickelt:

- Die Karte sendet mit 100 mW Leistung. Welche Leistung (in ,dBm') kommt an der Antenne an?
- Die Karte benötigt ein Empfangssignal mit mindestens -60 dBm. Welche Signalleistung (in ,dBm') muss die Antenne dazu in das Kabel liefern?