

2 Elektrische Ströme

Lernziele

- Sie kennen die Definition der Stromstärke und wissen, wie man sich den elektrischen Stromfluss vorstellen kann.
- Sie kennen die Definition des elektrischen Widerstandes und verstehen, wieso Leiter einen Widerstand haben.
- Sie können den elektrischen Widerstand eines Leiters bestimmen.
- Sie kennen das Ohm'sche Gesetz und verstehen, was der Unterschied zwischen einem Ohm'schen und nicht Ohm'schen Widerstand ist.
- Sie können die elektrische Energie und die elektrische Leistung herleiten.
- Sie kennen die Kirchhoff'schen Gesetze und können sie auf aufwändigere Schaltungen anwenden.
- Sie können mit Hilfe der Gesetze für Serie- und Parallelschaltung elektrische Schaltungen vereinfachen und sogenannte Ersatzwiderstände bestimmen.
- Sie verstehen die Funktionsweise des Ampere- und Voltmeters.

Nachdem wir nun das Konzept der Spannung kennengelernt und gesehen haben, wie man einen Plattenkondensator lädt und entlädt, ist es an der Zeit, den elektrischen Strom einzuführen. Intuitiv haben wir ihn bereits verwendet, indem wir z.B. die Bewegung der Elektronen im Zusammenhang mit der Spannung betrachtet haben.

In diesem Kapitel werden neben der *Stromstärke* auch der *Widerstand* und das *Ohmsche Gesetz* eingeführt. Die Ströme werden jedoch weiterhin als statisch betrachtet. Als Grundlage für die Berechnung komplexerer Stromkreise dienen die *Kirchhoff'schen Gesetze*, die abschliessend diskutiert werden. Die Kirchhoff'schen Gesetze bilden die Grundlage der gesamten Elektrotechnik und sind heute nicht mehr wegzudenken. Wir werden nur sehr einfache Schaltungen betrachten, denn sobald die Schaltungen grösser und komplexer werden, lässt man sie von einem Computerprogramm simulieren bzw. berechnen.

2.1 Stromstärke

Ein elektrischer Strom bedeutet ein Transport elektrischer Ladungen durch ein elektrisch leitendes Medium oder auch im Vakuum. Daraus lässt sich die Stromstärke, also das Mass des elektrischen Stroms definieren.

Def. 1: (*Stromstärke*) Die Stromstärke I ist definiert als die Ladungsmenge ΔQ , die pro Zeiteinheit Δt durch einen zur Stromrichtung senkrechten Querschnitt des Leiters fliesst:

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

Die Einheit der Stromstärke ist: $[I] = \text{A}$ und heisst Ampère (nach André-Marie Ampère¹).



A.-M. Ampère
(1775-1836)

Ampère war ein Wegbereiter auf dem Gebiet der Elektrodynamik. Ampère formulierte das Ampèresche Gesetz, das die Wechselwirkung elektrischer Ströme beschreibt und die Grundlage für das Verständnis elektromagnetischer Phänomene legte. Seine Arbeit trug entscheidend zur Entwicklung der Elektrotechnik bei. Ampère prägte auch den Begriff *Elektrodynamik* und zeigte, dass elektrische Ströme magnetische Felder erzeugen können. André-Marie Ampère war ein herausragender Physiker, der fundamentale Beiträge zur Elektrodynamik und Elektrotechnik geleistet hat.

Strom fliesst natürlich nicht nur in Leitern, sondern auch in anderen Materialien. Das hängt auch davon ab, woraus der Strom besteht. Wir unterscheiden:

- *elektronischer Leiter*: hauptsächlich Elektronen, Bsp.: Metalle

¹ André-Marie Ampère (20. Januar 1775 in Lyon, Frankreich - 10. Juni 1836 in Marseille) war ein französischer Physiker und Mathematiker. Nach ihm ist die internationale Einheit der Stromstärke Ampere benannt. Er war der erste, der erkannt, dass zwischen stromdurchflossenen Drähten eine Kraft wirkt.

- Ionen-Leiter: Ionen, Bsp.: Elektrolyte

Bsp. i.

Wie schnell sind die Elektronen in einem elektrischen Leiter im Mittel? Kreuzen Sie nur eine Antwort an:

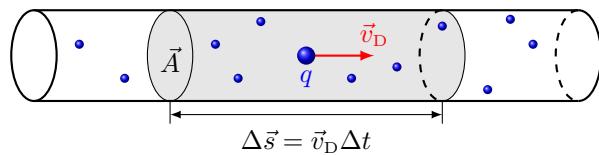
- o Mm/s o km/s o m/s o mm/s o $\mu\text{m}/\text{s}$ o nm/s

Oder direkt auf dieser Seite: [Clicker zur Geschwindigkeit](#)

Lsg: —

Lösung:

Betrachten wir einen Leiter, in dem sich n Ladungen q pro Volumeneinheit befinden (also Ladungsdichte² n), die sich mit einer Geschwindigkeit \vec{v}_D bewegen (vgl. Abb.).



Aus der Definition lässt sich nun eine Formel für den Strom ableiten. Beginnen wir mit der Definition:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}.$$

Die Ladung ΔQ , welche sich während der Zeit Δt im Bereich der Länge s befindet, ist:

$$\Delta Q = \Delta N q,$$

wobei ΔN die Anzahl Ladungen sind. Mit der Ladungsdichte gilt $\Delta N = n\Delta V$ und $\Delta V = A\Delta s$. Damit erhalten wir:

$$I = \frac{nqA\Delta s}{\Delta t}.$$

Die Strecke Δs entspricht der Länge, welche die Teilchen in der Zeit Δt durchqueren, damit ist: $\Delta s = v_D \Delta t$ und wir erhalten schliesslich folgendes Gesetz:

Ges. 1: (Stromstärke in einem Leiter) Die Stromstärke I in einem Leiter der Querschnittsfläche A und der Ladungsdichte n lässt sich berechnen mit:

$$I = nqAv_D,$$

wobei q die Ladung und v_D die Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger sind.

Das folgende Beispiel verdeutlicht, warum die Geschwindigkeit als Driftgeschwindigkeit bezeichnet wird:

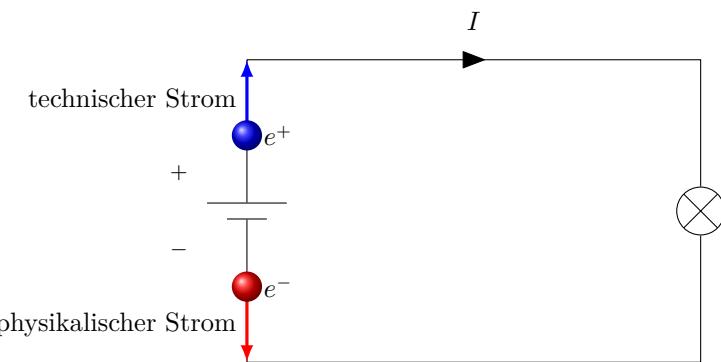
Bsp. ii.

Bestimmen Sie die Driftgeschwindigkeit der Elektronen in einem Kupferdraht mit einem Radius von 8.15 mm, in dem ein Strom von einem Ampère fliesst. Nehmen Sie für Kupfer ein Leitungselektron pro Atom an. ($\rho_{\text{Cu}} = 8.93 \text{ g/cm}^3$ und $M_{\text{Cu}} = 63.5 \text{ g/mol}$) Lsg: $v_D \approx -3.5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$

²Beachten Sie, dass dieses n nicht der Stoffmenge entspricht.

Lösung:

Obwohl die Stromstärke kein Vektor ist, wird in elektrischen Schaltungen eine Stromrichtung angegeben. In Physik und Technik wird die Stromrichtung als die Richtung definiert, in der sich die positive elektrische Ladung bewegt, auch wenn die bewegte Ladung negativ ist, wie bei einem elektrischen Leiter. Für ein einfaches Schaltbild gilt daher



Die positiven Ladungen sind in diesem Fall keine echten Ladungen, sondern nur als Gegenpol zur Bewegung der Elektronen zu verstehen.

2.2 Elektrischer Widerstand

Wie wir aus unserem Alltag wissen, benötigt jedes Gerät Energie, um zu funktionieren. Im Haushalt z. B. werden die meisten Geräte mit der gleichen Spannung versorgt, nämlich 230 V. Wir wissen aber, dass nicht jedes dieser Geräte gleich viel Energie verbraucht. Der Kühlschrank oder der Backofen verbrauchen wahrscheinlich mehr Energie als die LED-Lampe über dem Esstisch. Was bestimmt also, wie viel Energie verbraucht wird? Es ist der elektrische Widerstand. Wir definieren ihn als neue physikalische Grösse:

Def. 2: (Elektrische Widerstand) Der elektrische Widerstand R eines Objekts entspricht dem Verhältnis zwischen der angelegten Spannung U und dem sich einstellenden elektrischen Strom I , d. h.

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

Die Einheit des elektrischen Widerstandes ist: $[R] = \Omega$ und heisst Ohm (nach Georg Ohm³).



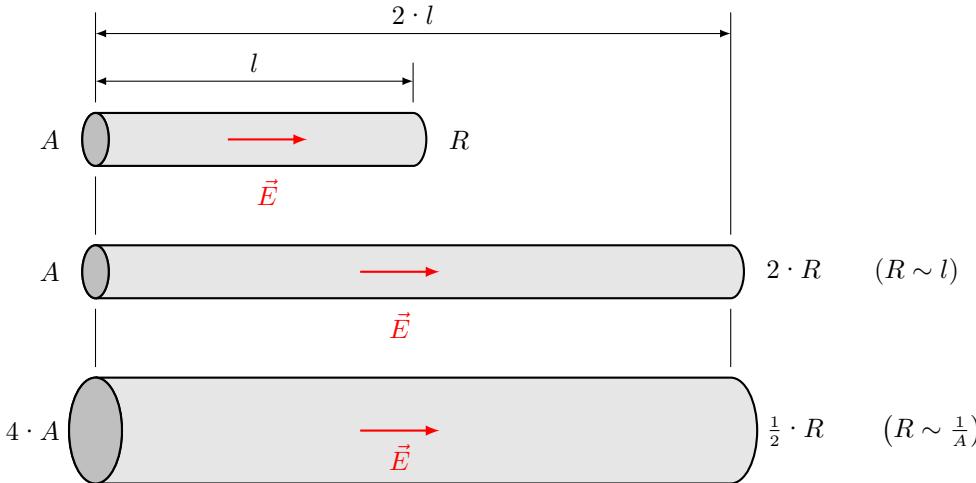
Ohm revolutionierte das Verständnis elektrischer Ströme mit seinem Ohmschen Gesetz. 1827 veröffentlichte er seine bahnbrechende Arbeit, in der er die Proportionalität zwischen der Spannung und dem elektrischen Strom in einem elektrischen Leiter beschrieb. Ohms grundlegende Erkenntnisse legten den Grundstein für die moderne Elektrotechnik und halfen, die Zusammenhänge in elektrischen Schaltungen zu verstehen. Georg Simon Ohm's Arbeit hatte einen nachhaltigen Einfluss auf die Physik des 19. Jahrhunderts und ist integraler Bestandteil der Grundlagen der elektrischen Theorie.

Eine anschauliche Interpretation des elektrischen Widerstandes soll hier aus [17] wiedergegeben werden. Im obigen Beispiel haben wir bereits angedeutet, wie die Driftgeschwindigkeit der Elektronen in einem Draht zustande

³Georg Simon Ohm (16 March 1789 – 6 July 1854) war ein deutscher Physiker und Mathematiker. Als Lehrer begann Ohm seine Untersuchungen mit den elektrochemischen Zellen, welche von Volta entdeckt worden waren. Ohm fand, dass es eine direkte Proportionalität gibt, zwischen der Spannung und dem Strom, was heute als Ohmsches Gesetz bekannt ist.

kommt. Durch das elektrische Feld im Draht werden die Elektronen ständig beschleunigt. Bei ihrer Bewegung stossen sie aber auch ständig gegen die Gitteratome des Materials. Dadurch werden sie wieder abgebremst und es stellt sich eine mittlere so genannte Driftgeschwindigkeit ein. Die verlorene kinetische Energie findet sich in den stärkeren Gitterschwingungen wieder, die wir als Temperaturerhöhung wahrnehmen. Diesen Vorgang kann man sich als eine Art innere Reibung vorstellen. Diese Stösse machen den eigentlichen elektrischen Widerstand aus.

Der Widerstand ist, wie diese anschauliche Interpretation nahelegt, natürlich vom Draht abhängig. Betrachten wir, was mit dem Widerstand passiert, wenn wir einen Draht verlängern oder seinen Querschnitt vergrössern (siehe Abbildung).



Diese Abhängigkeiten des Widerstandes R von A und l ergeben sich direkt aus der Definition von R . Soll bei einer längeren Leitung die gleiche Stromstärke fliessen, so muss die Spannung so lange angepasst werden, bis wieder die gleiche Feldstärke in der Leitung vorhanden ist, d. h.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{El}{I} \quad \Rightarrow \quad R \sim l.$$

Nun soll der Draht dicker sein. An der Spannung ändert sich dabei nichts. Damit gilt:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U}{nqAv_D} \quad \Rightarrow \quad R \sim \frac{1}{A}.$$

Daraus ergibt sich eine Formel für den Widerstand in einem Draht. Es gilt:

Ges. 2: (*Spezifische Widerstand*) Der Widerstand R in einem Draht der Länge l und Querschnitt A beträgt:

$$R = \rho \frac{l}{A},$$

wobei ρ der spezifische Widerstand des Drahtes ist, mit $[\rho] = \Omega \cdot \text{m}$.

Beachten Sie, dass der spezifische Widerstand temperaturabhängig ist. Wir werden jedoch solche Abhängigkeiten nicht berücksichtigen und ρ^4 stets als konstant annehmen. Hier noch einige spezifische Widerstände:

Stoff	ρ [$\Omega \cdot \text{m}$]
Aluminium	$2.7 \cdot 10^{-8}$
Kupfer	$1.7 \cdot 10^{-8}$
Eisen	$9.7 \cdot 10^{-8}$
Konstantan	$49 \cdot 10^{-8}$
Silizium	$1.7 \cdot 10^4$
Wasser (destilliert)	$1 \cdot 10^4$
Meerwasser	$2 \cdot 10^{-1}$

⁴Verwechseln Sie dieses ρ nicht mit dem ρ für die Dichte eines Materials. Das Symbol ist dasselbe, die Bedeutung ganz eine andere.

Man beachte den grossen Unterschied zwischen destilliertem Wasser und Meerwasser. Hier ein Beispiel.

Bsp. iii.

Bestimmen Sie die Stromstärke, welche im Meerwasser fliessen würde, wenn eine Spannung von 230 V in einem Abstand von einem Meter angelegt würde und der Strom einen Querschnitt von 1 mm^2 bräuchte. Lsg: $I \approx 1.2 \text{ mA}$

Lösung:

Man ist versucht zu sagen: „Das sind doch nur ein paar Milliamper!“ Aber man muss bedenken, dass schon 10 mA ausreichen, um Muskelkontraktionen auszulösen.

Der spezifische Widerstand wird verwendet, um die Leitfähigkeit verschiedener Materialien zu unterscheiden:

- Leiter: $\varrho < 10^{-4} \Omega\text{m}$,
 - Halb-Leiter: $10^{-4} \Omega\text{m} < \varrho < 10^6 \Omega\text{m}$,
 - Isolator oder Nichtleiter: $\varrho > 10^6 \Omega\text{m}$.

Abschliessend soll an einem einfachen Beispiel gezeigt werden, warum der Widerstand eines Kupferkabels, also eines Leiters, in den meisten Fällen vernachlässigt werden kann.

Bsp. iv.

Bestimmen Sie a) den Widerstand eines Kupferkabels von $l = 2 \text{ m}$ Länge und einem Querschnitt von $A = 1 \text{ cm}^2$ und b) die Länge eines Kupferkabels mit gleichem Querschnitt und einem Widerstand von einem Ohm ($R' = 1 \Omega$).
 Lsg: a) $R \approx 3.4 \cdot 10^{-4} \Omega$, b) $l' \approx 5.9 \text{ km}$

Lsg: a) $R \approx 3.4 \cdot 10^{-4} \Omega$, b) $l' \approx 5.9 \text{ km}$

Lösung:

Nun betrachten wir noch ein weiteres Beispiel in dem wir den spezifischen Widerstand aus fundamentalen Größen herleiten. Eine exakte Herleitung wird in der Festkörperphysik mit der Hilfe des *Drude-Modells*⁵ durchgeführt. Wir beschränken uns auf eine nicht ganz so rigorose Herleitung.

Bsp. v.

Esp. V: Finden Sie a) einen Term für den spezifischen Widerstand ϱ , wobei Sie die Definition des Widerandes als Startpunkt nehmen. Setzen Sie für die Spannung die Definition ein und für den Strom die Formel für den elektrischen Leiter. (Tipp: Die Driftgeschwindigkeit kann geschrieben werden als $v_D = \langle a \rangle \cdot \tau$, wobei $\langle a \rangle$ eine mittlere Beschleunigung und τ die Zeit zwischen zwei Stößen ist.) b) Bestimmen Sie mit diesem Term den spezifischen Widerstand für Kupfer, sofern $n_{Cu} \approx 8.47 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$ und $\tau_{Cu} \approx 2.5 \cdot 10^{-14} \text{ s}$ sind. Lsg: a) $-$, b) $\varrho \approx 1.68 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$

⁵Paul Karl Ludwig Drude (12. Juli 1863 in Braunschweig - 5. Juli 1906 in Berlin) war ein deutscher Physiker.

Lösung:

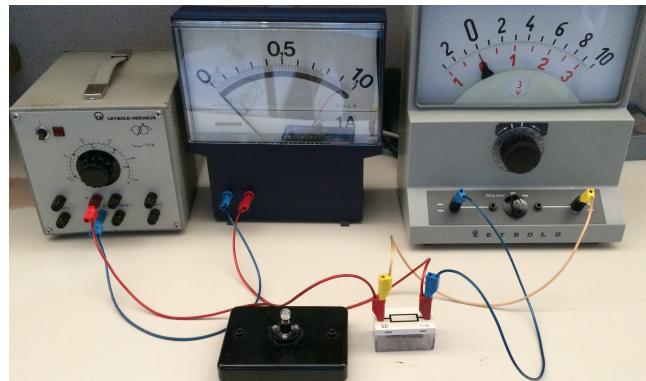
Abschliessend noch einige Bemerkungen zum Begriff Widerstand. Der Begriff Widerstand hat verschiedene Bedeutungen. Zum einen wird der Zahlenwert R als Widerstand bezeichnet. Dann aber auch die innere Reibung beim Stromfluss sowie jedes elektrische Gerät, das als Verbraucher in einem Stromkreis betrachtet werden kann.

2.3 Ohmsches Gesetz

Das Ohmsche Gesetz geht, wie der Name schon sagt, auf Georg Ohm zurück und stellt eine wichtige Grundlage der Elektrizitätslehre dar. Im Wesentlichen stellt das Gesetz einen Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke dar. Bevor wir jedoch das Ohmsche Gesetz formulieren, wollen wir den Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke im Experiment messen.

Exp. 1: Ohmsches Gesetz

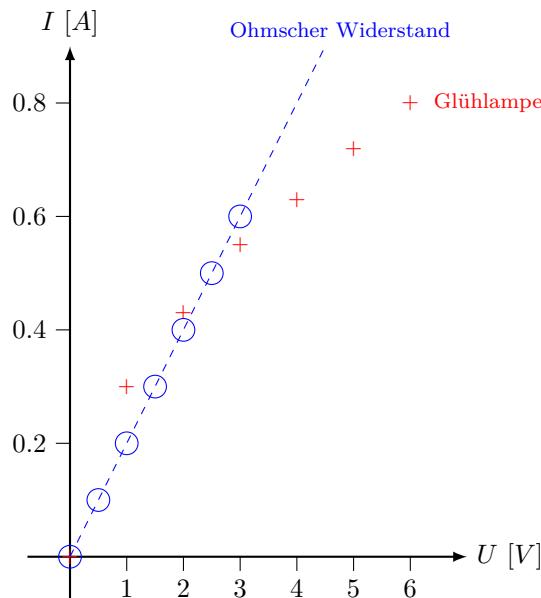
Für dieses Gesetz verwenden wir eine Glühlampe (6 V , 1 A) und einen sogenannten Widerstand von 5Ω . Diese werden nacheinander in eine einfache Schaltung eingebaut, die wie folgt aussieht



Wir variieren die Spannung und messen dabei die Stromstärke für beide Lampen. Dabei erhalten wir folgende Werte:

Glühlampe		Ω -Widerstand	
U [V]	I [A]	U [V]	I [A]
1.0	0.3	0.5	0.1
2.0	0.43	1.0	0.2
3.0	0.55	1.5	0.3
4.0	0.63	2.0	0.4
5.0	0.72	2.5	0.5
6.0	0.8	3.0	0.6

Stellt man die Werte in einem Koordinatensystem so dar, dass die Spannung der x -Achse und die Stromstärke der y -Achse entspricht, so erhält man die folgende Grafik:



Man erkennt, dass sich die Glühlampe und der ohmsche Widerstand nicht gleich verhalten. Der ohmsche Widerstand zeigt ein deutlich lineares Verhalten, die Glühlampe nur in bestimmten Bereichen. Dennoch haben beide lineare Anteile, d.h. U ist proportional zu I und aus der Definition des Widerstandes folgt, dass R konstant ist.

Auch wenn bei einer Glühlampe Spannung und Stromstärke nicht überall proportional zueinander sind, so gibt es doch Bereiche, in denen dies der Fall ist. Dies wird als Ohmsches Gesetz bezeichnet:

Ges. 3: (Ohmsches Gesetz) Das Ohmsche Gesetz besagt, dass die Spannung U proportional zur Stromstärke I ist. Der Proportionalitätsfaktor ist der elektrische Widerstand R und im Allgemeinen nicht konstant.

$$U \sim I.$$

Wenn ein Widerstand konstant ist, spricht man von einem *Ohmschen Widerstand*. Es gibt auch Widerstände, die über einen grösseren Bereich ohmsch sind. Dies sind in der Regel Bauelemente, die in der Elektronik verwendet werden. Wofür genau, soll nach diesem Beispiel diskutiert werden.

Bsp. vi.

Dieses Beispiel bezieht sich auf das vorhergehende Experiment. Hier noch einmal die Tabelle:

Glühlampe		Ω -Widerstand	
U [V]	I [A]	U [V]	I [A]
1.0	0.3	0.5	0.1
2.0	0.43	1.0	0.2
3.0	0.55	1.5	0.3
4.0	0.63	2.0	0.4
5.0	0.72	2.5	0.5
6.0	0.8	3.0	0.6

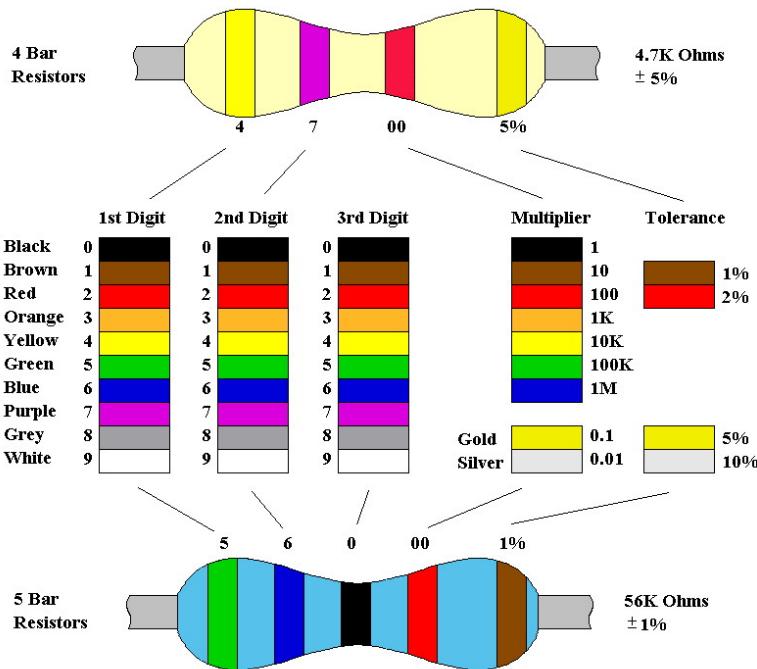
Bestimmen Sie den Widerstand der ersten und letzten Messung für die Glühlampe und den Ohmschen Widerstand.
Lsg: $R_1 \approx 3.3 \Omega$, $R_5 \approx 7.5 \Omega$, $R'_1 = R'_5 \approx 5 \Omega$

Lösung:

Wann und wozu braucht man Widerstände? Diese Frage bezieht sich auf das Bauelement Widerstand. In elektronischen Geräten kommt der Widerstand ebenso häufig vor wie die Kapazität. Solche Widerstände sehen in der Regel so aus:



Der Widerstandswert ist in einem System farbiger Ringe kodiert. Eine solche Farbcodeliste findet man hier [46] und sieht zum Beispiel so aus:



Solche Widerstände werden meistens als Schutzwiderstände, z.B. als Strombegrenzer, verwendet. Hängt der Widerstand kontinuierlich von einer anderen Grösse, z.B. der Temperatur, ab, so kann der Widerstand zur Messung dieser Grösse verwendet werden. Ändert sich der Widerstandswert bei einem bestimmten Wert der Umgebungsgrösse sprunghaft, so kann der Widerstand als Schalter verwendet werden.

Dies waren nun einige Anwendungen für das Bauelement Widerstand, aber es soll noch einmal erwähnt werden, dass im Allgemeinen jeder Verbraucher in einem Stromkreis einen Widerstand darstellt, wie dieses abschließende Beispiel zeigt.

Bsp. vii.

Betrachten wir noch einen einfachen Stromkreis, z. B. eine Taschenlampe, die durch zwei Batterien betrieben wird. a) Zeichnen Sie eine Schnittzeichnung einer Taschenlampe. b) Zeichnen Sie das Schaltschema inkl. Schalter und Lampe, wobei Sie die Lampe als Widerstand darstellen können. (Widerstandssymbol:  und Schaltersymbol: ). c) Bestimmen Sie für zwei 1.5 V Batterien die Stromstärke, falls die Lampe etwa $300\ \Omega$ verbraucht.

Lsg: a) -, b) -, c) $I \approx 0.01 \text{ A}$

Lösung:

Abschliessend bestimmen Sie für den elektrischen Strom die Arbeit und die Leistung in einem einfachen Stromkreis mit konstantem Strom und konstanter Spannung.

Bsp. viii.

Bestimmen Sie a) die Stromarbeit W_{el} und b) die elektrische Leistung P_{el} , falls ein Strom der Stärke I bei einer Spannung U während einer Zeit Δt fließt. Lsg: –

Lsg: —

Lösung:

Bisher haben wir nur sehr einfache Schaltbilder betrachtet. Im nächsten Abschnitt werden wir zwei Gesetze kennenlernen, die es uns ermöglichen, beliebig komplizierte Schaltpläne zu berechnen, es sind die Kirchhoffsschen Gesetze.

2.4 Kirchhoff'sche Gesetze

Die Kirchhoffschen Gesetze oder auch Regeln genannt, gehen auf Gustav Kirchhoff⁶ zurück, der sie 1845 formulierte.



G. Kirchhoff
(1824-1887)

Kirchhoff, ein deutscher Physiker des 19. Jahrhunderts, trug bedeutend zum Verständnis der Elektrodynamik und Spektralanalyse bei. Gemeinsam mit Robert Bunsen entwickelte er die Kirchhoff'sche Spektralanalyse, die zur Entdeckung neuer Elemente führte. Kirchhoff leistete auch wichtige Beiträge zur Thermodynamik. Sein Name ist besonders mit den Kirchhoff'schen Gesetzen in der Elektrotechnik verbunden, die fundamentale Prinzipien für elektrische Schaltungen darstellen. Kirchhoffs vielseitige Arbeit machte ihn zu einer Schlüsselfigur in der Physik des 19. Jahrhunderts.

Kirchhoff hat zwei Regeln formuliert, die *Knoten-* und *Maschenregel*. Beide sind keine neuen Gesetze, sondern

⁶Gustav Robert Kirchhoff (12. März 1824 in Königsberg (Preussen) - 17. Oktober 1887 in Berlin) war ein deutscher Physiker, der sich insbesondere um die Erforschung der Elektrizität verdient gemacht hat. Kirchhoff ist bekannt für seine 1845 entdeckten Regeln für elektrische Stromkreise, die die Abhängigkeit von elektrischer Spannung, elektrischem Strom und elektrischem Widerstand beschreiben. Diese sogenannten Kirchhoff-Regeln sind grundlegend für den Aufbau und die Analyse elektrischer Schaltungen sowie für die Elektrotechnik im Allgemeinen.

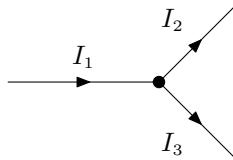
spezielle Formulierungen der Ladungs- und der Energieerhaltung.

Ges. 4: (1. Kirchhoffsches Gesetz oder Knotenregel) Die Knotenregel besagt, dass die Summe aller elektrischen Ströme I_i an einem Knoten null ist, d. h.

$$\sum_i I_i = 0,$$

wobei Ströme, die auf den Knoten zu gerichtet sind positiv und von ihm weg gerichtet sind negativ eingesetzt werden.

Ein Knoten ist ein Verzweigungspunkt in einem elektrischen Stromkreis. Er wird normalerweise durch einen schwarzen Punkt dargestellt. Für drei Ströme könnte dies z.B. so aussehen



In diesem Fall folgt aus der Knotenregel, d. h.

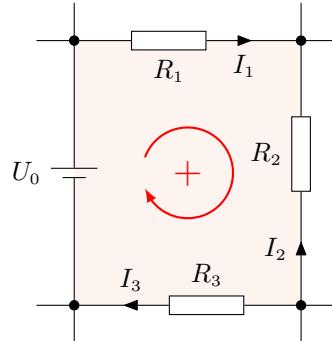
$$I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad I_1 = I_2 + I_3.$$

Ges. 5: (2. Kirchhoffsches Gesetz oder Maschenregel) Die Maschenregel besagt, dass die Summe aller elektrischen Spannungen U_i in einer Masche null ist, d. h.

$$\sum_i U_i = 0,$$

wobei Spannungszunahmen positiv und -abnahmen negativ gezählt werden.

Eine Masche ist ein in sich geschlossener Stromkreis innerhalb einer Schaltung. Dies könnte z. B. wie folgt aussehen:



Die Drehrichtung innerhalb der Masche (hier rot dargestellt) kann beliebig gewählt werden. In diesem Fall wird die Spannungsquelle von Minus nach Plus durchflossen, wodurch die Spannung erhöht wird. Da der Strom im Widerstand 1 in die gleiche Richtung fliesst wie die gewählte Umlaufrichtung, leistet der Widerstand Arbeit und somit ist $U_1 = R_1 I_1$ negativ. Analoges gilt für die anderen:

$$U_0 - U_1 - U_2 - U_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad U_0 - R_1 I_1 - R_2 (-I_2) - R_3 I_3 = 0.$$

Für beliebige Maschen erhält man in der Regel ein eindeutiges Gleichungssystem, wie wir im nächsten Beispiel sehen werden. Es ist jedoch zu beachten, dass immer unabhängige Maschen verwendet werden müssen, sonst ist das System über- oder unterbestimmt.

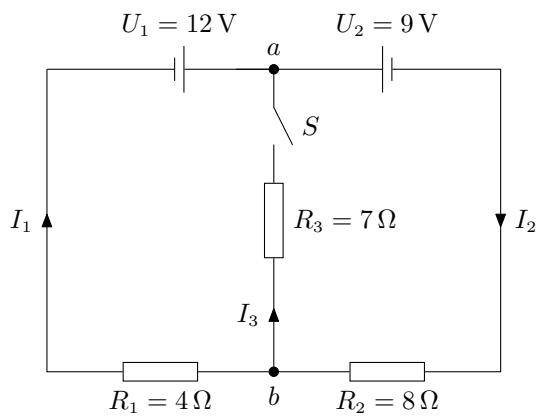
Noch eine Anmerkung zur Energieerhaltung. Während die Ladungserhaltung in der Knotenregel leicht zu erkennen ist, ist die Energieerhaltung nicht so offensichtlich. Wenn wir eine Ladung q gedanklich durch alle Abschnitte folgen, so ist damit Arbeit verbunden:

$$W_{\text{el}} = qU_0 + qU_1 + qU_2 + qU_3.$$

Da es sich um eine geschlossene Strecke handelt und die elektrische Kraft eine konservative Kraft ist, muss die Arbeit verschwinden. Damit ist auch die Änderung der potentiellen Energie gleich Null, d.h. die Energie bleibt erhalten.

Bsp. ix.

Betrachten wir das folgende Schaltschema (vgl. Abb.).



Bestimmen Sie die Stromstärken I_1 , I_2 und I_3 , wenn a) der Schalter S geöffnet und b) der Schalter geschlossen ist.

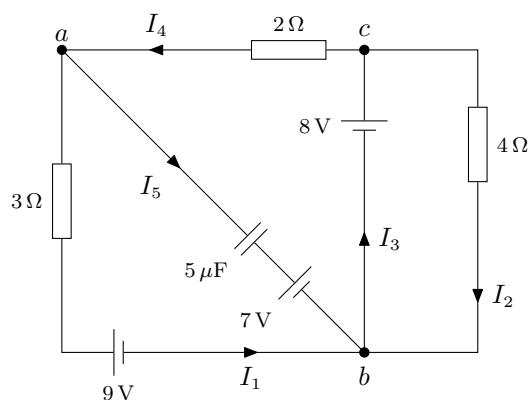
Lsg: a) $I = 0.25 \text{ A}$, b) $I_1 \approx 1.0 \text{ A}$, $I_2 \approx -0.13 \text{ A}$, $I_3 \approx -1.14 \text{ A}$

Lösung:

Das nächste Beispiel soll nicht so ausführlich berechnet werden, insbesondere soll das Lösen des Gleichungssystems dem Taschenrechner überlassen werden.

Bsp. x.

Bestimmen Sie für das folgende Schaltschema



- a) die Stromstärken I_1 bis I_5 und b) die Ladung auf dem Kondensator.

Lsg: a) $I_1 \approx -0.2 \text{ A}$, $I_2 \approx 2 \text{ A}$, $I_3 \approx 1.8 \text{ A}$, $I_4 \approx -0.2 \text{ A}$, $I_5 = 0$, b) $Q \approx 7.0 \mu\text{C}$

Lösung:

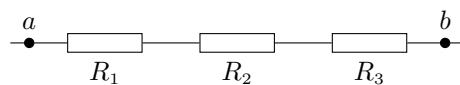
Das Rechnen mit Schaltungen ist im Grunde nicht schwierig, solange man sich streng an die Regeln hält. Eine wichtige Regel, die sich aus den Kirchhoffschen Gesetzen ergibt, ist die Vereinfachung von Schaltungen mit Widerständen. Grundsätzlich gibt es nur zwei Möglichkeiten, Widerstände miteinander zu verbinden, entweder in Reihe oder parallel.

2.4.1 Serie- und Parallelschaltung von Widerständen

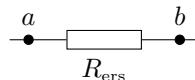
Aus den Kirchhoffsschen Gesetzen lassen sich Gesetzmäßigkeiten für Reihen- und Parallelschaltungen beliebiger Bauelemente ableiten. Exemplarisch soll dies hier für Widerstände ausführlich diskutiert werden.

Serieschaltung

Werden mehrere Widerstände hintereinander geschaltet, so spricht man von Serieschaltung und es sieht z. B. wie folgt aus:



Typisch für eine Reihenschaltung ist, dass durch die Widerstände der gleiche Strom fließt. Gesucht wird nun ein sogenannter Ersatzwiderstand R_{ers} ,



sodass die Spannung U_{ab} , welche zwischen a und b abfällt, die Gleiche ist. Die Spannung U_{ab} entspricht, wegen der Maschenregel, der Summe der Spannungen an den einzelnen Widerständen und da sich die Stromstärke zwischen a und b nicht ändert, gilt:

$$U_{ab} = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3) = IR_{\text{ers.}}$$

Damit ist der Ersatzwiderstand:

$$R_{\text{ers}} \equiv R_1 + R_2 + R_3,$$

Allgemein gilt:

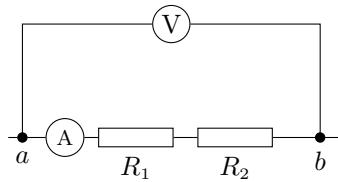
Ges. 6: (Serienschaltung von Widerständen) Bei der Serienschaltung von Widerständen ist der Ersatzwiderstand R_{ser} die Summe der Einzelwiderstände R_i , d.h.

$$R_{\text{ers}} = \sum_{i=1}^n R_i.$$

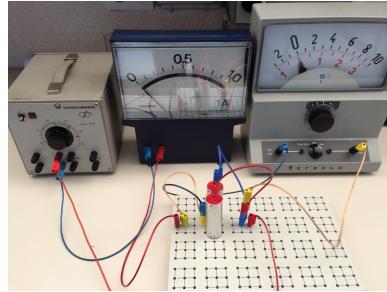
Das Gesetz ist sehr einfach. In Reihe geschaltete Widerstände werden einfach addiert, d.h. der Ersatzwiderstand ist immer grösser als jeder einzelne Widerstand. Überprüfen wir dieses Gesetz mit einem einfachen Experiment.

Exp. 2: Serieschaltung

Zwei Widerstände $R_1 = 5 \Omega$ und $R_2 = 10 \Omega$ werden in Reihe geschaltet, wie im folgenden Schaltbild dargestellt (Spannungsquelle nicht eingezeichnet):



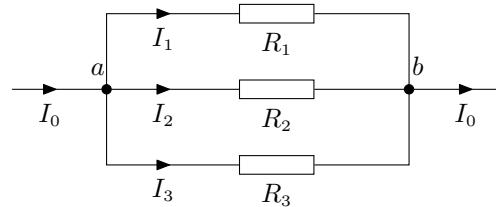
Dies sieht wie folgt aus:



Stellen wir einen Strom von $I \approx 0.5 \text{ A}$ ein, so messen wir eine Spannung über beide Widerstände von $U \approx 7.5 \text{ V}$. Dies ergibt einen Widerstand von $R = \frac{U}{I} \approx 15 \Omega$, was genau dem Ersatzwiderstand einer Serieschaltung entspricht: $R_{\text{res}} = R_1 + R_2 = 15 \Omega$.

Parallelschaltung

Werden drei Widerstände wie in der Abbildung unten geschaltet, so spricht man von einer Parallelschaltung.



Typisch für diese Schaltung ist, dass über alle Widerstände die gleiche Spannung U abfällt. Damit sind die einzelnen Ströme gegeben als:

$$I_1 = \frac{U_{ab}}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2} \quad \text{und} \quad I_3 = \frac{U_{ab}}{R_3}.$$

Wegen der Knotenregel gilt hier:

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3 = U_{ab} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = \frac{U_{ab}}{R_{\text{ers}}}.$$

Damit ist der Ersatzwiderstand:

$$\frac{1}{R_{\text{ers}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

Allgemein gilt:

Ges. 7: (Parallelschaltung von Widerständen) Bei der Parallelschaltung von Widerständen ist der Kehrwert des Ersatzwiderstands R_{ers} gleich der Summe der Kehrwerte der Einzelwiderstände R_i , d. h.

$$\frac{1}{R_{\text{ers}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}.$$

Dieses Gesetz ist etwas schwieriger, da es Brüche enthält. Hier ist nicht sofort ersichtlich, dass der Ersatzwiderstand immer kleiner ist als jeder Einzelwiderstand.

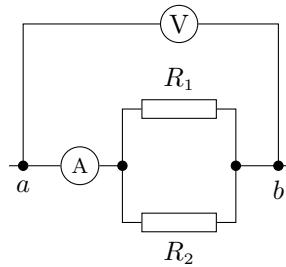


Zeige, dass der Ersatzwiderstand einer reinen Parallelschaltung immer kleiner ist als jeder einzelne Widerstand.

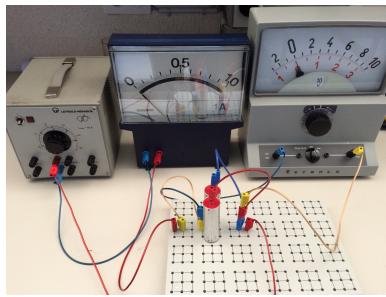
Überprüfen wir dieses Gesetz mit einem einfachen Experiment, diesmal aber mit einer Parallelschaltung.

Exp. 3: Serieschaltung

Zwei Widerstände von $R_1 = 5\Omega$ und $R_2 = 10\Omega$ werden parallel geschalten, wie dies im folgenden Schaltschema dargestellt ist (Spannungsquelle nicht eingezeichnet):



Dies sieht wie folgt aus:

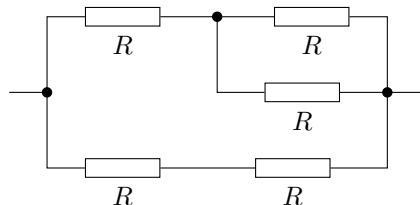


Stellt man einen Strom von $I \approx 0.75\text{ A}$ ein, so misst man an beiden Widerständen eine Spannung von $U \approx 2.5\text{ V}$. Daraus ergibt sich ein Widerstand von $R = \frac{U}{I} \approx 3.3\Omega$, was genau dem Ersatzwiderstand einer Parallelschaltung entspricht: $\frac{1}{R_{\text{res}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{3}{10\Omega}$ und damit ist $R_{\text{res}} \approx 3.33\Omega$.

Um diese beiden Gesetze ein wenig zu üben, betrachten wir zwei Schaltungen, die nur aus Widerständen bestehen.

Bsp. xi.

Bestimmen Sie den Ersatzwiderstand für die abgebildete Schaltung,



sofern alle Widerstände gleich gross sind, also R .

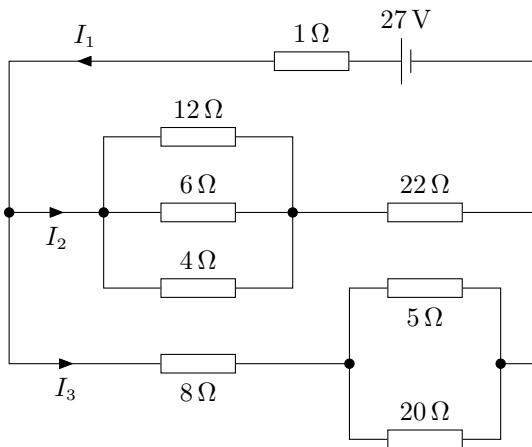
$$\text{Lsg: } R_{\text{ers}} = \frac{6}{7}R$$

Lösung:

Nun noch ein Beispiel, wobei man hier versucht sein könnte, die Kirchhoffschen Gesetze anzuwenden. Dies würde jedoch das Problem unnötig erschweren.

Bsp. xii.

Bestimmen Sie für den Stromkreis in der Abbildung die Ströme I_1 bis I_3 .



Tipp: Vereinfachen Sie das Schaltschema durch Ersatzwiderstände.

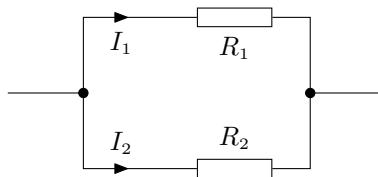
Lsg: $I_1 \approx 3 \text{ A}$, $I_2 \approx 1 \text{ A}$, $I_3 \approx 2 \text{ A}$

Lösung:

Im nächsten Abschnitt werden einige Anwendungen diskutiert. Unter anderem werden wir herausfinden, warum Vögel auf Hochspannungsleitungen stehen können, ohne gegrillt zu werden.

2.4.2 Anwendungen der Kirchhoffschen Gesetze

Bevor wir uns einigen Anwendungen zuwenden, wollen wir den Zusammenhang zwischen Strom und Widerstand in einer einfachen Parallelschaltung herleiten. Dazu betrachten wir das folgende Schaltbild:



Durch Anwendung der Maschenregel im Uhrzeigersinn erhalten wir:

$$-I_1R_1 + I_2R_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad I_1R_1 = I_2R_2.$$

Das bedeutet, dass die Stromstärke I umgekehrt proportional zum Widerstand R ist. Je grösser der Widerstand, desto geringer der Strom und umgekehrt. Eine Anwendung dieses Prinzips ist der Vogel auf der Hochspannungsleitung.

Vogel auf Hochspannungsleitung

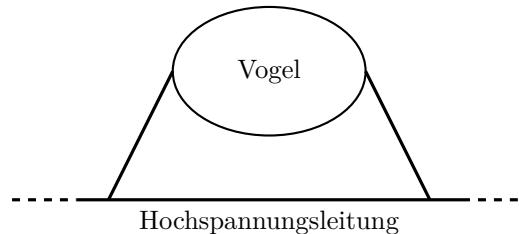
Wir alle kennen die Bilder von Vögeln auf der Hochspannungsleitung (vgl. Abb.) und vielleicht haben wir uns auch schon gefragt, weshalb können die Vögel das. Macht ihnen Strom nichts aus oder haben sie Isolatoren an den Füßen? Natürlich ist es nichts von all dem!



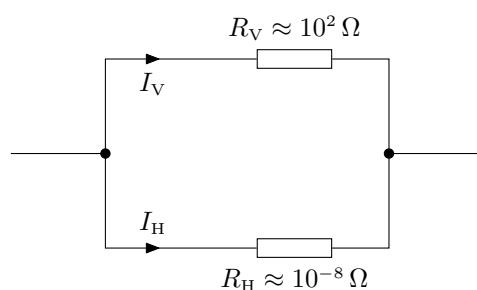
Oder in der Zukunft wird es wohl so aussehen:



Doch zurück zur Lösung des Problems. Betrachten wir einen Vogel und eine Hochspannungsleitung, so stellt sich das Problem schematisch wie folgt dar



Da der Strom durch das eine Bein in den Vogel hinein- und durch das andere Bein wieder herausfliessen kann und die Leitung zwischen den Beinen ebenfalls einen Widerstand aufweist, sieht das Schaltbild wie folgt aus:

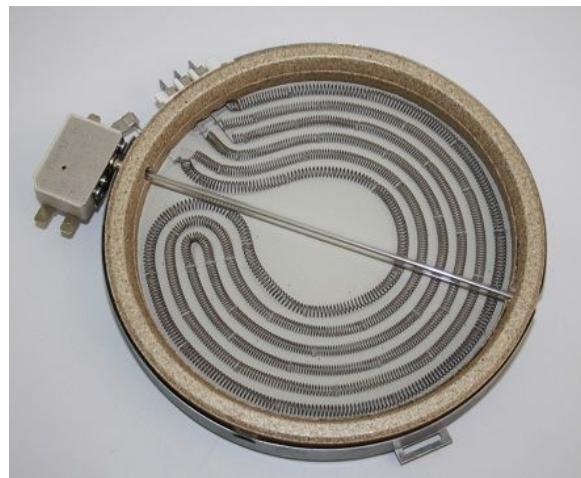


Eine Stromleitung kann maximal 2 kA tragen, so dass zwischen Vogel und Leitung eine Spannung von etwa 10^{-5} V fällt. Dabei fliesst aber ein Strom von etwa 10^{-7} A durch den Vogel, den er wahrscheinlich gar nicht bemerkt, höchstens ein leichtes Kitzeln.

Dies wurde auch in einem Hollywood-Film thematisiert. Hier ein kleiner Ausschnitt aus dem Film *Tango and Cash* aus dem Jahr 1989 (vgl. Video: [Tango erklärt Cash die Physik einer Hochspannungsleitung](#)).

Heizstufen einer Kochplatte

Eine elektrische Kochplatte hat in der Regel drei Heizwicklungen, die mit einem Schalter verschieden zusammengeschaltet werden können (vgl. Abb.).

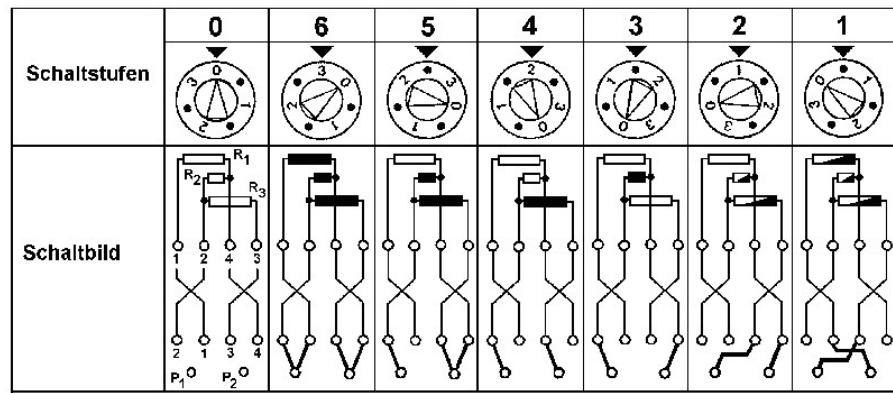


Zum Beispiel enthält eine 1500 W-Kochplatte mit sechs Heizstufen die drei Wicklungen $R_1 = 146 \Omega$, $R_2 = 66 \Omega$ und $R_3 = 165 \Omega$. Diese drei Widerstände können auf viele verschiedene Arten miteinander verbunden werden. Da die Gesamtspannung 230 V für alle Stufen gleich ist, verwenden wir die Formel für die Leistung:

$$P = UI = \frac{U^2}{R},$$

wobei $I = U/R$ eingesetzt wurde. Die Leistung ist also umgekehrt proportional zum Widerstand, d.h. beim grössten Widerstand haben wir die kleinste Leistung und umgekehrt. Bei Stufe 1 sind also alle Widerstände in Reihe geschaltet und wir erhalten eine Leistung von $P_1 \approx 140 \text{ W}$. Bei Stufe 6 sind alle Widerstände parallel geschaltet und wir erhalten den kleinstmöglichen Widerstand und damit die grösstmögliche Leistung $P_6 \approx 1.5 \text{ kW}$.

Das Schaltbild zeigt, dass nicht immer alle drei Widerstände verwendet werden (siehe Abbildung). Ein weisser Widerstand bedeutet, dass er nicht verwendet wird. Ein grauer Widerstand bedeutet, dass er parallel geschaltet ist und ein halb gefüllter Widerstand, dass er in Reihe geschaltet ist.

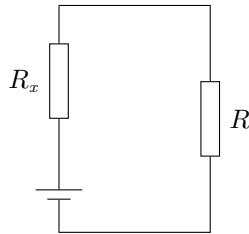


In einigen Versuchen, sicher aber im Praktikum, haben Sie Ströme und Spannungen gemessen. Wie solche Geräte aufgebaut sind, wollen wir uns jetzt ansehen.

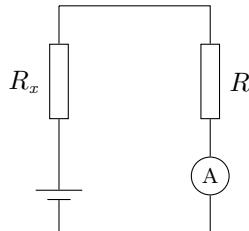
Ampère- und Voltmeter

Das Messen von Strömen mit dem Ampèremeter und das Messen von Spannungen mit dem Voltmeter sind in der Elektrizitätslehre von grosser Bedeutung. Zum Abschluss dieses Kapitels über elektrische Ströme möchten wir zwei Fragen beantworten. Zum einen, wie diese Messgeräte angeschlossen werden müssen und zum anderen, wie sie im Inneren aufgebaut sind.

Betrachten wir einen einfachen Stromkreis mit einem Verbraucher R (siehe Abbildung). Wir möchten wissen, welcher Strom durch den Verbraucher fliesst und welche Spannung über dem Verbraucher abfällt, wenn ein unbekannter Widerstand R_x in den Stromkreis eingefügt wird.

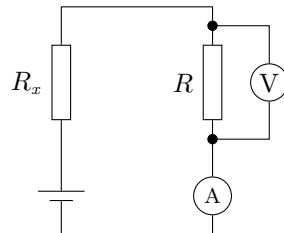


Um den Strom zu messen, müssen wir uns an die Knotenregel erinnern. Solange es keinen Knoten gibt, fliesst immer der gleiche Strom, also müssen wir das Ampèremeter in den Stromkreis integrieren. Mit anderen Worten, das Ampèremeter wird in Reihe geschaltet:



Da der Strom im gesamten Stromkreis gleich ist, spielt es keine Rolle, ob das Ampèremeter vor oder nach dem Widerstand angeschlossen ist.

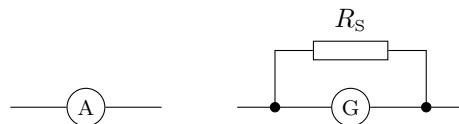
Um die Spannung zu messen, die über dem Verbraucher R abfällt, müssen wir uns an die Maschenregel erinnern. Da im Inneren des Stromkreises keine Spannung abfällt, müssen wir das Voltmeter parallel zum Widerstand schalten. Nur dann fällt über dem Voltmeter die gleiche Spannung ab wie über dem Widerstand. Das sieht dann so aus:



Im Gegensatz zum Ampèremeter muss beim Voltmeter darauf geachtet werden, dass es unmittelbar vor und nach dem zu messenden Widerstand geschaltet wird und nicht ein anderer Widerstand dazwischen liegt.

Werfen wir nun einen Blick auf das Innenleben der beiden Messgeräte. Beide verwenden als zentrales Messelement das sogenannte *Galvanometer*. Es wird erst im nächsten Kapitel über den Magnetismus genauer erklärt. Für den Moment reicht es zu wissen, dass es nur sehr kleine Ströme messen kann und dass der Zeigerausschlag proportional zur Stromstärke ist.

Wie sieht nun das Ampèremeter aus? Da es in Reihe geschaltet ist und das Galvanometer nur kleine Ströme messen kann, kann es nicht nur aus dem Galvanometer bestehen, sonst müsste es auch grosse Ströme messen können. Das Ampèremeter sieht also wie folgt aus:



Der *Shunt* R_S ist ein niederohmiger Widerstand. Das bedeutet, dass ein grosser Teil des Stroms durch diesen Widerstand fliesst und nur ein kleiner Teil durch das Galvanometer. Damit hat man sozusagen zwei Fliegen mit einer Klappe geschlagen. Zum einen wird der Stromkreis kaum gestört, da der grösste Teil des Stromes durch den Shunt fliesst und zum anderen fliesst nur sehr wenig Strom durch das Galvanometer.

Da das Voltmeter parallel geschaltet ist, verhält es sich genau umgekehrt. Es ergibt sich also folgendes Bild:



Der Widerstand R_V ist kein besonderer Widerstand, er sollte nur sehr gross sein und wird auch Vorwiderstand genannt. Der grosse Widerstand hat den Vorteil, dass nur sehr wenig Strom durch das Voltmeter und damit

auch durch das Galvanometer fliesst. Ausserdem ändert sich dadurch der Strom im Stromkreis nur geringfügig. Zusammenfassend kann man also sagen, dass das Ampèremeter in Reihe geschaltet ist, aber in sich selbst eine Parallelschaltung darstellt. Andererseits ist das Voltmeter parallel geschaltet, aber selbst eine Reihenschaltung.

Zusammenfassung Kapitel G2

1. Die *elektrische Stromstärke* I ist definiert als die Ladungsmenge ΔQ , die pro Zeiteinheit Δt durch einen zur Stromrichtung senkrechten Querschnitt des Leiters fliesst, d. h.

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}.$$

2. Die Stromstärke I in einem Leiter der Querschnittsfläche A und der Ladungsdichte n ist

$$I = nqAv_D,$$

wobei q die Ladung und v_D die Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger sind.

3. Der *elektrische Widerstand* R entspricht dem Verhältnis zwischen der angelegten Spannung U und dem sich einstellenden elektrischen Strom I , d. h.

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

4. Der Widerstand R in einem Draht der Länge l und Querschnitt A beträgt:

$$R = \rho \frac{l}{A},$$

wobei ρ der *spezifische Widerstand* des Drahtes ist.

5. Das *Ohm'sche Gesetz* besagt, dass die Spannung U proportional zur Stromstärke I ist. Verhält sich ein Widerstand so, dass Spannung und Strom proportional sind, dann spricht man von einem *ohmschen Widerstand*.

6. Die *elektrische Leistung* bei einem Strom I und einer Spannung U ist:

$$P_{\text{el}} = UI.$$

7. Die *Kirchhoff'schen Gesetze* lauten:

I. Die *Knotenregel* besagt, dass die Summe aller elektrischen Ströme I_i an einem Knoten null ist, d. h.

$$\sum_i I_i = 0,$$

sofern die eine Richtung positiv und die andere negativ gewählt wird.

II. Die *Maschenregel* besagt, dass die Summe aller elektrischen Spannungen U_i in einer Masche null ist, d. h.

$$\sum_i U_i = 0.$$

8. Bei einer *Serieschaltung* von Widerständen ist der Ersatzwiderstand R_{ers} gleich der Summe der Einzelwiderstände R_i , d. h.

$$R_{\text{ers}} = \sum_i R_i.$$

9. Bei einer *Parallelenschaltung* von Widerständen ist der Kehrwert des Ersatzwiderstands R_{ers} gleich der Summe der Kehrwerte der Einzelwiderstände R_i , d. h.

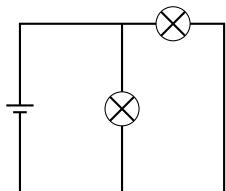
$$\frac{1}{R_{\text{ers}}} = \sum_i \frac{1}{R_i}.$$

Konzeptfragen Kapitel G2

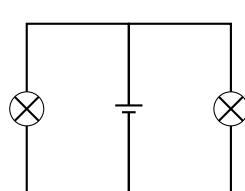
1. Warum geht das Licht in Ihrer Wohnung fast sofort an, wenn Sie den Schalter betätigen?
 - Wenn der Stromkreis geschlossen ist, kommt es zu einer schnellen Umverteilung der Oberflächenladungen im Stromkreis.
 - Ladungen speichern Energie. Wenn der Stromkreis geschlossen ist, wird die Energie freigesetzt.
 - Ladungen im Draht bewegen sich sehr schnell.
 - Die Stromkreise in einem Haus sind parallel verdrahtet. Daher fliesst bereits ein Strom.
 - Die Ladungen im Draht sind wie Murmeln in einer Röhre. Wenn der Stromkreis geschlossen ist, schieben sich die Ladungen gegenseitig durch den Draht.

2. Werden bei der Erzeugung von Licht in einer Glühbirne Ladungen verbraucht?
 - Ja, Ladung wird verbraucht. Ladungen, die sich durch den Glühfaden bewegen, erzeugen "Reibung", die den Glühfaden erwärmt und Licht erzeugt.
 - Ja, Ladung wird verbraucht. Ladungen werden als Photonen emittiert und gehen verloren.
 - Ja, Ladung wird verbraucht. Ladungen werden von der Glühwendel absorbiert und gehen verloren.
 - Nein, die Ladung bleibt erhalten. Ladungen werden einfach in eine andere Form umgewandelt, z. B. in Wärme oder Licht.
 - Nein, die Ladung bleibt erhalten. Ladungen, die sich durch den Glühfaden bewegen, erzeugen "Reibung", die den Glühfaden aufheizt und Licht erzeugt.

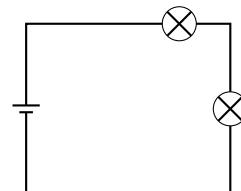
3. Welche Schaltung oder welche Schaltungen stellen eine Schaltung dar, die aus zwei Glühbirnen in Parallelschaltung mit einer Batterie bestehen?



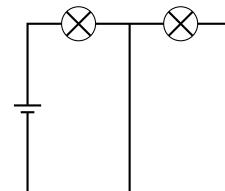
Schaltung 1



Schaltung 2



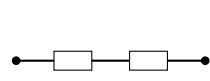
Schaltung 3



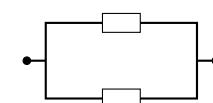
Schaltung 4

- Schaltung 1
- Schaltung 2
- Schaltung 3
- Schaltung 1 und 2
- Schaltung 1, 2 und 4

4. Vergleichen Sie den Ersatzwiderstand von Zweig 1 mit dem von Ersatzwiderstand von Zweig 2. Der Ersatzwiderstand von Zweig 1 ist _____ Zweig 2.



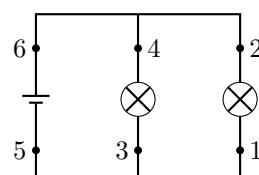
Zweig 1



Zweig 2

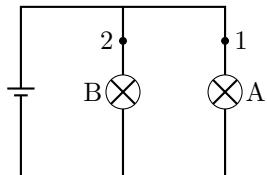
- viermal so gross
- doppelt so gross
- das Gleiche wie
- die Hälfte von
- ein Viertel von

5. Ordnen Sie die Ströme an den Punkten 1, 2, 3, 4, 5 und 6 vom Höchsten zum Niedrigsten.



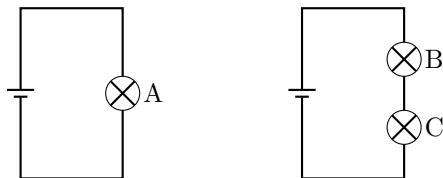
- 6, 4, 2, 1, 3, 5
- 6, 4, 2, 3, 1, 5
- $5 = 6, 3 = 4, 1 = 2$
- $5 = 6, 1 = 2 = 3 = 4$
- $1 = 2 = 3 = 4 = 5 = 6$

6. Wie verändert sich die Helligkeit der Glühbirnen A und B, wenn ein Draht zwischen den Punkten 1 und 2 angeschlossen wird?



- Beide nehmen zu
- Beide nehmen ab
- Sie bleiben gleich
- A wird heller als B
- Keine der beiden Glühbirnen wird leuchten

7. Vergleichen Sie die Energie, die pro Sekunde an jede der unten aufgeführten Glühbirnen abgegeben wird. Welche Glühbirne oder Glühbirnen haben die geringste Energiezufuhr pro Sekunde?



- A
- B
- C
- B = C
- A = B = C

Aufgaben Kapitel G2

Weitere einfache Aufgaben mit ausführlichen Lösungen findet man unter:

<https://www.dropbox.com/sh/m9vlo6gwqli3nds/AABWhKMXUJG70jsXx7ovB-fDa?dl=0> in den Kapiteln 26, 27, 28 & 29.



- Ein $l = 1 \text{ cm}$ langer Glasstab habe einen spezifischen Widerstand von $\rho_G = 10^{12} \Omega\text{m}$. Wie lange müsste ein Kupferdraht mit der gleichen Querschnittsfläche wie der Glasstab sein, damit sich der gleiche Widerstandswert ergibt? Wie oft könnte man diesen Draht um die Erde wickeln?

Lsg: $l_{\text{Cu}} \approx 5.9 \cdot 10^{17} \text{ m}$

- Herr Schlaumeier hat sich einen "Kleinsttauchsieder" (Heizwendel) aus Konstantandraht mit $R = 5.0 \Omega$ gebaut, der an ein Netzgerät der Spannung $U = 12 \text{ V}$ anzuschliessen ist. Welche Zeit t braucht Herr S. zur Erwärmung von $V = 0.501$ Glühwein (Dichte $\rho = 920 \text{ kg/m}^3$, spez. Wärmekapazität $c = 3800 \text{ J/(kg K)}$) von $T_1 = 20^\circ\text{C}$ auf $T_2 = 55^\circ$, wenn die Anordnung einen Wirkungsgrad von $\eta = 80\%$ besitzt?

Lsg: $t \approx 44 \text{ min}$

- Mit einer guten Autobatterie soll bei einer *schlechten* Batterie Starthilfe geleistet werden.

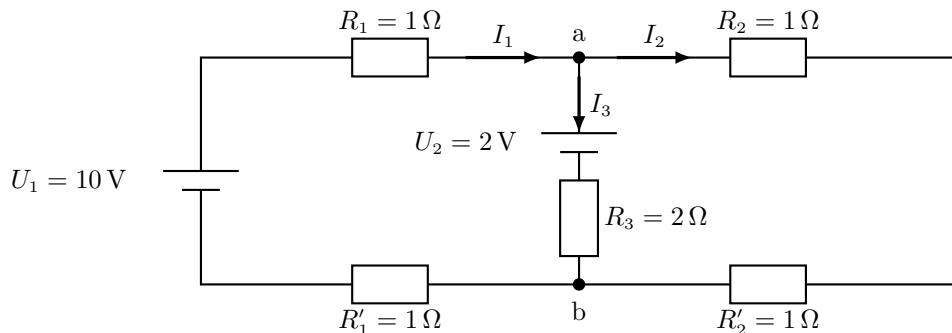
- Wie müssen die Pole der Batterie miteinander verbunden werden?

Die gute Batterie habe eine Quellenspannung von $U_1 = 12 \text{ V}$ während die schlechte nur $U_2 = 11 \text{ V}$ hat. Die Innenwiderstände der Batterien betragen $R_{i_1} = R_{i_2} = 0.01 \Omega$.

- Wie gross ist der Widerstand der $l = 2 \text{ m}$ langen Kupfer-Starthilfekabel mit einem Durchmesser von $d = 0.5 \text{ cm}?$
- Wie gross wird die Stromstärke sein, wenn die Batterien *richtig* verbunden werden?
- Wie gross wird die Stromstärke sein, wenn die Batterien *falsch* verbunden werden?

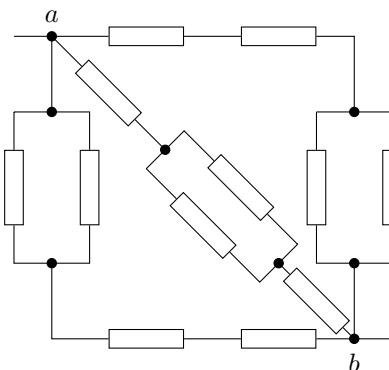
Lsg: a. ++, -- b. $R_1 = R_2 \approx 1.7 \text{ m}\Omega$ c. $I \approx 42.7 \text{ A}$ d. $I \approx 983 \text{ A}$

- Bestimmen Sie die Ströme in den verschiedenen Widerständen (vgl. Abb.).



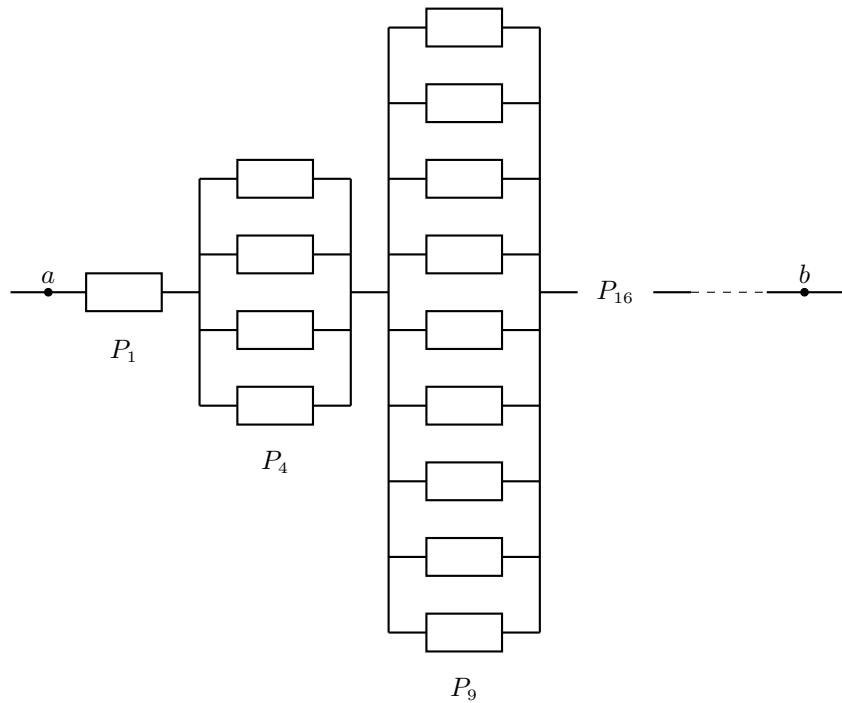
Lsg: $I_1 = 3 \text{ A}$, $I_2 = 2 \text{ A}$, $I_3 = 1 \text{ A}$

- Berechnen Sie den Ersatzwiderstand zwischen a und b für die Schaltung in der Abbildung. (Alle Widerstände haben den Wert R .)



Lsg: $R_{\text{res}} = \frac{5}{6}R$

6. Bestimmen Sie für diese unendliche Serienschaltung von Parallelschaltungen den Ersatzwiderstand zwischen den Punkten a und b . (Alle Widerstände haben den Wert R ; P_n bedeutet, dass n Widerstände parallel geschaltet werden.)



Lsg: $R_{\text{ers}} = \frac{\pi^2}{6}R$

7. Erläutern Sie mit Skizze die Funktionsweise des Ampèremeters und des Voltmeters.

Lsg: –

Literaturverzeichnis

- [1] URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Mars_Climate_Orbiter, Juni 2012
- [2] URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Internationales_Einheitensystem, Juni 2012
- [3] Wikipetzi, IngenieroLoco - Eigenes Werk. Based on File: Relations between new SI units definitions.png, CC BY-SA 4.0,
URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=40278935>
- [4] CMS Collaboration, *Combination of results on the rare decays $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ from the CMS and LHCb experiments*, CMS-PAS-BPH-13-007
- [5] Aoyama, Tatsumi and Hayakawa, Masashi and Kinoshita, Toichiro and Nio, Makiko, *Tenth-Order QED Contribution to the Electron g–2 and an Improved Value of the Fine Structure Constant*, Phys. Rev. Lett. Vol. 109, 2012, 10.1103/PhysRevLett.109.111807
- [6] URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Steradian>, Juni 2012
- [7] Aristoteles,
- [8] Galileo Galilei, *De motu*, 1590
- [9] DMK/DPK, *Formeln und Tafeln*, Orell Füssli, 7. Auflage, 1997
- [10] F. A. Brockhaus, *Der grosse Brockhaus*, 16. Auflage, 1955
- [11] URL: <http://www.quartets.de/acad/firstlaw.html>, September 2013
- [12] URL: <http://www.educ.ethz.ch/unt/um/phy/me/kreis/index>
- [13] Lewis C. Epstein, *Denksport Physik*, dtv, 9. Auflage, 2011
- [14] Harry Nussbaumer, *Astronomie*, 7. Auflage, 1999, vdf Hochschulverlag AG
- [15] URL: <http://lexikon.astronomie.info/mars/beobachtung2012/>, April 2013
- [16] Matthias Bartelmann, *Das Standardmodell der Kosmologie, Teil 1 und Teil 2 in Sterne und Weltraum*, Ausgabe: August 2007
- [17] Roman Sexl et al. *Einführung in die Physik - Band 1 & 2*, 3. korrigierte Auflage 2009, Sauerländer Verlag AG
- [18] Paul A. Tipler, *Physik*, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin, Oxford, 2. Auflage, 1994
- [19] URL: <https://www.etsy.com/ch/listing/1230366346/precision-made-scientific-mechanical>
- [20] Hans Kammer, Irma Mgelandze, *Physik für Mittelschulen*, 1. Auflage 2010, hep Verlag AG
- [21] URL: <https://www.auto-motor-und-sport.de/news/aerodynamik-report-spritsparmodelle-aus-dem-windkanal>
- [22] Wikipedia, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Fluid>, August 2013
- [23] Basiswissen Schule Physik, Duden Paetec, Berlin 2010
- [24] URL: <http://www.schulserver.hessen.de/>, Oktober 2013
- [25] URL: <http://www.leifiphysik.de>, September 2013
- [26] URL: <http://photos.zoochat.com>, Semptember 2013

- [27] URL: <http://www.lab-laborfachhandel.de>, Oktober 2013
- [28] Bissig Michael, *Schwimmwelt, Schwimmen lernen - Schwimmtechnik optimieren*, Schulverlag, Bern,
- [29] URL: https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/lm_data/lm_282/auto/kap09/cd259.htm, März 2014
- [30] URL: <https://www.vibos.de/veranstaltung/physik-teil-3-von-4-schwingungen-und-wellen>, März 2024
- [31] URL: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/707>
- [32] E.F.F. Chladni, *Die Akustik*, Taschenbuch Auflage 2012, Nabu Press
- [33] URL: <http://ephex.phys.ethz.ch>, Februar 2015
- [34] URL: <http://aufzurwahrheit.com/physik/quantenmechanik-5461.html>, März 2015
- [35] M. Cagnet, M. Françon, J.C. Thierr, *Atlas opitscher Erscheinungen*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1962
- [36] Bruno Cappeli et al. *Physik anwenden und verstehen*, Orell Füssli Verlag AG, 2004
- [37] Richard P. Feynman, *QED - Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*, Piper, 3. Auflage, 2018
- [38] Keith Johnson, *Physics for You: Revised National Curriculum Edition of GCSE*, Nelson Thornes, 2001
- [39] URL: <https://tu-dresden.de/mn/physik/ressourcen/dateien/studium/lehrveranstaltungen/praktika/pdf/TA.pdf?lang=en>, Juli 2018
- [40] Wolfgang Demtröder, *Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 1998
- [41] Unbekannt, *Engraving of Joule's apparatus for measuring the mechanical equivalent of heat*, Harper's New Monthly Magazine, No. 231, August, 1869
- [42] URL: <http://www.tf.uni-kiel.de>, März 2014
- [43] URL: [http://de.wikipedia.org/wiki/Entropie_\(Thermodynamik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Entropie_(Thermodynamik)), März 2014
- [44] URL: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:20070616_Dampfmaschine.jpg, März 2014
- [45] URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Bcoulomb.png>, März 2014
- [46] URL: <http://www.bader-frankfurt.de/widerstandscode.htm>, August 2014
- [47] Carl D. Anderson, *The Positive Electron*. Physical Review 43 (6): 491–494
- [48] URL: <http://pgd5.physik.hu-berlin.de/elektrostatik/ele12.htm>, Oktober 2014
- [49] URL: <http://www.aip.org/history/lawrence/radlab.htm>, Oktober 2014
- [50] URL: http://www.solstice.de/grundl_d_tph/exp_besch/exp_besch_04.html, Oktober 2014
- [51] URL: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/6639>, Oktober 2017
- [52] URL: <https://de.serlo.org/52586/elektromagnetische-wellen>, Oktober 2017
- [53] URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum, August 2022
- [54] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Zahnradmethode>, September 2022
- [55] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Double-Rainbow.jpg>, November 2023
- [56] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Regenbogen>, April 2024
- [57] Proton-Proton Kollision, CERN, Lucas Taylor
- [58] Ze'ev Rosenkranz, *Albert Einstein – Derrière l'image*, Verlag Neue Zürcher Zeitung, 2005.
- [59] Albert Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik 17 (10): 891–921.
- [60] Albert Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Springer-Verlag, 23. Auflage, 1988

- [61] Wikipedia, https://de.wikipedia.org/wiki/Relativitat_der_Gleichzeitigkeit, August 2018
- [62] URL: <http://static.a-z.ch>, Mrz 2015
- [63] Max Planck, *Vom Relativen zum Absoluten*, Naturwissenschaften Band 13, 1925
- [64] A. H. Compton, *The Spectrum of Scattered X-Rays*, Physical Review 22 (5 1923), S. 409–413
- [65] URL: <http://www.peter-glowatzki.de>, Mai 2015
- [66] James Franck, *Transformation of Kinetic Energy of Free Electrons into Excitation Energy of Atoms by Impacts*, Nobel Lectures, Physics 1922-1941
- [67] URL: <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/quantenobjekt-elektron/versuche>, Mai 2015
- [68] David Prutchi, Shanni Prutchi, *Exploring Quantum Physics through Hands-on Projects*, Wiley, 1 edition (February 7, 2012)
- [69] URL: <http://w3.ppp1.gov/>, September 2015
- [70] O. Hofling, Physik. Band II Teil 1, Mechanik, Wrme. 15. Auflage. Ferd. Dummfers Verlag, Bonn 1994
- [71] Kovalente Atomradien auf Basis der Cambridge Structural Database
URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Cambridge_Structural_Database, April 2018
- [72] G. Audi und A.H. Wapstra, Nuclear Physics A595, 409 (1995)
- [73] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gammastrahlung>, April 2018
- [74] URL: <http://www.wn.de/Muenster/2012/07/Das-Wunder-von...>, Juni 2012
- [75] L. Susskind und G. Hrabovsky, *The Theoretical Minimum - What you need to know to start doing physics*, Basic Books, 2014