

11 Elektrodynamik

Inhaltsverzeichnis

11	Elektrodynamik.....	1
11.1	Elektrischer Strom	3
11.2	Elektrische Bauteile	3
11.2.1	Der elektrische Widerstand	4
11.2.2	Diode	5
11.2.3	Schaltzeichen elektrischer Bauteile	6
11.3	Messgeräte	7
11.3.1	Anschluss von Messgeräten.....	7
11.4	Die Kirchhoffschen Regeln	8
11.4.1	Stromverzweigung (Kirchhoff 1)	8
11.4.2	Strommasche / Kirchhoff 2	8
11.5	Schaltung von Widerständen.....	10
11.5.1	Serieschaltung.....	10
11.5.2	Parallelschaltung	10
11.6	Stromquellen.....	13
11.6.1	Ideale Spannungsquellen.....	13
11.6.2	Reale Spannungsquellen.....	13
11.7	Stromarbeit, elektrische Energie und Leistung.....	14

Der elektrische Gleichstromkreis

11.1 Elektrischer Strom

Schliesst man eine Spannungsquelle (z.B. Batterie), eine Lampe und zwei Kabel (leitfähiges Material) richtig zusammen, so beginnt die Lampe zu leuchten. Die Batterie "pumpt" Elektronen durch die Leitungen – Elektronen "fliessen" durch den elektrischen Stromkreis. Zur Veranschaulichung wird oft das Bild des Wasserkreislaufs verwendet, wie es in Abbildung 1 dargestellt ist. Setzt man sich in Gedanken irgendwo beim elektrischen Stromkreis hin, so kann man die vorbeikommenden Ladungen zählen. Man kann genau angeben, wie viele Ladungen pro Zeiteinheit vorbeikommen. Man bestimmt damit den mittleren elektrischen Strom I pro Zeitspanne.¹ Es gilt

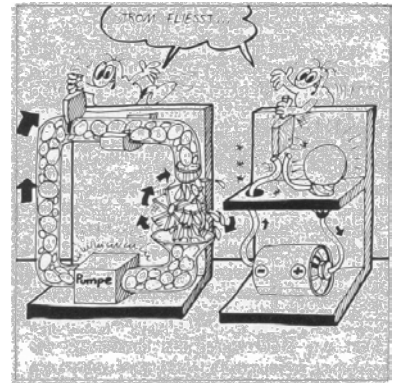


Abbildung 1: Quelle: Handbuch zum Kosmos Elektronikbaukasten X3000-X4000 (1985)



$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1)$$

mit der Einheit $[I] = \frac{[\Delta Q]}{[\Delta t]} = \frac{C}{s} = A$. Das Ampere A, benannt nach dem

französischen Physiker Ampère (Abbildung 2) bildet damit die Einheit des elektrischen Stromes und eine weitere SI – Basiseinheit! Natürlich muss es sich bei den bewegten Ladungen nicht um Elektronen handeln. Es könnten auch Ionen wandern (Lösungen). Allgemein kann man sagen



Abbildung 2: André Marie Ampère. (1775-1836)
Quelle : library.thinkquest.org



Strom ist bewegte Ladung!

Wichtig – und immer wieder Anlass von Verwirrungen – ist die Tatsache, dass der elektrische Strom per Definition vom Plus- zum Minuspol der Spannungsquelle fließt obwohl es Elektronen sind, die sich bewegen – vom Minuspol zum Pluspol.

11.2 Elektrische Bauteile

Dem Strom kann man innerhalb eines Stromkreises verschiedene Bauteile in den Weg stellen, um verschiedene Effekte zu erzeugen. Wir wollen uns hier den Aufbau einiger Bauteile ansehen.

¹ Für den momentanen Stromwert gilt $I = \frac{dQ}{dt}$, natürlich mit derselben Einheit Ampere.

11.2.1 Der elektrische Widerstand

Hängt man in einen Wasserkreislauf einen Sandsack, so erhöht man damit den Fließwiderstand des Wassers. Die Pumpe muss nun mehr arbeiten, um den Wasserstrom konstant zu halten. Kann sie das nicht, wird weniger Wasser fließen. Anstelle des Begriffs des Sandsacks könnte man auch einfach Verbraucher dazu sagen.

Im Bereich der Stromkreise sagt man natürlich nicht Sandsack, sondern elektrischer Widerstand. Auch er begrenzt den Durchfluss – den elektrischen Strom (Abbildung 3).

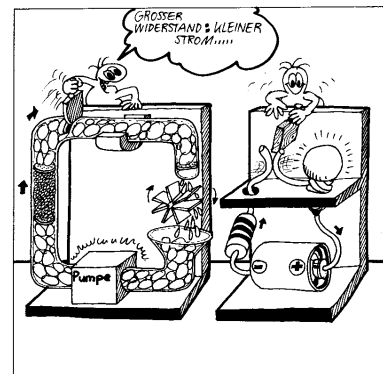


Abbildung 3: Vergleich von elektrischem Widerstand und Widerstand im Wasserkreislauf
Quelle: KOSMOS

Es gibt verschiedene Bauformen von elektrischen Widerständen. Die bekannteste ist wahrscheinlich der zylinderförmige mit farbigen Ringen, welchen wir uns genauer ansehen wollen. Er besteht aus einem kleinen Keramikzylinder, welcher als Träger des Widerstandsmaterials (Kohle, Metall Metalloxid) dient. Daran sind axial die Anschlussdrähte angelötet (Abbildung 4).

Es dürfte klar sein, dass Spannung, Stromstärke und Widerstand miteinander in Beziehung stehen: In einem guten Leiter (geringer Widerstand) wird bei gleicher Spannung ein grösserer Strom fließen als in einem schlechten Leiter (grosser Widerstand). Dabei gilt die Definition:

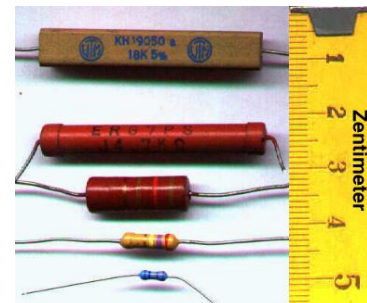


Abbildung 4: Unterschiedliche Bauformen von elektrischen Widerständen. Quelle: de.wikipedia.de

Der Widerstand R eines stromdurchflossenen Leiters ist der Quotient aus der angelegten Spannung U und dem dadurch hervorgerufenen Strom I :



$$R = \frac{U}{I} \Rightarrow [R] = \frac{V}{A} = \Omega \quad (2)$$

Die Einheit des elektrischen Widerstandes Ω ist benannt nach Georg Simon Ohm (1789 - 1854), einem deutschen Physiker.

Gebraucht wird auch etwa die **Leitfähigkeit G** . Sie ist der Kehrwert aus dem Widerstand:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U} \Rightarrow [G] = \Omega^{-1} = \frac{A}{V} \quad (3)$$



Abbildung 5 Georg Simon Ohm (1789-1854), Namensgeber des elektrischen Widerstandes.
Quelle: Wikipedia

Ringfarbe	Widerstandswert in [Ω]			Toleranz
	1. Ring 1. Ziffer	2. Ring 2. Ziffer	3. Ring (Multiplikator)	4. Ring
schwarz	0	0	$1 \cdot 10^0$	
braun	1	1	$1 \cdot 10^1=10$	$\pm 1\%$
rot	2	2	$1 \cdot 10^2=100$	$\pm 2\%$
orange	3	3	$1 \cdot 10^3=1000$	
gelb	4	4	$1 \cdot 10^4=10'000$	
grün	5	5	$1 \cdot 10^5=100'000$	$\pm 0.5\%$
blau	6	6	$1 \cdot 10^6=1'000'000$	$\pm 0.25\%$
violett	7	7	$1 \cdot 10^7=10'000'000$	$\pm 0.1\%$
grau	8	8	$1 \cdot 10^8=100'000'000$	
weiss	9	9	$1 \cdot 10^9=1'000'000'000$	
silber				$\pm 10\%$
gold				$\pm 5\%$
keine				$\pm 20\%$



Abbildung 6: Tabelle mit den Farbringen, mit denen der Widerstandswert codiert wird.

Auf den Widerständen wird der Wert des Widerstandes häufig mit Farbringen codiert, wie in der Tabelle in Abbildung 6 gezeigt ist. So hat der neben der Tabelle dargestellte Widerstand einen Wert von 40 (gelb:4, schwarz:0=40) $\cdot 100$ (rot:Faktor 100) $\Omega \pm 10\%$ (silber:10%) = $4000 \Omega \pm 10\% = 4k\Omega \pm 10\%$.²

Für Widerstände wird in elektrischen Schaltplänen ein Rechteck verwendet (vgl. Tabelle 2)

11.2.2 Diode

Dioden bestehen aus einer Kombination zweier verschieden dotierter Halbleiterkristalle (pn-Diode). Bei der Dotierung von Halbleitern kann man durch Hinzufügen geeigneter Fremdatome entweder zusätzliche bewegliche Elektronen in das Material "einfügen" (n-Halbleiter, Abbildung 7a)) oder Elektronen "entfernen" (p-Halbleiter, Abbildung 7b)).

Ein Siliziumatom (4 Valenzelektronen) ist im kristallinen Zustand von vier weiteren Siliziumatomen umgeben und hat daher ein komplettes Oktett. Ersetzt man ein Siliziumatom durch ein Phosphoratom (5 Valenzelektronen), so bringt dieses ein Valenzelektron zu viel mit. Dieses ist dann frei beweglich (Abbildung 7a)) und man spricht von einem n-Halbleiter. Umgekehrt verhält es sich, wenn man statt mit Phosphor mit Aluminium dotiert – in diesem Falle bringt das Aluminium nur drei Valenzelektronen mit. Es entsteht also eine Elektronenlücke, welche die Wanderung benachbarter Elektronen begünstigt (Abbildung 7b)) und man nennt dies dann einen p-Halbleiter. Egal welche Variante man wählt: die Leitfähigkeit von Halbleitermaterialien wird durch die Dotierung massiv gesteigert.

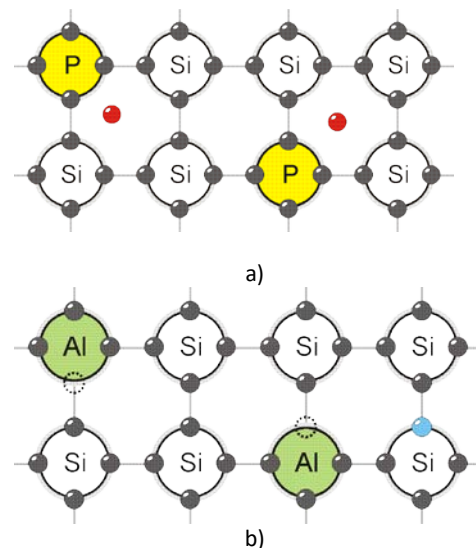


Abbildung 7: Dotierte Halbleiter.

² Unter <http://www.bader-frankfurt.de/widerstandscodiert.htm> können Sie den Widerstandscodiert einfach berechnen lassen.

Werden ein n- und ein p-Halbleiter (Tabelle 1) miteinander in Kontakt gebracht, so wandern Elektronen (dargestellt durch die Scheibchen) aus dem n-Halbleiter in den p-Halbleiter ein (Tabelle 1b)). Es entsteht um die Kontaktfläche herum eine Verarmungszone, in der sich die Ladungsträger nicht mehr frei bewegen können, weil die nächste "Lücke" zu weit weg ist (Tabelle 1c)).

Nun hat man zwei Möglichkeiten, eine externe Spannungsquelle anzuschliessen. Wird der Pluspol einer Stromquelle (Anode) an die n-Schicht angelegt und der Minuspol (Kathode) an die p-Schicht der Diode, so wird lediglich die Verarmungszone grösser (Tabelle 1d)) – es fliesst kein Strom. Vertauscht man hingegen die Anschlüsse, so kann Strom fließen (Tabelle 1e)).

Eine pn – Diode – bestehend eben aus einer p- und einer n – Halbleiterschicht – leitet den elektrischen Strom also nur in eine Richtung. Sie wirken für den Strom wie eine Einbahnstrasse. Das Schaltzeichen für eine Diode ist in Abbildung 8 mit Beschriftungen abgebildet.

Tabelle 1: Zur Funktionsweise einer Diode.

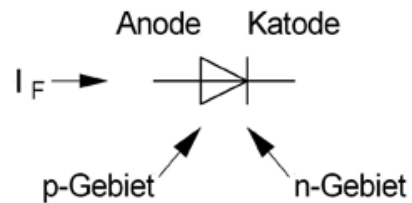
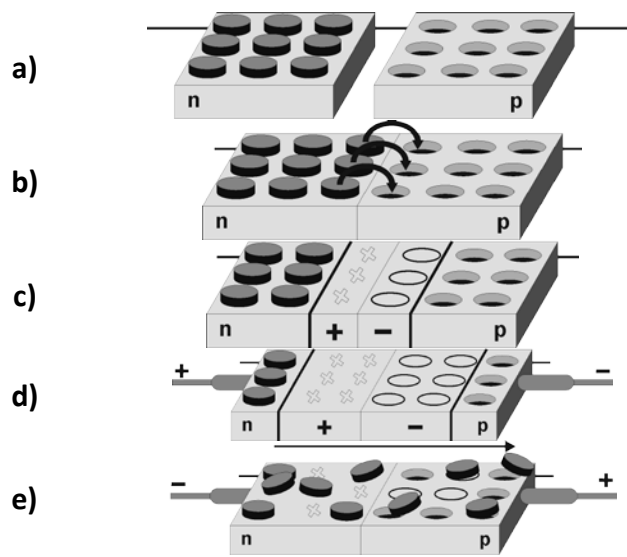


Abbildung 8: Schaltzeichen für eine Diode
Quelle: de.wikipedia.org.

11.2.3 Schaltzeichen elektrischer Bauteile

Tabelle 2: Schaltzeichen elektrischer Bauteile

Erde, Spannungsquellen	Bauelemente	Verschiedene

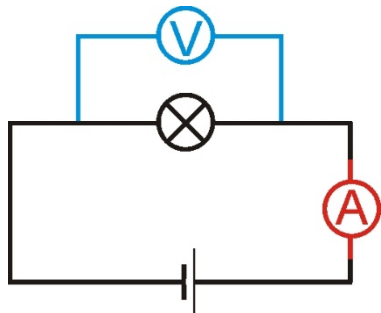
Beim Zeichnen einer Anordnung von leitend miteinander verbundenen elektrischer Bauteile – einer elektrischen Schaltung – benutzt man keine 3D – Darstellung, sondern genormte Schaltzeichen. Die für uns wichtigen Schaltzeichen sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Wir werden diesen Bauteilen nach und nach begegnen.

11.3 Messgeräte

Zur Messung von Strömen und Spannungen werden heutzutage meistens Digitalmultimeter eingesetzt. Diese Geräte können bei Bedarf einfach durch einen Drehregler als Strom- oder Spannungsmessgerät eingesetzt werden. Ebenfalls kann man mit ihnen Gleich- oder Wechselspannungen und –ströme messen.

Per Wahlschalter kann man auch verschiedene Messbereiche wählen, so dass Spannungen von mV bis mehrere 100 V und Stromstärken von μA bis 20 A mit dem gleichen Gerät gemessen werden können.

11.3.1 Anschluss von Messgeräten



Die wichtigsten beiden Messgeräte, die man im Zusammenhang mit Stromkreisen braucht, sind das Ampere- und das Voltmeter. Ersteres misst den Elektronendurchfluss, Letzteres die Potentialdifferenz. Entsprechend müssen die beiden Geräte mit dem Stromkreis verbunden werden. Das Amperemeter muss stets in Serie in den Stromkreis integriert werden (rot). Das Voltmeter hingegen soll die Spannung, also die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten messen und wird deshalb parallel in den Stromkreis integriert (blau). Man greift auf normierte Anweisungen zurück, wie eine Schaltung darzustellen ist. In der Abbildung links ist das Voltmeter (V) parallel zur Lampe geschaltet, währenddem das Amperemeter in Serie zur Lampe geschaltet wird.

Das Amperemeter hat einen möglichst kleinen Innenwiderstand R_A , damit das Amperemeter einen möglichst kleinen Einfluss auf den Stromkreis ausübt, die Stromstärke also nicht verändert. Ein ideales Amperemeter hätte damit einen Innenwiderstand $R_A \approx 0$.

Das Voltmeter wird parallelgeschaltet. Es hat einen möglichst hohen Innenwiderstand R_V , damit das Voltmeter den Stromkreis möglichst nicht beeinflusst. Ein ideales Voltmeter hat einen Innenwiderstand von $R_V \approx \infty$, so dass kein Strom durch das Voltmeter fließen kann.

Ein Voltmeter misst als umgebautes Amperemeter einen Strom $I_V = \frac{U}{R_V} \Rightarrow I_V \sim U$, der proportional zu U ist!

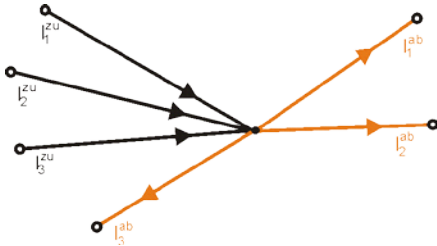
11.4 Die Kirchhoffschen Regeln

Kirchhoff (Abbildung 9) beschäftigte sich mit den Gesetzmässigkeiten, welche in einem Stromkreis gelten. Dabei formulierte er die nach ihm benannten Gesetze oder Regeln, die zur Berechnung von Strömen in und Spannungen in elektrischen Netzwerken dienen.



Abbildung 9: Gustav Robert Kirchhoff (1824 – 1887) Quelle: Wikipedia

11.4.1 Stromverzweigung (Kirchhoff 1)



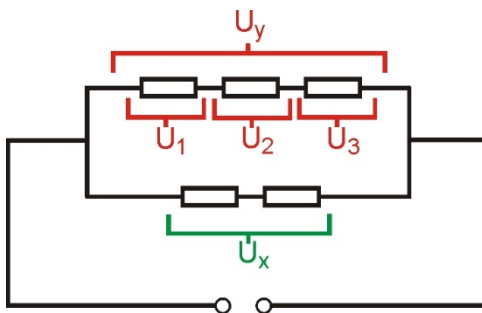
Knotenregel: An jedem Verzweigungspunkt des Stromkreises ist die Summe der zufließenden Ströme gleich der Summe der wegfließenden Ströme.

$$\sum_j I_j^{zu} = \sum_k I_k^{ab}$$

Dies ist nichts anderes als die Formulierung eines Ladungserhaltungssatzes auf etwas andere Art und Weise.

Die Ströme müssen dabei vorzeichenrichtig eingesetzt werden. Die zufließenden Ströme bekommen ein positives, die wegfließenden Ströme ein negatives Vorzeichen.

11.4.2 Strommasche / Kirchhoff 2

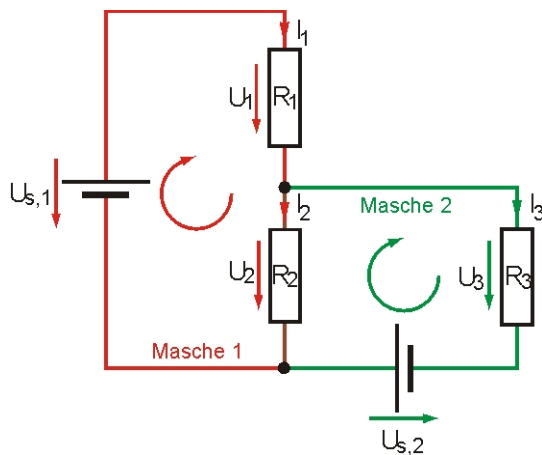


In einer Strommasche ist die Spannung längs beider Zweige gleich gross. Auf die Zeichnung bezogen bedeutet dies, dass $U_x = U_y$ ist. Dann ist aber zwangsläufig $U_y = U_1 + U_2 + U_3$.



Maschenregel: Die Summe aller vorzeichenbehafteten Spannungen in einer Masche ist null: $\sum_k U_k = 0$.

11.4.2.1 1. Beispiel zur Anwendung der Kirchhoffschen Regeln



In der nebenstehenden Abbildung ist ein Netzwerk dargestellt, welches aus drei elektrischen Widerständen ($R_1 - R_3$) und zwei Spannungsquellen ($U_{s,1}$ und $U_{s,2}$) zusammengesetzt ist (s steht dabei für source).

Die Aufgabe besteht nun darin, die (Teil-) Ströme I_1 bis I_3 und die (Teil-)Spannungen U_1 bis U_3 zu berechnen, wenn die Widerstandswerte R_1 bis R_3 und die Spannungswerte $U_{s,1}$ respektive $U_{s,2}$ bekannt sind.

Wir "setzen" uns mal auf den Knoten zwischen R_1 und R_2 und benutzen die erste **Knotenregel**. I_1 fließt auf diesen Knoten zu, bekommt also ein positives Vorzeichen. Die Ströme I_2 und I_3 fließen von diesem Knoten weg und bekommen daher ein negatives Vorzeichen:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

Nun folgt die **Maschenregel**. Für die Masche 1 ergibt sich

$$U_1 + U_2 - U_{s,1} = 0 \text{ oder } I_1 R_1 + I_2 R_2 - U_{s,1} = 0$$

und für die Masche 2

$$-U_2 + U_3 - U_{s,2} = 0 \text{ oder } I_3 R_3 - I_2 R_2 - U_{s,2} = 0$$

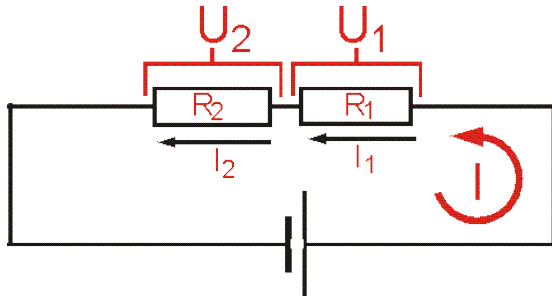
Damit stehen drei Gleichungen für die Berechnung der drei Ströme zur Verfügung.

$$\left. \begin{array}{l} I_1 - I_2 - I_3 = 0 \\ I_1 R_1 + I_2 R_2 = U_{s,1} \\ I_3 R_3 - I_2 R_2 = U_{s,2} \end{array} \right\}$$

Dieses Gleichungssystem kann man nun einfach von Hand oder mit dem Taschenrechner lösen. Hat man erst einmal die Ströme ermittelt, so kann man auch die Spannungen über $U=R \cdot I$ berechnen.

11.5 Schaltung von Widerständen

11.5.1 Serieschaltung



Schaltet man zwei Widerstände so zusammen, dass sie vom *gleichen Strom* durchflossen werden, so spricht man von einer Serie- oder Reihenschaltung:

Nach Kirchhoff 1 fließt durch alle Widerstände der gleiche Strom. Es gilt also

$$I = I_1 = I_2.$$

Ausserdem ist die Gesamtspannung gleich der Summe der Teilspannungen:

$$U = U_1 + U_2.$$

Dividiert man die letzte Gleichung durch den Gesamtstrom I , so erhält man

$$\frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} = R_1 + R_2.$$

Verallgemeinert man dieses Resultat auf beliebig viele Widerstände, so bekommt man

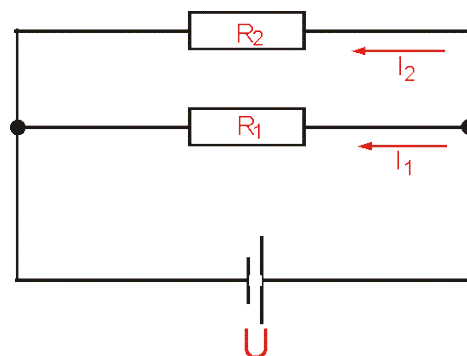


$$R_{\text{gesamt}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

11.5.2 Parallelschaltung

Schaltet man zwei Widerstände so zusammen, dass über ihnen die *gleiche Spannung abfällt*, so spricht man von einer Parallelschaltung. Dann gilt

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \text{ und } I_2 = \frac{U}{R_2}.$$



Der Gesamtstrom lässt sich berechnen zu

$$I = \frac{U}{R} = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Man sieht, dass $\frac{U}{R} = U \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$ ist. Dann ist aber offensichtlich $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$. Verallgemeinert man dieses Resultat wieder auf viele Widerstände, so bekommt man



$$\frac{1}{R_{\text{gesamt}}} = \sum_i \frac{1}{R_i}$$

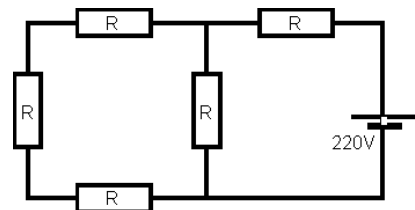
Der Kehrwert des Ersatzwiderstandes berechnet sich also aus der Summe der Kehrwerte der Einzelwiderstände.

11.5.2.1 2. Beispiel zu den Kirchhoffschen Gesetzen

Wir wollen uns nun ein zweites einfaches Beispiel zur Anwendung der Kirchhoffschen Gesetze ansehen. Hier wollen wir aber zunächst auf die Erstellung eines Gleichungssystems verzichten.

Aufgabe

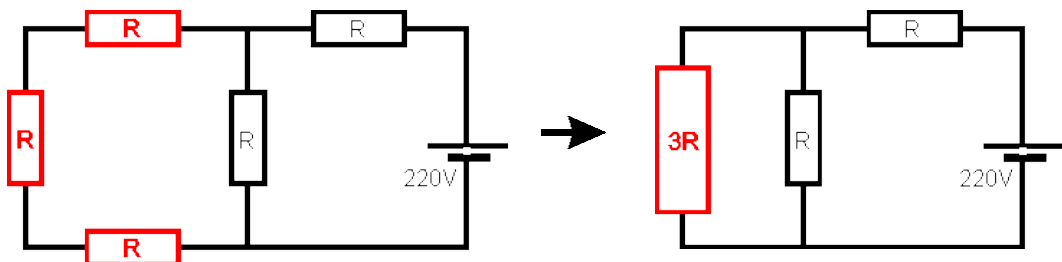
Berechnen Sie den Gesamtwiderstand der abgebildeten Anordnung. Welche Ströme fließen durch jeden einzelnen der 2Ω Widerstände?



1. Lösung (ohne Gleichungssystem)

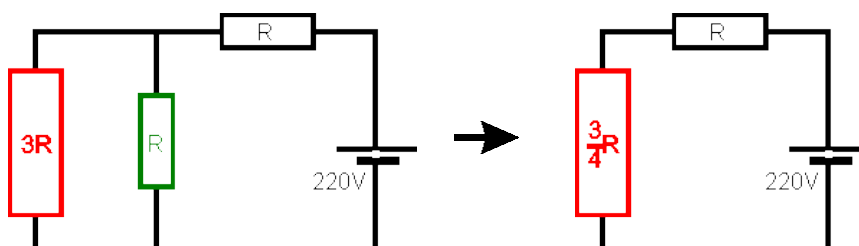
Um die Teilströme schlussendlich berechnen zu können, braucht man den Gesamtstrom. Deshalb muss man den Gesamtwiderstand der Schaltung kennen. Wir müssen also den Ersatzwiderstand berechnen. Dazu fassen wir die einzelnen Widerstände schrittweise zusammen.

- i) Die drei rot markierten Widerstände sind in Serie angeordnet. man kann sie deshalb durch einen einzigen Widerstand mit dem Wert $3R$ ersetzen.



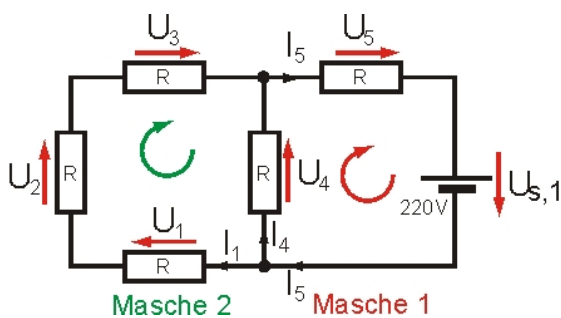
- ii) Nun erkennt man, dass der grün und der rot markierte Widerstand parallel zueinander geschaltet sind. Der Ersatzwiderstand berechnet sich also zu

$$\frac{1}{R_{\text{ers1}}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{3R} = \frac{4}{3R} \text{ oder } R_{\text{ers1}} = \frac{3}{4}R.$$



- iii) Diese zwei Widerstände sind nun noch in Serie und damit erhält man für den Ersatzwiderstand einen Wert von $R_{\text{ersatz}} = R + \frac{3}{4}R = 1\frac{3}{4}R$. Da jeder Widerstand 2Ω gross ist, ist damit $R_{\text{ersatz}} = 1\frac{3}{4} \cdot 2\Omega = \underline{\underline{3.5\Omega}}$.
- iv) Den Gesamtstrom erhält man zu $I = \frac{U}{R_{\text{ersatz}}} = \frac{220V}{3.5\Omega} = \underline{\underline{62.9A}}$. Dieser Strom wird auch durch den Widerstand oben rechts fliessen.
- v) Hingegen wird sich der Strom an der Gabelung aufteilen. Er hat zwei Möglichkeiten: entweder den Weg über die drei roten, in Serie geschalteten Widerstände ($R_{\text{total}} = 3R$) oder über den grünen Widerstand ($R_{\text{total}} = R$). Die Ströme verhalten sich umgekehrt proportional zu den Widerständen, weil über beiden Wegen die gleiche Spannung abfällt ($U = R \cdot I_1 = 3R \cdot I_2$ und daraus $\frac{I_1}{I_2} = \frac{3R}{R} = \frac{3}{1}$, wobei I_1 den Strom durch den grünen Widerstand darstellt): dreiviertel des Gesamtstromes wird durch den grünen Widerstand fliessen und ein Viertel durch die roten Widerstände. Also $I_1 = \frac{1}{4}I = \frac{1}{4} \cdot 62.9A = \underline{\underline{15.7A}}$ und $I_2 = \frac{3}{4}I = \frac{3}{4} \cdot 62.9A = \underline{\underline{47.1A}}$.

2. Lösung (mit Gleichungssystem)



Zunächst einmal markieren wir die nötigen Maschen und den Umlaufsinn, wie nebenstehend dargestellt ist. Nun folgt Schema F:

Die Anwendung der Knotenregel ergibt $I_5 - I_1 - I_4 = 0$.

Für die Masche 1 ergibt sich $U_4 + U_5 + U_{s,1} = 0$ oder $I_4 R + I_5 R = -U_{s,1}$ und für die zweite Masche analog $U_1 + U_2 + U_3 - U_4 = 0$ oder $I_1 R + I_2 R + I_3 R - I_4 R = 0$. Nun machen wir uns noch zunutze, dass $I_1 = I_2 = I_3 = I_{123}$ ist und schreiben das Gleichungssystem auf:

$$\left. \begin{array}{l} I_5 - I_{123} - I_4 = 0 \\ I_5 R + I_4 R = -U_{s,1} \\ 3I_{123} R - I_4 R = 0 \end{array} \right\} \text{oder mit Zahlen} \left. \begin{array}{l} I_5 - I_{123} - I_4 = 0 \\ I_5 \cdot 2\Omega + 0 + I_4 \cdot 2\Omega = -220V \\ 0 + 3I_{123} \cdot 2\Omega - I_4 \cdot 2\Omega = 0 \end{array} \right\}$$

Der Taschenrechner liefert dann $I_5 = -62.9A$, $I_{123} = -15.7A$ und $I_4 = -47.1A$, wie in der Lösung ohne Gleichungssystem, allerdings mit einem wichtigen Hinweis: die negativen Vorzeichen zeigen uns, dass wir die Stromrichtungen falsch herum angenommen haben. Die Ströme

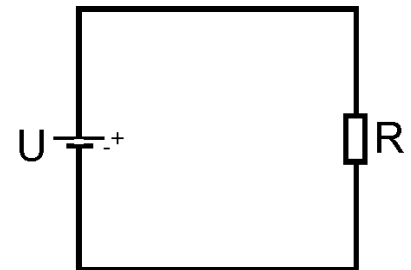
fließen allesamt im Gegenuhrzeigersinn – wie man anhand der Lage der Batterie auch erkennen kann.

Welche Variante Sie für die Bearbeitung von Aufgaben auswählen, bleibt Ihnen überlassen – jedoch ergibt sich durch die Anwendung der Variante zwei eine nicht unerhebliche Zeit- und Platzersparnis!

11.6 Stromquellen

11.6.1 Ideale Spannungsquellen

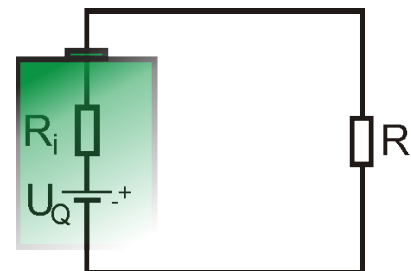
Eine Stromquelle heisst belastet, wenn sie einen Strom liefert, unbelastet, wenn sie stromlos ist. Die Spannung einer Spannungsquelle im unbelasteten Zustand nennt man **Quellenspannung**, **Urspannung** oder **Leerlaufspannung** ab. Nachstehend ist eine einfache Schaltung gezeigt, welche aus einer idealen Batterie mit der Quellenspannung U und einem Widerstand R besteht.



11.6.2 Reale Spannungsquellen

Eine reale Spannungsquelle gibt bei geschlossenem Stromkreis nicht mehr die Quellenspannung U_Q ab, sondern nur noch eine **Klemmenspannung** U , welche kleiner ist als U_Q .

Dies kommt daher, dass eine Spannungsquelle stets einen Innenwiderstand besitzt, welcher zwar sehr klein, aber doch vorhanden ist. Über diesem fällt – abhängig von der Stromstärke im Stromkreislauf – mehr oder weniger Spannung ab. Dadurch steht nicht mehr die ganze Spannung U_Q für den Stromkreislauf zur Verfügung. Man kann sich eine reale Spannungsquelle als eine ideale Spannungsquelle mit einem in Serie geschalteten Innenwiderstand R_i vorstellen.



Die Klemmenspannung ergibt sich zu



$$U = U_Q - IR_i \quad (4)$$

Oder, da über dem Widerstand R gerade die Klemmenspannung U abfällt

$$IR = U_Q - IR_i \quad (5)$$

Aufgelöst nach dem Strom und der Quellenspannung erhält man

$$I = \frac{U_Q}{R + R_i} \quad \text{oder} \quad U_Q = IR + IR_i .$$

11.7 Stromarbeit, elektrische Energie und Leistung

Die Arbeit, die ein Strom I in einem Widerstand R verrichtet, erhält man nach der Definitionsgleichung der Spannung U . Dabei gilt ja $W = \Delta q \cdot U$, wobei $\Delta q = I \cdot \Delta t$ ist. Die Kombination der beiden Gleichungen liefert

$$W = U \cdot I \cdot \Delta t = R \cdot I^2 \cdot \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t \quad (6)$$

Die Stromleistung P erhält man nach der Definition aus $P = \frac{W}{\Delta t}$ zu



$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{U \cdot I \Delta t}{\Delta t} = U \cdot I \quad (7)$$

Die Stromleistung ist also das Produkt aus Spannung und Stromstärke!