



Rüdiger Kuhnke

Elektrizität und Magnetismus

Dieses Skriptum deckt im wesentlichen den Inhalt der Lehrpläne für technisch orientierte berufsbildende Schulen ab, dies entspricht etwa dem Stoff der Sekundarstufe I.

Version 0.1 vom 1.10.2006
Noch nicht korrigiert

Kontakt zum Autor: ~~mailkuhnke@arcor.de~~ rkuhnke@rkuhnke.eu

Titelbild: Lightning storm at night (NASA)

1	Magnete und Magnetfeld	4
1.1	Magnetismus	4
1.2	Das magnetische Feld.....	6
1.3	Das Magnetfeld der Erde.....	10
2	Elektrischer Strom, Stromkreis	12
2.1	Elektrische Ladung.....	12
2.2	Bewegung von Ladungsträgern: elektrischer Strom	13
*	Albert Einstein, Leopold Infeld: Die beiden elektrischen Fluida.....	15
*	Crashkurs: Atome, Ionen, Elektronen	17
3	Strom und Magnetfeld.....	19
3.1	Magnetische Wirkung des Stroms.....	19
3.2	Das Magnetfeld um einen stromdurchflossenen Leiter.....	19
3.3	Stromrichtung und Magnetfeld	20
3.4	Kräfte zwischen stromdurchflossenen Leitern.....	21
3.5	Elektromagnete.....	22
4	Elektrische Stromstärke.....	23
4.1	Elektrische Stromstärke.....	23
4.2	Strommessung mit dem Drehspulgalvanometer	23
5	Elektrische Spannung und Leistung.....	25
5.1	Elektrische Spannung	25
5.2	Elektrische Leistung.....	26
5.3	Galvanisches Element	26
5.4	Reihen- und Parallelschaltung von Spannungsquellen	27
*	Der elektrische See.....	28
6	Elektrischer Widerstand	30
6.1	Der elektrische Widerstand	30
6.2	Das Ohmsche Gesetz.....	30
6.3	Der spezifische Widerstand.....	32
6.4	Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands.....	32
6.5	Die Kirchhoffschen Gesetze der Stromverzweigung	33
6.6	Leitwert und Leitfähigkeit.....	36
7	Elektrotechnische Anwendungen.....	37
7.1	Potentiometerschaltung	37
7.2	Das Drehspulgalvanometer als Amperemeter.....	37
7.3	Das Drehspulgalvanometer als Voltmeter.....	39
7.4	Die Wheatstonesche Brücke.....	41
7.5	Quellen- und Klemmenspannung.....	42

Magnete und Magnetfeld

1.1 Magnetismus

1.1.1 Magnetische Pole

1.1.1.1 Magnetische Pole

Taucht man einen Magneten in Eisenfeilspäne und nimmt ihn wieder heraus, bleiben die Späne hauptsächlich an den Enden hängen. Diese Stellen, an denen die Anziehungskraft am größten ist, heißen die *Pole* des Magneten.

Hängen wir einen Stabmagneten freischwiegend horizontal auf, so schwingt er hin und her und stellt sich schließlich annähernd in Nord-Süd-Richtung ein. Drehen wir ihn um 180° , so verharrt er nicht in dieser Lage, sondern schwingt solange, bis derselbe Pol wieder nach Norden zeigt. Die beiden Pole haben offensichtlich bezüglich ihrer Ausrichtung verschiedene Eigenschaften. Den nach Norden gerichteten Pol des Magneten nennt man *Nordpol*, der nach Süden gerichteten *Südpol*.

Versuchen wir die Pole zu trennen, indem wir den Magneten durchtrennen, so zeigt sich, daß dies nicht gelingt. An der Bruchstelle tauchen sofort zwei entgegengesetzte Pole auf, wir erhalten zwei vollständige Magneten. Weitere Teilungen ändern daran nichts: es ist nicht möglich, einen Magneten mit *nur einem* Nordpol oder *nur einem* Südpol herzustellen.

Nordpol und Südpol eines Magneten lassen sich nicht trennen: Magnete treten nur als *Dipole* auf, niemals als *Monopole*.

1.1.2 Magnetische Kraft

Bringt man zwei Magnete zusammen, so sind zwischen ihnen je nach ihrer Orientierung zueinander unterschiedliche Kräfte zu beobachten: nähert man den Nordpol eines Magneten dem Nordpol eines anderen Magneten, so stoßen sich die beiden Pole ab, nähert man den Nordpol aber dem Südpol des anderen Magneten, so ziehen sich die Pole an.

Gleichnamige Pole stoßen einander ab, ungleichnamige Pole ziehen einander an.

Weiterhin ist festzustellen, daß sich die anziehende oder abstoßende Kraft zwischen zwei Magnetpolen mit der Entfernung der Pole voneinander verringert. Ebenso ist die Kraft auf ein unmagnetisches Stück Eisen in der Nähe der Pole stärker als in weiterer Entfernung.

Daß an beiden Polen annähernd gleich große "Bärte" von Eisenfeilspänen hängen bleiben, ist ein Indiz dafür, daß beide Pole gleich große Kräfte ausüben.

Die magnetische Kraft verringert sich mit dem Abstand von den Polen.

Die Erde ist ein Magnet: aus der Tatsache, daß der magnetische Nordpol eines Magneten nach Norden zeigt, folgt, daß sich dort ein magnetischer Südpol befindet. Im Süden liegt ein magnetischer Nordpol. (Siehe Abschnitt 1.3: Das Magnetfeld der Erde.)

1.1.3 Das Modell der Elementarmagnete

Eine mögliche Erklärung der beschriebenen Sachverhalte liefert folgende Vorstellung: ein Magnet besteht aus vielen sehr kleinen Magneten, den *Elementarmagneten*, die alle im gleichen Sinne ausgerichtet sind.

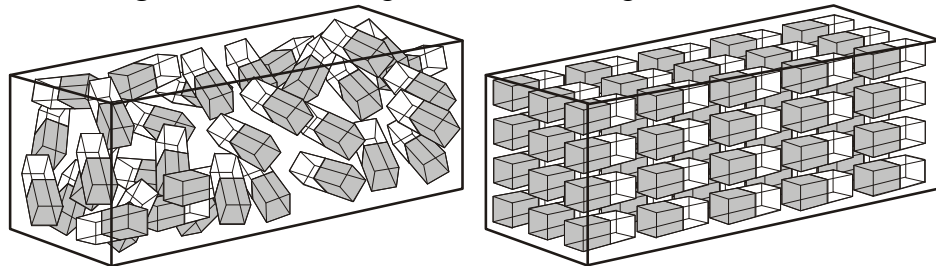


Abb. 1-1: Ein unmagnetisches und ein magnetisches Stück Eisen, bestehend aus Elementarmagneten

Sind die Elementarmagnete ungeordnet, so ist das Stück unmagnetisch, da sich ihre magnetischen Wirkungen in alle Richtungen gegenseitig aufheben. Ein Modell des aus Elementarmagneten zusammengesetzten Magneten stellen wir her, indem wir eine Glasröhre mit magnetisierten Stahlspänen (die jetzt die Elementarmagnete darstellen) füllen und an der Röhre mit einem Magneten wiederholt in derselben Richtung entlangfahren. Dabei ordnen sich die Späne. Nähert man einem Ende der Röhre dann eine Magnetnadel, so erweist es sich als Nord- oder Südpol. Entsprechend verhält es sich mit der Magnetisierung eines zuvor unmagnetischen Eisenstücks: unter der Wirkung des äußeren Magneten richten sich die ungeordneten Elementarmagnete aus und das Eisenstück wird zum Magneten.

Schütteln wir die mit Stahlspänen gefüllte Röhre, so verhält sie wieder wie ein unmagnetischer Stab, weil die Späne nicht mehr gleich ausgerichtet sind. Dem entspricht das Erhitzen eines Magneten: dabei verlieren die Elementarmagnete ihre Orientierung und das Material wird entmagnetisiert. (Die Temperatur, bei der ein magnetisches Material seinen Magnetismus verliert, heißt *Curie-Temperatur*, sie beträgt für Eisen 770°C .)

Das Modell der Elementarmagnete erklärt auch die Existenz der Pole: in der Mitte des Magneten heben sich die Kraftwirkungen der gleich ausgerichteten

Elementarmagnete gegenseitig auf, während sich an den Enden die Wirkungen vieler Nord- oder Südpole summieren.

Eisen und Stahl haben unterschiedliche magnetische Eigenschaften: im Stahl (kohlenstoffhaltiges Eisen) ist die Beweglichkeit der Elementarmagnete geringer als im Eisen, es ist daher einerseits schwerer magnetisierbar, andererseits behält es den einmal erworbenen Magnetismus länger bei. Zur Herstellung sogenannter *Permanentmagnete* verwendet man daher Stahl; im Eisen ist bleibt nur ein relativ kleiner, *remanenter Magnetismus* zurück.

1.2 Das magnetische Feld

1.2.1 Magnetische Feldlinien

Die magnetische Kraft wirkt, ohne daß die betreffenden Körper einander berühren, durch den leeren Raum, worunter wir einen "Raum frei von irgendwelchen Stoffen" verstehen.

Man nennt das Wirkungsgebiet eines Magneten im umgebenden Raum sein *magnetisches Feld* oder kurz *Magnetfeld*. Sein charakteristische Merkmal ist, daß in ihm andere Magnete oder magnetisierbare Körper Kräfte erfahren.

Wir nennen den Bereich des Raumes, in dem magnetische Kräfte wirken, ein magnetisches Feld.

Legen wir über einen Stabmagneten einen Karton und streuen auf ihn Eisenfeilspäne, so ordnen sich die Späne bei leichter Erschütterung des Kartons in Linien an.

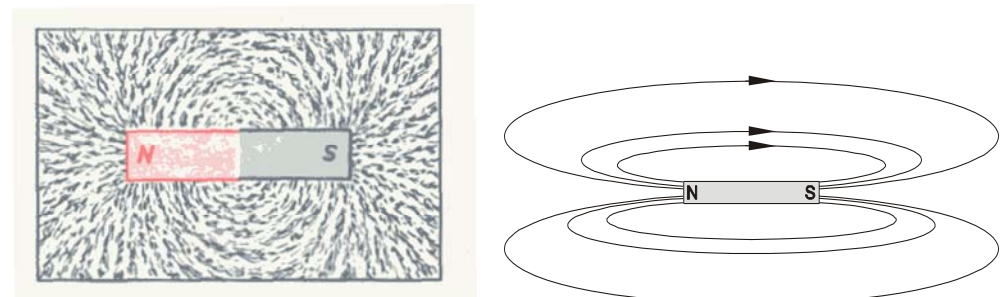


Abb.1-2: Eisenfeilspäne, die sich im Magnetfeld ordnen, zeigen den Verlauf der Feldlinien

Bringen wir eine Magnetnadel in die nähere Umgebung des Magneten, so stellt sie sich in die Richtung ein, in der auch die Linien der Eisenfeilspäne an dieser Stelle verlaufen. Diese Linien heißen *magnetische Feldlinien*. Es sind keine real existierenden, den Raum durchquerenden Linien, sondern lediglich Hilfsmittel zur Darstellung der Eigenschaften des Feldes. Sie geben an jeder Stelle des Magnetfeldes die Richtung der dort herrschenden Kraft auf einen Probemagneten an.

An dieser Stelle haben wir mit einer Magnetnadel Erkenntnis über Eigenschaften des Feldes erhalten. Man nennt eine solche Magnetnadel auch *Probemagnet*. Er zeichnet sich dadurch aus, daß er im Vergleich zum felderzeugenden Magneten selbst nur ein vernachlässigbar schwaches Feld und zudem nur eine kleine räumlich Ausdehnung hat.

Feldlinien können beliebig nahe beieinander liegen, da das Feld natürlich in *jedem* Punkt des Raumes eine Richtung hat. Die Größe der Eisenfeilspäne

oder der Probemagneten beschränkt jedoch die bildliche Darstellung der Feldlinien.

Wie aus den letzten beiden Abbildungen ersichtlich ist, ist jedoch in jeder Darstellung die Dichte der Feldlinien an den Polen, also in den Bereichen der größten Kraftwirkung, am größten.

Die Richtung des Magnetfeldes wird durch den Verlauf der Feldlinien, seine Stärke durch ihre Dichte angegeben.

1.2.2 Das Feld im Innern des Magneten

Wird ein Magnet durchtrennt, treten an den Bruchstellen Feldlinien in hoher Dichte aus, die die entstandene Lücke überbrücken. Das deutet darauf hin, daß die Feldlinien auch im Innern des Magneten in sehr hoher Dichte vorhanden sind. Das heißt:

Das magnetische Feld existiert auch im Innern des Magneten.

Die Bruchstellen sind Pole, d.h. die Pole eines Magneten sind diejenigen Stellen, an denen die im Innern des Magneten verlaufenden Feldlinien austreten.

Die magnetischen Feldlinien sind in sich geschlossene Linien, die im Magneten verlaufen, an den Polen aus- bzw. eintreten und sich außerhalb des Magneten schließen. Sie treten am Nordpol aus, am Südpol ein.

Diese Festlegung über die Richtung der Feldlinien ist (ebenso wie die Benennung der Pole) eine willkürliche Vereinbarung.

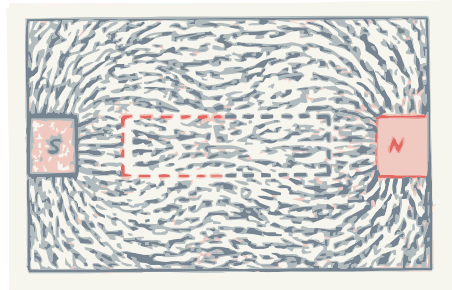


Abb.1-3: Feldlinien inner- und außerhalb eines Magneten

Da sich eine Magnetnadel längs der Feldlinien ausrichtet und diese vereinbarungsgemäß vom Nord- zum Südpol verlaufen, zeigt der Nordpol der Magnetnadel die *Richtung* der Feldlinien an.

1.2.3 Homogene und inhomogene Magnetfelder

Bei einem Hufeisenmagneten verlaufen im Bereich zwischen den Polen die Feldlinien annähernd parallel und haben den gleichen Abstand voneinander.

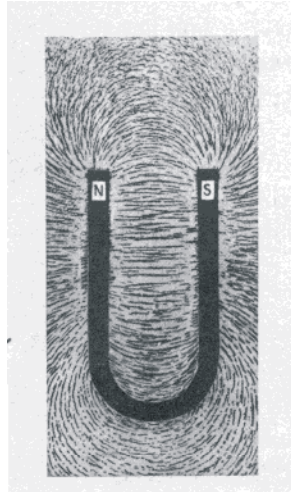


Abb.1-4 : Hufeisenmagnet mit Feldlinienbild

"Paralleler Verlauf" der Linien bedeutet, daß die Richtung des Feldes überall in diesem Bereich gleich ist. "Gleicher Abstand" der Linien bedeutet, daß überall in dieser Region eine gleich große Kraft auf einen Probemagneten wirkt. Man spricht hier von einem *homogenen Magnetfeld*.

Ein Magnetfeld heißt homogen, wenn

- die Richtung des Feldes überall gleich ist, d. h. wenn die Feldlinien parallel verlaufen und
- die Stärke des Feldes überall gleich ist, d. h. wenn die Feldlinien alle den gleichen Abstand voneinander haben,
- und wenn demzufolge die Kraft auf einen Probemagneten überall gleich groß ist.

Wie verhält sich in einem solchen Feld ein Probemagnet? Wird er, wenn er entsprechend der folgenden Skizze eingebracht wird, sich drehen und wenn ja, wird er danach seine Position verändern?

Wie wir wissen, wird sich die Magnetnadel längs der Feldlinien ausrichten, daher wirkt ein Drehmoment auf die Nadel. Sie wird sich so drehen, daß ihre Längsachse parallel zu den Feldlinien verläuft. Da die Kraft überall gleich groß ist, d. h. in alle Richtungen gleichmäßig wirkt, wird sich der Probemagnet danach nicht mehr bewegen.

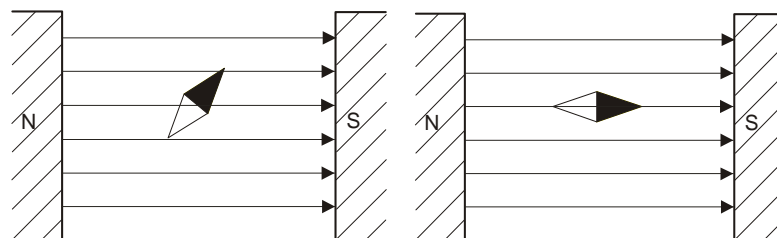


Abb. 1-5: Ausrichtung der Magnetnadel im homogenen Magnetfeld

Ein *inhomogenes Magnetfeld* finden wir beispielsweise am Ende eines Stabmagneten. Die Feldlinien verlaufen in verschiedene Richtungen und haben nicht überall den gleichen Abstand voneinander. Richtung und Stärke des Feldes sind an jedem Ort unterschiedlich.

Wie verhält sich in einem solchen Feld ein Probemagnet? Wird er, wenn er entsprechend der folgenden Skizze eingebracht wird, sich drehen und wenn ja, wird er danach seine Position verändern?

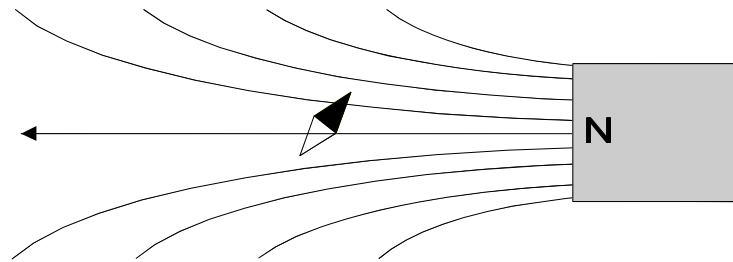


Abb. 1-6: Magnetnadel im inhomogenen Magnetfeld

Der Probemagnet wird sich zunächst in Richtung der Feldlinien ausrichten. In der Nähe des Pols liegen die Feldlinien dichter zusammen, d. h. daß dort das Feld und somit die auf die Magnetnadel wirkende Kraft stärker ist. Also bewegt sie sich auf den Pol des Magneten zu.

1.2.4 Magnetische Influenz und Ferromagnetismus

An einen kräftigen Stabmagneten kann man eine Kette von unmagnetischen Eisennägeln hängen. In seinem Magnetfeld wird jeder Nagel zu einem Magneten, der einen weiteren Nagel tragen kann. Entfernt man den Stabmagneten, so fällt die Kette auseinander: alle Nägel werden wieder unmagnetisch. Der so erregte Magnetismus ist um so stärker, je näher ein Eisenstückchen an den Magneten herankommt, am stärksten bei unmittelbarer Berührung. Man nennt diese Art der Erregung von Magnetismus *magnetische Influenz*. Dabei setzen sich die Feldlinien in den Nägeln fort; sie werden dort gesammelt und hindurchgeleitet (vgl. 1.2.2, Feld im Innern des Magneten). Tauchen wir einen schwach magnetischen Eisenstab in Eisenfeilspäne, bleiben nur einzelne Teilchen hängen. Setzen wir aber auf das obere Ende des Stabes den Pol eines starken Magneten und tauchen das untere Ende des Eisenstabes wieder ein, so bleibt ein langer Bart von Spänen hängen. Das heißt, daß die vom oberen Magneten ausgehenden Feldlinien durch den Stab hindurch verlaufen:

Eisen besitzt die Fähigkeit, die magnetischen Feldlinien zu sammeln und durch sich hindurchzuleiten.

Das eben beschriebene Experiment gelingt mit Aluminium, Kupfer und vielen anderen Metallen nicht. Stoffe mit der Fähigkeit, Feldlinien zu sammeln und durch sich hindurchzuleiten, heißen *ferromagnetische* Stoffe. Eisen und Stahl sind ferromagnetisch, Kobalt und Nickel haben in geringem Maße ferromagnetische Eigenschaften. Einige Legierungen sind ebenfalls ferromagnetisch.

Nicht ferromagnetische Metalle werden von Magneten nicht angezogen. Das Feld dringt durch sie hindurch, während es im Eisen gesammelt wird. Das bedeutet auch, daß ein Magnetfeld mit Eisen oder Stahl abgeschirmt werden kann, mit Aluminium oder Kupfer hingegen nicht.

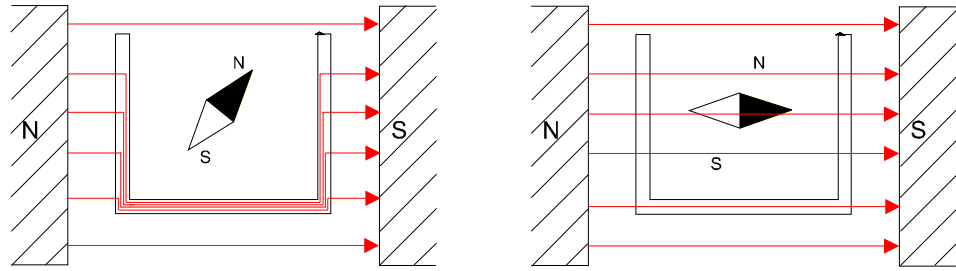


Abb. 1-7: Der Eisentopf schirmt das Magnetfeld ab. Auf eine in ihm befindliche Magnetnadel wirken keine Kräfte. Beim Aluminiumtopf verlaufen die Feldlinien so, als wenn der Topf nicht vorhanden wäre.

1.3 Das Magnetfeld der Erde

Das Magnetfeld der Erde erstreckt sich weit in den Weltraum und gleicht im Prinzip dem Feld einer magnetisierten Stahlkugel; es ist allerdings nicht kugelsymmetrisch, sondern durch einen von der Sonne stammenden Strom elektrisch geladener Partikeln verformt.

Gegenstände aus Stahl sind häufig magnetisch. Dies erklärt sich daraus, daß sie ständig dem Magnetfeld der Erde ausgesetzt sind; ihre Elementarmagnete ordnen sich dann in Richtung der Feldlinien an.

Deklination und Inklination

An der Erdoberfläche lassen sich die Eigenschaften des Erdmagnetfeldes durch Einzelmessungen an verschiedenen Orten bestimmen.

Eine Magnetnadel auf einer vertikalen Achse zeigt nicht genau nach Norden, sondern wird etwas nach Westen abgelenkt. Diese Ablenkung heißt *Deklination*, in der Nautik auch *Mißweisung*. Sie ist ortsabhängig, z. B. ist sie in Mitteleuropa für westlich gelegene Orte größer, für östlich gelegene kleiner. In höheren Breiten kann sie sehr groß sein. Außerdem ändert sie sich im Laufe der Zeit. Eine nur horizontal drehbare Magnetnadel nennt man *Deklinationsnadel*.

Hängt man eine Magnetnadel mit horizontaler Achse auf, so zeigt sie in einem bestimmten Winkel gegen die Erdoberfläche. Diesen Neigungswinkel zwischen der Horizontalen und der durch die Nadel angezeigten Richtung des Feldes nennt man *Inklination*. Wie die Deklination ist auch sie ortsabhängig und verändert sich mit der Zeit. Eine Magnetnadel mit horizontaler Achse heißt *Inklinationsnadel*.

Deklination und Inklination an einem Ort zeigen an, wie dort die Feldlinien des Erdmagnetfeldes verlaufen. Sammelt man die Ergebnisse vieler Einzelmessungen, so findet man, daß die Feldlinien in zwei Stellen zusammenlaufen, den *magnetischen Polen*¹. Sie fallen nicht mit den geographischen Polen zusammen und ändern im Laufe der Zeit ihre Lage. Eine Deklinationsnadel nimmt an den Polen keine bestimmte Richtung mehr an, die Inklinationsnadel stellt sich senkrecht ein.

¹ Die magnetischen Pole sind die Stellen, an denen die magnetischen Feldlinien senkrecht auf der Erdoberfläche stehen. Die geomagnetischen Pole sind die Stellen, an denen man letzteres erwarten würde, wenn die Erde ein kugelförmiger Magnet homogener Dichte wäre.

Mit Hilfe einer speziellen Karte, die für alle Orte die Deklination angibt, und einer Deklinationsnadel ist an jedem Ort der Erde die geographische Nordrichtung feststellbar. Eine für solche Zwecke geeignet aufgebaute Deklinationsnadel, die sich in einem eisenfreien Gehäuse über einer Windrose drehen kann, heißt *Kompaß*.

Elektrischer Strom, Stromkreis

2.1 Elektrische Ladung

2.2 Bewegung von Ladungsträgern: elektrischer Strom

2.3 Der einfache elektrischer Stromkreis

* A. Einstein, L. Infeld: *Die beiden elektrischen Fluida*

* *Crashkurs: Atome, Ionen, Elektronen*

2.1 Elektrische Ladung

Halten wir einen mit Wolle geriebenen Kugelschreiber einige Zentimeter über ein Häufchen Papierschnitzel, so werden diese vom Kugelschreiber angezogen. Viele Stoffe (beispielsweise Kunststoff, Hartgummi oder Glas) haben die Eigenschaft, leichte kleine Körperchen, wie Papier- oder Korkschnitzel anzuziehen, nachdem sie mit anderen Stoffen gerieben worden sind.

Setzen wir einen geriebenen Hartgummistab frei beweglich auf eine Nadelspitze, so stellt er sich in keine bestimmte Richtung ein. Nähern wir ihm einen anderen geriebenen Hartgummistab, so wird der bewegliche Stab von dem in unserer Hand abgestoßen. Nähern wir ihm aber einen geriebenen Glasstab, so wird er angezogen.

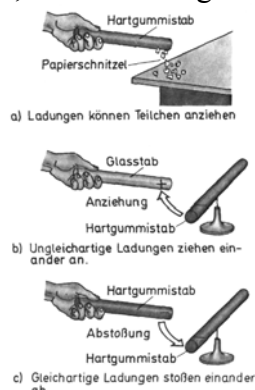


Abb. 2-1: Unterschiedliche Arten von Ladung

Die Vorgänge der hier beschriebenen *Reibungselektrizität* lassen sich erklären, wenn man annimmt, daß Glas und Hartgummi beim Reiben mit verschiedenen "Arten" von Elektrizität oder verschiedenartigen "*Ladungen*" versehen werden, die sich in oder an ihnen befinden. (Tatsächlich befinden sich diese Ladungen auf der Oberfläche der Stäbe.) Vereinbarungsgemäß nennt man die elektrischen Ladungen *positiv* und *negativ*. (Die Ladung des

Glases ist *positiv* und die Ladung des Hartgummis ist *negativ*.) Die oben beschriebenen Versuche zeigen:

Ungleichnamige Ladungen ziehen einander an, gleichnamige Ladungen stoßen einander ab.

Reibt man den eingangs beschriebenen Kugelschreiber nur kurze Zeit, so ist auch der beobachtete Anziehungseffekt nur klein. Daraus läßt sich schließen, daß die Ladungen in kleineren oder größeren Mengen übertragen werden bzw. auftreten. Man spricht hier deshalb auch von der *Ladungsmenge*, sie wird mit Q bezeichnet (siehe Abschnitt 4.1).

Positive Ladungen entstehen bei Elektronenmangel, negative Ladungen bei Elektronenüberschuß.

Analog zu den Bezeichnungen am Magneten spricht man hier von Polen: die Stelle mit Elektronenmangel heißt *positiver Pol* oder *Pluspol*, die Stelle mit Elektronenüberschuß heißt *negativer Pol* oder *Minuspol*.

Ein nicht geladener Körper enthält gleiche Mengen positiver und negativer elektrischer Ladungen, die sich in ihrer Wirkung gegenseitig aufheben.

2.2 Bewegung von Ladungsträgern: elektrischer Strom

2.2.1 Elektrischer Strom

Elektrischer Strom ist die Bewegung (das "Fließen") von Ladungsträgern, z.B. von Elektronen in Metallen oder Ionen in Flüssigkeiten. Dieses "Fließen" wird möglich, wenn man zwischen dem positiven und dem negativen Pol eine leitende Verbindung herstellt.

Elektronen bewegen sich von der Stelle mit Elektronenüberschuß zu der Stelle mit Elektronenmangel, d.h. vom Minuspol zum Pluspol.

Verschiedene Stoffe leiten den elektrischen Strom unterschiedlich gut, d.h. die Ladungsträger sind in ihnen mehr oder weniger leicht beweglich. Elektrisch leitend sind z.B. Metalle, die Erde, Kohle, der menschliche Körper und Elektrolytlösungen (siehe Kapitel 5). Metalle sind sehr gute, die anderen genannten Stoffe weniger gute oder schlechte *Leiter*. *Nichtleiter* oder *Isolatoren* sind z.B. Gummi, Keramik, reines Wasser. Die Übergänge zwischen Leiter und Nichtleiter sind fließend; reines Wasser z.B. ist wegen seiner Eigendissoziation eigentlich ein Leiter, allerdings ein sehr schlechter.²

In einem metallischen Leiter, z.B. einem Kupferdraht, sind die äußeren Elektronen der Kupferatome nicht an die Atomkerne gebunden, sondern frei be-

² Halbleiter sind Stoffe wie z.B. Silizium oder Germanium, die bei Raumtemperatur nur wenige frei bewegliche Ladungsträger enthalten. Bei Energiezufuhr, z.B. durch Temperaturerhöhung steigt die Zahl der Ladungsträger und damit die Leitfähigkeit. Die technische Bedeutung liegt darin, daß ihre Leitfähigkeit und andere elektrische Eigenschaften durch Zugabe geringer Mengen anderer Stoffe (gezielte Verunreinigung, "Dotierung") genau steuerbar ist.

weglich. Die Struktur des Drahtes wird durch die Atomrümpfe gebildet, die ortsfest und nur thermisch bedingten Schwingungen um ihre Ruhelage unterworfen sind. Die *freien Elektronen* bilden das sog. *Elektronengas*.

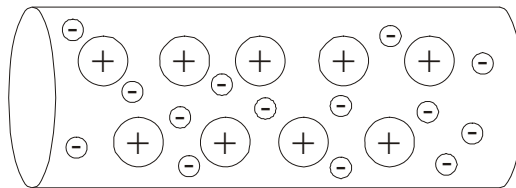


Abb. 2-2: Atomrümpfe und Elektronengas

Fließen eines Stroms in einem metallischen Leiter bedeutet, daß sich die freien Elektronen als Ladungsträger im Leiter bewegen.

Man unterscheidet Gleich- und Wechselstrom. Beim Gleichstrom fließt der Strom stets in die gleiche Richtung, d.h. die *Polung* ändert sich nicht. Beim Wechselstrom ändert sich ständig die Stromrichtung, z.B. im 230 Volt –Versorgungsnetz mit einer Frequenz von 50 Hertz. Hier wird zunächst nur der Gleichstrom behandelt.

2.2.2 Wärmewirkung des elektrischen Stroms

Die Bewegung der Elektronen im Draht ist durch ständige Wechselwirkung mit den Atomrümpfen gekennzeichnet. Dadurch befinden sich die Atomrümpfe in thermischer Bewegung: jeder stromdurchflossene Leiter erwärmt sich.

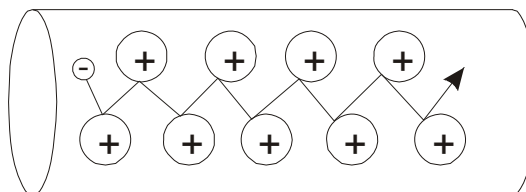


Abb.2-3: Wechselwirkungen

Eine technische Anwendung der *Stromwärme* oder *Jouleschen Wärme* sind z.B. Schmelzsicherungen in elektrischen Anlagen. Sie verhindern, daß bei einem Kurzschluß zu große Ströme fließen: überschreitet die Stromstärke einen festgelegten Wert, schmilzt durch die Stromwärme ein feiner Draht und unterbricht den Stromkreis.

2.2.3 Der einfache elektrische Stromkreis

Da der elektrische Strom nur dann fließen kann, wenn die Leiter zwischen dem positiven und dem negativen Pol nicht unterbrochen sind, spricht man auch von einem *geschlossenen elektrischen Stromkreis*. Der einfache, unverzweigte Stromkreis besteht aus einer *Spannungsquelle* (z.B. Batterie, Dynamo, Steckdose), den *Zuleitungen* zum *Verbraucher* (z.B. Lampe, Motor, Heizgerät) und einem *Schalter* zum Schließen oder Unterbrechen des Stromkreises.

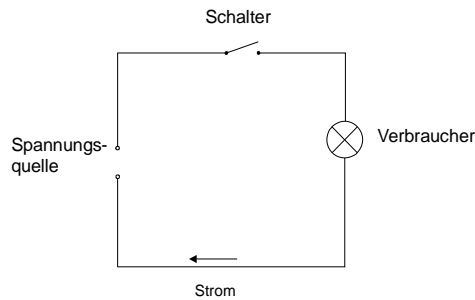


Abb. 2-4: Der einfache elektrische Stromkreis

Der Verbraucher wandelt elektrische Energie (s. u.) in andere Energieformen um, z.B. in Wärme, Licht oder Bewegung. Daher spricht man auch vom "Energiewandler" statt vom "Verbraucher".

* Albert Einstein, Leopold Infeld: Die beiden elektrischen Fluida

In Abschnitt 2.1 wurde der Begriff der elektrischen Ladung in sehr komprimierter Weise aus den beobachtbaren Erscheinungen der Reibungselektrizität abgeleitet. Die Beschreibung von Versuchen zur Reibungselektrizität ist, wie die im folgenden zitierten Autoren (mit zweifellos hinreichender Fachkompetenz) behaupten, "eintönig" und "langweilig".

"Die nächsten Seiten bringen eine mehr oder weniger eintönige Schilderung einiger sehr einfacher Experimente, die schon einmal deshalb langweilig ist, weil die bloße Beschreibung von Versuchen niemals so interessant sein kann wie ihre praktische Durchführung, dann aber auch, weil ihr Sinn erst klar wird, wenn man von der Theorie her an sie herangeht...

1. Ein Metallstab ruht auf einem Glasfuß, und seine beiden Enden sind mit Drähten an je ein Elektroskop angeschlossen. Was ist ein Elektroskop? Nun, ein einfacher Apparat, der im wesentlichen aus zwei Blattgoldstreifen besteht, die am unteren Ende eines kurzen Metallstumpfes angehängt sind. Das Ganze steckt in einer Glasflasche, und das darin befindliche Metall kommt nur mit ... Isolatoren in Berührung. Außer Elektroskop und Metallstab haben wir noch einen Hartgummistab und einen Flanellappen.

[Wir] reiben den Hartgummistab kräftig mit dem Flanelltuch und halten ihn dann an das Metall. Sofort klaffen die Streifen auseinander! Sie bleiben sogar auch dann noch gespreizt, wenn wir den Stab schon wieder weggenommen haben.

2. Nun kommt ein anderes Experiment, zu dem wir den gleichen Apparat verwenden wie vorher. Wieder hängen die Streifen zu Anfang zusammengelegt herab. Dieses Mal bringen wir den Gummistab aber nicht direkt mit dem Metall in Berührung, sondern halten ihn nur in die Nähe. Wieder klaffen die Streifen auseinander, nur sinken sie augenblicklich in ihre Ausgangsstellung zurück, wenn der Stab wieder weggenommen wird, ohne das Metall berührt zu haben, während sie bei dem vorigen Versuch ja gespreizt blieben.

3. Für das dritte Experiment wollen wir unseren Apparat etwas umändern. Nehmen wir an, der Metallstab bestünde aus zwei Teilen, die lose aneinandergesetzt sind. Wir reiben nun wieder den Gummistab mit dem Tuch und nähern ihn dem Metall. Es geschieht das gleiche: die Streifen klaffen auseinander. Jetzt wollen wir aber den Metallstab erst in seine beiden Teile

ander. Jetzt wollen wir aber den Metallstab erst in seine beiden Teile zerlegen und dann erst den Gummistab wegnehmen. Ergebnis: die Streifen bleiben gespreizt, statt wie beim zweiten Experiment in die Ausgangsstellung zurückzukehren.

Für diese einfachen und naiven Experimente wird kaum jemand ein brennendes Interesse aufbringen. Im Mittelalter hätte man dem Experimentator wahrscheinlich noch den Prozeß gemacht, uns kommen die Versuche aber langweilig und außerdem unlogisch vor. Es wäre jedoch schwierig, sie nach einmaligem Durchlesen obiger Schilderung fehlerlos nachzumachen. Mit ein wenig Theorie können wir sie aber ganz gut verstehen, ja, man kann sogar sagen, daß eine planlose, rein zufällige Durchführung solcher Experimente, ohne daß bereits mehr oder weniger fest umrissene Ideen über ihren Sinn und Zweck existieren, kaum denkbar ist.

Wir wollen nun einmal die Grundideen einer sehr einfachen und naiven Theorie umreißen, mit der man alle die geschilderten Erscheinungen deuten könnte:

Es gibt zwei *elektrische Fluida*, ein sogenanntes *positives Fluidum* (+) und ein *negatives* (-). ... Insofern, als sie mengenmäßig vermehrt oder vermindert werden können, haben diese Fluida in gewisser Weise substantiellen Charakter, doch bleibt ihr Gesamtbetrag in jedem isolierten System immer gleich...

Die nächste Annahme unserer Theorie ist die, daß zwei gleichnamige elektrische Fluida einander abstoßen, während zwei ungleichnamige sich anziehen...

Wir müssen aber noch ein letztes Postulat in unsere Theorie aufnehmen: Es gibt zwei Arten von Körpern, solche, in denen die Fluida sich ungehindert bewegen können, sogenannte *Leiter*, und solche, in denen das nicht der Fall ist, sogenannte *Nichtleiter* oder *Isolatoren*. Wie immer in derartigen Fällen, dürfen wir es mit dieser Klassierung nicht allzu genau nehmen. Ideale Leiter bzw. Isolatoren gibt es in Wirklichkeit nicht. Metalle, Erde, menschlicher Körper - das sind Leiter, deren Qualität allerdings verschieden ist. Glas, Gummi, Porzellan und dergleichen zählen zu den Isolatoren. Die Luft kann nur teilweise als Isolator angesehen werden, wie jedermann weiß, der schon einmal bei Experimenten wie den oben geschilderten zugesehen hat. Es gilt immer als gute Ausrede, wenn man das Mißlingen elektrostatischer Experimente der Luftfeuchtigkeit zuschreibt, die ja die Leitfähigkeit erhöht.

Die genannten theoretischen Annahmen reichen zur Erklärung der drei beschriebenen Experimente aus. Wir wollen sie nun noch einmal in der gleichen Reihenfolge durchsprechen, und zwar im Lichte der Theorie von den elektrischen Fluida:

1. Der Gummistab ist, wie andere Körper unter normalen Verhältnissen auch, elektrisch neutral. Er enthält zweierlei Fluida, nämlich positive und negative Elektrizität, zu gleichen Teilen. Wenn wir ihn mit Flanell reiben, scheiden wir diese beiden Fluida. Das ist eine rein konventionelle Vorstellung, eine Anwendung der aus der Theorie entwickelten Terminologie auf die Beschreibung dessen, was beim Reiben des Stabes geschieht. Die Elektrizitätsart, die nachher in dem Stab überwiegt, nennen wir die negative, und auch das ist natürlich reine Formsache. Wenn wir zu den Versuchen einen Glasstab verwendet und diesen mit einem Katzenfell gerieben hätten, würden wir auf Grund der geltenden Regeln genötigt gewesen sein, den Elektrizitätsüberschuß positiv zu nennen. Im weiteren Verlauf des Ex-

perimentes übertragen wir dadurch elektrisches Fluidum auf den metallenen Leiter, daß wir ihn mit dem Gummistab berühren. Hier kann es sich ungehindert bewegen und über das ganze Metall einschließlich der Blattgoldstreifen ausbreiten. Da zwei negative Ladungen einander abstoßen, zeigen die beiden Streifen das Bestreben, sich möglichst weit voneinander zu entfernen. Das Ergebnis ist die beobachtete Spreizung. Da das Metall in Glas oder einen anderen Isolator gebettet ist, verharrt das Fluidum auf dem Leiter, solange die Leitfähigkeit der Luft das zuläßt. Wir verstehen jetzt auch, warum wir vor Beginn des Experimentes das Metall berühren müssen. Tun wir das, so bilden Metall, Körper und Erde nämlich einen einzigen riesigen Leiter, über den das elektrische Fluidum sich so fein verteilt, daß auf dem Elektroskop praktisch nichts mehr zurückbleibt.

2. Dieses Experiment beginnt genauso wie das vorhergehende, nur daß der Gummistab, statt das Metall zu berühren, diesem lediglich angenähert werden darf. Die beiden in dem Leiter vorhandenen Fluida werden geschieden, da sie sich ja frei bewegen können; das eine wird angezogen, das andere abgestoßen. Wird der Gummistab entfernt, vermischen sie sich wieder, da ungleichnamige Fluida einander, wie wir wissen, anziehen.

3. Der Gummistab wird erst dann weggenommen, wenn der Metallstab in seine beiden Hälften zerlegt ist. In diesem Falle können die beiden Fluida sich nicht wieder miteinander vermischen, so daß die Blattgoldstreifen gespreizt bleiben, weil sie ja jeweils überwiegend mit einem der beiden elektrischen Fluida geladen sind.

Im Lichte dieser einfachen Theorie erscheinen alle bisher besprochenen Gesetzmäßigkeiten durchaus verständlich, ja, wir können damit sogar noch viele andere Tatsachen aus dem Reiche der Elektrostatik - wie dieses Gebiet genannt wird - erklären. Theorien haben den Zweck, uns auf neue Gesetzmäßigkeiten aufmerksam zu machen, zu neuen Experimenten anzuregen und die Wege zur Entdeckung neuer Phänomene und Gesetze zu ebnen. Ein Beispiel möge das verdeutlichen. Stellen wir uns den zweiten Versuch in etwas veränderter Form vor: Ich halte den Gummistab in die Nähe des Metalls und berühre den Leiter gleichzeitig mit dem Finger. Was geschieht? Nun, nach der Theorie wird das abgestoßene Fluidum (-) durch meinen Körper entweichen, so daß nur das andere, das positive, zurückbleibt. Nur die Streifen des Elektroskops, das dem Gummistab am nächsten ist, bleiben gespreizt. Führen wir diesen Versuch praktisch durch, so finden wir unsere Voraussage bestätigt.

Die Theorie, mit der wie hier arbeiten, ist, vom Standpunkt der modernen Physik aus betrachtet, zweifellos naiv und unzulänglich, doch ist sie insofern typisch, als sie die charakteristischen Merkmale der physikalischen Theorie schlechthin besitzt."

Quelle: Einstein, A. und Infeld, L.: Die Evolution der Physik. Wien, Hamburg 1950

* Crashkurs: Atome, Ionen, Elektronen

In diesem Skriptum werden zum Teil elementare Grundkenntnisse über Atome, Ionen, Elektronen etc. vorausgesetzt. Insbesondere auf Ionen und Elektronen wird in späteren Kapiteln näher eingegangen; für den Anfang soll dieser "Crashkurs" genügen.

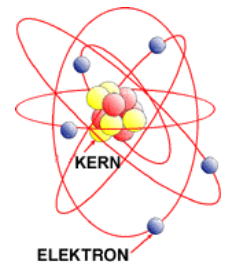
Stoffe sind entweder *chemische Elemente* oder *chemische Verbindungen*. Elemente (Grundstoffe) sind chemisch nicht weiter zerlegbar und bestehen aus gleichartigen *Atomen*. Beispiele: Wasserstoff, Schwefel, Kupfer. Vereinigen sich bei einer *chemischen Reaktion* zwei oder mehrere Atome, so entsteht ein *Molekül*, der kleinste Teil einer chemischen Verbindung. Beispiele: Wasser, Kupfersulfat, Natriumchlorid.

Atome bestehen aus dem *Kern* und der *Hülle*. Der Kern ist aus *Protonen* und *Neutronen* aufgebaut, die *Elektronen* bilden die *Elektronenhülle*. Protonen (Symbol p^+) sind positiv geladen, Neutronen (Symbol n) tragen keine Ladung. Die Elektronen (Symbol e^-) sind negativ geladen und haben eine etwa 2000 mal kleinere Masse als die Kernbausteine. Die Ladungen der Protonen und Elektronen sind die Elementarladungen $+e$ bzw. $-e$.

Die verschiedenen Elemente unterscheiden sich durch ihren Atomaufbau. Wasserstoff, das einfachste Element, besteht lediglich aus einem Proton und einem Elektron. Lithium hat von allen Metallen den einfachsten Atomaufbau: es besitzt einen Kern aus drei Protonen und drei Neutronen sowie eine Hülle aus drei Elektronen. Der Kern des Urans enthält 92 Protonen, über 140 Neutronen und ist von einer Hülle aus 92 Elektronen umgeben.

Wie ein Atom "in Wirklichkeit" aussieht, läßt sich nicht beschreiben. Es wurden jedoch im Laufe der Zeit Modelle entwickelt, von denen das bekannteste das *Bohrsche Atommodell* ist. In diesem Modell bewegen sich die Elektronen auf kreisförmigen Bahnen um den Kern.

Nach den Gesetzen der Elektrodynamik würde ein Elektron auf einer solchen Bahn ständig Energie abstrahlen und innerhalb von 10^{-8} s in den Kern stürzen. Es sei daher noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, daß es sich dabei um eine Modellvorstellung und nicht um eine vergrößerte, "wahrheitsgetreue" Abbildung eines Atoms handelt. Protonen, Neutronen und Elektronen sind keine kleinen Kügelchen und die Elektronen bewegen sich auch nicht um den Kern wie Planeten um die Sonne. Näheres dazu in Gribbin, John.: Auf der Suche nach Schrödingers Katze, München⁵ 2002 (Piper).



Zur Verdeutlichung der Größenverhältnisse:

Ein Atomkern ist etwa 10^{-14} m groß, ein Atom etwa 10^{-10} m. Würde man ein Atom billionenfach vergrößern, so hätte der Kern die Größe einer Kirsche, während das gesamte Atom 300 m Durchmesser hätte. In einem solchen Atom hätte der Eiffelturm Platz, die Elektronen hätten die Größe von Stecknadelköpfen.

Enthält die Hülle eines Atoms so viele Elektronen, wie sich Protonen in seinem Kern befinden, ist das Atom elektrisch neutral. Nach außen tritt keine elektrische Ladung in Erscheinung. Befinden sich dagegen in der Hülle mehr oder weniger Elektronen, als Protonen im Kern vorhanden sind, so ist das Atom im ersten Fall negativ, im zweiten Fall positiv geladen. Man sagt, das Atom sei *ionisiert* und bezeichnet es als *Ion*. Auch elektrisch geladene Moleküle nennt man Ionen, man spricht z.B. von Sulfationen (SO_4^{2-}).

Strom und Magnetfeld

3.1 Magnetische Wirkung des Stroms

3.2 Das Magnetfeld um einen stromdurchflossenen Leiter

3.3 Stromrichtung und Magnetfeld

3.4 Kräfte zwischen stromdurchflossenen Leitern

3.5 Elektromagnete

3.1 Magnetische Wirkung des Stroms

Ein von einem stromdurchflossenen, isolierten Draht umwickelter Nagel wird magnetisch, er zieht Büroklammern oder Eisenfeilspäne an: der elektrische Strom hat eine magnetische Wirkung.



Abbildung 3-1: Strom erzeugt ein Magnetfeld

Eine Magnetnadel, die über einem horizontal in Nord-Süd-Richtung aufgespannten Draht aufgehängt ist, dreht sich aus der ursprünglichen Richtung weg, wenn der Draht von Strom durchflossen wird (Vgl. 3.3).

Ein stromdurchflossener Leiter ist von einem magnetischen Feld umgeben. Es gibt keinen elektrischen Strom ohne magnetische Wirkungen.

3.2 Das Magnetfeld um einen stromdurchflossenen Leiter

1820 entdeckte Oersted, dass ein Strom eine Kompassnadel bewegt. Strom in einem Draht erzeugt also ein Magnetfeld um den Draht. Wir führen einen Kupferdraht senkrecht durch einen mit Eisenfeilspänen bestreuten Karton. Nach dem Einschalten des Stroms ordnen sich die Späne bei leichter Erschütterung in konzentrischen Kreisen um den Leiter herum an. Stellen wir

einige Magnetnadeln um den Leiter herum auf, so ordnen sie sich in der Richtung der vom elektrischen Strom erzeugten magnetischen Feldlinien.

Die magnetischen Feldlinien bilden konzentrische Kreise um den stromdurchflossenen Leiter.

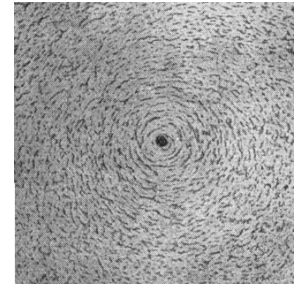
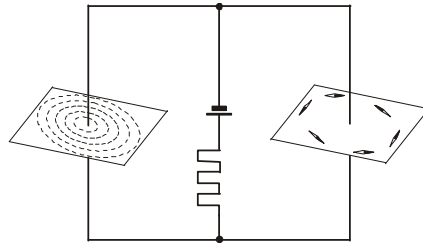


Abbildung 3-2: Magnetfeld um einen Leiter

3.3 Stromrichtung und Magnetfeld

Halten wir den stromdurchflossenen Draht der Länge nach über eine Magnetnadel, so wird sie abgelenkt. Ändern wir die Richtung des Stroms, indem wir die Pole der Spannungsquelle vertauschen, so wird die Nadel in entgegengesetzter Richtung abgelenkt.

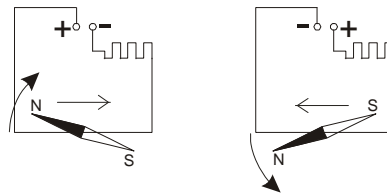


Abbildung 3-3: Ablenkung einer Magnetnadel in der Nähe eines Stroms

Mit der Änderung der Stromrichtung ändert sich die Richtung des magnetischen Feldes.

Wie die Festlegung der Richtung der magnetischen Feldlinien ist auch die Richtung des Stroms nur eine Vereinbarung. Die hier definierte Stromrichtung ist die sog. *technische Stromrichtung*, sie weist vom Plus- zum Minuspol und ist der Bewegungsrichtung der Elektronen entgegengesetzt (vgl. Abschnitt 2.2, Bewegung von Ladungsträgern).

Die technische Stromrichtung ist die Richtung vom Plus- zum Minuspol.

Den Zusammenhang zwischen der so definierten Stromrichtung und dem Magnetfeld beschreibt die "Rechte-Faust-Regel":

Umfaßt man den stromdurchflossenen Draht mit den vier Fingern der geballten rechten Hand und läßt den Daumen in die technische Stromrichtung zeigen, geben die übrigen Finger in die Richtung der magnetischen Feldlinien an.



Abbildung 3-4: "Rechte-Faust-Regel"

Für das magnetische Feld im Innern von Spulen heißt das:

Zeigen die vier Finger der geballten rechten Hand in die Richtung, in der der Strom durch die Windungen fließt, so gibt der Daumen die Richtung des magnetischen Feldes im Innern an.

Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule entspricht dem Feld eines Stabmagneten; die Lage des Nord- und des Südpols lassen sich leicht bestimmen:

Blickt man auf die Stirnfläche der Spule, so ist dort ein Nordpol, wenn der Strom linksdrehend durch die Windungen fließt, und ein Südpol, wenn er rechtsdrehend fließt. Im Innern der Spule besteht ein homogenes Magnetfeld.

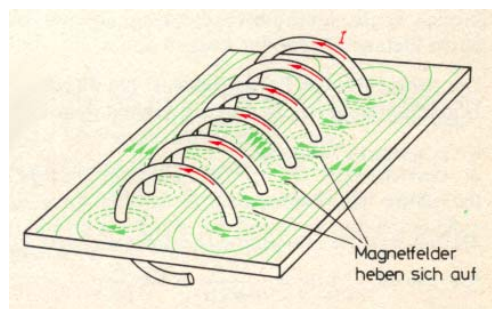


Abbildung 3-5: Magnetfeld einer Spule³

3.4 Kräfte zwischen stromdurchflossenen Leitern

Das Magnetfeld um stromdurchflossene Leiter erzeugt eine Kraft zwischen den Leitern. Liegen zwei Leiter nebeneinander, so lassen sich mit der "Rechte-Faust-Regel" deren Magnetfelder und die von ihnen hervorgerufenen Kräfte in Abhängigkeit von der Stromrichtung folgendermaßen darstellen:

³ Quelle: Röder, H et al.: Elektronik. Industrie- Rundfunk-, Fernsehelektronik. Verlag Europa-Lehrmittel, Wuppertal ⁶ o. J.

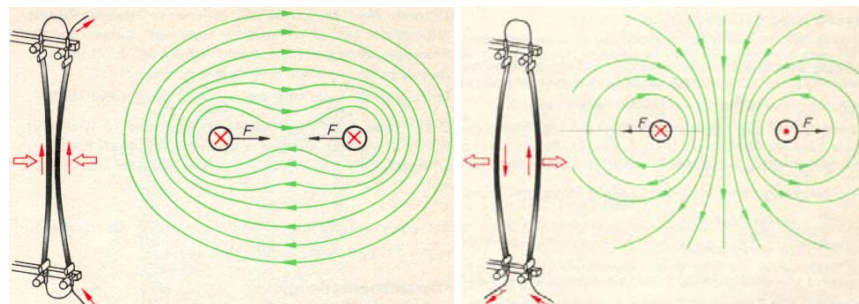


Abbildung 3-6: Kräfte auf parallele Leiter⁴

**Gleichsinnig von Strom durchflossene parallele Leiter ziehen sich an.
Gegensinnig von Strom durchflossene parallele Leiter stoßen sich ab.**

3.5 Elektromagnete

In 3.1 wurde gezeigt, daß ein von einem stromführenden Draht umwickelter Nagel magnetisch wird. Die Feldlinien des Magnetfeldes der stromdurchflossenen Spule verlaufen in hoher Dichte durch den Nagel und machen aus ihm, solange der Strom fließt, einen Magneten. Eine solche Spule mit Eisenkern stellt einen *Elektromagneten* dar.

In der technischen Anwendung besteht er meist aus der Spule mit feststehendem Kern und einem von diesem angezogenen beweglichen Eisenstück, dem *Anker*.

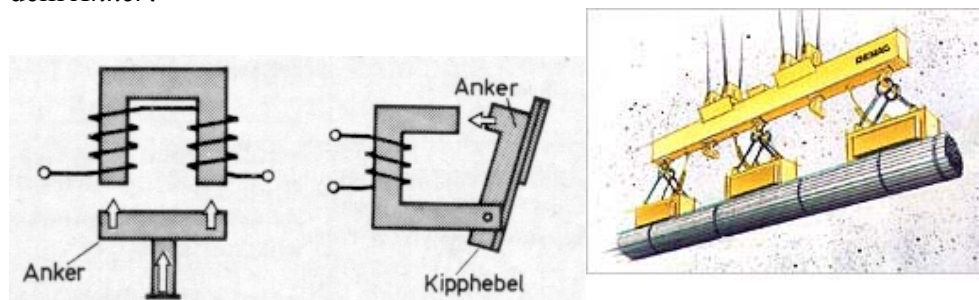
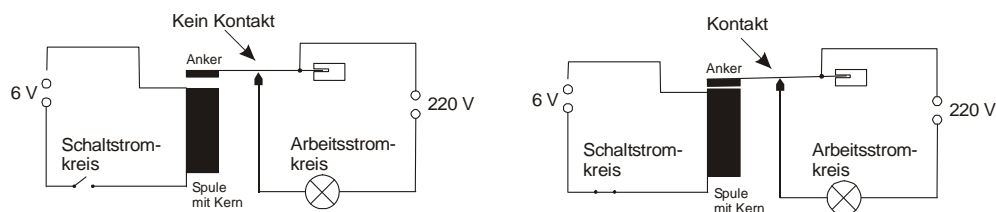


Abbildung 3-7: Kernmagnet, Kipphebelmagnet und ein elektromagnetischer Kran.

Eine weitere Anwendung des Elektromagneten stellt das *Relais* dar: es ermöglicht das Schalten starker Ströme mit Hilfe schwacher Ströme.



Aus: Im Schaltstromkreis fließt kein Strom, der Anker wird nicht angezogen.

Ein: Im Schaltstromkreis fließt Strom, der Anker wird von der Spule angezogen und schließt den Kontakt im Arbeitsstromkreis.

Abbildung 3-8: Relais

⁴ Quelle: Röder, H et al.: Elektronik. Industrie- Rundfunk-, Fernsehelektronik. Verlag Europa-Lehrmittel, Wuppertal⁶ o. J.

Elektrische Stromstärke

4.1 Elektrischer Stromstärke

4.2 Strommessung mit dem Drehspulgalvanometer

4.1 Elektrische Stromstärke

Wie oben erwähnt, ist elektrischer Strom das Fließen von Ladungen, zumeist von Elektronen als Ladungsträgern im metallischen Leiter. Die *Stromstärke* drückt aus, welche Ladungsmenge Q pro Zeiteinheit transportiert wird:

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

In Kapitel 3 wurde gezeigt, daß stromdurchflossene Leiter eine Kraft aufeinander ausüben. Die zwischen den Leitern wirkende Kraft, ist um so stärker, je stärker der Strom ist. Daher ist die elektrische Stromstärke, das *Ampere*, über die Kraft zwischen zwei Leitern definiert.⁵

Das Ampere ist eine Grundgröße; die Einheit der elektrischen Ladung Q (vgl. Abschnitt 2.1), das *Coulomb*, ist wie folgt abgeleitet:

$$[Q] = 1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ As}.$$

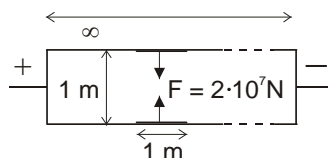
Die in Kapitel 2 erwähnte kleinstmögliche Ladungsmenge, die *Elementarladung* e des Elektrons, beträgt

$$e = 1.6020 \cdot 10^{-19} \text{ C}.$$

4.2 Strommessung mit dem Drehspulgalvanometer

Ein feststehendes Magnetfeld übt eine Kraft auf eine stromdurchflossene Spule aus, da diese selbst einen Magneten darstellt (vgl. 3.3, das Feld der Spule ähnelt dem eines Stabmagneten). Daher erfährt eine solche Spule ein

⁵ Das Ampere ist die Stärke eines konstanten elektrischen Stromes, der, durch zwei parallele, geradlinige, unendlich lange und im Vakuum im Abstand von 1 Meter voneinander angeordnete Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigen Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je 1 Meter Leiterlänge die Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ Newton hervorrufen würde.



Drehmoment, wenn sie zwischen den Polen eines Magneten aufgehängt ist: sie stellt sich senkrecht zu den Feldlinien des Magneten ein (vgl. Abschnitt 1.2.3).

Ein feststehendes Magnetfeld wirkt richtend auf eine bewegliche stromdurchflossene Spule.

Das *Drehspulgalvanometer* oder *Drehspulmeßinstrument* besteht aus einem Hufeisenmagneten, zwischen dessen Polen sich eine um einen Eisenzyylinder gewickelte rechteckige Spule um ihre Achse (die zugleich Achse des Zylinders ist) drehen kann.

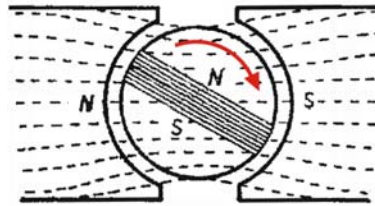


Abb. 4-1: Prinzip des Drehspulgalvanometers

Im stromlosen Zustand wird die Spule durch Federn in der Ruhelage gehalten. Wird sie von Strom durchflossen, so muß sich drehen. Diese Drehung geht soweit, bis die Federspannung gleich der (vom Strom verursachten) ablenkenden magnetischen Kraft ist. Diese Auslenkung aus der Ruhelage ist proportional dem Strom. An der Spule ist ein Zeiger befestigt, der die Auslenkung auf einer Skala anzeigt.

Strommeßgeräte heißen *Amperemeter*; sie werden stets *in* den Stromkreis, d.h. in Reihe mit dem Verbraucher geschaltet.

Elektrische Spannung und Leistung

5.1 Elektrische Spannung

5.2 Elektrische Leistung

5.3 Galvanisches Element

5.4 Reihen- und Parallelschaltung von Spannungsquellen

* Der Elektrische See

5.1 Elektrische Spannung

Ungleichnamige Ladungen ziehen sich an. Um Pole (Stellen mit entgegengesetzten Ladungen) zu erzeugen, d.h. eine räumliche Trennung der Ladungen zu vollziehen, muß Arbeit gegen die Anziehungskraft der Ladungen geleistet werden.

Diese Arbeit steht wieder zur Verfügung, wenn ein Ladungsausgleich zwischen den Polen stattfindet, d.h. wenn ein Strom fließt. Die dann freiwerdende Energie kann z.B. mit einem Motor in mechanische Energie oder mit einem Heizgerät in Wärmeenergie umgewandelt werden.

Ladungstrennung bedeutet Speicherung von Energie.

Welche Arbeit der Strom zu leisten vermag, hängt davon ab, welche Ladungsmenge mit welchem Arbeitsaufwand getrennt wurde. Bezieht man die investierte Arbeit W auf die getrennte Ladungsmenge Q , so erhält man eine Größe U , die *elektrische Spannung* heißt. Ihre Einheit ist das *Volt* (V).

$$[U] = \frac{[W]}{[Q]} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C}} =: 1 \text{ V}.$$

Elektrische Spannung ist die beim Trennen der Ladungen aufgebrauchte und gespeicherte Arbeit pro Ladungseinheit; sie ist Ursache des elektrischen Stroms.

Gemessen wird die Spannung mit einem *Voltmeter*. Dabei handelt es sich um ein Drehspulgalvanometer, das *an* den Stromkreis, d.h. parallel zum Spannungserzeuger oder Verbraucher angeschlossen wird. Die anliegende Spannung verursacht einen zu ihr proportionalen Strom, auf den das Gerät wie in Kapitel 4 beschrieben reagiert. Mit Kenntnis des Ohmschen Gesetzes (vgl. Kapitel 6) läßt sich das Galvanometer in Volt eichen (vgl. Abschnitt 7.3).

5.2 Elektrische Leistung

Berücksichtigt man, daß $1\text{ C} = 1\text{ As}$ bzw. $[Q] = [I] \cdot [t]$, so erhält man

$$[U] = \frac{[W]}{[I] \cdot [t]} \text{ bzw. } U = \frac{P}{I},$$

wobei $P = W/t$ die elektrische Leistung ist.

Das Volt ist als 1 J/C definiert, damit ist $1\text{ V} = 1\text{ J/As} = (1\text{ J/s}) / (1\text{ A})$, also

$$1\text{ V} = \frac{1\text{ J}}{1\text{ As}} = \frac{1\text{ J/s}}{1\text{ A}}, \text{ also}$$

$$1\text{ V} = \frac{1\text{ W}}{1\text{ A}}.$$

Das heißt: die Spannung gibt Auskunft darüber, welche elektrische Leistung bei gegebener Stromstärke zur Verfügung steht oder welche Stromstärke für eine bestimmte Leistung notwendig ist.

Bei einer Spannung von 235 V kann ein Strom von beispielsweise 10 A oder 16 A fließen. Der Strom von 16 A vermag mehr Arbeit zu leisten, als der von 10 A . Bei gleicher Spannung kommt es also auf die Stromstärke an, welche Arbeit geleistet werden kann. (In diesem Fall stehen Leistungen von $235\text{ V} \cdot 10\text{ A} = 2350\text{ W}$ bzw. $235\text{ V} \cdot 16\text{ A} = 3760\text{ W}$ zur Verfügung.)

Will man eine elektrische Leistung von 2200 W zur Verfügung stellen und hat die Wahl zwischen Spannungen von 110 V und 220 V , so ist im ersten Fall eine Stromstärke von $2200\text{ W} / 110\text{ V} = 20\text{ A}$ nötig, im zweiten Fall nur 10 A . Man kommt also in einem 220-Volt-Netz mit geringeren Strömen und so mit weniger dicken Leitungen aus.

5.3 Galvanisches Element

Ein *galvanisches Element* besteht aus einem Gefäß, das eine Salzlösung oder eine verdünnte Säure enthält, und zwei darin eintauchenden Leitern aus verschiedenem Material (z.B. Zink und Kupfer). Die Flüssigkeit heißt *Elektrolyt*, die darin eintauchenden Leiter *Elektroden*.

Die Zinkelektrode löst sich im Elektrolyten auf, d.h. sie gibt Zn^{2+} -Ionen ab und erhält so einen Elektronenüberschuß: sie lädt sich negativ auf.

Die positiven, im Elektrolyten gelösten Zinkionen laden diesen und die mit ihm leitend verbundenen Kupferelektrode positiv auf.

Damit besteht eine Spannung zwischen den Elektroden des galvanischen Elements. Ihre Höhe hängt von der Art des Elektrolyten und dem Elektrodenmaterial ab. Die negativ geladene Elektrode heißt *Kathode*, die positiv geladene *Anode*.

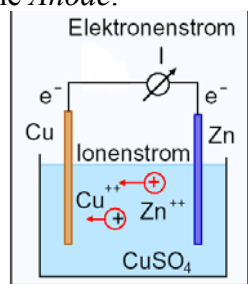


Abb.5-1: Das galvanische Element

Solange die Zinkelektrode nicht durch einen äußeren Stromkreis leitend mit der Kupferelektrode verbunden ist, können die "überschüssigen" Elektronen der Zinkelektrode nicht abfließen. Ihre negative Überschußladung verhindert den Austritt weiterer Zn^{2+} -Ionen, es stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein.

Wird nun der äußere Stromkreis geschlossen, fließen die Elektronen der Kathode über den Verbraucher zur Anode und ziehen dadurch die positiven Zn^{2+} -Ionen zur Anode. Aufgrund der nun abgeflossenen Elektronen ist das Gleichgewicht an der Zinkelektrode gestört, es gehen weitere Zn^{2+} -Ionen in Lösung. Dieser Vorgang dauert an, bis entweder der äußere Stromkreis unterbrochen wird oder der Elektrolyt mit Zinkionen gesättigt ist.

Im galvanischen Element und anderen Spannungsquellen wird also keine Ladung gespeichert, sondern lediglich getrennt: eine solche Spannungsquelle ist ein Energiespeicher, kein Ladungsspeicher.

5.4 Reihen- und Parallelschaltung von Spannungsquellen

Galvanische Elemente (und alle anderen untereinander gleichartigen Spannungsquellen) lassen sich *in Reihe* oder *parallel* schalten.

Zur Demonstration der *Reihenschaltung* stellen wir drei Elemente zu je 1,5 Volt so zusammen, daß wir den positiven Pol des ersten Elements mit dem negativen des zweiten verbinden. Da der negative Pol des zweiten Elements mit dem positiven des ersten leitend verbunden ist, hat er wie dieser gegenüber dem negativen Pol des ersten Elements die Spannung 1,5 V. Zwischen dem positiven Pol des zweiten und dem negativen Pol des ersten Elements besteht daher die Spannung 3 V und schließlich zwischen dem positiven Pol des dritten und dem negativen Pol des ersten Elements die Spannung 4,5 V.

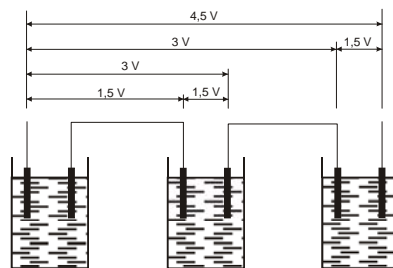


Abb.5-2: Spannungsaddition bei Reihenschaltung

Zwischen dem Minuspol des ersten und dem Pluspol des letzten Elements besteht eine Spannung, die sich aus der Summe der Einzelspannungen ergibt, m. a. W.:

Bei hintereinander geschalteten Spannungsquellen addieren sich die Einzelspannungen zur Gesamtspannung.

Bei der Parallelschalung von Elementen verbindet man alle positiven Pole miteinander und ebenso alle negativen. Hierbei ändert sich die Spannung nicht, es addieren sich aber die den einzelnen Elementen entnehmbaren Ströme (vgl. Abschnitt 6.5, Kirchhoffsche Gesetze).

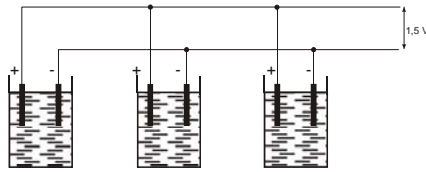


Abb.5-3: Parallelschaltung galvanischer Elemente

Bei parallel geschalteten Spannungsquellen ist der Gesamtstrom die Summe der Einzelströme.

Grundsätzlich lassen sich nicht nur Spannungsquellen, sondern alle elektrischen Bauelemente in Reihe oder parallel schalten, siehe dazu auch Abschnitt 6.5.

* Der elektrische See

In vielen Schulbüchern findet man zum Verhältnis zwischen Strom und Spannung eine Analogie aus der Mechanik, nämlich den Stausee, der aufgrund seiner Höhe (entspricht der Spannung) mit fallendem Wasser (entspricht dem Strom) dadurch Arbeit leistet, daß er eine Turbine antreibt. Diese Darstellungen sind meist nicht sehr informativ; eine wirklich schöne Beschreibung der Verhältnisse findet sich bei Kenn Amdahl:

Der elektrische See

Hoch oben auf einem Berg liegt ein großer, kalter und nebeliger See. Zwei Flüsse fließen von ihm aus dem Gebirge zum Meer hinab. Einer der Flüsse ist so groß und mächtig wie der Nil oder der Mississippi. Er ist tief und breit, voller Fische und für Wasserskiläufer oder sogar Hausboote geeignet. Der andere Fluß ist dagegen winzig, nur wenige Zentimeter tief und vielleicht ein bis zwei Meter breit. Eigentlich ist er nur ein Bach. Wenn man ihn durchwaten, kann man die Steine in seinem Bett erkennen.

Der Elektrische See liegt etwa tausend Meter über dem Meeresspiegel. Unabhängig von den zahllosen Mäandern auf dem Weg zum Meer transportieren also beide Flüsse das Wasser von ganz oben einen Kilometer weit nach unten. Der Höhenunterschied von einem Kilometer zwischen See und Meer ist auch der Grund, warum das Wasser die Flüsse hinabfließt. Jeder Wassertropfen aus diesem See hat auf seinem Weg ins Meer eine Fallhöhe von einem Kilometer zurückzulegen. Dieser Höhenunterschied ist die Flüssigkeitsanalogie zur elektrischen Spannung.

Beide Flüsse haben also dieselbe elektrische Spannung, denn jeder von ihnen bewältigt denselben Tausend-Meter-Höhenunterschied vom Ursprung bis zum Meer. Dennoch sind die beiden Flüsse nicht identisch. Der eine führt viel mehr Wasser als der andere, also leistet er auch mehr Arbeit als der kleine. Er transportiert größere Schiffe, bewegt größere Felsbrocken und kann ein wesentlich größeres Wasserrad drehen. Er hat mehr Ampere. Strom ist der Muskel der Elektrizität.

Falls Sie jemals einen *bodyguard* brauchen, nehmen Sie einen mit viel Ampere.

Beide Flüsse können Sand zum Meer transportieren. Dazu sollte Sie jedoch wissen, wie viel Spannung und wie viel Strom Sie nutzen können. Wenn man mehr elektrische Spannung hat, kann man auch mehr Sand transportieren. Verbreitert man das Flußbett, kann man ebenfalls mehr Sand transportieren. Da beide Flüsse aus dem Elektrischen See die gleiche elektrische

Spannung... haben, beruht ihr Leistungsunterschied auf anderen Gegebenheiten, wie etwa der Breite ihrer Stromrinne, ob sie mäandern oder gar unterirdisch verlaufen, ob sie Stromschnellen oder Hindernisse in ihrem Weg haben.

Quelle: Amdahl, Kenn: Elektronen gibt es hier nicht. Elektrizität für coole Köpfe. Reinbek 2000. (Zwei sinnentstellende Druck- oder Übersetzungsfehler wurden von mir stillschweigend korrigiert.)

Elektrischer Widerstand

- 6.1 Der elektrische Widerstand
- 6.2 Das Ohmsche Gesetz
- 6.3 Der spezifische Widerstand.
- 6.4 Temperaturabhängigkeit des Widerstands
- 6.5 Die Kirchhoffschen Gesetze der Stromverzweigung
- 6.6 Leitwert und Leitfähigkeit

6.1 Der elektrische Widerstand

Auf einem Isolator sei ein Draht in dichten Windungen aufgewickelt (W). Am Ende A ist er über ein Amperemeter mit der Spannungsquelle verbunden, weiterhin gibt es eine verschiebbare Abnahmeklemme B. Beim Verschieben von B ändert sich die Länge des stromdurchflossenen Leiters zwischen den beiden Klemmen.

Verschieben wir die Klemme B so, daß der stromdurchflossene Teil des Drahts länger wird, nimmt die Stromstärke ab. Wird er kürzer, so nimmt die Stromstärke zu. Schon eine kleine Längenänderung bewirkt eine merkliche Änderung der Stromstärke.

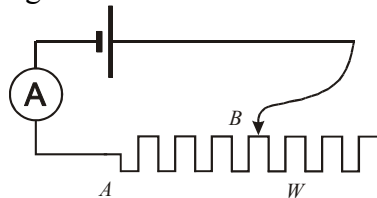


Abb.6-1: Abhängigkeit des Stroms von der Länge des Leiters

Das kurze Drahtstück leitet also den Strom besser als das lange. Das lange Drahtstück "hemmt" den Strom mehr als das kurze, man sagt, es hat einen größeren *elektrischen Widerstand R*.

Jeder Leiter und jeder Verbraucher besitzt einen elektrischen Widerstand.

6.2 Das Ohmsche Gesetz

Um eine Beziehung zwischen dem elektrischen Widerstand einerseits und den bereits bekannten elektrischen Größen Strom und Spannung andererseits zu finden, untersuchen wir das Verhalten von Strom und Spannung (genauer gesagt: die Abhängigkeit des Stroms von der Spannung) bei zwei Leitern mit

verschiedenem Widerstand. Zuerst messen wir die Stromstärke, die bei verschiedenen Spannungen durch einen Leiter der Länge $\ell = 1.5 \text{ m}$ fließt.⁶ Die Meßergebnisse sind in der Tabelle dargestellt. Es zeigt sich, daß die Stromstärke der Spannung proportional ist. (Das bedeutet, daß der Quotient U/I konstant ist.)

U (V)	I (A)	U/I (V/A)
0	0	-
2	0,02	100
4	0,04	100
6	0,06	100
8	0,08	100
10	0,10	100
100	1,0	100

Meßergebnisse für $\ell = 1.5 \text{ m}$

Wiederholen wir den Versuch mit einem doppelt so langen Leiter aus dem gleichen Material (d.h. mit dem doppelten Widerstand), finden wir auch hier, daß die Stromstärke proportional der Spannung ist. (Der Quotient U/I ist natürlich auch hier konstant, hat aber einen anderen Wert als beim vorherigen Versuch.)

U (V)	I (A)	U/I (V/A)
0	0	-
2	0,01	200
4	0,02	200
6	0,03	200
8	0,04	200
10	0,05	200
100	0,5	200
200	1,0	200

Meßergebnisse für $\ell = 3 \text{ m}$

In beiden Fällen gilt $I \sim U$, wobei der Widerstand (mit R bezeichnet) während der Messung konstant bleibt. Dies ist der Inhalt des *Ohmschen Gesetzes*:

Bei konstantem elektrischen Widerstand ist der Strom proportional der Spannung:
 $I \sim U$ für $R = \text{const.}$

Es gibt Situationen, in denen das Ohmsche Gesetz nicht gilt: wird z.B. ein Draht von Strom durchflossen, so erhöht er seine Temperatur und damit auch seinen Widerstand (siehe Abschnitt 6.4). R ist hier also nicht konstant und damit ist auch der Strom nicht mehr proportional der Spannung. Wird der Draht durch ein Gebläse gekühlt und bleibt seine Temperatur hinreichend konstant, gilt das Ohmsche Gesetz in guter Näherung.

Wie oben schon gesagt, bedeutet die Proportionalität $I \sim U$, daß das Verhältnis von Strom und Spannung für ein und denselben Leiter konstant ist (im zweiten Fall war es doppelt so groß wie im ersten Fall). Dieser Wert ist definitionsgemäß der elektrische Widerstand des Leiters:

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

Die Einheit des elektrischen Widerstands ist 1 Ohm, abgekürzt 1Ω :

⁶ Der hier verwendete Leiter besteht vorzugsweise aus Konstantan, einer Legierung aus 60% Kupfer und 40 % Nickel. Im Gegensatz zu den anderen Metallen sind damit die Versuchsergebnisse von der Temperatur weitgehend unabhängig (siehe Abschnitt 6.4).

$$[R] = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 1 \Omega.$$

6.3 Der spezifische Widerstand

Der Widerstand eines stromführenden Drahtes ist proportional zu seiner Länge ℓ und umgekehrt proportional zur Querschnittsfläche A des Leiters:

$$R \sim \ell, R \sim A^{-1}.$$

Also gilt

$$R \sim \frac{\ell}{A}.$$

Es existiert ein materialabhängiger Proportionalitätsfaktor ρ , so daß gilt

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{A}.$$

ρ heißt *spezifischer Widerstand* des Leiters. Seine Einheit ergibt sich zu

$$[\rho] = [R] \cdot \frac{[A]}{[\ell]} = \Omega \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = \Omega \cdot \text{m}.$$

Gibt man aus praktischen Gründen die Länge ℓ des Leiters in m und seine Fläche A in mm^2 an, so erhält man die Einheit des spezifischen Widerstandes wie folgt:

$$[\rho] = [R] \cdot \frac{[A]}{[\ell]} = \Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}.$$

In Worten ausgedrückt:

Der spezifische Widerstand ist der Widerstand eines Leiters von 1 m Länge und 1 mm^2 Querschnitt.

Das sind $10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$; dies ist die Einheit, die normalerweise in Tabellenwerken verwendet und mit der in der Praxis gerechnet wird.

Tabelle einiger spezifischer Widerstände ρ bei 18°C in $\Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$:

Silber	0,016	Konstantan	0,48
Kupfer	0,017	Quecksilber	0,958
Aluminium	0,032	Kohle	100
Eisen	0,09 - 0,15	Kochsalzlg. 20%	50000
Wolfram	0,053	Schwefelsäure 30%	13000

6.4 Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands

Der elektrische Widerstand ändert sich mit der Temperatur ϑ ; wird der Widerstand bei der Temperatur ϑ mit R_ϑ und der Widerstand bei der Temperatur 0°C mit R_0 bezeichnet, ist die mathematische Beschreibung dieser Abhängigkeit gegeben durch

$$R_\vartheta = R_0(1 + \alpha \vartheta),$$

wobei α der *Temperaturkoeffizient* des elektrischen Widerstands mit der Einheit

$$[\alpha] = ^\circ\text{C}^{-1} \text{ oder } \text{K}^{-1}$$

ist. Wird der Widerstand bei der Temperatur 1 mit R_1 und der Widerstand bei der Temperatur 2 mit R_2 bezeichnet, läßt sich der Zusammenhang unabhängig von Nullpunkt der Celsius-Skala so darstellen:

$$R_2 = R_1(1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta).$$

Der Widerstand der meisten metallischen Leiter wächst mit der Temperatur, der Widerstand von Elektrolyten und von Kohle nimmt mit steigender Temperatur ab (d.h. ihr Temperaturkoeffizient ist negativ).

6.5 Die Kirchhoffschen Gesetze der Stromverzweigung

6.5.1 Kirchhoffsche Gesetze für Reihenschaltungen

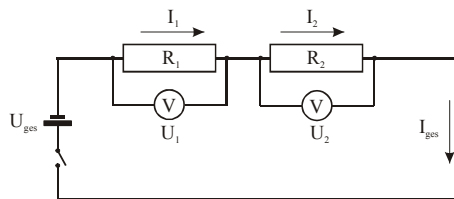


Abb.6-2: Reihenschaltung von Widerständen

Da sich der Strom in einer Reihenschaltung nicht verzweigt, muß er überall gleich sein. (Die durch die in der Skizze eingezeichneten Voltmeter fließenden Ströme seien vernachlässigbar.) Dies ist das *erste Kirchhoffsche Gesetz der Reihenschaltung*:

In der Reihenschaltung fließt überall derselbe Strom: $I_{ges} = I_1 = I_2$.

Die Wirkung hintereinander liegender Widerstände addiert sich: *zweites Kirchhoffsches Gesetz der Reihenschaltung*:

In der Reihenschaltung ist der Gesamtwiderstand die Summe der Einzelwiderstände: $R_{ges} = \sum R_i$.

Daraus und aus $R = U/I$ folgt

$$\frac{U_{ges}}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} \Leftrightarrow \frac{U_{ges}}{I} = \frac{U_1 + U_2}{I},$$

daraus folgt das dritte Kirchhoffsche Gesetz der Reihenschaltung:

In der Reihenschaltung ist die Summe der Teilspannungen gleich der angelegten Gesamtspannung: $U_{ges} = \sum U_i$

Wegen $I_1 = I_2$ und $I = U/R$ gilt:

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}$$

oder das vierte Kirchhoffsche Gesetz der Reihenschaltung:

In der Reihenschaltung verhalten sich die Teilspannungen wie die zugehörigen Widerstände: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$.

6.5.2 Kirchhoffsche Gesetze für Parallelschaltungen

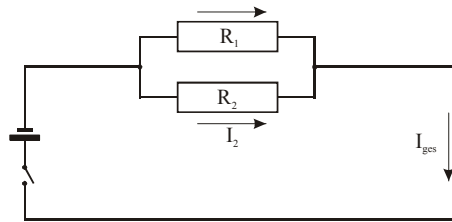


Abb.6-3: Parallelschaltung von Widerständen

Der Strom in einer Parallelschaltung verzweigt sich in Teilströme. Die Summe dieser Teilströme muß so groß sein wie der Gesamtstrom. Dies ist das *erste Kirchhoffsche Gesetz der Parallelschaltung*:

In der Parallelschaltung ist der Gesamtstrom gleich der Summe der Teilströme:

$$I_{ges} = \sum I_i.$$

Zweites Kirchhoffsches Gesetz der Parallelschaltung:

In der Parallelschaltung liegt an allen Widerständen dieselbe Spannung:

$$U_{ges} = U_1 = U_2.$$

Nach dem ersten Gesetz gilt wegen $I = U/R$:

$$\frac{U_{ges}}{R_{ges}} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2},$$

damit folgt das *dritte Kirchhoffsche Gesetz der Parallelschaltung*:

In der Parallelschaltung ist der Kehrwert des Gesamtwiderstands die Summe der Kehrwerte der Einzelwiderstände: $R_{ges}^{-1} = \sum R_i^{-1}$

Aus dem zweiten Gesetz und aus $U = R \cdot I$ folgt

$$I_{ges} \cdot R_{ges} = I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2,$$

daraus folgt das *vierte Kirchhoffsche Gesetz der Parallelschaltung*:

In der Parallelschaltung verhalten sich die Teilströme umgekehrt wie die zugehörigen Widerstände: $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$.

Beispiel 1. Gegeben sei folgende Schaltung mit den Werten $U = 110 \text{ V}$, $R_1 = 40 \text{ } \Omega$, $R_2 = 50 \text{ } \Omega$, $R_3 = 30 \text{ } \Omega$.

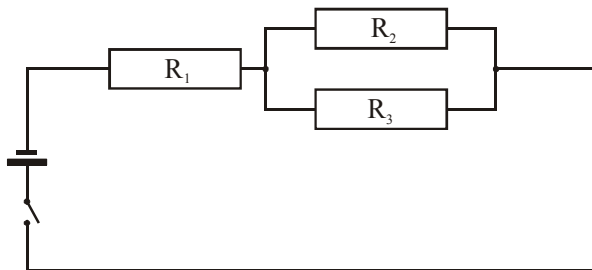


Abb.6-4: Wie groß sind die Ströme I_1, I_2, I_3 ?

Die Widerstände R_2 und R_3 werden zunächst zu einem *Ersatzwiderstand* zusammengefaßt, der in Reihe mit R_1 geschaltet ist.

Nach dem dritten Kirchhoffschen Gesetz für Parallelschaltungen gilt

$$R_{\text{Ersatz}}^{-1} = R_2^{-1} + R_3^{-1}, \text{ also } R_{\text{Ersatz}} = (R_2^{-1} + R_3^{-1})^{-1}, \text{ damit folgt}$$

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_{\text{Ersatz}} = R_1 + (R_2^{-1} + R_3^{-1})^{-1} = 58.75 \text{ } \Omega.$$

Der Gesamtstrom ergibt sich aus dem Gesamtwiderstand und der Gesamtspannung:

$$I_{\text{ges}} = U_{\text{ges}}/R_{\text{ges}} = 110\text{V}/58.75\Omega = 1.87 \text{ A}$$

Dieser Strom ist auch gleich dem Strom I_1 (Serienschaltung: $I_{\text{ges}} = I_1 = I_{2,3}$).

Im Ersatzwiderstand liegt an beiden Teilwiderständen gleiche Spannung, d.h. $U_2 = U_3$. Die Gesamtspannung ist die Summe der Spannungen U_1 und der Spannung $U_{2,3}$ am Ersatzwiderstand:

$$U_{\text{ges}} = U_1 + U_{2,3} = U_1 + U_2 = U_1 + U_3.$$

U_1 läßt sich mit den bekannten Größen berechnen:

$$U_1 = I_1 \cdot R_1 = 74.8 \text{ V}.$$

Damit und mit der Gesamtspannung ergibt sich $U_{2,3}$:

$$U_{2,3} = U_{\text{ges}} - U_1 = 35.2 \text{ V}.$$

Nun sind alle Größen bekannt, um I_2 und I_3 auszurechnen:

$$I_2 = U_2/R_2 = 0.704 \text{ A}, \quad I_3 = U_3/R_3 = 1.17 \text{ A}.$$

Beispiel 2: An der Netzspannung $U = 220 \text{ V}$ sei ein Heizgerät mit einem Widerstand von $48,4 \Omega$ angeschlossen. Wie viele Glühbirnen mit einem Widerstand von je 807Ω lassen sich parallel schalten, wenn ein Strom von 6 A nicht überschritten werden soll?

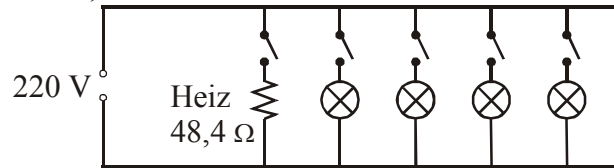


Abb.6-5: Parallel geschaltete Verbraucher

Wie groß ist der Gesamtwiderstand? Gegeben ist $U = 220 \text{ V}$ und ein maximaler Strom $I = 6 \text{ A}$. Damit ist

$$R = U/I = 36,67 \Omega.$$

Da es sich um eine Parallelschaltung handelt, gilt

$$R^{-1} = R_{\text{Heiz}}^{-1} + R_{\text{Birne}}^{-n},$$

wobei n die Anzahl der Birnen ist. Es ist

$$n = R_{\text{Birne}} (R^{-1} - R_{\text{Heiz}}^{-1}) = 5,3.$$

Es dürfen also maximal 5 Birnen dazugeschaltet werden.

6.6 Leitwert und Leitfähigkeit

Der *Leitwert* G eines Leiters ist der Kehrwert seines Widerstands:

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

mit der Einheit Siemens (S):

$$[G] = 1 \Omega^{-1} =: 1 \text{ S}.$$

Damit läßt sich das dritte Kirchhoffsche Gesetz der Parallelschaltung in der Form schreiben:

$$G_{\text{ges}} = \sum G_i.$$

Der Kehrwert des spezifischen Widerstands ist die *Leitfähigkeit* κ . Ihre Einheit ergibt sich zu

$$[\kappa] = [\rho^{-1}] = \frac{1}{\Omega \cdot \text{m}} = \frac{\text{S}}{\text{m}}$$

Ebenso wie beim spezifischen Widerstand wird in der Praxis (z.B. in der Konduktometrie, der Messung der Leitfähigkeit eines Elektrolyten) oft eine besser zu handhabende Einheit verwendet, nämlich $\mu\text{S}/\text{cm}$ (das sind $10^{-4} \text{ S}/\text{m}$).

In 6.2 wurde gezeigt, daß bei konstantem Widerstand der Strom proportional der Spannung ist: $I \sim U$. Um aus der Proportionalität eine Gleichung zu gewinnen, setzen wir I/U als Proportionalitätskonstante ein: $I = (I/U) \cdot U$. I/U ist aber gerade der Kehrwert von U/I , also von R . Damit erhalten wir $I = G \cdot U$.

Elektrotechnische Anwendungen

7.1 Potentiometerschaltung

7.2 Das Drehspulgalvanometer als Amperemeter

7.3 Das Drehspulgalvanometer als Voltmeter

7.4 Die Wheatstonesche Brücke

7.5 Quellen- und Klemmenspannung

7.1 Potentiometerschaltung

Liegt zwischen den Enden A und B eines Leiters mit hohem Widerstand (z. B. einer Spule aus dünnem Draht) eine Spannung von z. B. 100 Volt an, so fällt sie proportional der Länge der Spule ab. Schließen wir ein Voltmeter zwischen A und einen verschiebbaren Kontakt in E an, so messen wir, wenn E in der Mitte steht, zwischen A und E eine Spannung von 50 Volt. Wird der Kontakt so eingestellt, daß l_2 ein Fünftel der Gesamtlänge l ist, so messen wir 20 Volt.

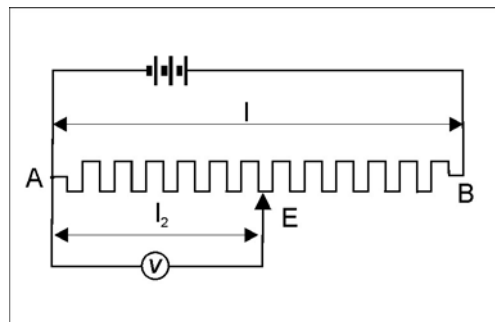


Abb. 7-1: Potentiometerschaltung

Wir können auf diese Weise zwischen A und E jede beliebige Spannung zwischen 0 und 100 Volt abgreifen. Eine solche Schaltung, mit der man eine *Spannungsteilung* vornimmt, heißt *Potentiometerschaltung*.

7.2 Das Drehspulgalvanometer als Amperemeter

Jedes Drehspulgalvanometer hat einen *Innenwiderstand* R_i , der hauptsächlich durch die Drehspule verursacht wird.

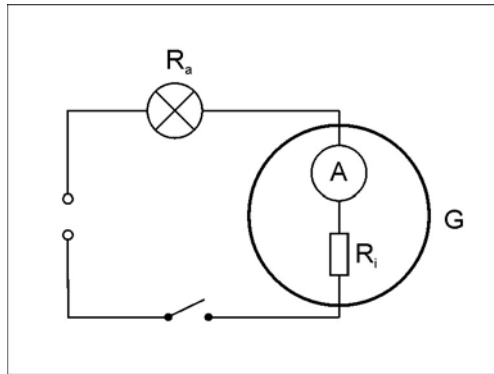


Abb.7-2: R_i ist der Innenwiderstand des Galvanometers G , R_a ist der Widerstand außerhalb des Galvanometers

Bei Benutzung des Instruments als Amperemeter mißt man wegen des Innenwiderstands den Strom $I = U/(R_a + R_i)$, der kleiner ist als der interessierende Strom U/R_a . Um diese Differenz möglichst klein zu halten, soll der Innenwiderstand klein gegenüber dem äußeren Widerstand sein: $R_i \ll R_a$. Zur Meßbereichserweiterung des Amperemeters leitet man über einen parallel geschalteten *Nebenwiderstand* R_N , den *Shunt*, einen Teil des Stroms um.

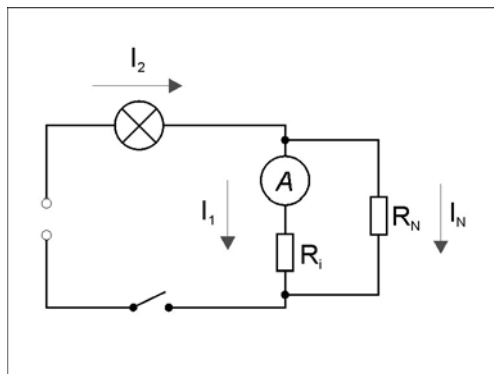


Abb.7-3: Nebenwiderstand R_N

Beispiel: Ein Amperemeter mit einem Innenwiderstand von 50Ω habe seinen Maximalauschlag bei $I_1 = 0.005 \text{ A}$. Es soll aber ein Strom von $I_2 = 1 \text{ A}$ gemessen werden. Der "neue" Gesamtstrom I_2 soll sich aus I_1 und I_N ergeben; da es sich um eine Parallelschaltung handelt, gilt

$$I_2 = I_1 + I_N, \text{ d.h.}$$

$$I_N = I_2 - I_1$$

Mit den genannten Zahlen ergibt sich I_N zu $1 \text{ A} - 0.005 \text{ A} = 0.995 \text{ A}$. In der Parallelschaltung gilt für Widerstände und Ströme:

$$\frac{R_N}{R_i} = \frac{I_1}{I_N}$$

Also ist der Nebenwiderstand wie folgt zu bemessen:

$$R_N = \frac{I_1 \cdot R_i}{I_N} = 0.251 \Omega$$

Allgemein gilt für die Erweiterung des Meßbereichs auf das n-fache des ursprünglichen Stroms, d.h. für $I_2 = n \cdot I_1$, folgendes:
Über den Nebenwiderstand R_N fließt der Strom

$$I_N = I_2 - I_1 = (n \cdot I_1) - I_1 = (n - 1) \cdot I_1$$

Damit ergibt sich

$$R_N = \frac{R_i \cdot I_1}{I_N} = \frac{R_i \cdot I_1}{(n - 1)I_1} \Rightarrow R_N = \frac{R_i}{n - 1}$$

**Der Nebenwiderstand ist stets klein gegenüber dem Innenwiderstand:
 $R_N \ll R_i$**

7.3 Das Drehspulgalvanometer als Voltmeter

7.3.1 Spannungsmessung mit dem Galvanometer

Ein Drehspulgalvanometer, das parallel zur Spannungsquelle oder zum Verbraucher geschaltet wird, dient als Spannungsmesser. Aus der Kenntnis des Innenwiderstands R_i und der angezeigten Stromstärke läßt sich die an den Klemmen herrschende Spannung nach $U = I \cdot R_i$ berechnen; dementsprechend kann die Skala des Geräts zugleich für Strom und Spannung ausgelegt sein.

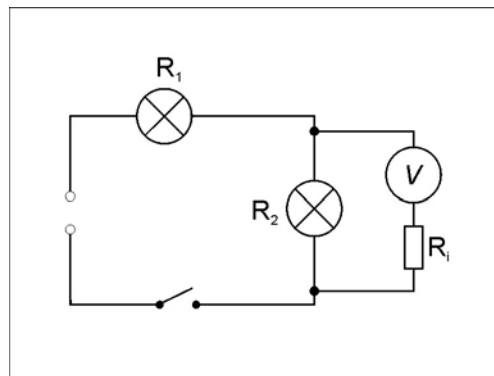


Abb.7-4 :Als Spannungsmesser geschaltetes Voltmeter

Hat ein Drehspulinstrument z. B. eine Ampereskala von 0 bis 10 A und einen Innenwiderstand von 10Ω , so läßt sich eine Spannung von 0 bis 100 Volt messen. Auf der Skala lassen sich dann je nach Art der Schaltung Strom oder Spannung ablesen.

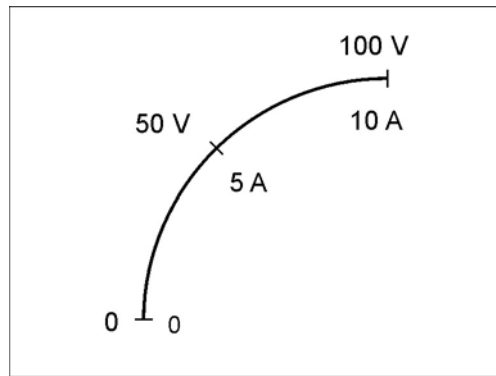


Abb.7-5:Skala für Strom und Spannung

7.3.2 Der Innenwiderstand des Voltmeters

Liegt am Verbraucher mit dem Widerstand R_a die Spannung U , so sollte eine Spannungsmessung $U = R_a \cdot I$ ergeben. Das Meßwerk hat aber einen Innenwiderstand R_i , so daß tatsächlich $U = R_a \cdot I_1 = R_a \cdot (I - I_2)$. gemessen wird. Das ist kleiner als $R_a \cdot I$.

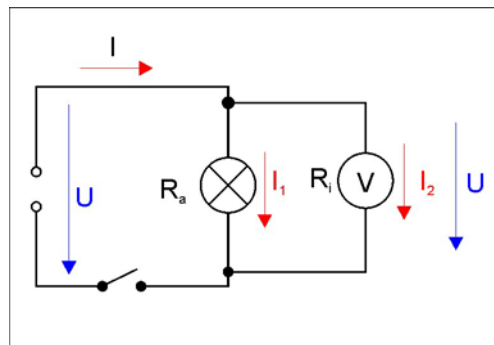


Abb.7-6: R_i ist der Innenwiderstand des Voltmeters

Der so erhaltene Wert nähert sich aber $R_a \cdot I$, wenn I_2 sehr klein wird, d.h. R_i sehr groß wird. Das heißt:

Beim Voltmeter soll der Innenwiderstand groß gegenüber dem Widerstand am Verbraucher sein: $R_i \gg R_a$.

Im Idealfall wäre der Innenwiderstand eines Voltmeters also unendlich.

7.3.3 Meßbereichserweiterung

Beträgt der Meßbereich in obigem Beispiel 100 V bei $R_i = 10 \Omega$, so würde er bei $R_i = 100 \Omega$ das zehnfache betragen: $U = R_i \cdot I = 100 \Omega \cdot 10 \text{ A} = 1000 \text{ V}$. Eine Vergrößerung des Innenwiderstands durch einen (damit in Reihe geschalteten) Vorwiderstand stellt also eine Meßbereichserweiterung des

Voltmeters dar. Um dem Idealfall $R_i = \infty$ möglichst nahe zu kommen, soll der Vorwiderstand groß gegenüber dem Innenwiderstand sein: $R_V \gg R_i$.

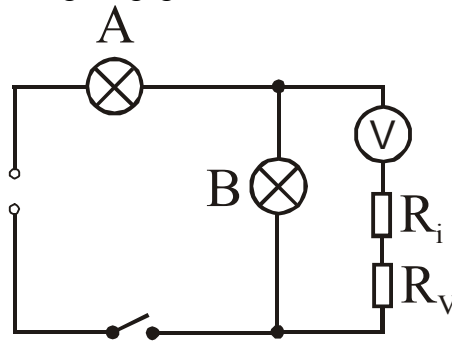


Abb.7-7: Vorwiderstand R_V

Soll der ursprüngliche Meßbereich U_i (der mit R_i geltende Meßbereich) auf das n -fache $U_2 = n \cdot U_i$ erweitert werden, so gilt mir dem „neuen“ Widerstand $R_i + R_V$:

$$U_2 = U_V + U_i \quad \text{bzw.}$$

$$U_V = U_2 - U_i = nU_i - U_i = (n - 1)U_i.$$

Ferner gilt (viertes Kirchhoffsches Gesetz der Reihenschaltung):

$$\frac{R_V}{R_i} = \frac{U_V}{U_i}.$$

Daraus folgt

$$R_V = \frac{R_i \cdot U_V}{U_i} = \frac{R_i \cdot (n - 1) \cdot U_i}{U_i},$$

der Vorwiderstand ist also zu bemessen mit

$$R_V = R_i \cdot (n - 1).$$

Beispiel: ein Galvanometer mit einem Innenwiderstand $R_i = 50 \, \Omega$ zeige bei Vollausschlag eine Spannung $U = 0,25 \, \text{V}$ an. Wie ist der Vorwiderstand zu bemessen, um einen Meßbereich von $U_2 = 50 \, \text{V}$ zu erreichen?

$$R_V = R_i \cdot (n - 1) = R_i \cdot \left(\frac{50}{0,25} - 1 \right) = R_i \cdot 199 = 50 \, \Omega \cdot 199 = 9950 \, \Omega.$$

7.4 Die Wheatstonesche Brücke

Die Wheatstonesche Brückenschaltung dient zur Bestimmung eines unbekanntes Widerstands R_X . In der gezeigten Schaltung ist der Widerstand R_N , der *Vergleichswiderstand*, bekannt.

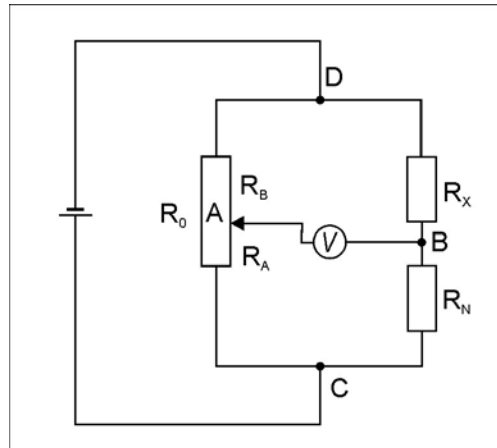


Abb.7-8: Wheatstonesche Brücke

Wenn die am Potentiometer R_0 abgegriffenen Widerstände R_A und R_B sich zueinander verhalten wie die Widerstände R_N und R_X , so herrscht zwischen den Punkten A und B keine Spannung:

$$\frac{R_B}{R_A} = \frac{R_X}{R_N} \quad \text{für } U_{AB} = 0 \quad \text{bzw.}$$

$$R_X = \frac{R_B \cdot R_N}{R_A} \quad \text{für } U_{AB} = 0.$$

Mit einem Voltmeter (in diesem Fall ein sog. *Nullanzeiger*) wird dieser *Nullabgleich* durchgeführt, am Potentiometer ist das Verhältnis R_B/R_A abzulesen. Daraus ist R_X zu berechnen.

7.5 Quellen- und Klemmenspannung

Jede Spannungsquelle besitzt einen Innenwiderstand R_i , wodurch sich die *Quellen-* oder *Urspannung* U_Q bei Belastung um $R_i \cdot I$ vermindert. An den Klemmen steht daher nur die *Klemmenspannung*

$$U_K = U_Q - (R_i \cdot I)$$

zur Verfügung.

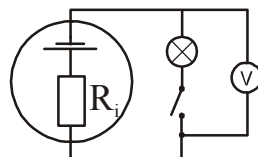


Abb.7-9: Das Voltmeter mißt die Klemmenspannung

Beispiel: An eine Batterie mit einer Quellenspannung $U_Q = 20 \text{ V}$ und einem Innenwiderstand von $R_i = 2 \text{ } \Omega$ werde ein Verbraucher mit einem Lastwiderstand von $R_a = 8 \text{ } \Omega$ ange-

geschlossen. Welche Spannung U_K liegt (ohne Berücksichtigung des Leitungswiderstands) am Verbraucher an?

Der Gesamtstrom beträgt $I = U_Q / (R_i + R_d)$. Die Differenz ergibt sich zu

$$\Delta U = R_i \cdot I = 2 \Omega \cdot \frac{20 \text{ V}}{10 \Omega} = 4 \text{ V},$$

so daß am Verbraucher 16 V zur Verfügung stehen.

Im unbelasteten Zustand ist $U_Q = U_K$. Beim Kurzschluß fließt ein starker Strom, der *Kurzschlußstrom*

$$I_K = \frac{U_Q}{R_i}.$$

In obigem Beispiel beträgt der Kurzschlußstrom $I_K = 20 \text{ V} / 2 \Omega = 10 \text{ A}$.