fernmeldelehrling.de

HANDBUCH

FÜR DEN

FERNMELDEHANDWERKER

der Deutschen Bundespost

BAND B 3

DIE FACHKUNDE

Die Gleichstromlehre (Wesen der Elektrizität; elektrischer Stromkreis; Maßeinheiten; Ohmsches Gesetz; Widerstand; Leitfähigkeit; Spannungsabfall; Stromverzweigung; Wärmewirkung und chemische Wirkung des elektrischen Stromes; elektrisches Feld; Kondensator)

VERLAG: DEUTSCHE POSTGEWERKSCHAFT - VERLAG GMBH.
6 FRANKFURT - SAVIGNYSTRASSE 29

fernmeldelehrling.de

Schmidt Hermann

Handbuch für den Fernmeldehandwerker der DBP

14 wichtige Lehr- und Lernwerke für den FLehrl; auch für den Handwerker F und den Fernmeldehandwerker zur Vorbereitung auf die Grundlagenlehrgänge gut geeignet!

Band A 1 — Allgemeine Berufskunde

Weg und Ziel der Ausbildung — Der Lehrvertrag — Die Fernmeldehandwerkerprüfung — Die Tätigkeitsgebiete des Fernmeldehandwerkers, sein beruflicher Werdegang und seine Aufstiegsmöglichkeiten — Der Tarifvertrag — Gesetze und Verordnungen des Fernmeldewesens — Allgemeine Vorschriften zum Schutz gegen Starkstrom und Unfallschäden

Band A 2 — Allgemeine Berufskunde

Allgemeines über den Staatsaufbau — Aufgaben und Gliederung der DBP — Die Sozialeinrichtungen bei der DBP — Allgemeines aus der Geschichte des Post- und Fernmeldewesens — Wie fertige ich meine schriftlichen Prüfungsarbeiten? — Musterausarbeitungen und Musterthemen

Band B 1 — Die Fachkunde

Mathematische und physikalische Grundkenntnisse einschließlich der Stoffgebiete aus den beiden Grundlagenlehrgängen

Band B 2 — Die Fachkunde

Fachzeichnen — Technisches Zeichnen — Stromlaufzeichnen

Band B 3 — Die Fachkunde

Die Gleichstromlehre (Wesen der Elektrizität; elektrischer Stromkreis; Maßeinheiten; Ohmsches Gesetz; Widerstand; Leitfähigkeit; Spannungsabfall; Stromverzweigung; Wärmewirkung und chemische Wirkung des elektrischen Stromes; elektrisches Feld; Kondensator)

— Weiteres siehe 3. und 4. Umschlagseite —

HANDBUCH

FÜR DEN

FERNMELDEHANDWERKER

der Deutschen Bundespost

DPG

BAND B 3

DIE FACHKUNDE

Die Gleichstromlehre (Wesen der Elektrizität; elektrischer Stromkreis; Maßeinheiten; Ohmsches Gesetz; Widerstand; Leitfähigkeit; Spannungsabfall; Stromverzweigung; Wärmewirkung und chemische Wirkung des elektrischen Stromes; elektrisches Feld; Kondensator)

3. VERBESSERTE UND ERWEITERTE AUFLAGE

VERLAG: DEUTSCHE POSTGEWERKSCHAFT - VERLAG GMBH.
6 FRANKFURT - SAVIGNYSTRASSE 29

fernmeldelehrling.de

Vorwort

Die vierzehn Bände des **„Handbuchs für den Fernmeldehandwerker der DBP“** sollen

1. **den Fernmeldelehrlingen während der Lehrzeit ein ständiger Begleiter sein und ihnen eine umfassende und gute Prüfungsvorbereitung ermöglichen,**
2. **den Handwerkern F aufzeigen, welches Fachwissen erforderlich ist, um genausoviel zu wissen wie die Lehrlinge am Ende ihrer Lehrzeit,**
3. **den Fernmeldehandwerkern die Möglichkeit geben, ihr Wissen aufzufrischen und es auf den neuesten Stand der Fernmeldetechnik zu bringen und**
4. **eine ausreichende Vorbereitung auf den Lehrstoff der dienstlichen Grundlagenlehrgänge gewährleisten.**

In der Fernmeldehandwerkerprüfung sowie in den Grundlagenlehrgängen müssen neben den praktischen Fertigkeiten auch die theoretischen Fachkenntnisse über die Fernmeldetechnik vorhanden sein. Das gleiche gilt hinsichtlich der Kenntnisse in dem wichtigen Prüfungsfach „Allgemeine Berufskunde“ sowie in bezug auf die Grundkenntnisse über die für das Fernmeldewesen wichtigen Gesetze und Verordnungen, wie FAG, TWG oder FeO. Einer der Bände allein kann dem Leser dieses umfangreiche Wissen nicht vermitteln; alle vierzehn Bände zusammen (vgl. hierzu die Angaben auf der 2., 3. und 4. Umschlagseite) enthalten jedoch das Fachwissen, das sich der Leser im Interesse des Prüfungserfolges und seines weiteren Aufstiegs aneignen muß.

In dem „Handbuch für den Fernmeldehandwerker der DBP“ ist nur der unbedingt notwendige Lehrstoff in einfachster Form behandelt worden. Die Verfasser erheben nicht den Anspruch, daß die Bände alle Vorschriften und technischen Einzelheiten sowie das in der Praxis selten oder gar nicht Vorkommende enthalten. Ihnen ging es vielmehr darum, eine

Fibel **für den Fernmeldelehrling,**
für den Handwerker F und
für den Fernmeldehandwerker

zu schaffen, die der gestellten Aufgabe im Interesse der Leser ohne unnötigen Ballast gerecht wird.

Druck: Sommer 1964

Nachdruck, auch auszugsweise, nicht gestattet

INHALTSVERZEICHNIS

A. Die Elektrizität

I. Grundsätzliches ... 7
1. Die Naturerscheinung „Elektrizität“ ... 7
2. Was heißt „Elektrizität“? ... 7
3. Die Bedeutung der Elektrizität für die Menschheit ... 7

II. Das Wesen der Elektrizität ... 8
1. Die Reibungselektrizität ... 8
2. Leiter und Nichtleiter ... 10
3. Atome und Elektronen ... 11
4. Die Elektronenbewegung ist die Grundlage der elektrischen Vorgänge ... 12
   a) Die Spannung ... 12
   b) Der Strom ... 13
   c) Technische Stromrichtung und Elektronenrichtung ... 13
   d) Der Widerstand ... 14
5. Übungsaufgaben ... 15

B. Grundlagen der Gleichstromlehre

I. Der elektrische Stromkreis ... 15

II. Die elektrischen Maßeinheiten ... 16
1. Die Maßeinheit der Stromstärke ... 16
2. Die Maßeinheit des Widerstandes ... 19
3. Die Maßeinheit der Spannung ... 19
4. Übungsaufgaben ... 19

III. Das Ohmsche Gesetz ... 20
1. Das Rechnen mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes ... 21
   a) Das Umstellen der Formel ... 21
   b) Berechnen der Stromstärke I ... 22
   c) Berechnen der Spannung U ... 23
   d) Berechnen des Widerstandes R ... 23
2. Übungsaufgaben ... 24

IV. Der Widerstand ... 24
1. Der spezifische Widerstand ... 25
2. Widerstand und Temperatur ... 26
3. Die Berechnung des Leiterwiderstandes ... 27
4. Der Isolationswiderstand ... 30
5. Übungsaufgaben ... 31

V. Leitfähigkeit und Leitwert ... 31
1. Die Leitfähigkeit ... 31
2. Der Leitwert ... 33
3. Übungsaufgaben ... 34

VI. Der Spannungsabfall ... 34

fernmeldelehrling.de

VII. **Die Schaltung von Widerständen** ... 38
1. Die Reihenschaltung ... 38
2. Die Nebeneinanderschaltung ... 40
3. Die Gruppenschaltung ... 43
4. Die Spannungsteilerschaltung ... 45
5. Übungsaufgaben ... 48

VIII. **Die Stromverzweigung** ... 50
1. Die Kirchhoffschen Sätze ... 50
2. Übungsaufgaben ... 54

C. Die Wärmewirkung des elektrischen Stromes

I. **Der Strom erwärmt den Leiter** ... 55
1. Die Stromdichte ... 56
2. Die Anwendung der Stromwärme ... 57

II. **Leistung und Arbeit** ... 58
1. Die elektrische Leistung ... 58
2. Der Wirkungsgrad ... 61
3. Mechanische Arbeit und Leistung ... 62
4. Beziehungen zwischen mechanischer und elektrischer Leistung ... 63
5. Die elektrische Arbeit ... 64
6. Übungsaufgaben ... 65

D. Die chemische Wirkung des elektrischen Stromes

I. **Die Elektrolyse** ... 66
1. Die Entdeckungen Galvanis und Voltas ... 68

II. **Die elektrischen Elemente** ... 68
1. Polarisation und Depolarisation ... 69
2. Das Zink-Kupfer-Element ... 70
3. Das Zink-Kohle-Element ... 71
4. Das Trockenelement ... 72

III. **Die Schaltung von Elementen** ... 73
1. Der innere Widerstand eines Elements ... 73
2. Die Anwendung des Ohmschen Gesetzes ... 73
3. Die Hintereinanderschaltung ... 78
4. Die Nebeneinanderschaltung ... 79
5. Die Gruppenschaltung ... 80
6. Übungsaufgaben ... 82

E. Der Sammler (Akkumulator)

I. **Der Bleisammler** ... 83
1. Die Bauart der Bleisammler ... 83
2. Ladung und Entladung ... 85
3. Die Aufnahmefähigkeit ... 87

II. **Der Stahlsammler** ... 88

III. **Übungsaufgaben** ... 88

F. Spannungserzeugung durch Wärme, Licht und Druck

G. Das elektrische Feld

I. **Der Nachweis des Spannungszustandes** ... 89

II. **Kräfte im elektrischen Feld** ... 91
1. Die elektrischen Feldlinien ... 91
2. Die Kraftwirkung des elektrischen Feldes ... 92
3. Die elektrische Feldstärke ... 93
4. Das elektrische Potential ... 95

III. **Die elektrische Beeinflussung (Influenz)** ... 96

IV. **Übungsaufgaben** ... 97

H. Der Kondensator

I. **Aufbau und Wirkungsweise des Kondensators** ... 97
1. Die Wirkungsweise des Kondensators ... 98
2. Kapazität und Dielektrikum ... 99
3. Kapazität und Spannung ... 100

II. **Bauarten von Kondensatoren** ... 101

III. **Kondensatorschaltungen** ... 103
1. Die Nebeneinanderschaltung ... 103
2. Die Hintereinanderschaltung ... 105
3. Übungsaufgaben ... 106

Dank des Entgegenkommens der Firma PHYWE, Göttingen, war es möglich, einige Bilder mit Versuchsaufbauten aus dem Werk „Die Physik in Versuchen" in diesen Band als Anschauungs- und Hilfsmittel aufzunehmen.

fernmeldelehrling.de

A. Die Elektrizität

I. Grundsätzliches

1. Die Naturerscheinung „Elektrizität"

Wer von uns kennt nicht den Blitz, eine Naturerscheinung, die uns in unserer Kindheit als übernatürliche Kraft oft genug in den Gewitternächten geängstigt hat? Staunend und schaudernd haben wir am nächsten Morgen dann gehört, daß „es eingeschlagen" hatte oder auch daß „der Blitz gezündet" hatte. Ähnlich mag es auch in der Vorzeit den naturverbundenen Völkern ergangen sein, wenn sie die Kraft und die Gewalt der sich in Blitz und Donner offenbarenden Himmelserscheinung „Elektrizität" erlebt haben. Wir wissen, daß die Germanen z. B. die Erscheinungen Blitz und Donner dem Gotte Thor zugeschrieben haben. Vom Gotte Thor bis zur Erforschung der Elektrizität und ihrer Nutzbarmachung für die Menschheit ist es ein weiter Weg.

2. Was heißt „Elektrizität"?

Das Wort **Elektrizität** ist abgeleitet von dem griechischen Wort **Elektron.** Elektron wiederum ist die Bezeichnung für den **Bernstein**, den kühne Seefahrer aus dem hohen Norden mitbrachten, und mit dem sich die griechischen Frauen schmückten. Dieser Bernstein zeigte eine besondere Eigenart: Man konnte aus ihm knisternde Funken ziehen, wenn man ihn mit einem Wolltuch gerieben hatte; die Bernsteinkämme zogen beim Kämmen die feinen Frauenhaare an sich.

An die geheimnisvolle Kraft des Bernsteins und an die Bezeichnung Elektron erinnerte sich um 1600 der englische Physiker Gilbert. Er gebrauchte das griechische Wort zur Benennung der dem Bernstein innewohnenden Kraft. Daraus entstand als Bezeichnung für die in der gesamten Natur wirkende Kraft das Wort **Elektrizität.**

3. Die Bedeutung der Elektrizität für die Menschheit

Es war ein langer Weg von der Furcht unserer Vorfahren vor Blitz und Donner bis zur heutigen Bedeutung der Elektrizität. Heute heizen wir unsere Wohnungen mit Elektrizität, mit Hilfe des elektrischen Stromes schmelzen wir Metalle, durch Ausstrahlung elektrischer Wellen senden und empfangen wir Nachrichten zu und von jedem Punkt der Erde.

Die nachstehend aufgeführten Erfindungen sollen uns als Merksteine dienen für den Siegeszug der Elektrizität:

1663 Erfindung der Elektrisiermaschine durch Otto von Guericke

1752 Einführung des Blitzableiters durch Benjamin Franklin

1780 Entdeckung der Berührungselektrizität durch Galvani

1826 Erfindung des Elektromagneten durch Sturgeon

1844 Inbetriebnahme der ersten neuzeitlichen Telegraphenverbindung zwischen Baltimore und Washington durch Samuel Morse

1846 Erfindung des elektrischen Zeigertelegraphen mit Selbstunterbrechung durch Werner v. Siemens

1847 Herstellung des ersten Telegraphenkabels durch Werner v. Siemens

1859 Erfindung des Akkumulators durch Planté (später verbessert durch Edison)

fernmeldelehrling.de

1861 Erfindung des Fernsprechers durch Philipp Reis, Verbesserung durch Anwendung des Dauermagneten durch Bell (1876) und durch Anwendung des Kohlemikrophons durch Hughes (1878)
1866 Erfindung der Dynamomaschine durch W. v. Siemens
1879 Inbetriebnahme der ersten deutschen elektrischen Schienenbahn durch W. v. Siemens
1897 Erfindung der Glühlampe durch Edison
1895 Alexander Popow benutzt als erster einen aufgespannten Draht als Antenne
1896 Einführung der drahtlosen Telegraphie durch Marconi (Funkentelegraphie)
1902 Einführung der drahtlosen Telephonie durch Collins
1923 Inbetriebnahme des ersten deutschen Rundfunksenders (Berlin)
1935 Erste Fernsehübertragung während der Deutschen Rundfunkausstellung in Berlin
1937 Beginn der Entwicklung von Relaisrechnern durch K. Zuse
1948 Erfindung des Transistors durch W. H. Brattain und I. Barden
1954 Umwandlung von Atomenergie in Elektrizität durch Rappaport
1956 Eröffnung des 90000-kW-Reaktors in England, des ersten Atomkraftwerks der Welt

II. Das Wesen der Elektrizität

1. Die Reibungselektrizität

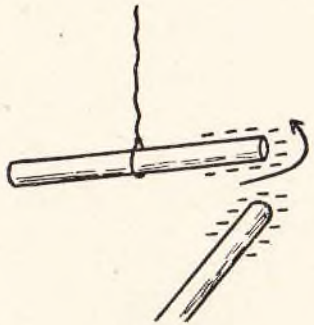
Wir reiben einen Hartgummistab mit einem Wolltuch (besser noch mit einem Katzenfell) und halten ihn über einige Papierschnitzel, die wir uns aus feinem Seidenpapier gefertigt haben. Die Papierschnitzel werden von dem Hartgummistab angezogen. Wir ersehen daraus, daß der Hartgummistab eine elektrische Veränderung erfahren hat.

Als nächstes lagern wir einen Hartgummistab, den wir zuvor kräftig mit einem Wolltuch gerieben haben, drehbar auf einer Spitze. Wir reiben einen zweiten Hartgummistab und nähern ihn dem einen Ende des ersten Stabes. Ist der zweite Stab nahe genug an den ersten herangeführt worden, so weicht der erste aus. Es muß also in beiden Stäben durch das Reiben eine elektrische **Ladung** hervorgerufen worden sein.
Wir merken uns:

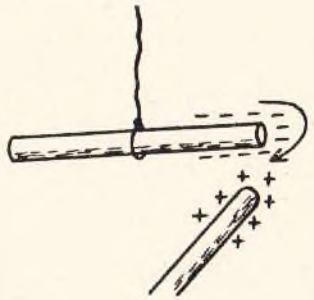
Die durch das Reiben auf den Hartgummistäben hervorgerufenen Ladungen stoßen sich ab.

Wir reiben nun einen Glasstab mit einem Tuch aus reiner Seide und stellen fest, daß wir auch mit diesem Stab Papierschnitzel anziehen können. Wiederholen wir den Versuch der Annäherung der Hartgummistäbe jetzt mit den Glasstäben. Wir reiben den ersten Stab und hängen ihn in der Mitte freischwebend auf, dann nähern wir ihm einen zweiten geriebenen Stab. Wir sehen, der erste Glasstab weicht dem zweiten aus (Abb. 1).

Die durch das Reiben auf den Glasstäben hervorgerufenen Ladungen stoßen sich ab.



(Abb. 1)



(Abb. 2)

Jetzt wollen wir einen Hartgummistab und einen Glasstab reiben. Wir nähern wie vorher den geriebenen Stab dem aufgehängten und stellen fest, daß dieser sich zu dem ihm genäherten hinwendet. Bewegen wir den genäherten Stab bei dem richtigen Abstand um den gelagerten herum, so folgt ihm der gelagerte nach (Abb. 2).

Die Ladungen des Hartgummistabes und die des Glasstabes ziehen sich an.

Wir haben gesehen, daß auf den beiden Hartgummistäben gleichnamige Ladungen entstanden, die einander abstoßen; bei den beiden Glasstäben war es das gleiche. Bei einem Hartgummistab und einem Glasstab jedoch entstanden ungleichnamige Ladungen, die einander anziehen. Daraus folgt das Grundgesetz der elektrischen Ladungen:

Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab. UngleichnamigeLadungen ziehen sich an.

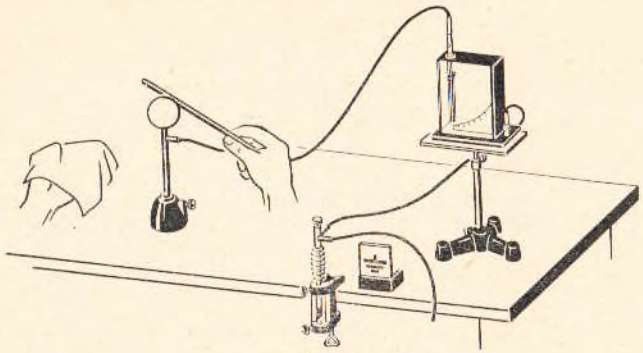
Wir wissen nun, daß die Ladungen der Hartgummistäbe und die der Glasstäbe verschiedenartig sind. Der Physiker Lichtenberg hat bereits 1777 den Satz aufgestellt:

Glaselektrizität ist positive Elektrizität, Gummielektrizität ist negative Elektrizität.

Die elektrische Ladung kann man mit einfachen Geräten (dem Elektroskop und dem Elektrometer) nachweisen; Abb. 3 zeigt den Nachweis einer Ladung.

fernmeldelehrling.de

„Reibungselektrizität“



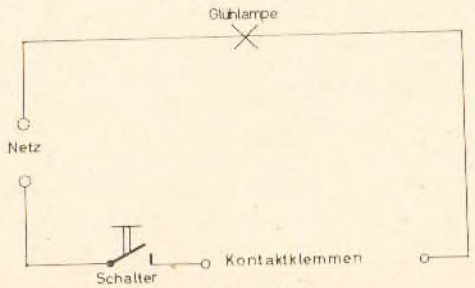
(Abb. 3)

mit Hilfe des Elektrometers.

2. Leiter und Nichtleiter

Wir wollen einige Werkstoffe auf ihre Eigenschaften als Träger der Elektrizität untersuchen. Zu diesem Zweck bauen wir uns eine Versuchsanordnung nach dem Schema der Abb. 4 auf. Bevor wir den Schalter schlie-

„Leiter und Nichtleiter“



(Abb. 4)

ßen, spannen wir zwischen die Kontaktklemmen einen Kupferdraht. Wenn der Schalter jetzt geschlossen wird, brennt die Lampe, weil die Elektrizität aus der Steckdose heraus über eine Leitung (einschließlich des Kupferdrahtes) zur Glühlampe geleitet wird. Auf diese Weise wollen wir auch noch andere Stoffe zwischen die Kontaktklemmen spannen. Dabei werden wir feststellen, daß z. B. Kupfer, Eisen, Aluminium, Silber, Kohle und sogar Wasser, die Elektrizität zur Glühlampe gelangen lassen, während andere Stoffe, wie z. B. Porzellan, Glas, Glimmer, Gummi, Papier, Kunststoffe und Luft, die Elektrizität nicht leiten.

Wir können demnach die Stoffe in zwei große Gruppen einteilen, nämlich in

Leiter und **Nichtleiter**

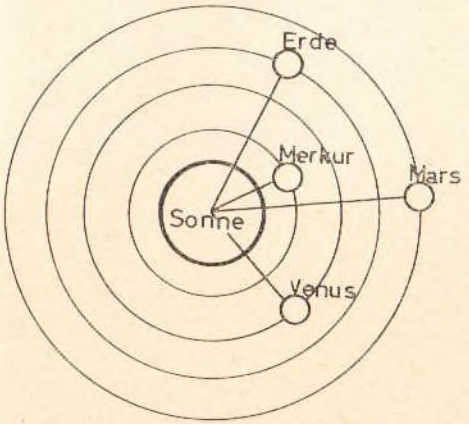
3. Atome und Elektronen

Im vorherigen Abschnitt haben wir festgestellt, daß es Stoffe gibt, die Elektrizität leiten, und andere, die das nicht tun. Da für alle untersuchten Stoffe die Versuchsbedingungen gleich waren, muß diese Eigenart in den Stoffen selbst zu suchen sein. Wir wollen uns deshalb mit dem **Aufbau der Stoffe** beschäftigen.

Nach früheren Erkenntnissen hielt man die **Atome** für die kleinsten Teilchen, aus denen alle Stoffe bestehen. Das Wort Atom kommt aus dem Griechischen (atomos) und heißt unteilbar. Stoffe, die aus nur einer einzigen Atomart aufgebaut sind, nennt man **Grundstoffe** oder **Elemente.** Zur Zeit sind 102 solcher Elemente bekannt.

Nach neuesten Forschungsergebnissen ist das Atom jedoch nicht das letzte Glied im Aufbau der Elemente. Das Atom ist ähnlich aufgebaut wie das Sonnensystem (Abb. 5). Während beim Sonnensystem die Planeten sich mit hoher Geschwindigkeit um die Sonne bewegen, so bewegen sich um den **Atomkern** kleinste Elektrizitätsteilchen, die **Elektronen.** So wie beim Sonnensystem die Planeten nicht von der Fliehkraft in das Weltall geschleudert, sondern von der Massenanziehungskraft der Sonne in ihrer Bahn gehalten werden, so werden auch die Elektronen durch bestimmte Kräfte in ihrer schalenförmig um den Kern liegenden Bahn gehalten. Diese Kräfte haben elektrische Eigenschaften. Es hat sich nämlich her-

„Sonnensystem“



(Abb. 5)

„Aufbau eines Wasserstoffatoms“

(Abb. 6)

fernmeldelehrling.de

ausgestellt, daß die Elektronen negativ und der Atomkern positiv geladen sind. So werden also die negativ geladenen Elektronen vom positiv geladenen Atomkern angezogen; der Fliehkraft wird das Gleichgewicht gehalten (Abb. 6). Die Zahl der um den Atomkern kreisenden Elektronen beträgt je nach Art des Stoffes 1 bis 102. Das Wasserstoffatom hat nur ein Elektron (Abb. 6), das Kupfer 29, das Silber 47, das Quecksilber 80 und das Nobelium 102. Wenn der Atomkern das Elektron anzieht, muß er eine gleichgroße, aber entgegengesetzte Ladung besitzen, mit der er die Fliehkraft aufhebt. Es muß also für jedes um einen Atomkern kreisende Elektron, das ja Träger einer negativen Ladungseinheit ist, eine positive Ladungseinheit im Kern vorhanden sein, beim Wasserstoff als 1, beim Kupfer 29, beim Silber 47, beim Quecksilber 80 und beim Nobelium 102 positive Kernladungseinheiten. Die Einheit der Kernladung bezeichnet man mit **Proton.** Jedes Atom hat also ebenso viele Protonen wie Elektronen. Die elektrischen Ladungen sind so im Gleichgewicht; das Atom wirkt nach außen hin neutral.

Die Elektrizität kann nicht erzeugt werden, sie ist in jedem Stoff vorhanden, als negative Ladungseinheit im Elektron und als positive Ladungseinheit im Atomkern.

Außer den Elektronen, die in einem Atomverband gebunden sind, haben alle Stoffe auch noch solche, die sich aus dem Verband lösen können. Diese **freien Elektronen** bewegen sich frei zwischen den Atomen und sind die Träger der Elektrizität. Die normalerweise sich neutral verhaltenden Stoffe zeigen erst dann elektrisches Verhalten, wenn ihre sich in ungeregelten Bewegungen befindlichen Elektronen durch einen äußeren Anstoß in eine bestimmte Richtung gelenkt werden (durch Reiben eines Hartgummistabes mit einem Wolltuch erfolgt Anreicherung mit Elektronen).

Im Abschnitt 2 haben wir die Stoffe in Leiter und Nichtleiter eingeteilt. Jetzt können wir ergänzend dazu feststellen, daß nur dann die Stoffe gute Leiter der Elektrizität sind, wenn in ihnen viele freie Elektronen bewegt werden können.

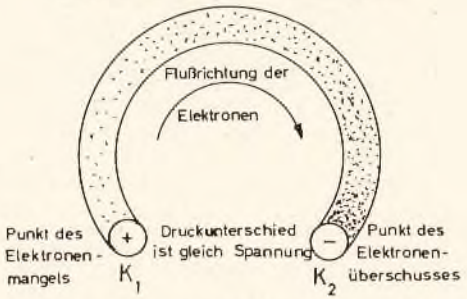
Sind in einem Stoff viele freie Elektronen vorhanden, so ist er ein guter Leiter; sind in einem Stoff wenig freie Elektronen vorhanden, so ist er ein schlechter Leiter.

4. Die Elektronenbewegung ist die Grundlage der elektrischen Vorgänge

a) Die Spannung

In dem Versuch nach Abb. 4 wurde die Elektrizität aus einer Steckdose zur Glühlampe geleitet. Wir wollen uns diesen Vorgang an Hand der Abb. 7 noch einmal vor Augen führen:

„Entstehen einer Spannung"



(Abb. 7)

Die Elektronen fließen von der Klemme K1 zur Klemme K2. Bei der Klemme K1 entsteht dadurch ein Elektronenmangel und bei der Klemme K2 ein Elektronenüberschuß. Weil sich bei der Klemme K2 die Elektronen gleicher Ladung zusammendrängen, entsteht dort ein **Druck**; bei der Klemme K1 jedoch entsteht durch das Abfließen der Elektronen eine Leere und somit ein Sog. Zwischen den Klemmen K1 und K2 herrscht ein Druckunterschied der Elektronen. Wie bei einer Wasserpumpe das Wasser hochgesogen und dann aus der Pumpenöffnung gedrückt wird, so werden auch die Elektronen angesogen und fortgedrückt. Die treibende Kraft, die die Elektronen fortbewegt, ist der Druckunterschied oder die **Spannung.**

Die Höhe der Spannung ist abhängig vom Druckunterschied zwischen dem Punkt des Elektronenmangels und dem Punkt des Elektronenüberschusses. Dabei ist der Punkt des Elektronenüberschusses der negative Pol und der Punkt des Elektronenmangels der positive Pol.

b) Der Strom

Ein elektrischer Strom fließt dann, wenn Punkte verschiedenen Elektronendrucks, also verschiedener Spannung, leitend miteinander verbunden werden. Die freien Elektronen fließen in einem Leiter in einer bestimmten Richtung. Man kann den elektrischen Strom mit einem Meßgerät messen. Die Größe des Stromes ist abhängig von der Anzahl der freien Elektronen, die in einer bestimmten Zeit durch das Meßgerät hindurchfließen.

Der elektrische Strom ist der gerichtete Fluß der freien Elektronen in einem Leiter.

c) Technische Stromrichtung und Elektronenrichtung

Wir wissen aus dem Abschnitt A I 4a, daß der Punkt des Elektronenüberschusses der Minuspol und der Punkt des Elektronenmangels der

fernmeldelehrling.de

Pluspol genannt wird. Tatsächlich strömen die Elektronen vom Minuspol zum Pluspol. Weil man aber von den Elektronen in den Anfängen der Elektrotechnik noch keine Kenntnis hatte, ließ man ganz willkürlich den Strom vom Pluspol zum Minuspol fließen. Weil sich diese Bezeichnung eingebürgert hatte und sich durch eine Umstellung in der Praxis nichts geändert hätte, hat man die alte Stromrichtungsbestimmung in der Technik bis heute beibehalten.

Die technische Stromrichtung geht von Plus nach Minus[1].

d) Der Widerstand

Wir wollen die Fortbewegung eines freien Elektrons mit dem Vorwärtsschreiten eines Fußgängers vergleichen: In einer Hauptverkehrsstraße wird unser Fußgänger wegen der Verkehrsdichte nur sehr langsam vorwärtskommen, seiner Eile wirkt ein Widerstand entgegen, er wird schnell ermüden; wählt unser Fußgänger seinen Weg durch eine Nebenstraße mit sehr geringer Verkehrsdichte, so wird sein Vorwärtskommen kaum gehemmt werden, er wird mit gleichbleibender Geschwindigkeit seinem Ziel zustreben.

Auch die freien Elektronen bewegen sich nicht in allen Leitern mit gleichbleibender Geschwindigkeit dahin (Versuch nach Abb. 4). Sie stoßen auf ihrem Weg oft mit Atomen zusammen, und zwar um so häufiger, je dichter die Atome beieinanderstehen. Beim Zusammenstoßen mit den Atomen wird die Geschwindigkeit der freien Elektronen abgebremst, es wird Energie frei in Form von Wärme (der Leiter wird warm). Wenn aber die Geschwindigkeit nachläßt und damit der gesamte Fluß der freien Elektronen verringert wird, so wird der elektrische Strom kleiner.

Ein Leiter mit dicht beieinanderstehenden Atomen wird dem Elektronenstrom einen größeren **Widerstand** entgegensetzen als ein Leiter mit weit auseinanderstehenden Atomen.

Außerdem ist der Elektronenfluß noch abhängig von der Anzahl der freien Elektronen in einem Leiter. Je mehr freie Elektronen in einem Leiter vorhanden sind, um so mehr können an der Elektronenbewegung teilnehmen, um so weniger wird der gesamte Fluß verringert und um so mehr Strom kann fließen.

Die Atomdichte eines Leiters und die Zahl seiner freien Elektronen bewirken seinen Widerstand.

[1]) Den Unterschied zwischen technischer Stromrichtung und Elektronenrichtung kann man sich mit Hilfe eines von Prof. Max Planck geprägten Vergleichs gut merken: „Der Strom fließt von + nach —. Die Elektronen bewegen sich wie die Fische dem Strom entgegen, also von — nach +."

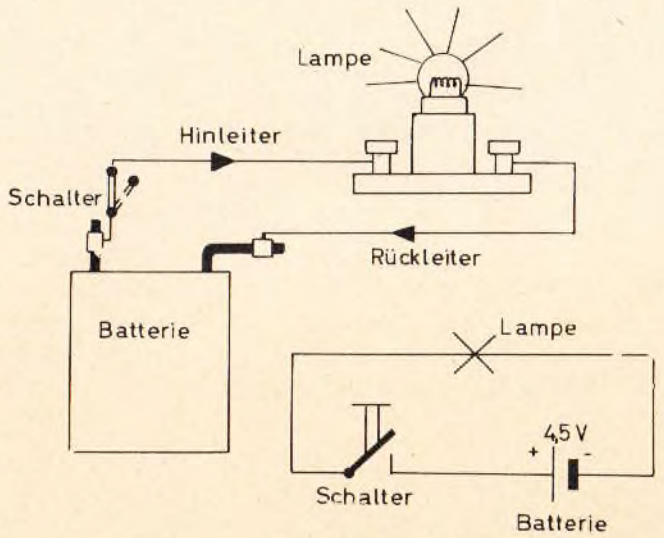
5. Übungsaufgaben

a) Erkläre die Bedeutung des Wortes „Elektrizität". b) Welcher Zusammenhang besteht zwischen den Begriffen positive und negative Elektrizität? c) Wie heißen die beiden Gruppen, in die sich alle Stoffe nach ihrem elektrischen Verhalten einteilen lassen? d) Wieso ist ein Atom nach außen hin elektrisch neutral? e) In welcher Weise bewegen sich die Elektronen um den Atomkern? f) Warum leitet ein Kupferdraht gut und die ihn umhüllende Isolationsschicht nicht? g) Warum ist die Spannung an einer Steckdose des Lichtnetzes wesentlich größer als die an den Polen einer Taschenlampenbatterie? h) Was muß erst vorhanden sein, bevor ein elektrischer Strom fließen kann? i) Was versteht man unter elektrischem Widerstand? k) Warum wird als Leiterstoff hauptsächlich Kupfer und nicht das viel billigere Eisen verwendet? l) Wie kommt es, daß sich Drähte bei Stromfluß bis zur Weißglut erwärmen?

B. Grundlagen der Gleichstromlehre

I. Der elektrische Stromkreis

Ein Versuch nach Abb. 8 läßt erkennen, daß in der Batterie eine Spannung erzeugt wird. Diese ist erforderlich, um die Elektronen durch die Leitung hindurch bis zur Lampe zu treiben. Der elektrische Strom fließt



(Abb. 8)

fernmeldelehrling.de

aber erst, wenn der Schalter geschlossen wird, denn dann erst wird die Lampe leuchten. Weil der Stromfluß seine Ursache in der in der Batterie erzeugten Spannung hat, nennt man diese Batterie auch **Spannungserzeuger.**

Wir erinnern uns vielleicht, daß unsere Taschenlampe nur noch ganz schwach brannte und wir eine neue Batterie holen mußten. Wir sehen also, daß eine Batterie nach einer gewissen Zeit keine Spannung mehr abgibt. Durch die Inbetriebsetzung der Lampe ist Spannung verbraucht worden; die Lampe ist also ein **Spannungsverbraucher.** Alle Geräte, die durch den elektrischen Strom in Betrieb genommen werden, sind also Spannungsverbraucher: Bügeleisen, Heizkissen, Tauchsieder, Rundfunk- und Fernsehempfänger, Motore usw.

Damit die Elektronen vom Spannungserzeuger über die Hinleitung zum Spannungsverbraucher und über die Rückleitung wieder zum Spannungserzeuger fließen können, muß der Schalter geschlossen werden (bei allen elektrischen Geräten muß ein Schalter betätigt werden). Dann kreisen die Elektronen ständig, und man spricht von einem **Stromkreis.**

Ein Stromkreis besteht also aus dem **Spannungserzeuger,** der **Leitung** und dem **Spannungsverbraucher.**

Wir sehen aus der Abb. 8, daß nur dann die Lampe leuchtet, wenn der Schalter geschlossen wird. Sobald er geöffnet wird, erlischt die Lampe: ein Zeichen dafür, daß kein Strom mehr fließt.

Nur in einem geschlossenen Stromkreis fließt elektrischer Strom.

Aus dem Abschnitt A II 4 wissen wir, daß nur Strom fließen kann, wenn als Ursache eine Spannung vorhanden ist. Außerdem wissen wir, daß dem Elektronenfluß durch die Leitung und durch den Spannungsverbraucher ein Widerstand entgegengesetzt wird. Wir finden also in jedem Stromkreis die drei Größen **Spannung – Strom – Widerstand.**

II. Die elektrischen Maßeinheiten

Damit man die in jedem Stromkreis vorherrschenden Verhältnisse berechnen kann, hat man für die Größen Spannung, Strom und Widerstand Kurzzeichen und Maßeinheiten geschaffen.

1. Die Maßeinheit der Stromstärke

Im Abschnitt A II 4b haben wir festgestellt, daß die Größe des Stromes abhängig ist von der Anzahl der freien Elektronen, die in einer bestimmten Zeit durch ein Meßgerät fließen. Diese Menge fließt aber auch an allen

Stellen eines geschlossenen Stromkreises. Diese Elektronenmenge nennt man **Elektrizitätsmenge** Q. Wie man eine bestimmte Wassermenge mit der Maßeinheit „1 Liter" bezeichnet, so hat man auch eine Maßeinheit für eine bestimmte Elektrizitätsmenge. Die Maßeinheit für die Elektrizitätsmenge ist das **Coulomb**[1]), es entspricht ungefähr einer Anzahl von $6{,}3 \cdot 10^{18}$ freien Elektronen.

Die Zeit, in welcher die Elektronen fließen, wird durch das Kurzzeichen t ausgedrückt und in Sekunden gemessen. Die Größe des Stromes nennt man die **Stromstärke** I und mißt sie in **Ampere**[2]), Kurzzeichen A.

Die Stromstärke ist die Elektrizitätsmenge, die in einer bestimmten Zeiteinheit durch einen Leiterquerschnitt hindurchfließt.

Die Stromstärke von 1 Ampere (A) ist dann vorhanden, wenn in einem Leiter in einer Sekunde die Elektrizitätsmenge 1 Coulomb fließt:

$$I = \frac{Q}{t}\ [\mathrm{A}]$$

Wir lösen die Formel $I = \frac{Q}{t}$ nach Q auf und erhalten:

$$Q = I \cdot t$$

Das Produkt $I \cdot t$ wird in Amperesekunden (As) angegeben. Eine **Amperesekunde** entspricht einem Coulomb, sie ist also ebenfalls ein Maß für die Elektrizitätsmenge Q.

Die Größe des elektrischen Stromes kann man auf chemischem Wege feststellen. Durch eine Silbernitratlösung wird ein Strom geschickt, der eine Ausscheidung reinen Silbers aus der Lösung bewirkt. Die Menge des ausgeschiedenen Silbers ist ein Maß für die Anzahl der fließenden Elektronen und damit auch ein Maß für die Stromstärke. Durch ein Reichsgesetz vom 1. Juni 1898 wurde festgelegt:

Ein Strom hat die Stromstärke von 1 Ampere, wenn er aus einer Silbernitratlösung in 1 Sekunde 1,118 mg Silber ausscheidet.

[1]) Coulomb = franz. Physiker (1736 bis 1806). Das Kurzzeichen für Coulomb ist C; es ist hier bewußt weggelassen worden, um Verwechslungen mit dem später noch auftretenden Begriff der Kapazität, die das gleiche Zeichen hat, zu vermeiden.

[2]) Ampere = franz. Physiker (1775 bis 1836).

fernmeldelehrling.de

Die Einheit 1 Ampere ist für die Starkstromtechnik u. U. zu klein und für die Fernmeldetechnik oft zu groß, man hat deshalb von ihr andere Maßgrößen abgeleitet:

So sind z. B. 1 Kiloampere = 1000 Ampere, 1 Milliampere = 1/1000 Ampere.

Für die Bezeichnung von Vielfachen und von Teilen von Maßeinheiten benutzt man die folgenden Vorsatzbezeichnungen:

T	Tera	$= 10^{12}$	= 1000000000000	= 1 Billion
G	Giga	$= 10^{9}$	= 1000000000	= 1 Milliarde
M	Mega	$= 10^{6}$	= 1000000	= 1 Million
k	Kilo	$= 10^{3}$	= 1000	= 1 Tausend
h	Hekto	$= 10^{2}$	= 100	= 1 Hundert
da	Deka	$= 10^{1}$	10	= Zehn
			1	= Eins
d	Dezi	$= 10^{-1}$	= 0,1	= 1 Zehntel
c	Zenti	$= 10^{-2}$	= 0,01	= 1 Hundertstel
m	Milli	$= 10^{-3}$	= 0,001	= 1 Tausendstel
µ[1])	Mikro	$= 10^{-6}$	= 0,000001	= 1 Millionstel
n	Nano	$= 10^{-9}$	= 0,000000001	= 1 Milliardstel
p	Piko	$= 10^{-12}$	= 0,000000000001	= 1 Billionstel

Zur Umrechnung einzelner Maßgrößen ist es vorteilhafter, sich der nachfolgenden Tabelle zu bedienen:

Benennung	Abk.	µA	mA	A	kA
Mikroampere	µA	1	0,001	0,000 001	0,000 000 001
Milliampere	mA	1 000	1	0,001	0,000 001
Ampere	A	1 000 000	1 000	1	0,001
Kiloampere	kA	1 000 000 000	1 000 000	1 000	1
bekannte Größe		Umrechnungsfaktor			

Beispiele zur Anwendung der Tabelle:

a) Wieviel mA sind 465 µA?
Wir suchen unter den bekannten Größen die µA heraus, es ist die erste Spalte von oben links außen. In dieser Spalte gehen wir nach rechts bis unter die Spalte mA. Dort finden wir den Umrechnungsfaktor 0,001. Die 465 µA sind also mit 0,001 malzunehmen: 0,001 · 465 = 0,465 mA.

b) Wieviel A sind 250 mA?
Wir finden in der zweiten Spalte von oben unter den Benennungen mA. Wenn wir jetzt nach rechts bis unter die Spalte A gehen, finden wir den Umrechnungsfaktor 0,001; 0,001 · 250 = 0,25 A.

[1]) µ (sprich my) ist ein griechischer Buchstabe.

2. Die Maßeinheit des Widerstandes

Das Quecksilber setzt den freien Elektronen immer den gleichen Widerstand entgegen, weil es in seinem Gefügeaufbau so gleichmäßig ist, daß die Atome stets denselben Abstand voneinander haben. Man hat deshalb das Quecksilber zur Festlegung für die Maßeinheit des Widerstandes ausersehen und am 1. Juni 1898 durch Reichsgesetz festgelegt:

Die Maßeinheit des Widerstandes ist der Widerstand einer Quecksilbersäule von 1 mm² Querschnitt und 106,3 cm Länge bei 0 °C. Diese Maßeinheit heißt Ohm[1]).

Die Abkürzung für Ohm ist der griechische Buchstabe Ω. Von der Maßeinheit 1 Ohm werden die Maßgrößen 1 Kiloohm (kΩ) = 1000 und 1 Megohm (MΩ) = 1 000 000 Ω abgeleitet.

3. Die Maßeinheit der Spannung

Aus den Einheiten für den Strom und den Widerstand kann nunmehr die Maßeinheit für die Spannung abgeleitet werden. Es ist eine ganz bestimmte Spannung erforderlich, um die Einheitsstromstärke von 1 Ampere durch den Einheitswiderstand von 1 Ohm hindurchzutreiben. Diese erforderliche Spannung ist ebenfalls als Maßeinheit gesetzlich festgelegt worden:

Die Maßeinheit der Spannung ist die Spannung, die durch einen Leiter von 1 Ohm Widerstand einen Strom von 1 Ampere treibt. Diese Maßeinheit heißt 1 Volt[2]).

Von der Maßeinheit 1 Volt sind die Maßgrößen abgeleitet: 1 Mikrovolt (µV) = 1/1000000 Volt, 1 Millivolt (mV) = 1/1000 Volt, 1 Kilovolt (kV) = 1000 Volt und 1 Megavolt (MV) = 1000000 Volt.

4. Übungsaufgaben

a) Stelle nach dem Muster der Tabelle für die Maßgrößen des Amperes Umrechnungstabellen für die Maßgrößen des Ohms und des Volts her.

b) Rechne um in A: 125467 µA; 725 mA; 0,36 kA;

c) Rechne um in Ω: 3,5 kΩ; 0,75 MΩ;

[1]) George Simon Ohm, deutscher Physiker (1787 bis 1845).

[2]) Volta, italienischer Physiker (1745 bis 1827).

fernmeldelehrling.de

d) Rechne um in kΩ: 36000 Ω; 0,8 MΩ;

e) Rechne um in μV: 9,3 mV; 0,000072 V;

f) Rechne um in mV: 15750 μV; 0,345 V;

g) Rechne um in V: 25500 mV; 0,85 kV; 0,097 mV.

III. Das Ohmsche Gesetz

Die drei festgelegten Maßeinheiten Ampere, Ohm und Volt geben uns die Möglichkeit, einen Stromkreis daraufhin zu untersuchen, in welchem Verhältnis Strom, Spannung und Widerstand zueinander stehen. Georg Simon Ohm fand heraus, daß zwischen den drei Größen eine Gesetzmäßigkeit besteht; das nach ihm benannte **Ohmsche Gesetz** lautet:

Der Strom I wird um so größer, je höher die Spannung und je kleiner der Widerstand sind.

In Buchstaben ausgedrückt lautet das Ohmsche Gesetz:

$$I = \frac{U}{R}\text{; Stromstärke} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Widerstand}}$$

Gilt für einen Stromkreis das Ohmsche Gesetz, so kann man von den drei Größen Stromstärke, Spannung und Widerstand die eine berechnen, wenn die anderen beiden bekannt sind.

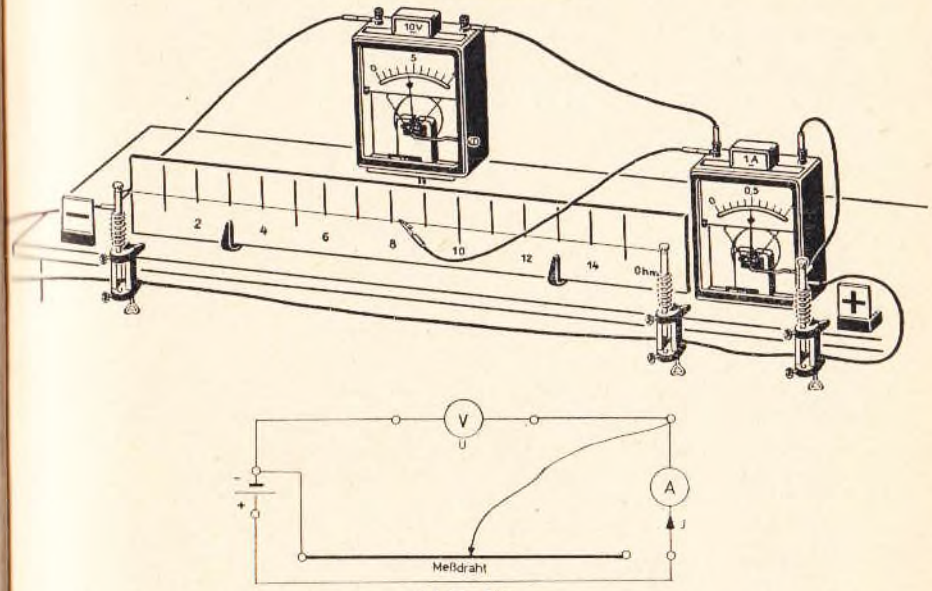
Daraus folgt:

Stromstärke = Spannung : Widerstand $\quad I = \frac{U}{R}$

Widerstand = Spannung : Stromstärke $\quad U = \frac{U}{I}$

Spannung = Stromstärke · Widerstand $\quad U = I \cdot R$

„Das Ohmsche Gesetz“



(Abb. 9)

Mit Hilfe der Versuchsanordnung nach Abb. 9 wollen wir die Richtigkeit des Ohmschen Gesetzes beweisen. Zunächst müssen wir den ausgespannten Widerstandsdraht eichen. Dazu führen wir die Krokodilklemme an dem Draht entlang und suchen die Stelle, an der der Quotient aus Stromstärke und Spannung = 1 ist. Diese Stelle wird mit einem Kreidestrich auf dem Brett markiert. Genauso suchen wir die Quotienten 2, 3, 4 usw. Die Quotienten sind unsere gesuchten Widerstandswerte; wir schreiben deshalb in die Reihen der Zahlen das Wort Ohm. Nun verdecken wir das Voltmeter und errechnen aus der am Instrument abzulesenden Stromstärke und dem am Brett feststellbaren Widerstand die Spannung.

Das Voltmeter haben wir vorher mit einem Tuch zugedeckt. Jetzt verdecken wir das Amperemeter und errechnen aus der am Voltmeter abzulesenden Spannung und dem durch die Krokodilklemme eingestellten Widerstandswert die Stromstärke. In beiden Fällen kontrollieren wir die Richtigkeit unserer Rechnung an den zunächst verdeckten Instrumenten.

1. Das Rechnen mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes

a) Das Umstellen der Formel

Aus der Algebra sollten wir die Rechenregeln für das Rechnen mit Gleichungen mit einer Unbekannten kennen. Zur Auffrischung unseres Gedächtnisses wollen wir hier jedoch das Umstellen der Formel für das Ohmsche Gesetz kurz erläutern:

fernmeldelehrling.de

Die Grundformel heißt: $I = \frac{U}{R}$

Wir wollen jetzt die Gleichung nach U auflösen, also $U = ?$

Zu diesem Zweck multiplizieren wir beide Seiten der Gleichung mit R:

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

Nun können wir auf der rechten Seite das R kürzen:

$$R \cdot I = \frac{U \cdot \cancel{R}}{\cancel{R}}$$

und wir erhalten

$$R \cdot I = U$$

oder nach Umstellung

$$U = I \cdot R$$

Jetzt wollen wir die Gleichung nach R auflösen, also $R = ?$

Wir verfahren zunächst genau wie bei der Auflösung nach U, bis zu der Zwischengleichung $R \cdot I = U$

Nun dividieren wir beide Seiten der Gleichung durch I

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

Wir kürzen auf der linken Seite das I

$$\frac{R \cdot \cancel{I}}{\cancel{I}} = \frac{U}{I}$$

und erhalten

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

b) Berechnen der Stromstärke I

1. Beispiel:

Ein Widerstand von 6 Ω liegt an einer Spannung von 12 V. Wie groß ist der Strom, der ihn durchfließt?

Gegeben: $U = 12\ \mathrm{V}$ $R = 6\ \Omega$

Gesucht: I

Lösung: $I = \frac{U}{R} = \frac{12}{6} = 2\ \mathrm{A}$

2. Beispiel:

In einem geschlossenen Stromkreis hat die Spannungsquelle eine Spannung von 60 V. In diesem Stromkreis liegt ein Widerstand von 300 Ω. Wie groß ist der Strom?

Gegeben: $U = 60\ \mathrm{V}$ $R = 300\ \Omega$

Gesucht: I

Lösung: $I = \frac{U}{R} = \frac{60}{300} = 0{,}2\ \mathrm{A} = 200\ \mathrm{mA}$

3. Beispiel:

An einer Spannungsquelle von 24 V liegt ein Widerstand von 3200 Ω. Wie groß ist die Stromstärke in diesem Stromkreis?

Gegeben: $U = 24\ \mathrm{V}$ $R = 3200\ \Omega$

Gesucht: I

Lösung: $I = \frac{U}{R} = \frac{24}{3200} = 0{,}0075\ \mathrm{A} = 7{,}5\ \mathrm{mA}$

c) Berechnen der Spannung U

1. Beispiel:

Durch einen Widerstand von 6 Ω fließt ein Strom von 2 A. Wie groß ist die Spannung?

Gegeben: $R = 6\ \Omega$ $I = 2\ \mathrm{A}$

Gesucht: U

Lösung: nach 1 a ist $U = I \cdot R$. Also $U = 2 \cdot 6 = 12\ \mathrm{V}$

2. Beispiel:

In einem Stromkreis, dessen Widerstand 200 Ω beträgt, fließt ein Strom von 30 mA. Wie groß ist die Spannung?

Gegeben: $R = 200\ \Omega$ $I = 0{,}03\ \mathrm{A}$

Gesucht: U

Lösung: $U = I \cdot R = 0{,}03 \cdot 200 = 6\ \mathrm{V}$

d) Berechnen des Widerstandes R

1. Beispiel:

In einem Stromkreis fließt bei einer Spannung von 220 V ein Strom von 4 A. Wie groß ist der Widerstand?

Gegeben: $U = 220\ \mathrm{V}$ $I = 4\ \mathrm{A}$

Gesucht: R

Lösung: Nach 1 a ist $R = \frac{U}{I}$, also $R = \frac{220}{4} = 55\ \Omega$

fernmeldelehrling.de

2. Beispiel:

Ein Widerstand nimmt bei einer Spannung von 15 V eine Stromstärke von 0,25 A auf. Wie groß ist der Widerstand?

Gegeben: $U = 15\ \text{V}$ $I = 0{,}25\ \text{A}$

Gesucht: R

Lösung: $R = \frac{I}{I} = \frac{15}{0{,}25} = 60\ \Omega$

3. Beispiel:

In einem geschlossenen Stromkreis begrenzt ein Widerstand bei einer Spannung von 24 V den Strom auf 8 mA. Wie groß ist der Widerstand?

Gegeben: $U = 24\ \text{V}$ $I = 0{,}008\ \text{A}$

Gesucht: R

Lösung: $R = \frac{U}{I} = \frac{24}{0{,}008} = 3000\ \Omega$

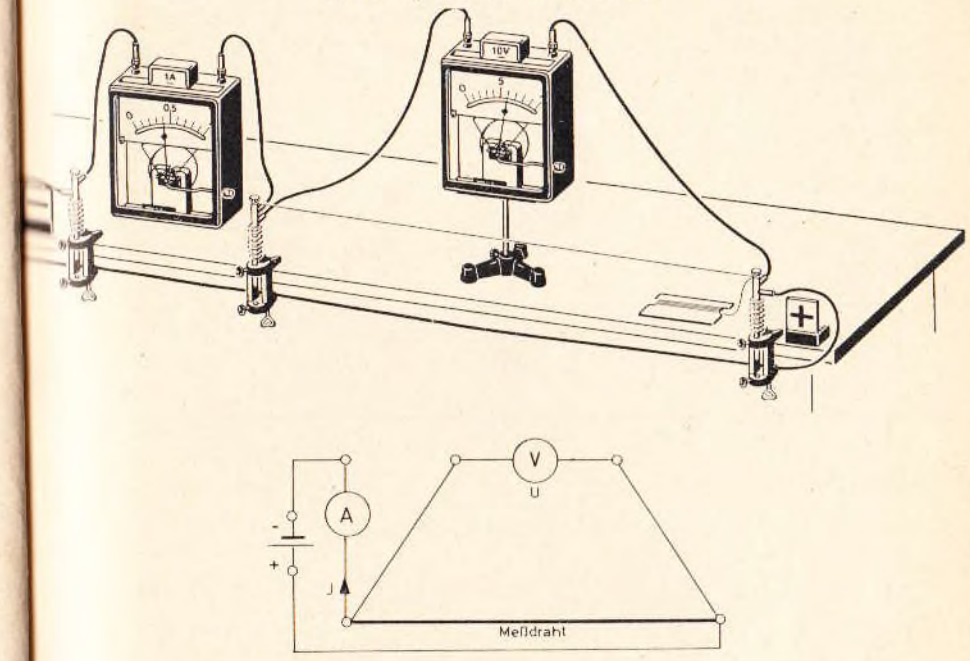
2. Übungsaufgaben

a) Welches sind die drei Maßeinheiten, die in einer bestimmten Beziehung zueinander stehen? **b)** Wie heißt das Ohmsche Gesetz? **c)** Wie groß ist die Stromstärke in einem Stromkreis, in dem eine Spannung von 36 Volt wirksam ist und dessen Widerstand 250 Ohm beträgt? **d)** In einem Stromkreis wird die Spannung von 24 auf 30 Volt erhöht, wobei der eingeschaltete Widerstand von 2,4 Ohm gleich bleibt. Wie verändert sich die Stromstärke? **e)** Wie groß ist die Spannung, die in einem Stromkreis, dessen Widerstand 42 Ohm beträgt, eine Stromstärke von 1,6 Ampere fließen läßt? **f)** Welche Spannungserhöhung verursacht die Änderung der Stromstärke von 0,6 auf 0,75 Ampere in einem Stromkreis, dessen Widerstand unveränderlich 20 Ohm beträgt? **g)** Bei einer Spannung von 48 Volt herrscht eine Stromstärke von 1,5 Ampere vor. Wie groß ist der in den Stromkreis geschaltete Widerstand? **h)** Welche Änderung muß der Widerstandswert erfahren, wenn er bei einer Spannung von 6 Volt die Stromstärke von 0,8 Ampere auf 480 Milliampere absinken lassen soll? **i)** Eine Taschenlampenbirne hat auf ihrem Sockel den Aufdruck 3,5 V/0,2 A. Wie groß ist ihr Widerstand?

IV. Der Widerstand

Das Ohmsche Gesetz hat uns gezeigt, daß die Stromstärke und die Spannung vom Widerstand abhängen. Durch den Widerstand kann man also die Werte für die beiden Größen bestimmen. Wir wollen uns deshalb etwas genauer mit dem Widerstand beschäftigen.

1. Der spezifische Widerstand



(Abb. 10)

Wir wollen uns einen Stromkreis nach Abb. 10 schalten, wobei wir in den Stromkreis Drähte gleicher Länge aber verschiedenen Materials und gleicher Stärke zwischen zwei Kontakte klemmen. Aus den Werten, die wir an den Instrumenten ablesen, können wir den Widerstand der einzelnen Drähte errechnen. Unter der Voraussetzung, daß alle Drähte 1 m lang sind und einen Durchmesser von 0,2 mm haben, werden wir feststellen, daß folgende Werte am Strom- und am Spannungsmesser angezeigt werden:

bei einem Kupferdraht:

$I = 3{,}5\ \text{A}$ $U = 2\ \text{V}$ nach dem Ohmschen Gesetz $R = 0{,}57\ \Omega$

bei einem Aluminiumdraht:

$I = 2{,}3\ \text{A}$ $U = 2\ \text{V}$ nach dem Ohmschen Gesetz $R = 0{,}91\ \Omega$

bei einem Eisendraht:

$I = 0{,}48\ \text{A}$ $U = 2\ \text{V}$ nach dem Ohmschen Gesetz $R = 4{,}15\ \Omega$

fernmeldelehrling.de

Wir sehen, daß die Werte für die Stromstärke bei gleichbleibender Spannung für die drei untersuchten Drähte verschieden sind. Die nach dem Ohmschen Gesetz errechneten Widerstände der einzelnen Drähte weichen erheblich voneinander ab. Die Ursache hierfür ist nur in der Art des Werkstoffs zu suchen.

Der Widerstand eines Leiters ist von seinem Werkstoff abhängig.

Diese Erkenntnis haben wir bereits im Abschnitt A II 2 bei der Betrachtung der Leiter und Nichtleiter gewonnen. Hier nun haben wir den Beweis. Jeder Werkstoff hat also einen Eigenwiderstand, der für ihn „spezifisch" ist.

Als spezifischen Widerstand bezeichnet man den Widerstand eines Leiters von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt bei einer Temperatur von 20 °C.

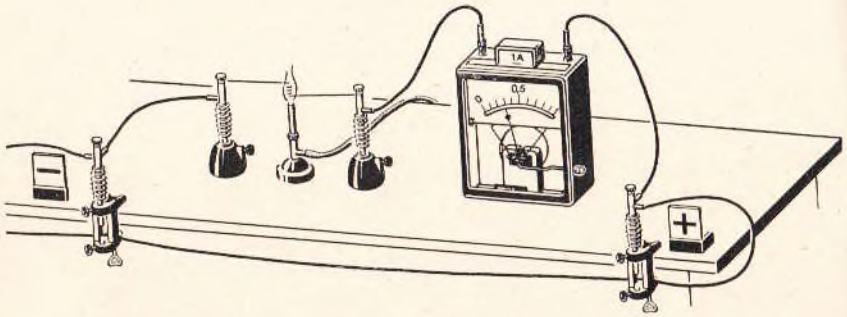
Der spezifische Widerstand wird mit dem griechischen Buchstaben ϱ (rho) bezeichnet.

Je besser der Werkstoff leitet, desto kleiner ist sein spezifischer Widerstand.

Die spezifischen Widerstände der wichtigsten Leiter haben folgende Werte:

Silber	=	0,016
Kupfer	=	0,017 – 0,018
Bronze	=	0,021
Aluminium	=	0,029
Eisen	=	0,13

2. Widerstand und Temperatur



(Abb. 11)

Die Widerstände aller metallischen Leiter nehmen mit steigender Temperatur zu und mit fallender Temperatur wieder ab. In der Versuchsschaltung nach Abb. 11 haben wir einen Eisendraht von etwa 50 cm Länge in der Mitte zu einer Locke gewickelt und in einen Stromkreis geschaltet. Das Amperemeter zeigt einen Strom von etwa 1 A. Erwärmen wir jetzt die Eisendrahtlocke mit Hilfe eines Bunsenbrenners, so geht der Ausschlag des Amperemeters zurück. Wir sehen also, wie sich die Temperatur auf einen Widerstand auswirkt; denn das Zurückgehen des Zeigers bedeutet, daß nach dem Ohmschen Gesetz

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

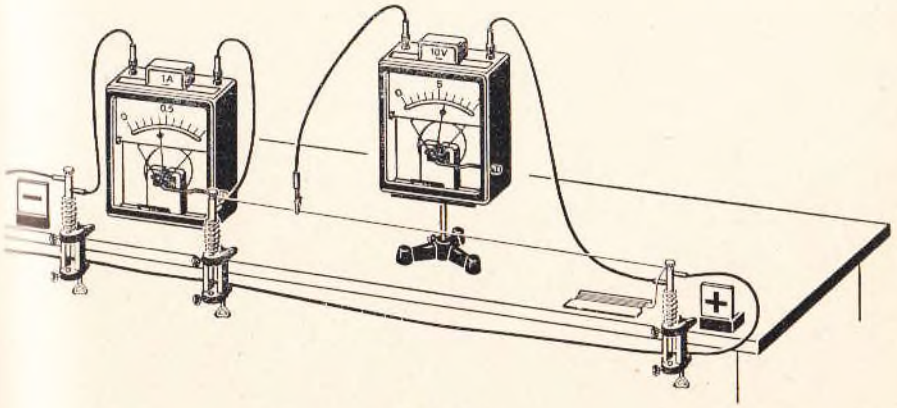
bei steigendem Widerstandswert der Wert für die Stromstärke geringer wird.

Es sei hier schon darauf hingewiesen, daß die vom Strom selbst erzeugte Wärme entscheidenden Einfluß auf die Temperatur eines Leiters hat.

3. Die Berechnung des Leiterwiderstandes

Wir haben uns bereits bei der Besprechung des spezifischen Widerstandes gemerkt, daß der Widerstand eines Leiters von der Werkstoffart oder besser von dem spezifischen Widerstand des Werkstoffes abhängig ist.

Wir bauen unseren Versuch nach der Abb. 10 noch einmal auf. Wir nehmen jedoch dahingehend eine Änderung vor, daß wir diesmal einen Konstantandraht gleichen Querschnitts nehmen, dessen Länge wir aber von Fall zu Fall verändern. Zweckmäßigerweise wird die Spannung auf 8 bis 10 V erhöht, dadurch erhält man gut ablesbare Stromwerte.



(Abb. 10)

fernmeldelehrling.de

Wenn wir den Konstantandraht auf 1 m Länge einspannen, erhalten wir einen bestimmten Stromstärkewert. Wir verlängern nun den Draht auf 1,5 m; 2 m und 2,5 m. Jedesmal wenn wir den Stromstärkewert ablesen, stellen wir fest, daß er geringer geworden ist. Das heißt also nach dem Ohmschen Gesetz $(I = \frac{U}{R})$,

daß der Widerstand größer geworden sein muß.

Der Widerstand wächst mit der Länge des Leiters.

Wir wiederholen den Versuch noch einmal, wollen aber jetzt drei Konstantandrähte von je 1 m Länge nehmen, deren Querschnitte[1]) jedoch verschieden sein sollen. Wir wollen Drähte mit den Durchmessern 0,2; 0,3 und 0,4 mm verwenden, dementsprechend sind nach der Fußnote die Querschnitte 0,0314; 0,0706 und 0,1256 mm². Beim Ablesen der jeweiligen Stromstärkewerte erkennen wir, daß bei größerem Querschnitt auch der Stromstärkewert größer ist. Nach dem Ohmschen Gesetz

$$(I = \frac{U}{R})$$

muß also der Widerstand geringer geworden sein.

Der Widerstand eines Leiters sinkt mit wachsendem Querschnitt.

Die Erkenntnisse über den vom Werkstoff, von der Leiterlänge und vom Leiterquerschnitt abhängigen Widerstand führen zu dem Gesetz:

Der Widerstand eines Leiters ist abhängig vom spezifischen Widerstand, von der Länge des Drahtes und von dessen Querschnitt.

Zur Berechnung des Leiterwiderstandes dient die Formel

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

Die Bezeichnung für ρ ist unwesentlich, solange l in m und A in mm² eingesetzt werden; R ergibt sich dann immer in Ω.

Grundsätzlich gilt:

a) Je größer der spezifische Widerstand, um so größer ist der Leiterwiderstand.

[1]) Der Querschnitt eines runden Drahtes wird nach der Formel für die Flächenberechnung des Kreises errechnet:

$$A = r^2 \cdot \pi$$

A ist also der Querschnitt, r ist der Halbmesser des Kreises (Radius) und π ist eine konstante Größe, deren Wert 3,14 beträgt. Die Hochzahl 2 gibt an, daß r mit sich selbst malgenommen werden muß ($r \cdot r$). Hat ein Draht einen Durchmesser von 0,2 mm, dann ist sein Radius $r = 0{,}1$ mm und der Querschnitt $A = r^2 \cdot \pi = 0{,}1 \cdot 0{,}1 \cdot 3{,}14 = 0{,}0314$ mm².

b) Je länger der Draht, um so größer ist der Leiterwiderstand.

c) Je kleiner der Querschnitt, um so größer ist der Leiterwiderstand.

1. Beispiel:

Ein Widerstand besteht aus 80 m Nickelindraht von 2 mm² Querschnitt. Wie groß ist sein Widerstand?

Gegeben: $\rho = 0{,}43 \quad l = 80$ m $\quad A = 2$ mm²

Gesucht: R

Lösung: $R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{0{,}43 \cdot 80}{2} = 17{,}2\ \Omega$

2. Beispiel:

Wie groß ist der Widerstand eines Kupferdrahtes von 350 m Länge und einem Durchmesser von 3 mm?

Gegeben: $\rho = 0{,}017 \quad l = 350$ m $\quad d = 3$ mm

Gesucht: R

Lösung: Berechnung von A

$A = r^2 \cdot \pi = 1{,}5 \cdot 1{,}5 \cdot 3{,}14$

$A = 7{,}065$ mm²

Berechnung von R

$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{0{,}017 \cdot 350}{7{,}065} = \frac{5{,}95}{7{,}065} = 0{,}84\ \Omega$

3. Beispiel:

Zur Herstellung eines Widerstandes von 100 Ω soll ein Draht mit einem Querschnitt von $A = 0{,}25$ mm² und einem spezifischen Widerstand $\rho = 0{,}5$ verwendet werden. Wie lang muß der Draht sein?

Gegeben: $R = 100\ \Omega \quad A = 0{,}25$ mm² $\quad \rho = 0{,}5$

Gesucht: l

Lösung: aus der Grundformel $R = \frac{\rho \cdot l}{A}$ errechnen ir durch Umstellung

$l = \frac{R \cdot A}{\rho}$ und erhalten $l = \frac{100 \cdot 0{,}25}{0{,}5} = 50$ m

4. Beispiel:

Wie groß ist der spezifische Widerstand eines Aluminiumdrahtes von 30 m Länge und 4 mm Durchmesser, dessen Widerstand 0,0697 Ω beträgt?

Gegeben: $l = 30$ m $\quad d = 4$ mm $\quad R = 0{,}0697\ \Omega$

Gesucht: ρ

Lösung: Berechnung von A

$A = r^2 \cdot \pi = 2 \cdot 2 \cdot 3{,}14 = 12{,}56$ mm²

Berechnung von ρ

aus der Grundformel $R = \frac{\rho \cdot l}{A}$ errechnen wir durch Umstellung

$\rho = \frac{A \cdot R}{l}$ und erhalten $\rho = \frac{12{,}56 \cdot 0{,}0697}{30} = 0{,}029$

fernmeldelehrling.de

5. Beispiel:

Ein Aluminiumdraht hat einen Widerstand von 3,5 Ω. Seine Länge beträgt 379 m. Wie groß ist der Durchmesser des Drahtes?

Gegeben: $\varrho = 0{,}029 \qquad l = 379\ \text{m} \qquad R = 3{,}5\ \Omega$

Gesucht: d

Lösung: Um d ausrechnen zu können, benötigen wir den Wert für A. Aus der Grundformel

$$R = \frac{\varrho \cdot l}{A}$$ errechnen wir durch Umstellung

$$A = \frac{\varrho \cdot l}{R}$$ und erhalten

$$A = \frac{0{,}029 \cdot 379}{3{,}5} = 3{,}14\ \text{mm}^2$$

Wir haben gelernt, daß der Querschnitt des Drahtes sich errechnet zu $A = r^2 \cdot \pi$. Aus dieser Formel errechnen wir durch Umstellung

$$r^2 = \frac{A}{\pi}\ .$$

Um r zu bekommen, müssen wir die Wurzel ziehen[1]) und erhalten

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{3{,}14}{3{,}14}} = \sqrt{1} = 1\ \text{mm}$$

Wir sollen jedoch den Durchmesser und nicht den Radius errechnen, also müssen wir, da $d = 2 \cdot r$ ist, den Radius mit 2 malnehmen und erhalten

$d = 2 \cdot r = 2 \cdot 1 = 2$ mm

4. Der Isolationswiderstand

Eine besondere Rolle spielt in der Fernmeldetechnik der **Isolationswiderstand.** Hierunter versteht man den Widerstand, den die **Isolation eines Leiters** gegen Erde oder gegen einen benachbarten Leiter hat. Der Isolationswiderstand soll möglichst groß sein, damit möglichst wenig elektrische Energie verloren geht. Der Energieverlust tritt auf durch Ableitung zur Erde oder Ableitung zum benachbarten Draht. Der Energieverlust tritt hauptsächlich in der Kabeltechnik auf, weil ja das Kabel selbst in der Erde liegt und weil im Kabel die Entfernung von Ader zu Ader sehr gering ist.

Zur Isolierung werden natürlich Werkstoffe benutzt, die Nichtleiter sind. Sie haben einen sehr hohen spezifischen Widerstand und leiten deshalb die elektrische Energie nicht, sie isolieren also.

Der Idealfall, daß nämlich der Isolationswiderstand einer Leitung gleich unendlich ist, kann – bedingt durch die verschiedenen Eigenschaften der Isolierstoffe – nicht erreicht werden. Es sind deshalb zur Sicherung des Fernmeldebetriebs **Mindestisolationswerte je km Doppelleitung** sowohl für Freileitungen als auch für Kabel festgelegt worden, z. B.

[1]) Siehe Band B 1 des Handbuchs für den Fernmeldehandwerker.

0,3 MΩ bei Freileitungen bei ungünstiger Witterung, bei trockenem Wetter mehrere Ω.
5000 MΩ bei Orts- und Bezirkskabeln.
10000 bis 50000 MΩ bei Fernkabeln.

Der Isolationswiderstand einer Leitung nimmt mit wachsender Leitungslänge ab. Deshalb muß man den Wert für 1 km (Tabellenwert) durch die gesamte Leitungslänge teilen, um den Isolationswiderstand der gesamten Leitung zu errechnen.

Beispiel:

Wie groß ist der Isolationswiderstand einer Freileitung von 50 km Länge, wenn der kilometrische Isolationswiderstand 2 M Ω beträgt?

2 M Ω sind 2 Millionen Ohm, also:
2000000 : 50 = 40000 Ω = 40 k Ω

5. Übungsaufgaben

a) Von welchen Größen ist der Ohmsche Widerstand einer Leitung abhängig? b) Was ist spezifischer Widerstand? c) Wie verhält sich ein Widerstand bei steigender Temperatur? d) Welcher Leitungswiderstand ist höher, der einer 1,5 mm Bronzeleitung oder der einer 2 mm Eisenleitung? e) Wie lang ist eine Fernsprechdoppelleitung aus 3 mm Hartkupfer, wenn ihr Widerstand 120,3 Ω beträgt? f) Wie groß ist der Querschnitt eines Eisendrahtes von 0,8 km Länge und einem Widerstand von 14,72 Ω? g) Welchen Widerstand besitzt eine 4 m lange Meßschnur aus Kupferlitze bei einem Querschnitt von 0,8 mm²? h) Um wieviel Prozent ändert sich der Widerstand einer Wicklung, wenn anstatt Kupferdraht von 0,25 mm Durchmesser ein solcher von 0,2 mm Durchmesser verwendet wird? i) Ein Widerstand, der bei 8 A Stromdurchgang die Spannung 12 V verbraucht, soll aus Konstantandraht ($\varrho = 0{,}5$) von 1,2 mm Durchmesser hergestellt werden. Welche Drahtlänge ist erforderlich? k) Welchen mittleren Windungsdurchmesser hat eine Kupferspule von 2000 Windungen, wenn ihr Widerstand 32 Ω beträgt und der Drahtdurchmesser 0,3 mm ist? l) Ein Widerstand von 15 Ω soll aus 47,5 m Neusilberdraht ($\varrho = 0{,}3$) hergestellt werden. Welcher Drahtdurchmesser ist zu wählen? m) Zwei nebeneinander geschaltete Heizwiderstände aus gleichem Material nehmen bei gleicher Drahtlänge 3,9 A bzw. 1,6 A auf. Wie groß ist der Durchmesser des schwächeren Drahtes, wenn der stärkere einen Durchmesser von 0,7 mm hat? n) Eine Heizspirale aus einem 1,6 mm starken und 32 m langen Draht nimmt beim Anschluß an 127 V die Stromstärke 26,5 A auf. Wie groß ist der spezifische Widerstand des verwendeten Materials? o) Welches Widerstandsmaterial wird man zur Herstellung eines Widerstandes von 12 Ω wählen, wenn der Wicklungskörper zwischen 30 m und 32 m Draht aufnehmen kann und ein Drahtdurchmesser von 1,2 mm am günstigsten ist?

V. Leitfähigkeit und Leitwert

1. Die Leitfähigkeit

Wir haben bereits festgestellt, daß Kupfer einen spezifischen Widerstand von $\varrho = 0{,}017$ bis 0,018 hat. Das bedeutet, daß der Kupferdraht, der

fernmeldelehrling.de

diesen Widerstand hat, 1 m lang sein und einen Querschnitt von 1 mm² haben muß. Wie lang müßte wohl der Draht sein, wenn er bei gleichem Querschnitt einen Widerstand von 1 Ω haben soll?

Wir gehen von unserer Formel für den Leiterwiderstand aus:

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

Da A jedoch gleich bleiben soll, also gleich 1 mm² bleibt, ergibt sich $R = \rho \cdot l$; durch Umstellung erhalten wir

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

Wir haben gefragt, wie lang der Draht sein muß für $R = 1\ \Omega$. Damit haben wir auch gleich die Lösung für l; wenn wir nämlich $R = 1$ setzen, erhalten wir:

$$l = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{0{,}01785} = 56 \text{ m}$$

Bei einem Widerstand von 1 Ω ist also der Kupferdraht 56 m lang. Auf die gleiche Weise kann man auch die Länge anderer Drähte errechnen. So haben z. B. für jeweils 1 Ω und bei einem Querschnitt von 1 mm² Aluminiumdraht eine Länge von 35 m, Eisendraht eine Länge von 7,7 m und Konstantandraht eine Länge von etwa 2 m.

Wir sehen also, daß die Drähte um so länger sind, je besser ihr Werkstoff den elektrischen Strom leitet. Demnach ist die errechnete Länge ein Maß für die **Leitfähigkeit** eines Leiters. Man bezeichnet sie mit dem griechischen Buchstaben ϰ (kappa).

Wir haben ϰ errechnet, indem wir den Querschnitt 1 mm² durch den spezifischen Widerstand der einzelnen Stoffe geteilt haben, also ist die Formel für die Leitfähigkeit:

$$\boxed{\varkappa = \frac{1}{\rho}}$$

umgekehrt jedoch ist der spezifische Widerstand:

$$\boxed{\rho = \frac{1}{\varkappa}}$$

Setzt man in die Formel $R = \frac{\rho \cdot l}{A}$

statt ρ die Bezeichnung für die Leitfähigkeit

$$\rho = \frac{1}{\varkappa}$$

ein, so ergibt sich:

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

oder anders geschrieben

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

$$R = \frac{1}{\varkappa} \cdot \frac{l}{A} = \frac{l}{\varkappa \cdot A}$$

Man kann also mit beiden Formeln

$$\boxed{R = \frac{\rho \cdot l}{A}} \text{ und } \boxed{R = \frac{l}{\varkappa \cdot A}}$$

den Widerstand eines Drahtes oder einer Leitung berechnen, je nachdem, ob der **spezifische Widerstand** oder die **Leitfähigkeit** gegeben ist.

1. Beispiel:
Welchen Widerstand muß ein Kupferdraht von 300 m Länge und 3 mm Durchmesser haben?

Gegeben: $l = 300$ m $\varkappa = 56$ $d = 3$ mm
Gesucht: R
Lösung: Berechnung von A
$A = r^2 \cdot \pi = 1{,}5 \cdot 1{,}5 \cdot 3{,}14 = 7{,}065$ mm²
Berechnung von R
$R = \frac{l}{\varkappa \cdot A} = \frac{300}{56 \cdot 7{,}065} = 0{,}76\ \Omega$

2. Beispiel:
Welchen Querschnitt hat ein Eisendraht von 0,5 km Länge bei einem Widerstand von 14,72 Ohm?

Gegeben: $l = 500$ m $\varkappa = 7{,}7$ $R = 14{,}72\ \Omega$
Gesucht: A
Lösung: Aus der Grundformel
$R = \frac{l}{\varkappa \cdot A}$ erhalten wir durch Umstellung
$A = \frac{l}{\varkappa \cdot R}$ und setzen ein
$A = \frac{500}{7{,}7 \cdot 14{,}72} =$ etwa 4,4 mm²

2. Der Leitwert

Wir haben festgestellt, daß die **Leitfähigkeit** der umgekehrte Wert des spezifischen Widerstandes ist. Unter **Leitwert** versteht man den umgekehrten Wert des Widerstandes. Der Leitwert hat die Bezeichnung G:

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

fernmeldelehrling.de

Die Einheit des Leitwertes ist das Siemens (S). Sie wird nach dem deutschen Erfinder Werner von Siemens in Siemens benannt:

$$1\ \mathrm{S} = \frac{1}{1\ \Omega}$$

Aus der obenstehenden Formel kann man auch den Widerstand errechnen, indem man sie nach R auflöst:

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

1. Beispiel:
Der Widerstand eines Leiters beträgt 10 Ω, wie groß ist sein Leitwert?

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{10} = 0{,}1\ \mathrm{S}$$

2. Beispiel:
Hat ein Leiter einen Leitwert von 0,000 3 Siemens, so ist sein Widerstand:

$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{0{,}000\,3} = 3333\ \Omega$$

3. Übungsaufgaben

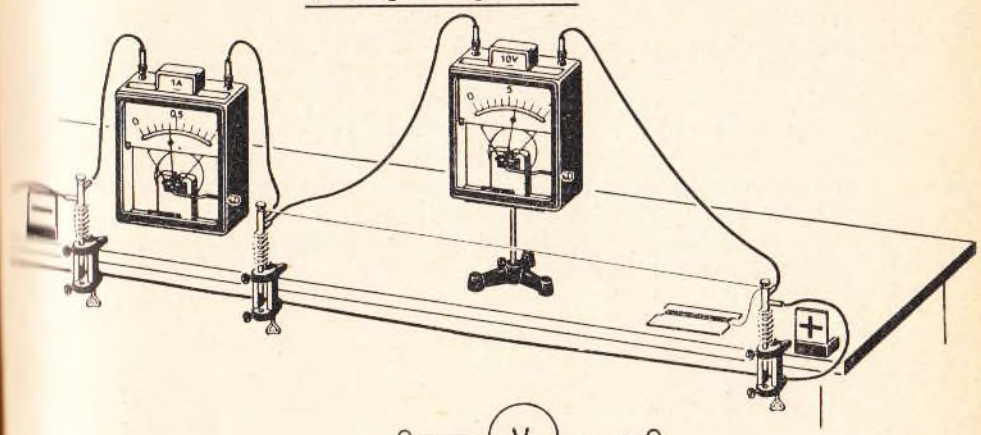
a) Welchen Widerstand hat eine Spule von 0,4 mm Kupferdraht, wenn sie 800 Windungen und einen mittleren Windungsdurchmesser von 50 mm hat? **b)** Welche Länge kann ein Kupferdraht vom gleichen Querschnitt wie ein 150 m langer Aluminiumdraht erhalten, ohne daß sein Widerstand größer wird als derjenige des Aluminiumdrahtes? **c)** Ein Vorwiderstand aus Eisendraht von 61,2 m Länge vernichtet bei der Stromstärke 0,8 A eine Spannung von 40 V. Welchen Durchmesser muß der Draht haben? **d)** Eine Kupferspule von 800 Windungen hat einen mittleren Durchmesser von 50 mm, sie hat einen Widerstand von etwa 46 Ω. Welcher Drahtdurchmesser muß gewählt werden? **e)** Eine 6 m lange Widerstandsspirale hat einen Durchmesser von 10 mm und einen Widerstand von 20 Ω. Auf je 100 mm Länge der Spirale werden 25 Windungen gezählt; der Drahtdurchmesser beträgt 1,8 mm. Wie groß ist die Leitfähigkeit des Materials?

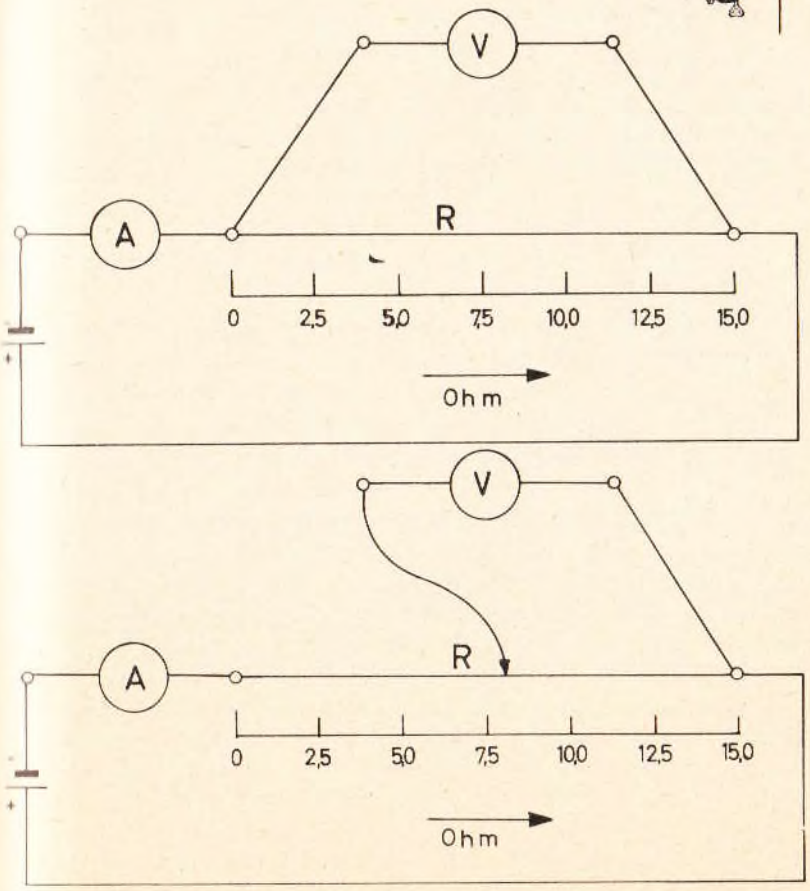
VI. Der Spannungsabfall

Wir wählen einen Versuchsaufbau nach Abb. 12. Der Widerstandsdraht soll einen Widerstand von 15 Ω haben; als Spannung wählen wir 6 V. Auf der Tischplatte teilen wir die Strecke des Widerstandsdrahtes in 6 gleiche Teile ein (0 – 2,5 – 5,0 – 7,5 – 10,0 – 12,5 – 15,0 Ω). Nach Einschalten der Spannungsquelle haben wir einen geschlossenen Stromkreis, in dem ein Strom von $I = \frac{U}{R} = \frac{6}{15} = 0{,}4\ \mathrm{A}$

fließt. Jetzt stecken wir in die eine Anschlußklemme des Voltmeters eine Schnur, an derem anderen Ende eine Krokodilklemme befestigt ist; das andere Ende des Voltmeters bleibt fest mit dem Pluspol verbunden. Mit

„Der Spannungsabfall"





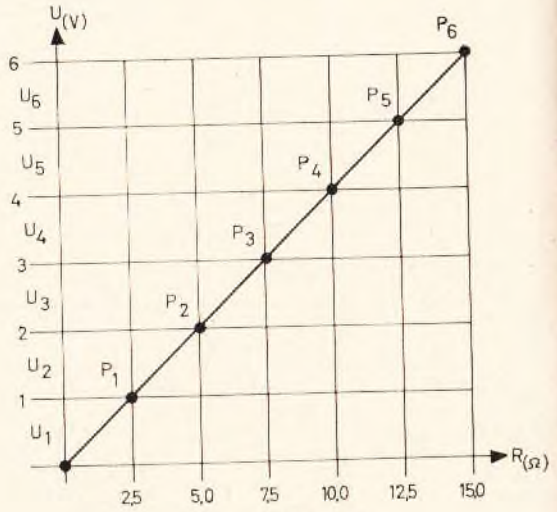
(Abb. 12)

fernmeldelehrling.de

Hilfe der Krokodilklemme schalten wir den Spannungsmesser nacheinander an die auf der Tischplatte markierten Punkte des Widerstandsdrahtes an. Wir sehen dabei, daß die Spannung bei gleichbleibender Stromstärke von 0 bis 6 V ansteigt. Die abgelesenen Werte tragen wir in eine Tabelle ein (Abb. 13). Wir erkennen, daß die Spannung bei dem Widerstandswert $R = 15\ \Omega$ den größten Wert hat, nämlich 6 V. Nun tragen wir die Werte der Tabelle in ein Diagramm ein (Abb. 14). Auf der senkrechten Linie tragen wir die Spannungswerte und auf der waagerechten Linie die Widerstandswerte ein. Wir erhalten dann die Punkte 1 bis 6. Wenn wir jetzt die Punkte alle miteinander verbinden, erhalten wir die Kurve des Spannungsabfalls.

R	U
Ω	V
15,0	6
12,5	5
10,0	4
7,5	3
5,0	2
2,5	1
0	0

(Abb. 13)



(Abb. 14)

Wir sehen aus dieser Kurve, daß die Spannung von ihrem Höchstwert (6 V) über dem Widerstand 15 Ω gleichmäßig bis zum Punkt Null abfällt. Das ist natürlich, denn nach dem Ohmschen Gesetz ist $U = I \cdot R$, d. h., bei gleichbleibender Stromstärke ist also die Spannung vom Widerstand abhängig; wenn $R = 0$ ist, muß auch $U = 0$ sein; wenn R seinen Höchstwert erreicht hat, muß auch U den Höchstwert erreicht haben.

Wenn wir uns vorstellen, daß alle elektrischen Geräte letzten Endes nichts anderes als Nutzwiderstände sind, so wird uns auch der Ausdruck „Nutzspannung" klar. Das ist nämlich die Spannung, die durch die Geräte verbraucht wird, die über dem Nutzwiderstand abfällt.

Während man durch die Nutzspannung einen Nutzen hat, ist dies anders mit der Spannung, die in den Leitungen verbraucht wird. Unser Versuch

zeigt, daß am Widerstand der Leitung ebenfalls Spannung verlorengeht. Auch hier wird Elektronenenergie bei der Überwindung des Leitungswiderstandes in Wärme umgesetzt. Das geschieht aber ungewollt. Man kann diese Tatsache jedoch als einen Verlust in Rechnung stellen. Der Leitungswiderstand ist deshalb ein Verlustwiderstand, und der an ihm auftretende Spannungsabfall ist ein Spannungsverlust.

Die von der Spannungsquelle gelieferte Spannung wird auf ihrem Wege zum Verbraucher durch den Leitungswiderstand geschwächt, und zwar um den entstehenden Spannungsabfall. Die an den Klemmen des Verbrauchers gemessene Spannung wird immer um den Spannungsverlust (Spannungsabfall) kleiner sein als die von der Spannungsquelle gelieferte Spannung.

Der Spannungsverlust wächst mit dem Strom I und dem Widerstand R der Leitung.

In Abwandlung des Ohmschen Gesetzes würde die Formel lauten:

$$U_v = I \cdot R_{Ltg}$$

Wir wollen die Spannungsabfälle zwischen den einzelnen Widerstandspunkten in Abb. 14 etwas näher untersuchen. Zwischen den einzelnen Punkten besteht jeweils ein Spannungsabfall von 1 Volt. Die Summe der Spannungsabfälle über den Teilwiderständen (von 0 bis Punkt 6) ergibt die Spannung der Spannungsquelle:

$$U = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + u_5 + u_6$$

und da die Spannungsabfälle alle gleich groß sind, ist

$$U = 6 \text{ mal } 1 \text{ Volt} = 6 \text{ Volt}.$$

Wenn wir jetzt unseren in 6 gleiche Teile geteilten Widerstandsdraht als Hintereinanderschaltung (siehe Abschnitt VII unter 1.) betrachten, so gilt der **2. Kirchhoffsche Satz:**

Bei einer Hintereinanderschaltung ist die Gesamtspannung gleich der Summe der Teilspannungen.

Beispiel:
Eine Lichterkette aus 11 Lampen soll an die Netzspannung von 220 Volt angeschlossen werden. Alle Lampen haben den gleichen Widerstandswert. Wie groß ist der Spannungsabfall an jeder Lampe?

Gegeben: 11 Lampen, $U = 220$ V

Gesucht: u_1 bis u_{11}

Lösung: Nach dem 2. Kirchhoffschen Satz ist

$$U = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + u_5 + u_6 + u_7 + u_8 + u_9 + u_{10} + u_{11}$$

Da alle Lampen gleiche Widerstandswerte haben, ist U = 11 mal u_1 und demnach

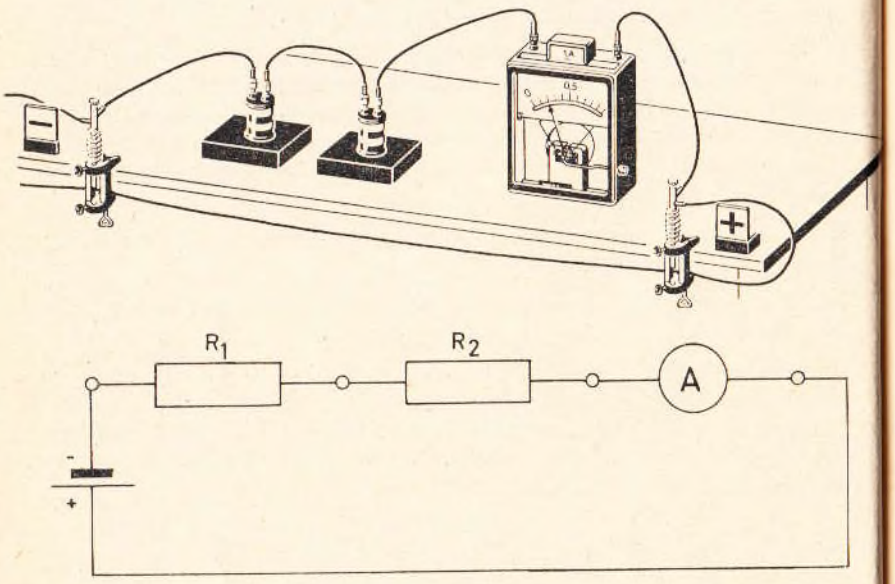
$$u_1 = \frac{U}{11} = \frac{220}{11} = 20 \text{ V}$$

An jeder Lampe werden also 20 Volt Nutzspannung verbraucht.

fernmeldelehrling.de

VII. Die Schaltung von Widerständen

1. Die Reihenschaltung



(Abb. 15)

Die Versuchsanordnung nach Abb. 15 soll die Frage klären, wie sich Spannung, Strom und Widerstand in einem Stromkreis verhalten, wenn mehrere Widerstände **in Reihe,** d. h. **einer hinter den anderen** geschaltet sind.

Wir schalten einen Festwiderstand (R 1) von 10 Ohm mit einem Strommesser in Reihe. Am Strommesser lesen wir den Wert 0,6 A ab. Dann wechseln wir den Widerstand von 10 Ohm (R 1) gegen einen solchen von 20 Ohm (R 2) aus. Wir stellen fest, daß das Amperemeter nur den halben Ausschlag anzeigt, nämlich 0,3 A. Wenn wir nun beide Widerstände hintereinander in den Stromkreis einschalten, so wird unser Instrument nur noch 0,2 A anzeigen.

Da wir wissen, daß bei gleichbleibender Spannung der Strom vom Widerstand abhängig ist, können wir aus den Versuchen schließen, daß bei einer Hintereinanderschaltung (Reihenschaltung) der Gesamtwiderstand größer ist als der größere der beiden Einzelwiderstände.

Wir können das soeben Gesagte mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes beweisen: Bei allen Versuchen betrug die Spannung 6 Volt, die Größen der Widerstände sind bekannt, wir errechnen also I:

$$\text{Fall 1: } I = \frac{U}{R_1} = \frac{6}{10} = 0{,}6\ \text{A}$$

$$\text{Fall 2: } I = \frac{U}{R_2} \quad \frac{6}{20} = 0{,}3\ \text{A}$$

$$\text{Fall 3: } I = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{U}{10 + 20} = \frac{6}{30} = 0{,}2\ \text{A}$$

Hiernach ist das nachfolgende Gesetz leicht zu begreifen:

Bei einer Hintereinanderschaltung (Reihenschaltung) von Widerständen ist der Gesamtwiderstand gleich der Summe der Einzelwiderstände (Teilwiderstände).

In einer Formel ausgedrückt heißt das:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots$$

1. **Beispiel:**

Drei Widerstände von 45, 83 und 127 Ω sind in Reihe zu schalten. Wie groß ist der Gesamtwiderstand?

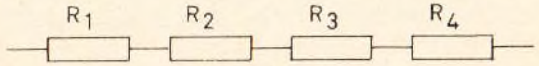
Gegeben: $R_1 = 45\,\Omega,\ R_2 = 83\,\Omega,\ R_3 = 127\,\Omega$

Gesucht: R

Lösung: $R = R_1 + R_2 + R_3 = 45 + 83 + 127 = 255\,\Omega$

2. **Beispiel:**

Wie groß ist der Gesamtwiderstand der Anordnung nach Abb. 16?



(Abb. 16)

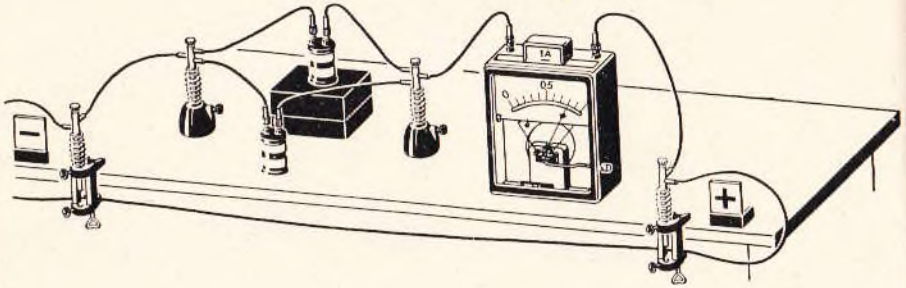
Gegeben: $R_1 = 25\,\Omega,\ R_2 = 35\,\Omega,\ R_3 = 70\,\Omega,\ R_4 = 15\,\Omega$

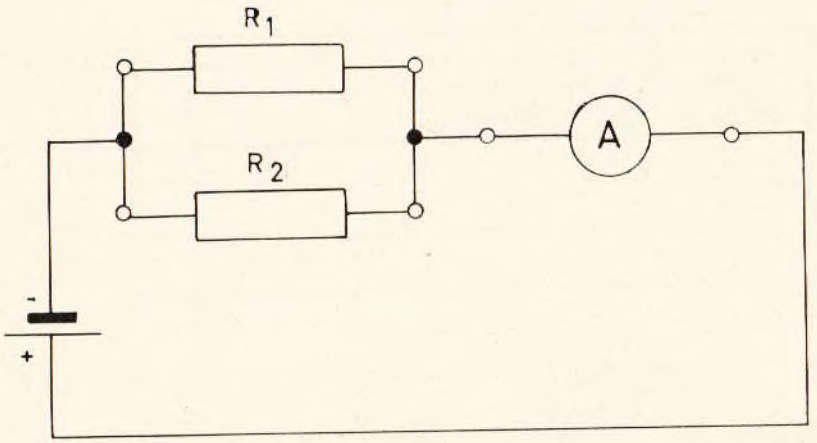
Gesucht: R

Lösung: $R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$
$= 25 + 35 + 70 + 15 = 145\,\Omega$

fernmeldelehrling.de

2. Die Nebeneinanderschaltung





(Abb. 17)

Bei der Parallel- oder Nebeneinanderschaltung werden alle Anfänge und alle Enden der Widerstände zusammengeschaltet und dann in einen Stromkreis geschaltet. Der Unterschied gegenüber der Reihenschaltung besteht darin, daß dem Strom bei der Reihenschaltung nur ein Weg vorgeschrieben war, während er bei der Nebeneinanderschaltung mehrere Wege vorfindet.

Wir wollen unseren Versuch nach Abb. 17 aufbauen. Zunächst wollen wir den Festwiderstand von 20 Ohm allein in den Stromkreis schalten. Wir werden dann genau wie im Fall 2 der Reihenschaltung am Strommesser den Wert von 0,3 A ablesen. Als nächstes schalten wir den Festwiderstand von 10 Ohm allein in den Stromkreis; wir lesen an unserem Instrument den Wert von 0,6 A ab. Dann werden die beiden Widerstände in der

oben beschriebenen Art, nämlich alle Anfänge und alle Enden zusammengefaßt, in den Stromkreis geschaltet. Der Strommesser wird jetzt einen Wert von etwa 0,9 A anzeigen.

Da die Spannung in allen drei Fällen konstant 6 V betrug, war also auch hier der Widerstand für den Strom bestimmend. Wir können also aus dem Versuch schließen, daß bei einer Nebeneinanderschaltung der Gesamtwiderstand kleiner ist als der kleinere der beiden Einzelwiderstände.

Das Ohmsche Gesetz allein kann uns hier keine Aufklärung geben. Es kommen noch andere Gesetzmäßigkeiten dazu, auf die wir später eingehen werden. Zunächst ist für die Nebeneinanderschaltung von Widerständen wichtig:

Bei einer Nebeneinanderschaltung ist der Gesamtwiderstand stets kleiner als der kleinste Einzelwiderstand.

Außerdem müssen wir uns merken, daß bei einer Nebeneinanderschaltung der Gesamtleitwert (siehe Seite 33) gleich der Summe der Einzelleitwerte ist. Wenn wir uns diesen Satz einprägen, werden wir bei der Anwendung der Formel für die Berechnung parallelgeschalteter Widerstände keine Schwierigkeiten haben, denn da $G = \frac{1}{R}$ ist, muß der Gesamtwiderstand bei einer Nebeneinanderschaltung sein:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \dots$$

Sofern wir nur zwei Widerstände wie in unserem Versuch nebeneinandergeschaltet haben, läßt sich die Formel vereinfachen. Wir wollen den Gesamtwiderstand unserer Versuchsanordnung berechnen.

Zunächst ist nach der Grundformel

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{20} + \frac{1}{10}$$

Wir suchen den Hauptnenner und erhalten:

$$\frac{1}{R} = \frac{10}{20 \cdot 10} + \frac{20}{10 \cdot 20} = \frac{10}{200} + \frac{20}{200} = \frac{30}{200} = \frac{3}{20}$$

fernmeldelehrling.de

Wenn wir statt der Ziffern die Kurzzeichen verwenden, ergibt sich folgende Rechnung:

$$\frac{1}{R} = \frac{R_2}{R_1 \cdot R_2} + \frac{R_1}{R_2 \cdot R_1} \text{ oder nach Umstellung}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2}$$

Wenn wir nun R haben wollen, müssen wir auf beiden Seiten der Gleichung Zähler und Nenner vertauschen:

$$\frac{R}{1} = \frac{20}{3} = 6{,}7; \qquad \frac{R}{1} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Die Formel für die Berechnung zweier parallelgeschalteter Widerstände ist also

$$\boxed{R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}}$$

oder in Worten ausgedrückt:

Der Gesamtwiderstand ist gleich dem Produkt der Einzelwiderstände geteilt durch deren Summe.

Sind nur gleichgroße Widerstände nebeneinandergeschaltet, so heißt das, daß $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ usw. ist. Für unsere Grundformel ergibt sich daraus:

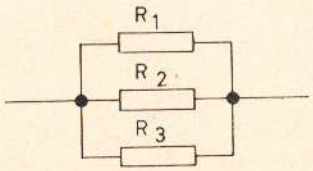
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} = \frac{4}{R_1}$$

Tauschen wir nun Zähler und Nenner auf beiden Seiten gegeneinander aus, so erhalten wir $R = \frac{R_1}{4}$ oder wenn es sich um p gleiche Einzelwiderstände handelt

$$\boxed{R = \frac{R_1}{p}}$$

1. Beispiel:

Wie groß ist der gesamte Widerstand der Anordnung nach Abb. 18?



(Abb. 18)

Gegeben: $R_1 = 75\,\Omega$, $R_2 = 50\,\Omega$, $R_3 = 100\,\Omega$

Gesucht: R

Lösung: Nach unserer Formel ist

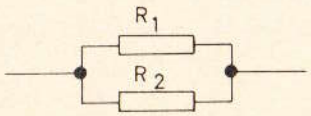
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{75} + \frac{1}{50} + \frac{1}{100} = \frac{4+6+3}{300} = \frac{13}{300}$$

Wir vertauschen auf beiden Seiten der Gleichung Zähler und Nenner und erhalten:

$$\frac{R}{1} = \frac{300}{13}; \text{ oder besser } R = \frac{300}{13} = 23{,}076\,\Omega$$

2. Beispiel:

Wie groß ist der Gesamtwiderstand der Anordnung nach Abb. 19?



(Abb. 19)

Gegeben: $R_1 = 60\,\Omega$, $R_2 = 75\,\Omega$

Gesucht: R

Lösung: Nach unserer Formel ist

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{60 \cdot 75}{60 + 75} = \frac{4500}{135} = 33{,}33\,\Omega$$

3. Beispiel:

Fünf Widerstände zu je $20\,\Omega$ sind parallelgeschaltet. Wie groß ist der gesamte Widerstand?

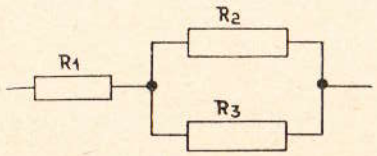
Nach der Formel ist $R = \frac{R_1}{p}$;

wir haben es hier mit 5 gleich großen Einzelwiderständen zu tun, also ist $p = 5$. Die 5 setzten wir also in die Formel ein und erhalten

$$R = \frac{20}{5} = 4\,\Omega$$

3. Die Gruppenschaltung

Der in der Praxis am meisten vorkommende Fall von Widerstandsschaltungen ist die Gruppenschaltung. Hierbei sind in einem Stromkreis Widerstände sowohl in Reihe als auch nebeneinandergeschaltet (Abb. 20).



(Abb. 20)

fernmeldelehrling.de

In der Abb. 20 ist der Widerstand R_1 mit den nebeneinandergeschalteten Widerständen R_2 und R_3 in Reihe geschaltet.

Wenn wir den gesamten Widerstand der Schaltung errechnen wollen, müssen wir zunächst den Widerstand errechnen, den R_2 und R_3 zusammen ergeben. R_2 und R_3 aber sind nebeneinandergeschaltet, und wir können hier die Formel

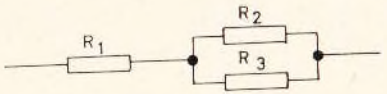
$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

anwenden. Den Widerstand, den wir aus der Rechnung erhalten, wollen wir den Ersatzwiderstand nennen und ihn mit den Indizes der zusammengefaßten Widerstände bezeichnen:

$R_{2,3} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$; dieser Ersatzwiderstand $R_{2,3}$ ist in Reihe geschaltet mit dem Widerstand R_1. Der gesamte Widerstand ist also $R = R_1 + R_{2,3}$

1. Beispiel:

Der Gesamtwiderstand der Anordnung nach Abb. 21 ist zu errechnen!



(Abb. 21)

Gegeben: $R_1 = 150\,\Omega$, $R_2 = 70\,\Omega$, $R_3 = 200\,\Omega$

Gesucht: R

Lösung: Wir errechnen zuerst den Ersatzwiderstand $R_{2,3}$:

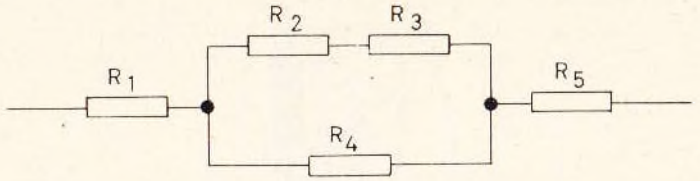
$$R_{2,3} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{70 \cdot 200}{70 + 200} = \frac{1400}{270} = 51{,}85\,\Omega$$

Der Ersatzwiderstand ist mit dem Widerstand R_1 in Reihe geschaltet, so ist also der Gesamtwiderstand der Anordnung

$$R = R_1 + R_{2,3} = 150 + 51{,}85 = 201{,}85\,\Omega$$

2. Beispiel:

Zu einem Relais mit zwei hintereinandergeschalteten Wicklungen von $R_2 = 600\,\Omega$ und $R_3 = 800\,\Omega$ liegt ein Widerstand von $R_4 = 1200\,\Omega$ parallel. Vor dieser Anordnung liegt ein Widerstand von $R_1 = 180\,\Omega$, und hinter die Anordnung ist ein Widerstand von $R_5 = 60\,\Omega$ geschaltet (Abb. 22). Wie groß ist der Gesamtwiderstand?



(Abb. 22)

Gegeben: $R_1 = 180\,\Omega$, $R_2 = 600\,\Omega$, $R_3 = 800\,\Omega$, $R_4 = 1200\,\Omega$, $R_5 = 60\,\Omega$

Gesucht: R

Lösung: Wir errechnen zunächst wieder den Ersatzwiderstand $R_{2,3,4}$ für die Parallelschaltung. Dabei ist jedoch zu beachten, daß R_2 und R_3 hintereinandergeschaltet sind. Diese beiden Widerstände müssen also erst zusammengezählt werden, bevor wir mit der Berechnung von $R_{2,3,4}$ beginnen können.

$$R_2 + R_3 = 600 + 800 = 1400\,\Omega$$

$$R_{2,3,4} = \frac{1400 \cdot 1200}{1400 + 1200} = \frac{1\,680\,000}{2600} = 646{,}15\,\Omega$$

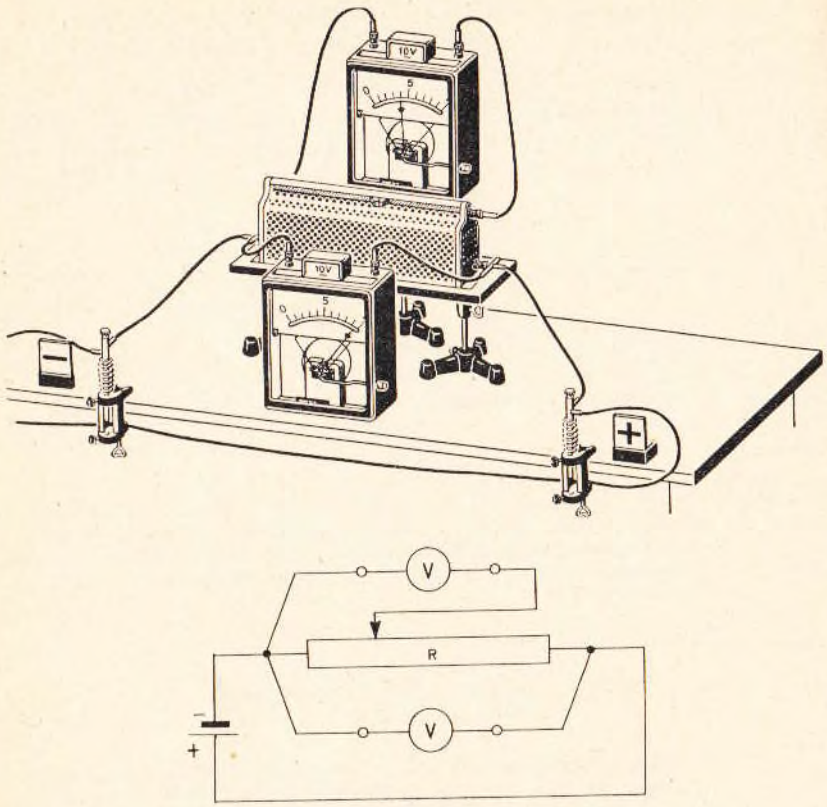
Nunmehr haben wir es nur noch mit einer glatten Hintereinanderschaltung von R_1, $R_{2,3,4}$ und R_5 zu tun. Der gesamte Widerstand der Anordnung nach Abb. 22 ist also

$$R = R_1 + R_{2,3,4} + R_5 = 180 + 646{,}15 + 60 = 886{,}15\,\Omega$$

4. Die Spannungsteilerschaltung

Aus Abb. 14 können wir ersehen, daß sich die Klemmenspannung (von der Spannungsquelle gelieferte Spannung) aufteilt in Teilspannungen, die jeweils über den entsprechenden Teilwiderständen abgegriffen werden können. Der Versuchsaufbau nach Abb. 23 soll uns diese Tatsache verdeutlichen.

fernmeldelehrling.de



(Abb. 23)

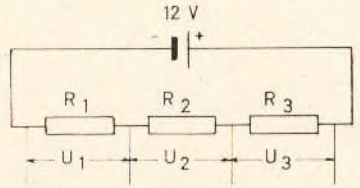
Ein Schiebewiderstand ist in einen Stromkreis geschaltet. Parallel zum Widerstand ist ein Voltmeter gelegt. Ein zweites Voltmeter liegt mit seiner einen Klemme am Widerstandsbeginn und mit der zweiten Klemme am Schieber des Widerstandes. Wir wollen jetzt den Schieber ganz nach links schieben. Unser erstes Instrument wird die Klemmenspannung von 10 V anzeigen, das zweite jedoch keinen Ausschlag zeigen. Wir schieben den Schieber langsam von links nach rechts. Das zweite Voltmeter wird entsprechend der Schieberstellung stetig ansteigen, während das erste Voltmeter konstant 10 V anzeigt. Man kann also mit dieser Schaltung eine Klemmenspannung in jeder gewünschten Weise unterteilen, wie der Name **Spannungsteiler** aussagt.

Wenn wir die Spannung über den jeweiligen Teilen des Schiebewiderstandes errechnen wollen, müssen wir uns auch hier des Ohmschen Gesetzes

bedienen, denn die Spannung über dem Teilwiderstand ist nichts anderes als ein Spannungsabfall. Natürlich kann man Teilstücke eines Schiebewiderstandes auch als Einzelwiderstände betrachten.

1. Beispiel:

Drei Einzelwiderstände sind nach Abb. 24 in einen geschlossenen Stromkreis geschaltet, an dem eine Spannung von 12 V liegt. Wie hoch sind die Spannungen über den einzelnen Widerständen, und wie hoch ist die Spannung über dem Gesamtwiderstand?



(Abb. 24)

Gegeben: $R_1 = 10\,\Omega$, $R_2 = 6\,\Omega$, $R_3 = 20\,\Omega$, $U = 12$ V

Gesucht: U_1, U_2, U_3 und U

Lösung: Als erstes müssen wir den Strom berechnen, der im Stromkreis fließt. Wir bedienen uns des Ohmschen Gesetzes, wobei berücksichtigt werden muß, daß für U die Klemmenspannung und für R der Gesamtwiderstand der Anordnung einzusetzen sind:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{10 + 6 + 20} = \frac{12}{36} = 0{,}33 \text{ A}$$

Nach dem Ohmschen Gesetz können wir nun die Spannungsabfälle über den Einzelwiderständen errechnen:

$U_1 = I \cdot R_1 = 0{,}33 \cdot 10 = 3{,}3$ V

$U_2 = I \cdot R_2 = 0{,}33 \cdot 6 = 1{,}98$ V

$U_3 = I \cdot R_3 = 0{,}33 \cdot 20 = 6{,}6$ V

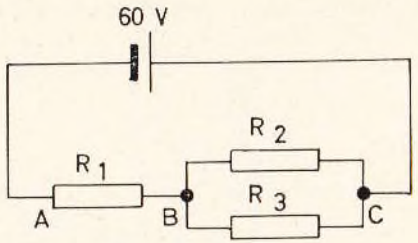
Die Summe der Teilspannungen beträgt:

$3{,}3 + 1{,}98 + 6{,}6 = 11{,}88$ V; unter Berücksichtigung der in der Rechnung vorgenommenen Kürzungen kann man sagen $U = 12$ V. Die über der gesamten Widerstandsanordnung herrschende Spannung ist also gleich der Klemmenspannung.

2. Beispiel:

In der Widerstandsanordnung nach Abb. 25 sollen die Spannungsabfälle zwischen den Punkten A und B sowie zwischen B und C ermittelt werden.

fernmeldelehrling.de



(Abb. 25)

Gegeben: $U = 60\ \text{V}$, $R_1 = 36\ \Omega$, $R_2 = 40\ \Omega$, $R_3 = 60\ \Omega$

Gesucht: U_1, U_2

Lösung: Zunächst müssen wir für die parallelgeschalteten Widerstände R_2 und R_3 einen Ersatzwiderstand $R_{2,3}$ errechnen, wie wir es nun schon mehrere Male getan haben:

$$R_{2,3} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{40 \cdot 60}{40 + 60} = \frac{2400}{100} = 24\ \Omega$$

Jetzt können wir den Gesamtwiderstand der Anordnung berechnen:
$R = R_1 + R_{2,3} = 36 + 24 = 60\ \Omega$
Nach dem Ohmschen Gesetz ist

$$I = \frac{U}{R} = \frac{60}{60} = 1\ \text{A}$$

Erst jetzt kommen wir zum Errechnen der gefragten Spannungen:

Spannungsabfall zwischen A und B:

$U_1 = I \cdot R_1 = 1 \cdot 36 = 36\ \text{V}$

Spannungsabfall zwischen B und C:

$U_2 = I \cdot R_{2,3} = 1 \cdot 24 = 24\ \text{V}$

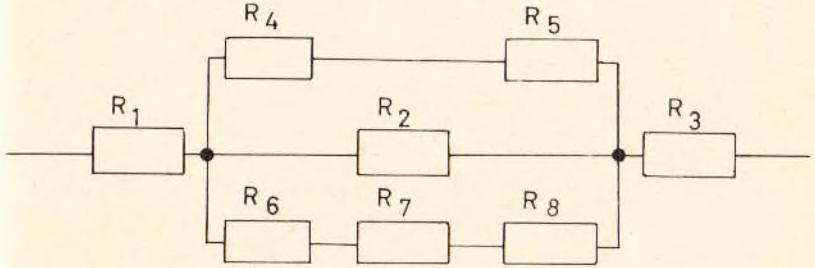
Die Summe der Teilspannungen muß wieder die Klemmenspannung ergaben $U_1 + U_2 = U = 36\ \text{V} + 24\ \text{V} = 60\ \text{V}$

Nachdem die Summe der einzelnen Spannungsabfälle gleich der Klemmenspannung ist, stellen wir fest, daß also der Spannungsabfall über dem Einzelwiderstand von 40 Ω gleich dem Spannungsabfall über dem Einzelwiderstand von 60 Ω ist.

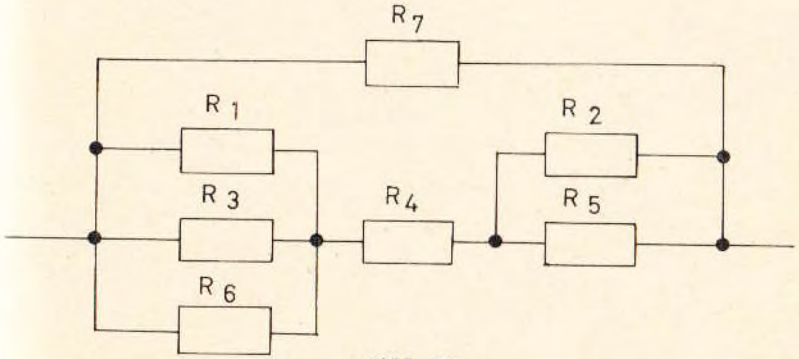
Die Spannung über einer Anordnung parallelgeschalteter Widerstände ist gleich der Spannung über dem Ersatzwiderstand.

5. Übungsaufgaben

a) Was ist Spannungsabfall? **b)** Skizziere eine Reihenschaltung aus 5 Einzelwiderständen. **c)** Skizziere eine Nebeneinanderschaltung aus 3 Einzelwiderständen. **d)** Was versteht man unter einer Gruppenschaltung? **e)** Was kann man mit einer Spannungsteilerschaltung erreichen? **f)** Drei Widerstände von 15 Ohm werden in Reihe geschaltet. Wie groß ist der Gesamtwiderstand? **g)** Welcher Gesamtwiderstand ergibt sich, wenn folgende Widerstände hintereinandergeschaltet werden: $R_1 = 12\ \Omega$, $R_2 = 15{,}8\ \Omega$, $R_3 = 23{,}7\ \Omega$ und $R_4 = 34\ \Omega$. **h)** Die Widerstände $R_1 = 15\ \Omega$, $R_2 = 6\ \Omega$, $R_3 = 18\ \Omega$, $R_4 = 16\ \Omega$ werden in einer Reihenschaltung an 220 V gelegt. Welche Stromstärke stellt sich ein, und welche Spannung nimmt jeder der vier Widerstände auf? **i)** Welchen Gesamtwiderstand ergeben drei parallelgeschaltete Widerstände von je 9 Ω? (im Kopf rechnen). **k)** Welcher Gesamtwiderstand ergibt sich, wenn vier Widerstände nebeneinandergeschaltet werden, von denen je zwei 4 MΩ und je zwei 6 Ω betragen? **l)** Zu einem Widerstand von 0,1 Ω soll ein zweiter parallelgeschaltet werden, so daß der Gesamtwiderstand 0,08 Ω beträgt. Wie groß muß der zweite Widerstand sein? **m)** Berechne den Gesamtwiderstand der Anordnung nach Abb. 26! Gegeben sind: $R_1 = 5{,}3\ \Omega$, $R_2 = 36\ \Omega$, $R_3 = 11\ \Omega$, $R_4 = 15\ \Omega$, $R_5 = 12\ \Omega$, $R_6 = 10\ \Omega$, $R_7 = 8\ \Omega$ und $R_8 = 2\ \Omega$. **n)** An der Anordnung nach Abb. 27 liegen 45 V. Wie groß muß R_7 sein, wenn in der Zuleitung 4,5 A fließen sollen, und die Widerstände folgende Werte haben: $R_1 = 5\ \Omega$, $R_2 = 2{,}4\ \Omega$, $R_3 = 8\ \Omega$, $R_4 = 12\ \Omega$, $R_5 = 5\ \Omega$ und $R_6 = 2{,}5\ \Omega$?

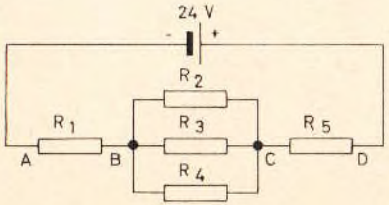


(Abb. 26)



(Abb. 27)

o) Wie groß sind die Spannungsabfälle zwischen den Punkten A und B, B und C sowie C und D der in Abb. 28 dargestellten Anordnung? Wie groß ist der Spannungsabfall über dem Einzelwiderstand R_4? Gegeben sind: $R_1 = 35\ \Omega$, $R_2 = 25\ \Omega$, $R_3 = 150\ \Omega$, $R_4 = 50\ \Omega$ und $R_5 = 46\ \Omega$.



(Abb. 28)

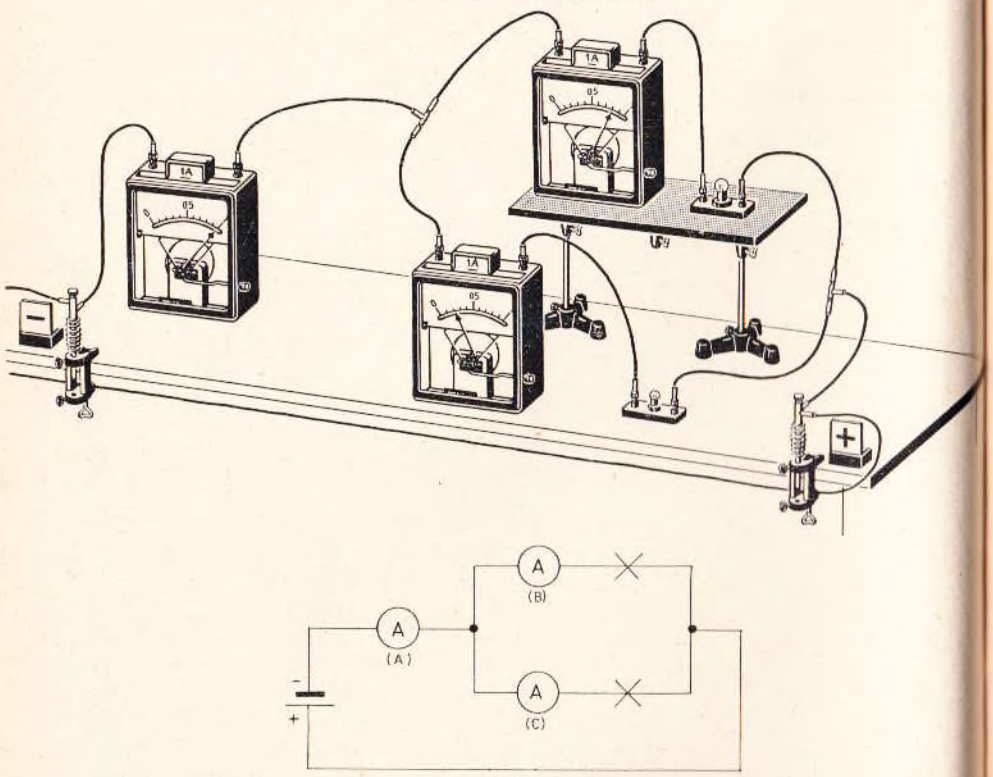
fernmeldelehrling.de

VIII. Die Stromverzweigung

1. Die Kirchhoffschen Sätze

Bei der Reihenschaltung von Widerständen bleibt die Stromstärke innerhalb des Stromkreises an allen Punkten gleich groß, weil ja alle Widerstände im Kreis hintereinander liegen. Wie sieht es nun bei der Nebeneinanderschaltung aus? An Hand der Abb. 29 wollen wir den Stromverlauf untersuchen. Statt fester Widerstände haben wir zwei Glühlämpchen

„Die Stromverzweigung"



(Abb. 29)

nebeneinandergeschaltet. In dem Stromkreis liegen drei Strommesser, einer vor der Verzweigung und je einer vor jedem Glühlämpchen, die übrigens beide 3,5 V/0,2 A haben. An der Anordnung liegt eine Spannung

von 3 bis 4 V. Wird der Stromkreis geschlossen, so wird das Instrument A einen Wert anzeigen, der sich aus der Summe der Werte der beiden anderen Instrumente ergibt. In diesem Falle wird also sein: $I = I_1 + I_2 = 0{,}2 + 0{,}2 = 0{,}4$ A.

Wenn wir jetzt das obere Lämpchen gegen ein solches von 4 V/1 A austauschen, so werden das Instrument A einen Wert von etwa 1 A, B einen Wert von etwa 0,8 A und C einen Wert von etwa 0,2 A anzeigen. Auch hier ist wieder $I = I_1 + I_2$ nämlich $I = 0{,}8 + 0{,}2 = 1$ A.

Die Versuchsanordnung nach Abb. 29 veranschaulicht den **ersten Kirchhoffschen Satz:**

In jedem Stromverzweigungspunkt ist die Summe der zufließenden Ströme gleich der Summe der abfließenden Ströme.

Beispiel:

Drei Widerstände zu 10, 20 und 50 Ohm liegen parallel an einer Spannung von 60 V. Wie groß sind die Teilströme, der aufgenommene Gesamtstrom und der Gesamtwiderstand?

Gegeben: $R_1 = 10\ \Omega$, $R_2 = 20\ \Omega$, $R_3 = 50\ \Omega$, $U = 60$ V

Gesucht: I, I_1, I_2, I_3 und R

Lösung: Bevor wir den Gesamtstrom errechnen können, ist erst einmal der Gesamtwiderstand zu ermitteln:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{10} + \frac{1}{20} + \frac{1}{50} = \frac{10 + 5 + 2}{100} =$$

$$\frac{1}{R} = \frac{17}{100}; \quad R = \frac{100}{17} = 5{,}88\ \Omega$$

Nunmehr errechnen wir I nach dem Ohmschen Gesetz:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{60}{5{,}88} = 10{,}2\ \text{A}$$

In einer reinen Parallelschaltung ist $U = U_1 = U_2 = U_3$, also ist die Spannung über allen Widerständen gleich groß, somit gilt für die Teilströme:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{60}{10} = 6{,}0\ \text{A}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{60}{20} = 3{,}0\ \text{A}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{60}{50} = 1{,}2\ \text{A}$$

Da $I = I_1 + I_2 + I_3$ ist, ergibt sich zur Kontrolle
$I = 6{,}0 + 3{,}0 + 1{,}2 = 10{,}2$ A

fernmeldelehrling.de

Jetzt wollen wir uns einmal die Widerstände R_1 und R_2 sowie die durch sie hindurchfließenden Ströme I_1 und I_2 ansehen:

Das Verhältnis $\frac{R_1}{R_2} = \frac{10}{20} = \frac{1}{2}$ und

das Verhältnis $\frac{I_1}{I_2} = \frac{6}{3} = \frac{2}{1}$ sind genau umgekehrt.

Das Verhältnis der Ströme hat also den umgekehrten Wert des Verhältnisses der Widerstände. Wollte man die Verhältnisse gleichsetzen, daß in diesem Falle ½ = ½ sein soll, so müßte man schreiben:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Bei einer Stromverzweigung verhalten sich die Teilströme umgekehrt wie die Widerstände.

1. Beispiel:

In einem geschlossenen Stromkreis liegen zwei Parallelwiderstände zu 60 Ω und 75 Ω. Die Spannung beträgt 10 V. Wie groß sind die Teilströme, die durch die Teilwiderstände fließen?

Gegeben: $R_1 = 60\ \Omega$, $R_2 = 75\ \Omega$, $U = 10$ V

Gesucht: I, I_1 und I_2 sowie R

Lösung: Bevor wir I berechnen können, müssen wir erst wieder R ermitteln:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{60 \cdot 75}{60 + 75} = \frac{4\,500}{135} = 33{,}3\ \Omega$$

Den Gesamtstrom I errechnen wir nach dem Ohmschen Gesetz:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{10}{33{,}3} = 0{,}3\ \text{A}$$

Da die Teilströme sich umgekehrt verhalten wie die Widerstände, ist $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{75}{60} = \frac{5}{4}$; das heißt also, daß wir von 9 Teilen ausgehen müssen, von dem Gesamtstrom $I = 0{,}3$ A entfallen 5 Teile auf I_1 und 4 Teile auf I_2. Wir müssen nun erst einmal den Betrag von $I = 0{,}3$ A in 9 Teile teilen, das sind 0,033 A und somit ist:

$I_1 = 5 \cdot 0{,}033 = 0{,}165$ A und

$I_2 = 4 \cdot 0{,}033 = 0{,}132$ A

$I = I_1 + I_2 = 0{,}297$ = rund 0,3 A, wir sehen also, daß wir richtig gerechnet haben.

Diese Berechnung ist recht umständlich, deshalb rechnet man möglichst nach dem Ohmschen Gesetz.

Die Spannung über einer Anordnung parallelgeschalteter Widerstände ist gleich der Spannung über dem Ersatzwiderstand (Abschnitt VII 4). Sofern wir, wie in unserem Falle, die Höhe der Spannung kennen, lassen sich die Teilströme aus ihr und den Widerständen berechnen:

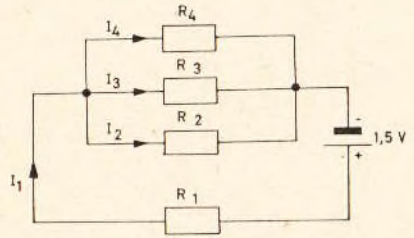
$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{10}{60} = 0{,}167\ \text{A}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{10}{75} = 0{,}133\ \text{A}$$

Auch hier rechnen wir zur Probe:
$I = I_1 + I_2 = 0{,}167 + 0{,}133 = 0{,}3$ A
Unsere Rechnung stimmt, und wir sind schneller zum Ziel gekommen.

2. Beispiel:

Die Teilströme I_2, I_3 und I_4 der Anordnung nach Abb. 30 sollen errechnet werden!



(Abb. 30)

Gegeben: $R_1 = 16\ \Omega$, $R_2 = 60\ \Omega$, $R_3 = 25\ \Omega$, $R_4 = 40\ \Omega$, $U = 1{,}5$ V

Gesucht: I, das hier gleich I_1 ist; I_2, I_3 u. I_4

Lösung: Den Strom I bzw. I_1, der als Gesamtstrom in der Anordnung wirksam ist, können wir errechnen, wenn wir den gesamten Widerstand der Anordnung kennen:

$$R = R_{2,3,4} + R_1$$

$$\frac{1}{R_{2,3,4}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{60} + \frac{1}{25} + \frac{1}{40}$$

$$\frac{1}{R_{2,3,4}} = \frac{10 + 24 + 15}{600} = \frac{49}{600}$$

$$R_{2,3,4} = \frac{600}{49} = 12{,}24\ \Omega$$

$$R = R_{2,3,4} + R_1 = 12{,}24 + 16 = 28{,}24\ \Omega$$

Nach dem Ohmschen Gesetz ist die Stromstärke

$$I = \frac{U}{R} = \frac{1{,}5}{28{,}24} = 0{,}053\ \text{A} = 53\ \text{mA} = I_1$$

Nach dem bisher Gesagten wissen wir, daß die Spannung U sich teilt, und zwar ist sie über den parallel angeordneten Widerständen

$U_{2,3,4} = I \cdot R_{2,3,4} = 0{,}053 \cdot 12{,}24 = 0{,}64872$ V = rd 0,65 V

Nunmehr können wir die Teilströme nach dem Ohmschen Gesetz errechnen:

$$I_2 = \frac{U_{2,3,4}}{R_2} = \frac{0{,}65}{60} = 0{,}01\ \text{A} = 10\ \text{mA}$$

$$I_3 = \frac{U_{2,3,4}}{R_3} = \frac{0{,}65}{25} = 0{,}026\ \text{A} = 26\ \text{mA}$$

$$I_4 = \frac{U_{2,3,4}}{R_4} = \frac{0{,}65}{40} = 0{,}01625\ \text{A} = \text{rd } 16\ \text{mA}$$

Die Summe der Teilströme muß gleich dem Gesamtstrom sein, wenn unsere Rechnung richtig ist:

$I = I_1 = I_2 + I_3 + I_4 = 0{,}01 + 0{,}026 + 0{,}016 = 0{,}052$ A

Der Unterschied von 1 mA ist durch die Aufrundung bedingt.

fernmeldelehrling.de

Wir wollen nun aber die Rechnung auch noch nach dem Widerstandsverhältnis durchführen:

$R_2 : R_3 : R_4 = 60 : 25 : 40$

Wenn wir die Werte durch 5 teilen, erhalten wir ein Verhältnis von 12 : 5 : 8 und bekommen insgesamt 25 Teile (12 + 5 + 8).

Wir müssen zunächst den Gesamtstrom in 25 Teile teilen, also

0,053 : 25 = 0,00212

Um die Teilströme zu errechnen, nehmen wir den 25sten Teil des Gesamtstromes mit den jeweiligen Verhältniszahlen mal:

0,00212 · 12 = 0,02544 A
0,00212 · 5 = 0,01060 A
0,00212 · 8 = 0,01696 A

Dann müssen wir uns überlegen, wie die drei errechneten Stromstärken sich auf die Widerstände verteilen:

Nach dem Ohmschen Gesetz ($I = \frac{U}{R}$) wissen wir, daß der stärkste Strom über den kleinsten Widerstand fließt; demnach müssen also gehören:

I_2 zu R_2 = 0,01060 A
I_3 zu R_3 = 0,02544 A
I_4 zu R_4 = 0,01696 A

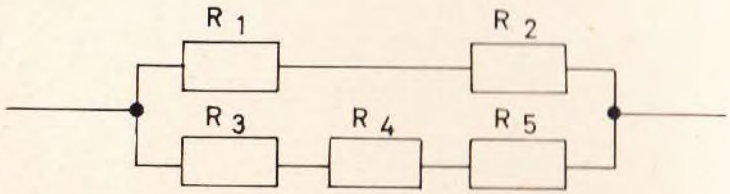
Wir rechnen zur Probe:

0,01060 + 0,02544 + 0,01696 = 0,053 A

Aus dem zweiten Beispiel ist wieder zu erkennen, daß die Errechnung der Teilströme nach dem Ohmschen Gesetz schneller und einfacher ist als nach dem Widerstandsverhältnis. Nach dem letzteren rechnet man nur, wenn eine Parallelschaltung nicht mehr als zwei Widerstände umfaßt.

2. Übungsaufgaben

a) Wie heißt der erste Kirchhoffsche Satz? **b)** Wie verhalten sich bei einer Stromverzweigung die Teilströme zu den Teilwiderständen? **c)** Von zwei nebeneinandergeschalteten Widerständen, die an 110 V liegen, nimmt der eine 1,2 A auf, der andere hat einen Wert von 250 Ω. Wie groß ist die Stromstärke in der Zuleitung? **d)** Vier parallelgeschaltete Widerstände von 2 kΩ; 2,5 kΩ; 4 kΩ und 5 kΩ werden von insgesamt 100 mA durchflossen. Welche Spannung liegt an ihnen und wie groß sind die Teilströme? **e)** Die Stromstärke in der Anordnung nach Abb. 31 soll in der Zuleitung 6 A betragen. Wie groß sind die Stromstärken in den Teilwiderständen? **f)** Die Gesamtstromstärke der Anordnung nach Abb. 26 beträgt 2 A. Wie groß sind die Teilstromstärken? (wenn die Widerstände folgende Werte haben: R_1 = 4,5 Ω, R_2 = 3,5 Ω, R_3 = 3,2 Ω, R_4 = 1,8 Ω und R_5 = 5 Ω?)

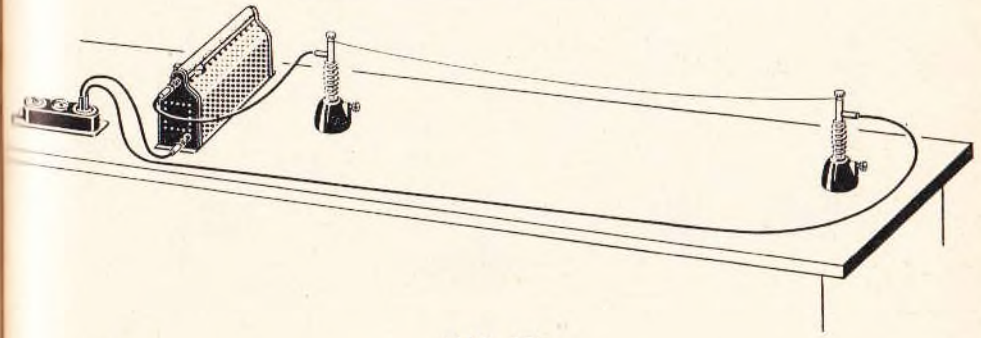


(Abb. 31)

C. Die Wärmewirkung des elektrischen Stromes

I. Der Strom erwärmt den Leiter

„Der Strom erwärmt den Leiter“

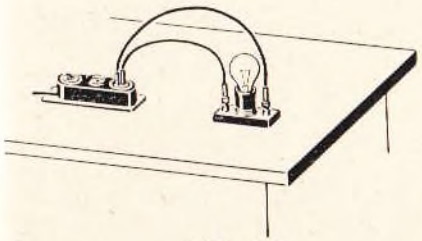


(Abb. 32)

In der Versuchsanordnung nach Abb. 32 ist ein Draht zwischen zwei Stromklemmen gespannt. In dem Stromkreis liegt ein Schiebewiderstand, der zunächst voll eingeschaltet ist. Mit abnehmendem Widerstand jedoch senkt sich der Draht in zunehmendem Maße, wird schließlich glühend und brennt am Ende durch.

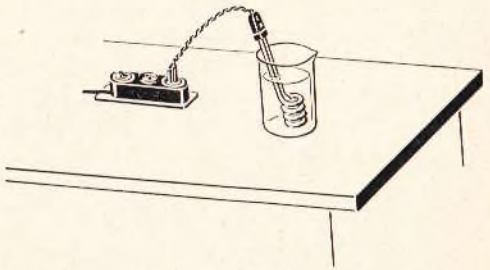
Der elektrische Strom bewirkt eine Erwärmung des Leiters.

„Die Glühlampe“



(Abb. 33)

Der „Tauchsieder“



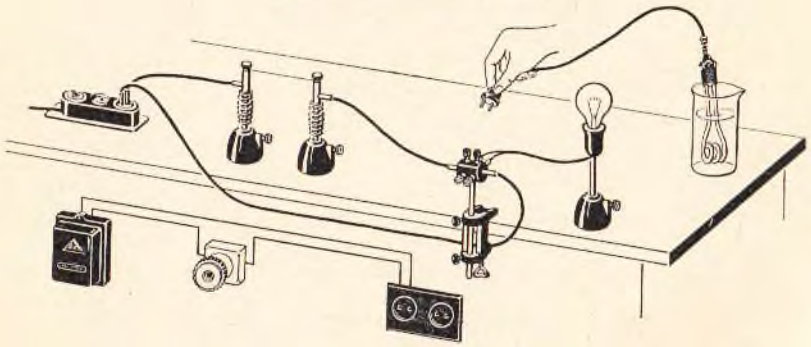
(Abb. 34)

Abb. 33 zeigt eine an das Lichtnetz angeschlossene Glühlampe. Wenn der Netzschalter geschlossen wird, so wird in dem Lampenkörper ein dünner Draht durch den elektrischen Strom zum Glühen gebracht. Der Draht wird wie bei dem Versuch nach Abb. 32 erwärmt.

fernmeldelehrling.de

Abb. 34 zeigt ein Gerät, das wir fast täglich im Haushalt benutzen, ohne uns dabei über den elektrischen Vorgang Gedanken zu machen. Die elektrische Stromwärme, die in Abb. 33 zum Leuchten benutzt wurde, wird hier zu Heizzwecken verwendet.

„Die Schmelzsicherung"



(Abb. 35)

Abb. 35 zeigt eine Anordnung, nach der die Stromwärme dazu benutzt wird, einen Stromkreis bei Überlastung oder Kurzschluß auszuschalten. Ein Draht ist in seinem Querschnitt und seinem Werkstoff so bemessen, daß er bei einer bestimmten im Stromkreis vorhandenen Stromstärke schmilzt. Wir alle kennen die Sicherungen, mit denen unsere Stromkreise im Haushalt abgesichert sind.

Die Feststellung, die wir an Hand der Versuchsanordnungen nach den Abb. 32 bis 35 gemacht haben, bestätigen die Erkenntnisse, die wir bereits im Abschnitt A II 4d gemacht haben. Die entstehende Wärme im Leiter ist nur aus den Zusammenstößen der Elektronen mit den Atomen des Leiters zu erklären. Je größer die Anzahl der fließenden Elektronen ist, um so größer ist auch der Strom, aber um so größer ist auch die Zahl der Zusammenstöße zwischen den Elektronen und den Atomen, und um so größer schließlich ist auch die frei werdende Wärme.

1. Die Stromdichte

Die meisten Leiter, mit deren Hilfe elektrische Energie befördert wird, sind mit einer Isolationsmasse umgeben, die nur eine Wärmefestigkeit von einer bestimmten Temperatur hat (meistens 60°C). Schon deshalb dürfen die Leiter nicht übermäßig erwärmt werden, gleichgültig ob sie zur Installation oder als Wicklung jeder Art verwendet werden. Wie der Versuch nach Abb. 32 gezeigt hat, kann ein Draht, der über die zulässige Temperatur erwärmt wird, verschmoren und damit die Gefahr eines Brandes hervorrufen.

Wir wissen bereits, daß ein Leiter mit dicht beieinanderstehenden Atomen dem Elektronenstrom einen größeren Widerstand entgegensetzt als ein solcher mit weit auseinanderstehenden Atomen. Wir haben weiterhin gelernt, daß der Widerstand u.a. abhängig ist vom Querschnitt des Leiters. Somit ist die Erwärmung eines Leiters abhängig von seinem Querschnitt. Zum Beweis dafür wollen wir den Versuch nach Abb. 32 wiederholen. Wir nehmen zuerst einen Konstantandraht von 0,2 mm Durchmesser und dann einen Konstantandraht von 0,4 mm Durchmesser. Wir sehen, daß letzterer erst viel später zu glühen beginnt und u. U. gar nicht durchbrennt. Die Erwärmung ist also letzten Endes abhängig von der Stromstärke und vom Leiterquerschnitt. Je mehr Strom je mm² fließt, d.h. je dichter die Elektronen fließen, um so größer ist die erzeugte Wärme. Man spricht deshalb von der **Stromdichte** in einem Leiter.

Die Stromdichte S wird in Ampere je mm² angegeben.

Die Stromdichte ist keine feste Größe; sie ist von verschiedenen Faktoren abhängig, z. B. von der Kühlung des Leiters. Wir wollen uns jedoch nicht eingehender mit der höchstzulässigen Belastung elektrischer Leiter befassen, weil das eher ein Gebiet der Starkstromtechnik ist.

2. Die Anwendung der Stromwärme

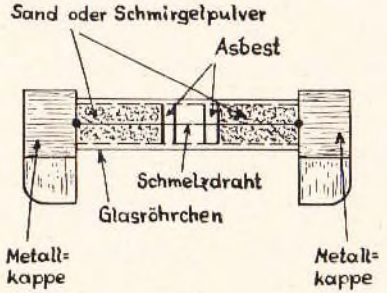
Durch Einschalten eines Drahtes von bestimmtem Querschnitt und Werkstoff kann man einen Stromkreis vor Überlastung schützen (siehe Abb. 32). In der Praxis macht man das mit Hilfe einer Sicherung, d.h. mit Hilfe eines Drahtstückes, dessen Querschnitt so bemessen ist, daß es beim Überschreiten der zulässigen Belastung (Erwärmung) durchschmilzt. Sofern die für die einzelnen Stromkreise (6 A, 10 A usw.) vorgeschriebenen Sicherungen eingehalten werden, kann eine Brandgefahr vermieden werden.

Die Brandgefahr wird nicht nur durch eine Überlastung des Stromkreises hervorgerufen, sondern sie kann auch bei Kurzschluß entstehen. **Kurzschluß** entsteht, wenn sich aus irgendeinem Grunde die Hin- und die Rückleitung direkt berühren. Der Widerstand des Stromkreises besteht dann nur aus dem Widerstand der Leitung bis zum Berührungspunkt und dem inneren Widerstand der Spannungsquelle; demzufolge verursacht die Spannung bei dem verhältnismäßig kleinen Widerstand in der Leitung einen sehr hohen Strom, der den Draht unzulässig hoch erwärmt und schließlich einen Brand verursachen kann.

In der Fernmeldetechnik geht es nicht so sehr um die Vermeidung der Brandgefahr als vielmehr um den Schutz hochempfindlicher Geräte vor unzulässig hohen Stromstößen, die auf Grund atmosphärischer Entladungen oder durch induktive Beeinflussung geerdeter Starkstromleitun-

fernmeldelehrling.de

gen entstehen können. Abb. 36 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der bei der DPB verwendeten Strom-Grobsicherung, die anspricht, sobald der Strom die höchstzulässige Stärke überschreitet. Der Schmelzdraht befindet sich in einem Glasrohr und ist an den Enden mit sogenannten



(Abb. 36)

Schneidenkontakten verbunden, die wiederum guten Kontakt mit der stromführenden Leitung (je eine Sicherung für jeden Leitungsdraht) haben. Zur Vermeidung eines Lichtbogens ist der größte Teil des Sicherungsdrahtes mit Sand oder mit Schmirgelpulver umgeben, das von zwei Asbestscheiben in der gewünschten Lage gehalten wird.

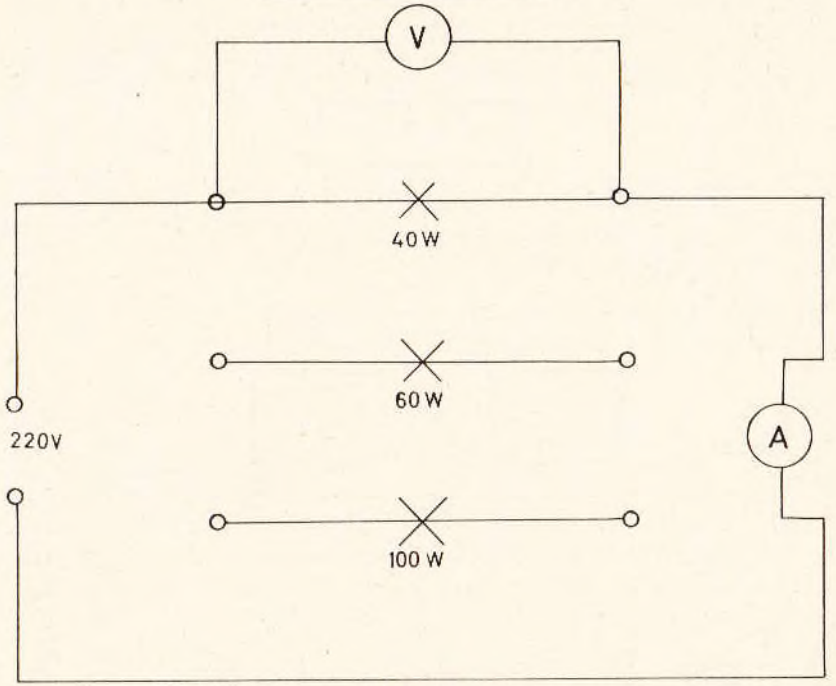
Je nach dem Verwendungszweck werden **Strom-Grobsicherungen** oder **Strom-Feinsicherungen** verwendet. Die Feinsicherungen sprechen schon auf schwache, die Grobsicherungen erst auf größere Stromstärken an. In der Fernmeldetechnik wird **grundsätzlich** jede stromführende Leitung abgesichert.

II. Leistung und Arbeit

1. Die elektrische Leistung

Zur Untersuchung der elektrischen Leistung wollen wir uns der vertrauten Glühlampe nach dem Versuchsschema der Abb. 37 bedienen. Wir wollen dazu drei Lampen zu je 40, 60 und 100 Watt benutzen. In den Stromkreis schalten wir ein Amperemeter und parallel zu der jeweiligen Glühlampe ein Voltmeter. Wir wollen jetzt die Helligkeit der drei Glühlampen miteinander vergleichen und die Instrumentenwerte in einer Tabelle festhalten. Zur Schonung unserer Augen stellen wir zwischen uns und die Lampe einen Schirm aus Transparentpapier. In die letzte Spalte unserer Tabelle wollen wir das Produkt aus Spannung und Strom eintragen.

„Die elektrische Leistung"



(Abb. 37)

Lampe	Licht-leistung	Lampen- Spannung	Strom	Produkt $U \cdot I$
40 Watt	klein	220 V	0,2 A	44 Watt
60 Watt	mittel	220 V	0,27 A	59,4 Watt
100 Watt	groß	220 V	0,45 A	99 Watt

Wir stellen fest:

a) mit der höheren Wattzahl der Lampe steigt die Lichtleistung,

b) die Wattangaben in der ersten und letzten Spalte stimmen fast genau überein,

c) zur Erzeugung der Lichtleistung ist eine elektrische Leistung erforderlich, die ohne Berücksichtigung der auftretenden Verluste der Lichtleistung entspricht. Somit ist also das Produkt $U \cdot I$ die aufgewendete elektrische Leistung, die den Draht zum Glühen gebracht und die Lichtleistung bewirkt hat.

fernmeldelehrling.de

Die elektrische Leistung ergibt sich aus dem Produkt von Spannung und Stromstärke.

Zur Kennzeichnung der elektrischen Leistung ist der Buchstabe P (früher N) gewählt worden. In Buchstaben ausgedrückt, lautet das Gesetz also:

$$P = U \cdot I$$

Werden U in Volt und I in Ampere eingesetzt, so ergibt sich P in Watt[1]).

Die Einheit der elektrischen Leistung
1 Watt (W) ist 1 Volt (V) mal 1 Ampere (A)

Wie beim Ohmschen Gesetz können wir auch hier die dritte Größe errechnen, wenn die beiden anderen bekannt sind; es sind also:

$$I = \frac{P}{U} \quad \text{und} \quad U = \frac{P}{I}$$

Die Einheit der Leistung, das Watt, ist im allgemeinen eine zu kleine Größe, man bedient sich deshalb oft der Größe Kilowatt (kW) = 1000 Watt (W).

Die Leistungsformel läßt sich auch anders ausdrücken. Nach dem Ohmschen Gesetz ist

$$U = I \cdot R \text{ und } I = \frac{U}{R}$$

Wenn wir diese beiden Formeln nacheinander in die Leistungsformel einsetzen, so bekommen wir:

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

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

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

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

Die Leistung kann also berechnet werden, wenn zwei von drei Werten des Ohmschen Gesetzes bekannt sind.

[1]) James Watt, englischer Physiker (1736 bis 1819).

1. Beispiel:

Eine Wählvermittlung benötigt bei einer Spannung von 60 V in Zeiten stärkster Belastung eine Stromstärke von 80 A. Wie groß ist der Leistungsverbrauch?

Gegeben: $U = 60$ V, $I = 80$ A
Gesucht: P
Lösung: $P = U \cdot I = 60 \cdot 80 = 4\,800$ Watt $= 4{,}8$ kW

2. Beispiel:

Ein elektrischer Ofen hat eine Leistung von 2 kW und wird an 220 V angeschlossen. Welche Stromaufnahme hat der Ofen?

Gegeben: $P = 2$ kW $= 2\,000$ W, $U = 220$ V
Gesucht: I
Lösung: Aus der Grundformel $P = U \cdot I$ erhalten wir durch Umstellung

$$I = \frac{P}{U} = \frac{2\,000}{220} = 9{,}09 \text{ A}$$

3. Beispiel:

Wie groß ist die Spannung bei einem Leistungsverbrauch von 1,2 W und bei einer Stromstärke von 40 mA?

Gegeben: $P = 1{,}2$ W, $I = 40$ mA $= 0{,}04$ A
Gesucht: U
Lösung: Aus der Grundformel $P = U \cdot I$ erhalten wir durch Umstellung

$$U = \frac{P}{I} = \frac{1{,}2}{0{,}04} = \frac{120}{4} = 30 \text{ V}$$

4. Beispiel:

Ein Widerstand von 3 kΩ nimmt einen Strom von 150 mA auf. Wie groß ist seine Wattbelastung?

Gegeben: $P = 2$ kΩ $= 2\,000$ Ω, $I = 15$ mA $= 0{,}15$ A
Gesucht: P
Lösung: $P = I_2 \cdot R = 0{,}15 \cdot 0{,}15 \cdot 2\,000 = 45$ W

5. Beispiel:

Ein Widerstand von 400 Ω liegt an einer Spannung von 220 V. Wie groß ist seine Leistungsaufnahme?

Gegeben: $R = 400$ Ω, $U = 220$ V
Gesucht: P
Lösung: $P = \frac{U^2}{R} = \frac{220 \cdot 220}{400} = 121$ W

2. Der Wirkungsgrad

Der Versuch nach Abb. 37 hat uns gezeigt, daß die in den Draht der Glühlampe geschickte elektrische Energie (Leistung) einmal eine Lichtleistung, zum andern aber auch eine **Wärmeleistung** hervorgerufen hat. Die Lichtleistung war gewünscht, die Wärmeleistung jedoch nicht, weil sie nämlich ein Teil der in die Glühlampe geschickten elektrischen Lei-

fernmeldelehrling.de

stung ist und die Lichtleistung um diesen Teil geschwächt wird. Die Wärmeleistung ist ein Verlust, der von der zugeführten Leistung abgezogen werden muß, wenn man die abgegebene Leistung erhalten will.

Die zugeführte Leistung wird mit P_{zu} und die abgegebene Leistung mit P_{ab} bezeichnet. Das Verhältnis von P_{ab} zu P_{zu} ($\frac{P_{ab}}{P_{zu}}$) nennt man Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad wird mit dem griechischen Buchstaben η (eta) bezeichnet. Es ist

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

Im günstigsten Fall wäre der Wirkungsgrad gleich 1, das würde bedeuten, daß keine Verluste auftreten; P_{ab} wäre also gleich P_{zu}. Die Ausnutzung der zugeführten Leistung wäre 100%. Dieser Fall kann jedoch niemals eintreten, weil die abgegebene Leistung infolge der stets vorhandenen Verluste immer kleiner ist als die zugeführte Leistung.

Beispiel:

Ein Gleichstrommotor gibt an der Riemenscheibe 1,1 kW ab und nimmt bei 220 V 6,66 A Strom auf. Wie groß ist der Wirkungsgrad?

Gegeben: $P_{ab} = 1{,}1$ kW, $U = 220$ V, $I = 6{,}66$ A

Gesucht: P_{zu} und η

Lösung: Wir müssen zunächst die zugeführte Leistung errechnen:

$$P_{zu} = U \cdot I = 220 \cdot 6{,}66 = 1{,}465 \text{ kW}$$

Nunmehr können wir den Wirkungsgrad berechnen:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{1{,}1}{1{,}465} = 0{,}75$$

Der Wirkungsgrad des Motors beträgt also 0,75 oder anders ausgedrückt 75%.

3. Mechanische Arbeit und Leistung

Zwei Lehrlinge sollen je eine Last von 100 kg über eine Strecke von 200 m ziehen. Die Arbeit ist für beide gleich. Sie kann errechnet werden aus der aufgewendeten Kraft und dem Weg, der zurückzulegen ist. Es ist

Arbeit = Kraft · Weg

$$A = F \cdot s$$

wobei die Kraft in kp und der Weg in m einzusetzen sind. Die Arbeit ergibt sich dann in kpm.

In unserem Fall beträgt die Arbeit für beide Lehrlinge

$$A = F \cdot s = 100 \cdot 200 = 20\,000 \text{ kpm}$$

Für die Arbeit benötigt der erste Lehrling eine Zeit von 10 min und der zweite eine Zeit von 20 min. Obwohl die Arbeit für beide gleich war, hat doch der erste mehr geleistet als der zweite. Sie unterscheiden sich in der Leistung:

	Arbeit	Zeit	Leistung
Lehrling A	20 000 kpm	10 min	2 000 kpm je min
Lehrling B	20 000 kpm	20 min	1 000 kpm je min

Die Leistung des Lehrlings B ist nur halb so groß wie die von A. A schafft nämlich 2 000 kpm je min und B nur 1 000 kpm je min. Es ist also:

Leistung = $\frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}}$ oder als Formel ausgedrückt

$$P = \frac{A}{t}$$

In der Technik wird allgemein mit der Zeiteinheit eine Sekunde (1 sec) gerechnet. Wenn die Arbeit in kpm und die Zeit in sec angegeben wird, ergibt sich die Leistung in kpm/sec (Kilopond mal meter pro Sekunde).

Die Leistung unserer Lehrlinge errechnet sich also:

Lehrling A: $P = \frac{A}{t} = \frac{20000}{600} = 33{,}3$ kpm/sec

Lehrling B: $P = \frac{A}{t} \quad \frac{20000}{1200} = 16{,}6$ kpm/sec

Durch Umstellung kann man aus der Leistungsformel die Arbeit berechnen, es ist $A = P \cdot t$

In der Technik, besonders für die Angabe der Leistung motorischer Antriebe, wird nicht die Leistungseinheit kpm/sec verwendet, sondern eine willkürlich festgesetzte Größe, die **Pferdestärke (PS).** Die Umrechnungsformel lautet:

$$1 \text{ PS} = 75 \text{ kpm/sec}$$

4. Beziehungen zwischen mechanischer und elektrischer Leistung

Mit Hilfe von Vergleichswerten kann man die mechanische Leistung leicht in die gleichwertige elektrische Leistung umrechnen. Dazu bedient man sich folgender Umrechnungswerte:

fernmeldelehrling.de

1 Watt	=	0,102	kgm/sec			
1 Kilowatt	=	102	kgm/sec	= 1,36 PS	=	rd. $^4/_3$ PS
1 kgm/sec	=	9,81	Watt			
1 PS	=	736	Watt	= 0,736 kW	=	rd. $^3/_4$ kW

Die Ungefährwerte (rd.) sind für Überschlagsberechnungen vorteilhaft anzuwenden.

1. Beispiel:

Wieviel PS entsprechen einer Leistung von 5,5 kW?

1 kW = 1,36 PS; 5,5 kW = 5,5 · 1,36 = 7,48 PS

2. Beispiel:

Zum Antrieb einer Bohrmaschine ist eine mechanische Leistung von 2,2 PS erforderlich. Wie groß ist die abgegebene Leistung des Motors in kW, und welche Leistungsaufnahme aus dem Netz hat er, wenn sein Wirkungsgrad 0,81 beträgt?

Gegeben: $P_{PS} = 2{,}2$ PS, $\eta = 0{,}81$

Gesucht: Nennleistung des Motors, P_{zu} in kW

Lösung: Nennleistung des Motors in kW

$P_{kW} = P_{PS} \cdot 0{,}736 = 2{,}2 \cdot 0{,}736 = 1{,}62$ kW

Leistungsaufnahme = zugeführter Leistung aus der Grundformel

$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$ errechnen wir durch Umstellung

$P_{zu} = \frac{P_{ab}}{\eta} = \frac{1{,}62}{0{,}81} = 2$ kW

5. Die elektrische Arbeit

Nach Umstellung der Leistungsformel haben wir die mechanische Arbeit errechnet

$$A = P \cdot t$$

Wenn in dem Beispiel auf Seite 64 nicht die Lehrlinge, sondern ein Elektromotor die Last über die Strecke bewegt, so gilt auch für den Motor: Arbeit ist das Produkt aus Leistung mal Zeit. Demnach gilt auch für die elektrische Arbeit die Formel

$$\boxed{A = P \cdot t}$$ in Wattstunden (Wh)

In diese Formel kann man je nach Bedarf für P einsetzen:

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

Die elektrische Arbeit wird in Wattsekunden (Ws), Wattstunden (Wh) oder Kilowattstunden (kWh) gemessen. Beim Einsetzen in die Formel ist unbedingt zu beachten, daß sich Ws ergeben, wenn P in Watt und t in Sekunden eingesetzt werden, daß sich Wh ergeben, wenn P in Watt und

die Zeit in Stunden eingesetzt werden, und daß die Arbeit sich in kWh ergibt, wenn P in Kilowatt und die Zeit in Stunden eingesetzt werden. Zur Umrechnung bedienen wir uns folgender Werte:

1 Wattsekunde = 1 Ws
1 Wattstunde = 1 Wh = 3600 Ws
1 Kilowattstunde = 1 kWh = 1000 Wh

Der Begriff der elektrischen Arbeit ist wichtig für die Berechnung der Gebühren, die von den Elektrizitätswerken erhoben werden. Neben einer ständig zu zahlenden Grundgebühr werden die Kosten (K) errechnet aus der am Zähler abgelesenen elektrischen Arbeit und dem Preis für die Kilowattstunde:

$$\boxed{K = A \cdot k = \text{Arbeit} \cdot \text{Tarifpreis}}$$

1. Beispiel:

Eine 60-Watt-Glühlampe brennt 10 Stunden. Welche Gebühr muß bezahlt werden, wenn die kWh 0,10 DM kostet?

Gegeben: $P = 60$ W, $t = 10$ Stdn., $k = 0{,}10$ DM/kWh

Gesucht: K

Lösung: Wir müssen zunächst die elektrische Arbeit errechnen zu

$A = P \cdot t = 60 \cdot 10 = 600$ Wh $= 0{,}6$ kWh

Danach betragen die Kosten

$K = A \cdot k = 0{,}6 \cdot 0{,}10 = 0{,}06$ DM $= 6$ Pf

2. Beispiel:

Ein Rundfunkgerät verbraucht durchschnittlich 45 W. Wie hoch ist die monatliche Gebühr, wenn das Gerät täglich fünf Stunden in Betrieb ist? Die kWh kostet 0,10 DM.

Gegeben: $P = 45$ W, $t_{tägl.} = 5$ Std., $k = 0{,}10$ DM/kWh

Gesucht: K

Lösung: Bevor wir die Arbeit errechnen, müssen wir die Zeit für einen Monat berechnen

$t_{Monat} = 30 \cdot t_{tägl.} = 30 \cdot 5 = 150$ Stdn.

Demnach beträgt die Arbeit

$A = P \cdot t = 45 \cdot 150 = 6750$ Wh $= 6{,}75$ kWh

Die Gebühr errechnet sich zu

$K = A \cdot k = 6{,}75 \cdot 0{,}10 = 0{,}675$ DM $= 70$ Pf

6. Übungsaufgaben

a) An ein Netz von 220 V werden zwei Glühlampen zu 110 V in Reihe geschaltet angeschlossen. Die eine Glühlampe hat eine Leistung von 40 W, die andere von 100 W. Wie verteilen sich Spannung und Strom, und was geschieht? **b)** An einer Magnetspule mit dem Widerstand 30 Ω liegen 220 V Gleichspannung. Welche Leistung nimmt die Spule auf? **c)** Welche Stromstärke nimmt ein Staubsauger von 200 W an der Spannung 110 V auf? **d)** Welche Spannung liegt an einem Widerstand, der 1,9 kW aufnimmt und dabei von 5 A durchflossen wird? **e)** Ein Motor gibt 3 kW ab, er hat bei 440 V eine Stromaufnahme von 8,52 A. Wie groß ist der Wirkungsgrad?

fernmeldelehrling.de

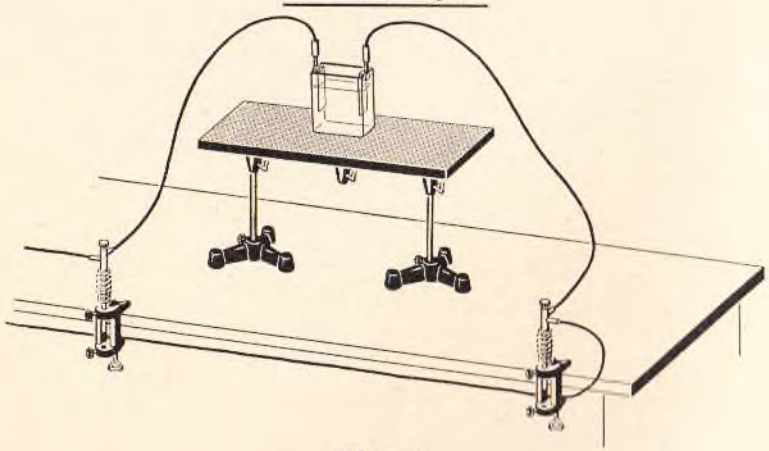
f) Was bedeutet es, wenn man sagt, daß ein Elektromotor einen Wirkungsgrad von 1 habe? g) Wie groß ist die durchschnittliche elektrische Leistung der Verbraucher eines Kleinbetriebes, der mit Gleichstrom versorgt wird, wenn bei normaler Arbeitszeit eine Stromrechnung von 80,— DM (ohne Grundgebühr) aufkommt? Der Preis für 1 kWh beträgt 35 Pf. h) Im größten deutschen Wasserkraftwerk, dem Walchenseekraftwerk, fallen pro Sekunde etwa 65 m³ Wasser die 6 großen Rohrleitungen hinab und werden den 8 Turbinen zugeführt. Der Höhenunterschied, den das Wasser durchfällt, beträgt rd. 200 m. Wie groß ist 1. die mechanische Arbeit in kgm, die das Wasser auf die Turbinen überträgt, 2. die abgegebene Leistung in PS und 3. der Wirkungsgrad der Anlage, wenn die Leistung der Turbinen insgesamt 168000 PS beträgt? i) Ein Motor für 440 V hat eine Leistungsabgabe von 40 PS. Sein Wirkungsgrad beträgt 0,87. Wie groß ist seine Leistungs- und Stromaufnahme aus dem Netz? k) Ein Rundfunkempfänger mit einer Leistungsaufnahme von 40 W ist am Tage 6 Stunden eingeschaltet. Wie hoch sind die monatlichen Kosten, wenn der Arbeitspreis und die Grundgebühr je 20 Pf betragen? l) Ein elektrischer Heizofen für 220 V verbraucht bei einer Einschaltdauer von 3,5 Stunden am Tag für 8,80 DM elektrische Energie im Monat. Der Preis für 1 kWh beträgt 11 Pf. Welche Stromstärke nimmt der Ofen auf? m) In welcher Zeit verbraucht ein elektrisches Gerät 1 kWh, wenn es bei 110 V Spannung eine Stromstärke von 2,5 A aufnimmt?

D. Die chemische Wirkung des elektrischen Stromes

I. Die Elektrolyse

Bei dem Versuch nach Abb. 38 wollen wir in einen Glastrog mit verdünnter Schwefelsäure zwei Kohleplatten tauchen. Diese Kohleplatten verbinden wir mit einer Spannungsquelle von einigen Volt. Schließen wir

„Die Elektrolyse“



(Abb. 38)

den Stromkreis, so werden wir an der einen Platte einige wenige, an der anderen Platte aber sehr viele Gasbläschen bemerken.

Bei einer chemischen Untersuchung der Gasbläschen würden wir feststellen, daß die kleinere Gasmenge aus Sauerstoff und die größere aus Wasserstoff besteht. Der elektrische Strom verursacht also beim Durchgang durch leitende Flüssigkeiten eine chemische Zersetzung.

Wir wiederholen den Versuch, ersetzen jedoch die verdünnte Schwefelsäure durch eine Kupfersulfatlösung. Schließen wir den Stromkreis, so überzieht sich die eine Kohleplatte mit einer Kupferschicht. Diese Schicht verschwindet wieder, wenn wir die Stromrichtung umkehren. Der elektrische Strom hat auch hier einen chemischen Vorgang bewirkt, der von der Stromrichtung abhängig ist.

Der elektrische Strom kann durch eine Flüssigkeit hindurchgehen, wenn in dieser geladene Teilchen vorhanden sind, die sich beim Anlegen einer Spannung zu einem entgegengesetzt geladenen Pol (Kohleplatte) hin in Bewegung setzen. Sie vermitteln dabei ebenso wie die freien Elektronen in einem Leiter (Draht) den Stromdurchgang durch die Flüssigkeit.

Nach dem englischen Physiker Michael Faraday heißt der chemische Vorgang, der sich bei unseren Versuchen abgespielt hat, **Elektrolyse.** Die Flüssigkeit nennt man **Elektrolyt.** Die Platten bezeichnet man als **Elektroden**, und zwar die mit dem positiven Pol der Spannungsquelle verbundene Platte als **Anode** und die mit dem negativen Pol verbundene Platte als **Kathode**.

Die Moleküle von Säuren, Basen und Salzen spalten sich in einer Lösung (z. B. Verdünnung durch Wasser) in zwei entgegengesetzt geladene Teile, nämlich in solche, denen Elektronen fehlen, und solche, die zuviel Elektronen haben. Aus der Elektronenlehre wissen wir, daß am Minuspol stets Elektronenüberschuß und am Pluspol Elektronenmangel herrscht. Die Teile der Moleküle, die zuviel Elektronen haben, wandern zum Punkt des Elektronenmangels, nämlich zur Anode, während die Teilchen, die zuwenig Elektronen haben, dem Punkt des Elektronenüberschusses, nämlich der Kathode zustreben. Die geladenen Teilchen in der Lösung nennt man **Ionen** (d. h. die Wandernden). Die zur Anode wandernden Teilchen sind also **Anionen**, die zur Kathode wandernden die **Kationen.**

Kationen wandern immer mit dem Strom.

Wasserstoff und Metalle bilden stets Kationen, Sauerstoff und andere Molekülteilchen Anionen. Deshalb werden Wasserstoff immer an der Kathode und Sauerstoff immer an der Anode ausgeschieden, wie wir im Versuch gesehen haben; das Kupfer schlägt sich aus dem gleichen Grunde immer an der Elektrode nieder, die mit dem Minuspol der Spannungsquelle verbunden ist.

fernmeldelehrling.de

1. Die Entdeckungen Galvanis und Voltas

Im Jahre 1789 entdeckte der italienische Gelehrte **Galvani**, daß ein Froschschenkel, den er an einem kupfernen Haken aufgehängt hatte, immer dann in Zuckungen geriet, wenn der Kupferhaken gegen das regenfeuchte eiserne Balkongitter schlug. Ein anderer Italiener, der Professor der Physik **Volta** nahm sich dieser Entdeckung an und versuchte, sie zu deuten. Er ging von der Annahme aus, daß es sich um einen elektrischen Vorgang handeln mußte. Im Verlauf vieler Versuche erkannte Volta, daß es sich wirklich um elektrische Energie handelte, die die Froschschenkel aufzucken ließ. Er fand heraus, daß zur Erzeugung solcher Energie immer zwei Metalle, z. B. Kupfer und Zink, erforderlich waren, die er durch nasse Tücher voneinander getrennt hatte. Zwischen diesen beiden **verschiedenartigen** Metallen stellte Volta eine Spannung fest. Er fand weiter heraus, daß die Spannung in ihrer Größe abhängig war von der Art der verschiedenen Metalle. Nach weiteren Versuchen war er in der Lage, eine Spannungsreihe aufzustellen, die nach ihm **Voltasche Spannungsreihe** genannt wird. Die Metalle dieser Reihe entwickeln zueinander eine bestimmte Spannung, wenn man sie in einen Elektrolyten bringt.

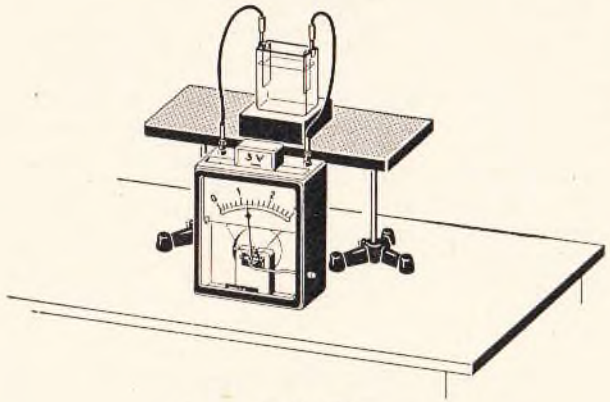
Die Voltasche Spannungsreihe ist im Laufe der technischen Entwicklung erweitert und vervollkommnet worden. In der nachfolgenden Übersicht sind die wichtigsten Metalle der Spannungsreihe aufgeführt, wobei die Spannungen gegen Wasserstoff (neutraler Stoff) angegeben sind:

Aluminium	— 1,45 Volt	Wasserstoff	± 0 Volt
Zink	— 0,77 Volt	Kupfer	+ 0,35 Volt
Eisen	— 0,43 Volt	Silber	+ 0,8 Volt
Nickel	— 0,2 Volt	Kohle	+ 0,85 Volt
Blei	— 0,14 Volt	Braunstein	+ 0,9 Volt

II. Die elektrischen Elemente

Mit Hilfe der Anordnung nach Abb. 39 wollen wir einen Voltaschen Versuch nachahmen. Wir füllen in einen Glastrog Leitungswasser und tauchen eine Zink- und eine Kupferelektrode hinein, die wir an ein Voltmeter anschließen. Nach kurzer Zeit zeigt das Instrument etwa 1 V an. Wir ersetzen nun die Kupferplatte durch eine Kohleelektrode. Das Instrument zeigt etwa 1 bis 1,5 V an. Wir wollen jetzt dem Wasser etwas Schwefelsäure zusetzen. Der Ausschlag des Instruments wird sich kaum ändern, und damit bleibt auch die Spannung fast konstant.

„Das Element"



(Abb. 39)

Der Vorgang aus der Elektrolyse ist also umkehrbar. Während bei der Elektrolyse durch die elektrische Spannung eine Zersetzung der Stoffe und eine Wanderung der Stoffteilchen verursacht wird, wird bei unserem jetzigen Versuch durch chemische Umwandlung der Stoffe eine Spannung erzeugt. Daß wirklich eine chemische Umwandlung erfolgt, kann man nach kurzer Zeit an dem stumpfen Aussehen der vorher metallisch glänzenden im Elektrolyten befindlichen Zinkplatte feststellen. Außerdem können an der Kohleelektrode aufsteigende Bläschen beobachtet werden.

Wir haben durch unseren Versuch infolge chemischer Umwandlung der Stoffe Spannung erzeugt. Wir haben ein **galvanisches Element** aufgebaut. Die Spannung, die von einem galvanischen Element erzeugt wird, nennt man **elektromotorische Kraft (EMK)**. Zwischen der bisherigen Bezeichnung für die Spannung U und der EMK besteht ein Unterschied, den wir später untersuchen wollen. Die EMK eines Elements ist abhängig von der Werkstoffart der Elektroden und von der Zusammensetzung des Elektrolyten.

1. Polarisation und Depolarisation

Wir haben bereits festgestellt, daß bei unserem Versuch nach Abb. 39 nach einiger Zeit an der Kohleelektrode Bläschen aufsteigen. Wenn wir noch länger beobachten, werden wir bemerken, daß die Spannung mehr und mehr nachläßt, während die Kohleelektrode über und über mit Bläschen besetzt wird. Diese Bläschen sind nichts anderes als Wasserstoff, der durch die elektrolytische Zersetzung entsteht. Er bildet mit der Kohleelektrode ein Element, dessen EMK der des ursprünglichen Elements entgegengesetzt ist. Diese Gegen-EMK setzt die EMK des Elements

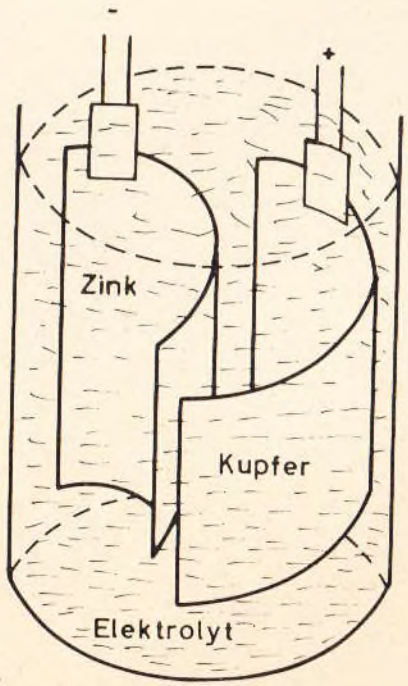
fernmeldelehrling.de

herab. Man kann das beweisen, indem man die Bläschen an der Kohleelektrode entfernt. Die Spannung ist wieder voll vorhanden, bis sich die Kohleelektrode erneut mit Bläschen vollgesetzt hat. Diesen Vorgang, der zur Bildung der Gegen-EMK führt, nennt man **Polarisation.**

Ein dauerhaftes Element kann man nur erhalten, wenn die Polarisation aufgehoben wird. Das geschieht dadurch, daß dem Wasserstoff an der positiven Elektrode Sauerstoff angeboten wird, der sich mit dem Wasserstoff zu Wasser verbindet (H_2O). Diese Befreiung der positiven Elektrode von den Wasserstoffbläschen nennt man **Depolarisation.** Stoffe, die in der Lage sind, Sauerstoff abzugeben, heben die Polarisation auf und heißen deshalb Depolarisatoren. Beim Zink-Kohle-Element (unser Versuch) besteht der Depolarisator aus Braunstein, bei anderen Elementen z. B. aus Aktivkohle.

2. Das Zink-Kupfer-Element

Die ältesten Elemente sind das Daniell-Element und das Meidinger-Element. Bei beiden befinden sich die einzelnen Elektroden noch jede für sich in ihrem eigenen Elektrolyten, Kupferblech in Kupfersulfatlösung und Zinkblech in verdünnter Schwefelsäure. Beide Elemente sind längst veraltet und werden heute nicht mehr verwendet.

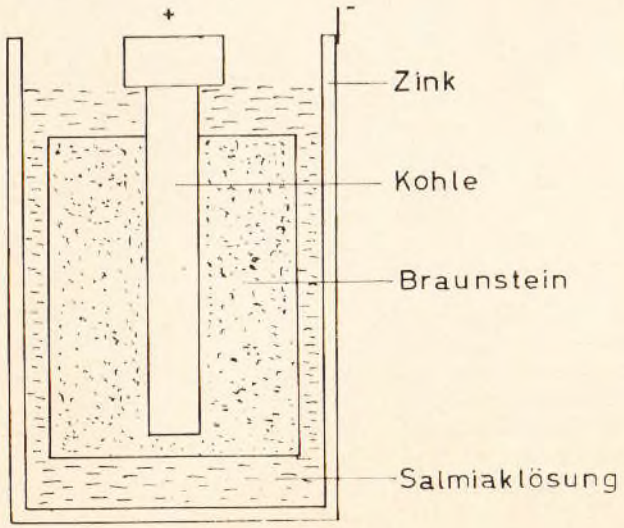


(Abb. 40)

Ein Zink-Kupfer-Element, dem man heute noch hier und da begegnet (besonders in Laboratorien) ist das Krüger-Element. Bei diesem Element befinden sich ein Zink- und ein Kupferblech in einem Glasgefäß, das als Elektrolyt in weichem Wasser gelöstes Zinksulfat enthält (Schema nach Abb. 40). In den Elektrolyten werden einige nußgroße Stücke Kupfervitriol gelegt. Sobald am Boden des Glasgefäßes durch das Kupfervitriol eine blaue Färbung hervorgerufen wird, ist das Element gebrauchsfertig. Es liefert eine EMK von 1 V. Als Depolarisator dient Kupfersulfat.

3. Das Zink-Kohle-Element

Das Zink-Kohle-Element hat gegenüber dem Zink-Kupfer-Element den Vorteil, daß es eine höhere EMK erzeugt. Nach der Voltaschen Spannungsreihe ist das Spannungsgefälle zwischen Kohle und Zink etwa 1,5 V; das Element liefert uns auch tatsächlich eine EMK von 1,5 V. Das Schema nach Abb. 41 zeigt uns den Aufbau eines sogenannten Naßelements. Man nennt dieses Element nach seinem Erfinder auch Leclanché-



(Abb. 41)

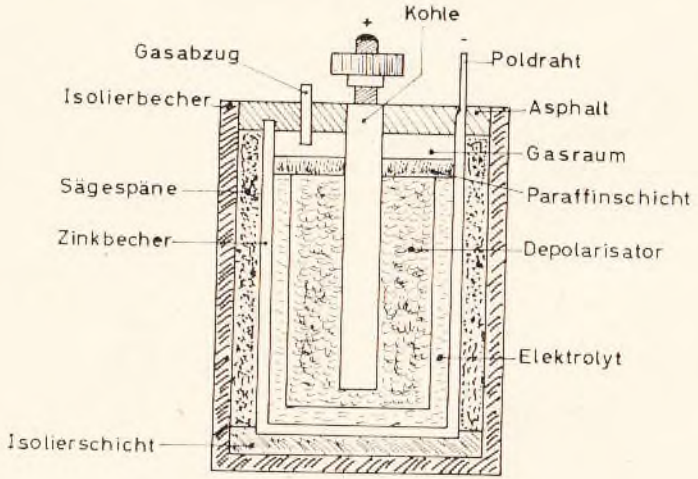
Element. Die Elektroden sind Kohle und Zink. Als Elektrolyt wird eine Salmiaklösung verwendet. Die Depolarisation erreicht man durch Braunstein, das in einem Beutel gehalten den Kohlestab umgibt.

fernmeldelehrling.de

Das Zink-Kohle-Element hat für die Fernmeldetechnik und besonders für die Verwendung bei der Deutschen Bundespost als Trockenelement Bedeutung erreicht.

4. Das Trockenelement

Den Aufbau eines Trockenelements zeigt uns Abb. 42. In dem Isolierbecher steht auf einer Isolierschicht die als Becher ausgebildete Zinkelektrode, an die ein aus der Verschlußmasse herausragender Poldraht angelötet ist. Der Kohlestab, der als Pluspol an seinem oberen aus der Verschlußmasse herausragenden Ende eine Schraubklemme besitzt, ist umgeben von einer Mischung aus Braunstein und Graphit, die von einem



(Abb. 42)

Netz aus Nesselgaze gehalten wird. Die Mischung dient als Polarisator. Der Elektrolyt ist hier keine Flüssigkeit, sondern eine mit Hilfe eines Verdickungsmittels gebundene Salmiakpaste, die sich zwischen der inneren Wandung des Zinkbechers und dem Kohlestab befindet, wobei auch der Depolarisator von ihr durchsetzt wird. Sofern der Zinkbecher nicht selbst als Gehäusewandung dient (Monozelle), ist der Zwischenraum zwischen ihm und dem Isolierbecher mit Sägespänen ausgefüllt. Über einer dünnen Paraffinschicht, die den Zinkbecher nach oben hin abschließt, befindet sich der Gasraum, aus dem die Gase mit Hilfe eines Gasabzugsröhrchens durch die abschließende Asphaltmasse hindurch entweichen können.

Luftsauerstoff-Elemente sind ähnlich aufgebaut wie die Zink-Kohle-Elemente. Als Depolarisator verwendet man jedoch an Stelle des Braunsteins Aktivkohle, die den Sauerstoff aufsaugt und mit ihm den Wasserstoff bindet. Diese Elemente trocknen leicht aus, weil sie wegen der Zufuhr des Luftsauerstoffs nicht dicht verschlossen werden dürfen. Man kann sie sehr schnell erkennen an dem zweiten Röhrchen.

III. Die Schaltung von Elementen

Wie wir gesehen haben, erzeugen die Elemente nur eine EMK bis zu 1,5 V. Diese geringe Spannung wird aber selten ausreichen. Deshalb sind wir gezwungen, mehrere Elemente zu einer Batterie zusammenzuschalten. Bevor wir das jedoch tun, müssen wir uns auch hierbei mit den Größen Spannung, Strom und Widerstand befassen.

1. Der innere Widerstand eines Elements

Genau wie ein Leiterwerkstoff den fließenden Elektronen einen Widerstand entgegensetzt, muß der Elektronenstrom im Innern eines Elements den Widerstand des Elektrolyten und den Widerstand der Elektrodenwerkstoffe überwinden. Diesen Widerstand im Innern des Elements, der auch in jeder anderen Spannungsquelle vorhanden ist, nennt man den **inneren Widerstand** (R_i).

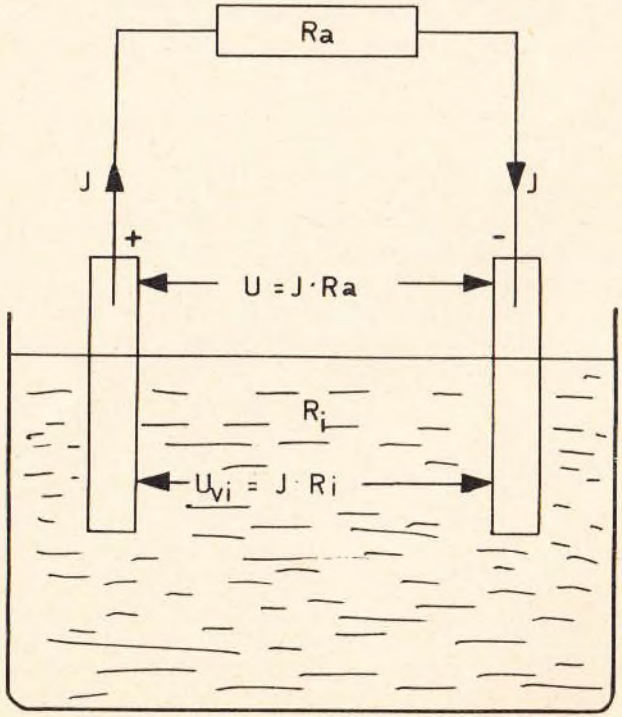
Der innere Widerstand der Zink-Kohle-Elemente schwankt je nach der Größe des Elements zwischen 0,1 bis 0,5 Ω; bei Alterung eines Elements wächst sein innerer Widerstand ganz beträchtlich.

2. Die Anwendung des Ohmschen Gesetzes

Nachdem wir wissen, daß in einem Spannungserzeuger (Element) ein innerer Widerstand wirksam ist, können wir uns auch vorstellen, daß an diesem inneren Widerstand ein Spannungsverlust auftreten muß, wenn ein Strom fließt (siehe Abschnitt B. VI. unter Spannungsabfall). Ein Strom kann aber nur fließen, wenn zwischen dem Plus- und dem Minuspol (gewöhnlich über einen Verbraucher) eine Verbindung besteht. Dieser Verbraucher ist in der Schaltung nach Abb. 43 der Widerstand R_a, den wir so nennen wollen im Gegensatz zu dem inneren Widerstand R_i. Wenn wir uns die Schaltung genauer ansehen, stellen wir fest, daß die Widerstände R_i und R_a hintereinandergeschaltet sind. Das bedeutet aber, daß sowohl über dem inneren Widerstand R_i als auch über dem Verbraucherwiderstand R_a ein Spannungsabfall auftritt, der in seiner Größe von der Höhe der *EMK* (E) und von der Größe des Gesamtwiderstandes $R_i + R_a$

fernmeldelehrling.de

abhängig ist. Über dem inneren Widerstand wird also ein Teil der *EMK* vernichtet, der andere Teil wird über dem Verbraucher als Nutzspannung wirksam. Weil diese Nutzspannung natürlich auch an den Klemmen des Elements vorhanden ist, nennt man sie **Klemmenspannung.** Sie ist unsere bekannte Spannung U, mit der wir bisher gerechnet haben. Die Spannung, die über dem inneren Widerstand R_i des Elements verlorengeht, nennen wir den inneren Spannungsverlust U_{vi} (im Gegensatz zu dem uns bereits bekannten Spannungsverlust auf Leitungen, den wir mit U_v bezeichnet haben).



(Abb. 43)

Die EMK treibt einen Strom durch den inneren Widerstand R_i des Elements und durch den Verbraucherwiderstand R_a. Ist der Stromkreis **nicht** geschlossen, so messen wir an den Klemmen des Elements den Wert der *EMK*, weil dann kein Strom fließt und über dem Widerstand R_i kein Spannungsverlust auftreten kann:

$$U_{vi} = 0 \cdot R_i = 0$$

Schließen wir den Stromkreis, fließt durch R_i ein Strom, der den Spannungsverlust U_{vi} verursacht:

$$U_{vi} = I \cdot R_i$$

Die Nutzspannung über dem Widerstand R_a errechnet sich wie folgt:

$$U = I \cdot R_a,$$

wobei der Widerstand der Leitungen nicht berücksichtigt werden soll. Der Spannungsverlust U_{vi} und die Nutzspannung U ergeben zusammen die *EMK* (E):

$$E = U + U_{vi}$$

Wenn wir U ebenfalls als Spannungsabfall betrachten, ist $U = I \cdot R_a$ und $U_{vi} = I \cdot R_i$, man kann also die Formel auch erweitern:

$$E = I \cdot R_a + I \cdot R_i$$

Die elektromotorische Kraft (EMK) eines Elemets ist gleich der Summe der Spannungsabfälle über dem äußeren und dem inneren Widerstand.

Nach dem Ohmschen Gesetz können wir leicht den Strom I errechnen:

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

in dieser Formel sind U immer die Klemmenspannung und R immer der äußere Widerstand. Wenn wir den Stromwert genau errechnen wollen, müssen wir den äußeren und den inneren Widerstand zusammenzählen (aus Abb. 43 ist die Hintereinanderschaltung der beiden Widerstände klar ersichtlich):

$$R_{ges} = R_a + R_i$$

Nun müssen wir natürlich an Stelle der Klemmenspannung U die EMK (E) einsetzen, der Strom ergibt sich dann:

$$I = \frac{E}{R_a + R_i} = \frac{E}{R_{ges}}$$

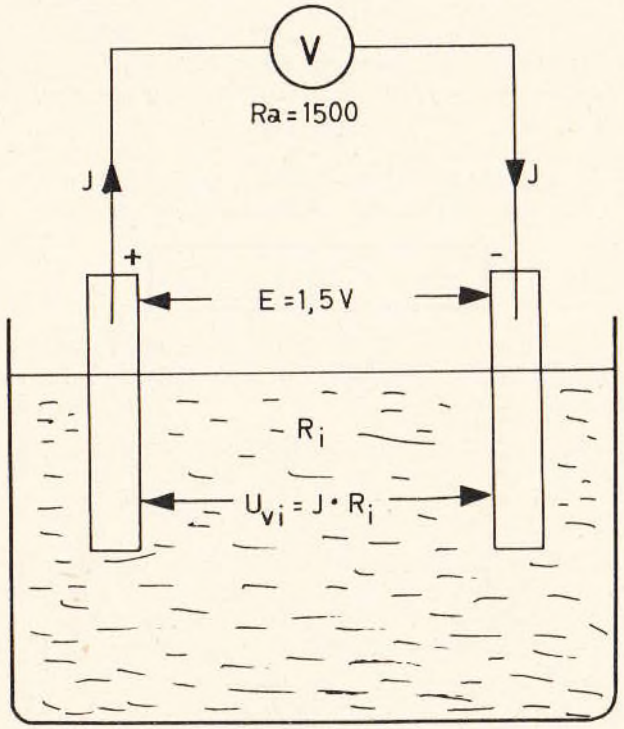
Zur besseren Übersicht sind nachfolgend die Formeln, die wir bei der Untersuchung der Elemente kennengelernt haben, noch einmal aufgeführt:

$E = U + U_{vi}$ daraus ergibt sich durch Umstellung
$U = E - U_{vi}$ bzw.
$U_{vi} = E - U$

fernmeldelehrling.de

$E = I \cdot R_a + I \cdot R_i$ und daraus durch Umstellung

$$I = \frac{E}{R_a + R_i}$$



(Abb. 44)

1. Beispiel:

Ein Zink-Kohle-Element hat bei einem inneren Widerstand von 0,5 Ω eine EMK von 1,5 V. An die Klemmen des Elements wird nach Abb. 44 ein Spannungsmesser mit einem Widerstand von 1500 Ω geschaltet. Wie groß sind der Strom, der Spannungsverlust und die Klemmenspannung?

Gegeben: $R_i = 0{,}5\ \Omega$; $E = 1{,}5$ V; $R_a = 1500\ \Omega$

Gesucht: I, U_{vi}, U

Lösung:

$$I = \frac{E}{R_a + R_i} = \frac{1{,}5}{1500 + 0{,}5} = \frac{1{,}5}{1500{,}5} = 0{,}001 \text{ A}$$

$$U_{vi} = I \cdot R_i = 0{,}001 \cdot 0{,}5 = 0{,}0005 \text{ V}$$

$$U = I \cdot R_a = 0{,}001 \cdot 1500 = 1{,}5 \text{ V}$$

2. Beispiel:

An die Klemmen des Elements im 1. Beispiel wird jetzt ein Widerstand von 5 Ω angeschlossen. Wie groß sind die Werte für I, U_{vi} und U?

Gegeben: $R_i = 0{,}5\ \Omega$; $E = 1{,}5$ V; $R_a = 5\ \Omega$

Gesucht: I, U_{vi}, U

Lösung:

$$I = \frac{E}{R_a + R_i} = \frac{1{,}5}{5 + 0{,}5} = \frac{1{,}5}{5{,}5} = 0{,}272 \text{ A}$$

$$U_{vi} = I \cdot R_i = 0{,}272 \cdot 0{,}5 = 0{,}136 \text{ V}$$

$$U = I \cdot R_a = 0{,}272 \cdot 5 = 1{,}36 \text{ V}$$

3. Beispiel:

Der äußere Widerstand soll gleich dem inneren Widerstand, d. h. $R_a = R_i$ sein. Wie ändern sich die Werte für I, U_{vi} und U?

Gegeben: $R_i = 0{,}5\ \Omega$; $E = 1{,}5$ V; $R_a = 0{,}5\ \Omega$

Gesucht: I, U_{vi}, U

Lösung:

$$I = \frac{E}{R_a + R_i} = \frac{1{,}5}{0{,}5 + 0{,}5} = \frac{1{,}5}{1} = 1{,}5 \text{ A}$$

$$U_{vi} = I \cdot R_i = 1{,}5 \cdot 0{,}5 = 0{,}75 \text{ V}$$

$$U = I \cdot R_a = 1{,}5 \cdot 0{,}5 = 0{,}75 \text{ V}$$

4. Beispiel:

Wir schließen das Element kurz, d. h. wir verbinden die Klemmen des Elements unmittelbar miteinander, der äußere Widerstand hat den Wert Null. Wie groß sind nunmehr I, U_{vi} und U?

Gegeben: $R_i = 0{,}5\ \Omega$; $E = 1{,}5$ V; $R_a = 0\ \Omega$

Gesucht: I, U_{vi}, U

Lösung:

$$I = \frac{E}{R_a + R_i} = \frac{1{,}5}{0{,}5 + 0} = \frac{1{,}5}{0{,}5} = 3 \text{ A}$$

$$U_{vi} = I \cdot R_i = 3 \cdot 0{,}5 = 1{,}5 \text{ V}$$

$$U = I \cdot R_a = 3 \cdot 0 = 0 \text{ V}$$

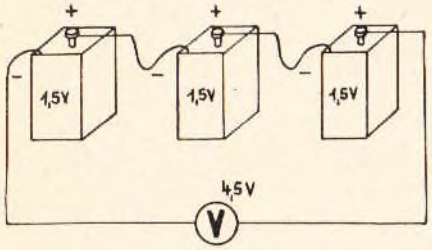
Aus den vier Beispielen ziehen wir folgende Schlüsse:

1. Ist in einem geschlossenen Stromkreis der äußere Widerstand im Vergleich zum inneren Widerstand einer Spannungsquelle sehr groß, dann ist die Klemmenspannung gleich der EMK; U_{vi} kann vernachlässigt werden.
2. Bei einem kleinen äußeren Widerstand steigt die Stromstärke und verursacht einen größeren Spannungsverlust über R_i. Die Klemmenspannung U ist kleiner als die EMK der Spannungsquelle.
3. Ist $R_a = R_i$, so ist der Spannungsverlust gleich der Klemmenspannung. Jeder Wert von U_{vi} oder U ist jedoch gleich der Hälfte des Wertes der EMK der Spannungsquelle.
4. Bei Kurzschluß ($R_a = 0$) wird die gesamte EMK über dem inneren Widerstand der Spannungsquelle verbraucht. Die Klemmenspannung hat den Wert Null, und der Spannungsverlust ist also gleich der EMK.

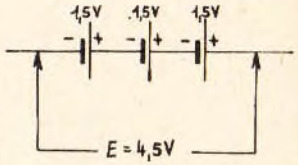
fernmeldelehrling.de

3. Die Hintereinanderschaltung

Bei der Hintereinanderschaltung von Elementen (Abb. 45 und 46) wird der Pluspol des ersten mit dem Minuspol des zweiten, der Pluspol des zweiten mit dem Minuspol des dritten Elements usw. verbunden. Dadurch



(Abb. 45)



(Abb. 46)

beträgt die Gesamt-EMK den Wert, der sich aus der Summe der Einzelwerte ergibt. In eine Formel gekleidet erhalten wir

$$E_{ges} = p \cdot E$$

wobei p die Anzahl der hintereinandergeschalteten Elemente angibt, und E die Einzel-EMK bedeutet. In den Abb. 45 und 46 sind drei Elemente hintereinandergeschaltet, es ergibt sich also bei einer EMK von je 1,5 V eine Gesamt-EMK von $3 \cdot 1{,}5 = 4{,}5$ V.

Da bei der Hintereinanderschaltung von Elementen auch die inneren Widerstände hintereinandergeschaltet sind, erhöht sich auch der gesamte Widerstand der Anordnung auf

$$R_{i(ges)} = p \cdot R_i$$

Wenn also in der Anordnung nach Abb. 45 und 46 jedes einzelne Element einen inneren Widerstand von 0,3 Ω hat, so würde der gesamte innere Widerstand $3 \cdot 0{,}3 = 0{,}9$ Ω betragen.

Beispiel:

Vier Zink-Kohle-Elemente werden zu einer Batterie zusammengeschaltet (Hintereinanderschaltung). Die inneren Widerstände der einzelnen Elemente betragen 0,5 Ω; 0,4 Ω; 0,3 Ω; und 0,6 Ω. Die EMK hat je Element einen Wert von 1,5 V. Wie groß ist die EMK der Batterie, und wie groß ist ihr innerer Widerstand?

Gegeben: $E = 1{,}5$ V; $R_{i1} = 0{,}5\,\Omega$; $R_{i2} = 0{,}4\,\Omega$; $R_{i3} = 0{,}3\,\Omega$; $R_{i4} = 0{,}6\,\Omega$; $p = 4$

Gesucht: E_{ges} $R_{i(ges)}$

Lösung: $E_{ges} = p \cdot E = 4 \cdot 1{,}5 = 6$ V

$R_{i1} + R_{i2} + R_{i3} + R_{i4} =$

$0{,}5 + 0{,}4 + 0{,}3 + 0{,}6 = 1{,}8\,\Omega$

Der in einem geschlossenen Stromkreis fließende Strom kann nach dem Ohmschen Gesetz leicht errechnet werden. Nach der Formel ist

$$I = \frac{E}{R_a + R_i}$$

Diese Formel ist nun natürlich der Batterieschaltung anzupassen, es wird

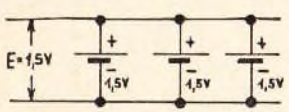
$$I = \frac{p \cdot E}{R_a + p \cdot R_i}$$

Wir erweitern unser Beispiel durch einen äußeren Widerstand von $R_a = 58\,\Omega$. Wir können hier natürlich nicht einen Wert für p einsetzen, sondern müssen, da die inneren Widerstände nicht gleich sind, ihre Summe nehmen. Es ergibt sich also für I

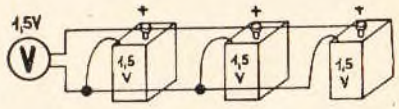
$$I = \frac{p \cdot E}{R_a + p \cdot R_i} = \frac{6}{58 + 1{,}8} = \text{rd. } \frac{6}{60} = 0{,}1\text{ A} = 100\text{ mA}$$

4. Die Nebeneinanderschaltung

Bei der Nebeneinanderschaltung von Elementen werden die gleichnamigen Pole miteinander verbunden, also Minuspol mit Minuspol und Pluspol mit Pluspol (Abb. 47 und 48).



(Abb. 47)



(Abb. 48)

Bei der Nebeneinanderschaltung (Parallelschaltung) von Elementen ist die EMK der Anordnung gleich der EMK eines einzelnen Elements.

Die inneren Widerstände der einzelnen Elemente werden bei der Nebeneinanderschaltung ebenfalls parallel geschaltet. Aus der Parallelschaltung von Widerständen wissen wir, daß dadurch der gesamte innere Widerstand der Anordnung sich verringert. Haben alle Elemente den gleichen inneren Widerstand, so gilt

$$R_{i(ges)} = \frac{R_i}{p}$$

Beispiel:

Fünf Zink-Kohle-Elemente werden nebeneinander geschaltet. Der innere Widerstand jedes Elements beträgt 0,5 Ω. Wie groß sind die Gesamt-EMK und der gesamte innere Widerstand?

Gegeben: $E = 1{,}5$ V; $R_i = 0{,}5\,\Omega$; $p = 5$

Gesucht: E_{ges} $R_{i(ges)}$

fernmeldelehrling.de

Lösung: Die EMK der Anordnung ist gleich der EMK des einzelnen Elements, nämlich 1,5 V. Der innere Widerstand der Anordnung errechnet sich

$$R_{i\ (ges)} = \frac{R_i}{p} = \frac{0{,}5}{5} = 0{,}1\ \Omega$$

Mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes können wir nunmehr auch für die Nebeneinanderschaltung den Strom errechnen, der in einem geschlossenen Stromkreis fließt, nämlich

$$I = \frac{E}{R_a + \frac{R_i}{p}}$$

Wir wollen in unserem Beispiel einen äußeren Widerstand von $R_a = 1{,}15\ \Omega$ annehmen. Dann errechnet sich der Strom zu

$$I = \frac{E}{R_a + \frac{R_i}{p}} = \frac{1{,}5}{1{,}15 + \frac{0{,}5}{5}} = \frac{1{,}5}{1{,}25} = 1{,}2\ A$$

Während wir durch die Hintereinanderschaltung von Elementen eine Erhöhung der EMK erreicht haben, wenden wir die Nebeneinanderschaltung an, wenn die Batterie stark belastet werden soll, d. h. wenn ein hoher Strom im Stromkreis fließen muß.

5. Die Gruppenschaltung

Wollen wir gleichzeitig eine große EMK **und** einen hohen Stromfluß erreichen, so wenden wir die Gruppenschaltung an (Abb. 49). Die EMK einer solchen Batterie ist gleich der Gesamt-EMK einer Reihenschaltung:

$$E_{ges} = p \cdot E$$

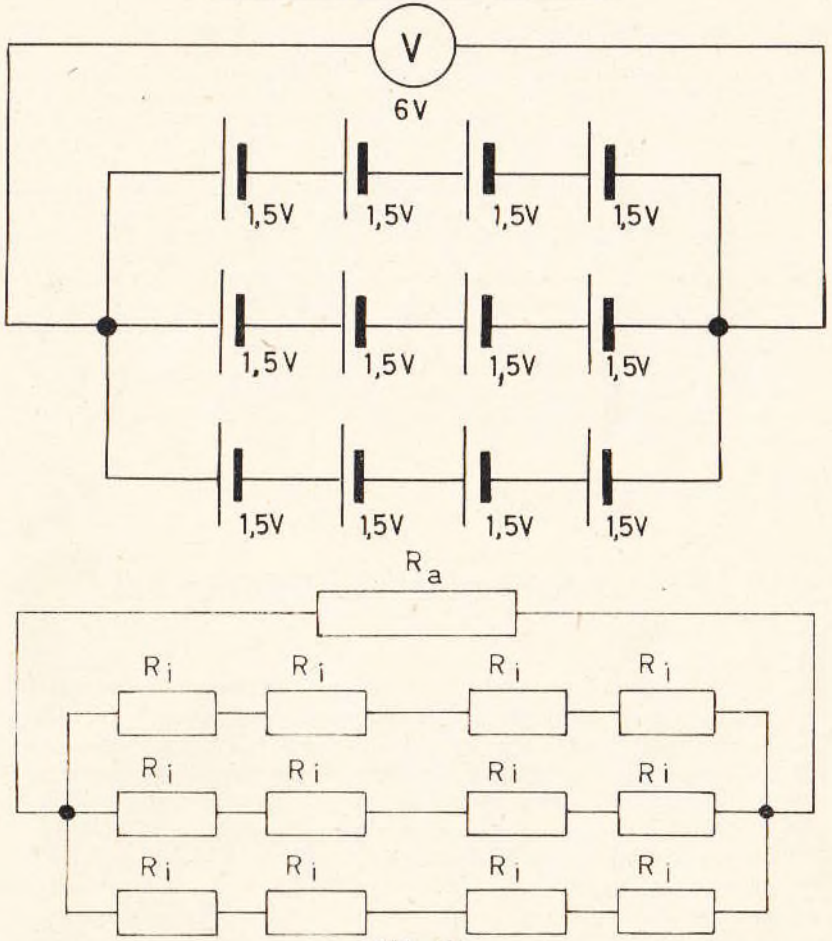
Da p Elemente hintereinandergeschaltet sind, ist der innere Widerstand dieser Reihe $R = p \cdot R_i$. Nun liegen die Reihen mit der gleichen Anzahl Elemente nebeneinander. Bezeichnen wir die Anzahl der nebeneinanderliegenden Reihen mit p, so errechnet sich der gesamte innere Widerstand der Anordnung wie folgt:

$$R_{i(ges)} = \frac{R}{n} = \frac{p \cdot R_i}{n}$$

Wir wollen auch gleich noch den in einem geschlossenen Stromkreis fließenden Strom berechnen. Nach dem Ohmschen Gesetz muß sich in einer Gruppenschaltung unter Berücksichtigung des bisher Gesagten ergeben:

$$I = \frac{p \cdot E}{R_a + \frac{p \cdot R_i}{n}}$$

„Gruppenschaltung von Elementen"



(Abb. 49)

Beispiel:
Wir wollen uns der Anordnung nach Abb. 49 bedienen. Der Strom ist zu berechnen.

Gegeben: $E = 1{,}5\ V$; $R_i = 0{,}3\ \Omega$; $R_a = 11{,}6\ \Omega$; $p = 4$; $n = 3$

Gesucht: E_{ges} $R_{i\ (ges)}$ I

Lösung: Die Gesamt-EMK ist die EMK einer Reihe:

$$E_{ges} = p \cdot E = 4 \cdot 1{,}5 = 6\ V$$

$$R_{i\ (ges)} = \frac{p \cdot R_i}{n} = \frac{4 \cdot 0{,}3}{3} = 0{,}4\ \Omega$$

$$I = \frac{p \cdot E}{R_a + \frac{p \cdot R_i}{n}} = \frac{6}{11{,}6 + 0{,}4} = \frac{6}{12} = 0{,}5\ A$$

fernmeldelehrling.de

6. Übungsaufgaben

a) Was versteht man unter Elektrolyse? b) Erkläre die Begriffe Anode und Kathode! c) Welche Bedeutung hat die Voltasche Spannungsreihe? d) Was versteht man unter Polarisation und Depolarisation? e) Erkläre den Aufbau eines Trockenelements! f) Eine Anodenbatterie soll bei der EMK eines Einzelelements von 1,5 V eine Gesamt-EMK von 90 V hergeben. Der Außenwiderstand soll 2000 Ohm betragen und der innere Widerstand eines jeden Elements 0,2 Ohm. Wieviel Elemente sind in Reihe zu schalten, und welcher Strom fließt in der Anordnung? g) Drei Zink-Kohle-Elemente sind hintereinandergeschaltet. Der innere Widerstand eines jeden Elements soll 0,5 Ohm betragen. Der äußere Widerstand hat einen Wert von 5 Ohm. Berechne E_{ges}, I, U_{vi} und U! h) Vier Zink-Kohle-Elemente sind nebeneinandergeschaltet. In dem Stromkreis liegt ein äußerer Widerstand von 10 Ohm. Wie groß sind E_{ges}, I, U_{vi} und U? i) Welche Stromstärke kann zwei nebeneinandergeschalteten Elementen entnommen werden, wenn die EMK jedes Elements 1,5 V und deren innerer Widerstand 0,2 Ohm beträgt? Der Außenwiderstand hat einen Wert von 1,15 Ohm. k) Welche Stromstärke kann einer Gruppenschaltung, bestehend aus 4 nebeneinandergeschalteten Gruppen mit je 5 in Reihe geschalteten Elementen entnommen werden, wenn die Elemente eine EMK von 1,5 V und einen inneren Widerstand von 0,2 Ohm haben und an einen Außenwiderstand von 2,7 Ohm angeschlossen sind?

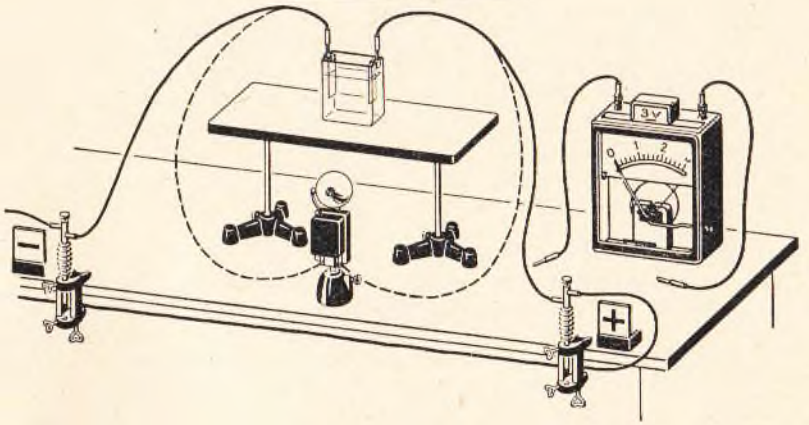
E. Der Sammler (Akkumulator)

Die bisher besprochenen Elemente nennt man **Primärelemente,** weil sie unmittelbar durch chemische Umwandlung der Stoffe eine EMK liefern. Neben diesen Primärelementen gibt es auch noch die sogenannten **Sekundärelemente,** die auch **Akkumulatoren** oder **Sammler** genannt werden. Bei diesen Elementen erfolgt eine chemische Umsetzung der Stoffe erst durch die Zuführung elektrischer Energie; hiernach erst können die Elemente während der Rückbildung der Stoffe eine EMK abgeben. Zwei Elektroden aus dem gleichen Stoff werden durch die Einwirkung des elektrischen Stroms so umgeformt, daß nach diesem chemischen Vorgang die Stoffe unterschiedlicher Art sind. Den chemischen Vorgang nennt man **Ladung.** Die verschiedenen Elektroden haben jetzt gegeneinander eine Spannung (EMK) und können nunmehr elektrische Energie abgeben. Sie tun das so lange, wie die Rückbildung der Elektroden in ihre ursprüngliche Stoffzusammensetzung andauert. Die Rückbildung nennt man **Entladung.**

Bei Sekundärelementen wird erst einmal elektrische Energie in chemische Energie umgesetzt (Ladevorgang). Erst danach kann von den Elementen elektrische Energie abgegeben werden, wobei wieder eine Umwandlung chemischer Energie in elektrische erfolgt (Entladevorgang).

I. Der Bleisammler

„Der Bleisammler"

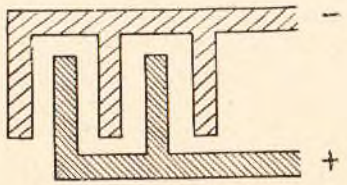


(Abb. 50)

In unserem Versuch nach Abb. 50 stellen wir zwei Bleiplatten in verdünnte Schwefelsäure (1 : 10). Schließen wir an die Platten ein Voltmeter an, so wird es keine Spannung anzeigen (vorausgesetzt, daß die Platten ganz gleichartig sind.)Wir legen jetzt an die Platten eine Gleichspannung von 4 Volt und beobachten, daß an den Platten Bläschen aufsteigen und daß die am positiven Pol der Gleichspannungsquelle liegende Platte braun wird. Nach etwa zwei Minuten schalten wir die Spannungsquelle ab und legen jetzt wieder das Voltmeter an die Platten; es wird einen Ausschlag bis auf etwa 2 Volt anzeigen. Schließen wir an die Platten eine Klingel an, so wird sie einige Zeit läuten. Wir haben also die Behauptungen aus dem vorangegangenen Abschnitt mit dem Versuch bewiesen.

1. Die Bauart der Bleisammler

Ein Sammler besteht nicht aus nur **zwei** Platten, vielmehr sind **mehrere** positive und negative Platten jeweils so geschaltet, daß sich immer eine



(Abb. 51)

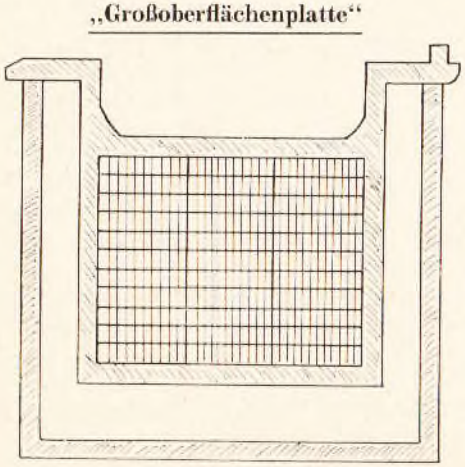
fernmeldelehrling.de

positive und eine negative Platte gegenüberstehen (Abb. 51), wobei die äußeren Platten stets negativ sind. Zwei in einem Glasgefäß befindliche Plattensätze bezeichnet man als **Sammlerzelle.** Die EMK einer Zelle beträgt immer 2 V.

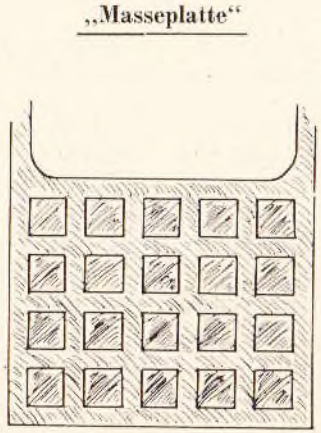
Die **positive Platte** wird als sogenannte **Großoberflächenplatte** hergestellt. Durch eine Riefelung erreicht man eine große Oberfläche im Verhältnis zu den geringen Abmaßen der Platte. Die aus einem Sammler entnehmbare Stromstärke ist von der Oberflächengröße der Platte abhängig. Die wirksame Masse der positiven Platte besteht aus Weichblei, das durch elektrochemische Formierung mit der wirksamen Schicht (Bleidioxyd, PbO_2) versehen wird (Abb. 52).

Die **negative Platte,** auch **Masseplatte** genannt, ist als Gitterplatte ausgebildet. Sie besteht aus einem fensterartigen Rahmen aus Hartblei; die Hohlräume sind mit der wirksamen Masse ausgestrichen (Abb. 53).

Die einzelnen Plattensätze werden in ein Glasgefäß eingebracht, das für jede Platte eine Führungsnut aufweist, damit sich die Platten nicht berühren können. Das Gefäß ist außerdem so ausgebildet, daß die Platten



(Abb. 52)



(Abb. 53)

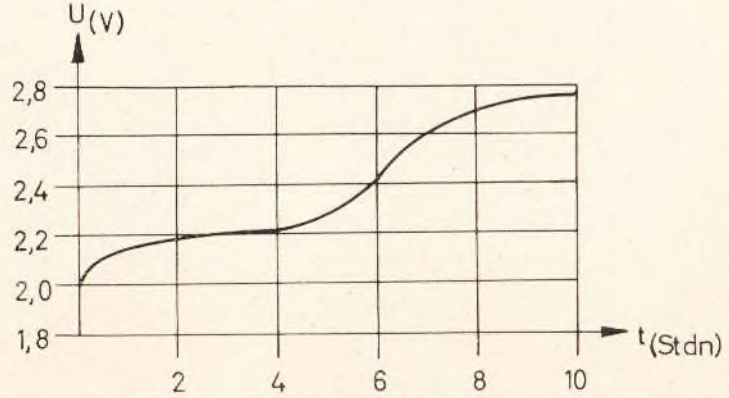
nicht auf den Boden aufstoßen. In dem Zwischenraum zwischen Platten und Gefäßboden kann sich der Schlamm herausfallender Masseteilchen absetzen, ohne die Platten miteinander zu verbinden und dadurch einen Kurzschluß zu verursachen.

Als **Elektrolyt** verwendet man verdünnte Schwefelsäure. Die Säuredichte muß ständig kontrolliert werden. Im allgemeinen werden die Batterien

mit den einzelnen Sammlerzellen von Firmen an Ort und Stelle aufgebaut und in Betrieb genommen. Sollte jedoch einmal verdünnte Schwefelsäure angesetzt werden müssen, so ist unbedingt darauf zu achten, daß man immer nur die Säure in das destillierte Wasser gießen darf und nicht umgekehrt, weil die Lösung dann stark spritzt und Kleidung und Körperteile (Augen) gefährdet sind. Die Wartung an der Batterie wird sich aber meistens auf die Kontrolle der Säuredichte und auf das Nachfüllen destillierten Wassers beschränken. Säure braucht nicht nachgefüllt zu werden, weil sie nicht verbraucht wird.

2. Ladung und Entladung

Das Laden einer Batterie (Sammelschaltung mehrerer Sammler) erfolgt, indem man den Pluspol der Batterie mit dem Pluspol und den Minuspol der Batterie mit dem Minuspol einer regelbaren Gleichstromquelle verbindet. Den Gleichstrom liefert in den meisten Fällen ein Ladegerät, das mit einem Gleichrichter ausgerüstet ist, der die aus dem Lichtnetz entnommene und mit Hilfe eines Transformators umgesetzte Wechselspannung gleichrichtet. Außerdem ist das Ladegerät mit einem Voltmeter und einem Amperemeter ausgestattet, mit deren Hilfe der Ladungszustand laufend überwacht werden kann. Die Ladestromstärke wird von den Batterie-Herstellerfirmen vorgeschrieben und muß genau eingehalten werden. Während des Ladens steigt die EMK von etwa 1,8 V schnell auf etwa 2,2 V und dann langsamer auf 2,4 V (Abb. 54). Bei diesem Wert



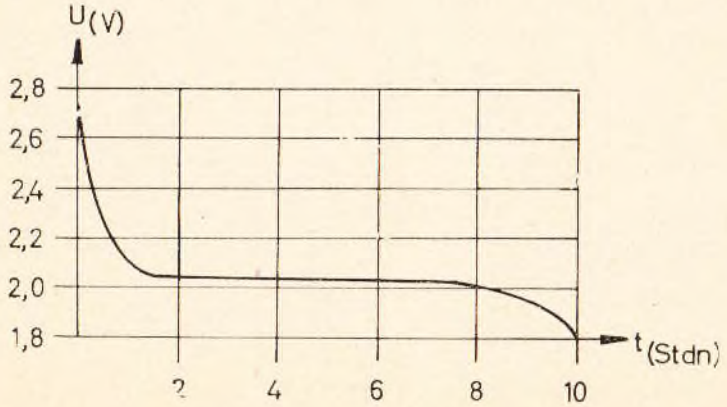
(Abb. 54)

beginnt die Säure heftig zu gasen (kochen). Die EMK steigt zum Ende der Ladung schnell auf etwa 2,7 bis 2,8 V. Das Gasen entsteht durch das Ent-

fernmeldelehrling.de

weichen der Wasserstoff- und Sauerstoffbläschen, die sich bei der Ladung bilden. Dadurch wird die Säuredichte erhöht. Man kann also auch an der Dichte der Säure den Ladungszustand der Batterie erkennen; sie soll bei voll geladenen Sammlern 1,2 bis 1,21 g/cm³ betragen (bei Autoakkus 1,24 g/cm³). Den Wert der Säuredichte mißt man mit dem Säuremesser (Aräometer). Der Ladezustand eines Sammlers ist außerdem noch an der durch das Glasgefäß hindurch sichtbaren Farbe der Platten zu erkennen. Die Plusplatten zeigen bei voll aufgeladener Batterie eine tief dunkelbraune, die Minusplatten eine hellgraue Farbe.

Bei der **Entladung** sinkt die EMK des Sammlers schnell auf 2 V ab (Abb. 55) und bleibt dann längere Zeit konstant. Sinkt die EMK auf den von der Herstellerfirma angegebenen tiefsten Wert, so muß unverzüglich mit der Entladung aufgehört werden, weil sonst die Platten zerstört würden. Der Tiefstwert beträgt meist 1,8 V. Bei diesem Entladezustand zeigt die positive Platte eine hellere Farbe. Der in ihr gesammelte Sauerstoff verbindet sich mit dem Wasserstoff zu Wasser. Dadurch wird



(Abb. 55)

die Säure verdünnt, die Säuredichte sinkt. Die negative Platte wird dunkelgrau. Nunmehr muß der Sammler sofort wieder aufgeladen werden. Man soll Batterien nie längere Zeit in entladenem Zustand stehen lassen, weil dann die Gefahr besteht, daß die Platten unbrauchbar werden.

Die beendete Ladung eines Bleisammlers ist erkennbar:

a) an der Höhe der EMK (2,7 bis 2,8 V)
b) an der Säuredichte (1,2 bis 1,21 g/cm³)
c) an der Farbe der Platten (+Platte tiefdunkelbraun, —Platte hellgrau)

Der entladene Zustand eines Bleisammlers ist erkennbar:

a) an der Höhe der EMK (1,8 V)
b) an der Säuredichte (1,18 g/cm³)
c) an der Farbe der Platten (+Platte rotbraun, —Platte dunkelgrau)

3. Die Aufnahmefähigkeit

Die Aufnahmefähigkeit oder Kapazität eines Sammlers ist abhängig von der Oberflächengröße seiner Platten. Die Aufnahmefähigkeit wird in Amperestunden (Ah) gemessen, auf Seite 21 hatten wir bereits von Amperesekunden als von einem Maß für die Elektrizitätsmenge gesprochen. Ein Sammler, der eine Kapazität von 10 Ah hat, hat also eine Elektrizitätsmenge von $10 \cdot 3600 = 36000$ Amperesekunden oder Coulomb aufgespeichert. Diese Elektrizitätsmenge kann während der Entladung wieder entnommen werden. Dabei ist es ohne Bedeutung, ob in 10 Stunden 1 A oder in 20 Stunden 0,5 entnommen werden.

Das Produkt aus der Stromstärke und der Zeit ergibt die Kapazität des Sammlers:

$$K = I \cdot t$$

wobei I in Ampere und t in Stunden anzusetzen sind. Je höher die entnommene Stromstärke ist, um so kleiner ist die Kapazität des Sammlers. Die Herstellerfirmen geben deshalb die Kapazität für eine bestimmte Entladedauer an, z. B. 60 Ah zehnstündig.

Die gespeicherte Elektrizitätsmenge hat der Sammler bei einer bestimmten Ladestromstärke innerhalb der Ladezeit aufgenommen; man kann also sagen, dem Sammler sind Amperestunden (Ah) zugeführt worden. Vergleicht man nun die vom Sammler abgegebenen Ah mit den ihm zugeführten Ah, so gibt das Verhältnis den Amperestundenwirkungsgrad des Sammlers an:

$$\eta_{Ah} = \frac{\text{Entlade-Ah}}{\text{Lade-Ah}}$$

Der Amperestundenwirkungsgrad eines Sammlers liegt bei 0,9.

fernmeldelehrling.de

Der Wattstundenwirkungsgrad ergibt sich aus dem Verhältnis der abgegebenen zur aufgenommenen Arbeit (siehe auch Seite 64):

$$\eta_{Wh} = \frac{\text{abgegebene Wh}}{\text{aufgenommene Wh}}$$

Der Wattstundenwirkungsgrad liegt bei 0,75.

II. Der Stahlsammler

Ein Sammler, der in der Flugtechnik, in Elektrofahrzeugen, für Notbeleuchtungen und für elektrische Grubenlampen verwendet wird, ist der Stahlsammler. In einem Gehäuse aus vernickeltem Stahlblech sind die Elektroden untergebracht; die positive Elektrode enthält in einem feingelochten vernickelten Stahlblech als wirksame Masse Nickelhyroxyd, die negative Elektrode in sogenannten Röhrchenplatten fein verteiltes Eisen (Nickel-Eisen-Sammler) oder Cadmium (Nickel-Cadmium-Sammler). Als Elektrolyt wird Kalilauge verwendet (Laugendichte etwa 1,2 g/cm³).

Der Sammler liefert eine EMK von 1,2 V. Er muß neu aufgeladen werden, sobald die EMK unter 1 V sinkt.

III. Übungsaufgaben

a) Weshalb lädt man einen Sammler mit Gleichstrom und nicht mit Wechselstrom? **b)** Beschreibe die +Platte und die —Platte eines Bleisammlers. **c)** An welchen Merkmalen erkennt man, daß ein Sammler entladen ist? **d)** Welchen Nachteil hat ein Element gegenüber dem Sammler? **e)** In einer Firmenangabe für eine 12-V-Batterie wird die Kapazität mit 60 Ah angegeben. Wie groß ist die Stromstärke, die der Batterie bei zehnstündiger Entladung entnommen werden kann? **f)** Ein Sammler hat eine Kapazität von 50 Ah 10stündig. Ihm werden in 11 Stunden 5 A je Stunde entnommen. Wie groß ist sein Wirkungsgrad? **g)** Eine Batterie hat 20 Sammlerzellen, wie hoch ist ihre EMK? **h)** Welche EMK liefert ein Nickel-Cadmium-Sammler? **i)** Welcher Elektrolyt wird im Stahlsammler verwendet?

F. Spannungserzeugung durch Wärme, Licht und Druck

Die Möglichkeiten der Spannungserzeugung durch Wärme, Licht und Druck sollen nur der Vollständigkeit wegen erwähnt werden. Sie haben ihre Bedeutung bei wissenschaftlichen Untersuchungen und Messungen. In der Fernmeldetechnik, soweit sie den üblichen Anforderungen entsprechen, sind sie vorerst noch von untergeordneter Bedeutung.

Ein **Thermoelement** erzeugt Spannung durch Wärme. Eine Lötstelle zweier Drähte aus verschiedenen Metallen wird erwärmt. Verbindet man die kalten Enden der Metalle mit einem Strommesser, so zeigt er einen Ausschlag. Wo ein Strom fließt, muß auch eine Spannung vorhanden sein. Diese Spannung ist jedoch sehr klein, sie wird nach Millivolt gemessen. Auf Grund dieser Erkenntnis kann man mit Hilfe eines **Pyrometers,** das aus einem Thermoelement und einem Millivoltmeter besteht, Temperaturen sehr genau messen.

Beim Auftreffen von Lichtstrahlen auf bestimmte Stoffe **(Photozelle)** entsteht ein elektrischer Strom. Starke Lichtbündel verursachen einen stärkeren Strom als schwache. Jedoch sind die Stromstärken so schwach, daß sie nach µA gemessen werden. Anwendung der Lichtelektrizität beim elektrischen Belichtungsmesser, beim Film, Fernsehen u. a. m.

Druck- oder Piëzoelektrizität entsteht bei mechanischem Druck auf bestimmte Kristalle (Quarz, Turmalin u. a.). Die EMK ist sehr klein, sie wird nach Mikrovolt gemessen und ist abhängig von der Stärke des aufgewandten Drucks.

G. Das elektrische Feld

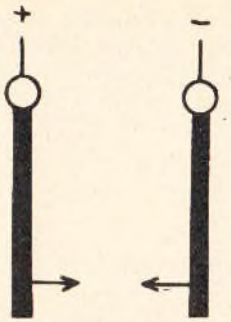
Unter A. II. 1. (Reibungselektrizität) haben wir eine elektrische Ladung kennengelernt, die wir mit Hilfe eines Elektrometers gemessen haben. Die Ladung hatten wir durch Reibung (Hartgummistab/Wollappen) erzeugt und auf **einen** Leiter gebracht. Wir wollen uns jetzt mit den Erscheinungen beschäftigen, wie sie durch eine elektrische Ladung zwischen **zwei** Leitern hervorgerufen werden.

I. Der Nachweis des Spannungszustandes

In der Abb. 56 sind im Schema zwei leicht bewegliche senkrecht aufgehängte Leiter dargestellt, deren Enden sich nicht berühren. Wird an die befestigten Enden mit Hilfe eines Bandgenerators eine hohe Spannung gelegt, so findet zwischen den Leitern eine Elektronenbewegung statt, d. h. zwischen den Leitern herrscht eine Spannung. Diese Spannung bewirkt, daß die beiden Leiter sich **aufeinander zu bewegen** (Pfeile in Abb. 56). Die Bewegung ist um so stärker, je höher die Spannung ist.

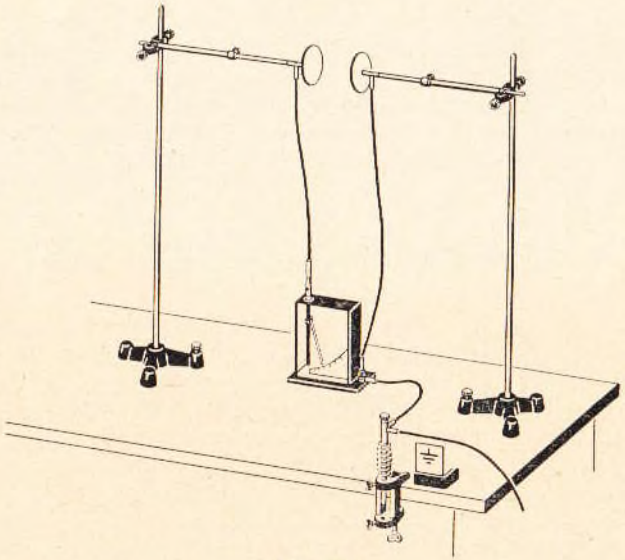
Die Spannung kann man messen mit Hilfe des Elektrometers. Wir bauen einen Versuch nach Abb. 57 auf.

fernmeldelehrling.de



(Abb. 56)

An die einander gegenüberstehenden Platten (Leiter) legen wir eine hohe Gleichspannung (Bandgenerator). Das an die Platten geschaltete Elektrometer zeigt einen Ausschlag. Nun unterbrechen wir die Zuführung zur Spannungsquelle und betrachten das Elektrometer. Wir sehen, daß auch jetzt noch zwischen den Platten eine Spannung vorhanden ist, weil das Elektrometer immer noch einen Ausschlag hat. Vergrößern wir jetzt den Abstand der Platten, ohne jedoch die Spannung wieder anzulegen, so wird das Elektrometer seinen Ausschlag ebenfalls vergrößern. Stellen wir den ursprünglichen Plattenabstand wieder her, so geht auch der Ausschlag des Elektrometers wieder auf seinen Anfangswert zurück.



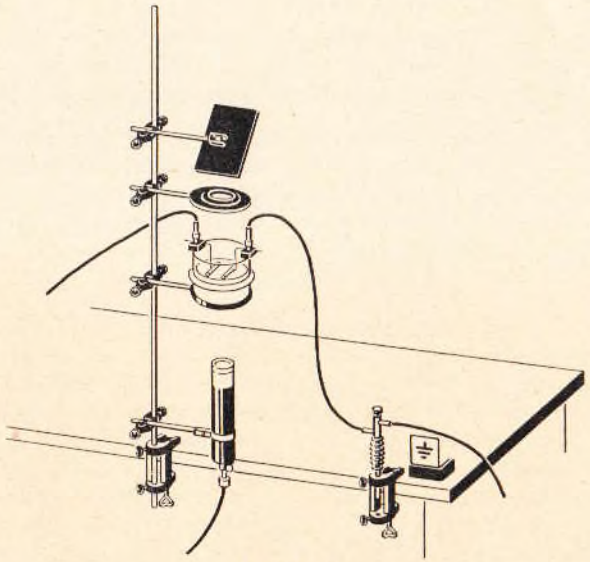
(Abb. 57)

Der Spannungszustand einer Spannungsquelle ist übertragbar auf den Raum zwischen zwei Leitern, die sich nicht berühren.

II. Kräfte im elektrischen Feld

1. Die elektrischen Feldlinien

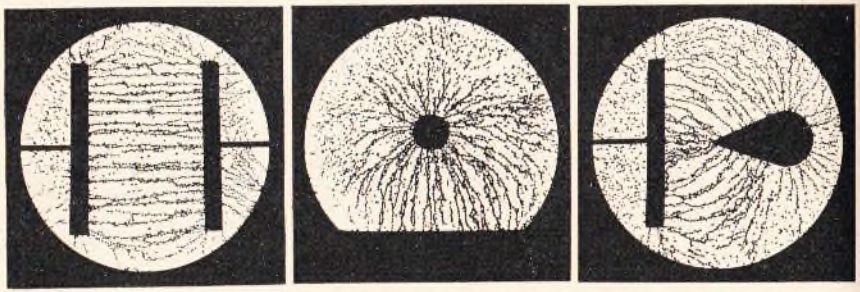
Elektrische Feldlinien sind nicht sichtbar. Mit Hilfe einer Anordnung nach Abb. 58 kann man sie aber nachweisen. Der größte Teil der Apparatur dient zur Projektion des Feldlinienvorgangs auf einen Wandschirm. Deshalb soll nur der wesentliche Teil beschrieben werden. Wir erkennen in einer Halterung am Stativ ein Glasgefäß (Projektionsschale), in dem sich zwei Elektroden befinden. In die Projektionsschale wird Rizinusöl eingefüllt, darauf werden Grießkörner gestreut und durch Umrühren gut verteilt. Zum Nachweis der Feldlinien ist eine Gleichspannung von einigen Tausend Volt (Bandgenerator) erforderlich. Ein Pol der Spannungsquelle wird geerdet und der andere möglichst berührungsfrei an eine Elektrode (in der Projektionsschale) geführt. Nach kurzer Zeit wandern die Grießkörner auf den (nicht sichtbaren) elektrischen Feldlinien entlang, wobei sie elektrische Ladung an andere Grießkörner abgeben, so daß sich bald ganze Körnerketten bilden. Je nach der Form der Elektroden ergeben sich, durch die Projektion auf den Wandschirm gut sichtbar ge-



(Abb. 58)

fernmeldelehrling.de

macht, die Bilder nach Abb. 59. Diese sichtbar gewordenen Linien bezeichnet man als **elektrische Feldlinien.**



(Abb. 59 a – c)

Der Raum, in dem elektrische Feldlinien vorhanden sind, heißt „elektrisches Feld". Die Feldlinien treten immer senkrecht aus einem positiven Leiter heraus und enden senkrecht eintretend auf dem negativen Leiter.

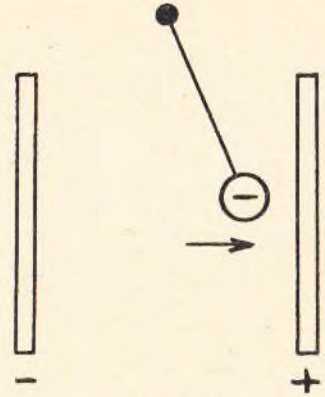
Das elektrische Feld nach Abb. 59a bezeichnet man als **homogen** (gleichförmig) und die Felder nach Abb. 59b bis c als **inhomogen** (undgleichförmig). In einem homogenen elektrischen Feld verlaufen also die Feldlinien parallel.

Bei der Abb. 59c ist zu erkennen, daß die Feldlinien an der Spitze der rechten Elektrode besonders dicht sind. Die Feldliniendichte ist also dort sehr groß, wo die Elektrodenoberfläche besonders stark gekrümmt ist.

Wenn man der spannungsführenden Elektrode eine Metallkugel nähert, so wird das Feld sich nicht verändern. Nimmt man statt dessen aber eine Metallspitze, so wird das elektrische Feld zusammenbrechen. Die Spitze saugt die elektrische Ladung ab. Auf dieser Spitzenwirkung beruht die Wirkungsweise des Blitzableiters.

2. Die Kraftwirkung des elektrischen Feldes

Wird in ein elektrisches Feld zwischen zwei Platten eine elektrische Ladung, z. B. eine an einem Faden aufgehängte geladene Holundermarkkugel, gebracht (Abb. 60), so wird die Kugel von der einen Platte angezogen und gleichzeitig von der anderen Platte abgestoßen. Verbindet man beide Platten mit einem Leiter, gleichen sich die entgegengesetzten Ladungen aus, die Platten werden elektrisch neutral, und die Holundermarkkugel kehrt in ihre Ruhelage zurück. Wenn die Platten wieder aufgeladen werden, wiederholt sich der gleiche Vorgang: Die negativ ge-



(Abb. 60)

ladene Kugel wird wieder von der positiven Platte angezogen und von der negativ geladenen abgestoßen. In dem elektrischen Feld stellen wir also eine **Kraftwirkung** fest.

In einem elektrischen Feld (dessen Raum immer von Kraftlinien angefüllt ist) wird auf einen elektrisch geladenen Körper eine Kraft ausgeübt.

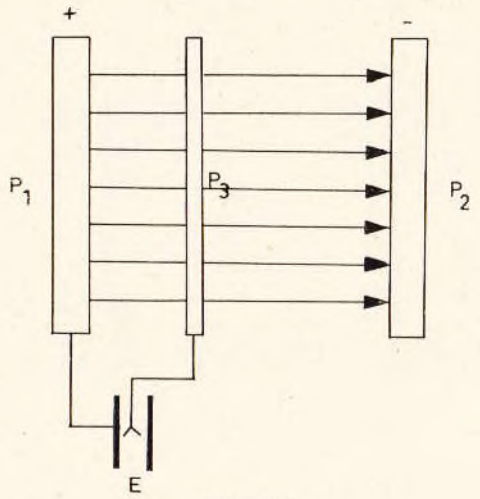
3. Die elektrische Feldstärke

Die Stärke des elektrischen Feldes ist abhängig von der angelegten Spannung und vom Abstand der Elektroden oder Platten. Die Einheit der Feldstärke ist Volt pro cm Feldlinienlänge:

$$E = \frac{U}{l} \quad \frac{\text{Volt}}{\text{cm}}$$

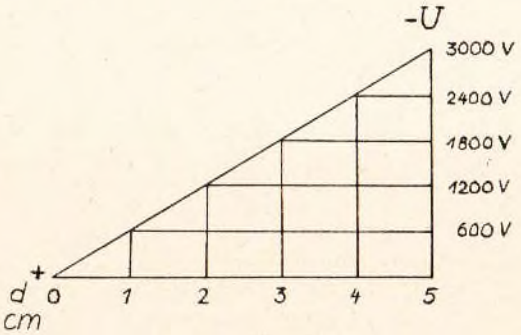
Anhand der Abb. 61 wollen wir die Stärke des elektrischen Feldes untersuchen. Zwischen den beiden Platten P_1 und P_2 besteht ein von einer angelegten Spannung abhängiges elektrisches Feld. Das Elektrometer E zeigt einen bestimmten Ausschlag. Jetzt bringen wir in das Feld eine weitere Platte P_3 und schalten das Elektrometer an P_1 und P_3. Der Ausschlag bestätigt, daß auch zwischen P_1 und P_3 eine Spannung vorhanden ist. Je näher wir mit P_3 an P_1 herankommen, um so geringer wird der Ausschlag des Elektrometers, bis bei Berührung der beiden Platten kein Ausschlag mehr festzustellen ist. Berühren sich jedoch P_3 und P_2, so zeigt das Elektrometer den gleichen Ausschlag, wie es ihn vor dem Einbringen

fernmeldelehrling.de



(Abb. 61)

von P_3 gezeigt hat. Es ist also zwischen **allen Punkten** des elektrischen Feldes und der spannungführenden Platte P_1 eine Spannung vorhanden, die ihren höchsten Wert an der geerdeten Platte erhält. Man spricht auch hier von einem Spannungsabfall (siehe auch Abschnitt B. VI.). Damit soll zum Ausdruck gebracht werden, daß die Spannung längs des elektrischen Feldes von ihrem Höchstwert auf den Wert Null abfällt. In einem homogenen Feld verläuft der Spannungsabfall geradlinig (Abb. 62). Wir nehmen an, zwischen den Platten P_1 und P_2 sei eine Spannung von 3000 Volt wirksam. Der Abstand zwischen den Platten soll = 5 cm betragen. Bei



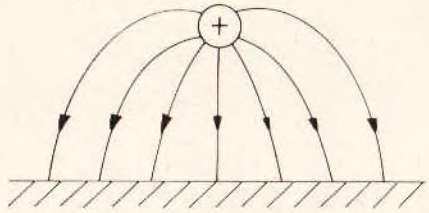
(Abb. 62)

einer Entfernung der Platte P_3 von 1 cm von der Platte P_1 hat die Spannung den Wert 600 V und steigt um diesen Wert bei jedem weiteren cm

bis zur Platte P_2. Der Spannungsabfall pro 1 cm beträgt also 600 V. Dieser Spannungsabfall pro cm Feldlinienlänge ist ein Maß für die in diesem Beispiel vorhandene elektrische Feldstärke, deren Einheit Volt pro cm ist.

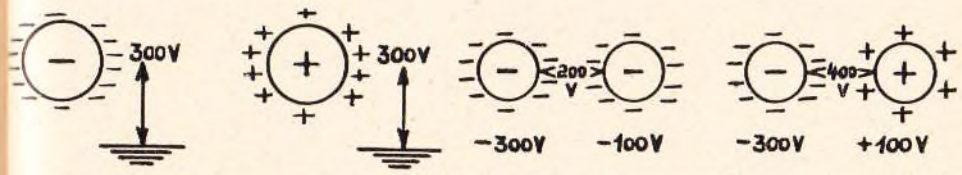
4. Das elektrische Potential

Über potentielle oder Energie der Lage und über kinetische oder Energie der Bewegung siehe Band B 1. Hier soll nur noch in Erinnerung gerufen werden, daß die Energie der Lage ihren Ursprung in der vorher geleisteten Arbeit hat. In unserem Falle kann man sagen, daß der Spannung eine Arbeit zugrunde liegt, die pro Ladungseinheit (elektrische Ladung) aufgebracht werden mußte. Wir wollen uns den Vorgang anhand eines Beispiels noch einmal vor Augen führen. Wir stellen uns eine über der Erde schwebende Kugel vor (Abb. 63), auf die wir von der Erde aus eine elektrische Ladung bringen wollen. Dabei entsteht zwischen der Kugel und der Erde ein elektrisches Feld. Dieses Feld wirkt sich gegenüber unserem Ladungstransport als Hemmnis aus. Je größer nämlich die Elektrizitätsmenge auf der Kugel wird, um so mehr Arbeit müssen wir aufwenden, um gegen das Feld neue Ladungen auf die Kugel bringen zu können. In steigendem Maße baut sich eine Spannung gegen Erde auf. Da aber gleichzeitig durch den Ladungstransport auf der Kugel Energie der Lage gespeichert wird



(Abb. 63)

(Band B 1), bezeichnet man die **Spannung gegen Ende als Potential,** wobei die Erde selbst das Potential Null hat. Zur näheren Erläuterung soll Abb. 64 dienen:



(Abb. 64a–d)

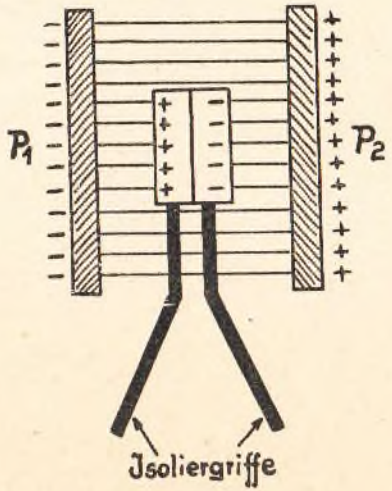
fernmeldelehrling.de

Abb. 64a stellt einen mit 300 V negativ gegen Ende geladenen Körper dar (Potential —300 V). Der Körper nach Abb. 64b hat ein Potential von +300 V. Zwischen den beiden Körpern beträgt die Spannungsdifferenz (Potentialdifferenz) nach Abb. 64c 200 V (von —100 bis —300 sind = 200). Die Körper nach Abb. 64d sind ungleichnamig aufgeladen; die Potentialdifferenz beträgt 400 V (von —300 bis +100 sind = 400).

Zwei Punkte mit verschiedenem Potential haben gegeneinander eine Potentialdifferenz, sie entspricht der Spannung U.

III. Die elektrische Beeinflussung (Influenz)

In das elektrische Feld zwischen den Platten P_1 und P_2 führen wir nach Abb. 65 zwei Metallplatten, die sich innig berühren sollen. Damit wir keine Ableitung verursachen, sind an den Platten Isoliergriffe angebracht. Nach einiger Zeit trennen wir noch innerhalb des elektrischen Feldes die beiden Metallplatten voneinander und nehmen sie dann aus dem Feld heraus. Wir berühren mit der einen Platte ein Elektrometer und stellen einen Ausschlag fest; die Platte hat also ein Potential. Jetzt berühren wir das Elektrometer mit der anderen Platte, der Zeiger geht auf Null zurück; die zweite Platte hat ebenfalls ein Potential, aber es ist dem der ersten entgegengesetzt. Was ist geschehen?



(Abb. 65)

Bevor wir die Metallplatten in das elektrische Feld gebracht haben, waren ihre Ladungen noch gleichmäßig verteilt und im Gleichgewicht; die Platten waren elektrisch neutral (siehe auch A. II. 3.). Die im elektrischen

Feld auf die Ladungen der Platten wirkenden Kräfte zwingen die freien Elektronen, dem Zug des elektrischen Feldes zu folgen. Dadurch tritt, da die innige Berührung praktisch die beiden Platten zu **einem** Körper vereinigte, auf der einen Seite ein Elektronenmangel (positive Ladung) und auf der anderen Seite ein Elektronenüberschuß (negative Ladung) auf. Trennen wir die Platten noch im elektrischen Feld voneinander, behalten sie ihre Ladungen bei, wie wir es mit dem Elektrometer haben beweisen können.

Den Vorgang des Trennens der Ladungen eines ursprünglich neutralen Körpers nennt man **elektrische Beeinflussung** oder **Influenz.**

Influenz ist die Beeinflussung eines isolierten neutralen Leiters durch das elektrische Feld.

Infolge der Kraftwirkung des Feldes wandern die freien Elektronen des Leiters in entgegengesetzter Richtung zu den Feldlinien.

Die Ladung eines Leiters befindet sich immer an seiner Oberfläche.

IV. Übungsaufgaben

a) Erkläre die Wirkungsweise eines Elektrometers. b) Was ist ein elektrisches Feld? c) Erkläre den Unterschied zwischen einem homogenen und einem inhomogenen elektrischen Feld. d) Was versteht man unter „Spitzenwirkung"? e) Erkläre die Kraftwirkung des elektrischen Feldes am Beispiel der Holundermarkkugel. f) Wie ist der Ausdruck „Spannungsabfall" längs des elektrischen Feldes zu verstehen? g) Erkläre die Ausdrücke „Potential" und „Potentialdifferenz". h) Was versteht man unter Influenz? i) Wo befindet sich die Ladung eines Körpers? k) Wann ist ein Körper elektrisch neutral?

H. Der Kondensator

I. Aufbau und Wirkungsweise des Kondensators

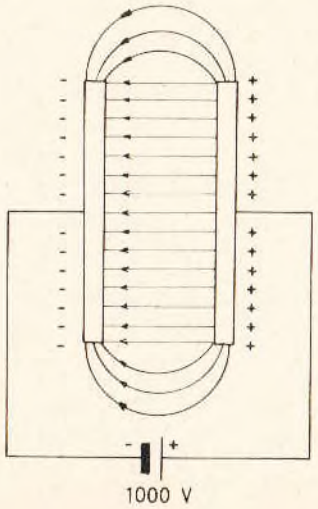
Die Vorrichtung, die den Aufbau eines elektrischen Feldes ermöglicht, nennt man **Kondensator.** Alle unter G. aufgeführten Versuche waren also bereits Versuche mit Kondensatoren. Die einfachste Form eines Kondensators sind zwei Platten, die einander gegenüberstehen und durch eine Isolierschicht voneinander getrennt sind. Bei unseren bisherigen Betrachtungen bestand die Isolierschicht aus Luft, sie kann aber auch aus festen Stoffen bestehen, z. B. Glimmer, Papier u. a. Auch zwei gegeneinander

fernmeldelehrling.de

isolierte Leitungen kann man als Kondensator betrachten (Kabeladern, Freileitungen), weil sich zwischen ihnen bei einer angelegten Spannung ein elektrisches Feld aufbaut.

1. Die Wirkungsweise des Kondensators

Die Platten in unseren bisherigen Versuchen waren so mit einer Spannungsquelle verbunden, daß zwischen ihnen ein Ladungstransport stattgefunden hat. Betrachten wir die Platten nun als Kondensator, so können wir sagen, der Kondensator ist **geladen.** Zwischen seinen Platten ist die Spannung der Spannungsquelle vorhanden. Die Abb. 66 stellt einen Plattenkondensator dar, der an eine Spannungsquelle angeschlossen ist. Zwischen den Platten ist eine Spannung von 1000 V (die Spannung der Spannungsquelle) vorhanden. Die geradlinig zwischen den Platten verlaufenden Linien stellen das homogene elektrische Feld und die an den



(Abb. 66)

Enden der Platten verlaufenden gekrümmten Linien das inhomogene elektrische Feld dar.

Nicht alle Kondensatoren sind gleich gut geeignet, elektrische Ladung aufzunehmen und zu speichern. Die Fähigkeit der Aufnahme und Speicherung elektrischer Ladung bezeichnet man mit **Kapazität eines Kondensators.** Die Kapazität hat das Formelzeichen C.

Durch Versuche ist ermittelt worden, daß die Kapazität eines Kondensators abhängig ist

a) von der Größe der wirksamen Plattenflächen,
b) vom Abstand der Platten voneinander und
c) von der Art des Isolierstoffs zwischen den Platten.

Je größer die Plattenfläche ist, um so größer ist auch die Kapazität; je größer der Abstand zwischen den Platten wird, um so kleiner wird die Kapazität.

2. Kapazität und Dielektrikum

Den Isolierstoff zwischen den Platten bezeichnet man mit Dielektrikum. Nun sind die Isolierstoffe in ihrem Aufbau verschieden und haben demzufolge auch verschiedene Einwirkung auf die Kapazität eines Kondensators. Der Einfluß eines Dielektrikums auf die Kapazität wird durch eine Zahl angegeben, die man **Dielektrizitätskonstante** nennt, sie ist mit dem griechischen Buchstaben ε (Epsilon) gekennzeichnet. Für Luft ist die Dielektrizitätskonstante $\varepsilon = 1$. Die Dielektrizitätskonstanten aller anderen Isolierstoffe (Dielektrika) sind größer als 1.

Bei der Berechnung der Kapazität ist nicht die Dielektrizitätskonstante für Luft ($\varepsilon = 1$) als Bezugsgröße zu verwenden, sondern die Dielektrizitätskonstante für das Vakuum ($\varepsilon_0 = 8.859 \cdot 10^{-14}$). Man nennt deshalb die Dielektrizitätskonstante der Isolierstoffe die relative Dielektrizitätskonstante ε_r. Um die absolute Dielektrizitätskonstante zu erhalten, ist ε_r mit ε_0 zu multiplizieren: $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$.

Die nachstehende Tabelle gibt die relativen Dielektrizitätskonstanten (ε_r) einiger Isolierstoffe an:

Luft	= 1,0	Glimmer	= 6,0 – 7,0
Hartgummi	= 2,7	Marmor	= 8,3
Bernstein	= 2,8	Hartpapier	= 5,0 – 6,0
Bakelit	= 2,9	Quarz	= 3,8 – 5,0
Porzellan	= 4,5	Pertinax	= 4,8
Glas	= 5,7	dest. Wasser	= 81

Isolation der Fernmeldekabel etwa 1,6

Isolation der Starkstromkabel etwa 4,3

Damit man die Kapazität eines Kondensators auch rechnerisch ermitteln kann, sind die Faktoren, die für ihre Größe bestimmend sind, in einer Formel zusammengefaßt worden:

fernmeldelehrling.de

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{d} \quad \text{[Farad]}$$

In Worten ausgedrückt heißt das: Die Kapazität eines Kondensators ist gleich der Dielektrizitätskonstanten mal der Fläche der Platten, geteilt durch den Abstand der Platten voneinander. Die Fläche A wird in cm^2 und der Abstand d in cm eingesetzt.

3. Kapazität und Spannung

Wir haben bereits unter G. festgestellt, daß die Stärke des elektrischen Feldes u. a. von der Spannung abhängt. Damit kann man auch sagen: Die in einem Kondensator gespeicherte Elektronenmenge ist auch von der Spannung abhängig. Wenn man von der Ladung eines Kondensators spricht, kann man nun weiter folgern, daß die Ladung abhängig ist von

a) der angelegten Spannung und
b) der Größe des Kondensators,

wobei wir unter Größe des Kondensators die Größe der Plattenflächen, den Abstand und das Dielektrikum zusammengefaßt haben.

Im vorhergehenden Abschnitt haben wir festgestellt, daß die **Größe des Kondensators** seiner **Kapazität** gleichzusetzen ist. Setzen wir nun die bereits bekannten Buchstaben ein, für die Kondensatorladung $= Q$, für die Kapazität $= C$ und für die Spannung $= U$, so ergibt sich die Ladung

$$Q = C \cdot U \quad \text{[As]}$$

Wir wissen, daß die Elektrizitätsmenge Q in Amperesekunden (As) gemessen wird (siehe Abschnitt B. II. 1.).

Damit ist festgelegt worden:

Ein Kondensator, der bei 1 Volt Spannung eine Ladung von 1 Amperesekunde aufnimmt, hat eine Kapazität von 1 Farad[1]).

Wir wollen aus dieser Formel noch eine Erkenntnis ziehen. Durch Umstellung erhalten wir

$$U = \frac{Q}{C}$$

[1]) Farad zu Ehren des englischen Physikers Faraday (1791 bis 1867).

Aus dieser Formel erkennen wir, daß die Spannung an einem Kondensator bei **gleichbleibender** Elektrizitätsmenge mit kleiner werdender Kapazität zunimmt, aber mit größer werdender Kapazität abnimmt.

Die Maßeinheit des **Farad** wird bei der Bemessung der Kondensatoren zugrunde gelegt. Diese Einheit ist jedoch für praktische Zwecke zu groß. Deshalb rechnet man mit dem millionsten Teil des Farad, mit dem **Mikrofarad** (µF). Auch das Mikrofarad ist für manche Fälle noch zu groß, so daß man noch kleinere Werte eingeführt hat. So ist das **Nanofarad** (nF) gleich dem tausendsten Teil des µF, und das **Picofarad** (pF) ist gleich dem millionsten Teil des µF. Es kommt hin und wieder noch vor, daß die Kapazität eines Kondensators in cm angegeben ist. Es genügt zu wissen, daß das cm etwa dem Wert eines pF entspricht (1 pF = 0,9 cm).

Die Umrechnung von µF in nF bzw. pF ergibt sich aus der nachstehenden Aufstellung:

$$1\ \mu F = 10^{-6}\ F = \frac{1}{1\,000\,000}\ F$$

$$1\ nF = 10^{-9}\ F = \frac{1}{1\,000\,000\,000}\ F = \frac{1}{1000}\ \mu F$$

$$1\ pF = 10^{-12}\ F = \frac{1}{1\,000\,000\,000\,000} F = \frac{1}{1000} nF = \frac{1}{1\,000\,000} \mu F$$

Beispiel:

Wie groß ist die Kapazität eines Plattenkondensators, dessen Fläche 10 cm^2 ist und dessen Plattenabstand ein Maß von 0,1 mm aufweist? Das Dielektrikum ist Glimmer.

Gegeben: $A = 10\ cm^2$; $d = 0{,}1\ mm$; $\varepsilon_r = 7$

Gesucht: C

Lösung: Der Plattenabstand muß in cm angegeben werden
$d = 0{,}1\ mm = 0{,}01\ cm$
Wir setzen jetzt in die Formel auf Seite 107 ein

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{d} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d} = \frac{8{,}859 \cdot 7 \cdot 10}{10^{-14} \cdot 0{,}01} = 620 \cdot 10^{-12}\ F = 620\ pF$$

II. Bauarten von Kondensatoren

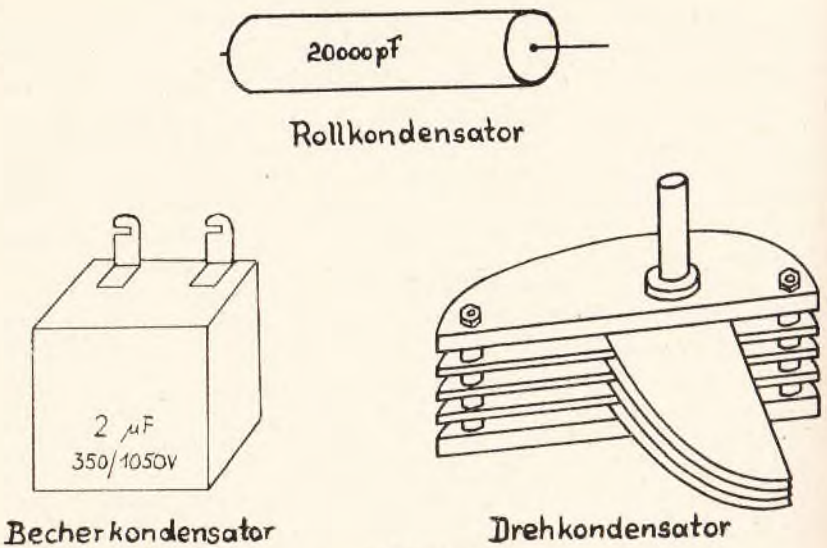
Es wird grundsätzlich unterschieden zwischen Kondensatoren mit **unveränderlicher** und Kondensatoren mit **veränderlicher** Kapazität.

Die wichtigsten Bauformen der Kondensatoren mit unveränderlicher Kapazität sind

a) der Rollkondensator und
b) der Becherkondensator.

Beide Typen sind Wickelkondensatoren; sie unterscheiden sich hauptsächlich durch ihre äußere Form (Abb. 67).

fernmeldelehrling.de



(Abb. 67)

Der Rollkondensator ist zylindrisch geformt, während der Becherkondensator ein würfelförmiges Aluminiumgehäuse zeigt. Der innere Aufbau, nämlich der Wickel, ist bei beiden Typen gleich:

Lange Streifen aus Stanniol (Zinnfolie) oder aus Aluminiumfolie bilden die Kondensatorbeläge (wie die Platten beim Plattenkondensator). Diese Beläge sind durch Zwischenlagen von öl- oder paraffingetränktem Papier voneinander isoliert (Dielektrikum). Bei gegebener Breite bestimmen die Streifen mit ihrer Länge die Kapazität des Kondensators. Die Streifen (Kondensatorband) werden zu einem Wickel zusammengerollt und in ein Röhrchen aus Glas, Hartpapier oder Pappe hineingeschoben, dessen Enden mit Isoliermasse vergossen werden. Die Enden der Streifen sind herausgeführt; bei den Becherkondensatoren sind sie an Lötösen oder Lötfahnen befestigt.

Besonders hochwertige Kleinkondensatoren mit unveränderlicher Kapazität haben als Dielektrikum keramische Stoffe. Die Beläge werden als sogenannte Silberschichten aufgebrannt. Kondensatoren dieser Bauform sind in ihren Kapazitätswerten besonders beständig.

Ein neuer Kondensatortyp, der ebenfalls zu den Wickelkondensatoren zählt, ist der Metall-Papier-(MP)-Kondensator. Er hat eine besonders hohe Durchschlagsfestigkeit (siehe unten) und eine hohe Lebensdauer. Der Metallbelag wird durch Verdampfen auf das als Dielektrikum dienende sehr dünne Kondensatorpapier aufgebracht. Bei einem Durch-

schlag (siehe unten) brennt die Metallschicht in größerem Umfang ab als das Papier, wodurch eine Berührung der beiden Folien verhindert wird. Der Kondensator bleibt voll verwendungsfähig.

Eine besondere Stellung unter den Kondensatoren mit unveränderlicher Kapazität nehmen die Elektrolytkondensatoren ein. Sie haben einen Belag aus Aluminiumfolie und einen, der aus mit Chemikalien getränktem Fließpapier besteht. Als Dielektrikum dient eine Oxydschicht, die sich erst unter dem Einfluß einer Gleichspannung bildet. Diese Oxydschicht ist sehr dünn; daher haben Elektrolytkondensatoren eine sehr hohe Kapazität bei kleinen Abmessungen. Diese Kondensatoren dürfen nur mit Gleichspannung betrieben werden, weshalb die Pole auf dem Gehäuse gekennzeichnet sind.

Auf die Gehäuse der Kondensatoren ist neben den Kapazitätswerten, die in F, nF oder auch pF angegeben sind, die Nennspannung der zulässigen Gleichstrombelastung in Volt angegeben (Abb. 67). Der angegebene Wert darf nicht überschritten werden, weil es sonst zu einer Überschreitung der Durchschlagsfestigkeit kommt. Bei zu hoher Spannung auf den Belägen kann durch das Dielektrikum hindurch ein Spannungsausgleich stattfinden, wobei das Dielektrikum beschädigt und damit der Kondensator unbrauchbar wird, weil sich an der Durchschlagstelle die beiden Beläge berühren. Besondere Vorsicht ist beim Anlegen einer Wechselspannung geboten, weil die am Kondensator wirksam werdende Scheitelspannung größer ist als die z. B. durch ein Meßinstrument angezeigte Effektivspannung (siehe Band B 4).

Der ebenfalls in Abb. 67 dargestellte Drehkondensator dient zur Einstellung verschiedener Kapazitätswerte. Er ist also ein Kondensator mit veränderlicher Kapazität. Drehkondensatoren bestehen aus einem Paket feststehender Aluminium- oder Messingplatten, dem **Stator,** und einem Paket drehbar auf einer Achse gelagerter Platten, dem **Rotor,** die in den Stator eingedreht werden können. Die jeweilige Stellung des Rotors zum Stator ist ausschlaggebend für die Größe der Kapazität. Wird der Rotor ganz in den Stator hineingedreht, ist die Kapazität am größten. Als Dielektrikum zwischen Statorplatten und Rotorplatten dient fast ausschließlich Luft (Luftdrehkondensatoren).

III. Kondensatorschaltungen

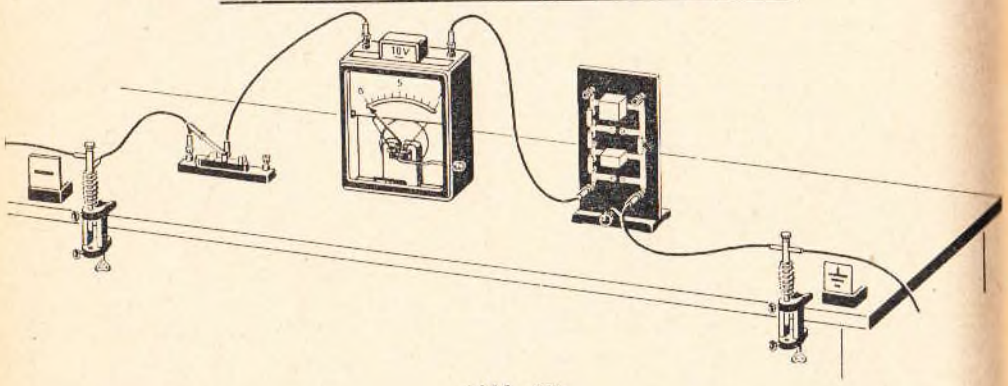
1. Die Nebeneinanderschaltung

Wir bauen einen Versuch nach Abb. 68 auf. Es stehen zwei Kondensatoren, 1µF und 2 µF, zur Verfügung. Als erstes laden wir den 1-µF-Kondensator auf, wobei das Meßinstrument einen bestimmten Ausschlag zeigt. Bei der Aufladung des 2-µF-Kondensators ist der Ausschlag größer.

fernmeldelehrling.de

Wir laden jetzt die beiden nebeneinandergeschalteten Kondensatoren auf, der Ausschlag ist noch größer. (Vor jedem Einzelversuch sind die

„Die Nebeneinanderschaltung von Kondensatoren“



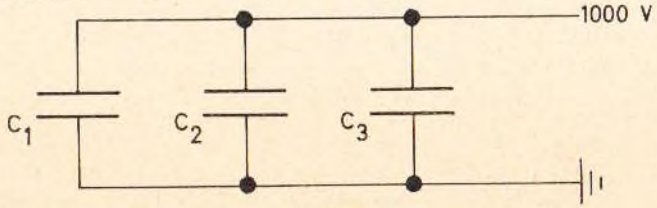
(Abb. 68)

Kondensatoren sorgfältig zu entladen.) Wenn wir den Versuch mit zwei Kondensatoren von je 2 µF wiederholen und das Meßinstrument genau betrachten, stellen wir fest, daß der Ausschlag bei jedem Einzelkondensator halb so groß ist wie der Ausschlag bei der Parallelschaltung.

Die Gesamtkapazität parallel geschalteter Kondensatoren ist größer als jede Teilkapazität.

Die Gesamtkapazität parallel geschalteter Kondensatoren ist gleich der Summe der Einzelkapazitäten.

Beispiel:
Drei Kondensatoren sind parallel geschaltet; $C_1 = 2\mu F$, $C_2 = 0{,}5\ \mu F$ und $C_3 = 0{,}25\ \mu F$. Wie groß ist die Gesamtkapazität?



(Abb. 69)

Nach dem vorerwähnten Versuch ist

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \ldots$$

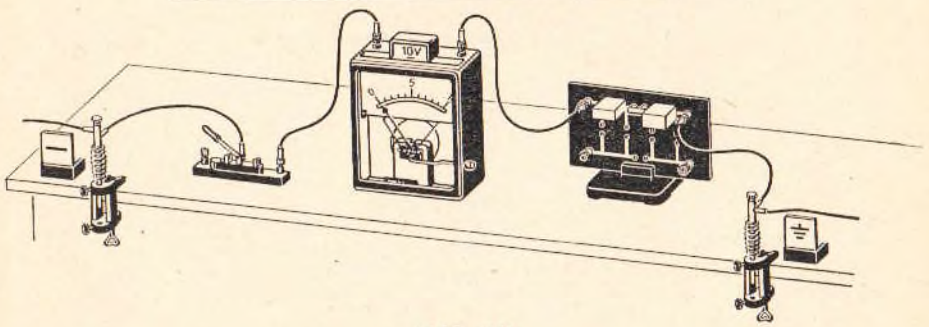
Wir brauchen also nur noch einzusetzen:

$$C = 2 + 0{,}5 + 0{,}25 = 2{,}75\ \mu F.$$

2. Die Hintereinanderschaltung

Wir wollen jetzt die beiden Kondensatoren von vorhin (1 µF und 2 µF) in der Hintereinanderschaltung untersuchen. Im Versuch nach Abb. 70 messen wir zuerst den Ausschlag bei der Aufladung des 2-µF-Kondensators und merken uns den Wert. Der Ausschlag bei der Aufladung des

„Die Hintereinanderschaltung von Kondensatoren“



(Abb. 70)

1-µF-Kondensators ist kleiner. Nachdem wir beide Kondensatoren wieder entladen haben, schalten wir sie hintereinander und laden erneut auf. Der Ausschlag des Meßgeräts ist noch kleiner geworden.

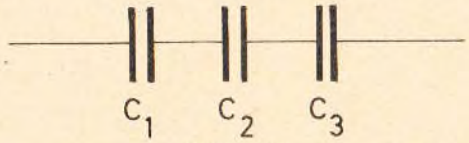
Die Gesamtkapazität hintereinandergeschalteter Kondensatoren ist kleiner als die Teilkapazität jedes Teilkondensators.

Der Kehrwert der Gesamtkapazität hintereinandergeschalteter Kondensatoren ist gleich der Summe der Kehrwerte der Einzelkapazitäten.

Diese Merksätze in eine Formel gekleidet, ergeben:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \ldots$$

Beispiel:
Drei Kondensatoren mit den Werten 0,5 µF; 2 µF und 4 µF sind hintereinandergeschaltet. Berechne die Gesamtkapazität.



(Abb. 71)

fernmeldelehrling.de

Wir setzen in die obige Formel ein

$\frac{1}{C} = \frac{1}{0{,}5} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} = \frac{11}{4}$ durch Umkehrung erhalten wir

$C = \frac{4}{11} = 0{,}364\ \mu F$

Vergleichen wir die Formeln mit denen für die Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen, so stellen wir fest, daß sich die Kapazitäten bei Zusammenschaltung gerade umgekehrt verhalten wie die Ohmschen Widerstände.

3. Übungsaufgaben

a) Erkläre den Aufbau eines Kondensators! **b)** Von welchen Faktoren ist die Kapazität eines Kondensators abhängig? **c)** Was versteht man unter Dielektrikum? **d)** Zähle die Dielektrizitätskonstanten der wichtigsten Dielektrika auf! **e)** Wie groß ist die Kapazität eines Plattenkondensators, dessen Fläche 62 cm^2 ist und dessen Plattenabstand ein Maß von 0,2 mm hat, als Dielektrikum dient Pertinax? $_5$) Wieviel pF sind 0,29 µF? **g)** Welche Bauformen von Kondensatoren kennst Du? **h)** Vier Kondensatoren von 200 pF, 0,8 nF, 30 µF und 0,005 F sind parallelgeschaltet, wie groß ist die Gesamtkapazität? **i)** Drei Koudensatoren von je 0,25 µF sind hintereinandergeschaltet, wie groß ist die Gesamtkapazität? **k)** Fünf Kondensatoren von 400 nF, 0,3 F, 2575 pF, 8 µF und 35 µF sind hintereinandergeschaltet, wie groß ist die Gesamtkapazität?

fernmeldelehrling.de

Band B 4 — Die Fachkunde

Die Wechselstromlehre (Dauermagnetismus; Elektromagnetismus; Fremdinduktion; Selbstinduktion; Bewegung durch Induktion; Entstehung des Wechselstromes; Spannungserzeuger; Wechselstromwiderstände; Wechselstromleistung; Mehrphasenwechselstrom; Schaltung von Wechselstromwiderständen, Resonanz; Vorgänge auf elektrischen Leitungen)

Band B 5 — Die Fachkunde

Elektrische Meßgeräte und Meßschaltungen

Band C 1 — Die handwerkliche Ausbildung

Werkstoffe der Fernmeldetechnik und ihre Bearbeitung; Werkzeuge und Werkzeugmaschinen (Eisen und Stahl, Kupfer, Zinn, Zink, Blei, Aluminium, Edelmetalle u. a.; Werkstoffprüfung; Oberflächenschutz der Metalle; Nichtmetallische Werkstoffe; Isolierstoffe; Kunststoffe; Baustoffe; Messen und Anreißen; spanabhebende und spanlose Verformung; Verbindungsarten; Wärmebehandlung; Bohren, Senken, Reiben, Drehen, Fräsen)

Band C 2 — Die handwerkliche Ausbildung

Der oberirdische Linienbau — Planung und Bau oberirdischer Anschluß- und Fernlinien — Schlauchdrahtleitungen und Luftkabel

Band C 3 — Die handwerkliche Ausbildung

Der unterirdische Linienbau — Gestaltung der Fernmeldenetze — Die Fernmeldekabel — Aufgaben und Aufbau der Bauteile im Anschlußnetz

Band C 4 — Die handwerkliche Ausbildung

Aufbau und Wirkungsweise der Fernsprechapparate und Zusatzeinrichtungen

Band C 5 — Die handwerkliche Ausbildung

Grundzüge der Wählvermittlungstechnik (Bauelemente und ihre Verwendung; Zeichnungen, Pläne und ihre Erklärung; Gliederung und Aufbau der Ortswählvermittlungen und Systemmerkmale; Vorfeldeinrichtungen; Stromversorgung und Erdungsanlagen; Stromlauf der Wählsysteme 50 und 55; Signale; Prüfgeräte, Fernwählvermittlungsstellen)

— Weiteres siehe 2. und 4. Umschlagseite —

fernmeldelehrling.de

Band C 6 — Die handwerkliche Ausbildung

Nebenstellenanlagen (Zweck der Nebenstellenanlagen; Rechtsbestimmungen; Sprechstellen; Leitungen und Fernsprechapparate; Ausführung der Anlagen, Baustufen; Stromversorgung; Schaltungsaufbau [kleine Nebenstellenanlagen, Reihenanlagen und kleine Schrankanlagen]; Grundaufbau der mittleren und großen Wählernebenstellenanlagen)

Band C 7 — Die handwerkliche Ausbildung

Der Sprechstellenbau (Bauauftrag; Einrichtungs- und Änderungsgebühren; Teilnehmereinrichtungen; Fernmeldebauzeug; Bauausführung)

Umfang je Band etwa 140 Seiten

Deutsch und Rechnen

Wichtig zur Vorbereitung
auf Eignungsfeststellungen und Prüfungen

Deutsch

Rechtschreiblehre — Wortlehre — Satzlehre — Zeichensetzung — Stil- und Aufsatzkunde
Umfang rd. 180 Seiten **Preis je Band 2,50 DM**

Rechenlehre

Rechnen — Raumlehre — Sortenverwandlung
Übungs- und Prüfungsaufgaben — Lösungsheft
Umfang rd. 160 Seiten **Preis 3,20 DM**

— Weiteres siehe 2. und 3. Umschlagseite —

Sämtliche Lehrwerke können bestellt werden bei
Deutsche Postgewerkschaft Verlag GmbH.
6 Frankfurt — Savignystraße 29