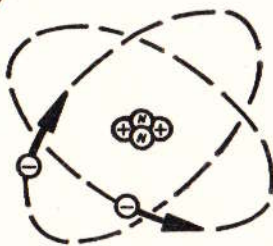
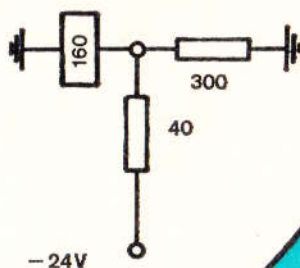
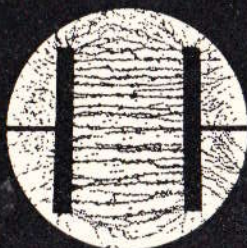


Handbuch der Fernmeldetechnik

- Buchreihe AFt -



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



Band B 3

Gleichstromlehre

Joachim Galster
8551 Gosberg 88

Handbuch der Fernmeldetechnik

— Buchreihe AFt —

17

wichtige Lehr- und Lernwerke für den Flehrl; auch für den Handwerker F und den Fernmeldehandwerker zur Vorbereitung auf die Grundlehrgänge Ft 1 und 2 gut geeignet!

- Band A 1** — **Allgemeine Berufskunde**
Weg und Ziel der Ausbildung — Lehrvertrag — Fernmeldehandwerkerprüfung — Tarifvertrag — Gesetze und Verordnungen des Fernmeldewesens
- Band A 2** — **Allgemeine Berufskunde**
Allgemeines über den Staatsaufbau — Aufgaben und Gliederung der DBP — Sozialeinrichtungen bei der DBP — Musterausarbeitungen und Musterthemen
- Band B 1** — **Grundkenntnisse der Physik und Mathematik**
Erklärung der Grundgrößen der Physik — Buchstabenrechnen — Lösen von Gleichungen — Umstellen von Formeln
- Band B 2** — **Fachzeichnen in der Fernmeldetechnik**
Technisches Zeichnen — Stromlaufzeichnen — Planunterlagen und Zeichnen in der Linientechnik
- Band B 3** — **Gleichstromlehre**
Wesen der Elektrizität — Größen, Einheiten und Gesetze im Gleichstromkreis — Wirkungen des elektrischen Stromes — Arten der Spannungserzeugung — Elektrisches Feld — Kondensator
- Band B 4** — **Wechselstromlehre**
(2 Teile)
Dauermagnetismus — Elektromagnetismus — Fremdinduktion — Selbstinduktion — Entstehung des Wechselstromes — Wechselstromwiderstände — Stromversorgungsanlagen — Vorgänge auf elektrischen Leitungen — Elektronenröhren
- Band B 5** — **Meßgeräte und Meßschaltungen**
Meßtechnik und Meßübungen — Entstörungs- und Prüftechnik
- Band B 6** — **Beispiele und Aufgaben aus der Fernmeldetechnik**
(2 Teile)
Übungsbeispiele und Aufgabensammlung aus der Physik und der Gleich- und Wechselstromlehre — Berechnen elektrischer Größen in Schaltungen der Fernmeldetechnik

— Weitere Lehrbücher siehe 3. und 4. Umschlagseite —

HANDBUCH der FERNMELDETECHNIK

— Buchreihe AFt —

Herausgegeben mit Unterstützung
des Bundesministers für das Post- und Fernmeldewesen

BAND B 3

Gleichstromlehre

Wesen der Elektrizität; elektrische Größen und Einheiten; Ohmsches Gesetz; Widerstand als elektrische Größe und als Bauelement; Kirchhoffsche Sätze; Wärmewirkung und chemische Wirkung des elektrischen Stromes; Arten der Spannungserzeugung; elektrisches Feld; Kondensator

6., verbesserte und erweiterte Auflage

Deutsche Postgewerkschaft — Hauptvorstand — Verlag
6 Frankfurt 1 — Savignystraße 43

Joachim Galster
8551 Gosberg 88

Vorwort

Die siebzehn Bände des „Handbuchs der Fernmeldetechnik — Buchreihe Aft —“ sollen

1. den Fernmeldelehrlingen während der Lehrzeit ein ständiger Begleiter sein und ihnen eine umfassende und gute Prüfungsvorbereitung ermöglichen,
2. den Fernmeldearbeitern bei der Vorbereitung auf die Prüfung nach dem Tarifvertrag, § 10, behilflich sein,
3. den Handwerkern aus artverwandten Berufen aufzeigen, welches Fachwissen erforderlich ist, um genausoviel zu wissen wie die Lehrlinge am Ende ihrer Lehrzeit,
4. den Fernmeldehandwerkern die Möglichkeit geben, ihr Wissen aufzufrischen und es auf den neuesten Stand der Fernmeldetechnik zu bringen und
5. eine ausreichende Vorbereitung auf den Lehrstoff der dienstlichen Grundlehrgänge gewährleisten.

In der Fernmeldehandwerkerprüfung sowie in den Grundlehrgängen Ft 1 und 2 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 und FeO. Einer der Bände allein kann dem Leser dieses umfangreiche Wissen nicht vermitteln; alle siebzehn Bände zusammen (vgl. hierzu die Angaben auf der 2. und 3. Umschlagseite) enthalten jedoch das Fachwissen, das sich der Leser im Interesse des Prüfungserfolges und seines weiteren Aufstiegs aneignen muß. In dem „Handbuch der Fernmeldetechnik“ 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 Fernmeldearbeiter,
für den Handwerker aus artverwandten Berufen und
für den Fernmeldehandwerker

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

Stand: Sommer 1970

Nachdruck, auch auszugsweise, nicht gestattet.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einführung in die Elektrizitätslehre	
1.1. Der Begriff „Elektrizität“	5
1.2. Die Bedeutung der Elektrizität	7
1.3. Die Elektronen als Grundlage der Elektrizität	8
1.3.1. Aufbau und elektrisches Verhalten der Stoffe	8
1.3.2. Leiter und Nichtleiter	11
1.3.3. Elektronenbewegung und elektrische Vorgänge	12
1.4. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 1.1. bis 1.3.	15
2. Grundlagen der Gleichstromlehre	
2.1. Der Stromkreis	15
2.2. Die elektrischen Größen und ihre Einheiten	16
2.2.1. Die Stromstärke	17
2.2.2. Der Widerstand	19
2.2.3. Die Spannung	20
2.2.4. Das Ohmsche Gesetz	20
2.3. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 2.1. und 2.2.	24
2.4. Der elektrische Widerstand	25
2.4.1. Widerstand und Temperatur	25
2.4.2. Spezifischer Widerstand und Leitfähigkeit	28
2.4.3. Berechnen des Leiterwiderstandes	31
2.4.4. Widerstände als Bauelemente	34
2.4.5. Der Isolationswiderstand	38
2.5. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.4.	38
2.6. Die elektrische Spannung	39
2.7. Die Schaltung von Widerständen	43
2.7.1. Die Reihenschaltung	43
2.7.2. Die Parallelschaltung	47
2.7.3. Die Gruppenschaltung	52
2.7.4. Die Spannungsteilerschaltung	54
2.8. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 2.6. und 2.7.	57
3. Arbeit, Leistung, Energie	
3.1. Mechanische Arbeit und Leistung	59
3.2. Elektrische Arbeit und Leistung	61
3.3. Der Zusammenhang zwischen mechanischer Energie, elektrischer Energie und Wärmeenergie	63
3.4. Der Wirkungsgrad	64
3.5. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 3.1. bis 3.4.	66
4. Die Wärmewirkung des elektrischen Stromes	
4.1. Die Anwendung der Stromwärme	67
4.2. Die Stromwärmeverluste	70
5. Die chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes	
5.1. Die Elektrolyse	72
5.1.1. Allgemeines	72
5.1.2. Praktische Anwendung der Elektrolyse in der Technik	76
5.1.3. Unerwünschte Erscheinungen der Elektrolyse	78
5.2. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 5.1.	81
5.3. Elektrochemische Spannungserzeuger	81
5.3.1. Allgemeines	81

	Seite
5.3.2. Die elektrolytischen Vorgänge bei der Spannungserzeugung . . .	83
5.3.3. Primärelemente (Galvanische Elemente)	83
5.3.4. Sekundärelemente (Akkumulatoren)	91
5.3.5. Gegenzellen	99
5.4. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 5.3.	99
6. Die Arten der Spannungserzeugung	
6.1. Allgemeines	100
6.2. Spannungserzeugung durch mechanische Ursachen	100
6.2.1. Reibungselektrizität	100
6.2.2. Piezoelektrizität	101
6.2.3. Induktionselektrizität	102
6.3. Spannungserzeugung durch chemische Einflüsse	102
6.4. Spannungserzeugung durch Wärme	103
6.5. Spannungserzeugung durch Lichteinwirkung	105
6.6. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 6.1. bis 6.5.	106
7. Die Schaltung von Spannungserzeugern	
7.1. Allgemeines	107
7.2. Spannungsverlust in Spannungserzeugern	107
7.3. Die Hintereinanderschaltung	111
7.4. Die Parallelschaltung	113
7.5. Die Gruppenschaltung	114
7.6. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 7.1. bis 7.5.	116
8. Das elektrische Feld	
8.1. Die elektrische Ladung	116
8.2. Das elektrische Potential	117
8.3. Das elektrische Feld	118
8.4. Die elektrische Feldstärke	120
8.5. Die elektrische Influenz	122
8.6. Die elektrische Schirmwirkung	125
8.7. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 8.1. bis 8.6.	127
9. Der Kondensator	
9.1. Aufbau und Wirkungsweise	127
9.2. Kapazität und Dielektrikum	129
9.3. Kondensatorverluste	133
9.4. Technische Ausführungsformen	133
9.4.1. Festkondensatoren	133
9.4.2. Veränderbare Kondensatoren	139
9.5. Kondensatordaten	140
9.6. Kondensatorschaltungen	140
9.6.1. Die Parallelschaltung	140
9.6.2. Die Hintereinanderschaltung	141
9.7. Kondensatoren im Gleich- und Wechselstromkreis	143
9.8. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 9.1. bis 9.7.	145

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

1. Einführung in die Elektrizitätslehre

1.1. Der Begriff „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 schauernd 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.

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. An die geheimnisvolle Kraft des Bernsteins erinnerte sich um 1600 der Engländer Gilbert, als er bei anderen Stoffen die gleiche Erscheinung beobachtete. Er gab der von geriebenen Körpern ausgehenden Kraft den Namen „Bernsteinkraft“. Daraus wurde in Anlehnung an das griechische Wort für Bernstein der Name **Elektrizität**.

Die durch Reiben bestimmter Stoffe entstehende Elektrizität wird als **Reibungselektrizität** bezeichnet. Ein Versuch mit geriebenen Hartgummi- und Glasstäben zeigt uns nun, daß es zwei Arten von Elektrizität gibt.

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

Als nächstes hängen wir einen Hartgummistab in der Mitte freischwebend auf, nachdem wir ihn kräftig mit einem Wolltuch gerieben haben. Wir reiben einen zweiten Hartgummistab und nähern ihn dem einen Ende des ersten Stabes (vgl. hierzu Abb. 1). 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 Elektrizität entstanden sein.

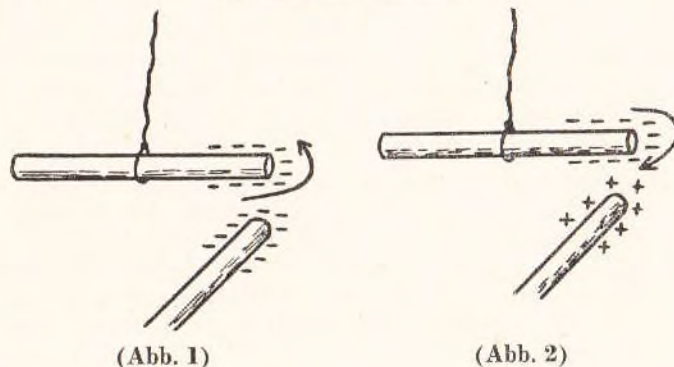
Bezeichnet man die auf einem Körper nach außen wirksame Elektrizität als **elektrische Ladung**, so ergibt sich:

Die durch das Reiben auf den Hartgummistäben hervorgerufenen elektrischen 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. Jetzt wiederholen wir den Versuch der Annäherung der Hartgummistäbe mit den Glasstäben. Wir reiben den ersten Stab und hängen ihn in der Mitte freischwebend auf, dann nähern wir ihm einen zweiten geriebenen Glasstab. Wir sehen, der erste Glasstab weicht dem zweiten aus. Wir erkennen:

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

Reibungselektrizität



(Abb. 1)

(Abb. 2)

Jetzt wollen wir einen Hartgummistab und einen Glasstab reiben. Wir nähern den geriebenen Glasstab dem aufgehängten Hartgummistab und stellen fest, daß beide Stäbe sich anziehen. Bewegen wir den Glasstab, so folgt ihm der Hartgummistab nach (vgl. hierzu Abb. 2). Wir erkennen:

Die elektrischen Ladungen des Hartgummistabes und des Glasstabes ziehen sich gegenseitig an.

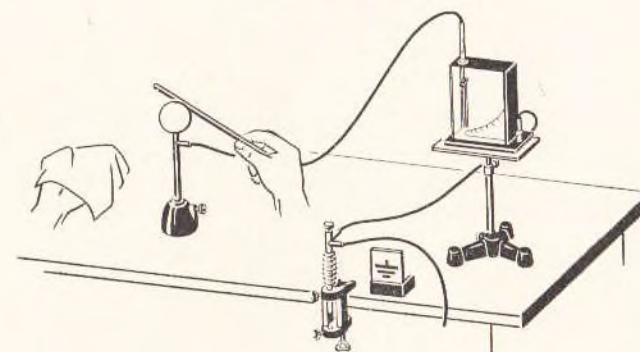
Wir haben gesehen, daß auf den beiden Hartgummistäben elektrische Ladungen entstanden, die einander abstoßen; bei den beiden Glasstäben war es das gleiche. Die Ladungen des Hartgummistabes und des Glasstabes ziehen sich jedoch gegenseitig an. Daraus zogen gegen Ende des 18. Jahrhunderts Wissenschaftler die Erkenntnis, daß die Elektrizität der Hartgummistäbe und der Glasstäbe verschiedenartig ist. Willkürlich bezeichneten sie die auf dem Glasstab erzeugte Elektrizität als **positiv (+)** und die auf dem Hartgummistab erzeugte Elektrizität als **negativ (-)**.

Fassen wir die Ergebnisse des oben beschriebenen Versuchs zusammen, so ergibt sich die Regel:

**Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab.
Ungleichnamige Ladungen ziehen sich an.**

Elektrische Ladungen kann man mit einem Elektroskop oder einem Elektrometer nachweisen. In der Abb. 3 ist ein Elektrometer dargestellt.

Elektrometer



(Abb. 3)

Bei diesem Gerät ist ein Metallstab gut isoliert in ein Metallgehäuse eingeführt. An dem Metallstab befindet sich eine leichte, bewegliche Metallnadel. Wird nun der Metallstab elektrisch aufgeladen (z. B. durch Berühren mit einem geriebenen Hartgummistab), so verteilt sich diese Ladung wegen der gegenseitigen Abstoßungskraft ihrer Ladungsteilchen über den ganzen Metallstab und die bewegliche Nadel. Dadurch wird die Nadel vom Stab abgestoßen. Der Ausschlag bleibt so lange bestehen, bis die Ladung von dem Metallstab wieder abgenommen wird (z. B. durch Berühren des Metallstabes mit der Hand).

1.2. Die Bedeutung der Elektrizität

Es war ein langer Weg von der Furcht unserer Vorfahren vor Blitz und Donner beziehungsweise von der Beobachtung der Reibungselektrizität durch die Griechen bis zur heutigen Bedeutung dieser Naturerscheinung. Noch vor knapp 150 Jahren wurde die Elektrizität nur für Laboratoriumsexperimente benutzt. Erst im vorigen Jahrhundert begann eine stürmische Entwicklung, von der die nachstehenden Daten einen Eindruck vermitteln sollen:

- 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)
- 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
- 1879 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

Neben der schon seit langem bekannten Reibungselektrizität kennt man heute eine Reihe anderer Möglichkeiten, Elektrizität zu erzeugen, so vor allem mit Hilfe des Magnetismus in den Dynamos und mit Hilfe chemischer Vorgänge in den galvanischen Elementen. Darüber hinaus kann man durch Wärme in den Thermoelementen, durch Licht in den Photozellen und durch Druck in Quarzkristallen Elektrizität erzeugen (vgl. hierzu Abschnitt 6.). Diese auf verschiedene Weise zu erzeugende Elektrizität ist an sich unsichtbar. Man kann sie jedoch an ihren Wirkungen erkennen (z. B. magnetische Wirkung, Wärmewirkung, Lichtwirkung, chemische Wirkung). Vgl. hierzu die Abschnitte 4. und 5.

Entsprechend den verschiedenen Wirkungen der Elektrizität gibt es heute eine Vielzahl von Anwendungsgebieten für diese Naturerscheinung. So wird sie unter anderem verwendet zur Beleuchtung, zur Heizung, zum Antreiben von Geräten, Maschinen oder Anlagen und zum Übertragen von Nachrichten selbst über größte Entfernungen.

1.3. Die Elektronen als Grundlage der Elektrizität

1.3.1. Aufbau und elektrisches Verhalten der Stoffe

Das Verstehen elektrischer Vorgänge erfordert die Kenntnis einiger Grundbegriffe vom Aufbau der Stoffe.

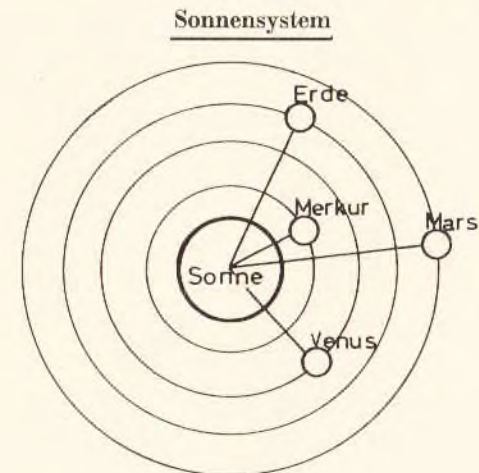
Man kennt heute mehrere 100000 verschiedene Stoffe (**chemische Verbindungen**), die auf der Erde vorkommen. In diesen Stoffen wurden 89 verschiedene **Grundstoffe (chemische Elemente)** gefunden, die che-

misch nicht weiter in andersartige Stoffe zerlegt werden können. Alle Gesteine, Bodenschätze, Erde, Wasser, Flüssigkeiten, Gase usw. bestehen also aus diesen Grundstoffen. Daneben ist es gelungen, 14 weitere Grundstoffe künstlich herzustellen.

Alle Stoffe bestehen aus unter sich gleichen Bausteinen, deren Größe allerdings weit unter der Sichtbarkeitsgrenze liegt. Man nennt solche kleinsten Teilchen **Moleküle**. Da alle Stoffe mit chemischen Mitteln in ihre Grundstoffe zerlegbar sind, muß das auch bei den Molekülen möglich sein. Die auf chemischem Wege erzeugten Teile eines Moleküls nennt man **Atome**. Wir merken uns:

**Ein Molekül ist das kleinste Teilchen einer chemischen Verbindung;
ein Atom ist das kleinste Teilchen eines chemischen Elements.**

Das Wort Atom ist abgeleitet von dem griechischen Wort „atomos“; es heißt „unteilbar“. Noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts nahm man an, daß die Atome die kleinsten unteilbaren Teilchen sind, aus denen alle Stoffe bestehen. Heute betrachtet man jedes Atom als eine kleine Welt für sich. Ähnlich wie beim Sonnensystem Planeten auf bestimmten Bahnen um die Sonne kreisen (vgl. hierzu Abb. 4), bewegen sich beim Atom



(Abb. 4)

um einen **Atomkern** mit großer Geschwindigkeit kleinste Teilchen, die **Elektronen**. Die Elektronenbahnen stellt man sich als kreis- oder ellipsenförmige Schalen vor, die in Abständen hintereinander um den Kern liegen.

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. Zwischen dem Atomkern und den Elektronen besteht eine elektrische Anziehungskraft, denn der **Atomkern ist positiv** geladen, während die **Elektronen negativ** geladen sind (ungleichnamige Ladungen ziehen sich an). Diese Anziehungskraft hält der Fliehkraft das Gleichgewicht. Wenn der Atomkern die Elektronen anzieht, muß er für jedes um den Kern kreisende Elektron eine positive Ladungseinheit enthalten. Die Zahl dieser **positiven Kernladungen**, der **Protonen**, wird durch die Ordnungszahl des Elements (1...103) angegeben, z. B.

beim **Wasserstoffatom** (Ordnungszahl 1) kreist um ein positiv geladenes Proton ein negatives Elektron;

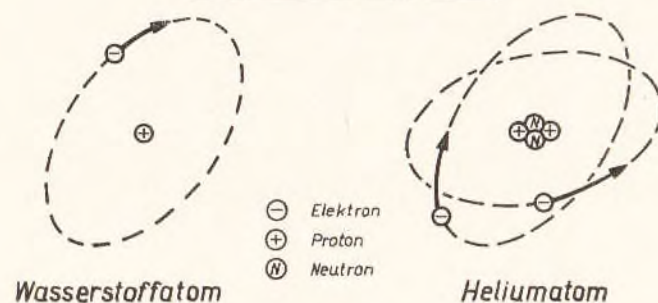
beim **Heliumatom** (Ordnungszahl 2) kreisen um zwei Protonen zwei Elektronen;

beim **Kohlenstoffatom** (Ordnungszahl 6) haben wir im Kern 6 Protonen und auf zwei diesen Kern umgebenden Schalen 6 Elektronen;

beim **Kupferatom** (Ordnungszahl 29) finden wir im Kern 29 Protonen und auf mehreren diesen Kern umgebenden Bahnen 29 Elektronen.

In sämtlichen Atomen mit mehr als einer Kernladung befinden sich im Kern neben den positiven Protonen noch **elektrisch neutrale Neutronen**. Diese Neutronen (auch „Atomkitt“ genannt) sorgen dafür, daß die Protonen wegen ihrer gleichnamigen Ladung sich nicht gegenseitig abstoßen, so daß der Kern zerfällt (vgl. hierzu Abb. 5).

Schematischer Atomaufbau



(Abb. 5)

Die Elektrizität ist also bereits in jedem Stoff vorhanden, als negative Ladungseinheit im Elektron und als positive Ladungseinheit im Proton.

Solange bei den Atomen die Zahl der negativ geladenen Elektronen der Zahl der positiv geladenen Protonen entspricht, heben sich die elektrischen Ladungen gegenseitig auf; das Atom erscheint nach außen elektrisch

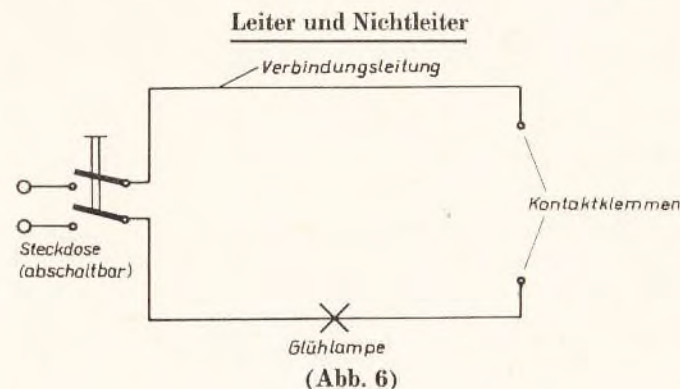
neutral. Zur Gewinnung elektrischer Energie (Elektrizität) kommt es nun darauf an, die **elektrischen Ladungen voneinander zu trennen**. Diese Ladungstrennung kann auf verschiedene Weise erfolgen (vgl. hierzu Abschnitt 1.2.).

Die auf der **äußeren Schale** eines Atoms kreisenden Elektronen nennt man **Valenzelektronen**. Sie sind das Bindeglied zwischen den Atomen einer chemischen Verbindung und nicht so fest an den Atomkern gebunden wie die Elektronen der inneren Schalen. Diese Valenzelektronen können sich z. T. vom Atomverband lösen und zwischen den Atomen hin- und herbewegen. So sind z. B. alle Valenzelektronen der Metalle bei normaler Temperatur vom Atom gelöst und bewegen sich als **Leitungselektronen** oder „freie Elektronen“ von einem Atom zum anderen. Es findet also ein Elektronenaustausch von Atom zu Atom statt. Ist nun bei einem Atom die Zahl der Protonen größer als die Zahl der Elektronen, dann erscheint das Atom elektrisch positiv geladen (**Elektronenmangel**). Umgekehrt hat ein Atom eine negative Ladung, wenn die Anzahl der Elektronen größer ist als die Zahl der Protonen (**Elektronenüberschuß**).

Entfernt man nun von einem Körper viele freie Elektronen (z. B. werden beim Reiben des Glasstabes Elektronen entfernt, die in die Seide übergehen), dann wird der ganze Körper infolge des Elektronenmangels elektrisch positiv, während der Körper, der die Elektronen aufgenommen hat (z. B. die Seide), durch den Elektronenüberschuß elektrisch negativ wurde. So wie hier tritt stets bei der Erzeugung eines elektrischen Zustandes nie eine Elektrizitätsart allein auf.

1.3.2. Leiter und Nichtleiter

Wir wollen untersuchen, welche Werkstoffe die Elektrizität weiterleiten. Zu diesem Zweck bauen wir uns die in der Abb. 6 dargestellte Versuchsanordnung auf.



(Abb. 6)

Eine Glühlampe wird mit einer Verbindungsleitung (isolierter Kupferdraht) an eine abschaltbare Steckdose angeschlossen. Die Verbindungsleitung wird an zwei Kontaktklemmen unterbrochen. Zwischen diese Kontaktklemmen spannen wir zunächst einen Kupferdraht. Schalten wir jetzt die Steckdose ein, so brennt die Lampe, weil die Elektrizität aus der Steckdose heraus über die Verbindungsleitung (einschließlich des Kupferdrahtes zwischen den Kontaktklemmen) zur Glühlampe geleitet wird. Jetzt schalten wir die Steckdose wieder ab und spannen nacheinander noch verschiedene andere Stoffe zwischen die Kontaktklemmen. Bei jedem Stoff schalten wir die Steckdose wieder ein.

Der Versuch zeigt, 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 weiterleiten. Man teilt daher die Stoffe im allgemeinen in **Leiter** und **Nichtleiter** ein. Stoffe, deren elektrischer Widerstand zwischen denen von guten und schlechten Leitern liegt, nennt man **Halbleiter**.

1.3.3. Elektronenbewegung und elektrische Vorgänge

1.3.3.1. Der elektrische Strom

Der im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Versuch hat gezeigt, daß die Elektrizität von der Steckdose mit Hilfe eines Leiters zur Glühlampe geleitet wird. In diesem Leiter befinden sich gleichmäßig verteilt freie Elektronen, die sich ungeordnet zwischen den Atomen hin- und herbewegen (vgl. hierzu Abb. 7).

Ungeordnete Bewegung
der freien Elektronen
(kein Strom)



○ Atom • Elektron

(Abb. 7)

Gerichtete Bewegung
der freien Elektronen
(Strom)



→ Bewegungsrichtung

(Abb. 8)

Sobald jedoch die Bewegung der freien Elektronen gerichtet wird, entsteht ein Elektronenstrom (vgl. hierzu Abb. 8). Diesen **gerichteten Elektronenstrom** nennt man **elektrischen Strom**.

Ein elektrischer Strom besteht also ebenso aus bewegten Elektronen, wie z. B. ein Luftstrom aus bewegten Luftteilchen besteht (ein Teilchen treibt das andere vor sich her).

Dabei bewegen sich die Elektronen nur sehr langsam vorwärts (in einer Sekunde nur wenige Millimeter). Trotzdem kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektrischen Stromes bis 300 000 km/s betragen (vgl. eine Reihe hintereinanderliegender Billardkugeln beim Anstoß).

Damit in einem Leiter die Bewegung der freien Elektronen gerichtet wird, also ein Strom fließt, müssen die freien Elektronen angestoßen werden. Dieser Anstoß erfolgt z. B. durch Berühren des Leiters mit einem elektrisch nicht neutralen Körper, einem geladenen Körper. Die freien Elektronen des Leiters bemühen sich dann sogleich, die Ladung gleichmäßig zu verteilen. Es fließt ein Ausgleichsstrom von der elektrischen negativen Ladung (Elektronenüberschuß) zur elektrisch positiven Ladung (Elektronenmangel). Dabei strömen die Elektronen so lange, bis ein Ausgleich hergestellt und die Elektronendichte überall gleich ist.

Der Elektronenstrom fließt von $\ominus$ nach $\oplus$

Unabhängig von der Elektronenstromrichtung hat man für die Technik festgelegt, daß der Strom vom $\oplus$ nach $\ominus$ fließt.

Die Festlegung dieser technischen Stromrichtung erfolgte, als man noch keine Kenntnis von den Elektronen und ihrer Bewegungsrichtung hatte.

Die technische Stromrichtung geht von $\oplus$ nach $\ominus$

1.3.3.2. Die elektrische Spannung

Soll ständig ein Strom fließen, dann muß bei der negativen Ladung stets für Elektronennachschub gesorgt werden. Ein Strom fließt nur, wenn auf der einen Seite die Elektronen durch die Anhäufung (Elektronenüberschuß) unter einem gewissen Druck stehen, der durch die gegenseitige Abstoßung verursacht wird. Auf der anderen Seite muß stets eine Leere (Elektronenmangel) und damit ein Sog vorhanden sein. Es ist also ein Druckunterschied erforderlich. **Dieser Druckunterschied** ist die treibende Kraft, die die Elektronen fortbewegt. Er heißt **elektrische Spannung**.

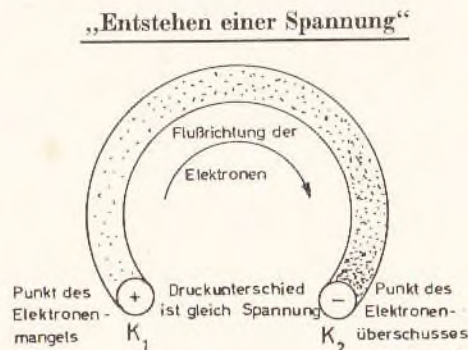
Je größer der Druckunterschied, also je größer die Spannung, desto größer der Elektronentransport und somit der elektrische Strom. Ist kein Druckunterschied, also keine Spannung mehr vorhanden, so findet kein Elektronentransport statt, es fließt kein elektrischer Strom.

Je größer die elektrische Spannung, desto größer der elektrische Strom.

Einrichtungen, die dafür sorgen, daß stets ein Druckunterschied vorhanden ist, heißen **Spannungserzeuger** oder **Spannungsquellen**. Da der elektrische Strom eine Folge der elektrischen Spannung ist, spricht man sehr oft auch von **Stromquellen**. Spannungsquellen haben in der Regel zwei Anschlußpunkte (Pole, Klemmen). Am $-$ Pol ist der Elektronen-

überschuß und am $+$ Pol der Elektronenmangel. Die verschiedenen Arten der Spannungserzeugung sind im Abschnitt 6. beschrieben.

Ein Spannungserzeuger ist z. B. ein Dynamo. In ihm befindet sich eine Wicklung aus Kupferdraht. Solange die Maschine stillsteht, sind die Elektronen in der Wicklung gleichmäßig verteilt. Wird die Maschine gedreht, so werden die freien Elektronen in eine Richtung gedrängt (vgl. hierzu Abb. 9). Bei der Klemme K1 entsteht dadurch ein Elektronenmangel ($+$ Pol) und bei der Klemme K2 ein Elektronenüberschuß ($-$ Pol). Zwischen den Klemmen besteht eine Spannung. Werden die Klemmen durch einen Leiter miteinander verbunden, dann fließt ein elektrischer Strom.



(Abb. 9)

Bleiben bei der Spannungsquelle der positive und der negative Pol immer an der gleichen Stelle, dann strömen die Elektronen immer in die gleiche Richtung. Diesen Strom nennt man daher **Gleichstrom**.

Wechseln die Punkte des Elektronenüberschusses und -mangels dauernd, dann wechselt im gleichen Rhythmus die Richtung des Elektronenstromes. Diesen Strom nennt man daher **Wechselstrom**.

1.3.3.3. Der elektrische Widerstand

Die Größe des Stromes hängt einmal von der Größe der Spannung ab. Zum anderen hängt die Größe des Stromes vom Stoff ab, in dem der Strom fließen soll.

Die Fähigkeit eines Leiters, einen elektrischen Strom weiterzuleiten, hängt vor allem von der Zahl seiner freien Elektronen ab. Je mehr freie Elektronen im Stoff vorhanden sind, um so mehr können an der Elektronenbewegung teilnehmen, um so mehr Strom kann fließen. Von Bedeutung ist aber auch die Beweglichkeit der freien Elektronen. Je dichter im Stoff die Moleküle zusammenstehen, um so häufiger stoßen die freien Elektronen mit ihnen zusammen. Dadurch wird die Fortbewegung der Elektronen und damit das Fließen des Stromes behindert. Ein Teil der Bewegungsenergie der Elektronen wird in Wärmeenergie umgewandelt. Diese „Stromwärme“ tritt in jedem Leiter auf. Die so entstehenden Stromwärmeverluste entsprechen den Reibungsverlusten in der Mechanik.

Man sagt, die Stoffe haben einen mehr oder weniger großen **elektrischen Widerstand**. Dieser Widerstand hängt von der Atomdichte des Stoffes und der Zahl seiner freien Elektronen ab.

Je größer der elektrische Widerstand, desto kleiner der elektrische Strom.

1.4. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 1.1. bis 1.3.

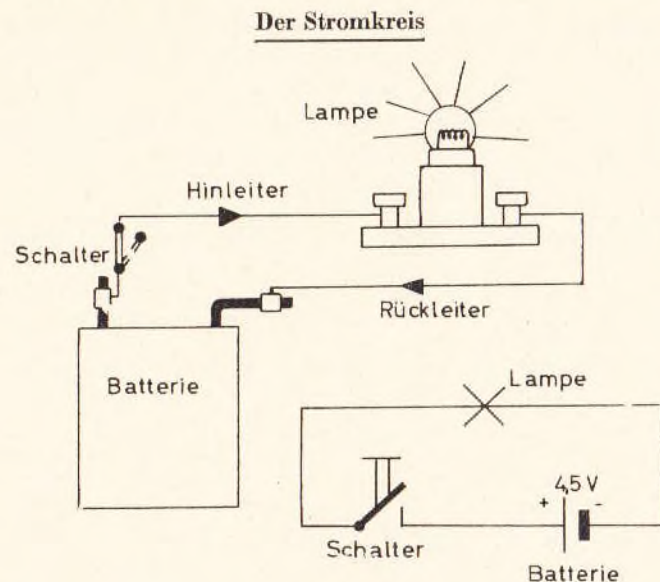
1. Woher kommt der Name Elektrizität? 2. Wie verhalten sich gleichnamige und ungleichnamige elektrische Ladungen zueinander? 3. Mit welchem Gerät kann man elektrische Ladungen nachweisen? 4. Beschreiben Sie den Aufbau und die Wirkungsweise dieses Gerätes! 5. Beschreiben Sie den Unterschied zwischen einem chemischen Element und einer chemischen Verbindung! 6. Was ist ein Molekül? 7. Was ist ein Atom und woher kommt der Name? 8. Beschreiben Sie den Aufbau eines Atoms! 9. Welche elektrischen Ladungen tragen die Protonen, die Elektronen und die Neutronen? 10. Was sind freie Elektronen und was versteht man unter Valenzelektronen? 11. Erklären Sie die Begriffe Elektronenmangel und Elektronenüberschuß! 12. Nennen Sie einige Beispiele für Leiter und Nichtleiter! 13. Was versteht man unter einem elektrischen Strom? 14. Nennen Sie die maximale Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektrischen Stromes! 15. Beschreiben Sie den Unterschied zwischen der Elektronenstromrichtung und der technischen Stromrichtung! 16. Beschreiben Sie den Begriff elektrische Spannung! 17. Wodurch unterscheidet sich der Gleichstrom vom Wechselstrom? 18. Wovon hängt der elektrische Widerstand eines Stoffes ab? 19. Warum erwärmen sich Leitungsdrähte, wenn sie vom elektrischen Strom durchflossen werden? 20. Beschreiben Sie, wie die freien Elektronen in einem Leitungsdraht beeinflusst werden, der an die beiden Pole einer Taschenlampenbatterie angeschlossen wird! 21. Wie verhalten sich elektrischer Strom und elektrischer Widerstand zueinander?

Weitere Rechenaufgaben siehe Band B 6 (Teile 1 und 2) des „Handbuchs der Fernmeldetechnik – Buchreihe AFT“.

2. Grundlagen der Gleichstromlehre

2.1. Der Stromkreis

In der Abb. 10 ist ein elektrischer Stromkreis bildlich und daneben mit Hilfe genormter Schaltzeichen dargestellt. In diesem Stromkreis befindet sich als Spannungserzeuger eine Batterie. Die von der Batterie erzeugte Spannung treibt die Elektronen durch die Leitung und durch die Lampe. Dabei wird die Spannung vor allem von der Lampe wieder verbraucht. Die Lampe ist also ein Spannungsverbraucher wie alle Geräte, die durch den elektrischen Strom betrieben werden (z. B. Motoren, Heiz- und Kochgeräte, Rundfunk- und Fernsehempfänger).



(Abb. 10)

In den elektrischen Stromkreisen befinden sich Spannungserzeuger, Leitungen und Spannungsverbraucher.

Im dargestellten Stromkreis kann der elektrische Strom erst fließen (kreisen vom Spannungserzeuger über Leitung und Spannungsverbraucher zum Spannungserzeuger zurück), wenn der Schalter geschlossen wird; man sagt, wenn der Stromkreis geschlossen ist.

Nur in einem geschlossenen Stromkreis verursacht eine Spannung einen ständig fließenden Strom.

2.2. Die elektrischen Größen und ihre Einheiten

Wir wissen, daß ein Strom nur fließen kann, wenn eine Spannung vorhanden ist. Andererseits wird der Strom durch einen Widerstand mehr oder weniger begrenzt, wobei sowohl die Leitung (Leitungswiderstand) als auch der Spannungsverbraucher (Verbraucherwiderstand) eine Rolle spielen. Die Stärke des Stroms, die Stromstärke, hängt also von der Spannung und vom Widerstand ab.

In jedem Stromkreis finden wir die elektrischen Größen **Stromstärke**, **Spannung**, **Widerstand**. Um die Verhältnisse in den Stromkreisen be-

rechnen zu können, hat man für diese Größen Einheiten (Maßeinheiten) geschaffen.

2.2.1. Die Stromstärke

Der elektrische Strom hat je nach der Zahl der an der Stromleitung beteiligten Elektronen eine bestimmte Stärke. Diese Stromstärke erkennt man an der Größe der Wirkung des Stromes. Zur Festlegung der Einheit der Stromstärke dienten zunächst die bei der chemischen Wirkung des elektrischen Stromes beobachteten Vorgänge (vgl. hierzu Abschn. 5.1. „Die Elektrolyse“).

Durch eine Silbernitratlösung wird ein Strom geschickt, der eine Ausscheidung reinen Silbers aus der Lösung bewirkt. Das Gewicht des ausgeschiedenen Silbers ist ein Maß für die Anzahl der fließenden Elektronen.

Die Elektronenmenge, die in einer beliebigen Zeit 1,118 mg Silber aus einer Silbernitratlösung ausscheidet, wurde als **Einheit der Elektrizitätsmenge** festgelegt. Diese Einheit nennt man nach dem franz. Physiker Coulomb (1736 bis 1806):

1 Coulomb (1 C)

1 Coulomb entspricht ungefähr einer Anzahl von $6,3 \cdot 10^{18}$ freien Elektronen.

Die Elektrizitätsmenge hat das Formelzeichen Q .

Die Elektronenmenge, die in einer Sekunde 1,118 mg Silber aus einer Silbernitratlösung ausscheidet, wurde als **Einheit der Stromstärke** festgelegt¹⁾. Diese Einheit nennt man nach dem franz. Physiker Ampère (1775 bis 1836):

1 Ampere (1 A)

Die Stromstärke hat das Formelzeichen I .

Die Stromstärke I ist also die Elektrizitätsmenge Q , die in der Zeiteinheit (1 Sekunde) durch den Leiter fließt. Damit ergibt sich, wenn man die Elektrizitätsmenge Q durch die Zeit t teilt:

$$I = \frac{Q}{t} \text{ (A)}$$

¹⁾ Seit 1948 wird die Einheit der Stromstärke aus den Anziehungskräften zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern bestimmt (MKSA-Einheit): „Ein Ampere ist die Stromstärke des Gleichstroms, der zwei gerade, fadenförmige und im Abstand von 1 m parallel zueinander verlaufende Leiter durchfließt und zwischen diesen eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ N je Meter ihrer Länge erzeugt.“

Nach Umstellen der Formel ist $Q = I \cdot t$ (C). Setzt man für I und t die gebräuchlichen Einheiten ein, so ergibt sich für die Elektrizitätsmenge eine weitere Einheit, die **Amperesekunde** ($A \cdot s = As$).

$$1 C = 1 As; \quad 3600 C = 3600 As = 1 Ah.$$

Beispiel:

Welche durchschnittliche Stromstärke wird einer Batterie entnommen, wenn diese eine Elektrizitätsmenge von 38 Ah hat und nach 10 Stunden entladen ist?

Gegeben: $Q = 38 \text{ Ah}$, $t = 10 \text{ h}$

Gesucht: I

$$\text{Lösung: } I = \frac{Q}{t} = \frac{38 \text{ Ah}}{10 \text{ h}} = \underline{\underline{3,8 \text{ A}}}$$

Die durchschnittliche Stromstärke beträgt 3,8 A.

Die Einheit 1 Ampere ist für die Starkstromtechnik u. U. zu klein und für die Fernmeldetechnik oft zu groß. In diesen Fällen werden Vergrößerungen oder Verkleinerungen der Einheit 1 A benutzt, z. B. 1 Kiloampere (kA) = 1000 Ampere (A), 1 Milliampere (mA) = $\frac{1}{1000}$ Ampere (A).

Zur Bezeichnung von Vielfachen oder Teilen von Einheiten werden folgende Kurzzeichen verwendet:

T	Tera	= 10^{12}	= 1 000 000 000 000	= 1 Billion
G	Giga	= 10^9	= 1 000 000 000	= 1 Milliarde
M	Mega	= 10^6	= 1 000 000	= 1 Million
k	Kilo	= 10^3	= 1 000	= 1 Tausend
h	Hekto	= 10^2	= 100	= 1 Hundert
da	Deka	= 10^1	= 10	= 1 Zehn
			= 1	= 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}	= 0,000 001	= 1 Millionstel
n	Nano	= 10^{-9}	= 0,000 000 001	= 1 Milliardstel
p	Piko	= 10^{-12}	= 0,000 000 000 001	= 1 Billionstel

Zur Umrechnung einzelner Maßeinheiten 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 Einheit	Umrechnungsfaktor				

Beispiel zur Anwendung der Tabelle:

Wieviel mA sind 465 μA ?

Wir suchen als bekannte Einheit μA heraus. Sie steht in der ersten Zeile. In dieser Zeile gehen wir nach rechts bis unter die Spalte mA. Dort finden wir den Umrech-

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

nungsfaktor 0,001. Die 465 μA sind also mit 0,001 malzunehmen: $0,001 \cdot 465 = 0,465 \text{ mA}$.

2.2.2. Der Widerstand

Der Widerstand, den der Strom auf seinem Wege zu überwinden hat, kann verschieden groß sein. Um das Verhalten der Leiter (geringer Widerstand) und Nichtleiter (großer Widerstand) miteinander vergleichen zu können, wurde für den elektrischen Widerstand eine Einheit festgelegt. Diese Einheit wird dargestellt durch den Widerstand einer Quecksilbersäule von 1 mm² Querschnitt und 1063 mm Länge bei 0 °Celsius¹⁾. Die **Einheit des Widerstands** nennt man nach dem deutschen Physiker Ohm (1789–1854):

1 Ohm (1 Ω)

Als Kurzzeichen wird für die Einheit des Widerstands der griechische Buchstabe Omega (Ω) verwendet.

Der Widerstand hat das Formelzeichen R .

Folgende Vergrößerungen der Einheit sind gebräuchlich:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Kiloohm (k}\Omega\text{)} &= 1\,000 \text{ Ohm } (\Omega), \\ 1 \text{ Megohm (M}\Omega\text{)} &= 1\,000\,000 \text{ Ohm } (\Omega). \end{aligned}$$

Eine andere Möglichkeit zur Kennzeichnung des elektrischen Verhaltens der Leiter und Nichtleiter besteht darin, die Fähigkeit, den Strom weiterzuleiten, anzugeben. Diese Eigenschaft eines Stoffes wird durch den Leitwert angegeben. Die **Einheit des Leitwerts** nennt man nach dem deutschen Ingenieur Werner von Siemens (1816 bis 1892):

1 Siemens (1 S)

Der Leitwert hat das Formelzeichen G .

Ein großer Widerstand leitet den Strom schlecht (d. h. kleiner Leitwert); ein kleiner Widerstand leitet den Strom gut (d. h. großer Leitwert). Der Leitwert ist somit der umgekehrte Wert des Widerstands:

$$G = \frac{1}{R} \text{ bzw. } R = \frac{1}{G}$$

1. Beispiel:

Der Widerstand eines Leiters beträgt 10 Ohm. Wie groß ist sein Leitwert?

Gegeben: $R = 10 \Omega$

Gesucht: G

¹⁾ Seit 1948 gilt als Einheit des Widerstandes der Quotient aus Spannung und Strom (MKSA-Einheit): „Ein Widerstand besitzt den Wert 1 Ohm, wenn durch ihn bei einer Spannung von 1 Volt der Strom 1 Ampere fließt.“

Lösung: $G = \frac{1}{R} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ S} = \underline{\underline{100 \text{ mS}}}$

Der Leitwert beträgt 100 mS.

2. Beispiel:

Ein Leiter hat einen Leitwert von 0,3 mS. Wie groß ist sein Widerstand?

Gegeben: $G = 0,3 \text{ mS} = 0,0003 \text{ S}$

Gesucht: R

Lösung: $R = \frac{1}{G} = \frac{1}{0,0003} = \underline{\underline{3333 \Omega}}$

Der Widerstand beträgt 3333 Ω .

2.2.3. Die Spannung

Die Einheit für die Spannung wird aus den Einheiten für Strom und Widerstand abgeleitet. Es ist die Spannung, die durch einen Leiter von 1 Ω Widerstand einen Strom von 1 A treibt¹⁾. Diese **Einheit der Spannung** nennt man nach dem italienischen Physiker Volta (1745 bis 1827):

1 Volt (1 V)

Die Spannung hat das Formelzeichen U .

Folgende Vergrößerungen oder Verkleinerungen der Einheit sind gebräuchlich:

1 Megavolt (MV)	= 1 000 000 Volt (V),
1 Kilovolt (kV)	= 1000 Volt (V),
1 Millivolt (mV)	= $\frac{1}{1000}$ Volt (V),
1 Mikrovolt (μV)	= $\frac{1}{1000000}$ Volt (V).

2.2.4. Das Ohmsche Gesetz

Untersucht man die Verhältnisse in einem Stromkreis, so erkennt man, daß zwischen den drei Größen Stromstärke, Spannung und Widerstand eine Abhängigkeit besteht.

Mit Hilfe eines in der Abb. 11 dargestellten Versuchs soll der Zusammenhang zwischen diesen drei Größen festgestellt werden.

Zunächst wollen wir den ausgespannten Widerstandsdraht eichen. Dazu führen wir die Krokodilklemme an dem Draht entlang und suchen die Stelle, an der der Quotient aus Spannung und Stromstärke = 1 ist. Diese Stelle kennzeichnen wir auf dem Brett hinter dem Widerstandsdraht mit einem Kreidestrich und schreiben den ermittelten Quotienten hinzu. Genauso suchen wir die Quotienten 2, 3, 4 usw. (Aus den in der Abb. 11 ablesbaren Werten für Spannung und Stromstärke ergibt sich ein Quotient von $4,1 : 0,5 = 8,2$.) Die Quotienten sind die Widerstandswerte des Drahtes; wir schreiben deshalb in die Reihe der Zahlen das Wort Ohm.

¹⁾ Seit 1948 gilt als Einheit der Spannung der Quotient aus Arbeit und Elektrizitätsmenge (MKSA-Einheit): „Ein Volt besteht zwischen zwei Punkten eines elektrischen Feldes, wenn die Arbeit 1 Joule an einer Ladung von 1 Coulomb verrichtet werden muß“; $(1 \text{ V} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C}} = \frac{1 \text{ Ws}}{1 \text{ As}} = \frac{1 \text{ VAs}}{1 \text{ As}})$.

Vergleichen wir nun bei gleichbleibender und bei sich ändernder Spannung für verschiedene Stellungen der Krokodilklemme die Werte für Stromstärke, Spannung und Widerstand miteinander, so erkennen wir folgende Zusammenhänge:

- a) Bei konstanter Spannung wird der Strom um so kleiner, je größer der Widerstand ist. Das Produkt aus Stromstärke und Widerstand ist konstant und entspricht der Größe der Spannung.

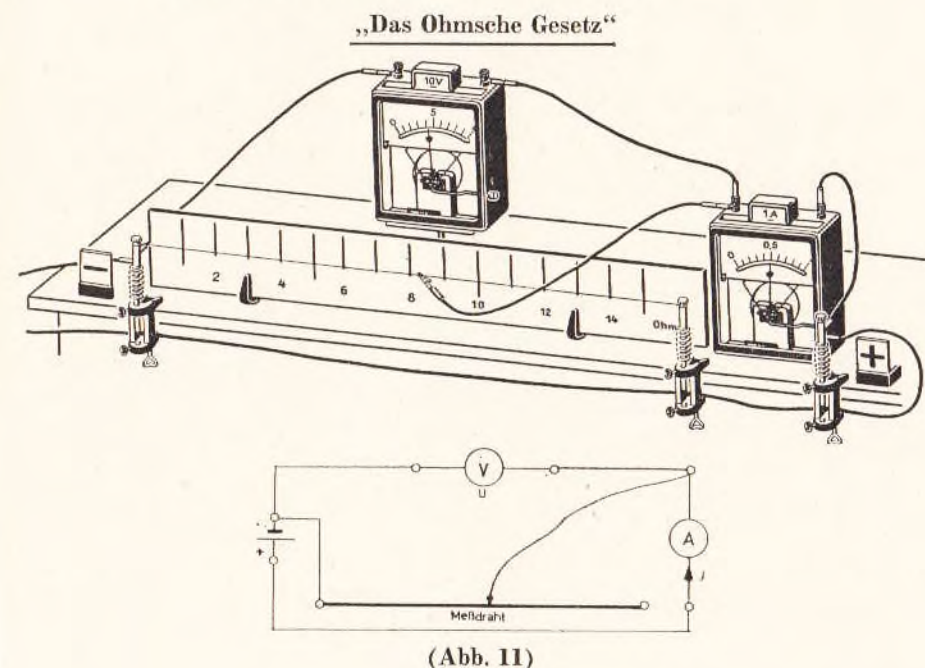
Bei gleichbleibender Spannung ändern sich Stromstärke und Widerstand im umgekehrten Verhältnis.

- b) Bei konstantem Widerstand ist der Quotient aus Spannung und Stromstärke konstant.

Bei gleichbleibendem Widerstand ändern sich Spannung und Stromstärke im gleichen Verhältnis.

- c) Ändert man die Größe der Spannung sowie die Größe des Widerstandes, dann ergibt der Quotient aus Spannung und Widerstand die Stromstärke.

Die Stromstärke bleibt konstant, wenn sich Spannung und Widerstand im gleichen Verhältnis ändern.



Werden diese Ergebnisse des Versuchs in eine rechnerisch verwendbare Form gesetzt, so erhält man die Formel für das von Georg Simon Ohm festgestellte wichtige Gesetz der Elektrotechnik:

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

Dieses **Ohmsche Gesetz** gilt für den ganzen Stromkreis und auch für einzelne Teile eines Stromkreises. Dabei ist darauf zu achten, daß die einzelnen Werte für Stromstärke, Spannung und Widerstand jeweils zu dem gleichen Abschnitt eines Stromkreises gehören.

Aus der Algebra kennen wir die Regeln für das Rechnen mit Gleichungen mit einer Unbekannten. Zur Auffrischung der Kenntnisse soll jedoch das Umstellen der Formel für das Ohmsche Gesetz kurz erläutert werden:

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 :

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

Nun können wir auf der rechten Seite das R kürzen:

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

und wir erhalten

$$R \cdot I = U$$

oder nach Vertauschen der Seiten

$$U = I \cdot R$$

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 :

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

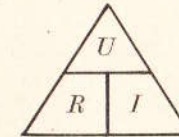
Wir kürzen auf der linken Seite das I :

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

und erhalten

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

Wir erkennen, daß stets eine der 3 Größen berechnet werden kann, wenn die anderen beiden Größen bekannt sind. Dabei sind die Werte stets in den Einheiten Volt, Ohm und Ampere einzusetzen. Man kann das Ohmsche Gesetz auch sehr einfach mit Hilfe des „Ohmschen Dreiecks“ umformen:



Deckt man die gesuchte Größe zu, so ergibt sich das Lösungsschema für die Berechnung dieser Größe.

Wir wollen nun mit einigen Beispielen das Rechnen mit dem Ohmschen Gesetz üben:

Berechnen der Stromstärke

1. Beispiel:

Ein Widerstand von 6Ω liegt an einer Spannung von 12 V . Wie groß ist die Stromstärke im Widerstand?

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

Gesucht: I

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

Die Stromstärke im Widerstand beträgt 2 A .

2. Beispiel:

An einer Spannungsquelle von 24 V liegt ein Widerstand von $3,2 \text{ k}\Omega$. Wieviel mA fließen in diesem Stromkreis?

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

Gesucht: $I \text{ (mA)}$

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

Es fließen $7,5 \text{ mA}$.

Berechnen der Spannung

1. Beispiel:

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

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

Gesucht: U

Lösung: $U = I \cdot R = 2 \cdot 6 = \underline{\underline{12 \text{ V}}}$

Die Spannung beträgt 12 V .

2. Beispiel:

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

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

Gesucht: U

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

Die Spannung beträgt 6 V.

Berechnen des Widerstandes

1. Beispiel:

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

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

Gesucht: R

Lösung: $R = \frac{U}{I} = \frac{220}{4} = \underline{\underline{55 \Omega}}$

Die Größe des Widerstandes beträgt 55 Ω .

2. Beispiel:

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

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

Gesucht: $R \text{ (k}\Omega\text{)}$

Lösung: $R = \frac{U}{I} = \frac{24}{0,008} = 3000 \Omega = \underline{\underline{3 \text{ k}\Omega}}$

Die Größe des Widerstandes beträgt 3 k Ω .

2.3. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 2.1. und 2.2.

1. Wie heißen die Einheiten für Spannung, Stromstärke, Elektrizitätsmenge, Widerstand und Leitwert? Welche Kurzzeichen werden für diese Einheiten verwendet? 2. Geben Sie die Formelzeichen an für Spannung, Stromstärke, Elektrizitätsmenge, Widerstand und Leitwert! 3. Erläutern Sie den Begriff Leitwert, und erklären Sie, wie Widerstand und Leitwert sich zueinander verhalten? 4. Nennen Sie die Formel für den Zusammenhang zwischen Elektrizitätsmenge und Stromstärke? 5. Stellen Sie nach dem Muster der Umrechnungstabelle für die Einheit der Stromstärke Tabellen für die Einheiten des Widerstandes und der Spannung her! 6. Unter welchen Voraussetzungen fließt ein Strom in einem Stromkreis? 7. Wieviel A sind 125 467 μA ; 725 mA; 0,36 kA? 8. Wieviel Ω sind 3,5 k Ω ; 0,75 M Ω ? 9. Wieviel M Ω sind 200 000 Ω ? 10. Wieviel μV sind 9,3 mV; 0,000 072 V? 11. Wieviel mV sind 15 750 μV ; 0,345 V; 0,024 kV? 12. Wieviel Ω sind $\frac{2}{3} \text{ S}$? 13. Wieviel S sind 4 Ω ? 14. Wieviel V sind 0,5 kV + 800 mV? 15. Wieviel mA sind 3,5 A + 400 μA ? 16. Wieviel k Ω sind 52 000 Ω + 0,7 M Ω ? 17. Wie heißt das Ohmsche Gesetz? 18. Wie groß ist die Stromstärke in einem Stromkreis, in dem eine Spannung von 36 V wirksam ist und dessen Widerstand 250 Ω beträgt? 19. In einem Stromkreis wird die Spannung von 24 auf 30 V erhöht, wobei der Widerstand gleichbleibend 2,4 Ω beträgt. Wie verändert sich die Stromstärke? 20. Wie groß ist die Spannung, die in einem Stromkreis, dessen Widerstand 42 Ω beträgt, eine Stromstärke von 1,6 A fließen läßt? 21. Durch welche Spannungserhöhung ändert sich in einem Stromkreis die Stromstärke von 0,6 A auf 0,75 A, wenn der Widerstand unverändert 20 Ω beträgt? 22. Welche Widerstandsänderung läßt bei einer Spannung von 6 V die Stromstärke von 0,8 A auf 480 mA absinken? 23. Eine Glühlampe hat auf ihrem Sockel den Aufdruck 3,5 V/0,2 A. Wie groß ist ihr Widerstand? 24. Erklären Sie mit Hilfe des

Ohmschen Gesetzes die Wirkung eines Kurzschlusses (unmittelbare Verbindung der Klemmen einer Spannungsquelle ohne Verbraucherwiderstand)! 25. Erläutern Sie die Begriffe 1 Ampere, 1 Volt, 1 Ohm, 1 Amperesekunde und 1 Siemens! Weitere Rechenaufgaben siehe Band B 6 (Teile 1 und 2) des „Handbuchs der Fernmelde-technik“.

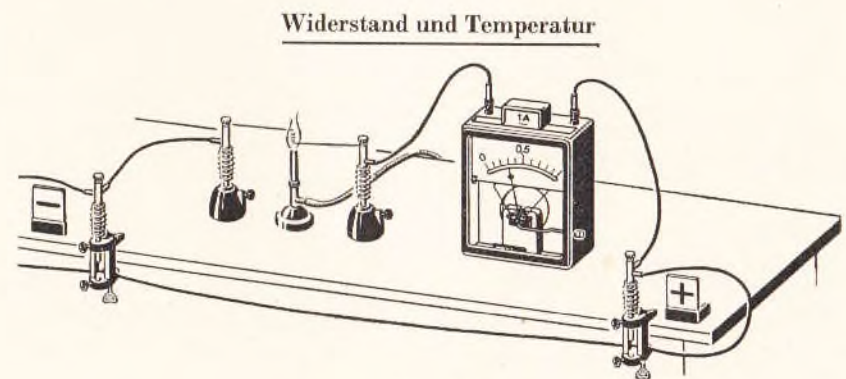
2.4. Der elektrische Widerstand

Der Begriff „Widerstand“ hat in der Elektrotechnik eine doppelte Bedeutung. Einmal bezeichnen wir damit die Größe in einem Stromkreis, die nach dem Ohmschen Gesetz die Stromstärke begrenzt. Jedes elektrische Bauelement (Leitung, Lampe, Heizofen, Klingel, Fernsprechapparat usw.) hat einen elektrischen Widerstand (Leitungswiderstand, Verbraucherwiderstand usw.). Andererseits nennen wir bestimmte Bauelemente, die in Stromkreisen verwendet werden, Widerstände (Schichtwiderstände, Drahtwiderstände usw.). Vergleiche hierzu Abschnitt 2.4.4.

2.4.1. Widerstand und Temperatur

Der elektrische Widerstand ist keine konstante, sondern eine temperaturabhängige Größe. Die eine Widerstandsänderung bewirkende Temperaturänderung kann durch äußere Wärmequellen und auch durch die vom elektrischen Strom selbst erzeugte Wärme verursacht werden.

Mit Hilfe eines in der Abb. 12 dargestellten Versuchs soll das Verhalten des Widerstandes verschiedener Werkstoffe bei Änderung der Temperatur untersucht werden.



(Abb. 12)

Zwischen zwei Klemmen schalten wir nacheinander einen Eisendraht, einen Kupferdraht, einen Konstantandraht und einen Kohlestab. Mit einem Bunsenbrenner

werden diese Werkstoffe erhitzt. Dabei sehen wir, daß der Zeiger des Amperemeters nach dem Erhitzen eines Werkstoffes einen anderen Wert anzeigt als vorher.

Im einzelnen zeigt der Versuch:

- Bei Eisen und Kupfer nimmt der Widerstand mit der Temperaturerhöhung zu. Diese und die meisten anderen Metalle leiten also den Strom im kalten Zustand besser als im warmen. Man nennt sie daher **Kaltleiter**.
- Bei Konstantan wird der Widerstandswert kaum verändert, der Widerstand bleibt **konstant** (daher der Name Konstantan). Diese Eigenschaft findet man auch bei anderen Widerstandslegierungen (z. B. Manganin).
- Bei Kohle nimmt der Widerstand beim Erwärmen ab. Kohle gehört zu den **Heißeleitern**, die den Strom im heißen Zustand besser leiten als im kalten. Heißeleiter sind meist Nichtmetalle (z. B. Urantioxyd, Kurzbezeichnung: „Urdox“).

Durch Zusammenschalten geeigneter Kalt- und Heißeleiter kann man temperaturunabhängige Widerstände herstellen (z. B. Eisen-Urdox-Widerstand).

Der Widerstandswert nach der Temperaturänderung setzt sich zusammen aus dem Widerstandswert bei 20 °C und der Widerstandsänderung. Somit ergibt sich die Formel:

$$R_t = R_{20} + \Delta R$$

wobei

$$\Delta R = R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

Durch Einsetzen erhält man

$$R_t = R_{20} + R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

und durch rechnerische Umwandlung

$$R_t = R_{20} (1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

In diesen Formeln bedeuten:

Δ = Änderung, Unterschied, Differenz (Δ : griech. Buchstabe „Delta“)

ΔR = Widerstandsänderung in Ω

R_{20} = Widerstand in Ω bei der Normaltemperatur t_1 (20 °C)

R_t = Widerstand in Ω nach der Temperaturänderung bei der Temperatur t_2

Δt = Temperaturdifferenz in °C ($\Delta t = t_2 - t_1$), wobei für t_1 die Normaltemperatur (20 °C) und für t_2 die höhere beziehungsweise tiefere Temperatur einzusetzen ist.

α = Temperaturbeiwert (Temperaturzahl, Temperaturkoeffizient). Diese Zahl gibt die Widerstandsänderung eines Widerstandes von 1 Ω bei einer Temperaturänderung um 1 ° (genau von 20 ° bis 21 °) an. (α : griech. Buchstabe „Alpha“).

Für einige Werkstoffe sind nachstehend die Temperaturbeiwerte angegeben:

Werkstoff	$\alpha \left(\frac{1}{^\circ\text{C}} \right)$	Werkstoff	$\alpha \left(\frac{1}{^\circ\text{C}} \right)$
Silber	0,0036	Nickelin	0,00023
Kupfer	0,0040	Manganin	0,00001
Aluminium	0,0040	Konstantan	-0,00003
Eisen	0,0048	Kohle	-0,00050

1. Beispiel:

Wie groß ist der Widerstand einer Kupferwicklung bei einer Temperatur von 80 °C, wenn bei einer Temperatur von 20 °C ein Widerstand von 26 Ω gemessen wird? Der Temperaturbeiwert beträgt 0,004 $\frac{1}{^\circ\text{C}}$.

Gegeben: $R_{20} = 26 \Omega$, $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $t_2 = 80^\circ\text{C}$, $\alpha = 0,004$

Gesucht: R_t

$$\begin{aligned} \text{Lösung: } R_t &= R_{20} + \Delta R \\ \Delta R &= R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t \\ \Delta R &= 26 \cdot 0,004 \cdot 60 \\ \Delta R &= 6,24 \Omega \\ R_t &= 26 + 6,24 \\ R_t &= \underline{\underline{32,24 \Omega}} \end{aligned}$$

Der Widerstand bei 80 °C beträgt 32,24 Ω .

2. Beispiel:

Der Widerstand einer Kohlefadenlampe beträgt im ausgeschalteten Zustand bei 20 °C 1400 Ω . Im eingeschalteten Zustand nimmt die Glühlampe an einer Spannung von 220 V einen Strom von 1 A auf. Der Temperaturbeiwert für Kohle beträgt -0,0005.

- Wie groß ist der Widerstand der Kohlefadenlampe im eingeschalteten Zustand?
- Wie groß ist die Temperatur des heißen Kohlefadens?

Gegeben: $R_{20} = 1400 \Omega$, $U_t = 220 \text{ V}$, $I_t = 1 \text{ A}$, $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $\alpha = -0,0005$

Gesucht: a) R_t b) t_2

$$\begin{aligned} \text{Lösung: a) } R_t &= \frac{U_t}{I_t} = \frac{220}{1} = \underline{\underline{220 \Omega}} \\ \text{b) } \Delta t &= t_2 - t_1 \\ t_2 &= t_1 + \Delta t \\ \Delta R &= R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t \\ \Delta t &= \frac{\Delta R}{R_{20} \cdot \alpha} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta R &= R_t - R_{20} \\
 \Delta R &= 220 - 1400 \\
 \Delta R &= -1180 \, \Omega \\
 \Delta t &= \frac{-1180}{1400} = -0,0005 \\
 \Delta t &= 1686^\circ\text{C} \\
 t_2 &= 20 + 1686 \\
 t_2 &= 1706^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

- a) Der Widerstand der eingeschalteten Kohlefadenlampe beträgt $220 \, \Omega$.
 b) Die Temperatur des heißen Kohlefadens beträgt 1706°C .

Wir haben gesehen, daß der Widerstand vieler Metalle mit sinkender Temperatur abnimmt. Bei einer Abkühlung dieser Leiter bis in die Nähe des absoluten Nullpunktes (also bei -273°C) verschwindet der Widerstand vollkommen, d. h., ein einmal eingeleiteter elektrischer Strom kann sehr lange weiterbestehen, auch wenn keine elektrische Spannung mehr vorhanden ist. Diese Eigenschaft eines Leiters bezeichnet man mit **Supraleitfähigkeit**.

2.4.2. Spezifischer Widerstand und Leitfähigkeit

Der in der Abb. 13 dargestellte Versuch soll uns zeigen, welchen Einfluß der Werkstoff auf den Widerstand eines Leiters hat.

Zwischen zwei Kontaktklemmen schalten wir nacheinander Drähte aus verschiedenen Werkstoffen, jedoch gleicher Länge und gleicher Stärke. 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 $0,2 \text{ mm}$ haben, werden wir feststellen, daß folgende Werte von den Strom- und Spannungsmessern angezeigt werden:

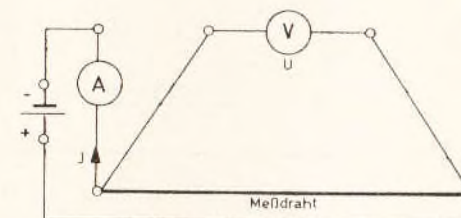
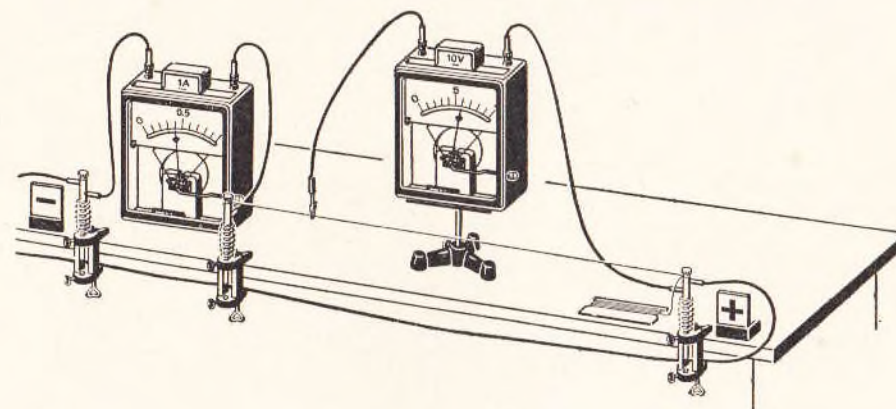
- a) Kupferdraht:
 $I = 3,5 \text{ A}$, $U = 2 \text{ V}$; nach dem Ohmschen Gesetz ist $R = 0,57 \, \Omega$
 b) Aluminiumdraht:
 $I = 2,2 \text{ A}$, $U = 2 \text{ V}$; nach dem Ohmschen Gesetz ist $R = 0,91 \, \Omega$
 c) Eisendraht:
 $I = 0,5 \text{ A}$, $U = 2 \text{ V}$; nach dem Ohmschen Gesetz ist $R = 4,0 \, \Omega$

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.

Jeder Werkstoff hat einen – seiner Eigenart entsprechenden – **spezifischen Widerstand**.

Der spezifische Widerstand



(Abb. 13)

Als **spezifischen Widerstand** bezeichnet man den Widerstand eines Leiters von 1 m Länge und 1 mm^2 Querschnitt bei einer Temperatur von 20°C .

Das Formelzeichen für den spezifischen Widerstand ist der griechische Buchstabe ρ (Rho).

Für einige Leiter sind nachstehend die spezifischen Widerstände angegeben:

Werkstoff	$\rho \left(\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right)$	Werkstoff	$\rho \left(\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right)$
Silber	0,016	Eisen	0,13
Kupfer	0,018	Manganin	0,42
Gold	0,023	Nickelin	0,43
Bronze	0,028	Konstantan	0,50
Aluminium	0,028	Kohle	10–100

Je kleiner der spezifische Widerstand eines Stoffes ist, desto besser leitet er den elektrischen Strom, desto größer ist seine **Leitfähigkeit**.

Mit Leitfähigkeit bezeichnet man den umgekehrten Wert des spezifischen Widerstandes.

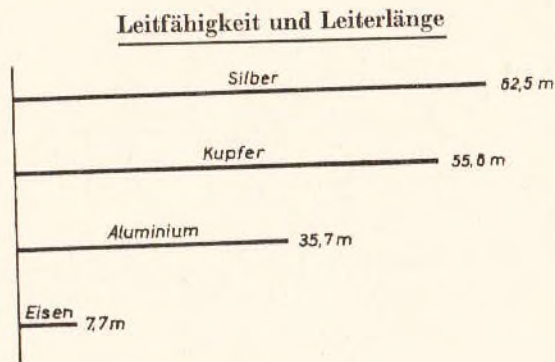
Das Formelzeichen für die Leitfähigkeit ist der griechische Buchstabe κ (Kappa).

Es ist also $\kappa = \frac{1}{\varrho}$ und $\varrho = \frac{1}{\kappa}$

Diese Leitfähigkeit entspricht der Länge eines Leiters von 1Ω Widerstand und 1 mm^2 Querschnitt.

Wenn 1 m eines Leiters von 1 mm^2 Querschnitt den Widerstand „ $\varrho \Omega$ “ hat, dann erhält man die Länge des Leiters mit gleichem Querschnitt, der einen Widerstand von „ 1Ω “ hat, indem man untersucht, wie oft „ $\varrho \Omega$ “ in „ 1Ω “ enthalten ist, d. h.

$$\text{Leiterlänge } l = \frac{1}{\varrho} = \kappa.$$



(Abb. 14)

In der Abb. 14 ist die Leitfähigkeit und damit die Länge verschiedener Leiter vom 1 mm^2 Querschnitt und 1Ω Widerstand maßstäblich dargestellt ($1 \text{ mm} \triangleq 1 \text{ m}$).

Beispiel:

Silber hat einen spezifischen Widerstand von $0,016$. Wie groß ist seine Leitfähigkeit?

Gegeben: $\varrho = 0,016$

Gesucht: κ

Lösung: $\kappa = \frac{1}{\varrho} = \frac{1}{0,016} = \underline{\underline{62,5}}$

Silber hat eine Leitfähigkeit von $62,5$.

2.4.3. Berechnen des Leiterwiderstandes

Der in der Abb. 15 dargestellte Versuch soll uns zeigen, daß der Widerstand eines Leiters außer vom Werkstoff noch von anderen Faktoren abhängt.

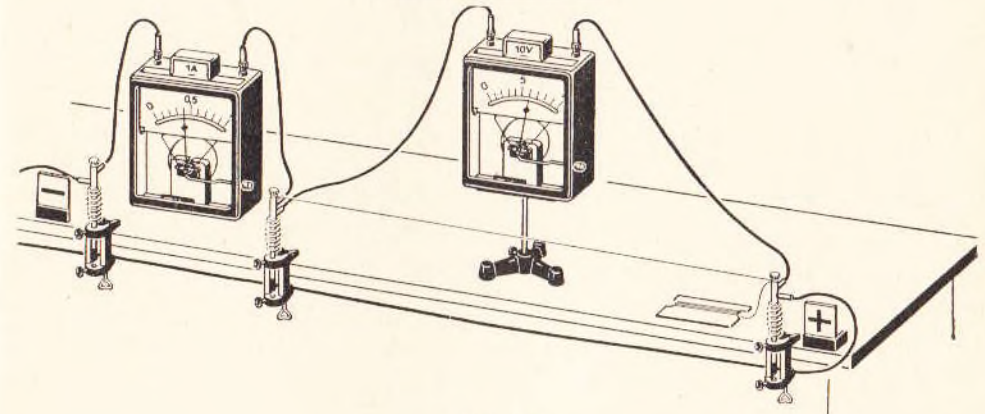
Zwischen zwei Kontaktklemmen schalten wir einen Konstantendraht mit konstantem Querschnitt, dessen Länge wir von Fall zu Fall ändern. Bei einer Spannung von 6 V erhalten wir dabei für die Stromstärke folgende Werte:

Drahtlänge $l = 1,0 \text{ m}$: Stromstärke $I = 0,82 \text{ A}$

Drahtlänge $l = 1,5 \text{ m}$: Stromstärke $I = 0,55 \text{ A}$

Drahtlänge $l = 2,0 \text{ m}$: Stromstärke $I = 0,41 \text{ A}$

Der Leiterwiderstand



(Abb. 15)

Wir stellen fest, daß mit zunehmender Länge des Leiters die Stromstärke kleiner wird. Das bedeutet (nach dem Ohmschen Gesetz), daß der Widerstand größer geworden sein muß.

Vergleichen wir den aus den Strom- und Spannungswerten ermittelten Widerstand mit der Leiterlänge, so erkennen wir, daß Widerstand und Leiterlänge sich im gleichen Verhältnis ändern.

Der Widerstand eines Leiters wächst linear mit der Leiterlänge.

Wir wiederholen den Versuch noch einmal, wollen aber jetzt drei Konstantendrahte von je 1 m Länge nehmen, deren Querschnitte jedoch verschieden sein sollen. Wir wollen Drähte mit den Durchmessern $0,2 \text{ mm}$, $0,3 \text{ mm}$ und $0,4 \text{ mm}$ verwenden. Für diese Drähte errechnen wir Querschnitte¹⁾ von $0,0314 \text{ mm}^2$, $0,0707 \text{ mm}^2$ und

¹⁾ Der Querschnitt eines runden Drahtes wird mit der Formel für die Berechnung einer Kreisfläche ermittelt:

$$A = \frac{d^2 \pi}{4}$$

In dieser Formel ist A der Querschnitt und d der Durchmesser des Drahtes. π ist eine Konstante, deren Wert $3,14$ beträgt.

0,1256 mm². Beim Ablesen der jeweiligen Stromstärke erkennen wir, daß bei größerem Querschnitt auch die Stromstärke größer ist. Nach dem Ohmschen Gesetz muß also der Widerstand kleiner geworden sein.

Errechnen wir aus den Strom- und Spannungswerten wieder den Widerstand und multiplizieren ihn mit dem jeweiligen Querschnitt, so sehen wir, daß das Produkt $R \cdot A$ konstant ist. Widerstand und Leiterquerschnitt verhalten sich also umgekehrt zueinander.

Der Widerstand eines Leiters wächst mit abnehmendem Querschnitt.

Der Versuch hat gezeigt, daß der Widerstand R eines Leiters nicht nur vom spezifischen Widerstand ϱ des Werkstoffs abhängt. Er wächst mit zunehmender Länge l und sinkt mit zunehmendem Querschnitt A des Leiters.

Für die Berechnung eines Leiterwiderstandes ergibt sich somit die Formel

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

Wenn anstelle des spezifischen Widerstands die Leitfähigkeit gegeben ist, setzt man in obige Gleichung für ϱ den Wert $\frac{1}{\kappa}$ ein. Damit erhält man die Formel:

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

Mit diesen Formeln erhält man den Leiterwiderstand in Ω , wenn die bekannten Größen in folgenden Einheiten eingesetzt werden:

Leiterlänge l in m, Querschnitt A in mm²,

spez. Widerstand ϱ in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$, Leitfähigkeit κ in $\frac{\text{S} \cdot \text{m}}{\text{mm}^2}$

1. Beispiel:

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

Gegeben: $l = 80 \text{ m}$, $A = 2 \text{ mm}^2$, $\varrho = 0,43$

Gesucht: R

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

Der Widerstandswert beträgt 17,2 Ω .

2. Beispiel:

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

Gegeben: $l = 350 \text{ m}$, $d = 3 \text{ mm}$, $\varrho = 0,018$

Gesucht: R

$$\text{Lösung: } R = \frac{\varrho \cdot l}{A}$$

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{3^2 \cdot 3,14}{4} = \underline{\underline{7,065 \text{ mm}^2}}$$

$$R = \frac{0,018 \cdot 350}{7,065} = \underline{\underline{0,89 \Omega}}$$

Der Kupferdraht hat einen Widerstand von 0,89 Ω .

3. Beispiel:

Zur Herstellung eines Widerstandes von 100 Ω soll ein Draht mit einem Querschnitt von 0,25 mm² und dem spezifischen Widerstand 0,5 verwendet werden. Wie lang muß der Draht sein?

Gegeben: $R = 100 \Omega$, $A = 0,25 \text{ mm}^2$, $\varrho = 0,5$

Gesucht: l

$$\text{Lösung: } R = \frac{\varrho \cdot l}{A}$$

$$l = \frac{R \cdot A}{\varrho} = \frac{100 \cdot 0,25}{0,5} = \underline{\underline{50 \text{ m}}}$$

Der Draht muß eine Länge von 50 m haben.

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

Gesucht: ϱ

$$\text{Lösung: } R = \frac{\varrho \cdot l}{A}$$

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

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{4^2 \cdot 3,14}{4} = \underline{\underline{12,56 \text{ mm}^2}}$$

$$\varrho = \frac{0,0697 \cdot 12,56}{30} = \underline{\underline{0,029}}$$

Der spezifische Widerstand beträgt 0,029 $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$.

5. Beispiel:

Wieviele km Eisendraht mit einem Querschnitt von 4,4 mm² haben einen Widerstand von 59 Ω ? Die Leitfähigkeit für Eisen beträgt 7,7.

Gegeben: $A = 4,4 \text{ mm}^2$, $R = 59 \Omega$, $\kappa = 7,7$

Gesucht: l (km)

$$\text{Lösung: } R = \frac{l}{\kappa \cdot A}$$

$$l = R \cdot \kappa \cdot A = 59 \cdot 7,7 \cdot 4,4 = 2000 \text{ m} = \underline{\underline{2 \text{ km}}}$$

Der Eisendraht hat eine Länge von 2 km.

6. Beispiel:

Ein Aluminiumdraht mit einer Leitfähigkeit von 34,5 hat einen Widerstand von 3,5 Ω. Seine Länge beträgt 379 m. Wie groß ist der Durchmesser des Drahtes?

Gegeben: $l = 379 \text{ m}$, $R = 3,5 \text{ Ω}$, $\kappa = 34,5$

Gesucht: d

Lösung: $A = \frac{d^2 \pi}{4}$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$$

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

$$A = \frac{l}{\kappa \cdot R} = \frac{379}{34,5 \cdot 3,5} = 3,14 \text{ mm}^2$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,14}{\pi}} = 2 \text{ mm}$$

Der Draht hat einen Durchmesser von 2 mm.

2.4.4. Widerstände als Bauelemente

Widerstände als Bauelemente werden u. a. verwendet, um in Stromkreisen Spannungen herabzusetzen oder zu teilen und um Stromstärken zu begrenzen. Je nach Verwendungszweck werden sie in verschiedenen Ausführungsformen und Größen und für verschiedene Belastungen hergestellt.

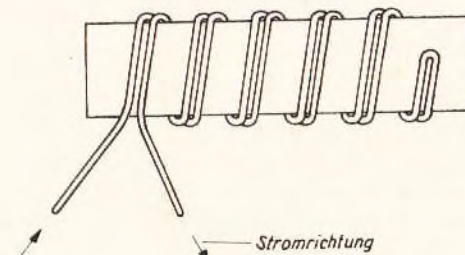
Man unterscheidet lineare und nichtlineare Widerstände.

Lineare Widerstände, die wiederum in solche mit festen und solche mit veränderbaren Werten unterteilt werden (Festwiderstände und Drehwiderstände bzw. Potentiometer), sollen in weiten Grenzen konstant bleiben. Sie werden vor allem als Drahtwiderstände und als Schichtwiderstände hergestellt.

Drahtwiderstände werden dort verwendet, wo eine hohe Belastung gefordert wird. Sie bestehen aus einer Drahtwicklung, die auf einem Isolierkörper (z. B. Porzellan) oder neben anderen Wicklungen auf einem Spulenkörper (z. B. bei Relais) aufgebracht ist. Als Widerstandsmaterial hat man eine Reihe von Legierungen entwickelt wie z. B. Nickelin ($\rho = 0,4$), Konstantan ($\rho = 0,5$) und Chrom-Nickel ($\rho = 1,0$). Genormte Widerstandsmaterialien werden oft durch die Bezeichnung WM ... gekennzeichnet, z. B. WM 50 (für Konstantan). Die Zahl hinter der Abkürzung WM gibt dabei an, wie groß bei diesem Material der Widerstand eines 100 m langen Drahtes von 1 mm² Querschnitt bei 20 °C ist.

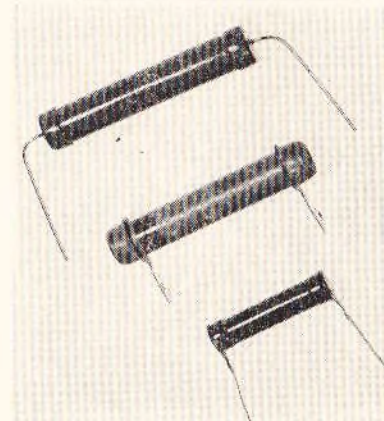
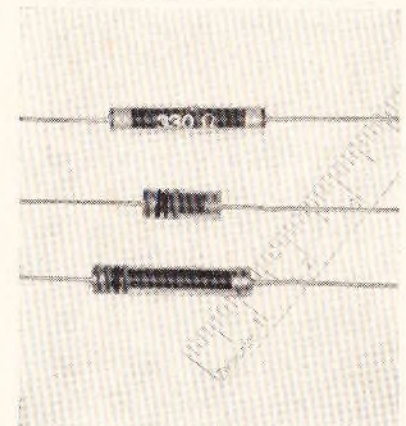
Drahtwiderstände, die eine möglichst kleine Induktivität und damit einen möglichst kleinen Wechselstromwiderstand aufweisen sollen (vgl.

hierzu Band B 4 des „Handbuchs der Fernmeldetechnik“), werden zweifädig („bifilar“) gewickelt (vgl. hierzu Abb. 16).

Bifilare Wicklung**(Abb. 16)**

Bei Drahtwiderständen werden die einzelnen Windungen durch eine Oxydschicht, durch eine Lackschicht oder auf andere Weise gegeneinander isoliert.

Bei den **Schichtwiderständen** unterscheidet man je nach der Art des verwendeten Widerstandsmaterials Kohleschichtwiderstände und Metallschichtwiderstände. Als Träger für die dünne Schicht des Widerstandsmaterials dient ein Keramik- oder Glaskörper. Die Schichtdicke richtet sich nach den gewünschten Widerstandswerten. Eine zusätzliche Widerstandserhöhung erzielt man durch Einschleifen einer Wendel.

Kohleschichtwiderstände**(Abb. 17)****Metallschichtwiderstände****(Abb. 18)**

In der Abb. 17¹⁾ sind drei unter der Bezeichnung „Karboid“ bekannte Kohleschichtwiderstände und in der Abb. 18¹⁾ drei Edelmetallschichtwiderstände dargestellt. Bei den letzteren befindet sich eine Widerstandsschicht aus Edelmetall an der Innenseite eines Glaskörpers.

Schichtwiderstände werden durch einen Lacküberzug vor Verschmutzung oder Beschädigung geschützt.

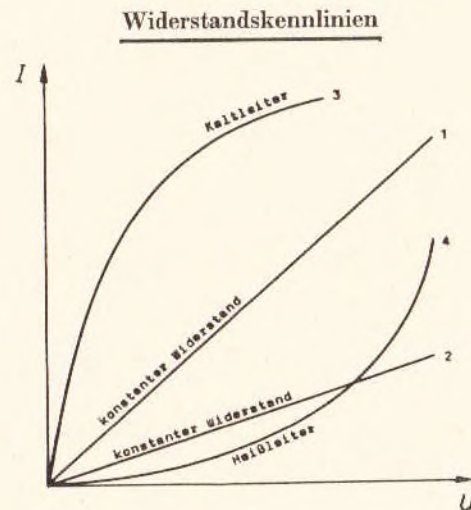
Bei den **nichtlinearen Widerständen** unterscheidet man temperaturabhängige, spannungsabhängige und beleuchtungsabhängige Widerstände.

Temperaturabhängige Widerstände (**Thermistoren**) sind meist Heißleiter mit hohem negativen Temperaturbeiwert. Die Widerstandsänderung wird durch Schwankungen der Außentemperatur oder durch Strombelastung (Stromwärme) hervorgerufen.

Bei den spannungsabhängigen Widerständen (**Varistoren**) wird der Widerstand mit ansteigender Spannung kleiner.

Bei den beleuchtungsabhängigen Widerständen (**Fotowiderständen**) wird der sogenannte innere fotoelektrische Effekt ausgenutzt (vgl. hierzu Abschnitt 6.5.).

Will man für verschiedene Widerstände die Abhängigkeit des Stromes von der Spannung zeichnerisch darstellen, so markiert man in einem



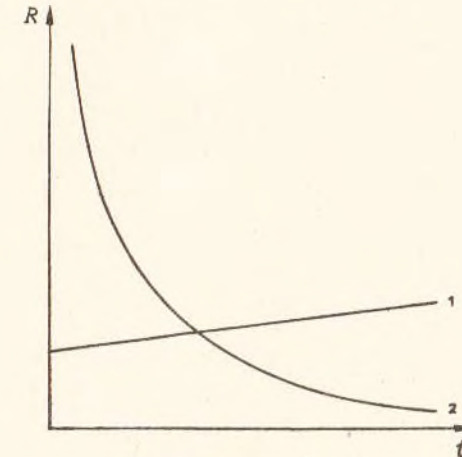
(Abb. 19)

¹⁾ Siemens-Pressebild

Diagramm die Schnittpunkte für die zusammengehörenden Strom- und Spannungswerte. Werden nun für die einzelnen Widerstände diese Schnittpunkte miteinander verbunden, so erhält man die Kennlinien der Widerstände. An der Neigung und am Verlauf einer **Widerstandskennlinie** ist die Größe beziehungsweise die Art des Widerstands zu erkennen (vgl. hierzu Abb. 19). Die Widerstandskennlinie verläuft um so steiler, je kleiner der Widerstand ist; sie verläuft um so flacher, je größer der Widerstand ist (Kennlinie 1: kleinerer Widerstand; Kennlinie 2: größerer Widerstand). Wird eine zunächst steil verlaufende Kennlinie immer flacher, so besagt dieser Verlauf, daß der Widerstand mit zunehmender Spannung größer wird (Kennlinie 3). Bei einem **linearen Widerstand** verläuft die Kennlinie geradlinig („linear“), d. h., Strom und Spannung ändern sich im gleichen Verhältnis, der Widerstand ist konstant (Kennlinien 1 und 2). Bei einem **nichtlinearen Widerstand** verläuft die Kennlinie nicht als Gerade („nichtlinear“), d. h., Strom und Spannung ändern sich nicht im gleichen Verhältnis, der Widerstand ist nicht konstant (Kennlinien 3 und 4).

In der Abb. 20 ist die Abhängigkeit des Widerstands eines Kupferleiters (1) sowie eines Halbleitermaterials (2) von der Temperatur dargestellt.

Widerstand und Temperatur



(Abb. 20)

Beleuchtungs- und spannungsabhängige Halbleiter haben einen ähnlichen Widerstandsverlauf wie temperaturabhängige Halbleiter.

Zur Kennzeichnung wird der Widerstandswert in Ω , $k\Omega$ oder $M\Omega$ angegeben. Bei Platzmangel kann bei $k\Omega$ - und $M\Omega$ -Werten das Zeichen Ω wegfallen. Häufig werden Größe und Toleranz der Widerstandswerte auch durch Farbringe bzw. Farbpunkte angegeben. Die für die verschiedenen Farben geltenden Widerstandswerte in Ω können der Tabelle im Abschnitt 9.5. entnommen werden. Der letzte Ring (gold bzw. silber) gibt die Toleranz des Widerstands an.

2.4.5. Der Isolationswiderstand

In der Fernmeldetechnik ist auch der **Isolationswiderstand** von großer Bedeutung. Man versteht darunter den Widerstand, den die Isolation eines Leiters gegen Erde oder gegen einen benachbarten Leiter hat. Dieser Isolationswiderstand soll möglichst hoch sein; also nur einen geringen Stromfluß zulassen.

Überall dort, wo ein Spannungsausgleich und damit ein Stromfluß unerwünscht ist (also auch dort, wo Menschen vor schädlichen Spannungen geschützt werden sollen), werden **Isolierstoffe** verwendet. Zu diesen Stoffen gehören u. a. trockene Luft, Papier, Lack, Gummi, Seide, Holz, Glimmer, Glas, Porzellan, Marmor und verschiedene Kunststoffe.

Ideale Isolierstoffe, die einen unendlich großen Widerstand haben, gibt es nicht. Um eine Betriebssicherheit zu gewährleisten, sind für den Isolationswiderstand Mindestwerte vorgeschrieben, z. B.

- für Freileitungen bei ungünstiger Witterung $0,3 M\Omega$ je km Doppelleitung,
- für Orts- und Bezirkskabel $5000 M\Omega$ je km Doppelleitung,
- für Fernkabel 10000 bis $50000 M\Omega$ je km Doppelleitung.

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:

Der Isolationswiderstand einer 50 km langen Freileitung beträgt $2 M\Omega$ je km. Wie groß ist der Isolationswiderstand der gesamten Leitung?

Gegeben: $R_1 = 2 M\Omega \cdot km$, $l_G = 50 km$

Gesucht: R_G

$$\text{Lösung: } R_G = \frac{R_1}{l_G} = \frac{2 M\Omega \cdot km}{50 km} = \underline{\underline{40 k\Omega}}$$

Der Isolationswiderstand der gesamten Leitung beträgt $40 k\Omega$.

2.5. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.4.

1. Erklären Sie die Begriffe Heißeiter und Kaltleiter! 2. Wie verhält sich der Widerstand eines Konstantandrahtes bei steigender Temperatur? 3. Was wird durch den Temperaturbeiwert angegeben? 4. Die Wicklung einer Spule besteht aus 420 m

Kupferdraht von 0,4 mm Durchmesser. Um wieviel Prozent nimmt der Widerstand zu, wenn die Temperatur von $20^\circ C$ auf $85^\circ C$ ansteigt? 5. Zur Ermittlung der Temperatur eines Generators wird der Widerstand der Kupferwicklung vor der Inbetriebnahme (bei $20^\circ C$ Raumtemperatur) mit $12,5 \Omega$ und nach einstündigem Dauerbetrieb mit $13,8 \Omega$ festgestellt. Welche Temperatur hat die Wicklung in betriebswarmem Zustand? 6. Was versteht man unter Supraleitfähigkeit? 7. Von welchen Größen hängt der Widerstand eines Leiters ab? 8. Was wird durch den spezifischen Widerstand angegeben? 9. Was versteht man unter Leitfähigkeit? 10. Wie groß ist die Leitfähigkeit von Kupfer bei $50^\circ C$? 11. Eine 1,5-mm-Bronzeleitung und eine 2-mm-Eisenleitung sind gleich lang. Welcher Leitungswiderstand ist höher? 12. Wie lang ist eine Fernsprechdoppelleitung aus Kupfer mit 3 mm Durchmesser, wenn ihr Widerstand $120,3 \Omega$ beträgt? 13. Wie groß ist der Querschnitt eines Eisendrahtes von 0,8 km Länge und einem Widerstand von $14,72 \Omega$? 14. Wieviel Meter Konstantandraht von 0,2 mm Durchmesser sind zur Herstellung eines Widerstandes von $1,5 k\Omega$ nötig? 15. Ein Widerstand von 15Ω soll aus 47,5 m Neusilberdraht ($\rho = 0,3$) hergestellt werden. Welcher Drahtdurchmesser ist zu wählen? 16. 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? 17. Welches Widerstandsmaterial wird man zur Herstellung eines Widerstandes von 12Ω wählen, wenn der Wicklungskörper zwischen 30 m und 32 m Draht aufnehmen kann und ein Drahtdurchmesser von 1,2 mm am günstigsten ist? 18. Worin besteht der Unterschied zwischen dem Leitwert eines Leiters und der Leitfähigkeit eines Leiterwerkstoffes? 19. Was versteht man unter einer bifilaren Widerstandswicklung? 20. Welche Bedeutung hat die Bezeichnung WM 50? 21. Beschreiben Sie den Aufbau eines Schichtwiderstands! 22. Wodurch unterscheiden sich „lineare“ und „nichtlineare“ Widerstände? 23. Was sind Thermistoren und Varistoren? 24. Erklären Sie den Begriff „Isolationswiderstand“! 25. Wie verhalten sich Leitungswiderstand und Isolationswiderstand einer Leitung zur Leitungslänge? 26. Ein Schichtwiderstand ist durch folgende hintereinandergestellte Farbringe gekennzeichnet: rot-grün-orange-silber. Geben Sie Ohmwert und Toleranz des Widerstands an!

2.6. Die elektrische Spannung

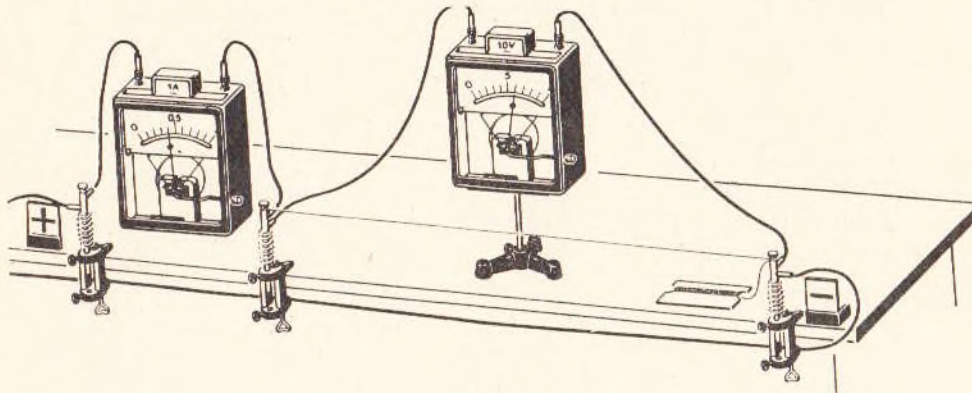
Die Ursache für den elektrischen Strom ist die elektrische Spannung. Infolge der im Stromkreis vorhandenen Widerstände verbraucht sich diese (die freien Elektronen treibende) Spannung auf dem Weg von einem Pol der Spannungsquelle bis zum anderen Pol. Dabei fällt die an den Klemmen der Spannungsquelle gemessene Spannung, die **Klemmenspannung**, um den Betrag der jeweils verbrauchten Spannung ab. Man nennt daher die verbrauchte Spannung auch **Spannungsabfall**.

Soll der von einem Widerstand verursachte Spannungsabfall gemessen werden, so wird ein Spannungsmesser an zwei Stellen angeschlossen, zwischen denen der Spannungsunterschied (= Spannungsabfall) festgestellt werden soll. Durch den Spannungsmesser fließt dabei nur ein ganz geringer Strom, weil dieses Instrument einen sehr hohen inneren Widerstand hat.

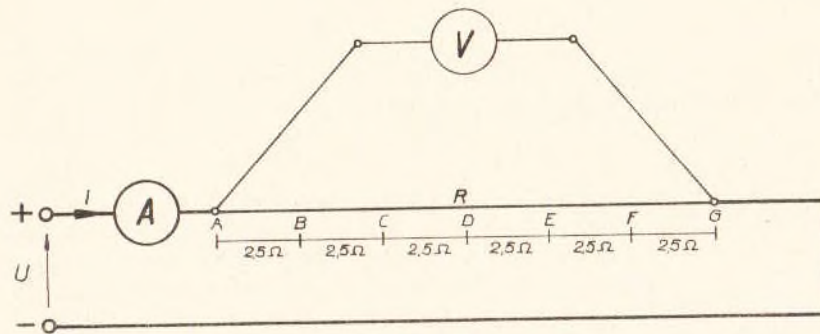
Der in der Abb. 21 dargestellte Versuch soll uns zeigen, wie die von der Spannungsquelle gelieferte Spannung von den Widerständen im Stromkreis verbraucht wird.

Die Versuchsspannung beträgt 6 V. Der verwendete Widerstandsdraht hat einen Widerstand von 15 Ω . Auf der Tischplatte teilen wir die Strecke des Widerstandsdrahtes in 6 gleiche Teile zu je 2,5 Ω ein.

„Der Spannungsabfall“



(Abb. 21)

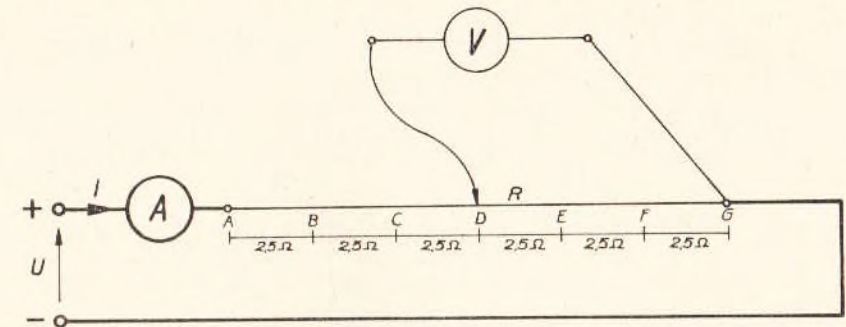


(Abb. 22)

Nach Einschalten der Spannungsquelle haben wir einen geschlossenen Stromkreis, in dem ein Strom von

$$I = \frac{U}{R} = \frac{6}{15} = 0,4 \text{ A}$$

fließt (vgl. hierzu Abb. 22). Jetzt stecken wir in die linke Anschlußklemme des Voltmeters eine Schnur, an deren anderem Ende eine Krokodilklemme befestigt ist; die



(Abb. 23)

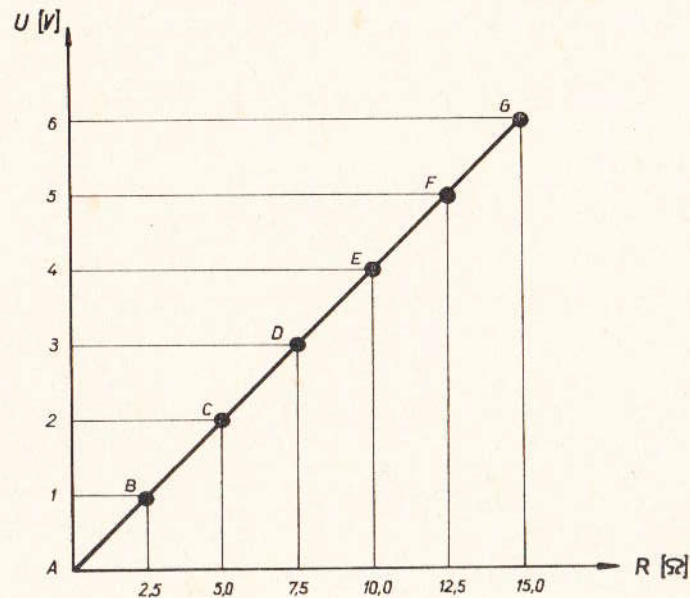
andere Klemme des Voltmeters bleibt fest mit dem Minuspol verbunden. Mit Hilfe der Krokodilklemme schalten wir den Spannungsmesser nacheinander an die auf der Tischplatte markierten Punkte A bis G des Widerstandsdrahtes an (vgl. hierzu Abb. 23). Dabei sehen wir, daß die Spannung bei gleichbleibender Stromstärke von 6 Volt bis 0 Volt abfällt. Die Differenz zwischen 6 Volt und der gemessenen Spannung wird von den links von der Krokodilklemme liegenden Teilwiderständen verbraucht.

In der folgenden Tabelle sind die während des Versuchs ermittelten Werte zusammengestellt:

Gemessener Abschnitt	Widerstand des gemessenen Abschnitts	Spannung über dem gemessenen Abschnitt	Verbrauchte Spannung
A - G	15,0 Ω	6 V	0 V
B - G	12,5 Ω	5 V	1 V
C - G	10,0 Ω	4 V	2 V
D - G	7,5 Ω	3 V	3 V
E - G	5,0 Ω	2 V	4 V
F - G	2,5 Ω	1 V	5 V
G - G	0 Ω	0 V	6 V

Wir ermitteln nun in einem Diagramm die Schnittpunkte für die jeweils zusammengehörenden Spannungs- und Widerstandswerte. Wenn wir dann die auf diese Weise gefundenen Punkte A bis G miteinander verbinden, erhalten wir die Kennlinie für die zur Überwindung des Drahtwiderstandes erforderliche Spannung (vgl. hierzu Abb. 24).

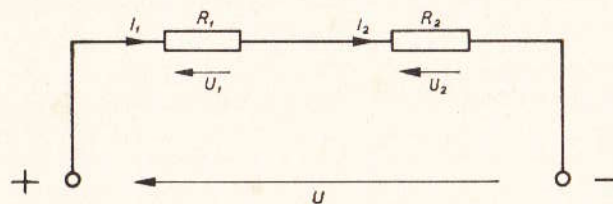
Aus der Tabelle sehen wir, daß der Spannungsabfall in dem Drahtwiderstand gleichmäßig ansteigt. Dabei entspricht der Spannungsabfall dem Teil der treibenden Spannung, der zur Überwindung des Widerstandes notwendig ist; in unserem Versuch ist z. B. zur Überwindung des Widerstandes 10 Ω eine Spannung von 4 V erforderlich. Untersuchen wir die Spannungsabfälle zwischen den einzelnen Widerstandspunkten A bis G, so erkennen wir ferner, daß zwischen den einzelnen Punkten jeweils ein



(Abb. 24)

Spannungsabfall von 1 V besteht. Die Summe der Spannungsabfälle über den 6 Teilwiderständen ergibt wieder die von der Spannungsquelle gelieferte Spannung ($6 \times 1 \text{ Volt} = 6 \text{ Volt}$). Die Summe aller Spannungsabfälle entspricht somit der gesamten treibenden Spannung (vgl. hierzu Abschn. 2.7.1.).

Beim Berechnen elektrischer Stromkreise empfiehlt es sich, die Kurzzeichen der elektrischen Größen U , I und R in ein Schaltbild einzutragen. Die Richtungen der Stromstärke und der stromtreibenden Spannung werden dabei entsprechend der technischen Stromrichtung durch je einen Pfeil gekennzeichnet. Für die Spannungsabfälle werden die Spannungspfeile der Stromrichtung entgegengesetzt gezeichnet (vgl. hierzu Abb. 25).



(Abb. 25)

Sämtliche Spannungsabfälle lassen sich nach dem Ohmschen Gesetz berechnen, d. h. $U_1 = I_1 \cdot R_1$ oder $U_2 = I_2 \cdot R_2$ usw. Somit wird der Spannungsabfall um so größer, je größer der Widerstand und je größer der diesen Widerstand durchfließende Strom ist.

Bei den Spannungsabfällen unterscheidet man Nutzspannungen und Spannungsverluste.

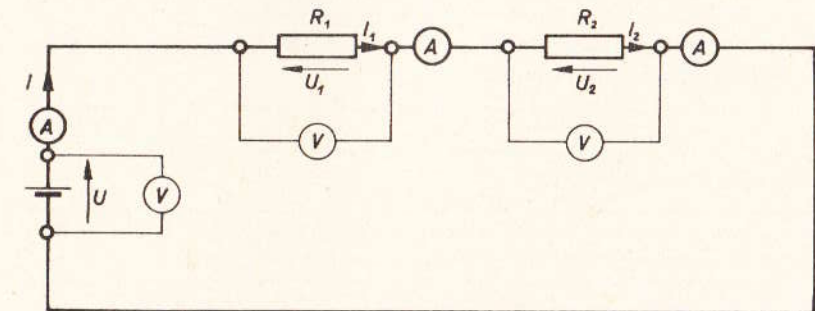
Nutzspannungen sind Spannungsabfälle in Nutzwiderständen wie z. B. Heizgeräten, Glühlampen und anderen „Verbrauchern“. Durch die Nutzspannungen hat man also einen Nutzen.

Spannungsverluste sind unerwünschte Spannungsabfälle in Verlustwiderständen. Zu den Verlustwiderständen gehören vor allem die Leitungswiderstände und die Innenwiderstände der Spannungsquellen.

Der durch die Leitungswiderstände ($R_{Ltg.}$) verursachte Spannungsverlust verringert die am Nutzwiderstand wirksame Spannung. Da mit zunehmender Leitungslänge der Widerstand der Leitung wächst, nimmt der Spannungsverlust mit der Länge der Leitung zu ($U_{Ltg.} = I \cdot R_{Ltg.}$). Der Einfluß des Innenwiderstandes der Spannungsquellen (R_i) ist im Abschnitt 7.2. beschrieben.

2.7. Die Schaltung von Widerständen

2.7.1. Die Reihenschaltung



(Abb. 26)

Von einer **Reihenschaltung** oder **Hintereinanderschaltung** spricht man, wenn mehrere Widerstände in Reihe, d. h. einer hinter den anderen geschaltet sind.

Mit der in der Abb. 26 als Schaltbild dargestellten Versuchsanordnung soll festgestellt werden, wie sich Spannungen, Ströme und Widerstände

in einem Stromkreis verhalten, wenn mehrere Widerstände in Reihe geschaltet sind.

Für den Versuch werden zwei Widerstände von $R_1 = 10 \Omega$ und $R_2 = 20 \Omega$ verwendet. Bei einer Versuchsspannung von 9 V fließt ein Strom von 0,3 A. Nach dem Ohmschen Gesetz ergibt sich damit ein Gesamtwiderstand von

$$R = \frac{U}{I} = \frac{9}{0,3} = 30 \Omega$$

Diese Werte sowie die für jeden Teilwiderstand ermittelten Werte sind in nachstehender Tabelle zusammengestellt:

Gemessener Abschnitt	Spannung	Stromstärke	Widerstand
Gesamter Außenstromkreis	$U = 9 \text{ V}$	$I = 0,3 \text{ A}$	$R = 30 \Omega$
Widerstand 1	$U_1 = 3 \text{ V}$	$I_1 = 0,3 \text{ A}$	$R_1 = 10 \Omega$
Widerstand 2	$U_2 = 6 \text{ V}$	$I_2 = 0,3 \text{ A}$	$R_2 = 20 \Omega$

Aus dem oben beschriebenen Versuch erkennen wir:

In einer Reihenschaltung werden alle Widerstände vom gleichen Strom durchflossen.

$$I = I_1 = I_2 = \dots\dots\dots$$

In einer Reihenschaltung ist der Gesamtwiderstand gleich der Summe der Teilwiderstände.

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

In einer Reihenschaltung ist die treibende Spannung gleich der Summe der Spannungsabfälle.

$$U = U_1 + U_2 + \dots\dots\dots$$

Erweiternd kann man sagen:

In jedem geschlossenen Stromkreis ist die Summe aller treibenden Spannungen gleich der Summe aller Spannungsabfälle.

Dies ist der „2. Kirchhoffsche Satz“⁽¹⁾.

Vergleicht man die Spannungsabfälle und Widerstände miteinander, so erkennt man ferner, daß an einem großen Widerstand ein großer und an einem kleinen Widerstand ein kleiner Spannungsabfall erfolgt. Bei genauer Betrachtung erkennen wir folgende Regel:

¹⁾ Robert Kirchhoff, deutscher Physiker, 1824–1887.

In einer Reihenschaltung verhalten sich die Spannungen zueinander wie die entsprechenden Widerstände.

$$\frac{U_1}{U} = \frac{R_1}{R} \quad \text{oder} \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

Mehrere hintereinandergeschaltete Widerstände (R_1, R_2 usw.) können als **ein** Widerstand gedacht werden. Diesen Widerstand nennt man Ersatzwiderstand.

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: $R = R_1 + R_2 + R_3 = 45 + 83 + 127 = \underline{\underline{255 \Omega}}$

Der Gesamtwiderstand beträgt 255 Ω .

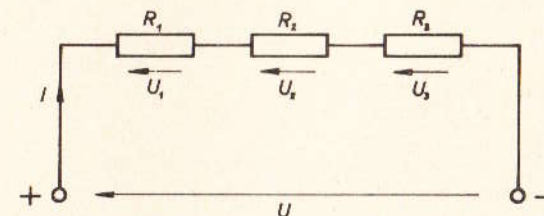
2. Beispiel:

Drei Widerstände von 20 Ω , 6 Ω und 14 Ω werden in Reihenschaltung an eine Spannung von 60 V gelegt. Welche Teilspannung liegt an jedem der drei Widerstände?

Gegeben: $R_1 = 20 \Omega, R_2 = 6 \Omega, R_3 = 14 \Omega, U = 60 \text{ V}$

Gesucht: U_1, U_2, U_3

Lösung:



(Abb. 27)

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 20 + 6 + 14 = \underline{\underline{40 \Omega}}$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{60}{40} = \underline{\underline{1,5 \text{ A}}}$$

$$U_1 = I_1 \cdot R_1 = 1,5 \cdot 20 = \underline{\underline{30 \text{ V}}}$$

$$U_2 = I_2 \cdot R_2 = 1,5 \cdot 6 = \underline{\underline{9 \text{ V}}}$$

$$U_3 = I_3 \cdot R_3 = 1,5 \cdot 14 = \underline{\underline{21 \text{ V}}}$$

$$\text{Probe: } U = U_1 + U_2 + U_3 = 30 + 9 + 21 = \underline{\underline{60 \text{ V}}}$$

Die Teilspannungen an den drei Widerständen betragen $U_1 = 30 \text{ V}$, $U_2 = 9 \text{ V}$ und $U_3 = 21 \text{ V}$.

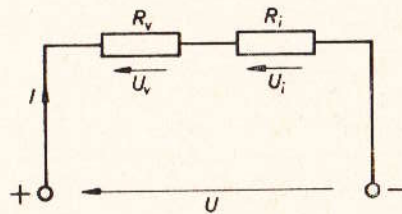
3. Beispiel:

Ein Spannungsmesser mit einem Innenwiderstand von $10\text{ k}\Omega$ hat einen Meßbereich von 20 V . Mit dem Spannungsmesser sollen Spannungen bis 250 V gemessen werden. Damit das Meßwerk nicht überlastet wird, muß ein Vorwiderstand dafür sorgen, daß auch nach der Meßbereichserweiterung bei vollem Zeigerausschlag am Innenwiderstand nur die zulässige Spannung von 20 V liegt (ob der „Vorwiderstand“ vor oder hinter den Innenwiderstand geschaltet wird, hat auf seine Wirkung keinen Einfluß). Wie groß muß der Vorwiderstand sein?

Gegeben: $R_i = 10\text{ k}\Omega$, $U_i = 20\text{ V}$, $U = 250\text{ V}$

Gesucht: R_v

Lösung:



(Abb. 28)

$$U = U_v + U_i$$

$$U_v = U - U_i = 250 - 20 = \underline{230\text{ V}}$$

$$\frac{R_v}{R_i} = \frac{U_v}{U_i}$$

$$R_v = \frac{R_i \cdot U_v}{U_i} = \frac{10000 \cdot 230}{20} = 115000\ \Omega = \underline{\underline{115\text{ k}\Omega}}$$

Der Vorwiderstand muß $115\text{ k}\Omega$ groß sein.

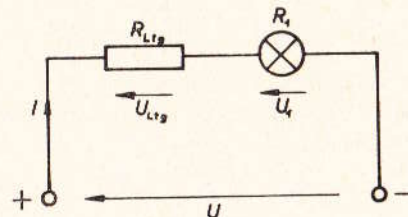
4. Beispiel:

Eine Signallampe ist mit einer 50 m langen Doppelleitung ($2 \times 0,6\text{ mm}$ Kupfer) mit der Spannungsquelle verbunden. Welchen Spannungsverlust verursacht die Leitung, wenn die Betriebsstromstärke $0,3\text{ A}$ beträgt? Wie groß ist die Nutzspannung an der Signallampe bei einer Klemmenspannung von 24 V ?

Gegeben: $l = 100\text{ m}$, $d = 0,6\text{ mm}$, $\rho = 0,018$, $I = 0,3\text{ A}$, $U_k = 24\text{ V}$

Gesucht: U_{Ltg} , U_1

Lösung:



(Abb. 29)

$$U_{\text{Ltg}} = I \cdot R_{\text{Ltg}}$$

$$R_{\text{Ltg}} = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{0,6^2 \cdot 3,14}{4} = \underline{0,2826\text{ mm}^2}$$

$$R_{\text{Ltg}} = \frac{0,018 \cdot 100}{0,2826} = \underline{6,37\ \Omega}$$

$$U_{\text{Ltg}} = 0,3 \cdot 6,37 = \underline{\underline{1,91\text{ V}}}$$

Die Leitung verursacht einen Spannungsverlust von $1,91\text{ V}$.

$$U_k = U_{\text{Ltg}} + U_1$$

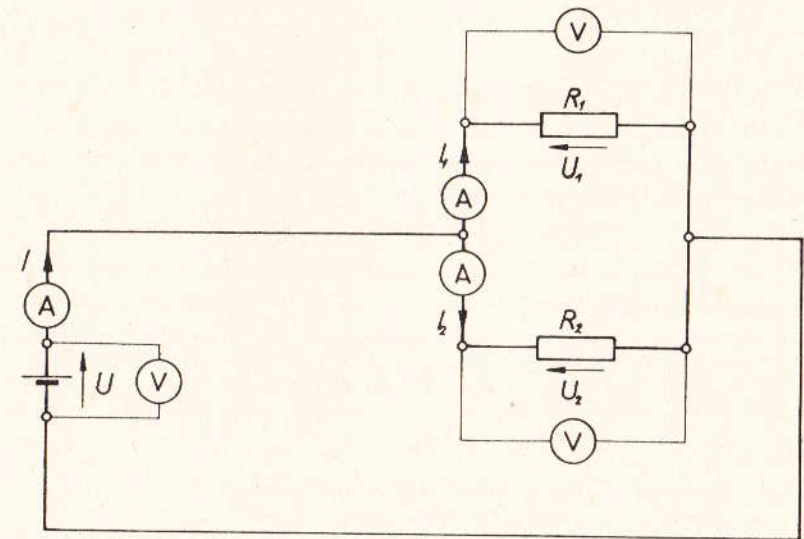
$$U_1 = U_k - U_{\text{Ltg}} = 24 - 1,91 = \underline{\underline{22,09\text{ V}}}$$

Die Spannung an der Signallampe beträgt $22,09\text{ V}$.

2.7.2. Die Parallelschaltung

Von einer **Parallelschaltung** oder **Nebeneinanderschaltung** spricht man, wenn alle Anfänge der zusammengeschalteten Widerstände miteinander verbunden sind und desgleichen alle Enden dieser Widerstände. An den Verbindungsstellen der Widerstände verzweigt sich der Strom (Stromverzweigungspunkte).

Mit der in der Abb. 30 als Schaltbild dargestellten Versuchsanordnung soll festgestellt werden, wie sich Spannungen, Ströme, Widerstände und Leitwerte verhalten, wenn mehrere Widerstände parallelgeschaltet sind.



(Abb. 30)

Für den Versuch werden zwei Widerstände von $R_1 = 10 \Omega$ und $R_2 = 20 \Omega$ verwendet.

Bei einer Versuchsspannung von 4 V fließt ein Strom von 0,6 A. Nach dem Ohmschen Gesetz ergibt sich damit ein Gesamtwiderstand von

$$R = \frac{U}{I} = \frac{4}{0,6} = 6,67 \Omega$$

Das Ergebnis läßt erkennen, daß bei einer Parallelschaltung der Gesamtwiderstand kleiner als der kleinste Teilwiderstand ist.

Die gemessenen und die rechnerisch ermittelten Werte sind wieder in nachstehender Tabelle zusammengestellt:

Gemessener Abschnitt	Spannung	Stromstärke	Widerstand	Leitwert
Gesamter Außenstromkreis	$U = 4 \text{ V}$	$I = 0,6 \text{ A}$	$R = 6\frac{2}{3} \Omega$	$G = 0,15 \text{ S}$
Widerstand 1	$U_1 = 4 \text{ V}$	$I_1 = 0,4 \text{ A}$	$R_1 = 10 \Omega$	$G_1 = 0,1 \text{ S}$
Widerstand 2	$U_2 = 4 \text{ V}$	$I_2 = 0,2 \text{ A}$	$R_2 = 20 \Omega$	$G_2 = 0,05 \text{ S}$

Aus dem oben beschriebenen Versuch erkennen wir:

In einer Parallelschaltung liegen alle Widerstände an der gleichen Spannung.

$$U = U_1 = U_2 = \dots\dots\dots$$

In einer Parallelschaltung ist der Gesamtleitwert gleich der Summe der Teilleitwerte.

$$G = G_1 + G_2 + \dots\dots\dots \text{ oder } \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots\dots$$

In einer Parallelschaltung (Stromverzweigung) ist der Gesamtstrom gleich der Summe der Teilströme.

$$I = I_1 + I_2 + \dots\dots\dots$$

Erweiternd kann man sagen:

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

Dies ist der „1. Kirchhoffsche Satz“.

Vergleicht man die Ströme und Widerstände miteinander, so erkennt man ferner, daß durch einen großen Widerstand ein kleiner Strom und durch einen kleinen Widerstand ein großer Strom fließt. Bei genauer Betrachtung erkennen wir folgende Regel:

In einer Parallelschaltung verhalten sich die Ströme zueinander wie die entsprechenden Leitwerte beziehungsweise umgekehrt wie die entsprechenden Widerstände.

$$\frac{I}{I_1} = \frac{G}{G_1} = \frac{R_1}{R} \text{ oder } \frac{I_1}{I_2} = \frac{G_1}{G_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Mehrere parallelgeschaltete Widerstände (R_1, R_2, R_3 usw.) können als ein Widerstand gedacht werden. Diesen Widerstand nennt man Ersatzwiderstand.

Wenn – wie in unserem Versuch – nur zwei Widerstände parallelgeschaltet sind, läßt sich die Formel zur Berechnung des Gesamtwiderstandes vereinfachen.

Nach der Grundformel ist

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

Wir suchen den Hauptnenner und erhalten

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

oder zusammengefaßt

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

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

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

Die Formel für die Berechnung zweier parallelgeschalteter Widerstände ist also

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

oder in Worten ausgedrückt:

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

Sind nur gleich große 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

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

Bei p gleichen Einzelwiderständen lautet die Formel für die Berechnung des Gesamtwiderstandes

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

1. Beispiel:

Zwei Widerstände von 60 und 75 Ω sind parallelgeschaltet. Wie groß ist der Gesamtwiderstand?

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

Gesucht: R

$$\text{Lösung: } R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{60 \cdot 75}{60 + 75} = \underline{\underline{33,33 \Omega}}$$

Der Gesamtwiderstand beträgt 33,33 Ω .

2. Beispiel:

Fünf Widerstände zu je 20 Ω sind parallelgeschaltet. Wie groß ist der Gesamtwiderstand?

Gegeben: $R_1 = 20 \Omega$, $p = 5$

Gesucht: R

$$\text{Lösung: } R = \frac{R_1}{p} = \frac{20}{5} = \underline{\underline{4 \Omega}}$$

Der Gesamtwiderstand beträgt 4 Ω .

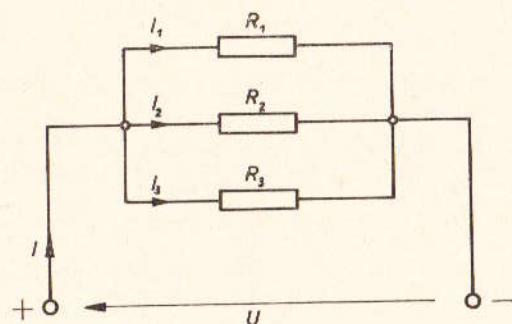
3. Beispiel:

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: $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$, $R_3 = 50 \Omega$, $U = 60 \text{ V}$

Gesucht: I , I_1 , I_2 , I_3 und R

Lösung:



(Abb. 31)

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

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{10} + \frac{1}{20} + \frac{1}{50} = \frac{10 + 5 + 2}{100} = \frac{17}{100}$$

$$R = \frac{100}{17} = \underline{\underline{5,88 \Omega}}$$

Der Gesamtwiderstand beträgt 5,88 Ω .

Nunmehr errechnen wir I nach dem Ohmschen Gesetz:

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

Der Gesamtstrom beträgt 10,2 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:

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

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

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

Da $I = I_1 + I_2 + I_3$ ist, ergibt sich zur Kontrolle

$$I = 6,0 + 3,0 + 1,2 = 10,2 \text{ A.}$$

Die Teilströme betragen $I_1 = 6,0 \text{ A}$, $I_2 = 3,0 \text{ A}$ und $I_3 = 1,2 \text{ A}$.

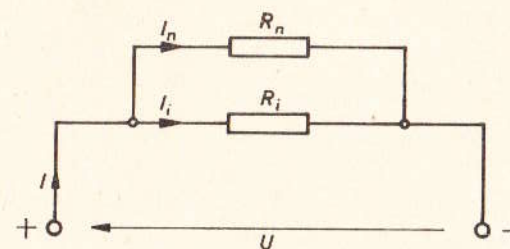
4. Beispiel:

Ein Amperemeter mit einem Innenwiderstand von 0,02 Ω hat einen Meßbereich von 10 A. Der Meßbereich soll auf 50 A erhöht werden. Damit das Meßwerk nicht überlastet wird, muß ein Nebenwiderstand dafür sorgen, daß auch nach der Meßbereichserweiterung bei vollem Zeigerausschlag nur die zulässige Stromstärke von 10 A durch das Meßwerk fließt. Die darüber hinaus vorhandene Stromstärke muß am Meßwerk seitlich vorbeigeleitet werden. Wie groß muß der Nebenwiderstand sein?

Gegeben: $R_i = 0,02 \Omega$, $I_i = 10 \text{ A}$, $I = 50 \text{ A}$

Gesucht: R_n

Lösung:



(Abb. 32)

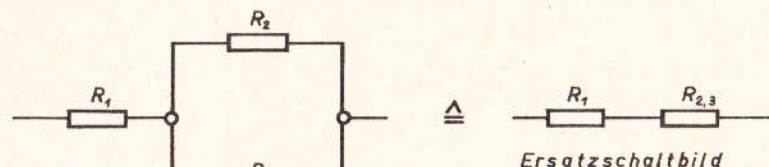
$$\begin{aligned}
 I &= I_1 + I_n \\
 I_n &= I - I_1 = 50 - 10 = \underline{40 \text{ A}} \\
 \frac{R_n}{R_1} &= \frac{I_1}{I_n} \\
 R_n &= \frac{I_1 \cdot R_1}{I_n} = \frac{10 \cdot 0,02}{40} = \underline{0,005 \Omega}
 \end{aligned}$$

Der Nebenzwiderstand muß $0,005 \Omega$ groß sein.

2.7.3. Die Gruppenschaltung

Von einer Gruppenschaltung spricht man, wenn in einem Stromkreis sowohl Reihen- als auch Parallelschaltungen vorkommen. Um die Berechnung solcher Gruppenschaltungen zu vereinfachen, ist es üblich,

1. mehrere Widerstände zu einem Ersatzwiderstand zusammenzufassen und
2. gegebenenfalls diesen Ersatzwiderstand in einem Ersatzschaltbild darzustellen (vgl. hierzu Abb. 33).



(Abb. 33)

In der Abb. 33 ist z. B. der Widerstand R_1 mit den parallelgeschalteten Widerständen R_2 und R_3 in Reihe geschaltet.

Wenn wir den gesamten Widerstand der Schaltung errechnen wollen, müssen wir zunächst den Widerstand ermitteln, den R_2 und R_3 zusammen ergeben. Verwenden wir die vereinfachte Formel für zwei parallelgeschaltete Widerstände, so können wir den Ersatzwiderstand wie folgt berechnen:

$$R_{2,3} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

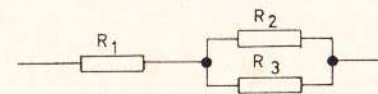
Den Ersatzwiderstand kennzeichnen wir mit den Indizes der zusammengefaßten Widerstände.

Da der Ersatzwiderstand $R_{2,3}$ mit dem Widerstand R_1 in Reihe geschaltet ist, ergibt sich der Gesamtswiderstand nach folgender Gleichung:

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

1. Beispiel:

Die Widerstände $R_1 = 150 \Omega$, $R_2 = 70 \Omega$ und $R_3 = 200 \Omega$ sind, wie in der Abb. 34 dargestellt, geschaltet.



(Abb. 34)

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

Gesucht: R

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

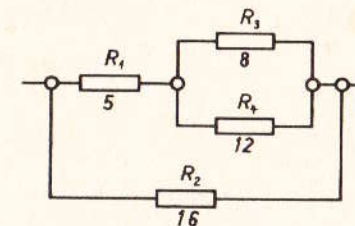
$$R_{2,3} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{70 \cdot 200}{70 + 200} = \frac{14000}{270} = \underline{51,85 \Omega}$$

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

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

2. Beispiel:

Der Gesamtswiderstand nebenstehender Schaltung ist zu berechnen.

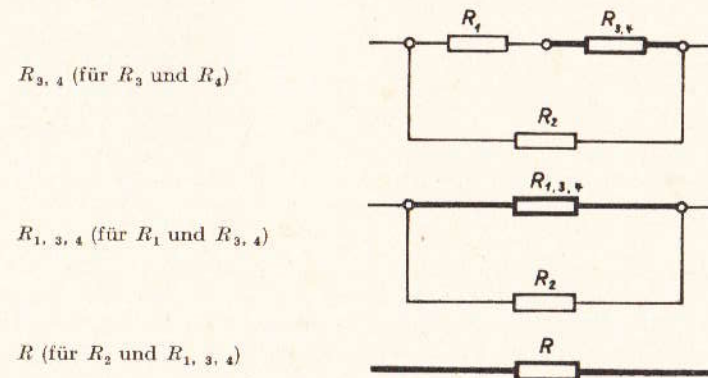


(Abb. 35)

Gegeben: $R_1 = 5 \Omega$, $R_2 = 16 \Omega$, $R_3 = 8 \Omega$, $R_4 = 12 \Omega$

Gesucht: R

Lösung: Für die Berechnung werden die Widerstände wie folgt zusammengefaßt:



(Abb. 36)

$$R_{3,4} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} = \frac{8 \cdot 12}{8 + 12} = 4,8 \Omega$$

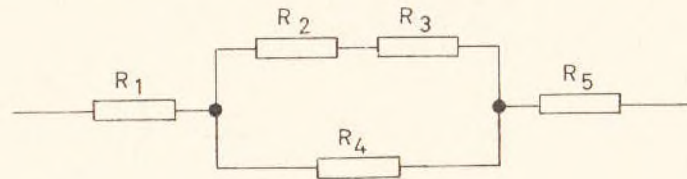
$$R_{1,3,4} = R_1 + R_{3,4} = 5 + 4,8 = 9,8 \Omega$$

$$R = \frac{R_2 \cdot R_{1,3,4}}{R_2 + R_{1,3,4}} = \frac{16 \cdot 9,8}{16 + 9,8} = 6,08 \Omega$$

Der Gesamtwiderstand beträgt 6,08 Ω .

3. 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. 37). Wie groß ist der Gesamtwiderstand?



(Abb. 37)

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.

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

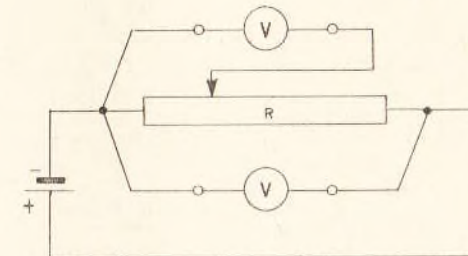
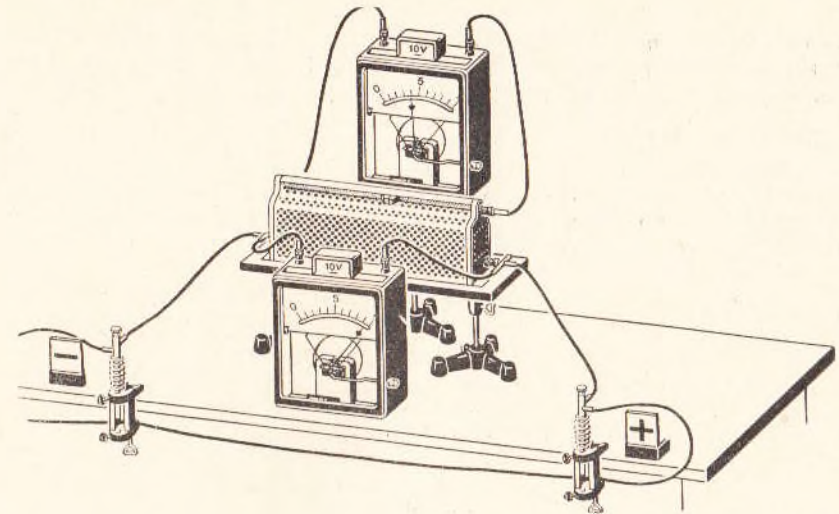
$$R_{2,3,4} = \frac{1400 \cdot 1200}{1400 + 1200} = \frac{1\,680\,000}{2600} = 646,15 \Omega$$

Nunmehr haben wir es nur noch mit einer glatten Hintereinanderschaltung R_1 , $R_{2,3,4}$ und R_5 zu tun. Der gesamte Widerstand der Anordnung nach Abb. 37 ist also

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

2.7.4. Die Spannungsteilerschaltung

Die Spannungsteilerschaltung ist eine Gruppenschaltung. Der Versuch zum „Spannungsabfall“ (vgl. hierzu Abb. 21 bis 24) hat uns gezeigt, daß sich die von der Spannungsquelle gelieferte Spannung aufteilt in Teilspannungen, die jeweils über den entsprechenden Teilwiderständen abgegriffen werden können. Der in der Abb. 38 dargestellte Versuch soll uns zeigen, daß man mit einem Schiebewiderstand (Regelwiderstand, Poten-



(Abb. 38)

tiometer) eine Spannung in jeder gewünschten Weise unterteilen und so z. B. die Spannung für einen Verbraucher regulieren kann.

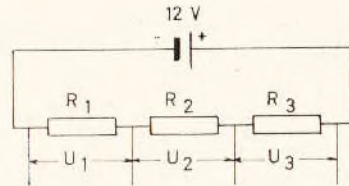
Ein Schiebewiderstand ist in einen Stromkreis geschaltet. Parallel zum Widerstand ist ein Voltmeter gelegt. Ein zweites Voltmeter liegt mit seiner einen Klemme am Widerstandsbeginn und mit der zweiten Klemme am Schieber des Widerstandes. Wir wollen jetzt den Schieber ganz nach links schieben. Unser erstes 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, können wir uns auch hier des Ohmschen Gesetzes bedienen (Teilspannung = Teilwiderstand $\times$ Stromstärke). Teilstücke eines Schiebewiderstandes kann man auch als Einzelwiderstände betrachten.

Bei der Spannungsteilerschaltung ist darauf zu achten, daß der in einem Teil des Schiebewiderstandes fließende Gesamtstrom die für den Widerstand angegebene Belastungsstromstärke nicht überschreitet.

1. Beispiel:

Drei Einzelwiderstände sind nach Abb. 39 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. 39)

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

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:

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

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

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

Die Summe der Teilspannungen beträgt:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = 3,3 + 1,98 + 6,6 = 11,88 \text{ V}$$

unter Berücksichtigung der in der Rechnung vorgenommenen Abrundungen kann man sagen $U = 12 \text{ V}$. Die über der gesamten Widerstandsanordnung herrschende Spannung ist also gleich der Klemmenspannung.

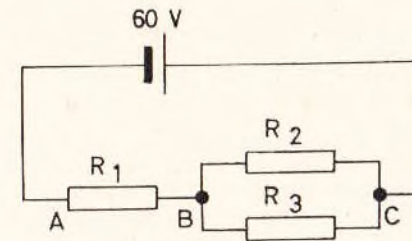
2. Beispiel:

In der Widerstandsanordnung nach Abb. 40 sollen die Spannungsabfälle zwischen den Punkten A und B sowie zwischen B und C ermittelt werden.

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:



(Abb. 40)

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

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 gesuchten 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 ergeben $U_1 + U_2 = U = 36 \text{ V} + 24 \text{ V} = 60 \text{ V}$

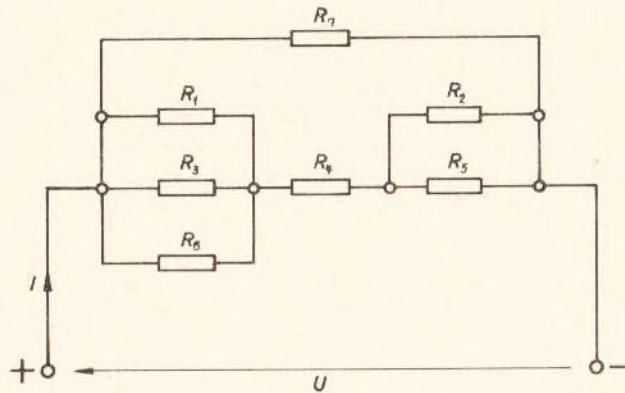
Nachdem die Summe der einzelnen Spannungsabfälle gleich der Klemmenspannung ist, stellen wir fest, daß also der Spannungsabfall über dem Einzelwiderstand von 40Ω gleich dem Spannungsabfall über dem Einzelwiderstand von 60Ω ist.

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

2.8. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 2.6. und 2.7.

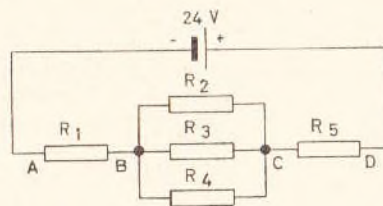
1. Wie heißt die an den Klemmen einer Spannungsquelle gemessene Spannung?
2. Was sind Spannungsverluste und wo treten sie auf?
3. Erklären Sie den Begriff „Nutzspannung“!
4. Was versteht man unter Spannungsabfall?
5. Wie heißt der 1. Kirchhoffsche Satz?
6. Wie heißt der 2. Kirchhoffsche Satz?
7. Wie ist das Verhältnis zwischen den Spannungen und Widerständen in einer Reihenschaltung?
8. Wie ist das Verhältnis zwischen den Strömen und Widerständen in einer Parallelschaltung?
9. Wie kann man die Meßbereiche von Spannungs- und Strommessern erweitern?
10. Warum müssen Spannungsmesser einen großen und Strommesser einen kleinen inneren Widerstand haben?
11. Skizzieren Sie eine Reihenschaltung aus 5 Einzelwiderständen und tragen Sie die Strom- und Spannungspfeile ein!
12. Skizzieren Sie eine Parallelschaltung aus 3 Einzelwiderständen und tragen Sie die Strom- und Spannungspfeile ein!
13. Was versteht man unter einer Gruppen-

schaltung? 14. Was kann man mit einer Spannungssteilerschaltung erreichen? 15. Wie verhält sich bei einer Parallelschaltung von Widerständen die Spannung über der gesamten Anordnung zu den Spannungen über den Einzelwiderständen? 16. Welcher Gesamtwiderstand ergibt sich, wenn folgende Widerstände hintereinandergeschaltet werden: $R_1 = 12 \text{ Ohm}$, $R_2 = 15,8 \text{ Ohm}$, $R_3 = 23,7 \text{ Ohm}$ und $R_4 = 34 \text{ Ohm}$? 17. Vier Widerstände von 15, 6, 18 und 16 Ohm werden in einer Reihenschaltung an 220 V gelegt. Welche Stromstärke stellt sich ein, und welche Spannung nimmt jeder der vier Widerstände auf? 18. Welchen Gesamtwiderstand ergeben drei parallelgeschaltete Widerstände von je 9 Ohm? (im Kopf rechnen). 19. Welcher Gesamtwiderstand ergibt sich, wenn vier Widerstände nebeneinandergeschaltet



(Abb. 41)

werden, von denen je zwei 4 M Ω und je zwei 6 M Ω betragen? 20. 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? 21. Von zwei parallelgeschalteten 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? 22. Vier parallelgeschaltete Widerstände von 2 k Ω ; 2,5 k Ω ; 4 k Ω und 5 k Ω werden von insgesamt 100 mA durchflossen. Welche Spannung liegt an ihnen und wie groß sind die Teilströme? 23. An der Anordnung nach Abb. 41 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 $R_6 = 2,5 \Omega$? 24. Wie groß sind die Spannungsabfälle zwischen den Punkten A und B, B und C sowie C und D der in Abb. 42 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. 42)

3. Arbeit, Leistung, Energie

Während die **Leistung** als eine Abkürzung des Wortes „Leistungsfähigkeit“ aufgefaßt werden kann, ist die **Arbeit** eine Verbrauchsangabe. Die Arbeit gibt an, daß eine Leistung eine bestimmte Zeit lang gewirkt hat.

Die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten, wird **Energie** genannt. Energie wird auch mit „gespeicherter Arbeit“ verglichen.

Die Energie (das Arbeitsvermögen) kommt in verschiedenen Formen vor, z. B.

Mechanische Energie,
Elektrische Energie,
Chemische Energie,
Magnetische Energie,
Wärme-Energie,
Licht-Energie.

3.1. Mechanische Arbeit und Leistung

Zum Verrichten einer mechanischen Arbeit muß eine Kraft aufgewendet werden (Muskelfraft, Wasserkraft u. a.).

3 Arbeiter tragen je 50 kp in die 5., 4. bzw. 3. Etage eines Hauses. Wer muß mehr arbeiten?

3 Arbeiter tragen 50 kp, 40 kp bzw. 30 kp in die 5. Etage eines Hauses. Wer muß mehr arbeiten?

An den obigen Beispielen erkennen wir, von welchen Faktoren die mechanische Arbeit abhängt:

Je größer die aufgewendete Kraft und je länger der Weg, desto größer ist die mechanische Arbeit.

Als Einheit der mechanischen Arbeit dient die Arbeitsmenge, die erforderlich ist, um „1 kp“ um „1 m“ zu heben. Diese Arbeitsmenge wird ein Kilopondmeter (kpm) genannt.

Wird eine Last senkrecht gehoben, so ist die Arbeit A^1 gleich Gewicht G mal Höhe h :

$$A = G \cdot h \text{ (kpm)}$$

¹⁾ Als Formelzeichen für die Arbeit wird auch W verwendet.

Wird eine Last auf einer waagerechten oder schrägen Bahn gezogen oder geschoben, so ist die Arbeit gleich Kraft F mal Weg s :

$$A = F \cdot s \text{ (kpm)}$$

Beispiel:

Zum Bewegen eines beladenen Wagens ist eine Kraft von 30 kp erforderlich. Welche Arbeit wird auf einer Strecke von 500 m verrichtet?

Gegeben: $F = 30 \text{ kp}$, $s = 500 \text{ m}$

Gesucht: A

Lösung: $A = F \cdot s = 30 \text{ kp} \cdot 500 \text{ m} = \underline{\underline{15000 \text{ kpm}}}$

Die mechanische Arbeit beträgt 15000 kpm.

Im allgemeinen kommt es nicht nur darauf an, daß eine Arbeit verrichtet wird; von großer Bedeutung ist es auch, wie schnell man mit der Arbeit fertig wird.

Führen z. B. zwei Arbeiter die gleiche Arbeit aus und benötigt der eine für diese Arbeit 5 Stunden und der zweite arbeitet daran 10 Stunden, dann haben zwar beide ihre Arbeit ausgeführt, aber der erste war schneller damit fertig. Man sagt, der erste Arbeiter „leistet mehr“.

Will man nun Arbeitskräfte, Maschinen usw. miteinander vergleichen, so vergleicht man ihre **Leistung** P , das ist die in der Zeiteinheit (in einer Sekunde) verrichtete Arbeit:

$$P = \frac{A}{t} \left(\frac{\text{kpm}}{\text{s}} \right)$$

Für die mechanische Leistung wird häufig „1 PS“ als größere Einheit verwendet:

$$1 \text{ PS} = 75 \frac{\text{kpm}}{\text{s}}$$

1 PS wird z. B. dann geleistet, wenn 75 kp innerhalb 1 Sekunde 1 Meter hoch gehoben werden.

Durch Umstellen der Gleichung $P = \frac{A}{t}$ erhält man:

$$A = P \cdot t$$

Man erhält die Arbeit, indem man die Leistung mit der Zeit multipliziert, in der sie gewirkt hat.

3.2. Elektrische Arbeit und Leistung

Der elektrische Strom kann Arbeit verrichten, d. h., die Arbeit wird von den wandernden Elektronen verrichtet. Je mehr Elektronen durch einen Verbraucher fließen, desto größer wird die verrichtete Arbeit. Die Kraft, die die Elektronen treibt, ist die elektrische Spannung.

Die elektrische Arbeit wird somit beeinflusst von der Spannung U und der Elektrizitätsmenge (Elektronenmenge) Q :

$$A = U \cdot Q$$

Da die Elektrizitätsmenge Q sich zusammensetzt aus der Stromstärke I und aus der Zeit t , in der dieser Strom fließt ($Q = I \cdot t$), ergibt sich

$$A = U \cdot I \cdot t$$

In dieser Gleichung ist das Produkt „ $U \cdot I$ “ die **elektrische Leistung** P :

$$P = U \cdot I$$

Die Einheit der elektrischen Leistung ist 1 Watt (1 W). Sie wurde nach dem Schotten James Watt, dem Erfinder der Dampfmaschine, benannt.

Durch Einsetzen der Gleichung $P = U \cdot I$ in die Gleichung für die elektrische Arbeit $A = U \cdot I \cdot t$ erhält man

$$A = P \cdot t$$

Je nach den eingesetzten Einheiten für die Leistung (W, kW) und für die Zeit (s, h) ergibt sich die **elektrische Arbeit** in Wattsekunden (Ws), Wattstunden (Wh) oder Kilowattstunden (kWh).

Diese elektrische Arbeit ist es, die von den elektrischen „Zählern“ gemessen wird und die der Abnehmer zu bezahlen hat. Die Kosten K errechnen sich, indem die am Zähler abgelesene elektrische Arbeit A in kWh mit dem Tarifpreis k , das ist der Preis pro kWh, multipliziert wird:

$$K = A \cdot k$$

Durch Einsetzen der Gleichungen des Ohmschen Gesetzes in die Gleichung $P = U \cdot I$ erhält man zwei weitere Gleichungen für die elektrische Leistung:

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

1. Beispiel:

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

Gegeben: $U = 60 \text{ V}$, $I = 80 \text{ A}$

Gesucht: P

Lösung: $P = U \cdot I = 60 \cdot 80 = 4800 \text{ Watt} = \underline{\underline{4,8 \text{ kW}}}$

Die Leistung beträgt 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: $P = 2 \text{ kW}$, $U = 220 \text{ V}$

Gesucht: I

Lösung: Aus der Grundformel $P = U \cdot I$ erhalten wir durch Umstellung

$$I = \frac{P}{U} = \frac{2000}{220} = \underline{\underline{9,09 \text{ A}}}$$

Die Stromstärke beträgt 9,09 A.

3. Beispiel:

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

Gegeben: $P = 1,2 \text{ W}$, $I = 40 \text{ mA}$

Gesucht: U

Lösung: Aus der Grundformel $P = U \cdot I$ erhalten wir durch Umstellung

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

Die Spannung beträgt 30 V.

4. Beispiel:

Ein Widerstand von 2 k Ω nimmt einen Strom von 150 mA auf. Wie groß ist seine Belastung?

Gegeben: $R = 2 \text{ k}\Omega$, $I = 150 \text{ mA}$

Gesucht: P

Lösung: $P = I^2 \cdot R = 0,15 \cdot 0,15 \cdot 2000 = \underline{\underline{45 \text{ W}}}$

Der Widerstand wird mit 45 W belastet.

5. Beispiel:

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

Gegeben: $R = 400 \Omega$, $U = 220 \text{ V}$

Gesucht: P

Lösung: $P = \frac{U^2}{R} = \frac{220 \cdot 220}{400} = \underline{\underline{121 \text{ W}}}$

Der Widerstand wird mit 121 W belastet.

6. Beispiel:

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

Gegeben: $P = 60 \text{ W}$, $t = 10 \text{ h}$, $k = 0,10 \text{ DM/kWh}$

Gesucht: K

Lösung: Wir müssen zunächst die elektrische Arbeit errechnen zu
 $A = P \cdot t = 60 \cdot 10 = 600 \text{ Wh} = \underline{\underline{0,6 \text{ kWh}}}$

Danach betragen die Kosten

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

7. 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: $P = 45 \text{ W}$, $t_{\text{tägl.}} = 5 \text{ h}$, $k = 0,10 \text{ DM/kWh}$

Gesucht: K

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

$$t_{\text{Monat}} = 30 \cdot t_{\text{tägl.}} = 30 \cdot 5 = \underline{\underline{150 \text{ h}}}$$

Demnach beträgt die Arbeit

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

Die Gebühr errechnet sich zu

$$K = A \cdot k = 6,75 \cdot 0,10 = 0,675 \text{ DM} = \underline{\underline{67,5 \text{ Pf}}}$$

3.3. Der Zusammenhang zwischen mechanischer Energie, elektrischer Energie und Wärmeenergie

Bei vielen Vorgängen in der Natur und in der Technik erfolgt eine Umwandlung der Energieformen, z. B. beim Elektromotor wird elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt, beim Elektroherd wird elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt. Bei diesen Energieumwandlungen kann man die Umrechnung mit Gleichungen vornehmen, die durch Versuche ermittelt wurden.

Den Zusammenhang zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie zeigt folgende Gleichung:

$$\boxed{1 \text{ kWh} = 1,36 \text{ PSh}}$$

Sollen Leistungen umgerechnet werden, so ergibt sich entsprechend:

$$\boxed{1 \text{ kW} = 1,36 \text{ PS}}$$

Die Einheit der Wärmemenge ist 1 Kalorie (cal); das ist die Wärmemenge, die benötigt wird, um 1 Pond (p) Wasser um 1 °C zu erwärmen.

$$1 \text{ kcal} = 1000 \text{ cal.}$$

Der Zusammenhang zwischen elektrischer Energie und Wärmeenergie wird durch folgende Gleichung angegeben:

$$1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$$

Für Umrechnungen zwischen Wärmeenergie und mechanischer Energie läßt sich folgende Gleichung verwenden:

$$1 \text{ kcal} = 427 \text{ kpm}$$

1. Beispiel:

Wieviele PS entsprechen einer Leistung von 5,5 kW?

$$1 \text{ kW} = 1,36 \text{ PS}; 5,5 \text{ kW} = 5,5 \cdot 1,36 = \underline{\underline{7,48 \text{ PS}}}$$

2. Beispiel:

Ein Durchlauferhitzer erzeugt eine Wärmemenge von 3100 kcal. Welcher elektrischen Arbeit entspricht diese Wärmemenge?

Da $1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$, untersuchen wir, wie oft 860 kcal in 3100 kcal enthalten sind. Die Division ergibt $3100 : 860 = \underline{\underline{3,6 \text{ kWh}}}$.

3.4. Der Wirkungsgrad

Bei einer Energieumwandlung ist die erzeugte Energie stets genauso groß wie die verbrauchte Energie (Gesetz von der Erhaltung der Energie). Die erzeugte Energie besteht jedoch zum Teil aus nutzloser Energie, den sogenannten Verlusten. So entstehen z. B. bei den elektrischen Maschinen:

Reibungsverluste, u. a. durch Lager- und Luftreibung, durch Reibung der Bürsten am Kollektor und an den Schleifringen.

Stromwärmeverluste; das sind die sogenannten Kupferverluste in Leitungen und Wicklungen, die von der Stromdichte abhängen.

Eisenverluste; hierzu gehören die Wirbelstromverluste im Eisen und die Ummagnetisierungsverluste (Hysteresisverluste).

Aus diesem Grunde ist bei jeder Energieumwandlung und auch bei mechanisch angetriebenen Maschinen wie Pumpen, Winden usw. die abgegebene Nutzleistung (P_{ab}) immer kleiner als die zugeführte Leistung (P_{zu}).

Das Verhältnis der abgegebenen Nutzleistung zur zugeführten Leistung nennt man den Wirkungsgrad.

Das Formelzeichen für den Wirkungsgrad ist der griechische Buchstabe Eta (η).

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

Der Wirkungsgrad ist stets kleiner als 1, weil die abgegebene Leistung nicht größer als die zugeführte Leistung sein kann.

Der Wirkungsgrad ist dimensionslos; er wird als Dezimalbruch (z. B. 0,8) oder in Prozenten (z. B. 80%) angegeben.

1. Beispiel:

Ein Gleichstrommotor gibt an der Riemenscheibe 1,5 PS ab und nimmt bei 220 V einen Strom von 6,5 A auf. Wie groß ist sein Wirkungsgrad?

Gegeben: $P_{ab} = 1,5 \text{ PS}$, $U = 220 \text{ V}$, $I = 6,5 \text{ A}$

Gesucht: η

$$\text{Lösung: } \eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$$

$$P_{ab} = \frac{1,5 \text{ PS}}{1,36} = \underline{\underline{1,1 \text{ kW}}}$$

$$P_{zu} = U \cdot I = 220 \cdot 6,5 = \underline{\underline{1430 \text{ W}}}$$

$$\eta = \frac{1100}{1430} = \underline{\underline{0,769}}$$

Der Wirkungsgrad beträgt 76,9%.

2. Beispiel:

Ein Gleichstrommotor mit einem Wirkungsgrad von 85% nimmt zwei Stunden lang 12 kW auf. Wie groß ist die abgegebene Leistung in PS?

Gegeben: $P_{zu} = 12 \text{ kW}$, $t = 2 \text{ h}$, $\eta = 85\%$

Gesucht: P_{ab} (PS)

$$\text{Lösung: } \eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$$

$$P_{ab} = P_{zu} \cdot \eta = 12 \cdot 0,85 = \underline{\underline{10,2 \text{ kW}}}$$

$$\text{Da } 1 \text{ kW} = 1,36 \text{ PS sind } 10,2 \text{ kW} = 10,2 \cdot 1,36 = \underline{\underline{13,9 \text{ PS}}}$$

Der Gleichstrommotor gibt 13,9 PS ab.

3. Beispiel:

Wieviele kW muß der Antriebsmotor einer Pumpenanlage aufnehmen, wenn in 30 min 13 m³ Wasser aus 135 m Tiefe gefördert werden sollen? Der Antriebsmotor hat einen Wirkungsgrad von 85% und die Pumpe einen Wirkungsgrad von 73%.

Gegeben: $t = 30 \text{ min}$, $V = 13 \text{ m}^3$, $h = 135 \text{ m}$, $\eta_M = 85\%$, $\eta_P = 73\%$

Gesucht: P_{zuM}

Lösung: Das Gewicht des zu fördernden Wassers beträgt

$$G = V \cdot \gamma = 13000 \text{ dm}^3 \cdot 1 \frac{\text{kp}}{\text{dm}^3} = \underline{\underline{13000 \text{ kp}}}$$

Damit muß die Pumpe folgende Leistung abgeben

$$P_{abP} = \frac{G \cdot h}{t} = \frac{13000 \text{ kp} \cdot 135 \text{ m}}{1800 \text{ s}} = 975 \frac{\text{kpm}}{\text{s}} = \underline{\underline{13 \text{ PS}}}$$

Wir berechnen nun die Leistung, die der Pumpe zugeführt werden muß (P_{zuP}). Da Motor und Pumpe unmittelbar miteinander verbunden sind, entspricht die der Pumpe zuzuführende Leistung der vom Motor abzugebenden Leistung ($P_{zuP} = P_{abM}$).

$$\eta_P = \frac{P_{abP}}{P_{zuP}}$$

$$P_{zuP} = \frac{P_{abP}}{\eta_P} = \frac{13}{0,73} = \underline{17,8 \text{ PS}} = P_{abM}$$

$$\eta_M = \frac{P_{abM}}{P_{zuM}}$$

$$P_{zuM} = \frac{P_{abM}}{\eta_M} = \frac{17,8}{0,85} = \underline{20,9 \text{ PS}}$$

Da $1 \text{ kW} = 1,36 \text{ PS}$, finden wir die zugeführte Leistung in kW, indem wir untersuchen, wie oft $1,36 \text{ PS}$ in $20,9 \text{ PS}$ enthalten sind:

$$P_{zuM} = \frac{20,9}{1,36} = \underline{15,4 \text{ kW}}$$

Der Motor muß eine Leistung von $15,4 \text{ kW}$ aufnehmen.

3.5. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 3.1. bis 3.4.

1. Wodurch unterscheiden sich die Begriffe Arbeit und Leistung? 2. Was versteht man unter Energie? 3. Nennen Sie die bekanntesten Energieformen! 4. Wie heißt die Umrechnungsgleichung, die den Zusammenhang zwischen elektrischer Energie und Wärmeenergie angibt? 5. Warum kann der Wirkungsgrad nie größer als 1 sein? 6. Welche Verluste entstehen bei elektrischen Maschinen? 7. An einer Magnetspule mit dem Widerstand 30Ω liegen 220 V Gleichspannung. Welche Leistung nimmt die Spule auf? 8. Welche Stromstärke nimmt ein Staubsauger von 200 W an der Spannung 110 V auf? 9. Welche Spannung liegt an einem Widerstand, der $1,9 \text{ kW}$ aufnimmt und dabei von 5 A durchflossen wird? 10. An ein Netz von 220 V werden zwei 110-V -Glühlampen hintereinandergeschaltet angeschlossen. Die eine Glühlampe hat eine Leistung von 40 W , die andere von 100 W . Welche Teilspannungen erhalten die Lampen und was geschieht? 11. Ein Motor gibt 4 PS ab; er hat bei 440 V eine Stromaufnahme von $8,52 \text{ A}$. Wie groß ist sein Wirkungsgrad? 12. Im größten deutschen Wasserkraftwerk, dem Walchenseekraftwerk, fallen in jeder Sekunde etwa 65 m^3 Wasser die 6 großen Rohrleitungen hinab und werden den 8 Turbinen zugeführt. Der Höhenunterschied, den das Wasser durchfällt, beträgt rund 200 m . Wie groß ist a) die vom Wasser auf die Turbinen übertragene Leistung in PS und b) der Wirkungsgrad der Anlage, wenn die abgegebene Leistung der Turbinen insgesamt 168000 PS beträgt? 13. 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? 14. Ein Rundfunkempfänger mit einer Leistungsaufnahme von 40 W ist am Tage 6 Stunden eingeschaltet. Wie hoch sind die monatlichen Kosten, wenn der Tarifpreis 20 Pf/kWh beträgt? 15. Ein elektrischer Heizofen für 220 V verbraucht bei einer Einschaltdauer von $3,5$ Stunden am Tag für $8,80 \text{ DM}$ elektrische Energie im Monat. Der Preis für eine Kilowattstunde beträgt 11 Pf . Welche Stromstärke nimmt der Ofen auf? 16. In welcher Zeit verbraucht ein elektrisches Gerät 1 kWh , wenn es bei 110 V Spannung eine Stromstärke von $2,5 \text{ A}$ aufnimmt?

4. Die Wärmewirkung des elektrischen Stromes

Im Abschnitt 3.3. wurde bereits darauf hingewiesen, daß elektrische Energie u. a. in Wärmeenergie umgewandelt werden kann. Zwischen beiden Energieformen besteht folgender Zusammenhang:

$$1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$$

Die zur Wärmeerzeugung umzuwandelnde elektrische Energie läßt sich nach folgender Gleichung berechnen:

$$A = U \cdot I \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t$$

Da $P = \frac{A}{t}$ ergibt sich die Wärmeleistung in Watt zu

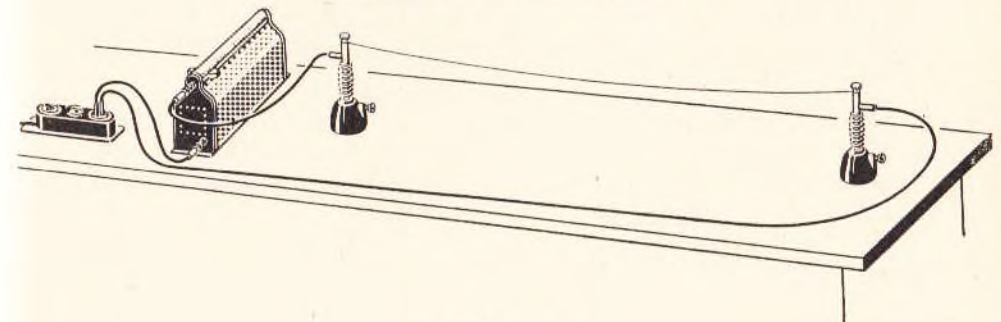
$$P = I^2 \cdot R$$

1000 Watt entsprechen somit einer Wärmeleistung von 860 kcal/h .

4.1. Die Anwendung der Stromwärme

Es gibt viele Möglichkeiten, mit Hilfe des elektrischen Stromes Wärme zu erzeugen und diese Wärme auszunutzen. In der Regel fließt dabei der Strom in dem zu erwärmenden Gut (unmittelbare Erwärmung) oder in einem Heizleiter, wobei die Wärmeübertragung auf das zu erwärmende Gut durch Wärmeleitung oder Wärmestrahlung erfolgt (mittelbare Erwärmung). Der Strom kann auch als Lichtbogen zwischen Elektroden fließen. Nachstehend werden einige Anwendungsbeispiele erläutert.

Der Strom erwärmt den Leiter

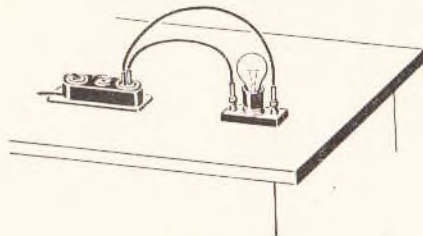


(Abb. 43)

In der Versuchsanordnung nach Abb. 43 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.

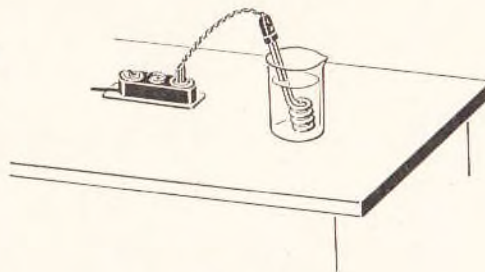
Der elektrische Strom bewirkt eine Erwärmung des Leiters.

Die Glühlampe



(Abb. 44)

Der Tauchsieder



(Abb. 45)

Abb. 44 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. Die Stromwärme wird zum **Beleuchten** verwendet.

Abb. 45 zeigt ein Gerät, das täglich in vielen Haushalten benutzt wird. So wie hier wird die elektrische Stromwärme in vielen anderen Fällen im Haushalt und in der Technik zu **Heizzwecken** verwendet (z. B. beim Durchlauferhitzer, Heizstrahler, Bügeleisen, Heizkissen, Elektroofen oder Lichtbogenschmelzofen). Will man die für die Erwärmung eines Gegenstandes erforderliche elektrische Leistung des Heizgerätes ermitteln, so muß man die benötigte Wärmemenge sowie die für die Aufheizung gewünschte Zeit kennen.

Ist die benötigte Wärmemenge nicht bekannt, so kann man sie mit Hilfe der Formel

$$Q = c \cdot G \cdot \Delta t$$

berechnen. In dieser Formel bedeuten

Q = Wärmemenge in kcal

c = spezifische Wärme in $\frac{\text{kcal}}{\text{kp} \cdot ^\circ\text{C}}$

G = Gewicht des zu erwärmenden Gegenstandes in kp

Δt = gewünschte Temperaturdifferenz in $^\circ\text{C}$

Beispiel:

Zum Erwärmen eines Raumes ist eine Wärmemenge von 8000 kcal erforderlich. Wie groß muß die Leistung eines Elektroofens sein, der diese Wärmemenge in drei Stunden abgeben kann?

Gegeben: $Q = 8000 \text{ kcal}$, $t = 3 \text{ h}$

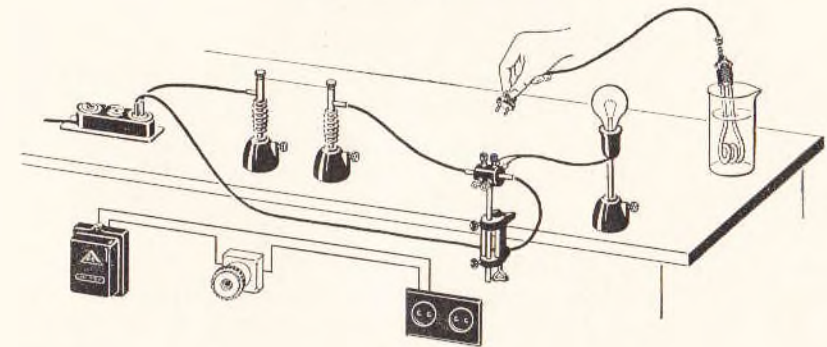
Gesucht: P

Lösung: $P = \frac{A}{t}$

$$A = \frac{Q}{860} = \frac{8000}{860} = 9,3 \text{ kWh}$$

$$P = \frac{9,3}{3} = 3,1 \text{ kW}$$

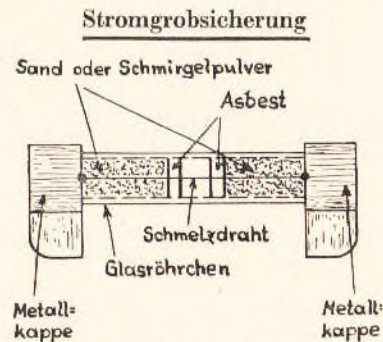
Die Schmelzsicherung



(Abb. 46)

Abb. 46 zeigt eine einfache Anordnung, in der die Stromwärme dazu benutzt wird, einen Stromkreis bei Überlastung oder Kurzschluß auszu-schalten. Ein Draht ist in seinem Querschnitt und in seinem Werkstoff so bemessen, daß er bei einer bestimmten im Stromkreis vorhandenen Stromstärke schmilzt. Wir alle kennen die **Sicherungen**, mit denen elektrische Stromkreise abgesichert werden. Für die einzelnen Stromkreise sind bestimmte Sicherungen (6A, 10A usw.) vorgeschrieben, damit eine Brandgefahr vermieden wird. Diese Gefahr besteht nicht nur bei einer Überlastung des Stromkreises, sondern auch bei einem **Kurzschluß**. Von einem Kurzschluß spricht man, wenn sich aus irgendeinem Grunde die Hin- und Rückleitung unmittelbar berühren. Der Widerstand des Stromkreises besteht dann nur aus dem Leitungswiderstand bis zum Berührungspunkt und dem inneren Widerstand der Spannungsquelle. Damit verursacht die Spannung bei dem verhältnismäßig kleinen Widerstand einen sehr hohen Strom, der den Draht unzulässig hoch erwärmt und schließlich einen Brand verursachen kann.

In der **Fernmeldetechnik** geht es vor allem um den Schutz hochempfindlicher Geräte vor unzulässig hohen Stromstößen, die aufgrund atmosphärischer Entladungen oder sonst durch induktive Beeinflussung entstehen können. Neben Einrichtungen zum Ableiten von Überspannungen werden daher Stromgrobsicherungen oder Stromfeinsicherungen verwendet. Die Feinsicherungen sprechen schon auf schwache, die Grobsicherungen erst auf größere Stromstärken an. **In der Fernmeldetechnik wird grundsätzlich jede stromführende Leitung abgesichert.**



(Abb. 47)

Abb. 47 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der bei der DBP verwendeten Stromgrobsicherung, die anspricht, sobald der Strom die höchstzulässige Stärke überschreitet. Der Schmelzdraht befindet sich in einem Glasrohr und ist an den Enden mit sogenannten Schneidenkontakten verbunden, die wiederum guten Kontakt mit der stromführenden Leitung haben. Um einen Lichtbogen zu vermeiden, ist der größte Teil des Sicherungsdrahtes mit Sand oder mit Schmirgelpulver umgeben, das von zwei Asbestscheiben in der gewünschten Lage gehalten wird.

Die oben angeführten Beispiele bestätigen, daß bei Stromfluß in einem Leiter Energie in Form von Wärme frei wird (vgl. hierzu Abschnitt 1.3.3.3.). Die entstehende Wärme in einem Leiter ist aus den Zusammenstößen der Elektronen mit den Molekülen des Leiters zu erklären. Je größer die Anzahl der fließenden Elektronen ist, desto größer ist auch der Strom, aber um so größer ist auch die Zahl der Zusammenstöße zwischen den Elektronen und den Molekülen und damit auch die erzeugte Wärme.

4.2. Die Stromwärmeverluste

Durch die Wärmeentwicklung in Leitungen, Geräten oder elektrischen Maschinen entstehen aber auch unerwünschte **Energieverluste**. Man nennt diese Verluste auch **Kupferverluste** oder **Stromwärmeverluste**. Eine über-

mäßige Erwärmung kann ferner unerwünscht sein, weil elektrische Leiter oft mit einem Isolierstoff umgeben sind, der nur eine geringe **Wärme-festigkeit** hat. Um die Stromwärmeverluste oder die Erwärmung der Leiter in erträglichen Grenzen zu halten, darf also die Strombelastung nicht zu hoch werden.

Wir wissen bereits, daß ein Leiter mit dicht beieinanderstehenden Molekülen dem Elektronenstrom einen größeren Widerstand entgegensetzt als ein solcher mit weit auseinanderstehenden Molekülen. Wir haben weiterhin gelernt, daß der Widerstand u. a. abhängig ist vom Querschnitt des Leiters. Somit ist die Erwärmung eines Leiters auch von seinem **Querschnitt** abhängig. Zum Beweis dafür wollen wir den Versuch nach Abb. 43 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 abhängig von der Stromstärke und vom Leiterquerschnitt ($P = I^2 \cdot R$). Je mehr Strom je mm² Querschnitt fließt, d. h., je dichter die Elektronen fließen, um so größer ist die erzeugte Wärme.

Die Stromstärke je mm² Leiterquerschnitt nennt man Stromdichte.

Die Stromdichte hat das Formelzeichen S . Sie wird in A/mm² angegeben und errechnet sich somit nach der Formel:

$$S = \frac{I}{A}$$

Die zulässige Stromdichte für elektrische Leiter ist keine konstante Größe. Sie hängt von verschiedenen Faktoren ab, z. B. von der Kühlung des Leiters. Wir wollen uns jedoch nicht eingehender mit der höchstzulässigen Strombelastung elektrischer Leiter befassen, weil dieses Problem in der Fernmeldetechnik keine Bedeutung hat.

5. Die chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes

5.1. Die Elektrolyse

5.1.1. Allgemeines

In Metallen, die man auch als Leiter erster Klasse bezeichnet, sind die Atome in Form von Kristallgittern fest untereinander verbunden. Der elektrische Strom wird in solchen Leitern durch die gerichtete Bewegung von freien Elektronen verursacht.

In Flüssigkeiten dagegen sind die Träger des elektrischen Stromes positiv (+) oder negativ (–) geladene Atome oder Atomgruppen (Moleküle). Diese Stoffteilchen, die entweder Elektronenmangel oder Elektronenüberschuß besitzen, nennt man **Ionen** (d. h. die Wandernden).

In mit Wasser verdünnten Laugen, Säuren oder auch in Salzlösungen zerfallen die vorhandenen Moleküle schon ohne äußere Einflüsse in solche Teilchen. Dabei erhalten diese positive oder negative elektrische Ladungen. So spalten sich z. B.:

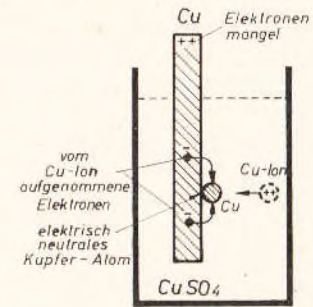
Salzsäure (HCl)	in	<	H -Ionen (+) Cl -Ionen (–)
Schwefelsäure (H_2SO_4)	in	<	H_2 -Ionen (+) SO_4 -Ionen (–)
Kalilauge (KOH)	in	<	K -Ionen (+) OH -Ionen (–)
Kupfersulfat ($CuSO_4$)	in	<	Cu -Ionen (+) SO_4 -Ionen (–)

Als Beweis mögen folgende Versuche dienen:

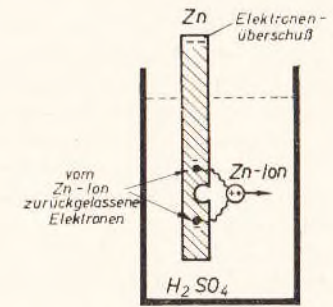
Füllt man z. B. in ein Glasgefäß eine Lösung von Kupfersulfat (Kupfersalzlösung – $CuSO_4$) und taucht einen blanken Kupferstab hinein, so hat sich der Kupferstab nach kurzer Zeit mit einer Kupferschicht überzogen. Es sind also die in der Lösung vorhandenen Kupferteilchen zum Kupferstab „gewandert“ (vgl. hierzu Abb. 48).

Füllen wir dagegen verdünnte Schwefelsäure (H_2SO_4) in das Gefäß und tauchen ein Stück blankes Zinkblech in die Flüssigkeit, so stellt man nach einiger Zeit fest, daß die blanken Zinkplatte an ihrer Oberfläche ganz rauh geworden ist. Von der Zinkplatte haben sich Teilchen (Atome) gelöst und sind in die Lösung gegangen (vgl. hierzu Abb. 49).

Die Ursachen dieser Erscheinungen sind in chemisch-elektrischen Vorgängen zu suchen.



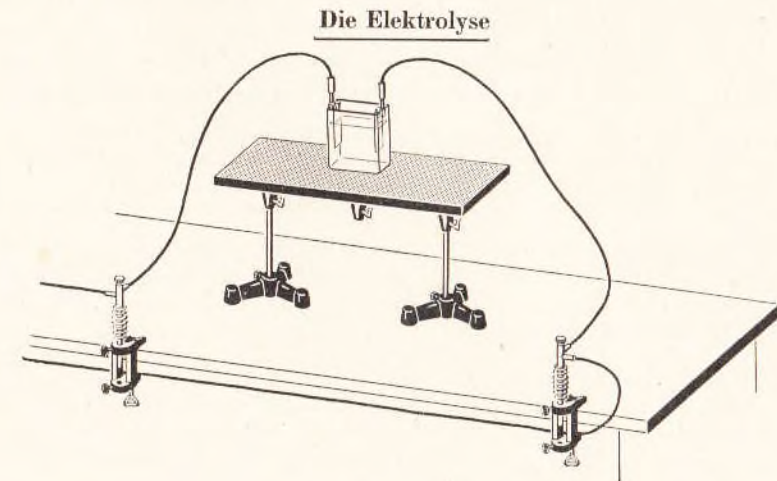
(Abb. 48)



(Abb. 49)

Im ersten Fall ist der sogenannte „osmotische Druck“ der Lösung stärker als der elektrolytische „Lösungsdruck“ des Kupfers. Er treibt die Kupferteilchen aus der Lösung. Im zweiten Fall ist der Lösungsdruck des Zinks stärker als der osmotische Druck der Lösung. Er drückt daher die Zinkteilchen in die Lösung. Die verschiedenen Lösungsbestrebungen von Metallen beziehungsweise Lösungen sind also die Ursachen für die verschiedenen Bewegungsrichtungen der Stoffteilchen.

Bei dem Versuch nach Abb. 50 wollen wir ein Glasgefäß (Trog) zuerst mit reiner Schwefelsäure füllen und zwei Kohleplatten als Stromzuführung benutzen. Diese Kohleplatten verbinden wir mit einer Gleichspannungsquelle von einigen Volt. Schließen wir den Stromkreis, so werden wir keinen Stromfluß feststellen, d. h., diese Flüssigkeit (reine Schwefelsäure) leitet den elektrischen Strom nicht. Das gleiche würden wir beobachten, wenn wir unter sonst gleichen Bedingungen den Glasbehälter mit reinem destilliertem Wasser füllen.



(Abb. 50)

Die Ursache liegt in inneren elektrischen Ausgleichsvorgängen zwischen den verschiedenen geladenen Stoffteilchen der konzentrierten Flüssigkeit, die nicht durch Wassermoleküle voneinander getrennt sind. Solche Flüssigkeit ist elektrisch neutral; sie ist „nichtleitend“. Machen wir den gleichen Versuch noch einmal, verwenden aber jetzt mit Wasser verdünnte Schwefelsäure, so fließt ein Strom durch die Flüssigkeit; sie ist „leitend“. Gleichzeitig stellen wir fest, daß an der einen Kohleplatte verhältnismäßig wenige, an der anderen Platte aber sehr viele Gasbläschen aufsteigen. Bei einer chemischen Untersuchung der Gasbläschen würden wir feststellen, daß die kleinere Gasmenge Sauerstoff und die größere Wasserstoff ist.

Der elektrische Strom verursacht beim Durchgang durch leitende Flüssigkeiten eine chemische Zersetzung der Flüssigkeit.

Wir wiederholen den letzten Versuch jetzt noch einmal, ersetzen jedoch die verdünnte Schwefelsäure durch eine Kupfersulfatlösung. Schließen wir den Stromkreis, so überzieht sich die eine Kohleplatte mit einer Kupferschicht. Diese Schicht wird wieder abgebaut und an der anderen Kohlelektrode ausgeschieden, wenn wir die Stromrichtung umkehren. Der elektrische Strom hat hier einen chemischen Vorgang bewirkt, der von der Stromrichtung abhängig ist.

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

Der Stromdurchgang durch leitende Flüssigkeiten ist demnach immer mit einer Stoffwanderung verbunden.

Nach dem englischen Physiker Michael Faraday heißt der chemische Vorgang, der sich bei unseren Versuchen abgespielt hat, **Elektrolyse**.

Unter Elektrolyse versteht man die Zersetzung einer elektrisch leitenden wäßrigen Lösung mit Hilfe des elektrischen Stromes.

Die leitende Flüssigkeit nennt man **Elektrolyt**. Die Kohleplatten 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 **Katode**.

Aus dem Abschnitt 1.3. „Die Elektronen als Grundlage der Elektrizität“ wissen wir, daß am Minuspol stets Elektronenüberschuß und am Pluspol Elektronenmangel herrscht. Die Moleküle oder Atome, die zuviel Elektronen haben, wandern deshalb zum Punkt des Elektronenmangels, zur Anode, während die Teilchen, die zuwenig Elektronen haben, dem Punkt des Elektronenüberschusses, der Katode, zustreben. Die geladenen Atome

oder Moleküle in der Lösung sind **Ionen**. Die zur Anode wandernden negativ geladenen Teilchen bezeichnet man als **Anionen**, die zur Katode wandernden positiv geladenen Teilchen als **Kationen**.

Kationen wandern immer mit dem technischen Strom

Wasserstoff und alle Metalle bilden stets Kationen, Sauerstoff und andere Atome und Moleküle Anionen. Deshalb wird z. B. Wasserstoff immer an der Katode und Sauerstoff immer an der Anode ausgeschieden, wie wir auch im Versuch gesehen haben. Aus dem gleichen Grunde schlagen sich die Metalle immer an der Elektrode nieder, die mit dem Minuspol der Spannungsquelle verbunden ist.

Wir hatten festgestellt, daß der Stromfluß in einer leitenden Flüssigkeit immer mit einem Stofftransport verbunden ist. Umgekehrt kann man sagen, wenn ein Stofftransport erfolgt, muß eine gewisse Elektrizitätsmenge fließen.

Die Einheit der Elektrizitätsmenge ist 1 Coulomb (vgl. hierzu Abschnitt 2.2.1.). Sie entspricht einer Zahl von $6,3 \cdot 10^{18}$ freien Elektronen. Bei der Beobachtung des Zusammenhangs zwischen dem Ladungsausgleich in leitenden Flüssigkeiten und dem Transport von Molekülen oder Atomen (Stoffteilchen) erkannte man folgende Regel, die als das „1. Faradaysche Gesetz“ bezeichnet wird:

Das Gewicht der bei einer Elektrolyse an den Elektroden ausgeschiedenen Stoffmenge ist proportional der geflossenen Elektrizitätsmenge.

Bezeichnen wir das Gewicht mit G , die geflossene Elektrizitätsmenge mit Q und mit c einen Faktor, der das Ausscheidungsvermögen des ionisierten Stoffes kennzeichnet (auch „Elektrochemisches Äquivalentgewicht“ genannt), so ergibt sich für die obige Regel folgende Formel:

$$G = Q \cdot c \text{ (Pond)}$$

und da $Q = I \cdot t$ ist:

$$G = I \cdot t \cdot c$$

Dabei ergibt sich das Gewicht in Pond, wenn I in Ampere, t in Sekunden und c in Pond/Coulomb eingesetzt werden.

Das elektrochemische Äquivalentgewicht c resultiert für jeden Stoff aus dem Atomgewicht, der chemischen Wertigkeit und einer durch Meßreihen ermittelten Konstanten $\frac{1}{96500}$; durch Versuche hat man festgestellt, daß zur Ausscheidung von 1 Pond Wasserstoff 96500 Coulomb benötigt werden. Hierauf beziehen sich die c -Werte für alle anderen Stoffe. So z. B.

c für Kupfer	$0,329 \cdot 10^{-3} \text{ p/C}$	c für Aluminium	$0,093 \cdot 10^{-3} \text{ p/C}$
c für Silber	$1,118 \cdot 10^{-3} \text{ p/C}$	c für Nickel	$0,304 \cdot 10^{-3} \text{ p/C}$

5.1.2. Praktische Anwendung der Elektrolyse in der Technik

Der Stofftransport bei Stromfluß in Elektrolyten wird in der Technik in verschiedenster Weise angewendet.

5.1.2.1. Galvanostegie

Um z. B. geringerwertige Metalle vor einer Oxydation (z. B. Verrosten des Eisens) zu schützen, oder auch aus Schönheitsgründen kann man mit Hilfe der Elektrolyse diese Metalle mit einem höherwertigen Metall überziehen. Man nennt diesen Vorgang „**Galvanisieren**“. Dabei werden die zu galvanisierenden Teile stets als Katode in das „elektrolytische Bad“ gehängt. Der Elektrolyt ist dabei immer eine Metallsalzlösung aus dem Metall, das aufgalvanisiert werden soll. Er besteht also z. B. beim Verkupfern eines Gegenstandes aus einer Kupfersalzlösung oder beim Versilbern aus einer Silbersalzlösung. Da das aus dem Elektrolyten ausscheidende Metall den Elektrolyten unkonzentrierter machen würde, besteht die andere Elektrode (Anode) aus dem gleichen Material, das aus der Lösung ausgeschieden wird; im ersten Fall also aus Kupfer und im zweiten aus Silber. Dadurch erhält die Lösung immer den entsprechenden Metallnachschub, d. h., die Konzentration des Elektrolyten bleibt gleich.

Auf diese Weise lassen sich die Gegenstände vernickeln, verchromen, verkupfern, versilbern, vergolden usw. Auch wenn Porzellanfiguren, Porzellanengeschirre usw. ganz oder teilweise metallische Überzüge erhalten sollen, werden diese Gegenstände in einen Elektrolyten eingehängt, nachdem die Stellen, die den Metallüberzug erhalten sollen, mit einem Graphitüberzug leitend gemacht und mit dem negativen Pol verbunden wurden.

5.1.2.2. Galvanoplastik

Die Elektrolyse ermöglicht es auch, von bestimmten plastischen Körpern wie Münzen, Büsten usw. Kopien herzustellen. Dabei wird zunächst von dem nachzubildenden Gegenstand ein Wachs- oder Gipsabdruck angefertigt. Dieser Abdruck aus nichtleitendem Material erhält einen Graphitüberzug, wodurch er leitend wird. Anschließend wird wie bei der Galvanostegie verfahren. Hierdurch erhält man einen Metallüberzug, der dann abgenommen werden kann. Man nennt diese Anfertigung von Kopien durch Bildung dicker galvanischer Niederschläge auf nichtleitendem Material **Galvanoplastik**.

Auch **Schallplatten** werden auf diese Weise hergestellt. Dabei nimmt eine Wachsplatte die Original-Schallaufzeichnung auf. Diese Wachsplatte wird durch einen Graphitüberzug leitend gemacht und dann in ein galvanisches Bad gehängt, wo sie

einen harten Metallüberzug erhält. Dieser Metallüberzug, der in umgekehrter Weise alle Vertiefungen und Erhöhungen der Wachsplatte in allen Feinheiten enthält, wird dann als Preßplatte (Mutterplatte) für das Pressen der im Handel erhältlichen Schallplatten verwendet.

5.1.2.3. Herstellung von Reinmetallen (Raffination)

Das in der Elektrotechnik verwendete Kupfer muß chemisch besonders rein sein, denn nur geringste Anteile Phosphor, Aluminium und einiger anderer Stoffe wirken sich sehr nachteilig auf die elektrische Leitfähigkeit aus. Man verwendet daher Kupfer, das durch **elektrolytische Raffination** von Verunreinigungen weitgehend befreit worden ist. Das zu reinigende Kupfer dient in einem elektrolytischen Bad als Anode und geht in Lösung. Durch Ausscheidung aus dieser Lösung wird das Elektrolytkupfer gewonnen.

Neben Kupfer werden auch andere Metalle wie z. B. Aluminium aus der Tonerde (Bauxit) elektrolytisch gewonnen.

5.1.2.4. Eloxalverfahren

Aluminium bildet bekanntlich beim Zusammentreffen mit Sauerstoff (auch dem Sauerstoff der Luft) sofort eine Oxydschicht¹⁾, die von großer Härte ist, isolierend wirkt und sich sogar metallisch beliebig färben läßt. Diese Eigenschaft des Aluminiums macht man sich beim Eloxalverfahren zunutze („Eloxal“ ist die Kurzbezeichnung für elektrisch oxydiertes Aluminium). Bei diesem Verfahren wird im Gegensatz zum Galvanisieren das zu behandelnde Aluminiumstück an der Anode des elektrolytischen Bades angebracht. Als Elektrolyt verwendet man eine Lösung mit stark sauerstoffhaltigem Material wie Borax, Natriumperborat oder dergleichen. Der Sauerstoff, der bekanntlich in einem Elektrolyten Anionen bildet, wandert zur Aluminiumelektrode (Anode) und verbindet sich dort mit dem Aluminium zu Aluminiumoxyd. Dieses Aluminiumoxyd läßt sich während des Vorgangs metallisch haltbar färben. Auf diese Weise erhalten Bauteile (z. B. Fensterrahmen), billige Schmuckgegenstände (Talmischmuck) und andere Dinge eine sehr dünne, aber sehr harte Oxydschicht; sie werden **eloxiert**.

5.1.2.5. Elektrolytkondensatoren

Die Aluminiumoxydschicht, von der im vorhergehenden Abschnitt gesprochen wurde, ist sehr dünn (ungefähr 10^{-4} mm = 0,1 µm); außerdem wirkt sie isolierend. Diese beiden Eigenschaften nutzt man bei der Herstellung von Elektrolytkondensatoren aus. Diese Kondensatoren haben aus zwei Gründen verhältnismäßig schnell Anwendung gefunden. Durch

¹⁾ Oxyd – heute auch Oxid

die sehr dünne Oxydhaut (Dielektrikum) haben sie bei geringem Raumbedarf eine verhältnismäßig große Kapazität. Daneben besitzen sie die Eigenschaft, sich nach einem Durchschlag auf elektrolytischem Wege zu regenerieren, so daß sie weiter verwendbar sind. Diese Selbstheilung erfolgt, indem an der Durchschlagstelle durch Wanderung von negativen Sauerstoffionen zur positiven Aluminiumelektrode die Oxydschicht sofort neu gebildet wird.

Diese Elektrolytkondensatoren haben jedoch den Nachteil, daß sie richtig gepolt in die entsprechende Schaltung eingesetzt werden müssen (Aluminiumelektrode als Pluspol). Andernfalls würde unter dem Einfluß der Elektrolyse die Oxydschicht abgebaut und der Kondensator dadurch zerstört. Für bestimmte Zwecke gibt es ungepolte Elektrolytkondensatoren; diese besitzen auf beiden Elektroden eine Oxydschicht. Verschiedene Nachteile der Aluminium-Elektrolytkondensatoren (z. B. großer Verlustfaktor, kleine Konstanz) führten zur Entwicklung der Tantal-Elektrolytkondensatoren, bei denen das Dielektrikum aus einer Tantal-Oxydschicht besteht (vgl. hierzu Abschnitt 9.4.1.2.).

5.1.2.6. Einheit der Stromstärke

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß sich die Einheit für die Stromstärke, „1 Ampere“, früher auf die Elektrolyse stützte. Danach hatte ein Strom dann die Stärke von einem Ampere, wenn er in einer Sekunde aus einer Silbernitratlösung (Elektrolyt) 1,118 mg Silber ausschied. Seit 1948 gilt für die Einheit der Stromstärke eine andere Definition (vgl. hierzu Abschnitt 2.2.1.).

5.1.3. Unerwünschte Erscheinungen der Elektrolyse

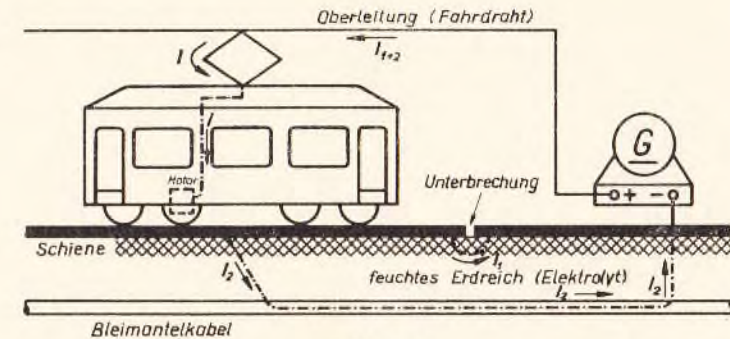
5.1.3.1. Elektrolytische Korrosion

Die im Abschnitt 5.1.1. beschriebene Zersetzung von Stoffen in Lösungen durch die Elektrolyse macht sich aber auch auf einigen Gebieten (besonders der Fernmeldetechnik) bemerkbar, wo sie höchst unerwünscht ist. Man nennt diese unerwünschte Erscheinung „**Elektrolytische Korrosion**“. Sie trat besonders bei der Zersetzung der Bleimäntel von Fernmeldekabeln und in den Kinderjahren der Fernmeldetechnik bei der Zerstörung von Relaiswicklungen in Wählvermittlungsstellen sehr unangenehm in Erscheinung.

5.1.3.2. Bleikabelkorrosion

An den Bleimänteln der Fernmeldekabel, besonders an solchen, die in der Nähe von Gleichstrombahnen (Straßenbahn, Berliner S-Bahn u. a.) verlegt waren, stellte man Zersetzungserscheinungen fest. Bei näherer Untersuchung stieß man auf Vorgänge der Elektrolyse.

Im allgemeinen werden diese Bahnen so betrieben, daß man den Strom vom Pluspol des Spannungserzeugers (Gleichstromgenerators) über den



(Abb. 51)

oberirdischen Fahrdrabt (bei der S-Bahn über eine dritte Schiene) den Fahrzeugen zuführt. Nach Ableistung ihrer Arbeit in den Fahrzeugmotoren erfolgt die Rückführung der verhältnismäßig starken Ströme über die Schienen zum Minuspol der Spannungsquelle (vgl. hierzu Abb. 51). Dabei fließt z. B. durch die an den Schienenstößen auftretenden Übergangswiderstände ein Teil des Gesamtstromes über Wege geringeren Widerstandes (z. B. feuchtes Erdbreich, Rohrleitungen, Wasseradern, Bleikabelmäntel usw.) als vagabundierender Gleichstrom zum Generator zurück. Das feuchte Erdbreich stellt mit den in ihm enthaltenen Salzen, Fäulnisstoffen usw. einen Elektrolyten dar. Fließt nun z. B. ein Strom über einen Bleikabelmantel, so muß an irgendeiner Stelle ein Stromaustritt aus dem Bleimantel ins feuchte Erdbreich erfolgen. Dabei gehen Bleiionen, die bekanntlich Kationen sind, aus dem Bleimantel in Richtung des Minuspols der Spannungsquelle in das Erdbreich über, d. h., das Blei wandert ab. Im Laufe der Zeit wird der Bleimantel an der Abwanderungsstelle zerstört und damit das Kabel unbrauchbar.

Als Gegenmaßnahme stellt man eine unmittelbare metallische Verbindung zwischen dem Minuspol der Spannungsquelle und dem Bleikabelmantel her. Diesen Schutz zur Verhinderung der elektrolytischen Metallwanderung nennt man **Elektrodrainage**.

Bei den in neuerer Zeit verwendeten Kabeln mit Kunststoffmantel können die oben beschriebenen Erscheinungen nicht auftreten, weil der Kunststoffmantel als Isolator einen Stromfluß zwischen Metallmantel und Erdbreich verhindert.

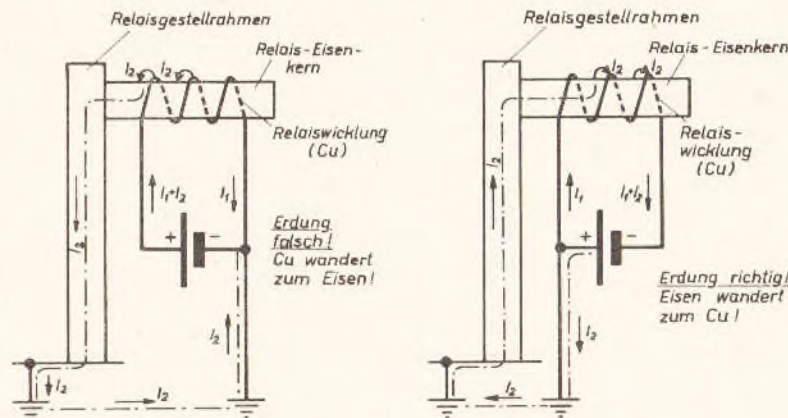
5.1.3.3. Zerstörung von Relaiswicklungen durch elektrolytische Korrosion

Alle in der Fernmeldetechnik verwendeten Isolierstoffe sind nach heutigen Erkenntnissen keine hundertprozentigen Isolatoren. Wir wissen z. B., daß der im oberirdischen Linienbau verwendete Freileitungsisolator bei

trockenem Wetter einen Isolationswiderstand von 5000 M Ω hat. Wenn aber ein Widerstand vorhanden ist, an dem eine Spannung liegt, fließt auch ein Strom, und sei er noch so klein.

Die atmosphärische Luft, die im allgemeinen feucht ist, andererseits aber auch mit Säuredämpfen (Rauchgasen usw.) oder in der Nähe der Küste mit Salzwasserdüsten durchsetzt ist, stellt einen Elektrolyten dar. Damit besteht in den technischen Einrichtungen der Fernmeldeanlagen, die mit Gleichstrom betrieben werden, die Möglichkeit der elektrolytischen Korrosion (Metallwanderung).

In den Anfangsjahren der Fernmeldetechnik wurde (wie bei Gleichstromanlagen der Starkstromtechnik heute noch üblich) der Minuspol der Stromversorgung geerdet. Dabei bildete sich ein Nebenstromkreis vom Pluspol der Batterie über den hohen Isolationswiderstand der Kupferdrahtisolierung und der feuchten Luft als Elektrolyt zu den Eisenkernen der Relais, die wiederum über die Eisenkonstruktion der Relaisgestelle mit der am Minuspol liegenden Erde in Verbindung standen. Da die feuchte Luft als Elektrolyt wirkte, entstand durch den Stromfluß eine elektrolytische Metallwanderung des Kupfers der Wicklung in Richtung zum Eisenkern des Relais (Metallionen wandern mit dem Strom). Durch diese Kupferabwanderung wurden die oft verhältnismäßig dünnen Wicklungsdrähte ($d = 0,06 \text{ mm}$) zerstört.



(Abb. 52)

Diese elektrolytische Korrosion war die Ursache dafür, daß man heute in Fernsprechanlagen den Pluspol der Gleichstromversorgung erdet. Zwar tritt auch dabei eine Metallwanderung auf, aber vom Eisenkern in Richtung Kupferwicklung. Diese ist wegen der umgekehrt gelagerten Querschnittsverhältnisse für die Fernsprechanlage ungefährlich (vgl. hierzu Abb. 52).

5.1.3.4. Elektrolytische Korrosion durch Elementbildung

An den Berührungsstellen zweier verschiedener Metalle (z. B. Würgeverbindungsstelle einer Aluminiumfreileitung mit einer Kupferfreileitung, Verbindungsstelle der Bleilaschen einer Sammlerbatterie mit der Kupfersammelschiene der Stromversorgung einer VStW, Bleikabelmantelverbindung mit einem Kupfererder usw.) können sich unter Einwirkung von Luftfeuchtigkeit als Elektrolyt galvanische Elemente (Lokalelemente) bilden (vgl. hierzu Abschnitt 5.3.). Da die Übergangsstelle widerstandsmäßig einen Kurzschluß darstellt, wird durch den aus diesem Element kommenden hohen Strom die Berührungsstelle in kurzer Zeit elektrolytisch zerstört.

Voraussetzung für die elektrolytische Korrosion ist also:

1. Vorhandensein eines Elektrolyts und
2. Fließen eines elektrischen Stromes, der
 - a) aus fremden Stromquellen oder
 - b) aus einem sich bildenden galvanischen Element kommen kann.

5.2. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 5.1.

1. Was versteht man unter Elektrolyse? 2. Erklären Sie die Begriffe Anode und Katode! 3. Was ist ein Elektrolyt? 4. Was sind Ionen? 5. Wodurch unterscheiden sich Anionen und Kationen? 6. Wann ist eine Flüssigkeit elektrisch leitend? 7. Wodurch unterscheiden sich Ionen von Elektronen? 8. Wie lautet das 1. Faradaysche Gesetz? 9. Erklären Sie den Begriff „Elektrochemisches Äquivalentgewicht“! 10. Wo wird die Elektrolyse praktisch angewendet? 11. Nach welcher Elektrode wandern Wasserstoff- und Metallionen? 12. Was versteht man unter Galvanisieren? 13. Wodurch unterscheidet sich Galvanoplastik von Galvanostegie? 14. Erklären Sie den Begriff „Eloxal“! 15. Wodurch heilen sich Elektrolytkondensatoren selbst? 16. Was versteht man unter elektrolytischer Raffination? 17. Erklären Sie den Begriff „Elektrolytische Korrosion“! 18. Was versteht man unter Elektrodrainage? 19. Warum wird in den Anlagen der Fernsprechtechnik nicht der Minuspol, sondern der Pluspol der Batterie geerdet? 20. Wieviel Stunden benötigt man, um 1 kp Reinaluminium aus einem elektrolytischen Bad zu gewinnen, wenn die Stromstärke 1000 A beträgt? Aluminium hat das elektrochemische Äquivalentgewicht $0,093 \cdot 10^{-3} \text{ p/C}$.

5.3. Elektrochemische Spannungserzeuger

5.3.1. Allgemeines

Im Abschnitt 1.2. wurde bereits darauf hingewiesen, daß Elektrizität (also eine elektrische Spannung) auch durch chemische Vorgänge erzeugt werden kann.

So entdeckte im Jahre 1789 der italienische Gelehrte **Galvani**, daß ein Froschschenkel, den er mit einem kupfernen Haken an einem Eisenzaun aufgehängt hatte, immer dann zusammenzuckte, wenn der Froschschenkel das regenfeuchte eiserne Gitter berührte. 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 ein elektrischer Vorgang sein mußte. Im Verlauf vieler Versuche erkannte Volta, daß es sich wirklich um elektrische Energie handelte, die den Froschschenkel zusammenzucken ließ. Er fand heraus, daß zur Erzeugung solcher Energie immer **zwei verschiedene Stoffe**, z. B. Kupfer und Zink, erforderlich waren, die er durch nasse Tücher voneinander getrennt hatte. Zwischen diesen beiden verschiedenen 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 entsprechender Untersuchung vieler anderer Stoffe war er in der Lage, eine Übersicht aufzustellen. Diese Spannungsreihe nach Volta wird **elektrochemische Spannungsreihe** genannt.

Zwischen den einzelnen Stoffen dieser Reihe entsteht eine bestimmte Spannung, wenn man sie in einen Elektrolyten bringt. Dabei wird die Polarität der Spannung der einzelnen Stoffe gegenüber Wasserstoff angegeben.

Die elektrochemische Spannungsreihe ist im Laufe der technischen Entwicklung erweitert und vervollkommen worden. In der nachfolgenden Übersicht sind die wichtigsten Stoffe der Spannungsreihe aufgeführt, wobei die Potentiale gegen Wasserstoff angegeben sind, da Wasserstoff bei allen elektrolytischen Vorgängen beteiligt ist.

Aluminium	Zink	Eisen	Nickel	Zinn	Blei	Wasserstoff	Kupfer	Silber	Kohle	Platin	Braunstein	Sauerstoff
(-)												(+)
-1,4	-0,76	-0,44	-0,23	-0,14	-0,13	0	+0,35	+0,8	+0,85	+0,86	+0,9	+1,39
												V

In dieser Spannungsreihe stehen links die unedleren und rechts die edleren Stoffe, d. h., die unedleren Stoffe haben gegenüber Wasserstoff, der das Potential Null hat, ein negatives und die edleren ein positives Potential. Die EMK in Volt zwischen zwei Stoffen ergibt sich aus folgender Regel:

$$E = \text{Potential 1} - \text{Potential 2}$$

Dabei gibt das Vorzeichen im Ergebnis die Polarität des Stoffes der ersten Elektrode gegenüber dem Stoff der zweiten Elektrode an, z. B.

$$E_{\text{Zn/C}} = (-0,76 \text{ V}) - (+0,85 \text{ V}) = -1,61 \text{ V}$$

5.3.2. Die elektrolytischen Vorgänge bei der Spannungserzeugung

Anläßlich der Erklärung der Vorgänge bei der Elektrolyse haben wir bereits erfahren, daß bestimmte Flüssigkeiten in Ionen zerfallen. Wir wollen nun den Ladungszustand der Ionen bei dem Versuch mit dem in Schwefelsäure getauchten Zinkblech untersuchen (vgl. hierzu Abb. 49).

Die Zinkatome, die sich aus dem Atomverband des Zinkblechs lösen (Nachweis durch die raugewordene Zinkoberfläche), konnten dieses nur unter der Voraussetzung, daß sie von den auf den äußeren Elektronenschalen befindlichen Elektronen einige zurückließen. Dadurch fehlen jedem Zinkion, das in die Lösung geht, Elektronen; es ist positiv geladen (Elektronenmangel). Diese positiven Zinkionen bilden nun mit den durch den Zerfall der Schwefelsäure (H_2SO_4) in H^- und SO_4^- -Ionen freigewordenen negativen SO_4^- -Ionen z. T. neutrales Zinksalz (Zinksulfat – $ZnSO_4$), während die positiven H^- -Ionen der Lösung eine positive Ladung erteilen. Gleichzeitig besitzt aber das Zinkblech durch die von den Zinkionen zurückgelassenen Elektronen einen Elektronenüberschuß gegenüber der Lösung. Das Zinkblech ist negativ geladen. Dieser Zersetzungs Vorgang wickelt sich so lange ab, bis die Lösung gesättigt ist, d. h., bis sie keine Zinkionen mehr aufnehmen kann. Zwischen der Zinkplatte und der Lösung haben wir jetzt eine elektrische Spannung.

Taucht man eine zweite Zinkplatte in die Lösung, so vollziehen sich an ihr die gleichen Vorgänge. Auch diese Platte hat eine negative Spannung gegenüber der Lösung. Da die Spannungen beider Zinkplatten gegen den Elektrolyten gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet sind, zeigt diese elektrochemische Zelle nach außen keine Spannung an.

Ersetzen wir jetzt aber eine der Zinkplatten in der Zelle durch eine Kupferplatte, dann geschieht folgendes:

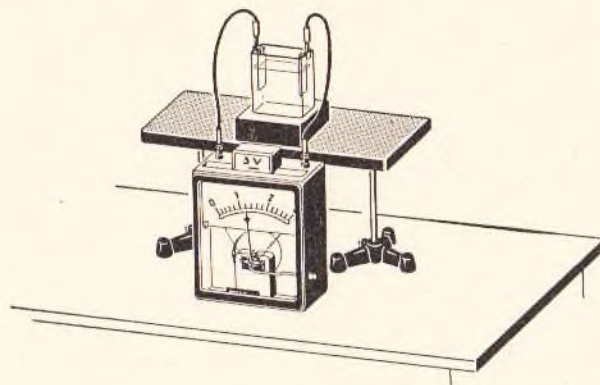
Aufgrund der in die Lösung drängenden Zn -Atome werden die Wasserstoffionen der Lösung zum Kupfer getrieben. Hier neutralisieren sich die H^- -Ionen, indem sie dem Kupfer Elektronen entziehen, und steigen z. T. als Gasbläschen auf. Das Kupferblech nimmt gegenüber der Lösung eine positive Ladung an (vgl. hierzu Abb. 48). Jetzt stehen sich zwei Stoffe mit verschiedenen Ladungszuständen in der Lösung gegenüber, nämlich Zink (Elektronenüberschuß) und Kupfer (Elektronenmangel). Wir stellen zwischen den beiden Elektroden eine Spannung fest.

5.3.3. Primärelemente (Galvanische Elemente)

Die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Vorgänge sind die Grundlage für einen Versuch von Volta, den wir mit Hilfe der Anordnung nach Abb. 53 nachahmen wollen.

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 1,5 V an. Wir wollen jetzt dem Wasser etwas Schwefelsäure hinzusetzen. Der Ausschlag des Instruments wird sich kaum ändern, d. h., die Spannung bleibt fast konstant, weil gewöhnliches Leitungswasser durch die in ihm enthaltenen Salze und Säurespuren bereits einen Elektrolyten darstellt. Mit destilliertem Wasser würde der Versuch allerdings nicht gelingen.

Der Vorgang bei 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 wir beobachten, daß an der Kohleelektrode Bläschen auftreten. Bei unserem Versuch haben wir infolge chemischer Umwandlung der Stoffe Elektronenverschiebungen verursacht und damit eine Spannung erzeugt. Wir haben ein **galvanisches Element** erhalten. Die Spannung, die von dieser Spannungsquelle erzeugt wird, nennt man **Elektromoto-**



(Abb. 53)

rische Kraft (EMK) oder Urspannung U_0 . Zwischen dieser EMK und der an den Klemmen des Elements wirksamen Spannung besteht ein Unterschied, den wir später untersuchen wollen. Die EMK eines Elements ist abhängig von der Werkstoffart der Elektroden. Die Zusammensetzung des Elektrolyten ist von geringerer Bedeutung.

5.3.3.1. Polarisation und Depolarisation

Bei dem in Abb. 53 dargestellten Versuch haben wir festgestellt, daß an der Kohleelektrode Bläschen auftreten. Wenn wir den Versuch länger beobachten, werden wir bemerken, daß die Spannung immer niedriger wird, während sich die Kohleelektrode über und über mit Bläschen besetzt. Diese Bläschen sind gasförmiger Wasserstoff, der durch die elektrolytische Zersetzung entsteht, wobei er als positives Ion von der Kohleelektrode Elektronen aufnimmt. Die Wasserstoffgasschicht auf der Kohleelektrode verursacht die Bildung eines neuen Elementes, bei dem sich jetzt Zink und Wasserstoff als Elektroden gegenüberstehen. Nach der elektrochemischen Spannungsreihe ist die Potentialdifferenz zwischen diesen beiden Stoffen bedeutend geringer als die zwischen Zink und Kohle. Man kann die spannungsvermindernde Wirkung der Wasserstoffbläschen beweisen, indem man sie an der Kohleelektrode entfernt. Die Spannung ist dann wieder voll vorhanden, bis sich die Kohleelektrode erneut mit Bläschen vollgesetzt hat. Dieser Vorgang, der zur Spannungsreduzierung führt, wird **Polarisation** genannt.

Ein dauerhaftes Element, das die Spannungsdifferenz der elektrochemischen Spannungsreihe erreicht, kann man nur erhalten, wenn die Polarisation verhindert 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 vom Wasserstoff nennt man **Depolarisation**. Stoffe, die in der Lage sind, Sauerstoff abzugeben, heben die Polarisation auf und heißen deshalb **Depolarisatoren**.

Beim Zink-Kohle-Braunstein-Element (vgl. hierzu Abb. 54) besteht der Depolarisator aus stark sauerstoffhaltigem Braunstein (MnO_2).

5.3.3.2. Das Zink-Braunstein-Element

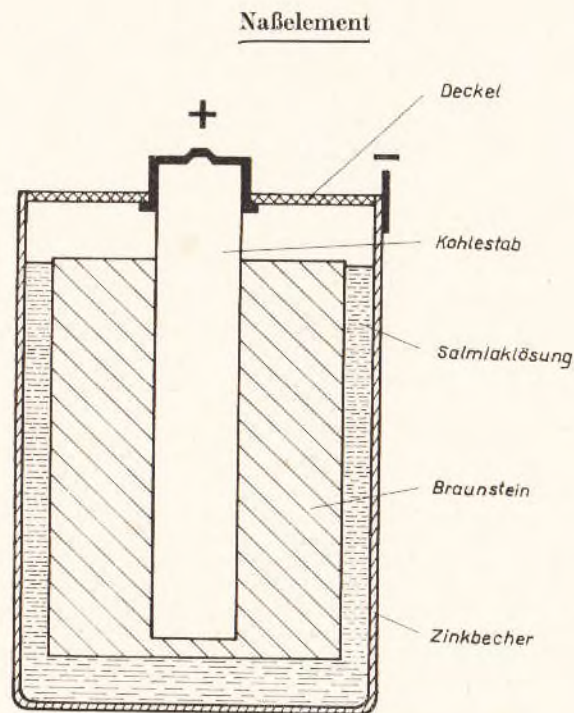
Seit der klassischen Elementausführung Voltas um das Jahr 1800 sind viele Konstruktionen von galvanischen Elementen entwickelt worden. Jede hat zu ihrem Teil dazu beigetragen, die Erkenntnisse über die Elektrotechnik auf den heutigen Stand zu bringen. So wurden 1830 das Daniel-Element, 1839 das Grove-Element, 1842 das Bunsen-Element und 1860 das Meidinger- und das Krüger-Element der Öffentlichkeit bekannt. Als letzte Entwicklung wäre die des Franzosen Leclanché zu nennen, die erstmals Braunstein als festen Depolarisator verwendete. Diese 1867 bekanntgewordene Ausführung finden wir noch heute in ähnlicher Form in unseren sogenannten Trockenelementen.

Das Zink-Braunstein-Element hat gegenüber fast allen anderen Elementen den Vorteil, daß es eine höhere EMK erzeugt. Nach der elektrochemischen

Spannungsreihe ist das Spannungsgefälle zwischen Braunstein und Zink etwa 1,66 V. Im Betrieb hat das Element eine Klemmenspannung U_k von 1,5 V. Zink-Braunstein-Elemente kennt man als Naß- und Trockenelemente.

Die Abb. 54 zeigt uns den schematischen Aufbau eines **Naßelements** (nach seinem Erfinder auch Leclanché-Element genannt). Die Elektroden bestehen aus Braunstein und Zink, wobei der den Kohlestab umgebende und in einem porösen Beutel enthaltene Braunstein gleichzeitig als Depolarisator wirkt. Der Braunsteinbeutel wird auch Puppe genannt. Der Kohlestab hat nur noch die Aufgabe der Stromableitung. Als Elektrolyt wird eine flüssige Salmiaklösung verwendet. Dieses Naßelement wird nicht mehr hergestellt.

Als **Trockenelement** wird das Zink-Braunstein-Element in der Fernmelde-technik besonders auch bei der Deutschen Bundespost häufig verwendet.



(Abb. 54)

Trockenelement



(Abb. 55)

Den Aufbau eines Trockenelements zeigt uns Abb. 55 am Beispiel der klassischen Rundzelle. In einer Papphülse (11) befindet sich die als Becher ausgebildete Zink-Elektrode (1). Der als Zuleitung zur positiven Elektrode dienende Kohlestift (4) besitzt oberhalb einer Abdeckscheibe (7) eine Polkappe (5). Er ist umgeben von einem Braunstein-Graphit-Gemisch (3), das als positive Elektrode und gleichzeitig als Depolarisator dient. Zwischen dieser positiven Elektrode und dem negativen Zinkbecher befindet sich ein Bodenisolator (6). An der Kennfarbe des Deckels (9) erkennt man, für welche Verwendung die Zelle besonders geeignet ist (Beleuchtung – blau; Geräte – rot; Motor – orange).

Der Elektrolyt ist beim Trockenelement keine Flüssigkeit mehr, sondern eine mit Hilfe eines Verdickungsmittels gebundene Salmiakpaste, die sich zwischen der inneren Wandung des Zinkbechers und der Braunsteinpuppe befindet; auch der Depolarisator ist von ihr durchsetzt.

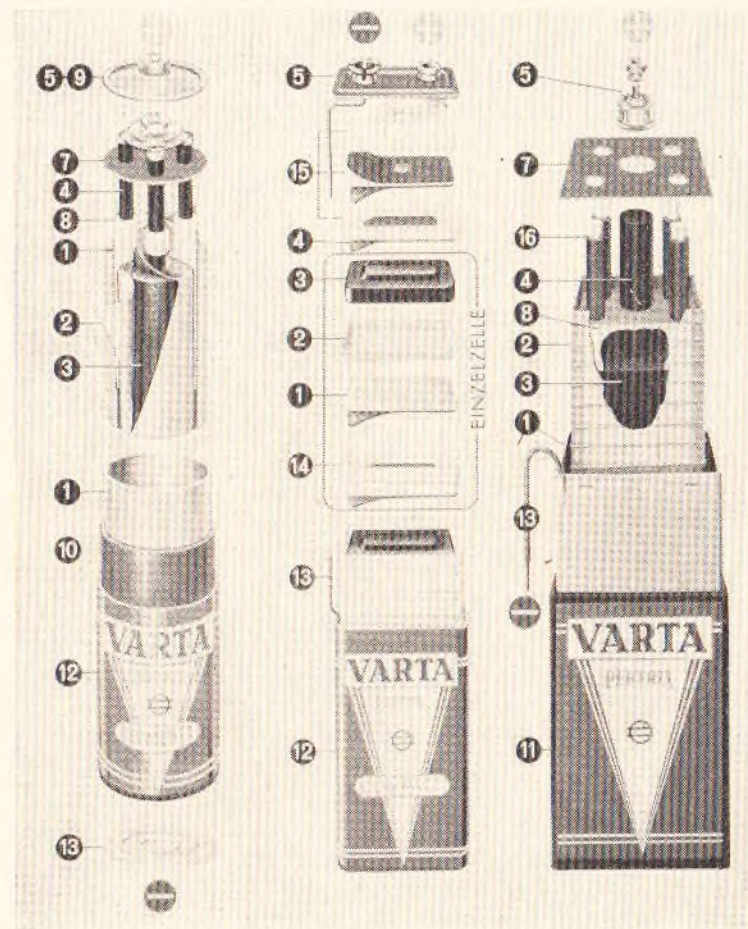
Während der Entladung wird der Zinkbecher zersetzt. Die Papphülse hat daher die Aufgabe, eventuell austretenden Elektrolyt aufzusaugen. Besonders anspruchsvolle Zellentypen werden in einer allseitig abgedichteten Stahlmantelkonstruktion ausgeführt (LEAK PROOF-Technik).

Außer der oben beschriebenen Konstruktion, der **Monozelle**, sind in den letzten Jahren einige Sonderausführungen von den Herstellerfirmen herausgebracht worden.

1962 kamen Trockenelemente auf den Markt, die als sogenannte **Segmentzellen** bei gleichem Rauminhalt eine bedeutend größere Strombelastbarkeit haben. Die Erhöhung der Belastbarkeit erreicht man durch Aufteilung des Zinkzylinders in vier Sektorenbecher. Jeder Sektorenbecher stellt für sich ein Element mit Braunsteinpuppe und Kohlestab dar. Die positiven und negativen Elektroden der einzelnen Elemente sind parallelgeschaltet. Die Abb. 56 zeigt eine Segmentzelle in LEAK PROOF-Ausführung.

Die sogenannte **Flachzelle** wurde zur Herstellung von Batterien mit hohen Spannungen und geringem Raumbedarf entwickelt. Wie schon der Name

Segment-Zelle Compact-Batterie Luft-Sauerstoff-Element



(Abb. 56)

(Abb. 57)

(Abb. 58)

- (1) Negative Zinkelektrode
- (2) Separatorpapier und Elektrolytträger
- (3) Positive Elektrode
- (4) Zuleitung für die positive Elektrode

- (5) Abschlußkappe, Knopfkontaktplatte bzw. Kontaktschraube
- (7) Abdeckscheibe
- (8) Distanzkörper
- (9) Zellendeckel
- (10) Bitumenpapier-Isolation
- (11) Pappkasten

- (12) Stahlblechmantel
- (13) Bodenscheibe bzw. Drahtableitung
- (14) Abgesetzte Kunststoffschale mit Leitschichtfolie
- (15) Stapelabschlußteile
- (16) Luftzuführung zur Depolarisations-elektrode

sagt, haben wir es bei diesen Batterien nicht mehr mit den üblichen zylindrischen Rundzellen zu tun, sondern mit tablettenförmigen **Plattenzellen**, die übereinander gestapelt werden. Eine aus Plattenzellen bestehende **Compact-Batterie** zeigt die Abb. 57.

Die Aufbau- bzw. Wirkstoffe sind bei den Flachzellen die gleichen wie bei den herkömmlichen Rundzellen. Die negative Elektrode besteht aus einer viereckigen Zinkscheibe, die auf ihrer Unterseite mit einer nur in einer Richtung elektrisch leitenden Kunststoffolie (1) beklebt ist. Diese Folie hat zwei Aufgaben. Sie soll die Zellen chemisch voneinander trennen, damit das Zink nicht von den Chemikalien der darunterliegenden Zelle angegriffen wird und gleichzeitig stellt sie die elektrisch leitende Verbindung zu eben dieser Zelle her. Auf der Zinkplatte liegt ein mit Elektrolyt getränkter Saugpapierstreifen (2). Der Braunstein-Depolarisator ist zu einer Tablette gepreßt und auf den Papierstreifen aufgelegt. Diese Depolarisator-tablette (3) stellt gleichzeitig die positive Elektrode dar. Die ganze Anordnung ist in einem kleinen Kunststoffschälchen untergebracht (14), dessen Boden eine große ausgestanzte Öffnung hat, durch die die Depolarisationstablette der darunterliegenden Zelle hindurchragt und mit der Kunststoffolie Kontakt hat. Durch einfaches Aufeinanderstapeln dieser Zellen kann man ohne Lötverbindungen Batterien beliebiger Spannungshöhe herstellen.

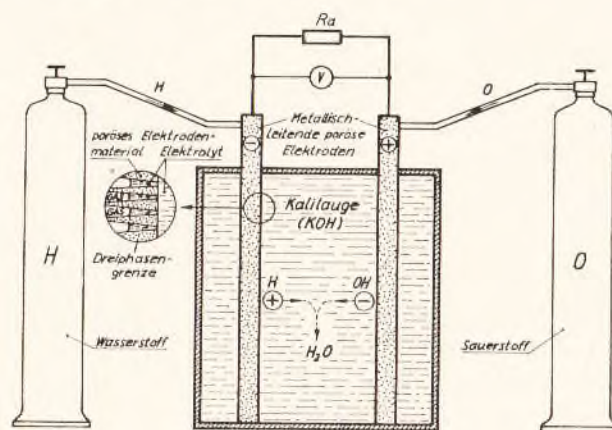
5.3.3.3. Das Luft-Sauerstoff-Element

Das **Luft-Sauerstoff-Element** (vgl. hierzu Abb. 58) ist ähnlich aufgebaut wie das Zink-Braunstein-Element. Als Depolarisator verwendet man aber hier nicht den Sauerstoff des Braunsteins, sondern den Sauerstoff der atmosphärischen Luft. Die im Innern der Zelle befindliche Puppe besteht bei dieser Ausführung aus Aktivkohle, die hochporös ist. Wie ein Schwamm saugt diese den Sauerstoff der Luft begierig auf. Dieser Sauerstoff verbindet sich bei Inbetriebnahme des Elements wie beim Braunstein-Element mit dem sich absetzenden Wasserstoff zu Wasser. Der konstruktive Aufbau weicht etwas von dem der anderen Elemente ab. Innerhalb der Zelle muß ein größerer Luftraum vorhanden sein, der durch verschließbare Röhrchen mit der Außenluft in Verbindung gebracht werden kann, damit der Luftsauerstoff bei Inbetriebnahme an die Aktivkohle gelangt. Das Luftsauerstoff-Element hat eine etwa zweieinhalbmal so große Kapazität wie die klassische Rundzelle (etwa 150 mAh/cm³).

5.3.3.4. Brennstoffzellen

Brennstoffzellen (Wasserstoff-Sauerstoff-Zellen) arbeiten im Prinzip ähnlich wie galvanische Elemente. Sie bestehen aus zwei gleichartigen porösen Metallelektroden (z. B. Nickellegierungen), die sich in einem Elektrolyten, meist Kalilauge, befinden. In die eine Elektrode läßt man

Wasserstoff und in die andere Sauerstoff unter einem Druck von etwa 1 atü einströmen. Das Wasserstoffgas dringt in die feinen Kanäle der porösen Wasserstoff-Elektrode in Richtung des Elektrolyten so weit ein, bis es durch den Haarröhrendruck (Kapillardruck) des Elektrolyten aufgehalten wird. In diesem Gebiet, das die **Dreiphasengrenzschicht** (fest, flüssig, gasförmig) genannt wird, finden elektrochemische Reaktionen statt. Hier bilden sich an der Wasserstoffelektrode aus dem neutralen Wasserstoffgas positive Wasserstoffionen, die in den Elektrolyten wandern; dabei wird diese Elektrode durch die zurückbleibenden Elektronen negativ geladen (Elektronenüberschuß). In der Grenzschicht der Sauerstoffelektrode bilden sich aus neutralem Sauerstoffgas, Wasser und Elektronen negative OH-Ionen, indem sie der Elektrode Elektronen entziehen, wodurch diese positiv geladen wird (Elektronenmangel). Diese negativen OH-Ionen vereinigen sich innerhalb des Elektrolyten mit den von der anderen Elektrode kommenden positiven H-Ionen zu neutralen H_2O -Molekülen (Wasser). Da sich diese Verbindung ohne Entstehung von Wärme vollzieht, spricht man von einer „kalten Verbrennung“ (daher auch der Name „Brennstoffzelle“). Das entstehende Wasser muß von Zeit zu Zeit abgezogen werden, da es die Konzentration des Elektrolyten verschlechtert (vgl. hierzu Abb. 59).



(Abb. 59)

Die zwischen den Elektroden entstehende Spannung beträgt theoretisch etwa 1,23 V; praktisch liegt sie zwischen 0,7 und 0,9 V (je nach der Stromdichte an der Elektrodenoberfläche von 100 mA bis 50 mA/cm²). Der Wirkungsgrad dieser Elemente liegt, da keine Wärmeverluste usw. entstehen, verhältnismäßig hoch zwischen 50 und 70%. Wegen ihrer hohen Wirtschaftlichkeit und ihres geringen Wartungsbedarfs werden Brennstoffzellen zur Stromversorgung von Fernmeldeeinrichtungen

eingesetzt, die weit abseits vom öffentlichen Starkstromnetz und an schwer zugänglichen Stellen betrieben werden müssen. Die Deutsche Bundespost verwendet sie z. B. zur Stromversorgung von Fernschfüllsendern und -umsetzern. Die hierfür eingesetzten Brennstoffzellenbatterien ergeben z. B. bei 24 V 100 W oder bei 12 V 50 W. Die Entwicklung der Brennstoffzellen ist noch nicht abgeschlossen. Auch hinsichtlich ihrer Verwendung gibt es sicher noch viele Möglichkeiten (z. B. beim elektrischen Antrieb von Kraftfahrzeugen und Booten oder beim Betrieb von Raumfahrzeugen).

5.3.4. Sekundärelemente (Akkumulatoren)

5.3.4.1. Allgemeines

Die bisher besprochenen Elemente nennt man **Primärelemente**, weil sie unmittelbar durch chemische Umwandlung der Stoffe eine EMK liefern. Neben diesen Primärelementen gibt es 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; erst hiernach 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. Diesen Umwandlungsprozeß nennt man **Ladung**. Die beiden Elektroden haben jetzt gegeneinander eine Spannung (EMK). Das Element kann nunmehr elektrische Energie abgeben, und zwar so lange, wie die Rückbildung der Elektroden in ihre ursprüngliche Stoffzusammensetzung andauert. Die Rückbildung nennt man **Entladung**.

Bei Sekundärelementen wird zuerst 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).

Der einem Sammler entnommene Strom ist aufgrund der chemischen Rückbildungen Gleichstrom. Damit ist wohl selbstverständlich, daß auch der bei der Ladung zur Umsetzung der elektrischen Energie in chemische Energie erforderliche Strom nur Gleichstrom sein kann.

Sammler sind nur für Gleichstrom brauchbar.

In der Praxis kommen zwei verschiedene Arten von Sammlern zur Anwendung.

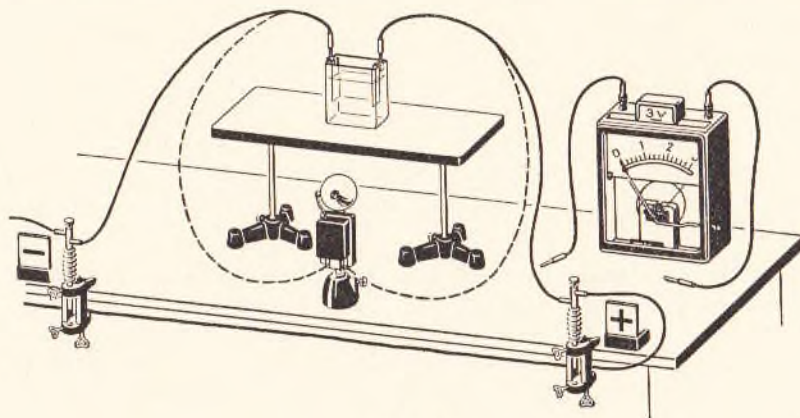
Für den Betrieb von Fernsprechanlagen (z. B. Vermittlungsstellen, große Nebenstellenanlagen), Uhrenanlagen usw. werden heute oft noch **Bleisammler** verwendet. Sie wurden 1859 von dem Franzosen Planté ent-

wickelt (1881 durch Faure verbessert) und haben ihren Namen nach den als Elektroden verwendeten Bleiplatten.

Für tragbare Zwecke und für Betriebsweisen, wo das Gewicht eine Rolle spielt (Stromversorgung in Flugzeugen, auf Schiffen, für elektrische Zugbeleuchtung und ähnliches), wird wegen seines geringeren Gewichts und der mechanischen und elektrischen Unempfindlichkeit der **alkalische Sammler** (auch Nickel-Eisen-Sammler oder Nickel-Kadmium-Sammler genannt) eingesetzt. Der alkalische Sammler hat seinen Namen nach der als Elektrolyt verwendeten Kalilauge. Er wurde fast gleichzeitig von dem Schweden Jungner und dem Amerikaner Edison um die Jahrhundertwende entwickelt.

5.3.4.2. Der Bleisammler

Bei dem in Abb. 60 dargestellten Versuch befinden sich zwei Bleiplatten in verdünnter Schwefelsäure (Mischungsverhältnis 1:10). Schließen wir an die Platten ein Voltmeter an, so wird es keine Spannung anzeigen (vorausgesetzt, daß die Platten völlig gleichartig sind). Wir legen jetzt an die Platten eine Gleichspannung

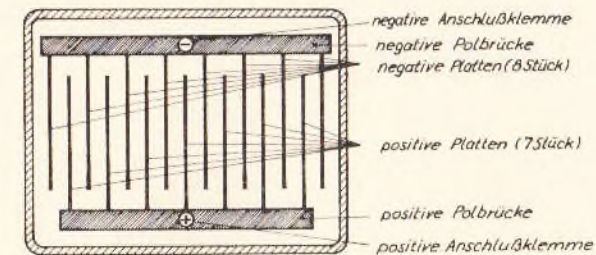


(Abb. 60)

von 4 Volt und beobachten, daß an den Platten Bläschen aufsteigen und daß die am positiven Pol der Gleichspannungsquelle liegende Platte braun wird. Nach einiger Zeit schalten wir die Spannungsquelle ab und legen jetzt wieder das Voltmeter an die Platten; es zeigt eine Spannung von etwa 2 Volt an. Schließen wir an die Platten eine Klingel an, so wird sie einige Zeit läuten. Damit haben wir die im Abschnitt 4.3.4.1. beschriebene Funktion der Sekundärelemente bewiesen.

Ein Bleisammler besteht nicht aus nur zwei Platten; vielmehr sind **mehrere positive und negative Platten** jeweils so zu Plattenpaketen (Plattensätzen) zusammengebaut, daß sich immer eine positive und eine negative Platte abwechseln. Die äußeren Platten sind stets negativ, so

daß jede Zelle stets eine negative Platte mehr hat, als positive Platten vorhanden sind (vgl. hierzu Abb. 61). Der Grund liegt in der Volumen-



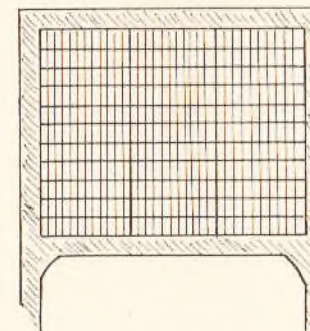
(Abb. 61)

änderung der aktiven Masse der positiven Platten zwischen Lade- und Entladezustand. Dadurch könnten sich die positiven Platten verbiegen, wenn sie nicht auf beiden Seiten von negativen Platten beeinflusst würden.

Zwei Plattensätze in einem mit einem Elektrolyten gefüllten Gefäß bezeichnet man als **Sammlerzelle**. Die EMK einer Zelle beträgt im Betriebszustand etwa 2 Volt; sie sinkt im entladenen Zustand bis auf 1,8 V ab.

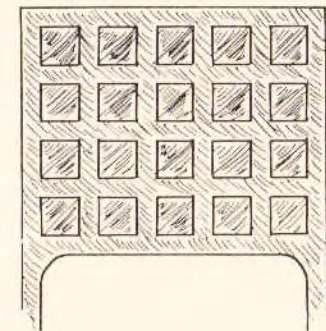
Als **positive Platte** wird meist die sogenannte **Großoberflächenplatte** verwendet, bei der man durch Rippen und Querstege eine große Oberfläche

Großoberflächenplatte



(Abb. 62)

Gitterplatte



(Abb. 63)

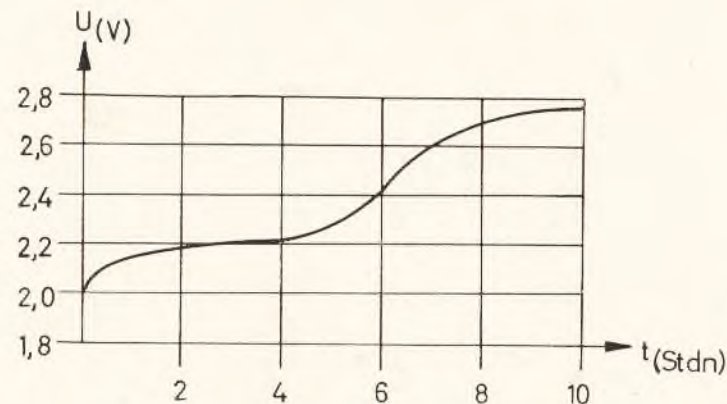
im Verhältnis zu den geringen Abmessungen der Platte erreicht. Die Oberfläche dieser aus reinem Blei gegossenen Platte wird durch elektrochemische Formierung mit der wirksamen Schicht (Bleidioxyd- PbO_2) versehen (vgl. hierzu Abb. 62).

Die **negative Platte** ist meist als Gitterplatte und gelegentlich auch als Kastenplatte ausgebildet. Die **Gitterplatte** besteht aus einem fensterartigen Rahmen aus Hartblei, dessen Hohlräume mit der wirksamen Masse ausgestrichen sind, die eine etwas andere Zusammensetzung hat als die wirksame Schicht der Großoberflächenplatte (vgl. hierzu Abb. 63). Die **Kastenplatte** bildet einen Hohlkörper, ähnlich einer Schachtel, deren innerer Hohlraum mit der aktiven Masse ausgefüllt ist.

Die einzelnen Plattensätze werden in ein säurefestes Gefäß eingebracht, das manchmal für jede Platte eine Führungsnut aufweist, damit sich die Platten nicht berühren können. Zwischen den Platten befinden sich sogenannte **Separatoren** oder **Scheider**. Das sind vor allem elektrolytdurchlässige Holzbrettchen oder geeignete durchlöchernte Kunststoffplatten. Sie sollen Kurzschlüsse zwischen den Platten verhindern. Das Gefäß ist außerdem so ausgebildet, daß die Platten nicht den Boden berühren. In dem Zwischenraum zwischen Platten und Gefäßboden kann sich der Schlamm herausfallender Masseteilchen absetzen, ohne die Platten miteinander zu verbinden und dadurch Kurzschlüsse zu verursachen (**Schlammraum**).

Als **Elektrolyt** verwendet man **verdünnte Schwefelsäure** (Volumen-Mischungsverhältnis: etwa 5 Teile destilliertes Wasser und 1 Teil Schwefelsäure), die die Platten stets voll bedecken soll (etwa 1 bis 2 cm über Plattenoberkante). Die **Säuredichte** ist das zuverlässigste Maß für den Lade- oder Entladezustand eines Bleisammlers. Sie muß ständig kontrolliert werden. Im allgemeinen werden die Sammlerzellen von Firmen an Ort und Stelle aufgestellt, mit Säure gefüllt 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 sonst stark spritzt und damit Kleidung und Körperteile (Augen) gefährdet werden. Die Wartung der Sammlerzellen 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.

Das **Laden** eines Sammlers erfolgt, indem man den Pluspol der Zelle mit dem Pluspol und den Minuspol der Zelle 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 reduzierte 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 Sammler-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

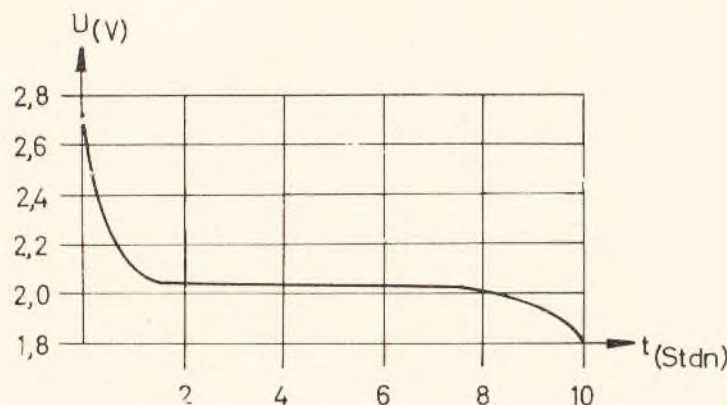


(Abb. 64)

2,4 V (vgl. hierzu Abb. 64). Bei dieser Spannung beginnt die Säure heftig zu gasen (kochen). Das Gasen entsteht dadurch, daß von dieser Spannung ab ein großer Teil des Ladestromes dazu benutzt wird, das Wasser elektrolytisch in Wasserstoff und Sauerstoff zu zersetzen. Diese Gase steigen an den Elektroden auf und entweichen. Daher muß bei Beginn der Gasung (bei 2,4 V) die Ladestromstärke beträchtlich reduziert werden. Die EMK steigt zum Ende der Ladung schnell auf etwa 2,7 V. Weiteres Laden ist nicht nur zwecklos, weil die Spannung nicht weitersteigt; es würde auch eine Schädigung der Platten bewirken.

Durch die chemischen Veränderungen innerhalb der Zellen wird beim Laden die Säuredichte erhöht. **Man kann also an der Dichte der Säure den Ladungszustand der Zelle erkennen.** Die Säuredichte soll bei voll geladenen Sammlern 1,2 g/cm³ (bei Autoakkus 1,24 g/cm³) und im entladenen Zustand 1,18 g/cm³ betragen. 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 (Bleiodoxyd) besitzen bei voll aufgeladenem Sammler eine tief dunkelbraune, die Minusplatten (reines Blei) eine hellgraue Farbe.

Bei der **Entladung** sinkt die EMK des Sammlers schnell auf 2 V ab (Abb. 65) und bleibt dann längere Zeit konstant. Sinkt die EMK auf den Tiefstwert von 1,8 V, so muß unverzüglich mit der Entladung aufgehört werden, weil sonst die Platten zerstört würden. Bei diesem Entladezustand zeigt die positive Platte eine helle braune Farbe. Der in ihr vorhandene Sauerstoff hat sich mit dem Wasserstoff, der während der Entladung durch die chemische Umwandlung frei wurde, zu Wasser verbunden. Dadurch wird die Säure verdünnt, die Säuredichte sinkt. Die negative Platte wird dunkelgrau. Nunmehr muß der Sammler sofort



(Abb. 65)

wieder aufgeladen werden. Man soll Bleisammler nie längere Zeit in entladem Zustand stehenlassen, weil dann die Gefahr besteht, daß die Platten unbrauchbar werden.

Die beendete Ladung eines Bleisammlers ist erkennbar:

- an der Höhe der EMK (2,7 V),
- an der Säuredichte (1,2 g/cm³) und
- an der Farbe der Platten (+ Platte tiefdunkelbraun, — Platte hellgrau).

Der entladene Zustand eines Bleisammlers ist erkennbar:

- an der Höhe der EMK (1,8 V),
- an der Säuredichte (1,18 g/cm³) und
- an der Farbe der Platten (+ Platte hellbraun, — Platte dunkelgrau).

5.3.4.3. Der alkalische Sammler

Der alkalische Sammler unterscheidet sich vom Bleisammler vor allem in seinem strukturellen Aufbau, in seiner Unempfindlichkeit gegen mechanische und elektrische Beanspruchung und in der Höhe seiner Spannung. Er besteht aus einem vernickelten Stahlblechgehäuse, in dem die Elektroden aus Nickel und Eisen bzw. Kadmium isoliert untergebracht sind. Die positive Elektrode, in einfachster Form ein vernickelter Eisengitterrahmen, enthält als aktive Masse eine Nickelverbindung und die negative Elektrode eine Eisen- oder Kadmiumverbindung. Als Elektrolyt wird verdünnte Kalilauge mit der Dichte 1,2 g/cm³ verwendet. Zur Vergrößerung der wirksamen Oberfläche der Platten werden ebenfalls

mehrere zu Plattenpaketen zusammengebaut; dabei hat das negative Plattenpaket auch eine Platte mehr als das positive.

Beim **Laden** eines alkalischen Sammlers werden Pluspol des Sammlers mit dem Pluspol der Spannungsquelle und Minuspol des Sammlers mit dem Minuspol der Spannungsquelle verbunden. Die angelegte Ladespannung beträgt etwa 2 Volt pro Zelle. Bei der Ladung verändert sich die Eisen- bzw. Kadmiumverbindung der negativen Elektrode zu reinem Eisen bzw. reinem Kadmium, während die Nickelverbindung der positiven Elektrode in eine Nickelverbindung höherer Oxydationsstufe übergeht. Die Kalilauge ändert sich bei diesem Vorgang nur unmerklich. Man kann daher beim alkalischen Sammler im Gegensatz zum Bleisammler den Ladungszustand der Zelle nicht an der Dichte des Elektrolyten erkennen. Die Spannung steigt beim Laden bis auf etwa 1,8 Volt an, sinkt dann aber schnell wieder ab. Man rechnet im allgemeinen mit einer mittleren Zellenbetriebsspannung von etwa 1,2 Volt.

Bei der **Entladung** verwandelt sich durch den jetzt in entgegengesetzter Richtung fließenden Strom das Eisen bzw. Kadmium der negativen Elektrode wieder in die Eisen- oder Kadmiumverbindung zurück. Ebenso entsteht aus der höheren Oxydationsstufe der Nickelverbindung der positiven Elektrode wieder eine Verbindung niedriger Stufe. Im entladenen Zustand weist die Zelle noch eine Spannung von 1,0 Volt auf.

Die mittlere Betriebsspannung des alkalischen Sammlers beträgt nur etwa $\frac{3}{5}$ der Spannung des Bleisammlers.

Die Vorteile des alkalischen Sammlers liegen in seiner großen Lebensdauer, seiner Unempfindlichkeit gegen mechanische und elektrische Überbeanspruchung, in seinem kleineren Gewicht und in seinem geringeren Wartungsbedarf. Ein Überladen ist unschädlich; auch kann er im Gegensatz zum Bleisammler nahezu unbegrenzte Zeit in ungeladenem Zustand stehenbleiben.

Moderne Ausführungen der alkalischen Sammler sind die gasdichten Zellen, z. B. die sogenannten „Knopfzellen“.

5.3.4.4. Aufnahmefähigkeit und Wirkungsgrad der Sammler

Die Aufnahmefähigkeit oder **Kapazität** K eines Sammlers hängt von der Oberflächengröße seiner positiven Platten ab. Sie errechnet sich als Produkt aus der **Stromstärke** I in Ampere und der **Zeit** t in Stunden:

$$K = I \cdot t$$

Die Kapazität wird in Amperestunden (Ah) angegeben. Diese Maßeinheit 1 Amperestunde (bzw. 1 Amperesekunde = 1 Coulomb) haben wir bereits im Abschnitt 2.2.1. als Einheit für die Elektrizitätsmenge kennengelernt (1 Ah = 3600 As = 3600 C).

Je höher die entnommene Stromstärke ist, um so kleiner ist die Kapazität eines Sammlers. Die Herstellerfirmen geben deshalb die Kapazität für eine bestimmte Entladedauer an, z. B. „60 Ah zehnstündig“.

Ein Sammler hat bei einer bestimmten Ladestromstärke innerhalb der Ladezeit eine gewisse Elektrizitätsmenge aufgenommen; man kann also sagen, dem Sammler sind Amperestunden zugeführt worden. Vergleicht man nun die vom Sammler abgegebenen Amperestunden mit den ihm zugeführten Amperestunden, so stellt man fest, daß die abgegebenen Amperestunden immer geringer sind als die aufgenommenen. Das Verhältnis der beiden Werte zueinander ist der **Amperestundenwirkungsgrad** des Sammlers:

$$\eta_{Ah} = \frac{\text{Entlade-Ah}}{\text{Lade-Ah}} = \frac{K_E}{K_L} = \frac{I_E \cdot t_E}{I_L \cdot t_L}$$

Der Amperestundenwirkungsgrad eines Bleisammlers, neuerdings auch **Gütefaktor** genannt, liegt bei 0,95 und der eines alkalischen Sammlers bei 0,70 bis 0,75.

Auch bei galvanischen Elementen wird die Kapazität in Ah gemessen. Sie liegt aber meist in der Größenordnung von mAh.

Die **Entladekapazität** K_E wird allgemein als die **Nennkapazität** des Sammlers bezeichnet. Sie ist immer niedriger als die **Ladekapazität** K_L . Die Verluste entstehen durch die Zersetzung des Wassers beim Gasen und durch die bei den chemischen Umwandlungsprozessen entstehende Wärme.

Das Verhältnis der tatsächlich abgegebenen Energie zur aufgenommenen Energie wird durch den **Wattstundenwirkungsgrad** angegeben. Der Wattstundenwirkungsgrad ergibt sich aus dem Amperestundenwirkungsgrad, indem man die Lade- und Entladespannungen berücksichtigt ($Ah \cdot V = Wh$). Vgl. hierzu die Ausführungen im Abschnitt 3.2. „Elektrische Arbeit und Leistung“.

$$\eta_{Wh} = \frac{\text{abgegebene Wh}}{\text{aufgenommene Wh}} = \frac{A_{ab}}{A_{zu}} = \frac{K_E \cdot U_E}{K_L \cdot U_L} = \frac{I_E \cdot t_E \cdot U_E}{I_L \cdot t_L \cdot U_L}$$

Der Wattstundenwirkungsgrad ist immer kleiner als der Amperestundenwirkungsgrad. Bei Bleisammlern beträgt er etwa 0,75, bei alkalischen Sammlern etwa 0,6.

Weitere Ausführungen über die chemischen Spannungserzeuger (z. B. über den inneren Widerstand) enthält der Abschnitt 7.

5.3.5. Gegenzellen

Zum Herabsetzen der Spannungen von Sammlerbatterien für Vermittlungsstellen, die unmittelbar nach dem Laden einen zu hohen Wert haben, werden Gegenzellen verwendet. Man unterscheidet alkalische Gegenzellen und Halbleiter-Gegenzellen.

Alkalische Gegenzellen sind elektrolytische Zellen, die aus einem mit Kalilauge gefüllten Glasgefäß mit zwei Nickelelektroden bestehen. Da die Gegenzellen in die Entladeleitung der Batterie geschaltet werden, fließt der gesamte Strom durch die Zellen hindurch. Dabei tritt eine Zersetzung des Wassers in der Kalilauge in positive Wasserstoff- und negative Sauerstoffionen ein. Der Wasserstoff setzt sich an der mit dem Minuspol der Batterie verbundenen Elektrode ab, wodurch diese positiv aufgeladen wird. Der negative Sauerstoff setzt sich an der anderen Elektrode ab und gibt dieser eine negative Ladung. Dadurch stehen sich bei fließendem Strom nicht mehr zwei Nickelelektroden, sondern eine Wasserstoff- und eine Sauerstoffelektrode gegenüber. Nach der elektrochemischen Spannungsreihe besteht zwischen diesen beiden Stoffen in einem Elektrolyten eine Spannung von etwa 1,4 Volt. Diese Spannung ist in ihrer Polarität der Batteriespannung entgegengerichtet und hebt sie damit z. T. auf. In neuerer Zeit werden alkalische Gegenzellen wegen der aufwendigen Wartungsarbeit und der Explosionsgefahr (Knallgasbildung!) bei der DBP nicht mehr eingesetzt. Dafür werden die wartungsfreien **Trockengleichrichtergegenzellen** (Selen, Silizium) verwendet, die allerdings nur eine Gegenspannung von 0,4 bis 0,8 Volt je Platte ergeben.

5.4. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 5.3.

1. Warum nennt man galvanische Elemente Primärelemente? 2. Welche Aufgabe hat der Depolarisator? 3. Was für ein Elektrolyt ist in einem galvanischen Element enthalten? 4. Was versteht man unter der elektrochemischen Spannungsreihe? 5. Wodurch unterscheidet sich das Luft-Sauerstoff-Element von den üblichen galvanischen Elementen? 6. Aus welchem Stoff bestehen die beiden Elektroden des Leclanché-Elements? 7. Woher kommt der Name Trockenelement? 8. Was für ein Depolarisator wird beim Luft-Sauerstoff-Element verwendet? 9. Beschreiben Sie den Unterschied zwischen einer Flachzelle und einer Rundzelle! 10. Weshalb lädt man einen Sammler mit Gleichstrom und nicht mit Wechselstrom? 11. Wodurch unterscheidet sich ein alkalischer Sammler von einem Bleisammler? 12. Woran erkennt man, daß ein Bleisammler entladen ist? 13. Beschreiben Sie den Unterschied zwischen einem Element und einem Sammler! 14. In der 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? 15. Ein Sammler hat eine Nennkapazität von 50 Ah zehnstündig. Beim Laden werden ihm in 11 Stunden ständig 5 A zugeführt. Wie groß ist sein Ah-Wirkungsgrad? 16. Wodurch werden bei einem Bleisammler Kurzschlüsse zwischen den Platten vermieden? 17. Welche EMK liefert ein Nickel-Kadmium-Sammler? 18. Welcher Elektrolyt wird im Stahlsammler verwendet? 19. Welche Dichte hat die Schwefelsäure eines Bleisammlers im entladenen Zustand? 20. Bei welcher Spannung fängt ein Bleisammler an zu gasen? 21. Welche Bedeutung hat der Schlammraum eines Bleisammlers? 22. Was versteht man unter einer Groboberflächenplatte? 23. Beschreiben Sie die Aufgabe der aktiven oder wirksamen Masse der Bleiplatten! 24. Warum hat jeder Sammler eine negative Platte mehr, als positive Platten vorhanden sind? 25. Welche Aufgabe haben Gegenzellen?

6. Die Arten der Spannungserzeugung

6.1. Allgemeines

Die elektrische Spannung wurde bereits im Abschnitt 1.3.3.2. eingehend erläutert.

Bei der Spannungserzeugung handelt es sich um das Umformen anderer Energieformen in elektrische Energie. Dabei können mechanische, chemische oder thermische Einflüsse aber auch Lichteinwirkungen die Ursache sein. Man spricht daher von der Spannungserzeugung

a) durch mechanische Einflüsse:

- „Reibungselektrizität“ (Reiben bestimmter Stoffe)
- „Piezoelektrizität“ (Zug- oder Druckeinwirkung bei bestimmten Stoffen)
- „Induktionselektrizität“ (Bewegen eines Leiters im Magnetfeld bzw. umgekehrt)

b) durch chemische Einflüsse:

- „Galvanische Elektrizität“ (Chemische Veränderung der Stoffe)

c) durch thermische Einflüsse:

- „Thermoelektrizität“ (Wärmebeeinflussung der Stoffe)

d) durch Lichteinwirkung:

- „Lichtelektrizität“ (Beeinflussung von Stoffen durch Lichtstrahlen)

Die einzelnen Arten der Spannungserzeugung sollen in den nachstehenden Abschnitten näher erläutert werden.

6.2. Spannungserzeugung durch mechanische Ursachen

6.2.1. Reibungselektrizität

Über die Spannungserzeugung durch Reibung haben wir bereits im Abschnitt „Einführung in die Elektrizitätslehre“ Näheres erfahren. Diese Art der Spannungserzeugung wird heute in der Praxis kaum angewandt.

Reibungselektrizität tritt aber oft an Stellen auf, wo sie unerwünscht ist. So kann man feststellen, daß große Tankwagen oder Omnibusse bei hohen Geschwindigkeiten durch die Reibung der Reifen an der Straßendecke und der Luft an den Außenwänden der Fahrzeuge elektrisch geladen werden. Beim Berühren dieser Fahrzeuge kann es dann zu elektrischen Entladungserscheinungen (elektrischer

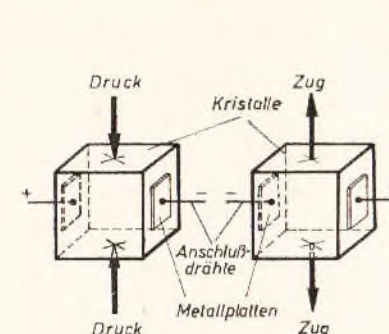
Schlag) kommen, weil sie durch die Gummireifen gegen Erde isoliert sind. Solche Fahrzeuge haben deshalb Vorrichtungen, die einen Ausgleich der elektrischen Ladungen ermöglichen (auf der Erde schleifende Metallketten oder Schleifdrähte). Ähnliche Erscheinungen treten z. B. auch bei Flugzeugen, an Druckereimaschinen beim Ablauf der Papierbahn von der Vorratsrolle, an Schallplatten beim Abspielen, an Dia-Rahmen und bei modernen Kunststoffen auf. Früher konnte man sie auch bei Transmissionsantrieben an der Ablaufstelle des Treibriemens von der Riemenscheibe beobachten.

6.2.2. Piezoelektrizität

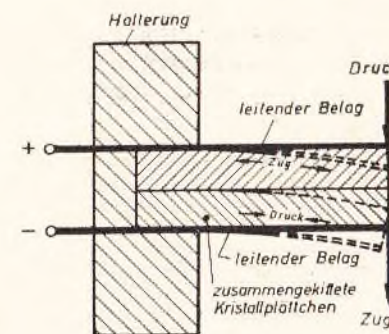
Beim Aufladen eines Kondensators kann man mittels feinsten Meßeinrichtungen feststellen, daß sich die Form des zwischen den beiden metallischen Kondensatorbelägen befindlichen Isolierstoffs (Dielektrikum) verändert. Diese Verformung des Materials macht sich als Längenzunahme (Ausdehnung) oder als Längenabnahme (Zusammenziehung) bemerkbar. Sie ist bei den meisten Isolierstoffen sehr gering. Bei Stoffen mit kristallinischem Aufbau zeigt sie sich jedoch in stärkerer Weise.

Der Vorgang der Verformung durch elektrische Ladungen ist umkehrbar. Übt man auf das Dielektrikum eines Kondensators einen Zug oder Druck aus, so läßt sich zwischen den beiden Metallbelägen eine Spannung nachweisen. Diese Erscheinung nennt man **Piezoeffekt** („piezèin“ heißt auf deutsch „Druck“). **Die so erzeugte Spannung ist sehr klein. Sie liegt in der Größenordnung von Mikrovolt und hängt ab von der Art des Piezokristalles und der Größe der Verformung.** Der Wirkungsgrad solcher Spannungsquellen liegt zwischen 1 und 5%.

Besonders geeignet für diese Spannungserzeugung sind aufgrund ihrer Kristallstruktur **Bariumtitanat, Seignettesalze, Turmalin** usw.



(Abb. 66)



(Abb. 67)

Ein Kristallstückchen legt man zwischen zwei Metallplatten, auf die dann Zug oder Druck ausgeübt wird, der sich auf das Kristallstückchen überträgt (vgl. hierzu Abb. 66). Bei den sogenannten „Biegern“ (mehrere zusammengeklebte Kristallscheiben mit verschiedenen Schnittebenen) erfolgt die Verformung durch Verbiegen der eingespannten Kristallscheiben (vgl. hierzu Abb. 67).

Die eben beschriebene Spannungserzeugung wird z. B. bei den **Kristallmikrofonen** angewendet. Die auftretenden Schallwellen verformen die Bariumtitanat-Bieger. Dabei entstehen sehr kleine Spannungen, die verstärkt werden müssen und dann dem Sender oder Wiedergabegerät zugeführt werden.

Auch bei der Wiedergabe von Schallplattenaufnahmen benutzt man das Prinzip der Piezospaltungserzeugung (**Kristalltonabnehmer**).

Eine Umkehrung des eben beschriebenen Vorgangs ist die Erzeugung von Druckschwankungen durch Spannungsschwankungen, die beim **Kristallfern Hörer** und beim **Kristalllautsprecher** angewandt wird.

6.2.3. Induktionselektrizität

Mit **Induktionsspannung** bezeichnet man die Spannung in einem Leiter, die durch Änderung des magnetischen Flusses in der Umgebung dieses Leiters entsteht. Wird die Änderung des magnetischen Flusses durch Bewegen eines Leiters innerhalb eines Magnetfeldes oder durch Bewegen eines Magnetfeldes in der Umgebung eines Leiters hervorgerufen, so nennt man sie „Bewegungsspannung“. Die Flußänderung bewirkt im Leiter (z. B. in der Wicklung eines Generators) eine Elektronenverschiebung (vgl. hierzu Abb. 9). Nähere Erläuterungen über die Erzeugung von „Induktionsspannungen“ enthält der Band B 4 dieser Fachbuchreihe.

6.3. Spannungserzeugung durch chemische Einflüsse

Die Erzeugung von Spannungszuständen durch chemische Einflüsse erfolgt in elektrochemischen Spannungserzeugern, den sogenannten Primär- und Sekundärelementen und in Brennstoffzellen (vgl. hierzu Abschnitt 5.3.).

Die **Primärelemente** (Trockenelemente) haben z. Z. noch eine große Bedeutung als Stromversorgungseinrichtung für tragbare Radio- und Fernsehempfänger, Lampen und viele andere transportable Geräte.

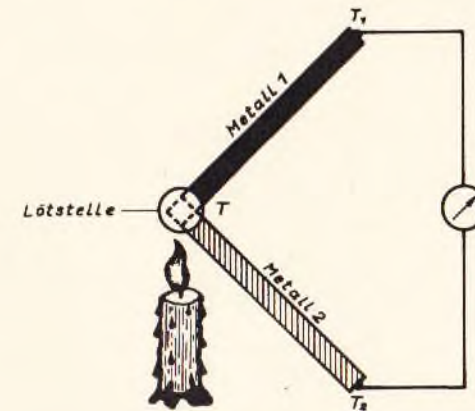
Sekundärelemente (Akkumulatoren) werden heute in großer Zahl für Kraftfahrzeuge, Luftfahrzeuge usw. sowie für ortsgebundene Anlagen (z. B. Fernmelde-Vermittlungseinrichtungen, Signal- und Uhrenanlagen) verwendet. Sie können entsprechend den jeweiligen Forderungen an die Stromversorgungsanlagen betrieben beziehungsweise geschaltet werden. Bei reinem „Batteriebetrieb“ werden sie abwechselnd geladen und entladen, während bei „Pufferbetrieb“ Netzstromversorgung, Batterie und Verbraucher ständig parallelgeschaltet sind. Bei „Bereitschaftsbetrieb“ steht die Batterie nur für Netzausfall in Reserve.

Brennstoffzellen sind moderne chemische Spannungserzeuger, die nach dem Prinzip der „kalten Verbrennung“ arbeiten (vgl. hierzu Abschnitt 5.3.3.4.). Sie finden heute bereits bei einigen fernmeldetechnischen Einrichtungen der DBP praktische Anwendung, besonders in Gegenden, die ohne Stromversorgung durch das öffentliche Starkstromnetz sind.

6.4. Spannungserzeugung durch Wärme

Fließt durch einen Leiter als Folge einer elektrischen Spannung ein elektrischer Strom, so erwärmt sich der Leiter. Auch diesen Vorgang kann man umkehren, d. h., man kann durch Wärmeeinflüsse eine Spannung in einem Leiter erzeugen. Die auf diese Weise erzeugte Spannung nennt man **Thermospaltung** (Thermo = Wärme).

Lötet oder schweißt man z. B. zwei Drähte aus verschiedenen Metallen zusammen und erwärmt diese Verbindungsstelle, dann treten zwischen den beiden Metallen in der Lötstelle Elektronenverschiebungen auf. Wir können zwischen den kalten Enden der beiden Metalle eine Spannung



(Abb. 68)

messen. Die Elektronenverschiebungen werden hervorgerufen durch die verschiedenen Sättigungsverhalten der Atome der erhitzten Metalle. Die Erwärmung ist also die Ursache der Elektronenbewegung. Eine Einrichtung, in der Wärmeenergie in elektrische Energie umgewandelt wird, nennt man **Thermoelement** (vgl. hierzu Abb. 68).

Die Höhe der erzeugten Spannung hängt von der Art der verwendeten Metalle und der Höhe des Temperaturunterschieds zwischen der Lötstelle und den kalten Enden der Metalle ab.

Genauso wie die Höhe der Spannung bei elektrochemischen Spannungsquellen aus der „elektrochemischen Spannungsreihe“ entnommen werden kann, kann man die Größe der Thermospaltung aus der **thermoelektrischen Spannungsreihe** feststellen.

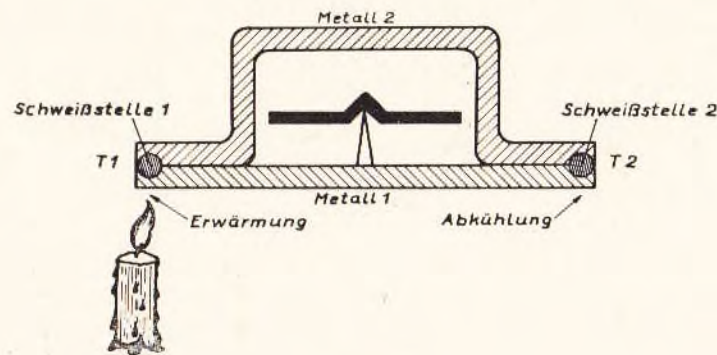
Dieser Spannungsreihe kann man z. B. entnehmen, daß für je 100 °C Temperaturerhöhung

- a) die Spannung zwischen Kupfer und Konstantan $4 \cdot 10^{-3} \text{ V}$
- b) die Spannung zwischen Eisen und Konstantan $5 \cdot 10^{-3} \text{ V}$
- c) die Spannung zwischen Nickel und Platin $4 \cdot 10^{-3} \text{ V}$

beträgt. Dabei sind die Grenztemperaturen für a) 400°C , für b) 900°C und für c) 1100°C . Wir erkennen, daß die durch Temperaturänderungen erzeugten Spannungen sehr klein sind. Der Wirkungsgrad ist sehr schlecht. Er liegt bei etwa 1%.

Sind zwei Lötstellen vorhanden, so wirken bei gleichen Temperaturen an beiden Lötstellen die Drücke der Elektronen und damit die elektrischen Spannungen einander entgegen. Die Gesamtspannung nach außen ist gleich Null. Erhöht man die Temperatur an der einen Lötstelle, so kann man eine Spannung messen. Wird die andere im gleichen Maße gleichzeitig abgekühlt, so verdoppelt sich die Spannung (vgl. hierzu Abb. 69).

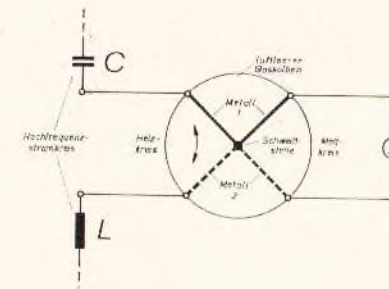
In der Technik werden Thermoelemente zum Messen hoher und tiefer Temperaturen eingesetzt, die die Meßbereiche der üblichen Quecksilber- und Weingeist-Thermometer überschreiten (z. B. in Schornsteinen, Hoch-



(Abb. 69)

öfen und Kühltürmen). In der Hochfrequenztechnik finden sie als sogenannte **Thermo-Umformer** oder **Thermokreuze** Anwendung zum Messen von Strömen oder Spannungen höherer Frequenzen (vgl. hierzu Abb. 70).

Der große Vorteil beim Einsatz der Thermoelemente als Thermometer besteht darin, daß sie durch den auftretenden Thermostrom als **Fernthermometer** eingesetzt werden können, d. h., die Temperaturen können an geeigneter Stelle (Schaltwarte, Zentrale usw.) abgelesen werden.



(Abb. 70)

6.5. Spannungserzeugung durch Lichteinwirkung

Bestimmte Halbleiterstoffe, z. B. Selen, aber auch Alkalimetalle, wie Natrium, Kalium, Cäsium und Rubidium, haben die Eigenschaft, aus ihrer Oberfläche Elektronen herauszuschleudern (zu emittieren), wenn sie von Lichtstrahlen getroffen werden. Die emittierten Elektronen kann man mit Hilfe einer zweiten Elektrode auffangen. Die Stärke des Elektronenstromes hängt vom Material und von der Stärke der auffallenden Lichtstrahlen ab. Die erzeugte Spannung ist sehr gering. Der Wirkungsgrad liegt bei 20 bis 25%. Eine Spannungsquelle dieser Art bezeichnet man als **Fotoelement**.

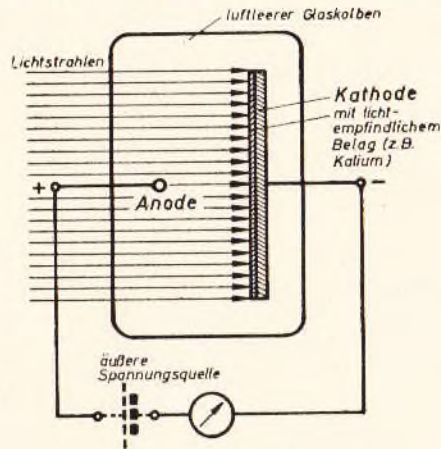
Den Effekt, der auch **äußerer fotoelektrischer Effekt** genannt wird, nutzt man in der **Fotозelle**¹⁾ aus. Eine solche Zelle besteht aus einem luftleer gepumpten Glaskolben, der zwei Elektroden enthält. Von diesen ist eine als Plattenelektrode ausgebildet und mit einer Alkalimetallverbindung bestrichen. Sie stellt die Katode dar. Wird die Alkalischicht von Lichtstrahlen getroffen, so emittiert sie Elektronen, die von der schleifenförmigen Anode aufgefangen werden (vgl. hierzu Abb. 71). Da der **Emissionsstrom** bei dieser Anordnung sehr gering ist, wird zur Stromverstärkung zwischen Anode und Katode zusätzlich eine äußere Spannungsquelle (Saugspannung) angelegt, die den Emissionsvorgang unterstützt. Fotozellen werden als Lichtrelais für Alarmanlagen, als Dämmerungsschalter für die automatische Einschaltung der Straßenbeleuchtung, für fotoelektrische Türöffner, in Zählwerken usw. verwendet.

Während Fotozellen eine äußere Spannungsquelle benötigen, können **Sperrschichtelemente** ohne zusätzliche Spannungsquelle betrieben werden. Bei diesen Elementen findet in der Grenzschicht zwischen einem Halbleiter und einem Leiter durch auftreffende Lichtstrahlen eine Elek-

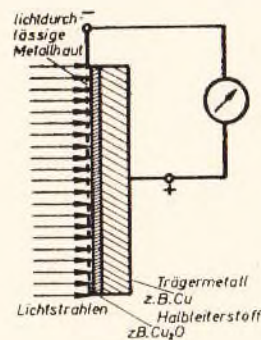
¹⁾ Im allgemeinen Sprachgebrauch unsichere Abgrenzung zwischen Fotoelement und Fotозelle.

tronenverschiebung statt. Diese Erscheinung nennt man Sperrschichteffekt oder **inneren fotoelektrischen Effekt** und das Fotoelement, in dem auf diese Weise eine Spannung erzeugt wird, **Sperrschichtelement**. (vgl. hierzu Abb. 72).

Zu diesen Elementen gehören die Senelemente, die als Belichtungsmesser bekannt geworden sind. Neuere Entwicklungen auf diesem Gebiet (z. B.



(Abb. 71)



(Abb. 72)

die Siliziumelemente) haben den Wirkungsgrad der Fotoelemente erheblich verbessert. Durch Gruppenschaltung von **Siliziumelementen** wurden sogenannte Sonnenbatterien (Solarbatterien) geschaffen, die in Gebieten mit gleichmäßiger intensiver Sonneneinstrahlung elektrische Energie zum Betrieb elektrischer Einrichtungen abgelegener Objekte erzeugen. Die Sender und Empfänger der Erdsatelliten werden auf diese Weise mit elektrischer Energie versorgt.

Auch die bei Lichteinfall an Halbleitern auftretende Widerstandsänderung beruht auf dem inneren fotoelektrischen Effekt. Bei diesem Vorgang werden durch Lichtstrahlen im Halbleiterwerkstoff zusätzlich Elektronen frei. Dadurch wird der Widerstand verringert. Solche Widerstände, deren Leitfähigkeit beleuchtungsabhängig ist, nennt man auch **Fotowiderstände**. Sie benötigen einen geschlossenen Stromkreis mit Spannungsquelle und werden z. B. beim Tonfilm zur Umwandlung von Lichtschwankungen in Stromschwankungen verwendet.

6.6. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 6.1. bis 6.5.

1. Welche Möglichkeiten zur Spannungserzeugung kennen Sie? 2. Was versteht man unter Piezoeffekt? 3. Wo wird der Piezoeffekt praktisch angewendet? 4. Beschreiben Sie die Wirkungsweise eines Thermoelements! 5. Was versteht man unter einem Thermokreuz? 6. Wo wird die Erzeugung von Thermospannungen praktisch ange-

wendet? 7. Wo entstehen durch Reibung unerwünscht elektrische Ladungen? 8. Was versteht man unter einem Bieger? 9. Was versteht man unter Induktionsspannung? 10. Welche Einrichtungen zur Spannungserzeugung auf chemischem Wege kennen Sie? 11. Was ist ein Sperrschichtelement? 12. Wo finden Fotozellen praktische Anwendung? 13. Was versteht man unter einem Fotowiderstand? 14. Wo werden Sperrschichtelemente eingesetzt? 15. Was versteht man unter einer Brennstoffzelle?

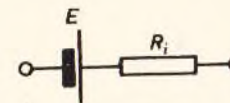
7. Die Schaltung von Spannungserzeugern

7.1. Allgemeines

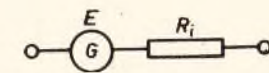
Wie wir gesehen haben, erzeugen z. B. elektrochemische Spannungsquellen nur eine EMK bis etwa 2 Volt pro Zelle. Diese geringe Spannung wird aber selten zum Betrieb elektrischer Einrichtungen ausreichen. Zur Vergrößerung der Spannung muß man dann mehrere solcher Elemente zu einer **Batterie** zusammenfügen. Auch wenn höhere Stromstärken benötigt werden, als sie ein Element hergibt, muß man mehrere Elemente zusammenschalten. Die nachstehenden auf die elektrochemischen Spannungsquellen bezogenen Ausführungen gelten sinngemäß für alle anderen Spannungserzeuger.

7.2. Spannungsverlust in Spannungserzeugern

Genau wie ein Leiterwerkstoff den fließenden Elektronen einen Widerstand entgegensetzt, muß der Strom im Innern eines elektrochemischen Spannungserzeugers 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 .



(Abb. 73)



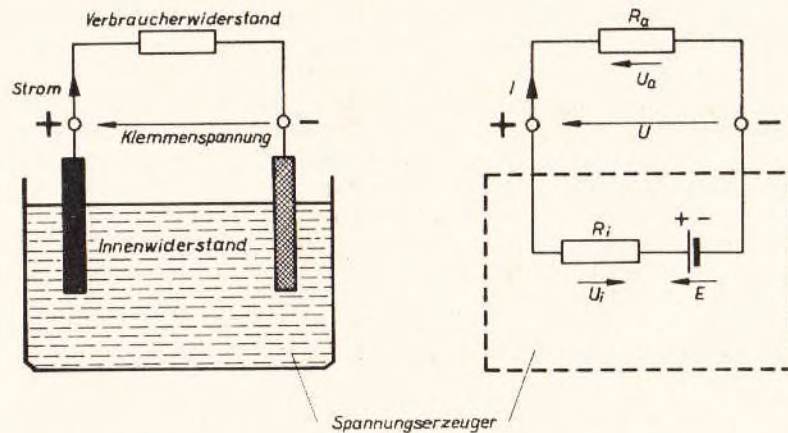
(Abb. 74)

Die Abb. 73 und 74 zeigen die Schaltbilder eines galvanischen Elements sowie eines Generators jeweils mit dem inneren Widerstand.

Der innere Widerstand der Zink-Braunstein-Elemente schwankt je nach der Größe des Elements zwischen 0,1 und 0,5 Ω ; bei Alterung eines Elements wächst sein innerer Widerstand ganz beträchtlich. Bleisammler haben je nach Größe innere Widerstände von 0,01 bis 0,00001 Ω ; je kleiner die Zelle, um so größer ist der innere Widerstand. Alkalische Sammler haben einen höheren inneren Widerstand als Bleisammler.

Nachdem wir wissen, daß in einem Spannungserzeuger ein innerer Widerstand wirksam ist, können wir uns auch vorstellen, daß an diesem inneren Widerstand ein Spannungsabfall auftreten muß, wenn ein Strom fließt (vgl. hierzu Abschnitt 2.6.). Ein Strom kann aber nur fließen, wenn zwischen dem Pluspol und dem Minuspol (gewöhnlich über einen Verbraucher) eine Verbindung besteht.

In den Abb. 75 und 76 sind Anordnung und Schaltbild eines elektrochemischen Spannungserzeugers mit Außenstromkreis dargestellt. Den Außenwiderstand (Verbraucher- und Leitungswiderstände) bezeichnet man mit R_a im Gegensatz zum Innenwiderstand der Spannungsquelle R_i .



(Abb. 75)

(Abb. 76)

Im Innenwiderstand wird also bereits ein Teil der EMK vernichtet; d. h., es entsteht ein unerwünschter Spannungsabfall, den man **inneren Spannungsverlust** U_i nennt:

$$U_i = I \cdot R_i$$

Zur Überwindung der außerhalb der Spannungsquelle liegenden Widerstände steht somit nur noch die Differenz zwischen der EMK und dem

inneren Spannungsverlust U_i zur Verfügung. Wir nennen diese Spannung, die wir an den Klemmen der Spannungsquelle messen können, **Klemmenspannung** U :

$$U = E - U_i$$

Diese Klemmenspannung muß die Spannungsabfälle im Außenstromkreis decken:

$$U = I \cdot R_a$$

Durch Umstellen der Gleichung $U = E - U_i$ erhalten wir

$$E = U + U_i$$

und durch Einsetzen der Gleichungen für die Spannungsabfälle

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

Die EMK ist gleich der Summe der Spannungsabfälle am Innen- und am Außenwiderstand.

Da $U = E - U_i$ und $U_i = I \cdot R_i$ ist, ergibt sich für die Klemmenspannung noch folgende Formel:

$$U = E - I \cdot R_i$$

Diese Formel zeigt, daß die Klemmenspannung um so größer ist, je kleiner die Stromstärke ist und je kleiner der innere Widerstand der Spannungsquelle ist. Man erkennt ferner, daß

- a) bei **Leerlauf** (Stromkreis nicht geschlossen, $I = 0$) die Klemmenspannung gleich der EMK ist ($U = E$) und
- b) bei **Kurzschluß** (Außenwiderstand gleich Null) die Klemmenspannung gleich Null ist und die gesamte EMK am Innenwiderstand verbraucht wird ($U_i = E$).

Aus der Gleichung $E = I \cdot R_a + I \cdot R_i = I (R_a + R_i)$ erhält man durch Umstellen:

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

1. Beispiel:

Ein galvanisches Element hat bei einem inneren Widerstand von 0,5 Ω eine EMK von 1,5 V. An die Klemmen des Elements wird ein Spannungsmesser mit einem

Widerstand von $1500\ \Omega$ geschaltet. Wie groß sind der Strom, der innere Spannungsverlust und die Klemmenspannung?

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

Gesucht: I , U_i , U

$$\begin{aligned}\text{Lösung: } I &= \frac{E}{R_a + R_i} = \frac{1,5}{1500 + 0,5} = \underline{\underline{0,001\ \text{A}}} \\ U_i &= I \cdot R_i = 0,001 \cdot 0,5 = \underline{\underline{0,0005\ \text{V}}} \\ U &= I \cdot R_a = 0,001 \cdot 1500 = \underline{\underline{1,5\ \text{V}}}\end{aligned}$$

Die Probe ergibt, daß $E = U + U_i = 1,5 + 0,0005 = 1,5005\ \text{V}$ ist (die geringe Abweichung von $1,5\ \text{V}$ ist durch Abrunden entstanden).

2. Beispiel:

An die Klemmen des Elements im 1. Beispiel wird jetzt ein Widerstand von $5\ \Omega$ angeschlossen. Wie groß sind die Werte für I , U_i und U ?

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

Gesucht: I , U_i , U

$$\begin{aligned}\text{Lösung: } I &= \frac{E}{R_a + R_i} = \frac{1,5}{5 + 0,5} = \underline{\underline{0,273\ \text{A}}} \\ U_i &= I \cdot R_i = 0,273 \cdot 0,5 = \underline{\underline{0,1365\ \text{V}}} \\ U &= I \cdot R_a = 0,273 \cdot 5 = \underline{\underline{1,365\ \text{V}}}\end{aligned}$$

Die Probe ergibt, daß $E = U + U_i = 1,365 + 0,1365 = \underline{\underline{1,5015\ \text{V}}}$ ist (die geringe Abweichung von $1,5\ \text{V}$ ist durch Abrunden entstanden).

3. Beispiel:

Der äußere Widerstand soll gleich dem inneren Widerstand, d. h. $R_a = R_i$ sein. Wie groß sind die Werte für I , U_i und U ?

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

Gesucht: I , U_i , U

$$\begin{aligned}\text{Lösung: } I &= \frac{E}{R_a + R_i} = \frac{1,5}{0,5 + 0,5} = \underline{\underline{1,5\ \text{A}}} \\ U_i &= I \cdot R_i = 1,5 \cdot 0,5 = \underline{\underline{0,75\ \text{V}}} \\ U &= I \cdot R_a = 1,5 \cdot 0,5 = \underline{\underline{0,75\ \text{V}}}\end{aligned}$$

Die Probe ergibt, daß $E = U + U_i = 0,75 + 0,75 = \underline{\underline{1,5\ \text{V}}}$ ist.

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_i und U ?

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

Gesucht: I , U_i , U

$$\begin{aligned}\text{Lösung: } I &= \frac{E}{R_a + R_i} = \frac{1,5}{0 + 0,5} = \underline{\underline{3\ \text{A}}} \\ U_i &= I \cdot R_i = 3 \cdot 0,5 = \underline{\underline{1,5\ \text{V}}} \\ U &= I \cdot R_a = 3 \cdot 0 = \underline{\underline{0\ \text{V}}}\end{aligned}$$

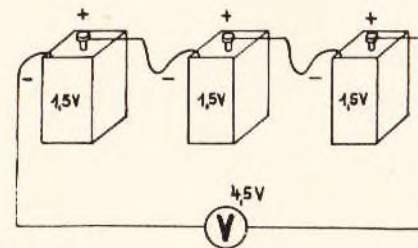
Die Probe ergibt, daß $E = U + U_i = 0 + 1,5 = \underline{\underline{1,5\ \text{V}}}$ ist.

Aus den vier Beispielen erkennen wir:

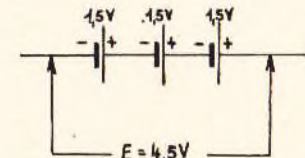
1. Ist in einem geschlossenen Stromkreis der äußere Widerstand im Vergleich zum inneren Widerstand der Spannungsquelle sehr groß, dann ist die Klemmenspannung ungefähr gleich der EMK; der innere Spannungsverlust kann vernachlässigt werden. Im Leerlauf, also bei praktisch unendlich großem Außenwiderstand, ist $U = E$.
2. Bei einem kleinen äußeren Widerstand verursacht die größere Stromstärke einen größeren Spannungsverlust am Innenwiderstand. Die Klemmenspannung ist kleiner als die EMK der Spannungsquelle.
3. Ist $R_a = R_i$, so ist der Spannungsverlust am inneren Widerstand gleich der Klemmenspannung. Die Werte von U_i und U sind je gleich der Hälfte des Wertes der EMK.
4. Bei Kurzschluß ($R_a = 0$) wird die gesamte EMK am inneren Widerstand der Spannungsquelle verbraucht. Die Klemmenspannung hat den Wert Null, weil der Spannungsverlust am inneren Widerstand gleich der EMK ist.

7.3. Die Hintereinanderschaltung

Um eine höhere Spannung zu erreichen, muß man die Spannungsquellen hintereinanderschalten. Bei der **Hintereinanderschaltung** von Spannungserzeugern (z. B. von galvanischen Elementen) wird der Pluspol des ersten mit dem Minuspol des zweiten, der Pluspol des zweiten mit dem Minuspol des dritten Elements usw. verbunden (vgl. hierzu Abb. 77 und 78).



(Abb. 77)



(Abb. 78)

Bei der Hintereinanderschaltung von Spannungserzeugern ist die Gesamt-EMK gleich der Summe der EMK der einzelnen Spannungserzeuger.

$$E_{\text{ges}} = E_1 + E_2 + E_3 + \dots$$

Haben sämtliche Spannungserzeuger die gleiche EMK, so ergibt sich

$$E_{\text{ges}} = n \cdot E$$

wobei n die Anzahl der hintereinandergeschalteten Elemente angibt und E die Einzel-EMK bedeutet. In den Abb. 77 und 78 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.

Bei der Hintereinanderschaltung von Elementen sind auch die inneren Widerstände hintereinandergeschaltet; daher ist der Gesamtwiderstand dieser Batterie gleich der Summe der einzelnen Innenwiderstände.

Da die Innenwiderstände der hintereinandergeschalteten Elemente gleich groß sind, ergibt sich

$$R_{i_{\text{ges}}} = n \cdot R_i$$

Wenn also im dargestellten Beispiel jedes Element einen inneren Widerstand von $0,3 \Omega$ hat, so würde der gesamte innere Widerstand $3 \cdot 0,3 = 0,9 \Omega$ betragen.

Passen wir die Formel zur Berechnung der Stromstärke

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

dieser **Hintereinanderschaltung** an, so kann man auch schreiben

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

Beispiel:

Vier galvanische Elemente werden in Reihenschaltung zu einer Batterie zusammengeschaltet. Die inneren Widerstände der einzelnen Elemente betragen $0,5 \Omega$; $0,4 \Omega$; $0,3 \Omega$ und $0,6 \Omega$. Jedes Element hat eine EMK von 1,5 V. Wie groß ist die EMK der Batterie, und wie groß ist ihr innerer Widerstand? Welche Stromstärke ergibt sich, wenn der Außenwiderstand 58Ω beträgt?

Gegeben: $E = 1,5$ V, $n = 4$, $R_{i1} = 0,5 \Omega$, $R_{i2} = 0,4 \Omega$,
 $R_{i3} = 0,3 \Omega$, $R_{i4} = 0,6 \Omega$, $R_a = 58 \Omega$

Gesucht: E_{ges} , $R_{i_{\text{ges}}}$, I

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

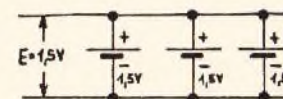
$$R_{i_{\text{ges}}} = R_{i1} + R_{i2} + R_{i3} + R_{i4} = 0,5 + 0,4 + 0,3 + 0,6 = \underline{\underline{1,8 \Omega}}$$

$$I = \frac{E_{\text{ges}}}{R_a + R_{i_{\text{ges}}}} = \frac{6}{58 + 1,8} = \underline{\underline{0,1 \text{ A}}}$$

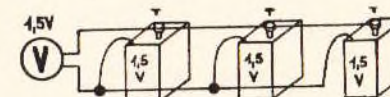
Die Batterie hat eine EMK von 6 V und einen Innenwiderstand von $1,8 \Omega$. Die Stromstärke beträgt $0,1$ A.

7.4. Die Parallelschaltung

Um eine höhere Stromstärke zu erreichen, muß man die Spannungsquellen parallel schalten. Bei der **Parallelschaltung** von Spannungserzeugern (z. B. von galvanischen Elementen) werden die gleichnamigen Pole miteinander verbunden, also Minuspol mit Minuspol und Pluspol mit Pluspol (vgl. hierzu Abb. 79 und 80).



(Abb. 79)



(Abb. 80)

Bei der Parallelschaltung von Spannungserzeugern ist die Gesamt-EMK gleich der EMK eines einzelnen Spannungserzeugers.

Da sämtliche Spannungserzeuger die gleiche EMK haben, ergibt sich

$$E_{\text{ges}} = E$$

Die inneren Widerstände der einzelnen Spannungserzeuger werden bei der Parallelschaltung ebenfalls parallelgeschaltet. Der Gesamtwiderstand dieser Batterie ist kleiner als der Innenwiderstand der einzelnen parallelgeschalteten Elemente.

Da alle Elemente den gleichen inneren Widerstand haben, so ergibt sich

$$R_{i_{\text{ges}}} = \frac{R_i}{p}$$

Dabei ist p die Anzahl der parallelgeschalteten Spannungserzeuger.

Passen wir die Formel für die Berechnung der Stromstärke dieser **Parallelschaltung** an, so ergibt sich

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

Beispiel:

Fünf galvanische Elemente werden parallelgeschaltet. Der innere Widerstand jedes Elements beträgt $0,5 \Omega$. Wie groß sind die Gesamt-EMK, der gesamte innere Widerstand und die Stromstärke bei einem Außenwiderstand von $1,15 \Omega$?

Gegeben: $E = 1,5$ V, $R_i = 0,5 \Omega$, $p = 5$, $R_a = 1,15 \Omega$

Gesucht: E_{ges} , $R_{i_{\text{ges}}}$, I

Lösung: $E_{\text{ges}} = E = \underline{\underline{1,5 \text{ V}}}$

$$R_{i_{\text{ges}}} = \frac{R_i}{p} = \frac{0,5}{5} = \underline{\underline{0,1 \Omega}}$$

$$I = \frac{E}{R_a + \frac{R_i}{p}} = \frac{E}{R_a + R_{i_{\text{ges}}}} = \frac{1,5}{1,15 + 0,1} = \underline{\underline{1,2 \text{ A}}}$$

Die Batterie hat eine EMK von 1,5 V und einen Innenwiderstand von 0,1 Ω . Sie gibt einen Strom von 1,2 A ab.

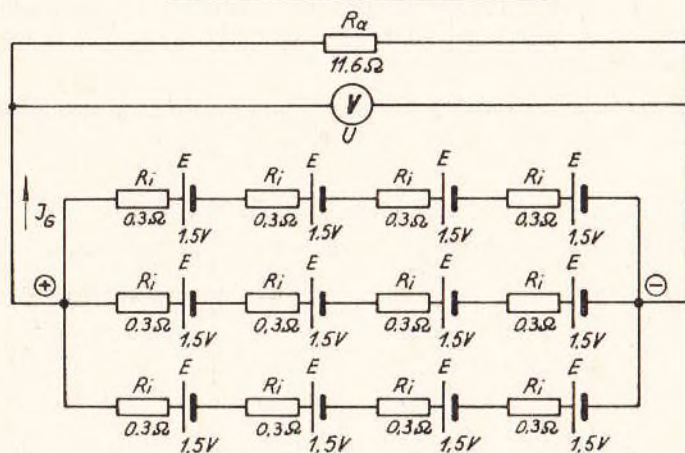
Aus den letzten beiden Beispielen erkennen wir, daß

durch die Hintereinanderschaltung von Elementen die EMK erhöht wird, während die Parallelschaltung dann angewendet werden muß, wenn die Batterie stark belastet werden soll, d. h., wenn ein starker Strom im Stromkreis fließt.

7.5. Die Gruppenschaltung

Wollen wir gleichzeitig eine hohe EMK und einen großen Stromfluß erreichen, so wenden wir die **Gruppenschaltung** an (vgl. hierzu Abb. 81).

Gruppenschaltung von Elementen



(Abb. 81)

Die EMK einer solchen Batterie ist gleich der Gesamt-EMK der in einer Reihe hintereinandergeschalteten Elemente:

$$E_{\text{ges}} = n \cdot E$$

Der innere Widerstand der in einer Reihe hintereinandergeschalteten Elemente beträgt

$$R_{i_{\text{Reihe}}} = n \cdot R_i$$

Nun liegen mehrere Reihen mit jeweils n hintereinandergeschalteten Elementen parallel. Bezeichnen wir die Anzahl der parallelgeschalteten Reihen mit p , so errechnet sich der gesamte Widerstand einer Batterie in Gruppenschaltung wie folgt:

$$R_{i_{\text{ges}}} = \frac{R_{i_{\text{Reihe}}}}{p} = \frac{n \cdot R_i}{p}$$

Aus den Formeln erkennen wir, daß

bei einer Gruppenschaltung von Spannungsquellen die Gesamt-EMK gleich ist der Summe der Einzel-EMK der hintereinandergeschalteten Spannungserzeuger einer Reihe, während der Gesamtwiderstand dieser Batterie gleich ist der Summe der Einzelwiderstände einer Reihe dividiert durch die Anzahl der parallelgeschalteten Reihen.

Für die **Stromstärke**, die von einer in Gruppenschaltung geschalteten Batterie abgegeben wird, ergibt sich aus

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

durch Einsetzen der Formeln für E_{ges} und $R_{i_{\text{ges}}}$ die nachstehende Formel:

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

Beispiel:

In einer Schaltung entsprechend der Abb. 81 hat jedes Element eine EMK von 1,5 V und einen inneren Widerstand von 0,3 Ω . Wie groß sind EMK und innerer Widerstand der Batterie sowie die Stromstärke bei einem Außenwiderstand von 11,6 Ω ?

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

Gesucht: E_{ges} , $R_{i_{\text{ges}}}$, I

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

$$R_{i_{\text{ges}}} = \frac{n \cdot R_i}{p} = \frac{4 \cdot 0,3}{3} = \underline{\underline{0,4 \Omega}}$$

$$I = \frac{n \cdot E}{R_a + \frac{n \cdot R_i}{p}} = \frac{E_{\text{ges}}}{R_a + R_{i_{\text{ges}}}} = \frac{6}{11,6 + 0,4} = \underline{\underline{0,5 \text{ A}}}$$

Die Batterie hat eine EMK von 6 V und einen inneren Widerstand von 0,4 Ω . Die Stromstärke beträgt 0,5 A.

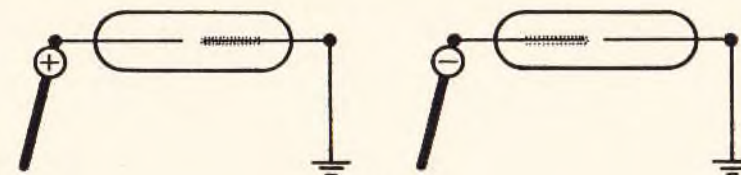
7.6. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 7.1. bis 7.5.

1. Wann spricht man bei Spannungserzeugern von einer Batterie? 2. Wodurch entsteht der innere Widerstand eines elektrochemischen Spannungserzeugers? 3. Warum unterscheidet sich die Klemmenspannung von der EMK einer Spannungsquelle? 4. Wie groß ist die Klemmenspannung bei Leerlauf und im Kurzschlußfall? 5. Ein Trockenelement hat eine EMK von 1,5 V und einen inneren Widerstand von 0,1 Ω . Wie groß ist der Kurzschlußstrom? 6. Wie verhalten sich EMK und Klemmenspannung zueinander, wenn Innenwiderstand und Außenwiderstand gleich groß sind? 7. Eine Anodenbatterie soll bei der EMK eines Elementes von 1,5 V eine Gesamt-EMK von 90 V hergeben. Der Außenwiderstand soll 2000 Ω betragen und der innere Widerstand eines jeden Elements 0,2 Ω . Wieviel Elemente sind in Reihe zu schalten, und welcher Strom fließt durch den Außenwiderstand? 8. Drei galvanische Elemente sind hintereinandergeschaltet. Der innere Widerstand eines jeden Elements soll 0,5 Ω betragen. Der Außenwiderstand hat einen Wert von 5 Ω . Berechnen Sie E_{ges} , I , U_i und U ! 9. Vier galvanische Elemente mit einer EMK von je 1,5 V und einem inneren Widerstand von je 0,4 Ω sind parallelgeschaltet. Im Außenstromkreis liegt ein Widerstand von 10 Ω . Wie groß sind E_{ges} , I , U_i und U ? 10. Welche Stromstärke kann zwei parallelgeschalteten Elementen entnommen werden, wenn die EMK jedes Elements 1,5 V und der innere Widerstand je 0,2 Ω beträgt? Der Außenwiderstand beträgt 1,15 Ω . 11. Welche Stromstärke kann einer Gruppenschaltung, bestehend aus vier parallelgeschalteten Gruppen mit je fünf in Reihe geschalteten Elementen, entnommen werden, wenn die Elemente eine EMK von je 1,5 V und einen inneren Widerstand von je 0,2 Ω haben? Der Außenwiderstand beträgt 2,7 Ω . 12. Eine VStW-Batterie besteht aus 30 hintereinandergeschalteten Bleisammlerzellen mit je 2 V EMK und je 0,02 Ω innerem Widerstand. Wie groß ist die Gesamt-EMK, der gesamte innere Widerstand und die Klemmenspannung bei einer Belastung von 25 A? 13. Sechs Bleisammlerzellen mit einer EMK von je 2 V und einem inneren Widerstand von je 0,03 Ω sollen zu einer Batterie vereinigt werden. In welcher Zusammenschaltung liefert die Batterie den größten Strom, wenn der äußere Widerstand in jedem Fall 12 Ω beträgt? 14. Vier Sammler mit einer EMK von je 2 V und einem inneren Widerstand von je 0,03 Ω werden einmal alle hintereinander- und einmal alle parallelgeschaltet. Wie groß ist in beiden Fällen die Gesamt-EMK, die Stromstärke und die Klemmenspannung bei einem Außenwiderstand von 10 Ω ? 15. Zwei VStW-Batterien mit je 30 hintereinandergeschalteten Bleisammlerzellen werden zur Entnahme eines stärkeren Stromes parallelgeschaltet. Jede Zelle hat eine EMK von 2 V und einen inneren Widerstand von 0,002 Ω . Wie groß ist die Klemmenspannung der Gruppenschaltung bei einer Stromentnahme von 50 A?

8. Das elektrische Feld

8.1. Die elektrische Ladung

Im Abschnitt 1.1. dieses Buches haben wir den Begriff der elektrischen Ladung kennengelernt. Wir wissen, daß man bei Elektronenüberschuß von einer **negativen Ladung** und bei Elektronenmangel von einer **positiven Ladung** spricht.



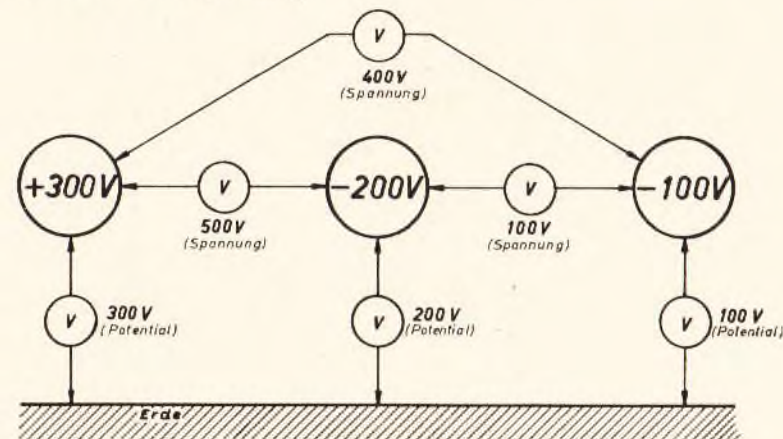
(Abb. 82)

Die Polarität einer Ladung kann man bei hohen Spannungen mit einem geerdeten Neonröhrchen feststellen, mit dem zu diesem Zweck die zu prüfende Ladung berührt wird (vgl. hierzu Abb. 82). Dabei leuchtet dann die Umgebung der Elektrode auf, aus der Elektronen austreten.

Glimmt also beim Berühren einer elektrischen Ladung die geerdete Elektrode des Neonröhrchens auf (vgl. Abb. 82 links), so fließen Elektronen von der Erde zur Ladung; die Ladung war positiv. Glimmt dagegen die mit der Ladung verbundene Elektrode des Neonröhrchens auf (rechte Abb.), so fließen Elektronen von der Ladung zur Erde; die Ladung war negativ.

8.2. Das elektrische Potential

Mit Potential bezeichnet man die Spannung zwischen einer elektrischen Ladung und einem Bezugspunkt, der das Potential Null hat. Häufig wird die Erdoberfläche, oft aber auch das Apparatgehäuse oder eine willkürlich gewählte Fläche als Bezugspunkt für das Potential benutzt. Die Differenz der Potentiale zweier Punkte mit gemeinsamer Bezugsfläche nennt man Potentialdifferenz oder Potentialgefälle. Dieses **Potentialgefälle** (der Druckunterschied zwischen den betrachteten Punkten) ist die **elektrische Spannung**.



(Abb. 83)

In der Abb. 83 sind z. B. drei Körper dargestellt, die ein Potential von $+300\text{ V}$, -200 V und -100 V gegen Erde haben. Die eingezeichneten Voltmeter zeigen diese Potentiale beziehungsweise die Spannungen zwischen den Körpern an.

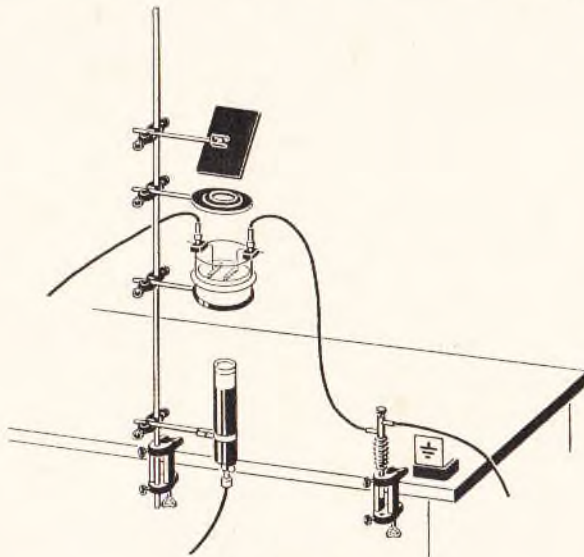
Eine Spannung kann nur zwischen zwei Körpern mit verschiedenem Potential vorhanden sein.

8.3. Das elektrische Feld

In Nichtleitern (Isolatoren) verursacht eine elektrische Spannung lediglich eine geringe gerichtete Verschiebung der an den Atomkern gebundenen Elektronen (vgl. hierzu Abschnitt 9.1.). Bei konstanter Spannung findet jedoch **keine ständige gerichtete Elektronenbewegung** im Isolator statt. In diesem Zusammenhang spricht man daher von der **ruhenden Elektrizität** oder **statischen Elektrizität** (Elektrostatik). Der Raum, in dem elektrische Kräfte diese Verschiebung verursacht haben, wird ein **elektrostatisches Feld** oder kurz **elektrisches Feld** genannt.

Elektrostatische Felder treten nur in Nichtleitern auf.

Bei sehr großen Spannungen können die bindenden Kräfte zwischen Atomkern und Elektronen jedoch überwunden werden. Es kommt dann zu einem „Durchschlag“, bei dem die elektrischen Ladungen sich in

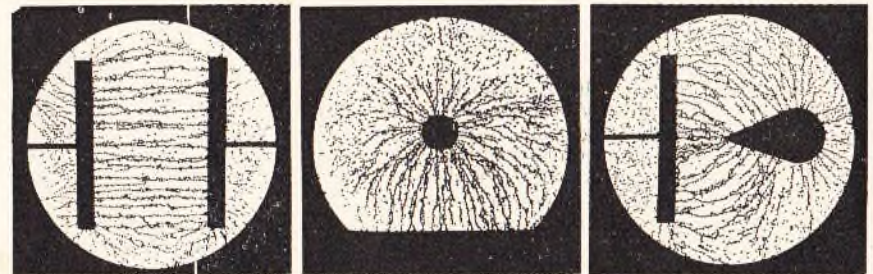


(Abb. 84)

Form eines Funkens ausgleichen. Wenn dieser Funke entlang der Oberfläche eines Isolators verläuft, spricht man auch von einem „Überschlag“.

Elektrische Felder sind nicht sichtbar. Mit Hilfe einer Anordnung nach Abb. 84 kann man sie aber nachweisen, weil leichte Körper sich in Richtung dieses Kraftfeldes einstellen. Die dabei sichtbar werdenden Linien nennt man **elektrische Feldlinien**. Sie geben die Richtung im Raum an, in der elektrische Kräfte wirksam sind.

Der größte Teil der Apparatur dient zur Projektion des Feldlinienbildes auf einen Wandschirm. 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 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 gemacht, die Bilder nach Abb. 85. Diese sichtbar gewordenen Linien bezeichnet man als elektrische Feldlinien.



(Abb. 85a-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.

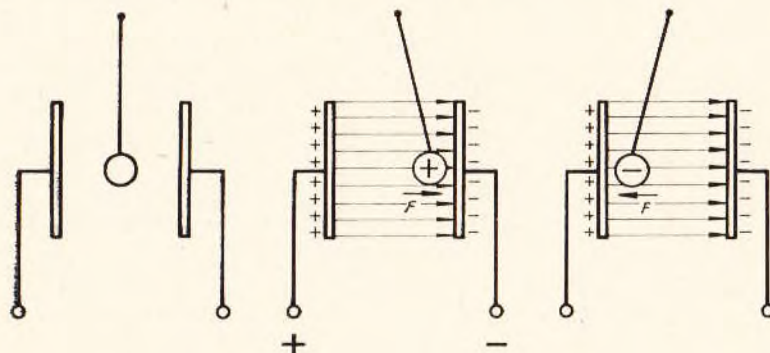
Das elektrische Feld zwischen zwei parallelen Platten (vgl. Abb. 85a) bezeichnet man als **homogen** (gleichförmig) und die Felder nach Abb. 85b bis c als **inhomogen** (ungleichförmig). In einem homogenen elektrischen Feld verlaufen die Feldlinien parallel.

Bei der Abb. 85c 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 einer geladenen Elektrode eine Metallkugel nähert, so wird sich das elektrische Feld nicht verändern. Nimmt man statt dessen aber

eine Metallspitze, so bricht das elektrische Feld zusammen. Die Spitze saugt die elektrische Ladung ab. Auf dieser **Spitzenwirkung** beruht die Wirkungsweise des Blitzableiters.

In einem weiteren Versuch wollen wir die Kraftwirkung in einem elektrischen Feld beobachten (vgl. hierzu Abb. 86).



(Abb. 86)

Zwischen zwei Platten befindet sich eine leichte metallisierte Kugel, die isoliert aufgehängt worden ist (linke Abb.). Werden die Platten kurzzeitig ungleichnamig aufgeladen und erhält die Kugel eine positive elektrische Ladung, so bewegt sie sich zur negativen Feldgrenze hin (mittlere Abb.). Hier erfolgt ein Ladungsaustausch. Die Kugel erhält eine negative Ladung und bewegt sich zur positiven Feldgrenze hin (rechte Abb.). Hier erfolgt abermals ein Ladungsaustausch, worauf die Kugel sich wieder zur anderen Seite hinbewegt. Dieser Vorgang wiederholt sich bis zur Erschöpfung des Feldes.

In einem elektrischen Feld stellen wir also eine Kraftwirkung fest.

In einem von elektrischen Feldlinien angefüllten Raum, einem elektrischen Feld, wird auf einen elektrisch geladenen Körper eine Kraft ausgeübt.

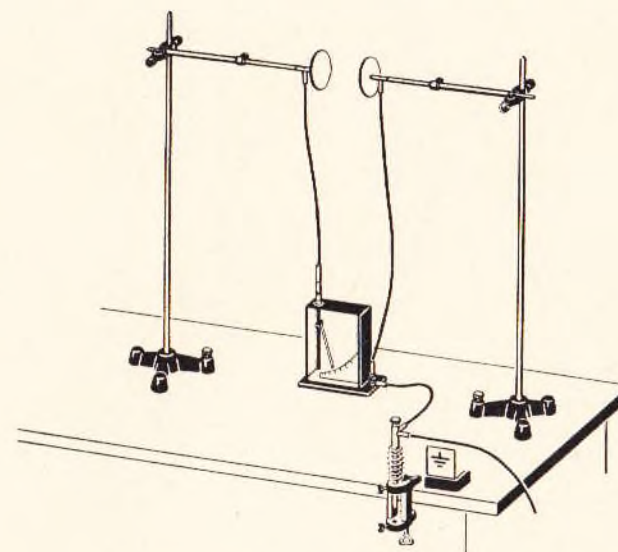
8.4. Die elektrische Feldstärke

Die an irgendeiner Stelle eines elektrischen Feldes festgestellte „Spannung je cm Feldlinienlänge“ nennt man elektrische Feldstärke E . Wenn U die Spannung in Volt und l die Länge der Feldlinien in cm zwischen den betrachteten Punkten ist, so ergibt sich die Feldstärke nach der Formel:

$$E = \frac{U}{l} \left(\frac{\text{V}}{\text{cm}} \right)$$

Die elektrische Feldstärke gibt die Größe der Kraft an, die in einem elektrischen Feld ausgeübt wird. Sie ist in einem homogenen elektrischen Feld überall gleich groß.

Der in der Abb. 87 dargestellte Versuch soll uns das Verhalten der Feldstärke bei einer Änderung des Abstandes zwischen den Feldgrenzen zeigen.



(Abb. 87)

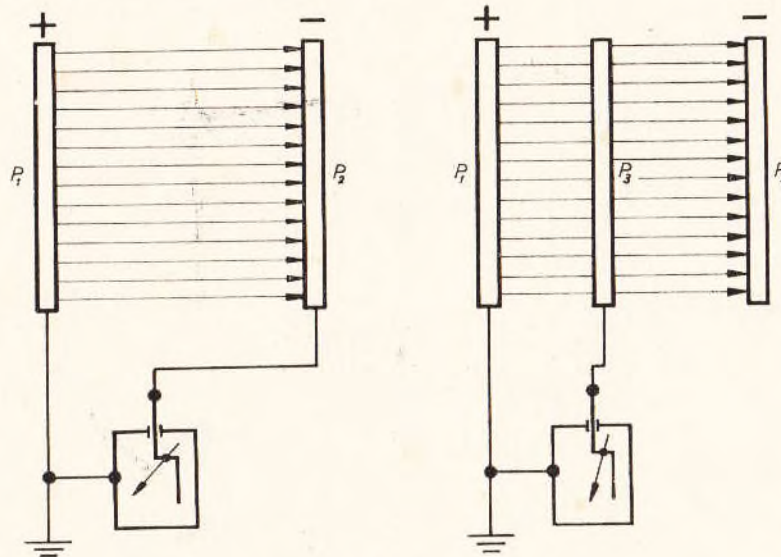
An die einander gegenüberstehenden Platten (Leiter) legen wir eine hohe Gleichspannung (Bandgenerator). Das an die Platten geschaltete Elektrometer zeigt einen Ausschlag. Nun unterbrechen wir die Zuführung zur Spannungsquelle und betrachten das Elektrometer. Wir sehen, daß auch jetzt noch zwischen den 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.

Wir haben festgestellt, daß bei einer Änderung des Abstandes zwischen zwei elektrisch geladenen Platten (Elektroden) die Feldstärke sich nicht verändert. Die Spannung zwischen den Platten und der Abstand der Platten ändern sich in gleicher Weise.

Ein weiterer Versuch soll uns den Verlauf der Spannung innerhalb des elektrischen Feldes zeigen (vgl. hierzu Abb. 88).

Zwischen den beiden Platten P_1 und P_2 besteht ein von einer angelegten Spannung abhängiges elektrisches Feld. Ein an P_1 und P_2 angeschlossenes Elektrometer zeigt

einen bestimmten Ausschlag (linke Abb.). Jetzt bringen wir in das Feld eine weitere Platte P_3 und schalten das Elektrometer an P_1 und P_3 (rechte Abb.). 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 von P_3 gezeigt hat.



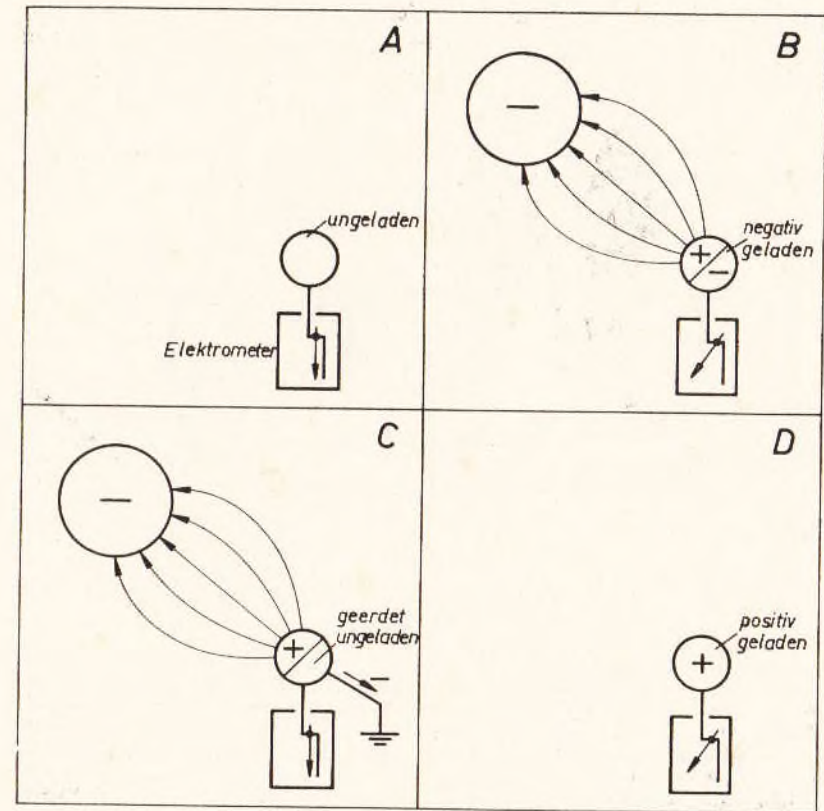
(Abb. 88)

Wir sehen, daß zwischen allen Punkten des elektrischen Feldes und der geerdeten Platte P_1 eine Spannung vorhanden ist, die ihren höchsten Wert zwischen der geerdeten Platte und P_2 hat. Man spricht auch hier von einem Spannungsabfall (vgl. hierzu Abschnitt 2.6.). Damit soll zum Ausdruck gebracht werden, daß die Spannung im elektrischen Feld von ihrem Höchstwert auf den Wert Null abfällt. In einem homogenen Feld verläuft der Spannungsabfall geradlinig.

8.5. Die elektrische Influenz

Elektrizität kann nicht nur durch Berühren von einem Leiter auf einen anderen Leiter übertragen werden. Ein elektrisch ungeladener (neutraler) Körper kann auch durch Annäherung so beeinflusst werden, daß er selbst elektrisch geladen wird. Diese Erscheinung nennt man elektrische Influenz.

Nähert man z. B. einen negativ geladenen Körper einem isoliert aufgestellten ungeladenen Leiter, so werden auf dem Leiter die freien Elektronen von dem negativ geladenen Körper abgestoßen. Auf der dem negativ geladenen Körper zugewendeten Seite des Leiters entsteht dadurch ein Elektronenmangel (positive Ladung). Auf der abgekehrten Seite ist nunmehr Elektronenanhäufung (negative Ladung). Dieser Zustand besteht so lange, wie die Annäherung dauert.



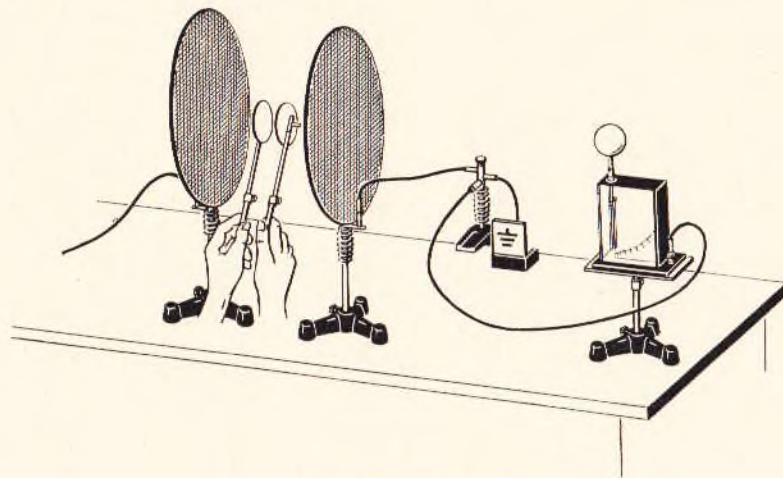
(Abb. 89)

In der Abb. 89 erhält ein zunächst ungeladener Leiter (kleine Metallkugel) durch Annäherung einer elektrischen Ladung (große Metallkugel) einen positiven und einen negativen Pol. Man sagt, der Leiter wird **polarisiert**. Ein Elektrometer zeigt das Potential der abgestoßenen (hier negativen) Ladung an (Abb. 89 B). Wird nun der polarisierte Leiter kurz geerdet, so wird die nicht gebundene (nicht angezogene) negative Ladung abgestoßen (zur Erde abgeleitet); der Ausschlag des Elektrometers geht zurück (Abb. 89 C). Entfernt man nun die beeinflussende (influenzierende) Ladung, so kann sich die bisher gebundene positive Ladung wieder ausbreiten. Der

Leiter ist positiv geladen. Das Elektrometer zeigt das Potential der positiven Ladung an (Abb. 89 D).

Wir sehen, daß bei einer durch Influenz bewirkten Ladungstrennung durch kurzzeitiges Erden (Abfluß) und anschließender Freigabe der gebundenen Ladung auf dem beeinflussten Leiter eine Ladung zurückbleibt. Leitet man diese Ladung ebenfalls ab, dann ist der Körper wieder elektrisch neutral.

Auch der in der Abb. 90 dargestellte Versuch beweist, daß in einem Leiter, der sich in einem elektrischen Feld befindet, die freien Elektronen verschoben werden.



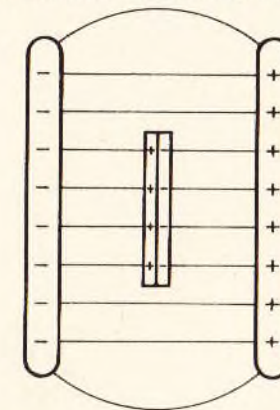
(Abb. 90)

Zwei sich innig berührende Metallplatten befinden sich in einem elektrischen Feld. 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.

Bevor wir die Metallplatten in das elektrische Feld gebracht haben, waren ihre Ladungen noch gleichmäßig verteilt und so nach außen unwirksam; die Platten waren elektrisch neutral. 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 (vgl. hierzu Abb. 91). Trennen wir die Platten noch im elektrischen Feld voneinander, behalten sie ihre Ladungen bei, wie wir es mit dem Elektrometer haben beweisen können.

Influenz ist die Beeinflussung eines isolierten neutralen Leiters durch ein elektrisches Feld. Dabei werden die vorhandenen elektrischen Ladungen getrennt und nach außen wirksam.



(Abb. 91)

Die freien Ladungen eines Leiters befinden sich an seiner Oberfläche (Außenwand). Dies ist eine Folge der zwischen den einzelnen gleichnamigen Ladungen wirkenden abstoßenden Kräfte.

8.6. Die elektrische Schirmwirkung

Durch Influenz können in oberirdisch verlegten Leitungen Ladungen erzeugt werden, die sich störend und gefährdend bemerkbar machen.

Unterirdisch verlegte Kabel können durch Influenz nicht von äußeren Feldern beeinflusst werden, weil die elektrischen Felder an der Erdoberfläche enden.

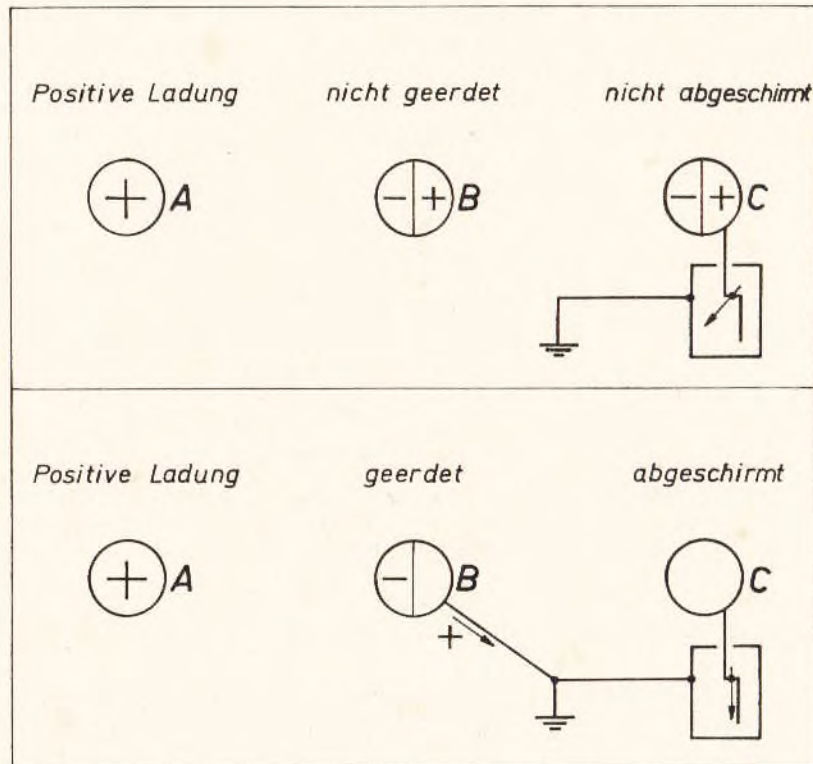
Mit dem in der Abb. 92 schematisch dargestellten Versuch soll die Schirmwirkung von Metallen im elektrischen Feld untersucht werden.

Der mit einem Elektrometer verbundene Leiter C wird in die Nähe des positiv geladenen Leiters A gebracht. Das Elektrometer schlägt aus. Bringen wir nun den nicht geerdeten Leiter B zwischen die Leiter A und C, so ändert sich der Ausschlag des Elektrometers nicht. Erden wir jedoch den Leiter B, so geht der Ausschlag des Elektrometers zurück.

Wir haben gesehen, daß elektrische Leiter sich bis zu einem bestimmten Grade durch einen geerdeten Leiter abschirmen lassen. Eine noch bessere Abschirmung erreicht man durch eine geerdete metallische Umhüllung.

Metalle besitzen in einem elektrischen Feld nur dann eine abschirmende Wirkung, wenn sie geerdet sind.

Wie wir im vorhergehenden Abschnitt gesehen haben, wird durch die Erdverbindung die in dem Leiter nicht gebundene elektrische Ladung



(Abb. 92)

abgestoßen. Der geerdete Leiter erscheint nach außen unelektrisch. Man sagt, er hat das Potential Null gegen Erde. Auch in der Nähe des geerdeten Leiters ist das Potential (also die Spannung gegen Erde) annähernd gleich Null. Das Potential steigt ja mit größer werdendem Abstand von der Erde (vgl. hierzu Abb. 88 „Spannungsabfall im elektrischen Feld“). Im „abgeschirmten“ Leiter, der sich in der Nähe des geerdeten Leiters befindet, sind somit nur geringe durch Influenz erzeugte Spannungen gegen Erde möglich.

8.7. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 8.1. bis 8.6.

1. Worin unterscheiden sich positive und negative elektrische Ladungen? 2. Wann ist ein Körper elektrisch neutral? 3. Wie kann man die Polarität einer elektrischen Ladung feststellen? 4. Erklären Sie den Unterschied zwischen einem elektrischen Potential und einer elektrischen Spannung! 5. Erklären Sie den Begriff „Statische Elektrizität“! 6. Was ist ein elektrisches Feld? 7. Welche Bedeutung haben elektrische Feldlinien? 8. Was versteht man in der Elektrostatik unter „Durchschlag“ und „Überschlag“? 9. Worin unterscheiden sich homogene und inhomogene elektrische Felder? 10. Was versteht man in der Elektrostatik unter „Spitzenwirkung“? 11. Erklären Sie an einem Beispiel die Kraftwirkung im elektrischen Feld! 12. Die Spannung zwischen zwei elektrisch geladenen parallelen Platten beträgt 200 V. Der Plattenabstand beträgt 1 mm. Wie groß ist die elektrische Feldstärke zwischen den Platten? 13. Was versteht man unter „Spannungsabfall im elektrischen Feld“? 14. Was versteht man in der statischen Elektrizität unter Influenz? 15. Wie können Influenzladungen getrennt werden? 16. Wo befinden sich die freien Ladungen eines Körpers? 17. Warum werden unterirdisch verlegte Kabel nicht von äußeren elektrischen Feldern beeinflusst? 18. Warum werden oberirdisch verlegte Leitungen abgeschirmt? 19. Wie kann man die in einem Kunststoff-Isolierrohr verlegten Installationsdrähte (Y-Drähte) abschirmen? 20. Wann besitzen Metalle in einem elektrischen Feld eine abschirmende Wirkung?

9. Der Kondensator

9.1. Aufbau und Wirkungsweise

Ein Kondensator ist eine Anordnung zum Speichern von elektrischer Energie. Er besteht aus zwei elektrisch leitenden Flächen, den **Belägen**, die durch eine isolierende Zwischenschicht getrennt sind. Diese Zwischenschicht, das **Dielektrikum**, kann aus Luft, aber auch aus Papier, Kunststofffolien, Porzellan, Glimmer oder anderen Stoffen bestehen. Auch zwei gegeneinander isolierte Leitungen (Kabeladern, Freileitungen) bilden einen Kondensator.

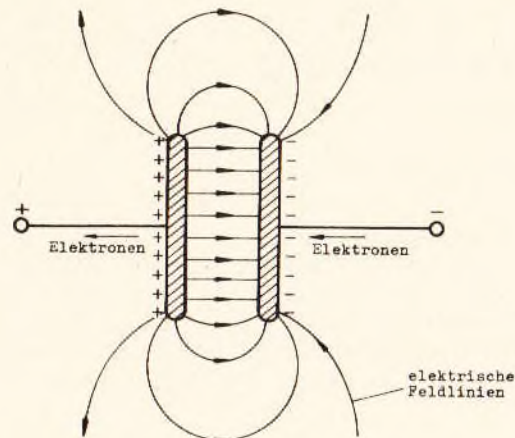
Werden die leitenden Flächen eines Kondensators an eine elektrische Spannung gelegt, so nehmen sie eine elektrische Ladung auf und speichern sie. Durch diese „Aufladung“ erhalten die leitenden Flächen also eine bestimmte Elektrizitätsmenge $+Q$ beziehungsweise $-Q$. Die dadurch am Kondensator entstehende Potentialdifferenz (Spannung) ist der anliegenden Spannung entgegengerichtet. Der Zufluß an Elektrizitätsmenge dauert nun so lange, bis die Gegenspannung des Kondensators der anliegenden Spannung das Gleichgewicht hält.

Mit dem Entstehen der Gegenspannung bildet sich im Dielektrikum ein elektrisches Feld (vgl. hierzu Abb. 93). Die im elektrischen Feld wirk-

samen Kräfte verursachen dabei eine sogenannte dielektrische Verschiebung. Man versteht darunter eine elastische Beanspruchung des Isoliermaterials, wobei die einzelnen Elektrizitätsteilchen (positiver Atomkern, negative Elektronen) innerhalb des Atomverbandes sich gegeneinander verschieben. Ein auf diese Weise polarisiertes Atom bezeichnet man auch als „Dipol“ (Zweipol). Eine vereinfachte Darstellung dieser Polarisation zeigt die Abb. 94.

Durch die Verschiebung der Elektrizitätsteilchen treten innerhalb des Atomverbandes elastische Gegenkräfte auf, die versuchen, die Elektrizitätsteilchen wieder in ihre ursprüngliche Lage zurückzuziehen. Sind diese Gegenkräfte so groß geworden, daß sie der angelegten Spannung gerade das Gleichgewicht halten, dann hört die Verschiebung auf, der Kondensator wird nicht weiter aufgeladen. Soll der Kondensator noch weitere elektrische Energie aufnehmen, so muß die angelegte Spannung vergrößert werden.

Elektrisches Feld zwischen zwei parallelen Platten

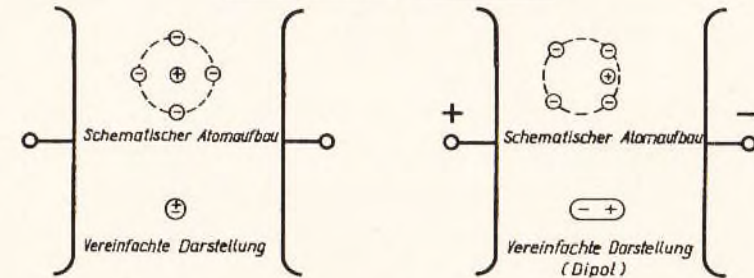


(Abb. 93)

Je höher die Ladespannung, desto größer ist die Elektrizitätsmenge, die ein Kondensator aufnimmt.

Während der Verschiebung findet eine gerichtete Bewegung der Elektronen statt, d. h., es fließt ein elektrischer Strom, der **Ladestrom**. Wird der Kondensator wieder entladen, d. h., die gespeicherten elektrischen Ladungen erhalten die Möglichkeit, sich auszugleichen, dann fließt so

Polarisation im Dielektrikum



(Abb. 94)

lange ein entgegengesetzt gerichteter Entladestrom, bis die Verschiebung im Dielektrikum rückgängig gemacht wurde.

Man sieht, daß die dielektrische Verschiebung dem mechanischen Spannen einer Gummischnur entspricht. Dieser Vergleich mit der Gummischnur geht noch weiter. Wird die Gummischnur überspannt, dann zerreißt sie. Diesem Zerreißen entspricht im elektrischen Feld der **Durchschlag**. Wird das Dielektrikum durch eine zu große elektrische Feldstärke beansprucht, dann können die bindenden Kräfte zwischen Atomkern und Elektronen überwunden werden. Die Elektrizitätsteilchen werden aus dem Atomverband herausgerissen und die elektrischen Ladungen gleichen sich in Form eines Funkens aus. Als Kennzeichen für die elektrische Festigkeit des Isoliermaterials wird die Feldstärke, bei der der Durchschlag erfolgt, **Durchschlagsfestigkeit** genannt. Die Durchschlagsfestigkeit ist keine konstante Größe. Sie hängt u. a. von der Temperatur des Materials, von der Dicke des Materials, von der Form der Elektroden und von der Dauer der Einwirkung ab.

9.2. Kapazität und Dielektrikum

Die elektrische Ladung, die ein Kondensator aufnehmen kann, hängt außer von der angelegten Spannung noch von dem Fassungsvermögen (der Aufnahmefähigkeit) ab. Dieses Fassungsvermögen nennt man **Kapazität**. Die Kapazität hat das Formelzeichen C .

Je größer die Kapazität, desto größer ist die Elektrizitätsmenge, die ein Kondensator aufnimmt.

Der Zusammenhang zwischen Elektrizitätsmenge, Kondensatorspannung und Kapazität lautet

$$Q = C \cdot U \quad (\text{As})$$

Daraus ergibt sich

$$C = \frac{Q}{U} \left[\frac{\text{As}}{\text{V}} \right] \text{ oder } \left[\text{F} \right]$$

Die Einheit der Kapazität ist **1 Farad (F)**¹⁾

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

Die Einheit 1 Farad ist 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 ($1 \text{ pF} = 0,9 \text{ cm}$).

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

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

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

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

Die Kapazität eines Kondensators hängt von den geometrischen Abmessungen (Größe und Abstand der leitenden Flächen) und vom Dielektrikum (Material zwischen den leitenden Flächen) ab (vgl. Induktivität einer Spule).

Je größer die sich gegenüberliegenden Oberflächen der Kondensatorbeläge sind, desto größer ist die Fläche des Dielektrikums und damit das Speichervermögen, die **Kapazität**. Von der Größe der Fläche des Dielektrikums hängt es ja ab, wieviel nebeneinanderliegende Atome sich an der Elektronenbewegung, am Verschiebungsstrom, beteiligen.

Je näher die Kondensatorbeläge einander gegenüberliegen, desto geringer ist die durch die Verschiebung entstehende Gegenkraft, desto größer ist also die **Kapazität**. Die Größe der durch Aufladung des Kondensators entstehenden Gegenkraft ergibt sich ja durch Addition der in den hinter-einanderliegenden Atomen entstehenden Einzelkräfte. Der Verringerung des Abstandes ist allerdings eine Grenze durch die Durchschlagsfestigkeit der isolierenden Zwischenschicht gesetzt.

Die für die isolierende Schicht zwischen den leitenden Flächen des Kondensators verwendeten Stoffe sind in ihrem Aufbau verschieden und

¹⁾ Benannt nach dem englischen Physiker Faraday (1791 – 1867).

haben demzufolge auch verschiedene Einwirkung auf die Kapazität eines Kondensators. Der Einfluß des Dielektrikums auf die Kapazität wird durch eine Zahl angegeben, die man **Dielektrizitätskonstante** nennt. Ihr Formelzeichen ist der griechische Buchstabe ϵ (Epsilon).

Die absolute Dielektrizitätskonstante ϵ ist das Produkt aus der Dielektrizitätskonstanten des Vakuums $\epsilon_0 = 8,859 \cdot 10^{-14} \frac{\text{F}}{\text{cm}}$ und der für den Isolierstoff geltenden relativen Dielektrizitätskonstanten ϵ_r ($\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$). Die relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r ist also eine auf das Vakuum bezogene Verhältniszahl, denn sie gibt an, um wievielfach so groß die Kapazität eines Kondensators ist, wenn statt Vakuum ein Isolierstoff als Dielektrikum verwendet wird:

$$\epsilon_r = \frac{\text{Kapazität des Kondensators mit Dielektrikum}}{\text{Kapazität des Kondensators mit Vakuum als Dielektrikum}}$$

Für Luft ist die relative Dielektrizitätskonstante $\epsilon_r \sim 1$. Für die anderen als Dielektrikum verwendeten Isolierstoffe ist sie größer als 1.

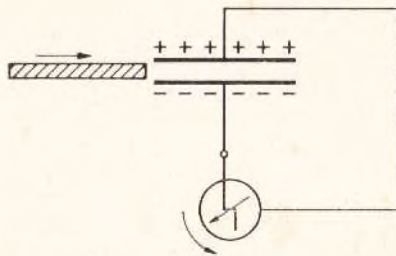
Ein Versuch (vgl. hierzu Abb. 95) zeigt das Verhalten der Kapazität bei Änderung des Dielektrikums. Zwei Platten eines geladenen Kondensators werden mit einem Elektrometer verbunden. Schiebt man nun eine Glasscheibe zwischen die Platten, so geht der Ausschlag des Elektrometers zurück. Die beobachtete Verringerung der Spannung bedeutet eine Vergrößerung der Kapazität, da das Produkt aus Spannung und Kapazität, die Elektrizitätsmenge, ja konstant ist ($Q = C \cdot U$).

Für einige Nichtleiter sind nachstehend die relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r und die Durchschlagsfestigkeit E angegeben.

Werkstoff	ϵ_r	$E \left(\frac{\text{kV}}{\text{cm}} \right)$
Luft	1	20
Hartpapier	4	200
Hartgummi	3	1000
Porzellan	6	200
Glas	6	600
Glimmer	8	600
Condensa	80	200

Dielektrizitätskonstante und Durchschlagsfestigkeit sind u. a. temperatur- und frequenzabhängig. In der Tabelle sind für die Durchschlagsfestigkeit die Effektivwerte einer sinusförmigen Wechselspannung von 50 Hz für eine Schichtdicke von 1 mm und 20 °C angegeben.

Die Dielektrizitätskonstante beträgt für die Isolation der papierisolierten Fernmeldekabel etwa 1,6 und für die Isolation der Starkstromkabel etwa 4,3.



(Abb. 95)

Zur rechnerischen Ermittlung der Kapazität eines Plattenkondensators dient folgende Formel:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d} \quad [\text{F}]$$

In dieser Formel bedeuten

$\varepsilon_0 = 8,859 \cdot 10^{-14} =$ Dielektrizitätskonstante für Vakuum in $\frac{\text{F}}{\text{cm}}$

$\varepsilon_r =$ relative Dielektrizitätskonstante des verwendeten Dielektrikums

$A =$ wirksame Oberfläche einer Kondensatorplatte in cm^2

$d =$ Abstand der Kondensatorplatten in cm

Beispiel:

Ein Kondensator aus zwei Platten von je 10 cm^2 Fläche liegt an 220 V Gleichspannung. Das Dielektrikum besteht aus einer $0,1 \text{ mm}$ starken Glimmerschicht ($\varepsilon_r = 7$).

a) Wie groß ist die Kapazität?

b) Welche Elektrizitätsmenge hat er aufgenommen?

Gegeben: $A = 10 \text{ cm}^2$
 $d = 0,1 \text{ mm} = 0,01 \text{ cm}$
 $\varepsilon_r = 7$
 $U = 220 \text{ V}$

Gesucht: a) C b) Q

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

b) $Q = C \cdot U$
 $= 620 \cdot 10^{-12} \cdot 220$
 $Q = 0,14 \cdot 10^{-6} \text{ As}$

Ergebnis: a) Der Kondensator hat eine Kapazität von 620 pF .

b) Der Kondensator hat eine Elektrizitätsmenge von $0,14 \cdot 10^{-6} \text{ As}$ aufgenommen.

9.3. Kondensatorverluste

Kondensatoren sind nicht vollkommen verlustfrei, obwohl sie in der Regel weit geringere Verluste verursachen als Spulen.

Verlustquellen des Kondensators sind die **Leitfähigkeit des Dielektrikums** und der **Widerstand in den Metallfolien und Zuleitungen**. Daneben entstehen bei Kondensatoren, die an Wechselspannungen liegen, noch **Verluste durch die ständige dielektrische Verschiebung**.

Durch diese Verluste entsteht eine Erwärmung des Dielektrikums, wodurch die elektrischen Eigenschaften des Kondensators ungünstig beeinflusst werden.

Bei verlustbehafteten Kondensatoren werden die Verluste durch einen Parallelwiderstand des Kondensators dargestellt (vgl. Reihenwiderstand bei einer Spule). In diesem Widerstand würde dieselbe Wärmeleistung (Verlustleistung) entstehen wie in dem Kondensator. Die vom Verlustwiderstand verursachte Abweichung der Phasenverschiebung von 90° wird durch den Verlustwinkel δ angegeben. Den Tangens dieses Winkels ($\tan \delta$) bezeichnet man als Verlustfaktor.

9.4. Technische Ausführungsformen

In der Fernmeldetechnik werden Kondensatoren in größten Stückzahlen verwendet. Die verschiedensten Anforderungen, die an die Kondensatoren gestellt werden, haben zur Entwicklung einer sehr großen Anzahl verschiedenartiger Bauformen mit unterschiedlichen Eigenschaften geführt. Die bekanntesten Ausführungsformen werden nachstehend – unterteilt nach Kondensatoren mit fester und solchen mit veränderbarer Kapazität – kurz beschrieben.

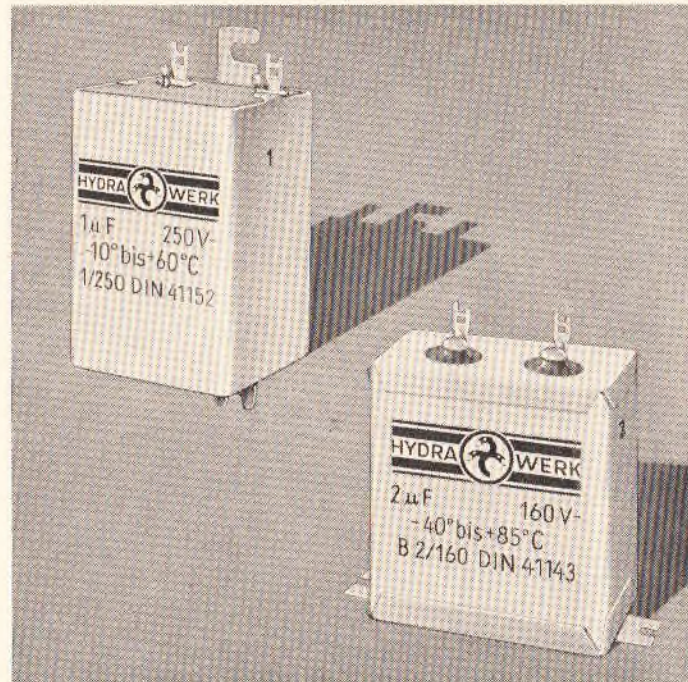
9.4.1. Festkondensatoren

Für große Kapazitäten werden Papier-, Kunstfolien- und Elektrolytkondensatoren und für kleine Kapazitäten Glimmer- und Keramik-kondensatoren hergestellt.

9.4.1.1. Papier- und Kunstfolienkondensatoren

Papier- und Kunstfolienkondensatoren werden als **Wickelkondensatoren** für Kapazitäten bis etwa $10 \mu\text{F}$ hergestellt. Bei diesen Kondensatoren sind zwei Metallfolien durch Paraffinpapier oder durch Kunststoffolien voneinander getrennt. Durch Zusammenrollen entsteht der Kondensatorwickel, der in einem Becher (**Becherkondensator**) oder in einem Röhrenchen (**Röhren-, Roll- oder Rundkondensator**) untergebracht und

Becherkondensatoren



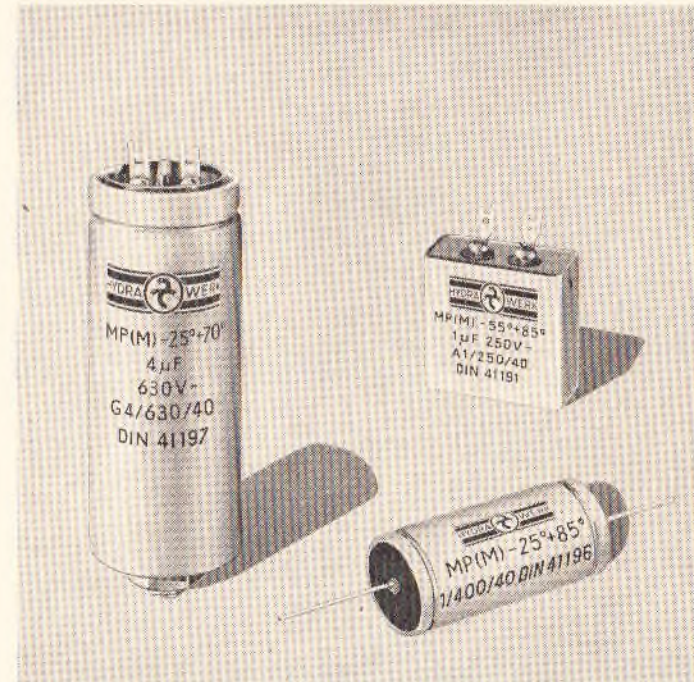
(Abb. 96)

luftdicht abgeschlossen wird. Die Abb. 96 zeigt zwei Becherkondensatoren.

Beim Löten ist ein zu starkes Erwärmen der Lötflächen zu vermeiden, damit sich in den Innenlagen des Wicksels keine Luftblasen bilden, die einen Durchschlag des Kondensators begünstigen.

Eine Sonderausführung der Wickelkondensatoren sind die **Metall-Papier-Kondensatoren (MP-Kondensatoren)**, bei denen der Metallbelag (Zink) durch Aufdampfen unmittelbar auf das als Dielektrikum verwendete Papier aufgebracht wird (vgl. hierzu Abb. 97). Der Vorteil der MP-Kondensatoren besteht in der sehr geringen Stärke der Metallfolie, die bei einem Durchschlag des Kondensators in der Umgebung der Durchschlagstelle verdampft. Dadurch wird ein Berühren der Metallschichten vermieden, so daß der Kondensator nach dem Durchschlag weiter betriebsfähig ist (vgl. hierzu Abb. 98). Über diese selbstheilende Eigenschaft verfügt auch der neuere **Metall-Lack-Kondensator (ML-Kondensator)**, bei dem an Stelle des Papiers eine dünne Lackhaut als

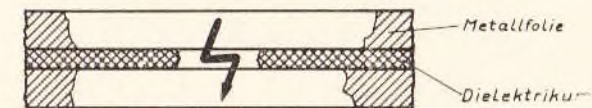
MP-Kondensatoren



(Abb. 97)

Dielektrikum dient. Ein ML-Kondensator ist nur etwa ein Drittel so groß wie ein vergleichbarer MP-Kondensator.

Durchschlag beim MP-Kondensator



(Abb. 98)

Bei den Wickelkondensatoren wird neuerdings Papier als Dielektrikum immer mehr von Kunststoffolien abgelöst. Gleichzeitig ist deutlich eine Tendenz zur Verkleinerung der Abmessungen zu erkennen.

Eine neuere Entwicklung der Wickelkondensatoren stellen die Kunststoffolienkondensatoren mit Styroflex als Dielektrikum dar. Sie werden

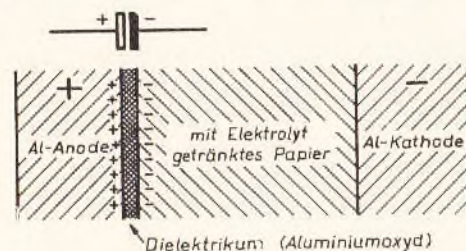
überall dort verwendet, wo nur sehr geringe Änderungen der Kapazitätswerte durch Alterung oder Temperatureinflüsse auftreten dürfen. Deshalb werden sie verschiedentlich auch als Ersatz für die zwar noch besseren, aber dafür auch größeren und teureren Glimmerkondensatoren verwendet.

9.4.1.2. Elektrolytkondensatoren

Elektrolytkondensatoren erfüllen die Forderung, große Kapazitätswerte (bis mehrere 1000 μF) auf möglichst kleinem Raum unterzubringen. Dafür müssen allerdings größere Verluste und eine geringere Konstanz in Kauf genommen werden.

Elektrolytkondensatoren werden neben anderen Ausführungsformen als Wickelkondensatoren hergestellt. An die Stelle des Papiers als Dielektrikum tritt jedoch eine auf elektrolytischem Wege hergestellte sehr

Prinzipaufbau eines Elektrolytkondensators



(Abb. 99)

dünne Oxydschicht. Der Kondensator besteht im einzelnen aus zwei Aluminiumfolien, und zwar einer Aluminiumanode, die eloxiert ist, und einer blanken Aluminiumkatode. Die **Eloxalschicht** (elektrisch oxydiertes Aluminium) der Al-Anode dient als Dielektrikum. Infolge ihrer außerordentlich geringen Stärke und ihrer Dielektrizitätskonstanten von $\epsilon_r \sim 8$ besitzt der Elektrolytkondensator eine ungewöhnlich hohe Kapazität bei normaler Fläche. Außerdem läßt sich durch Aufrauen der Anode die Kapazität noch wesentlich vergrößern. Zwischen der Anode und der Katode befinden sich als Abstandhalter – nicht als Dielektrikum – stark saugfähige, mit einem sauerstoffreichen Elektrolyten getränkte Papierstreifen (vgl. hierzu Abb. 99). Die Stärke der Eloxalschicht hängt von der Spannung ab, die bei ihrer Herstellung angelegen hat (**Formierungsspannung**).

Man unterscheidet Niedervolt-Kondensatoren (bis 100 V) und Hochvolt-Kondensatoren (über 100 V). Die gebräuchlichen Betriebsspannun-

gen liegen zwischen 6 und 550 V. Neben der für Dauerbetrieb geltenden Betriebsspannung ist auf den Elektrolytkondensatoren noch die Spitzenspannung angegeben, die nur kurzzeitig auftreten darf. Die Angabe 35/40 V bedeutet somit 35 V Betriebsspannung und 40 V Spitzenspannung (vgl. Abb. 100). Die Spitzenspannung entspricht etwa der Formierungsspannung und darf daher nicht überschritten werden; es würde sonst ein neuer Formierungsprozeß eintreten, der Veränderungen des Kondensators zur Folge hat.

Nach längerer Lagerung lassen die Elektrolytkondensatoren einen verhältnismäßig hohen **Reststrom** durch, da inzwischen die Oxydschicht abgebaut worden ist. Dieser Strom, der allerdings nach kurzer Zeit wieder auf den normalen Wert absinkt, ist auch nach Beendigung der Formierung erheblich größer als der bei Papierkondensatoren fließende Isolationsstrom. Elektrolytkondensatoren können sich nach einem Durchschlag infolge Neuformierung selbst heilen.

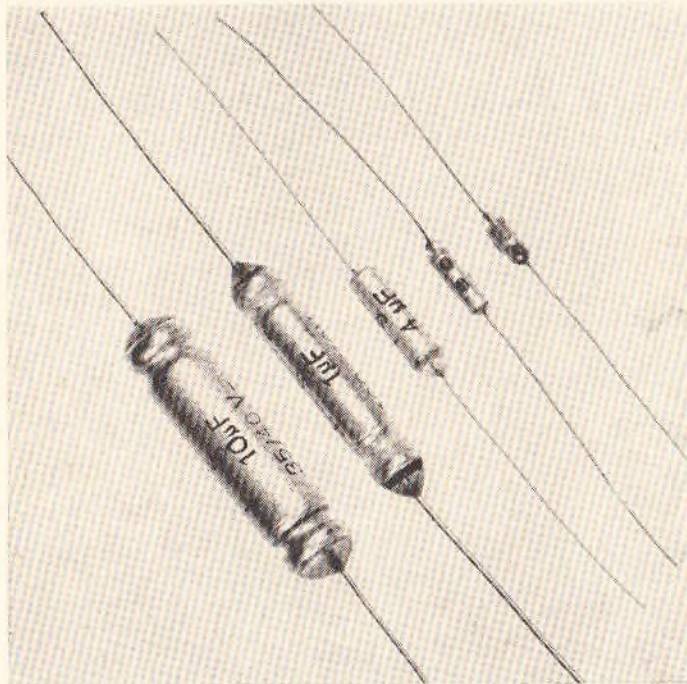
Der Elektrolytkondensator darf nur in der einen Richtung (+ Pol an Anode, – Pol an Katode) angeschlossen werden, weil nur in dieser

Aluminium-Elektrolytkondensator



(Abb. 100)

Tantal-Elektrolytkondensatoren



(Abb. 101)

Richtung die Oxydschicht den Stromdurchgang sperrt. Liegt bei falschem Anschluß des Kondensators der — Pol an der Anode, dann ist die Schicht stromdurchlässig und wirkt wie ein reiner Widerstand. In diesem Fall wird außerdem die Eloxalschicht wieder abgebaut. Für reine Wechselspannungen ist deshalb der normale „gepolte“ Elektrolytkondensator nicht brauchbar. Er ist jedoch anwendbar bei schwankender Gleichspannung + überlagerte Wechselspannung).

Neben gepolten werden auch ungepolte Elektrolytkondensatoren hergestellt, die auf beiden Elektroden eine Oxydschicht besitzen. Diese Kondensatoren werden dort angewendet, wo eine im Betrieb mögliche Umpolung zur Zerstörung des gepolten Kondensators führen würde.

Ein Ergebnis der Bemühungen, Elektrolytkondensatoren mit kleineren Abmessungen herzustellen, ist der **Tantal-Elektrolytkondensator**¹⁾. Dieser

¹⁾ Tantal (Element, chem. Zeichen: Ta) ist ein graues, hartes, aber dehnbares, seltenes Metall mit großer chemischer Widerstandsfähigkeit.

Kondensator zeichnet sich außerdem durch einen erheblich kleineren Verlustfaktor und durch eine höhere Konstanz gegenüber dem Aluminium-Elektrolytkondensator aus (vgl. hierzu Abschnitt 5.1.2.5.).

Die Abb. 100 zeigt einen Aluminium-Elektrolytkondensator der Hydra-Werke und die Abb. 101 fünf Siemens-Tantal-Elektrolytkondensatoren verschiedener Größe.

9.4.1.3. Glimmer- und Keramikkondensatoren

Glimmerkondensatoren werden dort angewendet, wo höchste Konstanz der Kapazität und kleinste Verluste gefordert werden. Sie werden für Kapazitäten bis $0,1 \mu\text{F}$ hergestellt.

Festkondensatoren mit Keramik als Dielektrikum kommen in ihrer Güte den Glimmerkondensatoren beträchtlich nahe. Keramikkondensatoren gibt es in zahlreichen Ausführungsformen (Plättchen, Hütlchen, Röhrlchen u. a.). Auf der Keramik befinden sich die Beläge, die aus einer fest haftenden, bei hoher Temperatur eingebrannten gut leitenden Silberschicht bestehen. Keramikkondensatoren werden für Kapazitäten bis zu einigen 1000 pF hergestellt.

9.4.2. Veränderbare Kondensatoren

9.4.2.1. Drehkondensatoren

Drehkondensatoren werden vor allem als Abstimmittel in Rundfunkempfängern angewendet. Sie bestehen aus einem feststehenden Plattenpaket (Stator) und einem eindrehbaren Plattenpaket (Rotor). Die jeweilige Stellung des Rotors zum Stator ist maßgebend für die Größe der Kapazität. Als Dielektrikum dient fast ausschließlich Luft.

9.4.2.2. Trimmer

Trimmer (früher auch Quetschkondensatoren genannt) werden im Gegensatz zu den Drehkondensatoren in der Regel nur einmal eingestellt, wobei der Abstand zwischen den Belägen durch eine Schraube verändert werden kann.

9.4.2.3. Differentialkondensatoren

Differentialkondensatoren bestehen aus zwei feststehenden und einem dazwischen angebrachten beweglichen Plattenpaket. Sie wirken wie kapazitive Spannungsteiler, d. h., die Kapazität des Rotors nimmt bei Drehung gegen den einen festen Plattensatz um so viel zu, wie sie gegen den anderen abnimmt.

9.5. Kondensatordaten

Auf den Kondensatoren ist neben der Größe und Toleranz noch die Betriebsspannung (Nennspannung) angegeben. Dieser Wert gilt für eine Gleichspannung beziehungsweise beim Anlegen einer Wechselspannung für den Maximalwert (nicht Effektivwert!). Daneben sind gelegentlich noch Angaben über den zulässigen Temperaturbereich, über die Prüfspannung und über Ausführungsnormen vorhanden.

Häufig geschieht die Kennzeichnung der Kapazitäts-, Toleranz- und Spannungswerte auch durch Farbringe beziehungsweise Farbpunkte. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Bedeutung der Farben.

Farbe	Kapazität in pF			Toleranz	Betriebsspannung in V
	1. Ring	2. Ring	3. Ring		
silber	—	—	10^{-2}	$\pm 10\%$	2000
gold	—	—	10^{-1}	$\pm 5\%$	1000
schwarz	—	0	—	—	—
braun	1	1	10^1	$\pm 1\%$	100
rot	2	2	10^2	$\pm 2\%$	200
orange	3	3	10^3	—	300
gelb	4	4	10^4	—	400
grün	5	5	10^5	—	500
blau	6	6	10^6	—	600
violett	7	7	10^7	—	700
grau	8	8	10^8	—	800
weiß	9	9	10^9	—	900
keine	—	—	—	$\pm 20\%$	500

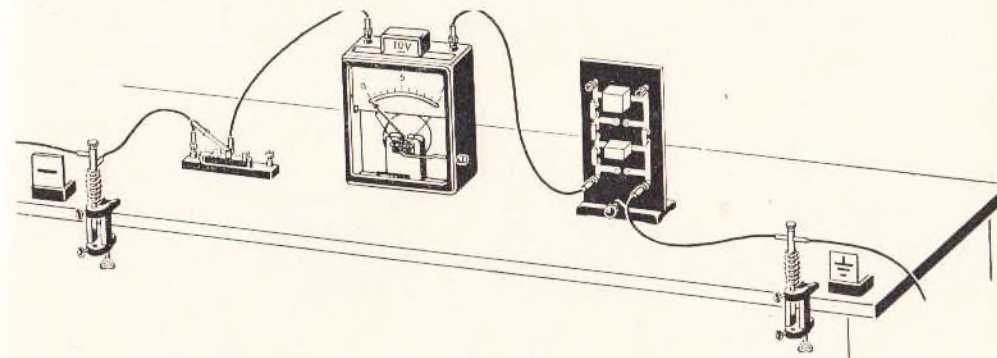
9.6. Kondensatorschaltungen

9.6.1. Die Parallelschaltung

Wir bauen einen Versuch nach Abb. 102 auf. Es stehen zwei Kondensatoren von $C_1 = 1 \mu\text{F}$ und $C_2 = 2 \mu\text{F}$ zur Verfügung. Als erstes laden wir den $1 \mu\text{F}$ -Kondensator auf, wobei das Meßinstrument einen bestimmten Ausschlag zeigt. Bei der Aufladung des $2 \mu\text{F}$ -Kondensators ist der Ausschlag größer. Wir laden jetzt die beiden parallelgeschalteten Kondensatoren auf, der Ausschlag ist noch größer. Vor dem Einzelversuch sind die Kondensatoren sorgfältig zu entladen.

Der Versuch zeigt, daß parallelgeschaltete Kapazitäten eine größere Elektrizitätsmenge aufnehmen als die größte Einzelkapazität.

Die Gesamtkapazität parallelgeschalteter Kondensatoren ist größer als jede Teilkapazität.



(Abb. 102)

Wenn wir den Versuch mit zwei Kondensatoren von je $2 \mu\text{F}$ 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.

Es ist also

$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$C \cdot U = C_1 \cdot U_1 + C_2 \cdot U_2$$

Da alle Zweige einer Parallelschaltung an der gleichen Spannung liegen, ergibt sich

$$C \cdot U = C_1 \cdot U + C_2 \cdot U$$

und nach Division durch U

$$C = C_1 + C_2$$

Die Größe der Kapazität hängt u.a. von der Größe der wirksamen Oberfläche ab. Durch die Parallelschaltung von Kondensatoren wird die Gesamtoberfläche gleich der Summe der Einzelflächen. Damit ergibt sich:

Die Gesamtkapazität parallelgeschalteter Kondensatoren ist gleich der Summe der Einzelkapazitäten.

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

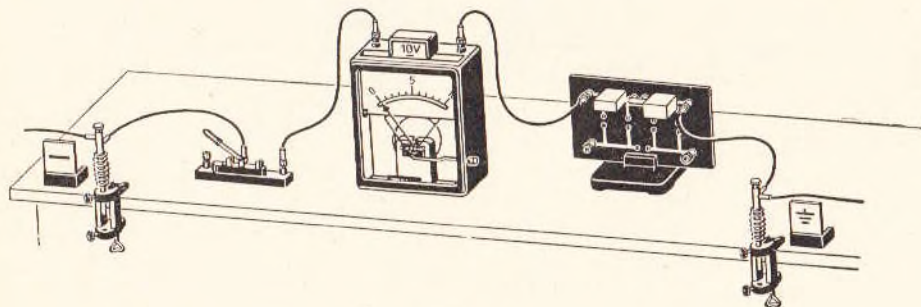
9.6.2. Die Hintereinanderschaltung

Bei dem in Abb. 103 dargestellten Versuch beobachten wir nacheinander den Ausschlag des Meßinstruments bei der Aufladung des $2 \mu\text{F}$ -Kondensators und des $1 \mu\text{F}$ -Kondensators. Wir stellen fest, daß der Ausschlag bei der Aufladung des $1 \mu\text{F}$ -Kondensators kleiner ist. Nachdem wir beide Kondensatoren wieder entladen

haben, schalten wir sie hintereinander und laden erneut auf. Wir stellen fest, daß der Ausschlag des Meßinstrumentes noch kleiner ist als bei der Aufladung des 1 μF -Kondensators.

Der Versuch zeigt, daß hintereinandergeschaltete Kapazitäten eine kleinere Elektrizitätsmenge aufnehmen als die kleinste Einzelkapazität.

Die Gesamtkapazität hintereinandergeschalteter Kondensatoren ist kleiner als jede Teilkapazität.



(Abb. 103)

Nach dem 2. Kirchhoffschen Gesetz ist bei der Hintereinanderschaltung der Kondensatoren

$$\begin{aligned} U &= U_1 + U_2 \\ \frac{Q}{C} &= \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} \end{aligned}$$

Da bei der Hintereinanderschaltung die Elektrizitätsmenge auf allen Kondensatorbelägen gleich ist, ergibt sich

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

und nach Division durch Q

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

Die Größe der Kapazität hängt u. a. vom Abstand der leitenden Flächen ab. Durch die Hintereinanderschaltung von Kondensatoren wird der Gesamt-Abstand vergrößert. Damit ergibt sich:

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

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

Beispiel:

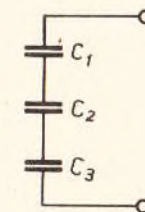
3 Kondensatoren von 0,5 μF , 2 μF und 4 μF sollen einmal parallel- und einmal hintereinandergeschaltet werden. Wie groß ist jeweils die Gesamtkapazität?

Gegeben: $C_1 = 0,5 \mu\text{F}$
 $C_2 = 2,0 \mu\text{F}$
 $C_3 = 4,0 \mu\text{F}$

Gesucht: C_r, C_p

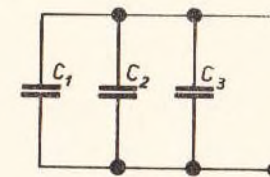
Lösung:

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_r} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \\ \frac{1}{C_r} &= \frac{1}{0,5} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \\ \frac{1}{C_r} &= \frac{11}{4} \\ C_r &= \underline{\underline{0,364 \mu\text{F}}} \end{aligned}$$



(Abb. 104)

Die Gesamtkapazität der hintereinandergeschalteten Kondensatoren beträgt 0,364 μF .



(Abb. 105)

$$\begin{aligned} C_p &= C_1 + C_2 + C_3 \\ C_p &= 0,5 + 2 + 4 \\ C_p &= \underline{\underline{6,5 \mu\text{F}}} \end{aligned}$$

Die Gesamtkapazität der parallelgeschalteten Kondensatoren beträgt 6,5 μF .

Vergleichen wir die Formeln für die Reihen- und Parallelschaltung von Kapazitäten mit denen für die Widerstände, so erkennen wir, daß sich die Kondensatoren beim Zusammenschalten umgekehrt verhalten wie die Widerstände.

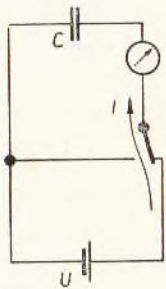
9.7. Kondensatoren im Gleich- und Wechselstromkreis

Ein Versuch soll das Auf- und Entladen eines Kondensators in einem **Gleichstromkreis** zeigen. Der Kondensator wird nach dem Anlegen der Gleichspannung (vgl. hierzu Abb. 106) so lange aufgeladen, bis er die angelegte Spannung angenommen hat. Dabei fließt kein gleichmäßiger Ladestrom. Der im Moment des Einschaltens sehr große Ladestrom nimmt mit fortschreitender Zeit ab, weil mit Zunahme der Ladung im Kondensator die der angelegten Spannung entgegengerichtete Kondensatorspannung größer wird. Der Ladestrom erreicht den Wert Null, wenn die Kondensatorspannung den Wert der angelegten Spannung erreicht hat. Nun fließt kein Strom mehr, d. h., **Gleichstrom wird von einem Kondensator gesperrt.**

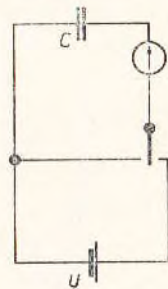
Wird der Ladestromkreis unterbrochen (vgl. hierzu Abb. 107), so bleibt der Spannungszustand des Kondensators längere Zeit erhalten.

Erst wenn die aufgeladenen Kondensatorplatten miteinander verbunden werden (vgl. hierzu Abb. 108), entlädt sich der Kondensator sehr schnell. Dabei fließt der Entladestrom in entgegengesetzter Richtung wie der Ladestrom.

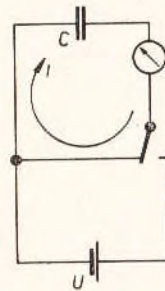
Durch die Größe des ohmschen Widerstandes im Lade- und Entladestromkreis wird die Dauer der Aufladung beziehungsweise der Entladung



(Abb. 106)



(Abb. 107)



(Abb. 108)

beeinflusst ($Q = I \cdot t$). Bei einem sehr kleinen Widerstand im Entladestromkreis kann kurzzeitig ein sehr hoher Strom fließen.

Legt man eine **Wechselspannung** an den Kondensator, dann findet ein ständiges Laden und Entladen des Kondensators statt. Die Moleküle des Isolierstoffes werden mit der Frequenz des Wechselstromes umpolarisiert. In den Leitungen ist ständig ein Stromfluß vorhanden, so daß der Kondensator scheinbar Wechselstrom durchläßt. Allerdings stellt auch der Kondensator für den Wechselstrom einen Widerstand dar. Dieser Wechselstromwiderstand (auch kapazitiver Widerstand genannt) hängt von der Kapazität des Kondensators und von der Frequenz des Wechselstromes ab (vgl. hierzu Band B 4 des „Handbuchs der Fernmeldetechnik“).

Kondensatoren werden (oft zusammen mit Spulen oder Widerständen) zu verschiedenen Zwecken verwendet, so unter anderem

als **Sperrkondensatoren**, um Teile der Stromkreise gegen Gleichstrom zu sperren,

als **Glättungskondensatoren** zum Vermindern der Welligkeit einer Gleichspannung,

als **Funkenlösch- und Störschutzkondensatoren** zur Verhinderung der Funkenbildung bei Kontakten durch „Absaugen“ elektrischer Energie,

als **Speicherkondensatoren** zur meist „blitzartigen“ Abgabe der durch Aufladung erhaltenen Energie,

in **elektrischen Filtern und Weichen** zum Trennen von Gleichstrom und Wechselströmen verschiedener Frequenz,

in **Schwingungskreisen** zum wechselseitigen Aufnehmen und Abgeben der Energie und

bei **Verzögerungsrelais** zur zeitlichen Regelung des Stromanstiegs oder Stromabfalls.

9.8. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 9.1. bis 9.7.

1. Beschreiben Sie den Aufbau eines Kondensators!
2. Von welchen Faktoren hängt die Kapazität eines Kondensators ab?
3. Nennen Sie einige Stoffe, die als Dielektrikum verwendet werden!
4. Was wird durch die Dielektrizitätskonstante angegeben?
5. Welchen Einfluß haben Ladespannung und Kapazität auf die von einem Kondensator aufzunehmende Elektrizitätsmenge?
6. Was versteht man unter Durchschlagsfestigkeit?
7. Wann hat ein Kondensator eine Kapazität von 1 Farad?
8. Wieviel pF sind 0,29 μ F?
9. Wodurch entstehen die Verluste des Kondensators?
10. Beschreiben Sie den Aufbau eines MP-Kondensators?
11. Welche besondere Eigenschaft hat der MP-Kondensator?
12. Beschreiben Sie den Aufbau eines Elektrolytkondensators!
13. Was ist ein ungepolter Elektrolytkondensator?
14. Was ist bei der Verwendung eines gepolten Elektrolytkondensators zu beachten?
15. Welche besondere Eigenschaft besitzt der Glimmerkondensator?
16. Welche Bedeutung haben die Farbringe auf einem Keramik Kondensator?
17. Vier Kondensatoren von 200 pF, 0,8 nF, 30 μ F und 0,005 F sind parallelgeschaltet. Wie groß ist die Gesamtkapazität?
18. Drei Kondensatoren von je 0,033 μ F sind hintereinandergeschaltet. Wie groß ist die Gesamtkapazität?
19. Drei Kondensatoren von 400 nF, 2500 pF und 2 μ F sind hintereinandergeschaltet. Wie groß ist die Gesamtkapazität?
20. Beschreiben Sie die Vorgänge beim Auf- und Entladen eines Kondensators im Gleichstromkreis!
21. Wie verhält sich ein Kondensator im Wechselstromkreis?
22. Nennen Sie einige Verwendungszwecke für Kondensatoren!

- Band C 1** — **Werkstoffkunde und Werkstoffbearbeitung**
Werkstoffe der Fernmeldetechnik und ihre Bearbeitung — Werkzeuge und Werkzeugmaschinen — Werkstoffprüfung — Oberflächenschutz der Metalle — Nichtmetallische Werkstoffe — Isolierstoffe — Kunststoffe
- Band C 2** — **Oberirdischer Linienbau**
FBG und FBZ im oberirdischen Linienbau — Planung und Bau oberirdischer Anschlußlinien — Installationskabel und Luftkabel — Erdungsanlagen
- Band C 3** — **Unterirdischer Linienbau**
Gestaltung der Fernmeldenetze — Fernmeldekabel — Aufgaben und Aufbau der Bauteile im Anschlußnetz — Schaltungen in Verzweigungseinrichtungen — Druckluftprüfeinrichtungen
- Band C 4** — **Fernsprechapparate und Zusatzeinrichtungen**
Aufbau, Schaltung und Wirkungsweise der Fernsprechapparate und Zusatzeinrichtungen
- Band C 5** — **Wählvermittlungstechnik**
(mit Beiheft) Grundzüge der Wählvermittlungstechnik — Bauelemente und ihre Verwendung — Gliederung und Aufbau der Ortswählvermittlungen — Vorfeldeinrichtungen — Stromversorgungs- und Erdungsanlagen — Fernwählvermittlungsstellen
- Band C 6** — **Nebenstellenanlagen**
(mit Beiheft) Zweck der Nebenstellenanlagen — Baustufen — Stromversorgung — Schaltungsaufbau der kleinen Nebenstellenanlagen und der Reihenanlagen
- Band C 7** — **Sprechstellenbau**
Bauftrag — Einrichtungs- und Änderungsgebühren — Teilnehmer-einrichtungen — Fernmeldebauzeug — Bauausführung

Umfang je Band rund 140 Seiten

Wichtig zur Vorbereitung auf Eignungsfeststellungen und Prüfungen

Deutschlehre (mit Beiheft)

Rechtschreibung — Wortlehre — Satzlehre — Zeichensetzung — Stil- und Aufsatzkunde — Übungsaufgaben — Übungsdiktate — Lösungen

Umfang rund 200 Seiten

Preis 5,— DM

Rechenlehre

Rechnen — Raumlehre — Sortenverwandlung — Übungsaufgaben — Angewandte Aufgaben — Lösungsheft

Umfang rund 190 Seiten

Preis 5,— DM

— Weitere Lehrbücher siehe 2. und 4. Umschlagseite —

Handbuch der Fernmeldetechnik

— Buchreihe BFt —

14

wichtige Lehr- und Lernwerke zur Vorbereitung auf den
Grundlehrgang Ft 2, die verschiedenen Aufbaulehrgänge
BFt und den Abschlußlehrgang BFt

Band G — Grundlagen der Fernmeldetechnik (2 Teile)

Band E — Fachbereich Entstörungstechnik (2 Teile)

Band L — Fachbereich Linientechnik

Band V — Fachbereich Vermittlungstechnik (3 Teile)

Band T — Fachbereich Telegraphentechnik (2 Teile)

Band U — Fachbereich Übertragungstechnik

Band Fu — Fachbereich Funktechnik

Umfang je Band etwa 180 Seiten

Sonderband — Allgemeines Prüfungswissen (für die Kräfte des BFW-, BFt-
und BPt-Dienstes) (2 Teile)

— Weitere Lehrbücher siehe 2. und 3. Umschlagseite —

Sämtliche Lehrwerke können bestellt werden bei
Deutsche Postgewerkschaft — Hauptvorstand — Verlag
6 Frankfurt 1 — Savignystraße 43