Grundwissen des Fernmeldedienstes

Band Ia

Einführung in die Grundlagen der Elektrotechnik

Herausgeber: Deutsche Postgewerkschaft, Hauptvorstand

Frankfurt (Main)

Grundwissen des Fernmeldedienstes

Band Ia

Einführung in die Grundlagen der Elektrotechnik

Teil I

Deutsche Postgewerkschaft, Verlag GmbH.

Frankfurt (Main) · Savignystraße 43

Vorwort zur 1. Auflage

Die Hefte I und II dieser Bandreihe sollen die Aufgabe erfüllen, dem **FB-Arbeiter** das grundsätzliche Wissen in der Elektrotechnik zu vermitteln und ihm dazu verhelfen, die FBHandwerkerprüfung, soweit sie das Fachgebiet Elektrotechnik betrifft, mit Erfolg abzulegen. Text und Abbildungen sind daher so einfach und verständlich wie möglich gehalten. Jedes Teilgebiet enthält eine Reihe von Rechenaufgaben mit Lösungen und Erläuterungen, so daß der Inhalt der Abhandlungen vertieft und dem Lernenden Gelegenheit gegeben wird, sich eingehend mit der Materie – nicht nur gedanklich – vertraut zu machen.

Wenn auch in erster Linie die beiden Hefte als Nachlese- und Lernwerk für den Fachschulunterricht gedacht sind, so ist es auch auf Grund der eingehenden Erläuterungen und genauen Beschreibungen möglich, daß sich der Lernende durch **Selbststudium** weitestgehend in den Stoff vertiefen kann. Für die Kräfte des einfachen Dienstes (TBetr W, TLA, PSch[Bau], PSch und FBHandwerker), die sich auf die TAss-Prüfung sowie für die Kräfte des technischen Dienstes, die sich auf die Werkführerprüfung vorbereiten wollen, können die Hefte I und II nur zur **Wiederholung** dienen. Der Vertiefung und Erweiterung ihres Wissens dienen weitere Hefte, die in Vorbereitung sind.

Frankfurt am Main, im Januar 1952
Untermainkai 70–76

Vorwort zur 4. Auflage

Die 4. Auflage dieses Bandes wurde völlig neu bearbeitet. Während der fachliche Inhalt gegenüber den bisherigen Auflagen kaum verändert worden ist, soll die neuartige Darstellung des behandelten Stoffes dem Lernenden helfen, sich in das Stoffgebiet leichter einzuarbeiten.

Alle Formeln sind numeriert, damit die Ableitung leichter verfolgt werden kann. Rechenbeispiele sind nur noch da gebracht, wo sie zum Verständnis von Ableitungen und Lehrsätzen erklärend dienen. Die Beherrschung grundsätzlicher Rechnungsarten wird vorausgesetzt.

Ergänzt wurde diese Auflage durch eine Zusammenstellung wichtiger Formeln und eine Tabelle mit Konstanten der gebräuchlichsten elektrischen Leiter.

Wir hoffen, daß auch diese Auflage den Kollegen des AFt- und des BFt-Dienstes eine wertvolle Hilfe sein wird.

Verlags GmbH., Frankfurt (Main), im April 1959
Savignystraße 43

Inhaltsverzeichnis

(1) Was ist Elektrizität?

Die Elektrizität ist eine Naturerscheinung, die lediglich an ihren **Wirkungen** zu erkennen ist. Die Elektrizität läßt z. B. den Faden einer Glühlampe glühen, der Faden wird hell und entwickelt nebenbei Wärme; wird ein elektrisches Bügeleisen an eine Spannungsquelle angeschlossen, wird infolge der Stromwärme das Bügeleisen heiß.

Die Ursachen vorstehender und später zu behandelnder anderer Vorgänge sind im **elektrischen Strom** zu suchen, den wir in diesem Band näher untersuchen wollen.

Wir kennen alle einen Wasserstrom, sei es ein Fluß oder der Wasserstrom, der aus dem aufgedrehten Hahn einer Wasserleitung fließt. Schließt der Wasserhahn nicht ganz dicht, tropft er, d. h. kleine Wasserteilchen – die Wassertropfen – fallen herunter. Physikalisch gesehen: Das Wasser besteht aus vielen winzig kleinen Wassertröpfchen, das Wasser hat **Teilchencharakter.**

Auch die Elektrizität hat Teilchencharakter, nur sind die „Elektrizitätsteilchen" so unvorstellbar klein, daß sie auch mit dem schärfsten Mikroskop nicht zu erkennen sind. Selbst ein Mikroskop, das viele Millionen Male vergrößert, würde die kleinen „Elektrizitätsteilchen" nicht erkennen lassen. Diese „Elektrizitätsteilchen" sind sogenannte „Urteilchen", die **Elektronen** genannt werden.

Elektronen sind so klein, daß sie ungehindert durch feste Stoffe – z. B. durch einen Kupferdraht – hindurchfließen können, ohne merklich abgebremst zu werden. Jedes Elektron ist elektrisch oder – fachtechnisch ausgedrückt – trägt eine bestimmte, genau festgelegte elektrische Ladung. Die **Ladung eines Elektrons,** die **Elementarladung** beträgt:

$$\text{(1a)} \quad \boxed{\mathfrak{E} = \frac{1}{6{,}29 \times 10^{18}}\ \text{Coulomb}}$$ [1]).

(2) Die Elektrizitätsmenge Q

Ist ein Gefäß, dessen Rauminhalt (dessen Volumen) ein Liter ($1\ l$) beträgt, ganz voll Wasser, dann hat das Gefäß eine bestimmte Anzahl Wassertropfen, nämlich die **Wassermenge** $Q = 1\ l$, zum Inhalt. Die Wassermenge Q wird also in Litern (l) gemessen.

Wir stellen uns nun vor, daß auch eine sehr große Menge Elektronen zu einer **Elektrizitätsmenge** Q zusammengefaßt wird.

Die Elektrizitätsmenge wird mit dem Formelzeichen Q bezeichnet; ihre Maßeinheit ist das Coulomb C[2]).

[1]) Siehe Ziffer (1) und (2) Bd. Ib.

[2]) *Coulomb* zu Ehren des französischen Physikers Coulomb — vgl. auch Ziffer (2) und (3) Bd. Ib.

(3) Der elektrische Strom

Fließt eine bestimmte **Elektrizitätsmenge** Q durch einen Draht hindurch, entsteht ein **Elektronenfluß:** Der **elektrische Strom.**

Zwecks anschaulicher Darstellung soll das oben Gesagte an einem Wasserbeispiel erläutert werden: Ein mit Wasser gefülltes Gefäß wird in einen Trichter entleert, der

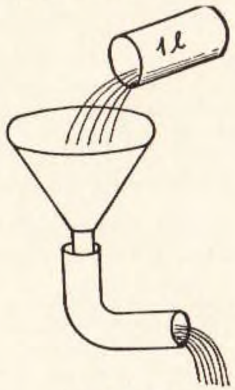


Abb. 1

in einen Rohrstutzen hineinragt. Infolge der Schwerkraft, die jedem einzelnen Wassertröpfchen innewohnt (Anziehungskraft der Erde), fließen die Wassertröpfchen aus dem Gefäß in den Trichter und weiter durch das Rohr zur Erde. Solange das Gefäß entleert wird, fließt ein **Wasserstrom,** der sich aus vielen **bewegten Wasserteilchen** (Wassertröpfchen) zusammensetzt. Die durch den Inhalt des Gefäßes bestimmte **Wassermenge** Q ist in einer bestimmten **Zeit** t durch das Rohr geflossen. Der Wasserstrom I kann also bestimmt werden durch die Wassermenge Q, die in einer bestimmten Zeiteinheit t geflossen ist:

$$\text{(3a)} \quad \boxed{I = \frac{Q}{t}\left[\frac{l}{s}\right]}\ .$$

In der Elektrizitätslehre entspricht die **Elektrizitätsmenge** Q der Wassermenge Q; die **Elektronen** entsprechen den Wassertröpfchen.

Der elektrische Strom ist also eine bewegte Elektrizitätsmenge (Elektronenmenge) oder – anders ausgedrückt – eine Elektronenbewegung[3]).

(4) Die Einheit der elektrischen Stromstärke

Die elektrische Stromstärke hat das Formelzeichen I; die Größe des elektrischen Stromes I wird in Ampere A gemessen[4]).

Ein Strom von der Größe 1 A fließt dann, wenn in der Zeit t von 1 Sekunde (s) die Elektrizitätsmenge Q von 1 C den Querschnitt des Drahtes durchfließt[5]).

[3]) Siehe Ziffer (4) Bd. Ib.

[4]) *Ampere* zu Ehren des französischen Physikers Ampère.

[5]) Siehe Ziffer (6) Bd. Ib.

Der Strom I ist gleich der Elektrizitätsmenge Q geteilt durch die Zeit t.

$$\text{(4a) Gesetz:} \quad \boxed{I = \frac{Q}{t}\,[\text{A}]}\ ^{6)}\ ;$$

(4b) Bemessungsgleichung: (Dimensionsgleichung)

$$\boxed{1\,\text{A} = \frac{1\,\text{C}}{1\,\text{s}}}\ .$$

Aus (4a) folgt: aus (4b) folgt:

$$\text{(4aI)} \quad \boxed{Q = I \times t\,[\text{C}]}\ ; \qquad \text{(4bI)} \quad \boxed{\begin{array}{l} 1\,\text{C} = 1\,\text{A} \times 1\,\text{s} \\ 1\,\text{C} = 1\,\text{As (Amperesekunde)} \\ \text{C} = \text{A} \times \text{s} \end{array}}\ .$$

Die Elektrizitätsmenge Q wird in der Technik in Amperesekunden (As) gemessen [Gleichung (4bI)].

Das Ampere ist für die Fernmeldetechnik eine große Einheit. Deshalb sind kleinere Werte eingeführt worden, und zwar: Das **Milliampere** (der tausendste Teil eines Amperes)

$$\text{(4bII)} \quad \boxed{1\,\text{mA} = \frac{1}{1000}\,\text{A} = \frac{1}{10^3}\,\text{A} = 0{,}001\,\text{A} = 10^{-3}\,\text{A}}$$

und das **Mikroampere** (der millionste Teil eines Amperes)

$$\text{(4bIII)} \quad \boxed{\begin{array}{l} 1\,\mu\text{A} = \dfrac{1}{1\,000\,000}\,\text{A} = \dfrac{1}{10^6}\,\text{A} = 0{,}000\,001\,\text{A} = 10^{-6}\,\text{A}; \\ 1\,\mu\text{A} = \dfrac{1}{1000}\,\text{mA} = \dfrac{1}{10^3}\,\text{mA} = 0{,}001\,\text{mA} = 10^{-3}\,\text{mA}. \end{array}}$$

(5) Die elektrische Spannung und der elektrische Stromkreis

In Abb. 2 sind zwei Gefäße (I und II) dargestellt, die durch eine Rohrleitung miteinander verbunden sind. In dieser Rohrleitung befindet sich eine Pumpe P, die Wasser aus dem Gefäß I in das höher gelegene Gefäß II hebt. Die Flüssigkeits-

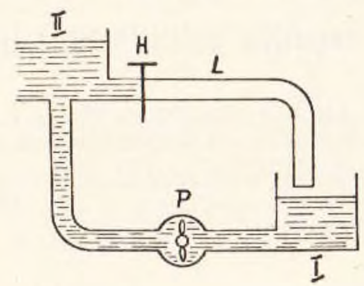


Abb. 2

[6]) Vgl. Gleichung (3a) Bd. Ia.

menge Q im Gefäß II liegt höher als die im Gefäß I; aufgrund des Lageunterschiedes herrscht zwischen beiden Flüssigkeitsmengen (Q I und Q II) ein **Druckunterschied** (Energie der Lage oder **potentielle Energie**). Wird der Hahn H geöffnet, besteht das Bestreben, den Druckunterschied zwischen den Flüssigkeitsmengen auszugleichen: **Infolge des verschiedenen Potentials der Wassermengen fließt ein Wasserstrom** I vom Gefäß II durch die Leitung L zum Gefäß I[7]).

In einem **elektrischen Stromkreis** liegen die Verhältnisse ähnlich wie oben beschrieben. Der durch die Pumpe P im Wasserstromkreis erzeugte Druckunterschied wird im elektrischen Stromkreis i. allg. durch einen **Generator** hervorgerufen und mit **Spannung** bezeichnet. Zwischen den Polen des Generators herrscht ein **Potential- (Druck-) Unterschied,** die dadurch auftretende **Spannung** wird mit dem **Formelzeichen** U bezeichnet und in **Volt (V)** gemessen[8]).

Die Spannung U **(der elektrische Potentialunterschied) ist die Ursache für den Antrieb der Elektronen.**

Liefert eine elektrische Spannungsquelle eine **ständige Spannung,** wird in einem **geschlossenen Stromkreis stets ein elektrischer Strom** fließen.

Ein elektrischer Stromkreis ist in Abb. 3 dargestellt. U ist die Spannungsquelle; I ist der Strom, der über den Widerstand R fließt, solange zwischen den mit „Plus (+)" und „Minus (—)" bezeichneten **Polen** der Spannungsquelle eine Spannung herrscht. Dabei ist – bei gleichbleibendem Widerstand R – die Größe des Elektronenflusses (die Stromstärke I) abhängig von der Größe der elektrischen Spannung U[9]).

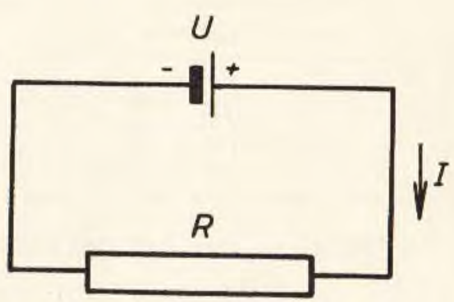


Abb. 3

(6) Positive und negative elektrische Ladungen – Stromrichtung

Es gibt nur eine Elektrizität, nämlich die elektrische Ladung der Elektronen. Dort, wo infolge „elektrischen Drucks" eine **Anhäufung** von Elektronen besteht, ist der **Minuspol** der Spannungsquelle, weil Elektronen negative elektrische Ladungen tragen. Dort, wo ein **Elektronenmangel** herrscht, ist der **Pluspol** der Spannungsquelle. Deshalb werden die Pole einer Spannungsquelle mit — (Minus) und + (Plus) bezeichnet.

[7]) Siehe Ziffer (7) Bd. Ib.

[8]) *Volt* zu Ehren des italienischen Physikers Volta.

[9]) Siehe Ziffer (8) Bd. Ib.

Elektronenanhäufung = Negative elektrische Ladung;
Elektronenmangel = Positive elektrische Ladung[10]).

Zwischen Pluspol und Minuspol herrscht immer eine Spannung (Potentialunterschied), die die Elektronen durch einen geschlossenen Stromkreis treibt (Abb. 3)[11]).

Früher, als man von Elektronen noch nichts wußte, wurde die Stromrichtung vom Pluspol zum Minuspol angegeben (technische Stromrichtung). Die Physik lehrt aber, daß ein Potentialausgleich – hier ein elektrischer Strom – nur von Orten des Überschusses (Elektronenanhäufung) zu Orten des Mangels (Elektronenmangel) stattfinden kann, daß also der elektrische Strom nur vom Minuspol zum Pluspol (äußerer Stromkreis!) fließen kann (physikalische Stromrichtung).

Technische Stromrichtung: + → —;
physikalische Stromrichtung: — → +.

(7) Leiter und Nichtleiter[12])

In jedem elektrischen Stromkreis wird dem elektrischen Strom (dem Potentialausgleich) ein Widerstand entgegengesetzt. Die Widerstände sind abhängig von der Zusammensetzung der Stoffe. **Stoffe, die den elektrischen Strom gut leiten, sind elektrische Leiter; Stoffe, die den elektrischen Strom nicht oder sehr schlecht leiten, sind Nichtleiter (Isolatoren).**

Die Leiter unterscheidet man in **Leiter erster Klasse** (Metalle und Kohle) und in **Leiter zweiter Klasse** (in Wasser gelöste Salze und Säuren).

Nichtleiter oder Isolatoren sind Porzellan, Glimmer, keramische Stoffe (z. B. Steatit), Kunststoffe (z. B. Frequenta und Styroflex), Gummi, trockene Luft usw.

Die Bezeichnung **Halbleiter** für Leinen, Holz, Baumwolle usw. ist heute nicht mehr üblich. Heute werden die Stoffe als **Halbleiter** bezeichnet, **die den elektrischen Strom nur in einer Richtung durchlassen** (Anwendung: Trockengleichrichter, Germaniumdiode, Transistoren).

(8) Der elektrische Widerstand

Zur Erläuterung des Begriffes „elektrischer Widerstand" wollen wir wieder ein Wasserbeispiel heranziehen, und zwar betrachten wir einige Wasserleitungsrohre verschiedener Durchmesser und unterschiedlicher Längen. Bei gleichen Druckverhältnissen fließt in der gleichen Zeit durch ein weites Rohr eine wesentlich größere Wassermenge als durch ein enges. Auch die Länge der Wasserrohre spielt eine Rolle: Je länger ein Rohr ist, desto größer ist die Reibung an den Rohrwänden und um so größer ist der Widerstand, der sich dem Wasserstrom entgegensetzt.

Der Widerstand einer Rohrleitung gegenüber dem Wasserstrom ist also um so größer, je kleiner der Rohrdurchmesser und je länger das Rohr ist.

Auch dem **elektrischen Strom** setzt sich ein **Widerstand** entgegen, der gleichfalls abhängig ist vom Querschnitt und von der Länge des Leiters. **Je kleiner der Querschnitt** F **(die Fläche) und je größer die Länge** l **des Drahtes ist, desto größer ist der Widerstand gegenüber dem elektrischen Strom.**

[10]) Siehe Ziffern (25) bis (28) Bd. Ib.

[11]) Siehe Ziffern (8), (26) und (28) Bd. Ib.

[12]) Siehe Ziffer (5) Bd. Ib.

Die Größe eines Widerstandes R wird in Ohm (Kurzzeichen Ω) gemessen[13]. Das Ohm ist für die Fernmeldetechnik oft eine zu kleine Einheit. Deshalb sind größere Werte eingeführt worden, und zwar: Das **Kiloohm** kΩ (das Tausendfache eines Ohms)

(8aI) $\boxed{1\ \text{k}\Omega = 1000\ \Omega = 10^3\ \Omega}$,

das **Megaohm (Megohm)** (das Millionenfache eines Ohms)

(8aII) $\boxed{1\ \text{M}\Omega = 1000\ \text{k}\Omega = 10^3\ \text{k}\Omega = 1\,000\,000\ \Omega = 10^6\ \Omega}$

und das **Gigaohm** (das Milliardenfache eines Ohms)

(8aIII)
$$\boxed{\begin{aligned}1\ \text{G}\Omega &= 1000\ \text{M}\Omega = 10^3\ \text{M}\Omega = 1\,000\,000\ \text{k}\Omega = 10^6\ \text{k}\Omega\\ &= 1\,000\,000\,000\ \Omega = 10^9\ \Omega\end{aligned}}\ .$$

(9) Der spezifische Widerstand

Während es beim Wasser im allgemeinen gleichgültig ist, aus welchem Werkstoff das Wasserrohr besteht, spielt beim elektrischen Widerstand neben dem Querschnitt und der Länge noch die **Art des Stoffes,** aus dem der Leiter besteht, eine große Rolle[14]. In Ziffer (7) dieses Bandes wurde schon unterschieden zwischen Leitern und Nichtleitern; hieraus geht hervor, daß nicht jeder Stoff den elektrischen Strom gleich gut leitet: **Die elektrische Leitfähigkeit der Stoffe ist verschieden.**

Um **vergleichbare Stoffkonstanten** zu erhalten, wurde der Widerstand von Drähten verschiedener Metalle bei **gleicher Temperatur**[15] gemessen; diese Drähte hatten alle **1 m Länge und 1 mm² Querschnitt.** Diese so ermittelte Stoffkonstante heißt **Einheitswiderstand oder spezifischer Widerstand** und wird mit ϱ[16] bezeichnet.

Die spezifischen Widerstände der wichtigsten Leiter sind in der Anlage (Seite 79) aufgeführt. Ist z. B. ϱ für Kupfer 0,017, ist der Einheitswiderstand von Kupfer – d. h. der Widerstand eines Kupferdrahtes von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt – 0,017 Ω.

Schon an dieser Stelle soll angedeutet werden, daß der Widerstand eines metallischen Leiters mit steigenden Temperaturen größer und mit fallenden Temperaturen kleiner wird; so ist z. B. der Widerstand eines Eisendrahtes bei +50° C wesentlich größer als bei —20° C. Im Gegensatz zu den Widerständen metallischer Leiter werden die Widerstände von Elektrolyten und Kohle mit steigenden Temperaturen kleiner[17].

[13]) *Ohm* zu Ehren des deutschen Physikers Ohm; Ω, sprich „Omega", griechischer Buchstabe.

[14]) Siehe Ziffer (5) Bd. Ib.

[15]) Üblich sind die Temperaturen von + 15° C, + 18° C und + 20° C.

[16]) ϱ, sprich „Rho", kleiner griechischer Buchstabe.

[17]) Vgl. Ziffer (12) dieses Bandes.

(10) Berechnung von Widerständen

Der **Widerstand** R eines Leiters ist abhängig von:

a) Der **Länge** l in Metern,

b) dem **Querschnitt** F in Quadratmillimetern,

c) dem **spezifischen Widerstand** ϱ[18].

Je größer der spezifische Widerstand, je länger der Leiter, und je kleiner der Querschnitt ist, desto größer ist der Widerstand R.

Der Widerstand eines Drahtes wird nach folgender Formel berechnet:

(10a) $$\boxed{\text{Widerstand} = \frac{\text{spezifischer Widerstand} \times \text{Länge in Metern}}{\text{Querschnitt in Quadratmillimetern}}}\ ,$$

(10aI) $$\boxed{R = \frac{\varrho \times l}{F}}\ .$$

Der Querschnitt F eines **runden Leiters** errechnet sich nach der Formel für die Berechnung der Kreisfläche: $F = r^2 \times \pi$[19].

Die Formel (10aI) kann umgestellt werden, es folgt:

(10aII) $$\boxed{\begin{aligned} l &= \frac{F \times R}{\varrho}\ [\text{m}]\\ F &= \frac{\varrho \times l}{R}\ [\text{mm}^2]\\ \varrho &= \frac{F \times R}{l}\end{aligned}}\ .$$

Nach der **Telegraphenmeßordnung (TMO), Teil 4,** sind die **kilometrischen Widerstände** von Freileitungen und Kabeln wie folgt festgelegt:

1 km Ortskabel	(Doppelleitung) Kupfer 0,4 mm	: R = 292 Ω/km,
1 km Ortskabel	(Doppelleitung) Kupfer 0,6 mm	: R = 130 Ω/km,
1 km Ortskabel	(Doppelleitung) Kupfer 0,8 mm	: R = 73,2 Ω/km,
1 km Freileitung	(Doppelleitung) Bronze 1,5 mm	: R = 31,4 Ω/km,
1 km Freileitung	(Doppelleitung) Stahl 2,0 mm	: R = 90 Ω/km.

[18]) Jede Konstante ist eine unbenannte Zahl; dem spezifischen Widerstand würde folgende Maßeinheit zustehen: $\frac{\text{mm}^2 \times \Omega}{\text{m}}$.

[19]) Vgl. „Rechenlehre".

(11) Der Leitwert

Der Leitwert G wird in Siemens (S) gemessen[20]).

Unter dem **Leitwert** eines Leiters wird der **Kehrwert (der reziproke Wert) seines Widerstandes** verstanden. Leiter, die dem elektrischen Strom einen großen Widerstand entgegensetzen, haben einen geringen Leitwert; Leiter mit einem geringen Widerstand haben einen großen Leitwert:

Großer Widerstand → kleiner Leitwert,
kleiner Widerstand → großer Leitwert.

Widerstand und Leitwert sind also reziproke (umgekehrte) Werte.

Daraus folgen die Gesetze:

$$\text{(11a)} \quad \boxed{G = \frac{1}{R}\,[\mathrm{S}]} \,,$$

$$\text{(11b)} \quad \boxed{R = \frac{1}{G}\,[\Omega]} \,;$$

und weiter die Bemessungsgleichungen:

$$\text{(11aI)} \quad \boxed{\mathrm{S} = \frac{1}{\Omega}} \,,$$

$$\text{(11bI)} \quad \boxed{\Omega = \frac{1}{\mathrm{S}}} \,.$$

Deshalb kann im allgemeinen gesagt werden: Fließt durch einen Leiter bei einer bestimmten Spannung ein **großer Strom,** ist die **Leitfähigkeit** des Leiters **groß** und sein Widerstand klein; fließt bei gleicher Spannung durch einen Leiter ein **kleiner Strom,** ist seine **Leitfähigkeit klein** und sein Widerstand groß.

Leitfähigkeit und Strom stehen in direktem Verhältnis.

Ist z. B. der Widerstand eines Leiters 10 Ω, dann ist sein Leitwert:

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

ist der Widerstand eines Leiters 1 MΩ, ist sein Leitwert:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{10^6} = \frac{1}{1\,000\,000} = 10^{-6} = 0{,}000\,001\ \mathrm{S} = 1\ \mu\mathrm{S}^{21)}.$$

Die Maßeinheit „Siemens" ist verhältnismäßig groß, deshalb wurden als kleinere Werte eingeführt:

[20]) *Siemens* zu Ehren Werner von Siemens, eines deutschen Physikers, Erfinders und Industriellen. — In den angelsächsischen Ländern wird der Leitwert in ℧ (sprich „Mho" — Umkehrung von „Ohm") gemessen, um schon durch die Maßeinheit anzudeuten, daß der Leitwert der reziproke — oder umgekehrte — Betrag vom Widerstand ist.

[21]) μS, sprich „Mikro-Siemens", der millionste Teil eines Siemens $= 10^{-6}$ S.

$$\text{(11c)} \quad \boxed{\textbf{Milli-Siemens (mS)} = 0{,}001\ \mathrm{S} = \frac{1}{1000}\ \mathrm{S} = 10^{-3}\ \mathrm{S}} \quad \text{und}$$

$$\text{(11d)} \quad \boxed{\begin{aligned} \textbf{Mikro-Siemens } (\mu\mathrm{S}) &= 0{,}000\,001\ \mathrm{S} = \frac{1}{1\,000\,000}\ \mathrm{S} = 10^{-6}\ \mathrm{S} \\ &= 0{,}001\ \mathrm{mS} = \frac{1}{1000}\ \mathrm{mS} = 10^{-3}\ \mathrm{mS} \end{aligned}} \,.$$

In Anlehnung an die Umwandlung von R nach G ist der Begriff des **spezifischen Leitwerts** $\varkappa$[22]) geschaffen worden. Es ist:

$$\text{(11e)} \quad \boxed{\varkappa = \frac{1}{\varrho}} \,,$$

$$\text{(11f)} \quad \boxed{\varrho = \frac{1}{\varkappa}} \,.$$

Die spezifischen Leitwerte der wichtigsten Leiter sind in der Anlage (Seite 79) aufgeführt.

Die in Ziffer (10) dieses Bandes gefundene Formel (10aI) für die Berechnung von Widerständen kann jetzt also folgende Formen erhalten:

$$\text{(11g)} \quad \boxed{R = \frac{\varrho \times l}{F} = \frac{l}{\varkappa \times F}\,[\Omega]} \,;$$

$$\text{(11h)} \quad \boxed{G = \frac{\varkappa \times F}{l} = \frac{F}{\varrho \times l}\,[\mathrm{S}]} \,.$$

(12) Der Einfluß der Temperatur auf den elektrischen Widerstand

Nicht nur die Länge, der Querschnitt und der spezifische Widerstand (oder der spezifische Leitwert) haben Einfluß auf den elektrischen Widerstand eines Leiters, sondern auch die Temperatur (vgl. Ziffer (9) dieses Bandes). **Bei metallischen Leitern steigt der Widerstand mit zunehmender Temperatur; bei Kohle und flüssigen Widerständen nimmt der Widerstand mit zunehmender Temperatur ab; bei verschiedenen Legierungen ist der Widerstand bei Temperaturänderungen fast konstant** (d. h. gleichbleibend) – z. B. bei Konstantan –.

Wie bei einem Widerstand die Stoffkonstanten ϱ und $\varkappa$ festgelegt worden sind, wurden auch **Stoffkonstanten** ermittelt, **die die Abhängigkeit des Widerstandsstoffes von der Temperatur kennzeichnen.** Diese Stoffkonstanten werden **Temperaturkoëffizienten**[23]) genannt und mit α[24]) bezeichnet.

[22]) $\varkappa$, sprich „Kappa", kleiner griechischer Buchstabe.

[23]) oë, Doppelpunkt über e ist ein „Trema", d. h. sprich o und e getrennt aus.

[24]) α, sprich „Alpha", kleiner griechischer Buchstabe.

Die Temperaturkoëffizienten der wichtigsten Leiter sind in der Anlage (Seite 79) aufgeführt.

α gibt an, um welchen Betrag sich ein Widerstand von 1 Ω bei einer Temperaturänderung von 1° C verändert.

Der Temperaturkoëffizient von Kupfer beträgt z. B. 0,0038, d. h. wird ein Kupferwiderstand von 1 Ω um 1° C erwärmt, beträgt sein Widerstand jetzt 1,0038 Ω. Wird der Kupferwiderstand um 10° C erwärmt, beträgt sein Widerstand $1 + (10 \times 0{,}0038) = 1{,}038$ Ω. Wird ein Kupferwiderstand von 100Ω um 5° C erwärmt, beträgt sein Widerstand jetzt $100 + (100 \times 0{,}0038 \times 5) = 100 + 1{,}9 = 101{,}9$ Ω.

Allgemein:

(12a) $\boxed{R_{\text{warm}} = R_{\text{kalt}} + R_{\text{kalt}} \times \text{Temperaturkoëffizient} \times \text{Temperaturänderung}}$;

(12aI) $\boxed{R_w = R_k + R_k \times \alpha \times (T_w - T_k)}$.

Da die Temperaturänderung $(T_w - T_k)$ auch mit $\Delta\ T$[25]) bezeichnet wird, folgt:

(12aII) $\boxed{R_w = R_k + R_k \times \alpha \times \Delta\ T}$ oder – wenn R_k ausgeklammert wird –

(12aIII) $\boxed{R_w = R_k\ (1 + \alpha \times \Delta\ T)}$.

Beispiel:

Ein Kupferwiderstand mißt bei 20° C $R_k = 300$ Ω; wie groß ist sein Widerstand R_w bei 25° C?

Lösung:

$$\Delta\ T = T_w - T_k = 25° - 20° = 5°\ \text{C};$$
$$R_w = R_k\ (1 + \alpha \times \Delta\ T)$$
$$= 300\ (1 + 0{,}0038 \times 5)$$
$$= 300 \times 1{,}019$$
$$\mathbf{R_w = 305{,}7\ \Omega = rd.\ 306\ \Omega.}$$

(13) Das Ohmsche Gesetz

In einem geschlossenen Stromkreis werden die **Beziehungen zwischen Strom, Spannung und Widerstand** durch das **Ohmsche Gesetz** bestimmt.

Ein geschlossener Stromkreis ist in Abb. 4 dargestellt.

Die Spannungsquelle U liefert die Elektromotorische Kraft (EMK), die über den Widerstand R einen Strom I fließen läßt. Der Widerstand R ist ein **Verbraucher,** z. B. eine Glühlampe, die Wicklung eines Relais, ein Heizwiderstand usw. Um die Beziehungen zwischen Strom, Spannung und Widerstand feststellen zu können, benötigen wir Strom- und Spannungsmesser. Es ist stets darauf zu achten, daß der **Strommesser** (das Amperemeter) **in die Leitung,** der **Spannungsmesser** (das Voltmeter) dagegen **an die Leitung** geschaltet wird (Abb. 5).

[25]) Δ, sprich „Delta“, großer griechischer Buchstabe, das Zeichen für Differenz (Unterschied).

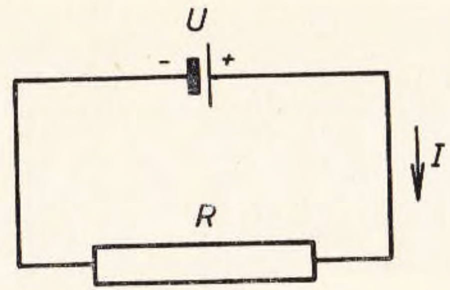


Abb. 4

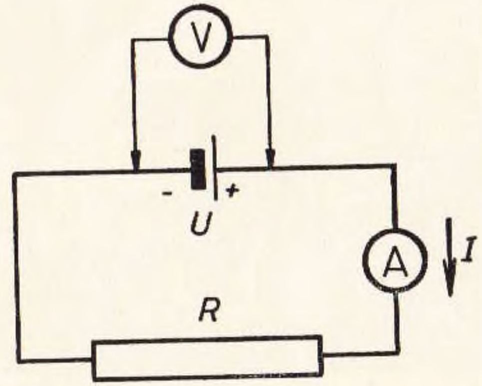


Abb. 5

Zuerst soll die **Beziehung zwischen Strom und Spannung bei konstantem Widerstand** bestimmt werden. Der Widerstand R soll 500 Ω betragen, die Spannung U soll von 0 bis 24 V in Stufen von 2 V zu 2 V regelbar sein, dann ist I in Abhängigkeit von der Spannung U:

R = **konstant** = **500** Ω

U	in V	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
I	in mA	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48

Aus der Tabelle ist zu ersehen, daß der Strom I mit wachsender Spannung U gleichmäßig größer und mit fallender Spannung U gleichmäßig geringer wird. Wird die Tabelle zeichnerisch so ausgewertet, daß die Veränderliche (U) auf der x-Achse (auf der Abszisse), die Abhängige (I) auf der y-Achse (auf der Ordinate) abgetragen wird, ergibt sich die graphische (zeichnerische) Darstellung Abbildung 6. Die gefundene Linie ist eine Gerade, man sagt deshalb, **I und U sind einander linear.**

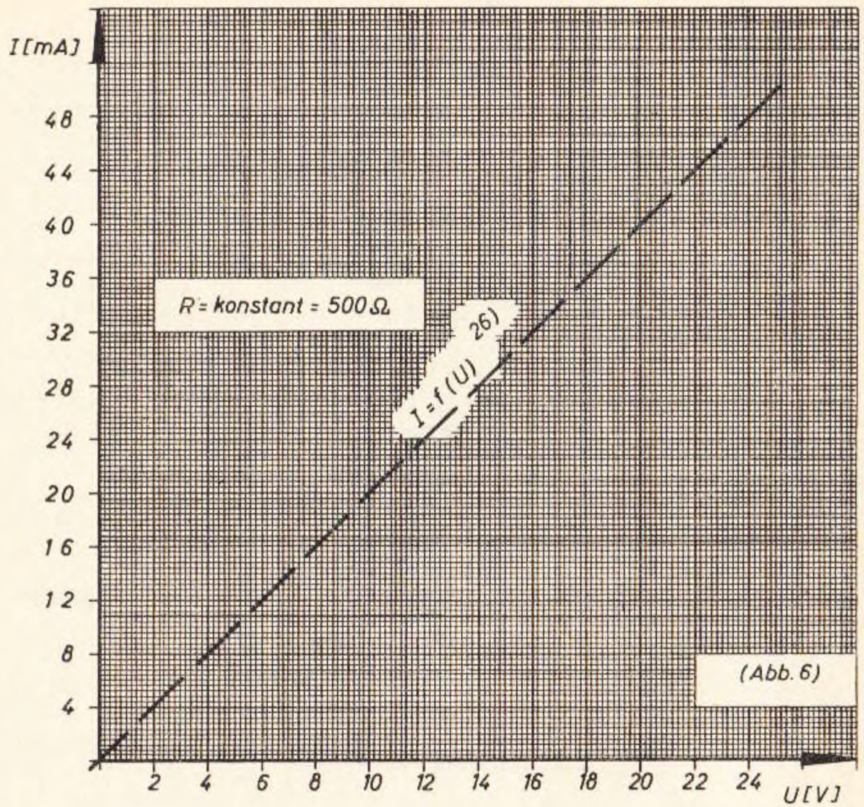


Abb. 6

Wird die **Spannung konstant** gehalten (U = 60 V), kann die **Beziehung zwischen Strom und Widerstand** gefunden werden. Die Werte des Widerstandes R werden von 0 Ω[27]) bis ∞[28]) verändert, für den Strom I ergeben sich dann folgende Werte:

U = **konstant** = **60 V**

R	in Ω	0	10	20	40	60	80	100	300	600	1000	5000	10000	100000	1000000	∞
I	in A	∞	6	3	1,5	1	0,75	0,6	0,2	0,1	0,06	0,012	0,006	0,0006	0,00006	0

Die gefundenen Werte werden wieder zeichnerisch ausgewertet und ergeben die graphische Darstellung Abbildung 7.

26) $I = f\,(U)$, lies: I gleich Funktion von U.
27) $R = 0\,\Omega$, d. h. Kurzschluß.
28) ∞, Zeichen für „Unendlich"; geöffneter Stromkreis.

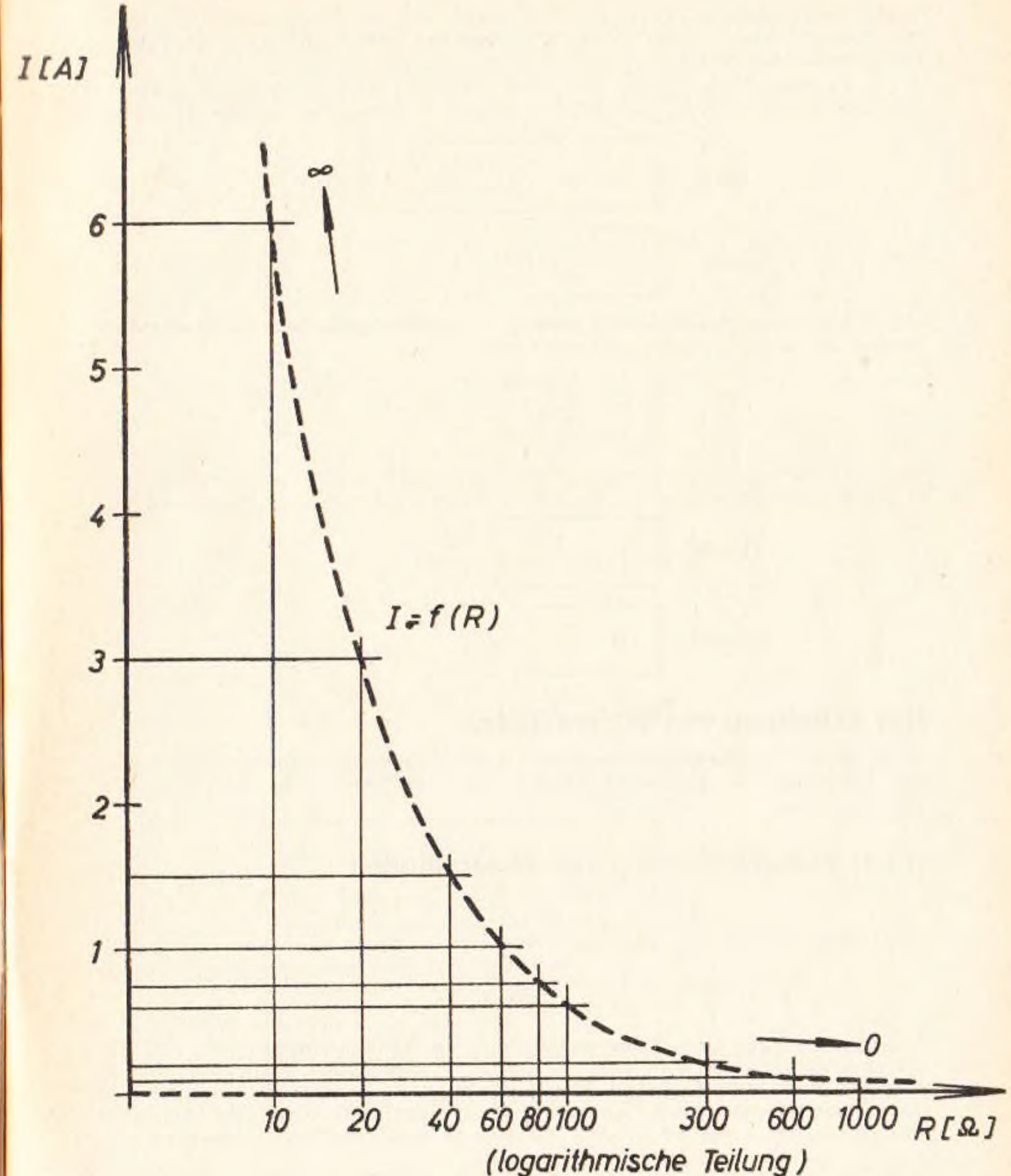


Abb. 7

Tabelle und graphische Darstellung zeigen, daß der Strom I mit größer werdendem Widerstand R kleiner wird. **I und R stehen im umgekehrten (reziproken) Verhältnis zueinander.**

Aus den beiden Feststellungen – I und U stehen in direktem, I und R stehen in umgekehrtem Verhältnis zueinander – folgt das **Ohmsche Gesetz,** es lautet:

(13a) $$\boxed{\text{Strom} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Widerstand}}},$$

(13aI) $$\boxed{I = \frac{U}{R}}$$ [29]).

Der Strom I ist gleich der Spannung U geteilt durch den Widerstand R.

In die Gleichung (13aI) sind stets einzusetzen:

I in Ampere (A),
U in Volt (V),
R in Ohm (Ω).

Durch Umformung können aus der Gleichung (13aI) auch leicht die Werte von U und R gefunden werden:

(13aII) $$\boxed{U = I \times R},$$

(13aIII) $$\boxed{R = \frac{U}{I}}.$$

(14) Schaltung von Widerständen

Widerstände können **hintereinander** (Reihenschaltung), **nebeneinander** (Parallelschaltung) und **gemischt** (Reihen- und Parallelschaltung zusammen) geschaltet werden.

(14.1) Reihenschaltung von Widerständen

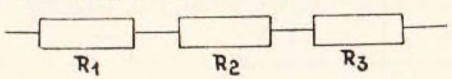


Abb. 8

Abbildung 8 zeigt eine **Reihenschaltung von Widerständen;** hier sind die Widerstände R_1 (50 Ω), R_2 (100 Ω) und R_3 (150 Ω) hintereinander geschaltet. **Alle drei Widerstände** sind aus **Kupferdraht** ($\varrho = 0{,}0176$) hergestellt und haben einen **Durchmesser von 0,15 mm** ($F = 0{,}0176\ \text{mm}^2$). Die Länge l des benötigten Drahtes errechnet sich für die drei Widerstände nach der Formel (10aII):

[29]) Die Beziehungen zwischen Strom, Spannung und Widerstand hat der deutsche Physiker Ohm in dem nach ihm benannten Gesetz im Jahre 1872 ausgedrückt.

$$l = \frac{F \times R}{\varrho}.$$

Somit haben die Drähte der Widerstände folgende Längen:

$$R_1 \to l_1 = \frac{0{,}0176 \times 50}{0{,}0176} = \mathbf{50\ m},$$

$$R_2 \to l_2 = \frac{0{,}0176 \times 100}{0{,}0176} = \mathbf{100\ m},$$

$$R_3 \to l_3 = \frac{0{,}0176 \times 150}{0{,}0176} = \mathbf{150\ m}.$$

Abbildung 8 kann also auch wie Abbildung 9 zeigt dargestellt werden:

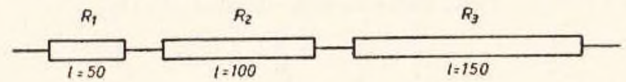


Abb. 9

Der **Draht des Gesamtwiderstandes** hat dann die **Länge:**

$$l_g = l_1 + l_2 + l_3,$$
$$l_g = 50 + 100 + 150 = \mathbf{300\ m}.$$

R_g errechnet sich nach der Formel (10aI):

$$R_g = \frac{\varrho \times l_g}{F},$$

$$R_g = \frac{0{,}0176 \times 300}{0{,}0176} = \mathbf{300\ \Omega}.$$

$R_g = 300\ \Omega$ kann aber auch unmittelbar durch Zusammenzählen der Einzelwiderstände errechnet werden (wobei ϱ und F der einzelnen Widerstände unterschiedlich sein können):

(14.1a) $$\boxed{\begin{aligned} R_g &= R_1 + R_2 + R_3, \\ R_g &= 50 + 100 + 150 = \mathbf{300\ \Omega}. \end{aligned}}$$

Der Gesamtwiderstand R_g ist bei Reihenschaltung von Widerständen gleich der Summe der Einzelwiderstände.

(14.1b) $$\boxed{R_g = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots\ldots + R_n},$$

(14.1c) $$\boxed{R_g = \Sigma R}$$ [30]).

[30]) Σ, Sigma, großer griechischer Buchstabe, mathematisches Kurzzeichen für „Summe"; lies hier: R Gesamt ist gleich der Summe aller R.

(14.2) Parallelschaltung von Widerständen

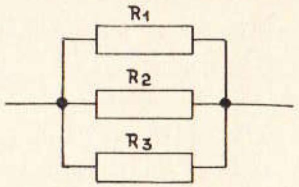


Abb. 10

Abbildung 10 zeigt eine **Parallelschaltung von Widerständen,** hier sind die Widerstände R_1 (80 Ω), R_2 (100 Ω) und R_3 (400 Ω) nebeneinander geschaltet. Wir nehmen an, daß **alle drei Widerstände aus Konstantan** ($\varrho = 0{,}5$) hergestellt sind und **gleiche Länge** ($l = 56$ m) haben. Dann errechnet sich der Querschnitt F der einzelnen Drähte nach der Formel (10aII):

$$F = \frac{\varrho \times l}{R}.$$

Somit haben die Drähte der drei Widerstände folgende Querschnitte:

$$R_1 \to F_1 = \frac{56 \times 0{,}5}{80} = \mathbf{0{,}35\ mm^2},$$

$$R_2 \to F_2 = \frac{56 \times 0{,}5}{100} = \mathbf{0{,}28\ mm^2},$$

$$R_3 \to F_3 = \frac{56 \times 0{,}5}{400} = \mathbf{0{,}07\ mm^2}.$$

Abbildung 10 kann also auch wie Abbildung 11 zeigt dargestellt werden:

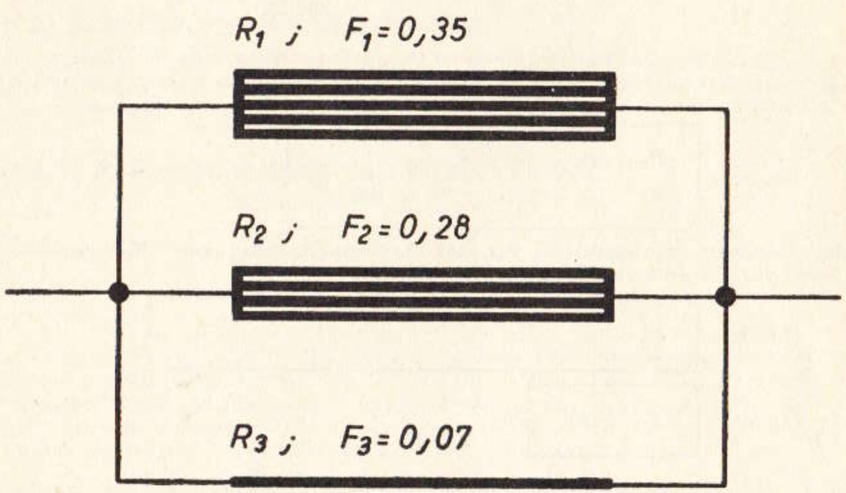


Abb. 11

Der **Ersatzwiderstand** R_e, d. h. der Widerstand, der ersatzweise für die Parallelschaltung geschaltet werden kann, muß also bei gleichem ϱ und gleichem l einen **Querschnitt** F_e haben, der gleich der Summe der Einzelquerschnitte ist:

$$F_e = \Sigma F,$$

$$F_e = F_1 + F_2 + F_3,$$

$$F_e = 0{,}35 + 0{,}28 + 0{,}07 = \mathbf{0{,}7\ mm^2}.$$

Demnach errechnet sich der **Ersatzwiderstand** R_e nach der Formel (10aI):

$$R_e = \frac{\varrho \times l}{F_e},$$

$$R_e = \frac{0{,}5 \times 56}{0{,}7} = \mathbf{40\ \Omega}.$$

Nach der Formel (11h) errechnet sich der Leitwert eines Widerstandes:

$$G = \frac{F}{\varrho \times l}.$$

Ist ϱ und l – wie in unserem Beispiel – konstant, ist der **Leitwert** G **eines Widerstandes dem Querschnitt** F **direkt proportional.** In der Formel

$$F_e = F_1 + F_2 + F_3$$

kann also für F ohne weiteres G gesetzt werden, dann gilt:

$$\textbf{(14.2a)} \quad \boxed{G_e = G_1 + G_2 + G_3}\ .$$

Nach Formel (11a) ist aber $G = \frac{1}{R}$, folglich:

$$G_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{80} = \mathbf{0{,}0125\ S},$$

$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{100} = \mathbf{0{,}01\ S},$$

$$G_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{400} = \mathbf{0{,}0025\ S}.$$

Also ist:

$$G_e = 0{,}0125 + 0{,}01 + 0{,}0025 = \mathbf{0{,}025\ S}.$$

Demnach errechnet sich der **Ersatzwiderstand** R_e nach Formel (11b):

$$R_e = \frac{1}{G_e},$$

$$R_e = \frac{1}{0{,}025} = \mathbf{40\ \Omega}.$$

Der Ersatzleitwert G_e ist bei Parallelschaltung von Widerständen gleich der Summe der Einzelleitwerte.

$$\textbf{(14.2b)} \quad \boxed{G_e = G_1 + G_2 + G_3 + \ldots\ldots + G_n},$$

$$\textbf{(14.2c)} \quad \boxed{G_e = \Sigma G}$$ [31]).

Da nach der Formel (11a) $G = \frac{1}{R}$ ist, können die Gleichungen (14.2b) und (14.2c) umgewandelt werden in:

$$\textbf{(14.2d)} \quad \boxed{\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots\ldots\ldots + \frac{1}{R_n}},$$

$$\textbf{(14.2e)} \quad \boxed{\frac{1}{R_e} = \Sigma\,\frac{1}{R}}.$$

Um die in diesem Abschnitt gefundenen Gesetze zu erläutern, sollen einige Beispiele gerechnet werden:

Beispiel 1:

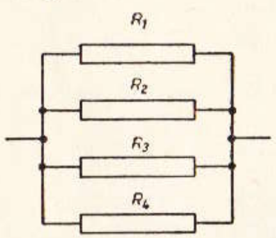


Abb. 12

Gegeben:
$R_1 = 20\,\Omega$
$R_2 = 50\,\Omega$
$R_3 = 75\,\Omega$
$R_4 = 150\,\Omega$

Gesucht:
$R_e = ?$

Lösung zu 1:

$$G_e = \Sigma G,$$
$$G_e = G_1 + G_2 + G_3 + G_4,$$
$$= \frac{1}{20} + \frac{1}{50} + \frac{1}{75} + \frac{1}{150}, \quad /\ \text{HN: } 300^{32)}$$
$$= \frac{15 + 6 + 4 + 2}{300},$$
$$= \frac{27}{300},$$
$$= \mathbf{0{,}09\ S.}$$

[31]) Vgl. Formel (14.1c) dieses Bandes.
[32]) HN: 300 = Hauptnenner gleich 300 (vgl. „Rechenlehre").

$$R_e = \frac{1}{G_e},$$
$$= \frac{1}{0{,}09} = \mathbf{11{,}1\ \Omega};$$
$$= \frac{300}{27} = \mathbf{11{,}1\ \Omega}.$$

Wie aus dem Beispiel 1 zu ersehen ist, braucht nicht der G_e in S ausgerechnet zu werden, für die Umrechnung von G_e in R_e genügt der ermittelte Bruch (hier: $\frac{27}{300}$), der dann einfach reziprok gesetzt wird (hier: $\frac{300}{27}$).

Beispiel 2:

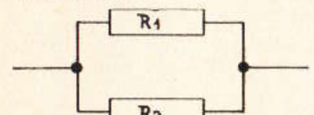


Abb. 13

Gegeben:
$R_1 = 24\,\Omega$
$R_2 = 36\,\Omega$

Gesucht:
$R_e = ?$

Lösung a zu 2:

$$G_e = \Sigma G,$$
$$G_e = G_1 + G_2,$$
$$= \frac{1}{24} + \frac{1}{36}, \quad /\ \text{HN: } 72$$
$$= \frac{3+2}{72},$$
$$= \mathbf{\frac{5}{72}};$$
$$R_e = \frac{1}{G_e},$$
$$= \frac{1}{\frac{5}{72}},$$
$$= \frac{72}{5},$$
$$= \mathbf{14{,}4\ \Omega}.$$

Lösung b zu 2:

$$G_e = \Sigma G,$$
$$G_e = G_1 + G_2,$$
$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \quad /\ \text{HN: } R_1 \times R_2$$
$$\frac{1}{R_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \times R_2},$$

$$R_e = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2},$$

$$R_e = \frac{24 \times 36}{24 + 36},$$

$$= \frac{864}{60},$$

$$= \mathbf{14{,}4\ \Omega}.$$

Der Ersatzwiderstand zweier parallel geschalteter Widerstände errechnet sich aus der Formel:

$$(14.2f) \quad \boxed{R_e = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}} \text{ [33]}.$$

Beispiel 3:

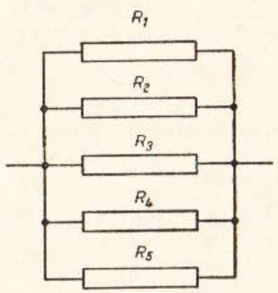


Abb. 14

Gegeben: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 300\ \Omega$; d. h. alle Widerstände betragen 300 Ω.

Gesucht: $R_e = ?$

Lösung a zu 3: $G_e = \Sigma G,$

$$G_e = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5,$$

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5},$$

$$= \frac{1}{300} + \frac{1}{300} + \frac{1}{300} + \frac{1}{300} + \frac{1}{300}, \quad /\ \text{HN: } 300$$

$$= \frac{1+1+1+1+1}{300},$$

$$= \frac{5}{300},$$

$$R_e = \frac{300}{5} = \mathbf{60\ \Omega}.$$

[33] Diese Formel ist eine *Sonderformel*, sie *gilt nur für die Parallelschaltung zweier Widerstände;* die Formel braucht nicht auswendig gelernt zu werden, weil sie jederzeit entwickelt werden kann.

Sind mehrere gleich große Widerstände parallel geschaltet, errechnet sich der Ersatzwiderstand durch Division nur eines Widerstandes durch die Anzahl (n) der parallel geschalteten Widerstände.

$$(14.2g) \quad \boxed{R_e = \frac{R}{n}} \text{ [34]}.$$

Lösung b zu 3:

$$R_e = \frac{R}{n},$$

$$= \frac{300}{5},$$

$$= \mathbf{60\ \Omega}.$$

Die drei vorstehenden Beispiele ergeben einen **Merksatz,** der bei der Berechnung parallel geschalteter Widerstände immer zu beachten ist:
Bei der Parallelschaltung von Widerständen ist der Ersatzwiderstand stets kleiner als der kleinste Einzelwiderstand.

$$(14.2h) \quad \boxed{R_e < \text{kleinster } R!} \text{ [35]}.$$

(14.3) Gemischte Schaltung von Widerständen

In der Praxis kommen am meisten gemischte Widerstandsschaltungen vor; sie stellen eine Verbindung zwischen Reihenschaltungen und Parallelschaltungen dar. Alle gemischten Schaltungen können anhand der Formeln (14.1c) und (14.2c) berechnet werden.

Beispiel 1:

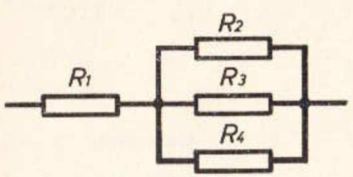


Abb. 15

Gegeben:

$R_1 = 36\ \Omega$
$R_2 = 75\ \Omega$
$R_3 = 120\ \Omega$
$R_4 = 180\ \Omega$

Gesucht:

$R_g = ?$

Lösung zu 1:

Zuerst wird R_e der parallel geschalteten Widerstände errechnet:

$$G_e = \Sigma G,$$

$$G_e = G_2 + G_3 + G_4,$$

[34] Auch diese Formel ist eine *Sonderformel*, sie *gilt nur* für die *Parallelschaltung gleichgroßer Widerstände;* auch diese Formel braucht nicht auswendig gelernt zu werden.
[35] <, kleiner als.

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4},$$

$$= \frac{1}{75} + \frac{1}{120} + \frac{1}{180}, \qquad / \text{ HN: } 1800$$

$$= \frac{24 + 15 + 10}{1800},$$

$$= \frac{49}{1800};$$

$$R_e = \frac{1800}{49},$$

$$R_e = \mathbf{36{,}7\ \Omega}.$$

R_e liegt in Reihe mit R_1 (s. Abb. 16), folglich ist:

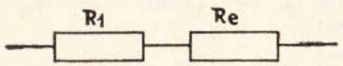


Abb. 16

$$R_g = \Sigma R,$$

$$= R_1 + R_e,$$

$$= 36 + 36{,}7,$$

$$R_g = \mathbf{72{,}7\ \Omega,\ rd.\ 73\ \Omega}.$$

Beispiel 2:

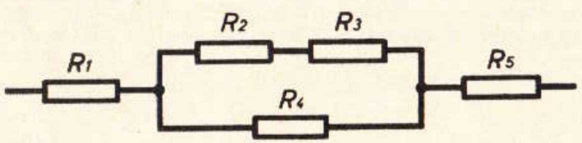


Abb. 17

Gegeben:

$R_1 = 80\ \Omega$
$R_2 = 60\ \Omega$
$R_3 = 100\ \Omega$
$R_4 = 160\ \Omega$
$R_5 = 240\ \Omega$

Gesucht:

$R_g = ?$

Lösung zu 2:

Zuerst wird R_{g1} der Reihenschaltung R_2/R_3 ausgerechnet:

$$R_g = \Sigma R,$$

$$R_{g1} = R_2 + R_3,$$

$$= 60 + 100,$$

$$R_{g1} = \mathbf{160\ \Omega};$$

R_{g1} liegt parallel zu R_4; da $R_{g1} = R_4 = 160\ \Omega$ ist, ist R_e der Parallelschaltung:

$$R_e = \frac{R}{n},$$

$$= \frac{160}{2},$$

$$R_e = \mathbf{80\ \Omega};$$

R_e liegt in Reihe mit R_1 und R_5, es folgt:

$$R_g = \Sigma R,$$

$$= R_1 + R_e + R_5,$$

$$= 80 + 80 + 240,$$

$$R_g = \mathbf{400\ \Omega}.$$

Beispiel 3:

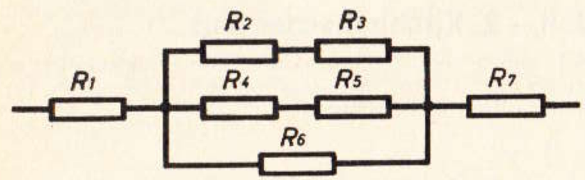


Abb. 18

Gegeben:

$R_g = 500\ \Omega$
$R_1 = 100\ \Omega$
$R_2 = 800\ \Omega$
$R_3 = 600\ \Omega$
$R_4 = 1200\ \Omega$
$R_6 = 420\ \Omega$
$R_7 = 120\ \Omega$

Gesucht:

$R_5 = ?$

Lösung zu 3:

1)
$$R_g = R_1 + R_e + R_7;$$

$$R_e = R_g - (R_1 + R_7),$$

$$= 500 - (100 + 120),$$

$$= 500 - 220,$$

$$R_e = \mathbf{280\ \Omega};$$

2)
$$R_{g1} = R_2 + R_3,$$

$$= 800 + 600,$$

$$R_{g1} = \mathbf{1400\ \Omega};$$

3)
$$G_e = G_{g1} + G_{g2} + G_6;$$

$$G_{g2} = G_e - (G_{g1} + G_6);$$

$$\frac{1}{R_{g2}} = \frac{1}{R_e} - \left(\frac{1}{R_{g1}} + \frac{1}{R_6}\right),$$

$$= \frac{1}{280} - \left(\frac{1}{1400} + \frac{1}{420}\right), \qquad / \text{ HN: } 4200$$

$$\frac{1}{R_{g2}} = \frac{15 - (3 + 10)}{4200},$$
$$= \frac{15 - 13}{4200},$$
$$= \frac{2}{4200};$$
$$R_{g2} = \frac{4200}{2},$$
$$R_{g2} = \mathbf{2100\ \Omega}.$$

4) $R_{g2} = R_4 + R_5;$
$$R_5 = R_{g2} - R_4,$$
$$= 2100 - 1200,$$
$$R_5 = \mathbf{900\ \Omega}.$$

(15) Spannungsabfall – 2. Kirchhoffscher Satz [36])

In Abbildung 8 (Ziffer 14.1) wurde eine Reihenschaltung von Widerständen berechnet. Diese Reihenschaltung soll an einer Spannung von 60 V liegen (Abb. 19); der Strom I und die Spannungen sind zu berechnen.

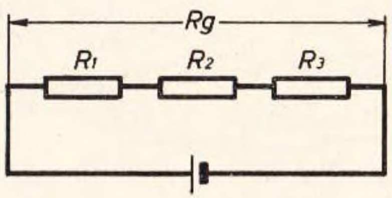


Abb. 19

Gegeben:	Gesucht:
$R_1 = 50\ \Omega$	
$R_2 = 100\ \Omega$	
$R_3 = 150\ \Omega$	$I = ?$
$R_g = 300\ \Omega$[37])	
$U = 60\ \text{V}$	

Nach dem Ohmschen Gesetz (Formel 13aI) ist:

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

hier $$I = \frac{U}{R_g},$$
$$= \frac{60}{300},$$
$$I = \mathbf{0{,}2\ A}.$$

[36]) Aus lehrmäßigen Gründen wird hier der 2. Kirchhoffsche Satz vor dem 1. Kirchhoffschen Satz behandelt (vgl. auch Ziffer 17).

[37]) Siehe Berechnung zu Abb. 8 (Seiten 20 und 21).

Da bei einer Reihenschaltung der Strom I sich nicht verzweigt, ist I an allen Punkten des Stromkreises gleich groß (Abb. 20).

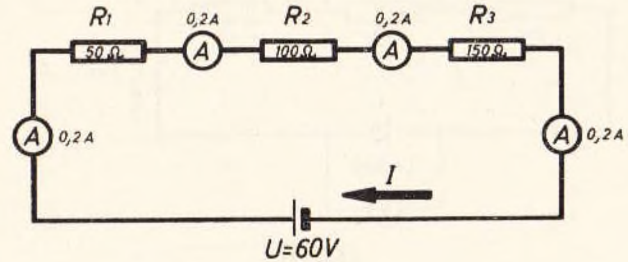


Abb. 20

Das Ohmsche Gesetz gilt nicht nur für einen geschlossenen Stromkreis, vielmehr können mit dem Ohmschen Gesetz auch Teile eines Stromkreises berechnet werden. Im Beispiel nach Abb. 19 können nach dem Ohmschen Gesetz auch die Spannungen über den einzelnen Widerständen errechnet werden. Da der Strom I an allen Punkten eines unverzweigten Stromkreises gleich groß ist, fließt durch jeden Widerstand der obigen Schaltung der Strom I = 0,2 A. Folglich errechnen sich die Spannungen über den einzelnen Widerständen nach der Formel (13aII):

$$U \text{ über } R_1 \rightarrow U_1 = I \times R_1 = 0{,}2 \times 50 = \mathbf{10\ V},$$
$$U \text{ über } R_2 \rightarrow U_2 = I \times R_2 = 0{,}2 \times 100 = \mathbf{20\ V},$$
$$U \text{ über } R_3 \rightarrow U_3 = I \times R_3 = 0{,}2 \times 150 = \mathbf{30\ V};$$
$$U \text{ über } R_g \rightarrow U_g = I \times R_g = 0{,}2 \times 300 = \mathbf{60\ V}.$$

Werden die Spannungen über den einzelnen Widerständen addiert, so folgt:

$$U_1 + U_2 + U_3 = 10 + 20 + 30 = 60\ \text{V} = U = U_g, \text{ also}$$

$$\text{(15a)} \quad \boxed{U_g = U_1 + U_2 + U_3}\ .$$

Wir sehen also, daß sich die **Gesamtspannung** (U oder auch U_g – das ist die Spannung, die an der gesamten Widerstandsanordnung anliegt –) sich **aufteilt in die Teilspannungen** U_1, U_2 und U_3 (Abb. 21).

Die über den einzelnen Widerständen herrschenden Spannungen (hier: U_1, U_2 und U_3) sind die Elektromotorischen Kräfte[38]), die den Strom I durch die Widerstände R treiben. Diese Spannungen gehen dabei verloren – sie fallen über den Widerständen ab –, deshalb werden sie **Spannungsabfall** oder **Verlustspannung** (U_v) genannt.

[38]) Vgl. Ziffer 13.

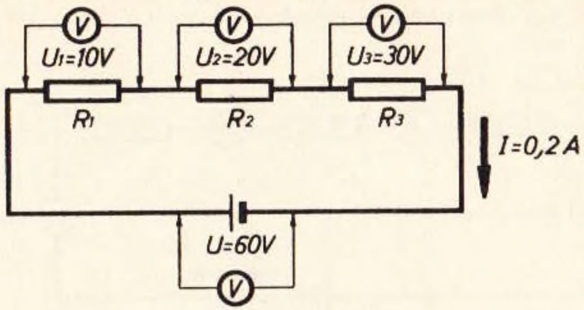


Abb. 21

Der Begriff „**Spannungsabfall**" soll anhand folgender Beispiele erläutert werden (Abbildungen 22 bis 25):

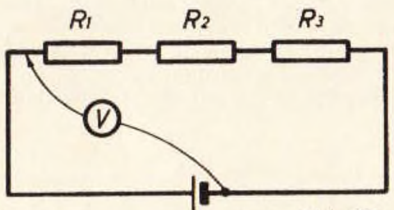


Abb. 22

Das Voltmeter zeigt die **volle Spannung von 60 V** an, weil noch keine Spannung abgefallen oder verbraucht ist.

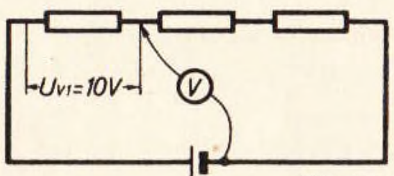


Abb. 23

Das Voltmeter zeigt die Spannung U^{I} = **50 V** an, weil über dem Widerstand R_1 der Spannungsverlust U_{v1} = **10 V** abgefallen ist $[U^{I} = U - U_{v1}]$.

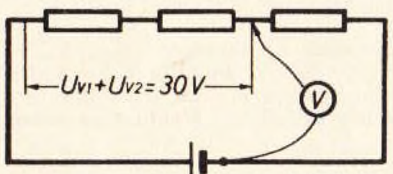


Abb. 24

Das Voltmeter zeigt die Spannung U^{II} = **30 V** an, weil über den Widerständen R_1 und R_2 der Spannungsverlust $U_{v1} + U_{v2} = 10 + 20 =$ **30 V** abgefallen ist $[U^{II} = U - (U_{v1} + U_{v2})]$.

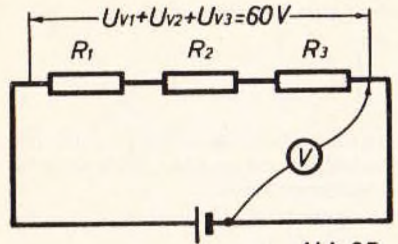


Abb 25

Das Voltmeter zeigt die Spannung U^{III} = **0 V** an, weil die gesamte am Stromkreis anliegende Spannung über den Widerständen R_1, R_2 und R_3 abgefallen ist (Spannungsverlust $U_{v1} + U_{v2} + U_{v3} = 10 + 20 + 30 = 60$ V). $[U^{III} = U - (U_{v1} + U_{v2} + U_{v3})]$.

Aus den Beispielen (Abb. 22 bis 25) folgt:

(15b) $\boxed{U = U_{v1} + U_{v2} + U_{v3}}$;

(15bI) $\boxed{U = \Sigma U_v}$.

Die **60-V-Batterie** besteht aber **aus 30 hintereinander geschalteten Einzelzellen,** von denen jede eine Spannung von 2 V hat (Hintereinanderschaltung von Elementen[39]), folglich kann die Schaltung in Abb. 19 auch wie in Abb. 26 gezeigt dargestellt werden.

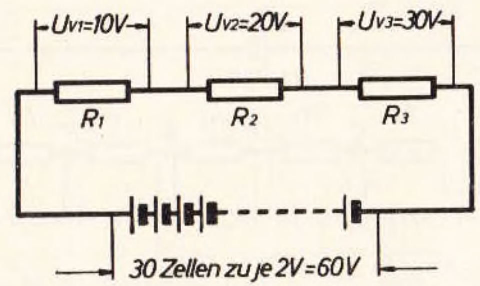


Abb. 26

Auf Grund dieser Darstellung kann gesagt werden, daß die anliegende Spannung U sich aus mehreren Einzelspannungen zusammensetzt, deren Summe (ΣU) der Gesamtspannung ($U = 60$ V) entspricht. Die Formel (15bI) kann also umgewandelt werden in:

(15bII) $\boxed{\Sigma U = \Sigma U_v}$.

Weiter ist nach dem Ohmschen Gesetz (Formel 13aII) $U = I \times R$, für die Verlustspannungen gilt also (vgl. auch Seite 33):

$$U_{v1} = I \times R_1,$$
$$U_{v2} = I \times R_2,$$
$$U_{v3} = I \times R_3.$$

[39]) Vgl. Ziffer 27, 1.

In die Formel (15bII) kann folglich für U_v auch $I \times R$ eingesetzt werden:

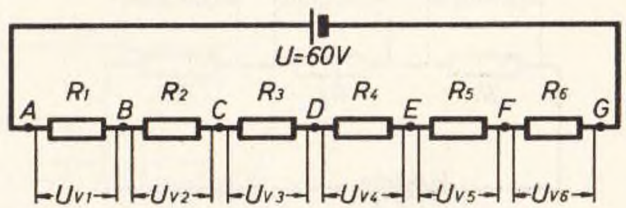
$$\text{(15bIII)} \qquad \boxed{\Sigma U = \Sigma I \times R} \; .$$

Die vorstehende Gleichung stellt den **2. Kirchhoffschen Satz** dar; er lautet: **In jedem in sich geschlossenen Stromkreis ist die Summe aller anliegenden Spannungen gleich der Summe aller Spannungsverluste.**
Werden die anliegenden Spannungen mit Plus (+) und die abfallenden Spannungen (Spannungsverluste) mit Minus (—) bezeichnet, folgt:

$$\text{(15bIV)} \qquad \boxed{\begin{aligned} \Sigma U - \Sigma U_v &= 0, \\ \Sigma U &= 0 \end{aligned}} \; .$$

(15.1) Rechnerische und zeichnerische Darstellung des Spannungsabfalls

Abbildung 27 stellt einen Widerstand von $R_g = 60\,\Omega$ dar, der von $10\,\Omega$ zu $10\,\Omega$ unterteilt ist. Die Spannung U über dem Gesamtwiderstand beträgt 60 V, der Strom I nach dem Ohmschen Gesetz (13aI) $I = \frac{U}{R_g} = \frac{60}{60} = 1$ A.



$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 10\,\Omega$

$R_g = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 = 60\,\Omega$

$U_{v1} = U_{v2} = U_{v3} = U_{v4} = U_{v5} = U_{v6} = 10$ V

$U = U_{v1} + U_{v2} + U_{v3} + U_{v4} + U_{v5} + U_{v6} = 60$ V

Abb. 27

Nach dem Beispiel in Ziffer 15 herrscht zwischen den Punkten A und G die Gesamtspannung $U = U_A = 60$ V;
zwischen den **Punkten B und G** die Spannung

$U_B = U - I \times R_1 = 60 - 1 \times 10 = \mathbf{50\ V}$;

zwischen den **Punkten C und G** die Spannung

$U_C = U - I\,(R_1 + R_2) = 60 - 1\,(10 + 10) = \mathbf{40\ V}$;

zwischen den **Punkten D und G** die Spannung

$U_D = U - I\,(R_1 + R_2 + R_3) = 60 - 1\,(10 + 10 + 10) = \mathbf{30\ V}$;

zwischen den **Punkten E und G** die Spannung

$U_E = U - I\,(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) = 60 - 1\,(10 + 10 + 10 + 10) = \mathbf{20\ V}$;

zwischen den **Punkten F und G** die Spannung

$U_F = U - I\,(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5) = 60 - 1\,(10 + 10 + 10 + 10 + 10) = \mathbf{10\ V}$;

werden beide Klemmen des Voltmeters an den **Punkt G** gelegt, zeigt der Spannungsmesser die Spannung $U_G = \mathbf{0\ V}$ an

[$U_G = U - I\,(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6) = 60 - 1\,(10 + 10 + 10 + 10 + 10 + 10) = 0$ V].

Umgekehrt kann auch gesagt werden, daß zwischen den **Punkten A und B** der Spannungsabfall $U_{v1} = \mathbf{10\ V}$, zwischen den **Punkten A und C** der Spannungsabfall $U_{v2} = \mathbf{20\ V}$, zwischen den **Punkten A und D** der Spannungsabfall $U_{v3} = \mathbf{30\ V}$ usw., schließlich zwischen den **Punkten A und G** der Spannungsabfall $U_{v6} = \mathbf{60\ V}$ ($U_{v6} = U$!) verlorengeht.

Die ermittelten Werte sind in nachstehender Tabelle zusammengefaßt:

U = **konstant = 60 V; I = konstant = 1 A**

Widerstand R	in Ω	0	10	20	30	40	50	60
Restspannung		U_A	U_B	U_C	U_D	U_E	U_F	U_G
	in V	60	50	40	30	20	10	0
Spannungsabfall		U_{v0}	U_{v1}	U_{v2}	U_{v3}	U_{v4}	U_{v5}	U_{v6}
	in V	0	10	20	30	40	50	60

Die gefundenen Werte ergeben die graphische Darstellung (Abb. 28).

Die gefundenen Kurven (Abb. 28 und 29) zeigen, daß **über einem Draht** (ϱ und F = konstant) **der Spannungsabfall U_v linear der Länge des Drahtes ist.** Wir ersehen aus der Tabelle und aus der graphischen Darstellung, daß die Spannung von ihrem Höchstwert (hier 60 V) über den Widerstand (hier 60 Ω) gleichmäßig bis zum Wert 0 V abfällt.

In einem in sich geschlossenen Stromkreis fällt die Spannung stets von ihrem Höchstwert auf den Wert 0 ab.

Weiter zeigen uns die Tabelle und die graphische Darstellung (Abb. 28), daß z. B. über dem Widerstand $R = 60\,\Omega$ die Spannung $U_{v6} = 60$ V abfällt, über dem Widerstand $R = 40\,\Omega$ fällt die Spannung $U_{v4} = 40$ V ab und über dem Widerstand $R = 10\,\Omega$ die Spannung $U_{v1} = 10$ V. Deshalb gilt:

In einem in sich geschlossenen Stromkreis verhalten sich die Spannungsabfälle wie die zugehörigen Widerstände (Abb. 30).

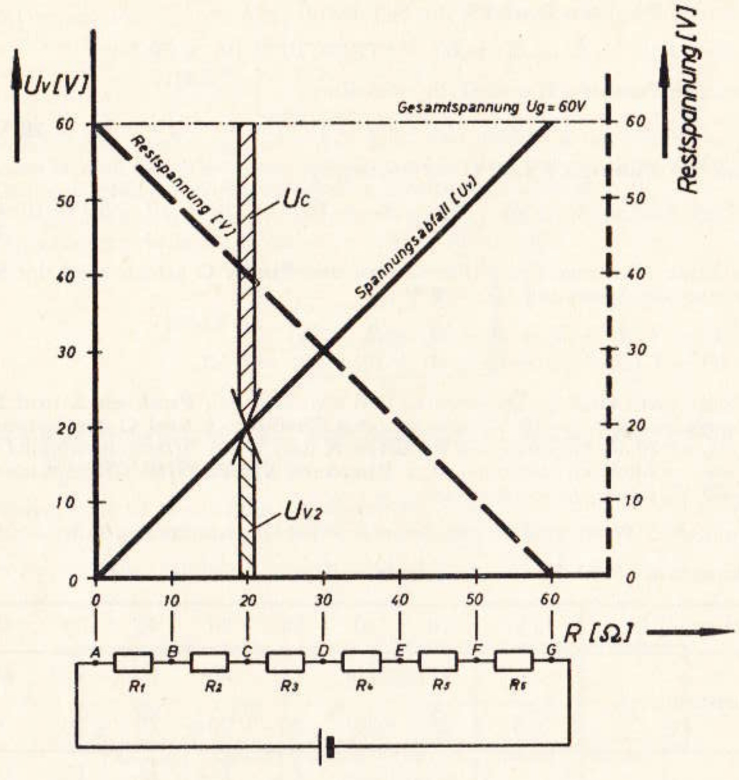


Abb. 28

(15.1a) $\boxed{U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3}$.

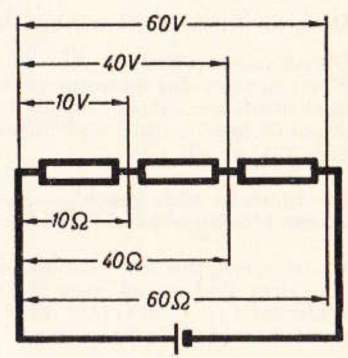


Abb. 30

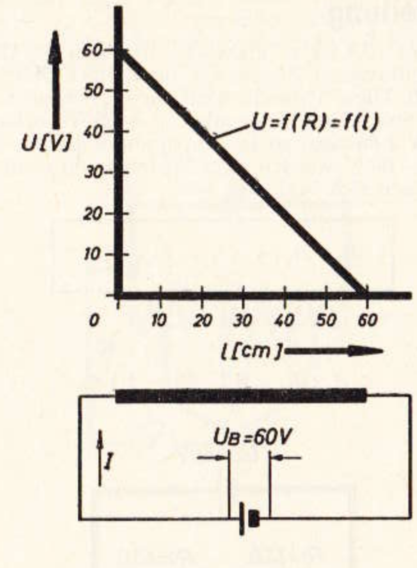


Abb. 29

Die gefundenen Beziehungen zwischen Spannungsabfall und Widerstand sollen auf die Schaltung nach Abbildung 19 angewendet werden; dann folgt:

$$
\begin{aligned}
R_1 &= 50\,\Omega \rightarrow & U_1 &= 10\text{ V},\\
R_2 &= 100\,\Omega \rightarrow & U_2 &= 20\text{ V},\\
R_3 &= 150\,\Omega \rightarrow & U_3 &= 30\text{ V},\\
R_4 = R_1 + R_3 &= 200\,\Omega \rightarrow & U_4 = U_1 + U_3 &= 40\text{ V},\\
R_5 = R_2 + R_3 &= 250\,\Omega \rightarrow & U_5 = U_2 + U_3 &= 50\text{ V},\\
R_6 = R_1 + R_2 + R_3 &= 300\,\Omega \rightarrow U_6 = & U_1 + U_2 + U_3 &= 60\text{ V}.
\end{aligned}
$$

Nach der Formel (15.1a) ist dann:

$$U_1 : U_2 : U_3 : U_4 : U_5 : U_6 = R_1 : R_2 : R_3 : R_4 : R_5 : R_6,$$
$$10 : 20 : 30 : 40 : 50 : 60 = 50 : 100 : 150 : 200 : 250 : 300.$$

Zur besseren Veranschaulichung soll jeder Wert der rechten Seite der Gleichung durch 5 dividiert werden, dann folgt:

$$10 : 20 : 30 : 40 : 50 : 60 = 10 : 20 : 30 : 40 : 50 : 60.$$

Diese Reihe zeigt, daß sich **die Spannungsabfälle wie die Widerstände verhalten.**

(16) Spannungsteilung

Aus den Ziffern 15 und 15.1 ist zu erkennen, daß sich die Gesamtspannung, die an einem in sich geschlossenen Stromkreis liegt, über den Teilwiderständen in Teilspannungen aufteilt. Diese Tatsache wird zur sogenannten **Spannungsteilung** benutzt. Ist z. B. eine Spannungsquelle mit U_g = **60 V** vorhanden und wird eine Spannung U_1 = **48 V** benötigt, so ist ein Spannungsteiler erforderlich. An die Spannungsquelle U_g = 60 V werden zwei Widerstände nach Abb. 31 geschaltet; diese Widerstände müssen sich verhalten wie

(16a) $$\boxed{R_1 : R_2 = (U_g - U_2) : U_2},$$

in unserem Beispiel:

$$R_1 : R_2 = (60 - 48) : 48,$$
$$R_1 : R_2 = 12 : 48 = \mathbf{1 : 4}.$$

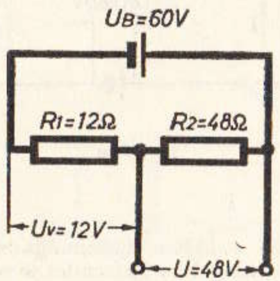


Abb. 31

Hier sind der Einfachheit halber die Widerstände zu R_1 = 12 Ω und R_2 = 48 Ω gewählt worden; selbstverständlich sind auch andere Widerstände möglich, wenn sie im Verhältnis wie 1:4 liegen, also

R_1 =	1 Ω	R_2 =	4 Ω
	2 Ω		8 Ω
	3 Ω		12 Ω
	4 Ω		16 Ω
	.		.
	.		.
	.		.
	24 Ω		96 Ω
	50 Ω		200 Ω
	250 Ω		1000 Ω
	usw.		usw.

Ein **Schiebewiderstand** (ein auf einen Keramikkörper aufgewickelter Widerstandsdraht) ermöglicht es, zwischen dem einen Endpunkt des Widerstandes und dem Schieber **jede gewünschte Spannung zwischen 0 V und der anliegenden Gesamtspannung** abzugreifen.

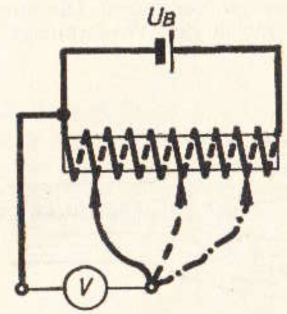


Abb. 32

Die gewünschte Spannung kann selbstverständlich auch zwischen zwei beliebigen Punkten des Widerstandes abgegriffen werden (Abb. 33). **Immer gilt, die abgegriffene Teilspannung ist gleich dem Produkt $I \times R$.**

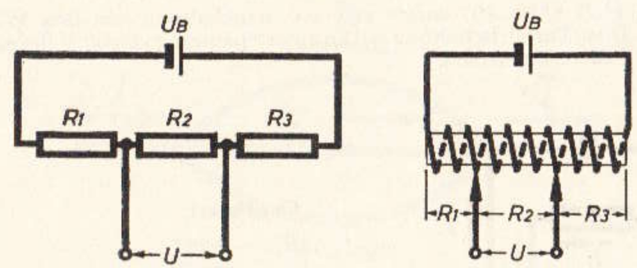


Abb. 33

Die errechnete Spannung kann nur dann abgegriffen werden, wenn über den angeschalteten Zweig kein Strom fließt. Der angeschaltete Widerstand muß also unendlich groß (z. B. offene Klemmen) oder mindestens sehr groß (z. B. innerer Widerstand eines Spannungsmessers) gegenüber dem Teilwiderstand sein, über dem die Spannung abgegriffen wird. Die Spannungsteilung mit Belastung, d. h. der angeschlossene Verbraucher hat einen endlichen Widerstand, wird in Ziffer (19) besprochen werden.

(17) Stromverzweigungen – 1. Kirchhoffscher Satz

In Ziffer (15) (Abb. 20) ist bereits gesagt worden, daß in einem unverzweigten Stromkreis der Strom I an allen Punkten des Stromkreises gleich groß ist: bei **Stromverzweigungen** verhält es sich **nicht** so.

In Abb. 34 ist ein Fluß dargestellt, der sich wegen einer Insel verzweigen muß. Der Hauptstrom teilt sich dabei in die Zweigströme I und II auf, die sich hinter der Insel wieder zum Hauptstrom vereinigen. Die Summe der Wassermengen der beiden Teilströme ist also gleich der Wassermenge des zu- und abfließenden Hauptstromes.

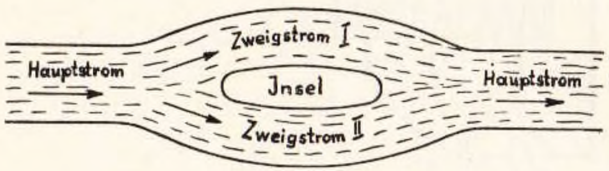


Abb. 34

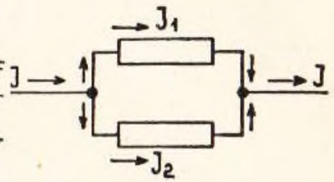


Abb. 35

Bei dem elektrischen Strom, der als Fluß einer Elektrizitätsmenge angesehen werden kann, sind die Vorgänge ähnlich. In Abbildung 35 ist eine einfache Stromverzweigung dargestellt; auch hier teilt sich der Hauptstrom (der Gesamtstrom) I in die beiden Teilströme I_1 und I_2 auf, die sich nach der Widerstandsverzweigung wieder zum Hauptstrom (Gesamtstrom) I vereinigen. Je mehr Widerstände parallel geschaltet sind, um so öfter verzweigt sich der Gesamtstrom I.

In Ziffer (14.2) (Abb. 10) wurde eine Parallelschaltung von drei Widerständen berechnet. Diese Parallelschaltung soll an einer Spannung von 60 V liegen (Abb.36); der Strom I ist zu berechnen.

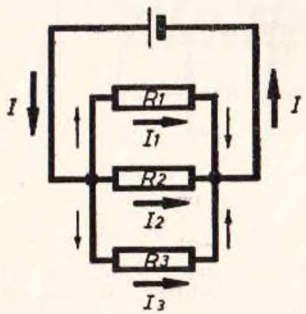


Abb. 36

Gegeben:	Gesucht:
$R_1 = 80\,\Omega$	
$R_2 = 100\,\Omega$	
$R_3 = 400\,\Omega$	$I = ?$
$R_e = 40\,\Omega$[40]	
$U = 60\,\Omega$	

[40]) Vgl. Berechnung R_e zu Abb. 10 (Seiten 22 und 23).

Nach dem Ohmschen Gesetz (Formel 13aI) ist:

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

hier: $$I = \frac{U}{R_e},$$

$$I = \frac{60}{40},$$

$$I = \mathbf{1{,}5\ A.}$$

In dem Stromkreis nach Abb. 36 fließt also ein Strom I von 1,5 A (Abb. 37).

Die Spannung U = 60 V liegt aber an jedem Widerstand der Parallelschaltung voll an, weil mit der Parallelschaltung keine weiteren Widerstände in Reihe liegen (die gezeichneten Stromzuführungen zu den Verzweigungspunkten sind widerstandslos!). Nach dem Ohmschen Gesetz (Formel 13aI) können folglich auch die Ströme errechnet werden, die durch die einzelnen Widerstände fließen. Es ist:

$$I \text{ durch } R_1 \rightarrow I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{60}{80} = \mathbf{0{,}75\ A,}$$

$$I \text{ durch } R_2 \rightarrow I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{60}{100} = \mathbf{0{,}6\ A,}$$

$$I \text{ durch } R_3 \rightarrow I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{60}{400} = \mathbf{0{,}15\ A;}$$

$$I \text{ durch } R_e \rightarrow I = \frac{U}{R_e} = \frac{60}{40} = \mathbf{1{,}5\ A.}$$

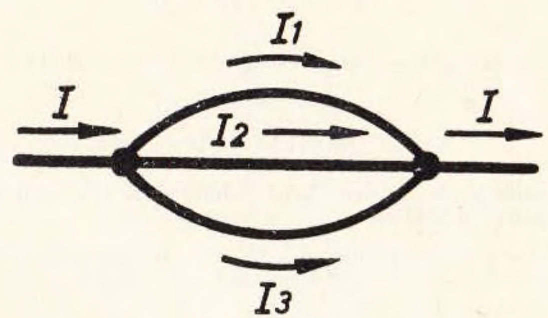


Abb. 37

Werden die Teilströme addiert, so folgt:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0{,}75 + 0{,}6 + 0{,}15 = 1{,}5\ \text{A} = I, \text{ also:}$$

(17a) $$\boxed{I = I_1 + I_2 + I_3}$$ [41]).

[41]) Vgl. Formel (15a).

Der Strom I teilt sich im Verzweigungspunkt 1 (Abb. 37) **in die Teilströme I_1, I_2 und I_3 auf, die sich im Verzweigungspunkt 2 wieder zum Strom I vereinigen.**

$$\text{(17aI)} \quad \boxed{I = \Sigma I_{\text{Teil}}}\,.$$

Zur Erhärtung der Formel (17a) soll noch ein weiteres Beispiel gerechnet werden. In Abbildung 38 sind zwei Parallelschaltungen hintereinander geschaltet.

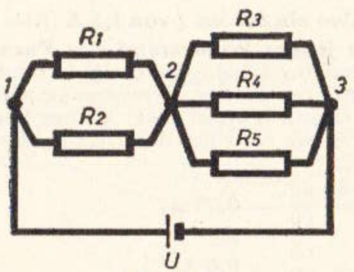


Abb. 38

Gegeben:	**Gesucht:**
$R_1 = 40\,\Omega$	
$R_2 = 60\,\Omega$	
$R_3 = 72\,\Omega$	
$R_4 = 90\,\Omega$	$I = ?$
$R_5 = 360\,\Omega$	
$U = 60\,\text{V}$	

Gesucht werden in dieser Schaltung wieder der Gesamtstrom I und die Teilströme I_1 bis I_5. Nach dem Ohmschen Gesetz (Formel 13aI) ist:

$$I = \frac{U}{R}, \quad \text{hier:} \quad I = \frac{U}{R_g}.$$

R_g – der Gesamtwiderstand – errechnet sich nach der Formel (14.1c):

$$R_g = \Sigma R;$$
$$R_g = R_{e1} + R_{e2}.$$

Die Ersatzwiderstände der beiden Parallelschaltungen (R_{e1} und R_{e2}) errechnen sich nach der Formel (14.2e) zu:

$$\frac{1}{R_e} = \Sigma\frac{1}{R};$$

$$\frac{1}{R_{e1}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{und} \quad \frac{1}{R_{e2}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}.$$

Es folgt also: a)

$$\frac{1}{R_{e1}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$
$$= \frac{1}{40} + \frac{1}{60}, \quad /\ \text{HN: } 120$$
$$= \frac{3+2}{120},$$

$$\frac{1}{R_{e1}} = \frac{5}{120};$$
$$R_{e1} = \frac{120}{5},$$
$$= \mathbf{24\,\Omega}.$$

b)

$$\frac{1}{R_{e2}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5},$$
$$= \frac{1}{72} + \frac{1}{90} + \frac{1}{360}, \quad /\ \text{HN: } 360$$
$$= \frac{5+4+1}{360},$$
$$= \frac{10}{360};$$
$$R_{e2} = \frac{360}{10},$$
$$= \mathbf{36\,\Omega}.$$

c)

$$R_g = R_{e1} + R_{e2},$$
$$= 24 + 36,$$
$$= \mathbf{60\,\Omega}.$$

d) Folglich ist:

$$I = \frac{U}{R_g},$$
$$= \frac{60}{60},$$
$$= \mathbf{1\,A}.$$

Aus dem 2. Kirchhoffschen Satz (Formel 15bIII) folgt:

$$U = \Sigma I \times R,$$
$$\text{also:} \quad U = I \times R_{e1} + I \times R_{e2}.$$

Durch die Ersatzwiderstände R_{e1} und R_{e2}, die hintereinander geschaltet sind, fließt der Strom $I = 1$ A, folglich fällt über dem Ersatzwiderstand R_{e1} die Spannung

$$U_{v1} = I \times R_{e1}, \text{ [42]}$$
$$= 1 \times 24,$$
$$= \mathbf{24\,V};$$

und über dem Ersatzwiderstand R_{e2} die Spannung

$$U_{v2} = I \times R_{e2},$$
$$= 1 \times 36,$$
$$= \mathbf{36\,V} \text{ ab.}$$

[42]) Vgl. Formel (13a II).

Die Spannung U_{v1} herrscht zwischen den Verzweigungspunkten 1 und 2, die Spannung U_{v2} zwischen den Verzweigungspunkten 2 und 3 der Widerstandsanordnung (Abb. 38)[43]. Demnach liegen die Widerstände R_1 und R_2 an der Teilspannung U_{v1} und die Widerstände R_3, R_4 und R_5 an der Teilspannung U_{v2}. Nach dem Ohmschen Gesetz können jetzt die Teilströme, die durch die einzelnen Widerstände fließen, berechnet werden:

$$I \text{ durch } R_1 \to I_1 = \frac{U_{v1}}{R_1} = \frac{24}{40} = \mathbf{0{,}6\ A;}$$

$$I \text{ durch } R_2 \to I_2 = \frac{U_{v1}}{R_2} = \frac{24}{60} = \mathbf{0{,}4\ A;}$$

$$I \text{ durch } R_3 \to I_3 = \frac{U_{v2}}{R_3} = \frac{36}{72} = \mathbf{0{,}5\ A;}$$

$$I \text{ durch } R_4 \to I_4 = \frac{U_{v2}}{R_4} = \frac{36}{90} = \mathbf{0{,}4\ A;}$$

$$I \text{ durch } R_5 \to I_5 = \frac{U_{v2}}{R_5} = \frac{36}{360} = \mathbf{0{,}1\ A.}$$

Betrachten wir die Ströme am Verzweigungspunkt 1, finden wir die Formel (17a) bestätigt:

$$I = I_1 + I_2 = 0{,}6 + 0{,}4 = 1\ \text{A};$$

ebenso bestätigen uns die Stromverhältnisse am Verzweigungspunkt 3 die Formel (17a):

$$I = I_3 + I_4 + I_5 = 0{,}5 + 0{,}4 + 0{,}1 = 1\ \text{A}.$$

Der Strom I teilt sich also wieder im Verzweigungspunkt 1 in die Teilströme I_1 und I_2 auf; dagegen vereinigen sich die Teilströme I_3, I_4 und I_5 im Verzweigungspunkt 3 wieder zum Strom I.

[43]) Vgl. Berechnung zu Abb. 19 (Seiten 30 bis 34).

Eine besondere Form stellen die **Stromverhältnisse am Verzweigungspunkt 2** dar, hier ist:

$$\textbf{(17b)} \quad \boxed{I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5},$$

$$(0{,}6 + 0{,}4 = 0{,}5 + 0{,}4 + 0{,}1).$$

In der Formel (17b) ist $I_1 + I_2$ **die Summe der zufließenden Ströme** am Verzweigungspunkt 2, dagegen ist $I_3 + I_4 + I_5$ **die Summe der abfließenden Ströme.** Folglich kann die Formel (17b) auch geschrieben werden:

$$\textbf{(17bI)} \quad \boxed{\Sigma I_{zu} = \Sigma I_{ab}}\ ^{44}).$$

Die vorstehende Gleichung stellt den **1. Kirchhoffschen Satz** dar; er lautet:

In jedem Verzweigungspunkt ist die Summe der zufließenden Ströme gleich der Summe der abfließenden Ströme (Abb. 39).

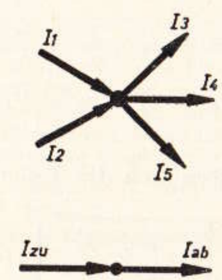


Abb. 39

Werden die zufließenden Ströme mit Plus (+) und die abfließenden Ströme mit Minus (—) bezeichnet, folgt:

$$\textbf{(17bII)} \quad \boxed{\begin{aligned} \Sigma I_{zu} - \Sigma I_{ab} &= 0, \\ \Sigma I &= 0 \end{aligned}}\ .$$

Auf Grund der Formel (17bII) kann der **1. Kirchhoffsche Satz** auch folgendermaßen ausgedrückt werden:

In einem Verzweigungspunkt ist die Summe aller Ströme gleich Null, wenn die zufließenden Ströme mit positiven (+) und die abfließenden Ströme mit negativen (—) Vorzeichen eingesetzt werden.

[44]) Vgl. Formel (15b II).

(17.1) Verhältnis der Teilströme zu ihren Widerständen

Betrachten wir die Teilströme zur Schaltung Abbildung 36, so ergibt die Gegenüberstellung Teilstrom – Widerstand folgendes Bild:

$$\begin{array}{lll} & R \downarrow & \\ R_1 = 80\,\Omega & & \rightarrow I_1 = 0{,}75\ \text{A}; \\ R_2 = 100\,\Omega & & \rightarrow I_2 = 0{,}6\ \ \text{A}; \\ R_3 = 400\,\Omega & & \rightarrow I_3 = 0{,}15\ \text{A}. \\ & & I \uparrow \end{array}$$

Wir können erkennen, daß bei Parallelschaltung von Widerständen **durch den größten Widerstand der kleinste Strom** und **durch den kleinsten Widerstand der größte Strom** fließen.

An jedem Widerstand einer Parallelschaltung liegt aber gleiche Spannung an, es folgt daher ($U = I \times R$):

$$I_1 \times R_1 = I_2 \times R_2 = I_3 \times R_3;$$
$$(0{,}75 \times 80 = 0{,}6 \times 100 = 0{,}15 \times 400).$$

Aus der obigen Gleichung folgt durch einfache Formelumstellung:

a) $I_1 \times R_1 = I_2 \times R_2 \rightarrow \dfrac{I_1}{I_2} = \dfrac{R_2}{R_1};$

b) $I_2 \times R_2 = I_3 \times R_3 \rightarrow \dfrac{I_2}{I_3} = \dfrac{R_3}{R_2};$

c) $I_1 \times R_1 = I_3 \times R_3 \rightarrow \dfrac{I_1}{I_3} = \dfrac{R_3}{R_1}.$

In Worten ausgedrückt:

Bei Parallelschaltung verhalten sich die Teilströme umgekehrt wie die zugehörigen Widerstände.

(17.1a) $\boxed{\dfrac{I_1}{I_2} = \dfrac{R_2}{R_1}}$ [45]).

(18) Der Isolationswiderstand

In Fernmeldekabeln sind die einzelnen Leiter gegeneinander und gegen Erde isoliert. **Der Isolationswiderstand ist der Widerstand, den ein Leiter gegen einen anderen Leiter oder gegen Erde (Masse) hat.** Der Isolationswiderstand soll so groß wie möglich sein, damit **Ableitungen** – das sind Ströme zur Erde – und **Nebenschlüsse** – das sind Ströme zu benachbarten Leitern – vermieden werden[46]).

Der Isolationswiderstand wird bei Kabeln durch die Papier-Luft-Umhüllung oder durch andere Isolier- (Widerstands-) Stoffe, wie z. B. Frequenta und Styroflex, gebildet, bei Freileitungen durch die Porzellan- oder Glasisolatoren, an denen die Leitungen befestigt sind, und bei isolierten Drähten durch eine Gummi- oder Kunststoffumhüllung oder durch eine Lackschicht.

[45]) Vgl. Formel (15.1a).

[46]) Nach Formel (11a) ist $G = \dfrac{1}{R}$, d. h. großer Widerstand → kleiner Leitwert (kleine Ableitung).

Trotz bester Isolierung wird sich ein ganz kleiner Strom von Millionstel oder gar Milliardstel Ampere über die Isolation zur Erde oder zum benachbarten Leiter nie vermeiden lassen. Dieser Strom wird um so größer sein, je länger die Leitung ist. Die Isolationswiderstände einer Leitung stellen nämlich eine sehr große Anzahl parallel geschalteter hochohmiger Widerstände dar (Abb. 40). Da der Ersatzwiderstand mit der Zahl der parallel geschalteten Widerstände kleiner wird, ist es ohne weiteres klar, daß mit länger werdender Leitung – Vergrößerung der Anzahl der parallel geschalteten Isolationswiderstände – der Gesamtisolationswiderstand kleiner und deshalb die Ableitung größer wird[47]).

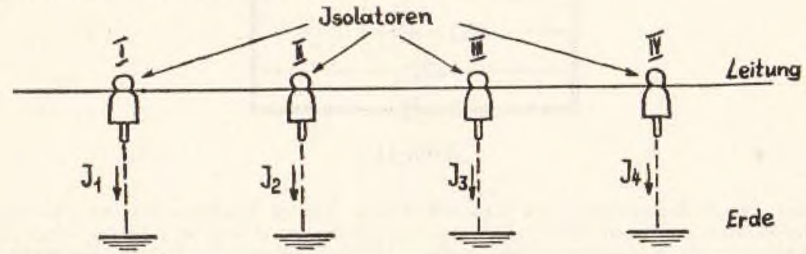


Abb. 40

In Abbildung 40 ist eine Freileitung dargestellt, die an Isolatoren befestigt ist. Die Isolatoren sind im allgemeinen aus Porzellan und haben einen hohen Isolationswert. Durch punktierte Striche ist dargestellt, daß jeder Isolator (über die Stütze, den Querträger und den Mast) mit Erde – wenn auch sehr schlecht leitend – verbunden ist. Es würde also ein kleiner Strom (I_1, I_2 usw.) über jeden Isolator zur Erde abfließen; dadurch wird der durch die Leitung fließende Gesamtstrom geschwächt. Dieser Vorgang wird mit **Ableitung** bezeichnet.

Der Isolationswiderstand nimmt mit wachsender Leitungslänge ab, während die Ableitung größer wird.

Die **Mindest-Isolationswerte je km Doppelleitung** für Freileitungen und Kabel betragen:

a) 0,3 MΩ bei Freileitungen unter ungünstigsten Witterungsverhältnissen; bei trockenem Wetter mehrere MΩ;

b) 5000 MΩ bei Orts- und Fernleitungskabeln;

c) 10 000 bis 50 000 MΩ bei Fernkabeln.

(19) Spannungsteiler mit Belastung

In Ziffer (16) wurde die Spannungsteilung besprochen; es wurde festgestellt, daß eine gegebene Spannung mittels einer Widerstandsanordnung nach dem 2. Kirchhoffschen Satz in verschiedene Teilspannungen zerlegt werden kann (Abb. 41). Die Teilspannungen verhalten sich dabei wie die Teilwiderstände. Im letzten Absatz der Ziffer (16) wurde aber daraufhingewiesen, daß die nach dem 2. Kirchhoffschen Satz errechneten Teilspannungen nur dann vorhanden sind, wenn über den angeschalteten Zweig kein Strom fließt, d. h. wenn der angeschaltete Widerstand unendlich oder sehr groß gegenüber dem Teilwiderstand ist. Da Spannungsmesser einen sehr großen inneren Widerstand haben, wird immer dann die errechnete Spannung gemessen werden, wenn nur der Spannungsmesser an den Teilwiderstand angeschlossen wird.

[47]) Vgl. Formel (14.2g).

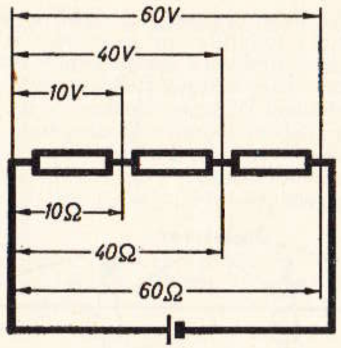


Abb. 41

In der Praxis liegen aber am Teilwiderstand häufig Verbraucher mit kleinen Widerständen an, dann fließt über den angeschalteten Zweig ein Strom und die Verhältnisse am Spannungsteiler werden dadurch verfälscht. **In diesen Fällen (den sog. Belastungsfällen) errechnet sich die wirkliche Teilspannung aus beiden Kirchhoffschen Sätzen.**

Zur Erläuterung soll das in Abbildung 42 dargestellte Beispiel durchgerechnet werden.

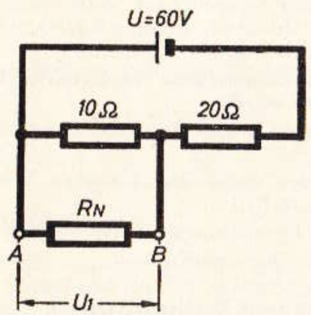


Abb. 42

Die gegebene Spannung ($U = 60$ V) teilt sich über der Widerstandsanordnung $R_1 = 10\ \Omega$ / $R_2 = 20\ \Omega$ auf. Nach der Formel (16a) müssen sich die Teilspannungen also wie 1:2 verhalten, d. h. U_1 **muß 20 V** und U_2 **40 V** betragen. Der Verbraucherwiderstand R_N liegt **parallel zu** R_1, R_N soll folgende Werte durchlaufen:

$R_{N_1} = \infty$ (offene Klemmen)
$R_{N_2} = 1\ \mathrm{M\Omega}$
$R_{N_3} = 100\ \mathrm{k\Omega}$
$R_{N_4} = 10\ \mathrm{k\Omega}$
$R_{N_5} = 1\ \mathrm{k\Omega}$

$R_{N_6} = 100\ \Omega$
$R_{N_7} = 10\ \Omega$
$R_{N_8} = 1\ \Omega$
$R_{N_9} = 0\ \Omega$ (Kurzschluß)

Bei $R_{N_1} = \infty$ sind die Klemmen A und B offen, die über R_1 abfallende Spannung errechnet sich nach Formel (16a) zu:

$$\frac{U_{11}}{U} = \frac{R_1}{R_1+R_2};$$

$$U_{11} = U \frac{R_1}{R_1+R_2},$$

$$= 60 \frac{10}{10+20},$$

$$= \frac{60}{3},$$

$$= \mathbf{20\ V.}$$

Bei $R_{N_2} =$ **1** $\mathrm{M\Omega}$ = **1 000 000** Ω errechnet sich der R_e, der durch die Parallelschaltung R_1 / R_{N_2} gegeben ist, zu:

$$R_e = \frac{R_1 \times R_{N_2}}{R_1 + R_{N_2}}\text{[48]},$$

$$= \frac{10 \times 1\,000\,000}{10 + 1\,000\,000},$$

$$= \frac{10\,000\,000}{1\,000\,010},$$

$$= \mathbf{9{,}99999} = \mathbf{rd.\ 10\ \Omega.}$$

Die Teilspannung U_{12} ist also wie bei R_{N_1} gleich **20 V.**

Bei $R_{N_3} =$ **100** $\mathrm{k\Omega}$ = **100 000** Ω errechnet sich der R_e zu:

$$R_e = \frac{R_1 \times R_{N_3}}{R_1 + R_{N_3}},$$

$$= \frac{10 \times 100\,000}{10 + 100\,000},$$

$$= \frac{1\,000\,000}{100\,010},$$

$$= \mathbf{9{,}9990} = \mathbf{rd.\ 10\ \Omega.}$$

Die Teilspannung U_{13} ist also gleich U_{11}, gleich **20 V.**

[48]) Vgl. Formel (14.2f).

Bei $R_{N_4} = \mathbf{10}$ kΩ = **10 000** Ω errechnet sich der R_e zu:

$$R_e = \frac{R_1 \times R_{N_4}}{R_1 + R_{N_4}},$$
$$= \frac{10 \times 10000}{10 + 10000},$$
$$= \frac{100\,000}{10\,010},$$
$$= \mathbf{9{,}9900} = \mathbf{rd.\ 10\ \Omega.}$$

Die Teilspannung U_{14} ist also gleich U_{11}, gleich **20 V.**

Bei $R_{N_5} = \mathbf{1}$ kΩ = **1000** Ω errechnet sich R_e zu:

$$R_e = \frac{R_1 \times R_{N_5}}{R_1 + R_{N_5}},$$
$$= \frac{10 \times 1000}{10 + 1000},$$
$$= \frac{10\,000}{1010},$$
$$= \mathbf{9{,}9009} = \mathbf{rd.\ 9{,}9\ \Omega.}$$

Die Teilspannung U_{15} errechnet sich dann zu:

$$U_{15} = U \frac{R_e}{R_e + R_2},$$
$$= 60 \frac{9{,}9}{9{,}9 + 20},$$
$$= \mathbf{19{,}86} = \mathbf{rd.\ 19{,}9\ V.}$$

Bei R_{N_6} = **100** Ω errechnet sich R_e zu:

$$R_e = \frac{R_1 \times R_{N_6}}{R_1 + R_{N_6}},$$
$$= \frac{10 \times 100}{10 + 100},$$
$$= \frac{1000}{110},$$
$$= \mathbf{9{,}0909} = \mathbf{rd.\ 9{,}1\ \Omega.}$$

Die Teilspannung U_{16} errechnet sich dann zu:

$$U_{16} = 60 \frac{9{,}1}{9{,}1 + 20},$$
$$= \mathbf{18{,}76} = \mathbf{rd.\ 18{,}8\ V.}$$

Bei R_{N_7} = **10** Ω errechnet sich R_e zu:

$$R_e = \frac{R}{2}\ ^{49)},$$
$$= \frac{10}{2},$$
$$= \mathbf{5\ \Omega.}$$

Die Teilspannung U_{17} errechnet sich dann zu:

$$U_{17} = 60 \frac{5}{5 + 20},$$
$$= \mathbf{12\ V.}$$

Bei R_{N_8} = **1** Ω errechnet sich R_e zu:

$$R_e = \frac{R_1 \times R_{N_8}}{R_1 + R_{N_8}},$$
$$= \frac{10 \times 1}{10 + 1},$$
$$= \frac{10}{11},$$
$$= \mathbf{0{,}9091} = \mathbf{rd.\ 0{,}91\ \Omega.}$$

Die Teilspannung U_{18} errechnet sich dann zu:

$$U_{18} = 60 \frac{0{,}91}{0{,}91 + 20},$$
$$= \mathbf{2{,}611} = \mathbf{rd.\ 2{,}6\ V.}$$

Bei R_{N_9} = **0** Ω ist R_e = **0** Ω, weil R_1 durch einen Kurzschluß überbrückt ist. Dann ist U_{18} = **0 V**, weil die anliegende Spannung (U = 60 V) voll über dem Widerstand R_2 abfällt.

Um eine gute Übersicht zu erhalten, sollen die errechneten Werte in einer Tabelle zusammengefaßt und graphisch dargestellt werden.

R_N	R_e	U_1
Ω	Ω	V
∞	10	20
10^6	10	20
10^5	10	20
10^4	10	20
10^3	9,9	19,9
10^2	9,1	18,8
10	5	12
1	0,91	2,6
0	0	0

[49]) Vgl. Formel (14.2g).

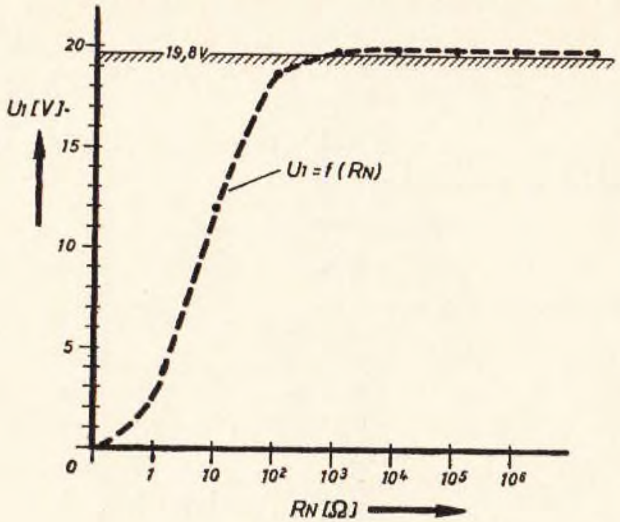


Abb. 43

Aus der Tabelle und aus der graphischen Darstellung ist zu ersehen, daß bei einer Spannungstoleranz von 1 v. H. vom Nennwert (das sind hier $\frac{20}{100} = 0{,}2$ V; also sind Spannungsschwankungen zwischen 19,8 und 20,2 V möglich), der **Widerstand des Verbrauchers mindestens das Hundertfache des Teilwiderstandes** haben muß; kleinere Verbraucherwiderstände sind möglichst zu vermeiden. Ist der Widerstand des Verbrauchers kleiner ($R_N < 100 \times R_1$), weicht die wirkliche Spannung von der errechneten Spannung ab.

Weiter ist darauf zu achten, daß **bei zu kleinem Verbraucherwiderstand über dem Teilwiderstand R_2 unzulässig große Ströme fließen können;** die Folge ist dann, daß der Widerstand R_2 durchbrennt. Auf die Belastung der Widerstände ist auch dann besonders zu achten, wenn die über R_1 abgegriffene Teilspannung fast so groß wie die gegebene Spannung ist (wichtig bei Schiebewiderständen!). In diesen Fällen ist es günstiger, die überschüssige Spannung über einem Vorwiderstand abfallen zu lassen und so zu vernichten.

(20) Mechanische Arbeit und Leistung

(20.1) Die mechanische Arbeit

Wenn ein Mensch eine Arbeit verrichtet, muß er Kraft aufwenden; die Energie, die er durch Nahrungsaufnahme gewinnt, wird durch die Verrichtung einer Arbeit umgesetzt. Das gleiche gilt für eine Maschine; die ihr zugeführte Energie (Kohle, Wasser usw.) wird in Arbeit umgesetzt.

Die aufgewendete **Kraft** allein ist aber nicht ein Maß für die Arbeit. Die Arbeit wird noch durch einen zweiten Faktor, den **Weg,** bestimmt; die Kraft muß längs eines bestimmten Weges aufgewendet werden, um eine bestimmte Arbeit zu verrichten. Wenn ein Mann ein Kilogrammgewicht einen Meter hochhebt, wendet

er eine Kraft auf, um dieses Kilogrammgewicht diesen Meter hochzuheben: **Die Physik spricht erst dann von Arbeit, wenn eine Kraft längs eines bestimmten Weges aufgewendet wird.** Hebt der Mann das Kilogrammgewicht drei Meter hoch, hat er die dreifache Arbeit wie vorher verrichtet; hebt er ein 10-Kilogramm-Gewicht drei Meter hoch, so hat er die (10 × 3) dreißigfache Arbeit verrichtet.

Arbeit ist das Produkt aus Kraft mal Weg (Abb. 44).

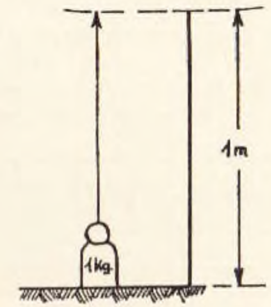


Abb. 44

(20.1a) $\boxed{\begin{array}{c}\text{Arbeit } A = \text{Kraft } P \times \text{Weg } s \\ A = P \times s\end{array}}$.

In der Formel (20.1a) wird die **Kraft P in kg** und der **Weg s in m** ausgedrückt; für die Arbeit ergibt sich dann die Maßeinheit:

(20.1aI) $\boxed{\text{Meterkilogramm (mkg)} = \text{m} \times \text{kg}}$.

Die Arbeit wird also in Meterkilogramm gemessen[50]).

(20.2) Die mechanische Leistung

Der Begriff der Arbeit ist im Leben nicht von so großer Bedeutung, vielmehr ist die **Leistung** ausschlaggebend. Wenn z. B. ein Bauarbeiter 10 Ziegelsteine (das Durchschnittsgewicht eines Ziegelsteins beträgt 2,5 kg) 12 m hinaufträgt, verrichtet er damit eine Arbeit von 25 × 12 = 300 mkg. Ruht sich dieser Arbeiter unterwegs mehrere Male aus, hat er doch zuletzt eine Arbeit von 300 mkg verrichtet. Ein anderer Arbeiter, der ohne abzusetzen dieselbe Last hochträgt, verrichtet die gleiche mechanische Arbeit. Trotzdem wird gesagt, daß der erste Arbeiter faul und der zweite Arbeiter fleißig ist. Der faule Arbeiter **leistet** weniger als der fleißige, weil der fleißige Arbeiter mehr Arbeit in einer **bestimmten Zeit** verrichtet. **Die Angabe einer geleisteten Arbeit in einer bestimmten Zeiteinheit ist das Maß der mechanischen Leistung:**

[50]) Die physikalische Maßeinheit der Kraft ist das Kilopond (kp); die physikalische Maßeinheit der Arbeit das Meterkilopond (mkp).

(20.2a) $$N = \frac{A}{t}$$ [51]).

Wird in die Formel (20.2a) die Formel (20.1a) eingesetzt, folgt:

(20.2aI) $$N = \frac{P \times s}{t}$$.

Die **mechanische Leistung** ist gleich dem Produkt aus **Kraft mal Weg dividiert durch die Zeit.**

In der Formel (20.2aI) wird die **Kraft** P **in kg,** der **Weg** s **in m** und die **Zeit** t **in Sekunden (s)** ausgedrückt; für die mechanische Leistung ergibt sich dann die Maßeinheit:

(20.2aII) $$\text{Meterkilogramm durch Sekunde} \left(\frac{\text{mkg}}{\text{s}}\right) = \frac{\text{m} \times \text{kg}}{\text{s}}$$.

Die Einheit $\frac{\text{mkg}}{\text{s}}$ ist für die Technik zu klein, daher ist der Wert **„Pferdestärke"** (PS) eingeführt worden:

(20.2aIII) $$1\ \text{PS} = 75\ \frac{\text{mkg}}{\text{s}},\qquad 1\ \frac{\text{mkg}}{\text{s}} = 0{,}0133\ \text{PS}$$.

(21) Elektrische Leistung und Arbeit

In der **Elektrizitätslehre** wird im Gegensatz zur Mechanik nicht von der Arbeit, sondern von der Leistung ausgegangen.

(21.1) Die elektrische Leistung

Wie es eine mechanische Leistung gibt, gibt es auch eine elektrische Leistung. Die **elektrische Leistung** wird – wie die mechanische Leistung – mit dem **Formelzeichen** N bezeichnet.

Die Einheit der elektrischen Leistung N **ist das Watt (W).**

Die elektrische Leistung ist das Produkt aus Spannung mal Stromstärke.

(21.1a) $$N = U \times I\ [\text{W}]$$.

Durch Umstellung der Formel (21.1a) ergibt sich:

(21.1aI) $$I = \frac{N}{U}\ [\text{A}]$$ und

[51]) N = Formelzeichen für die Leistung.

(21.1aII) $$U = \frac{N}{I}\ [\text{V}]$$.

Die Einheit der Leistung ist das **Watt (W)**; das Watt ist eine kleine Größe, als nächstgrößere Maßeinheit wurde das Kilowatt eingeführt.

(21.1b) $$1\ \text{kW} = 1000\ \text{W} = 10^3\ \text{W}$$.

In der Fernmeldetechnik wird auch manchmal mit dem **tausendsten Teil eines Watts, dem Milliwatt (mW)** gearbeitet:

(21.1c) $$1\ \text{mW} = \frac{1}{1000}\ \text{W} = 10^{-3}\ \text{W}$$.

Für die **Umrechnung** der elektrischen Leistung in mechanische Leistung und umgekehrt gelten folgende Formeln:

(21.1d) $$\begin{aligned} 1\ \text{kW} &= 1{,}36\ \text{PS} &&= 102\ \frac{\text{mkg}}{\text{s}},\\ 1\ \text{PS} &= 75\ \frac{\text{mkg}}{\text{s}} &&= 736\ \text{W},\\ 1\ \frac{\text{mkg}}{\text{s}} &= 9{,}81\ \text{W} &&= 0{,}0133\ \text{PS} \end{aligned}$$.

(21.2) Die elektrische Arbeit

Aus der Formel (20.2a) – $N = \frac{A}{t}$ – errechnet sich die Arbeit zu: $A = N \times t$.

Um aus der elektrischen Leistung die elektrische Arbeit ermitteln zu können, braucht also nur die elektrische Leistung mit der Zeit t multipliziert zu werden. Es folgt also:

(21.2a) $$A = N \times t = U \times I \times t$$.

Wird die Leistung N in **Watt** und die Zeit t in **Sekunden** ausgedrückt, folgt als **Maßeinheit der elektrischen Arbeit die Wattsekunde (Ws):**

(21.2b) $$1\ \text{Ws} = 1\ \text{W} \times 1\ \text{s}$$;

wird dagegen die Leistung N in **Kilowatt** und die Zeit t in **Stunden (h)** eingesetzt, folgt als **Maßeinheit der elektrischen Arbeit die Kilowattstunde (kWh):**

(21.2bI) $$1\ \text{kWh} = 1\ \text{kW} \times 1\ \text{h}$$.

Aus den Formeln (21.2b) und (21.2bI) folgt:

1 Wattsekunde = 1 Ws,

1 Wattstunde = 1 Wh = 60 × 60 Ws = **3600 Ws,**

1 Kilowattstunde = 1 kWh = 1000 × 60 × 60 = **3 600 000 Ws,**

1 Kilowattstunde = 1 kWh = 1000 Wh.

Die **Kilowattstunde** ist die am meisten gebräuchliche Einheit. Diese Maßeinheit der elektrischen Arbeit ist insofern wichtig, weil in ihr die elektrische Arbeit gemessen wird, die die Grundlage für die Gebührenberechnung der Kraftwerke darstellt.

(22) Die Stromwärme

Eine der Wirkungen der Elektrizität ist die **Entwicklung von Wärme,** der sog. Stromwärme[52]). Die elektrische Arbeit wird in Wärme umgewandelt; es findet also eine **Energieumwandlung** von elektrischer Energie in Wärmeenergie statt[53]).

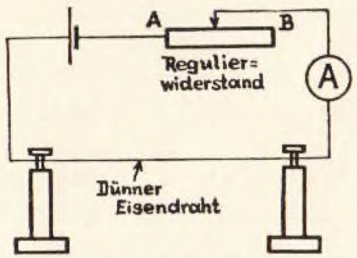


Abb. 45

In Abbildung 45 ist ein dünner Eisendraht über einen Strommesser und einen Regelwiderstand mit den Polen einer Gleichspannungsquelle verbunden. Mittels des Schiebewiderstandes kann die Größe des Stromes eingestellt werden, der durch die Schaltung und somit durch den Eisendraht fließt (Schieber des Regelwiderstandes auf B: Großer Widerstand im Stromkreis, also kleiner Strom; Schieber auf A: Kleiner Widerstand, also großer Strom). Die Größe des fließenden Stromes kann am Strommesser beobachtet werden.

Wird die Stromstärke in dieser Anordnung allmählich vergrößert, ist zu beobachten, daß zu Beginn des Versuches der Eisendraht keine besonderen Erscheinungen zeigt, während er bei einer bestimmten Stromstärke zu glühen beginnt, bei größer werdendem Strom immer heller glüht, und schließlich durchbrennt. Der elektrische Strom – besser, die **elektrische Arbeit** – wird also in **Wärme** umgesetzt. Die entwickelte **Wärmemenge** Q ist dabei von **Größe und Dauer des fließenden Stromes** abhängig.

[52]) Vgl. Ziffer (1), 1. Absatz, dieses Bandes und Ziffer (11) Bd. I b.

[53]) Andere Möglichkeiten der Energieumwandlung sind z. B. Wärmeenergie in mechanische Energie, mechanische Energie in elektrische Energie, chemische Energie in elektrische Energie.

Der englische Physiker Joule hat diese Energieumwandlung untersucht und das Untersuchungsergebnis in dem nach ihm benannten Gesetz festgelegt. Nach dem **Jouleschen Gesetz** ist:

$$\textbf{(22a)} \quad \boxed{1\ \text{cal}^{54)} = 0{,}427\ \text{mkg}}\ ,$$

d. h. um eine Wärmemenge Q von 1 cal zu erzeugen, muß eine mechanische Arbeit von 0,427 mkg aufgewendet werden.

Nach Formel (21.1d) entspricht der mechanischen Leistung von 1 $\frac{\text{mkg}}{\text{s}}$ die elektrische Leistung von 9,81 W; der mechanischen Arbeit von 1 mkg entspricht also die elektrische Arbeit von 9,81 Ws[55]). Wird dieser Wert in die Formel (22a) eingesetzt, folgt:

$$\textbf{(22aI)} \quad \boxed{\begin{array}{l}\textbf{1 cal} = 0{,}427\ \text{mkg} = 0{,}427 \times 9{,}81\ \text{Ws} = \\ = \textbf{4,18887 Ws} = \textbf{rd. 4,2 Ws}\end{array}}\ .$$

Um eine Wärmemenge von 1 cal zu erzielen, muß eine elektrische Arbeit von rd. 4,2 Ws aufgewendet werden.

Die elektrische Arbeit von 1 Ws erzeugt demnach $\frac{1}{4{,}18887} = 0{,}2387$ cal = rd. 0,24 cal:

$$\textbf{(22aII)} \quad \boxed{1\ \text{Ws} = 0{,}24\ \text{cal}}\ .$$

Wird in die Formel (22aII) die Formel (21.2b) eingesetzt, folgt:

$$\textbf{(22aIII)} \quad \boxed{1\ \text{W} \times 1\ \text{s} = 0{,}24\ \text{cal}}\ .$$

Nach der Formel (21.1a) wird die **Leistung** N **in Watt** gemessen, die **Sekunde** ist das Maß der **Zeit** t. Aus der Formel (22aIII) kann demnach die Formel für die **Wärmemenge** Q, das **Joulesche Gesetz,** entwickelt werden:

$$\textbf{(22b)} \quad \boxed{Q = 0{,}24 \times N \times t\ [\text{cal}]}\ .$$

Wird für die Leistung N der Ausdruck $N = U \times I$ (Formel 21.1a) eingesetzt, folgt:

$$\textbf{(22bI)} \quad \boxed{Q = 0{,}24 \times U \times I \times t\ [\text{cal}]}\ .$$

Nach Formel (13aI) ist $I = \frac{U}{R}$, folglich:

$$\textbf{(22bII)} \quad \boxed{Q = 0{,}24 \times \frac{U^2}{R} \times t\ [\text{cal}]}\ ;$$

[54]) *cal* = Kalorie; eine Kalorie ist die Wärmemenge, die 1 cm³ Wasser um 1°C erwärmt; 10^3 cal = 1000 cal = 1 kcal (Kilokalorie oder „große Kalorie").

[55]) Vgl. Formel (21.2b).

nach Formel (13aII) $U = I \times R$, also:

$$\text{(22bIII)} \quad \boxed{Q = 0{,}24 \times I^2 \times R \times t\,[\text{cal}]}\;.$$

Die Formel (22bIII) hat in der Praxis besondere Bedeutung, weil in den meisten Fällen der Widerstand und der ihn durchfließende Strom bekannt sind. Diese Formel zeigt, daß die **Stromwärme in erster Linie von der Größe des Stromes abhängig** ist, der durch den Widerstand fließt.

Die Stromwärme ist in vielen Fällen nicht erwünscht, sie stellt z. B. in der Fernmeldetechnik einen unwillkommenen **Energieverlust** dar. Um unnötige Energieverluste durch Wärmeabgabe zu vermeiden, muß dafür gesorgt werden, daß I^2 so klein wie möglich gehalten wird.

(22.1) Anwendung der Stromwärme – Stromsicherungen

Die elektrische Stromwärme wird in vielen Haushaltsgeräten angewandt, z. B. Glühlampe, elektrisches Bügeleisen, elektrische Kochplatte und elektrischer Heizofen. Eine besondere Anwendungsmöglichkeit stellen die **Schmelzsicherungen** dar, die die **Stromkreise vor zu hohen Strömen** (z. B. Fremdströmen oder Kurzschlußströmen) **schützen** sollen. Bei den Schmelzsicherungen wird infolge der entwickelten Stromwärme ein Schmelzdraht, der in den Stromkreis geschaltet ist, zum Schmelzen gebracht und so bei zu großen Strömen der Stromkreis unterbrochen. Weil diese Schmelzsicherungen die elektrischen Anlagen vor zu großen Strömen schützen sollen, werden sie **Stromsicherungen** genannt.

In Abbildung 46 wird der grundsätzliche Aufbau einer Stromsicherung gezeigt. Ein **Glasrohr** trägt an beiden Enden je eine **Metallkappe,** die mit der stromzuführenden Leitung in Verbindung stehen. Durch das Glasrohr ist der **Schmelzdraht** geführt, der i. allg. aus Silber[56]) besteht und mit den Metallkappen leitend verbunden ist. Um Flammenbildung zu unterbinden, ist der größte Teil des Schmelzdrahtes mit **Sand** oder mit **Schmirgelpulver** umgeben, das Pulver ist zur Mitte der Sicherung hin durch zwei **Asbestscheiben** abgeschlossen.

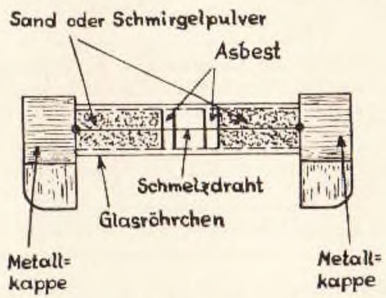


Abb. 46

Stromsicherungen haben den Zweck, zu große Ströme, die die Apparate, Kabel usw. zerstören könnten, sofort zu unterbrechen. Sobald der Strom die höchstzulässige Größe überschreitet, erwärmt sich der Schmelzdraht so stark, daß er schmilzt und damit den Stromkreis unterbricht. **Stromsicherungen werden stets in die Leitung geschaltet,** weil sie vom Strom durchflossen werden müssen (Abb. 47).

[56]) Silber wegen des niedrigen Schmelzpunktes.

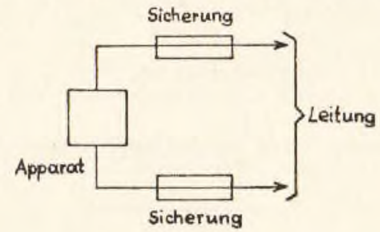


Abb. 47

Je nach Verwendungszweck werden **Grob- und Feinsicherungen** unterschieden. Grobsicherungen sprechen erst auf größere Ströme, Feinsicherungen dagegen schon auf kleinere Ströme an. **In der Fernmeldetechnik soll grundsätzlich jede stromführende Leitung abgesichert sein.**

Abbildung 48 zeigt die Schaltzeichen für Sicherungen.

Abb. 48

(23) Der Wirkungsgrad η[57])

Bei jeder Übertragung oder Umwandlung von Energie entstehen Verluste: Bei Maschinen in erster Linie durch Lagerreibung und Luftwiderstand; bei Akkumulatoren durch die chemische Umwandlung, bei der ein Teil der zugeführten Energie in Wärme umgesetzt wird; bei der Übertragung elektrischer Energie durch Spannungsabfall und Stromwärme. Die Energie, die einer Maschine, einem Akkumulator oder einer elektrischen Übertragungseinrichtung entnommen werden kann, ist stets um einen Betrag kleiner als die zugeführte Energie. Werden abgegebene und zugeführte Energie ins Verhältnis gesetzt, ergibt sich der Wirkungsgrad.

Der Wirkungsgrad η ist das Verhältnis von abgenommener (A_{ab}) zu zugeführter Energie (A_{zu}):

$$\text{(23a)} \quad \boxed{\eta = \frac{A_{ab}}{A_{zu}}}\;.$$

Nach Formel (21.2a) ist $A = N \times t$, also folgt:

$$\text{(23aI)} \quad \boxed{\eta = \frac{N_{ab} \times t}{N_{zu} \times t}}$$

[57]) η; sprich Eta, kleiner griechischer Buchstabe; Formelzeichen für den Wirkungsgrad.

und, da sich t gegen t kürzt:

$$\text{(23aII)} \quad \boxed{\eta = \frac{N_{ab}}{N_{zu}}} \;.$$

Der **Wirkungsgrad ist immer kleiner als 1** ($\eta < 1$) und kann entweder als **Dezimalbruch** (z. B. $\eta = 0{,}87$) oder in **Prozenten** (z. B. $\eta = 87\%$) ausgedrückt werden.

Werden **zwei Maschinen oder zwei Übertragungseinrichtungen** energiemäßig hintereinander geschaltet, errechnet sich der Wirkungsgrad der Gesamtanlage zu:

$$\text{(23b)} \quad \boxed{\eta_g = \eta_1 \times \eta_2} \;,$$

der **Gesamtwirkungsgrad ist also stets kleiner als der kleinste Einzelwirkungsgrad.**

(24) Spannungserzeugung durch chemische Vorgänge – Galvanische Elemente

Unter dieser Ziffer wollen wir die Spannungserzeugung durch chemische Vorgänge behandeln, wie sie in den sog. **galvanischen Elementen** vor sich geht. Zunächst wollen wir die Entwicklung der galvanischen Elemente geschichtlich verfolgen und dann auf das heute gebräuchlichste Element eingehen: Das Zink-Kohle-Element.

Geschichtliches: Im Jahre 1789 stellte der italienische Professor und Naturforscher **Galvani** fest, daß ein an einem **kupfernen** Haken aufgehängter Froschschenkel jedesmal in Zuckungen geriet, wenn er mit dem **eisernen** Balkongeländer, an dem der Kupferhaken hing, in Berührung kam. Der italienische Professor und Physiker **Volta** verfolgte diesen Vorgang und versuchte, ihn zu deuten. Volta nahm an, daß es sich um elektrische Erscheinungen handeln müsse. Er stellte fest, daß zur Erzeugung solcher elektrischer Vorgänge zwei **verschiedene** Metalle, z. B. Kupfer und Zink, notwendig seien, die durch feuchte Tücher voneinander zu trennen sind (Voltasche Spannungssäule). Zwischen den beiden Metallen bestand dann jeweils eine Spannung. Volta stellte ferner fest, daß die Spannung je nach Art der Metalle unterschiedlich ist und stellte die nach ihm benannte **Spannungsreihe** auf.

Die Voltasche Spannungsreihe, die mit der Zeit erweitert wurde, gibt an, welche Metalle gegeneinander Spannung aufweisen. Gleichzeitig läßt sich aus ihr ein Schluß über die **Größe der Spannung** ziehen.

Die Spannungsreihe lautet:

— Zink, Blei, Zinn, Eisen, Kupfer, Silber, Gold, Platin, Kohle, Braunstein +

Jedes Metall in der Spannungsreihe ist – von links nach rechts gesehen – elektrisch positiv gegenüber dem vorhergehenden (wobei Kohle und Braunstein hierbei als Metalle gelten sollen). Blei wäre dem Zink gegenüber positiv, Zinn gegenüber dem Blei usw.

Die Spannung zwischen zwei Gliedern der Spannungsreihe ist um so höher, je weiter sie in der Reihe voneinander entfernt sind.

Zum Beispiel ist Eisen dem Zink gegenüber stärker positiv (die Spannung ist größer) als Zinn oder gar das Blei. Die größte Spannung besteht zwischen Zink und Braunstein.

Verbindet man zwei in der Spannungsreihe auseinanderliegende Metalle, die durch ein feuchtes Tuch getrennt sind, mittels eines äußeren Schließungsbogens, so fließt ein elektrischer Strom[58].

(24.1) Das galvanische Element

Die oben dargestellte Form zur Erzeugung einer Spannung ist in der Praxis nicht gebräuchlich. Sobald die feuchten Tücher trocknen, bricht die Spannung zusammen und der Stromfluß hört auf. Stellt man jedoch zwei in der Spannungsreihe auseinanderliegende Metalle, z. B. Kupfer und Zink, in ein Gefäß, das mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt ist, herrscht eine Spannung zwischen den beiden Metallen, den sog. **Elektroden,** die längere Zeit anhält und für diese Zeitdauer in einem äußeren Schließungsbogen Elektronen antreibt: Es entsteht ein **ständiger** Elektronenfluß, der **elektrische Strom.** Die Flüssigkeit, in der die Elektroden stehen, nennt man **Elektrolyt.** Nimmt man die **technische** Stromrichtung (Pfeile Abb. 49) an, die im äußeren Stromkreis von Plus nach Minus geht, so fließt der Strom I von der positiven Elektrode, in diesem Fall Kupfer, über den äußeren Schließungsbogen zur negativen Elektrode (Zink) und im Elektrolyt vom Zink zum Kupfer.

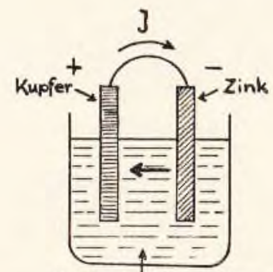


Abb. 49

Wir haben also einen vollständig **geschlossenen Stromkreis,** und zwar außen gebildet durch den äußeren Schließungsbogen (Widerstand) und innen durch den Elektrolyten (innerer Schließungsbogen).

Die Vorgänge im Elektrolyten sind ziemlich verwickelt, es soll daher hier nicht auf sie eingegangen werden. Es genügt zu wissen, daß eine mit einer Stoffumwandlung verbundene chemische Reaktion erfolgt, bei der die Energie gewonnen wird, die man **elektromotorische Kraft (EMK)** nennt[59].

Eine Anordnung von mehreren zusammengeschalteten Elementen nennt man Batterie. Auf die Arten der Zusammenschaltung wird später eingegangen[60].

[58]) Vgl. Bd. Ib, Abschnitt III.

[59]) Vgl. Bd. Ib, Abschnitt III.

[60]) S. Ziffer (27) dieses Bandes.

(24.2) Die elektromotorische Kraft (EMK)

Die Spannung, die an den **offenen** Klemmen eines Elementes oder einer Batterie herrscht, wird mit **elektromotorischer Kraft (EMK, abgekürzt** E) bezeichnet. Die EMK ist lediglich abhängig von der **Art** der Elektroden und des Elektrolyten; die **Größe** der Elektroden und ihr **Abstand** voneinander beeinflussen sie **nicht.** Die EMK eines **Zink-Kupfer-Elementes** beträgt z. B. **1,1 Volt,** die eines **Zink-Kohle-Elementes 1,5 V.**

Die EMK E bezeichnet demnach die Kraft, die die Elektronen antreibt. Diese Kraft hatten wir bisher mit Spannung U bezeichnet, jedoch besteht zwischen den Begriffen E und U ein Unterschied, auf den in Ziffer 26.1 näher eingegangen wird.

(24.3) Polarisation und Depolarisation

Wenn wir die Klemmen eines nach Abb. 49 aufgebauten und geschalteten galvanischen Elementes durch einen äußeren Schließungsbogen (Widerstand) verbinden und einen Strommesser in den äußeren Schließungsbogen schalten, stellen wir fest, daß die Stromstärke bei gleichbleibendem äußerem Widerstand nach einiger Zeit auf den Wert Null zurückgeht. Betrachten wir die **positive Elektrode** (**Kupfer** beim Zink-Kupfer-Element oder **Kohle** beim Zink-Kohle-Element), bemerken wir, daß sie sich bei Stromfluß mehr und mehr mit Gasbläschen überzieht. Diese Gasbläschen bestehen aus Wasserstoffgas, das sich durch die chemischen Vorgänge im Element gebildet hat. Da **Wasserstoff elektrisch negativ** ist, wandert es zur positiven Elektrode[61]). Die Wasserstoffbläschen überziehen allmählich die ganze positive Elektrode und machen so die positive Elektrode elektrisch negativ. Durch diesen Vorgang bildet sich ein **Gegenelement,** das mit der Zeit den Stromfluß unterbindet. Dieser Vorgang wird **Polarisation** genannt[62]).

Diese Polarisation muß unterbunden werden, damit bei geschlossenem äußerem Schließungsbogen stets ein Strom fließen kann.

Aus der Chemie ist bekannt, daß sich Wasserstoff gern mit Sauerstoff zu Wasser verbindet. Die **positive Elektrode** eines galvanischen Elementes muß also mit einem Stoff umgeben werden, der sauerstoffreich ist und sich elektrisch positiv verhält; dieser Stoff ist **Braunstein**[63]). Braunstein – chemisch: Mangansuperoxyd (MnO_2) – wird mit Graphit gemischt und in einem Beutel um die positive Elektrode gelegt. Die zur positiven Elektrode wandernden Wasserstoffbläschen müssen den Braunstein durchwandern und vereinigen sich hierbei mit dem Sauerstoff des Braunsteins zu Wasser. Sie werden so elektrisch neutralisiert. Die chemischen Mittel, die eine Polarisation verhindern, werden **Depolarisatoren** genannt, der elektrisch-chemische Vorgang **Ent- oder Depolarisation.**

(25) Das Zink-Kohle-Element

Das bei der DBP weitaus gebräuchlichste Element ist das Zink-Kohle-Element, dessen eine Elektrode (— Pol) aus Zink und dessen andere Elektrode (+ Pol) aus Kohle besteht. Ein solches Element hat gegenüber dem Zink-Kupfer-Element den Vorteil, daß die EMK zwischen Zink und Kohle größer ist als zwischen Zink und Kupfer, nämlich 1,5 V (vgl. Voltasche Spannungsreihe). Außerdem ist Kohle wesentlich billiger und leichter zu beschaffen als Kupfer. Als Elektrolyt dient eine

[61]) Ungleichnamige Pole ziehen sich an.

[62]) Vgl. auch Band Ib, Abschnitt III.

[63]) Vgl. Ziffer (24) dieses Bandes — Voltasche Spannungsreihe.

Salmiaksalzlösung, als Depolarisator eine Mischung aus Braunstein und Graphit, die in einem Beutel aus Nesselgaze die Kohleelektrode umgibt.

(25.1) Aufbau des Trockenelementes

Häufig wird das Zink-Kohle-Element als **Trockenelement** verwendet. Bei Trockenelementen ist der **Elektrolyt** nicht flüssig, sondern **pastenförmig**; der Elektrolyt wird mit einem Verdickungsmittel angedickt.

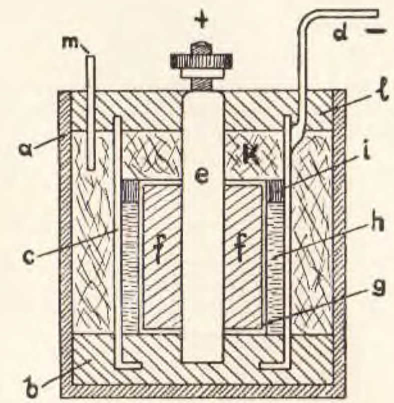


Abb. 50

Ein Trockenelement ist in Abbildung 50 im Schnitt dargestellt.

In einem viereckigen oder runden Isolierbecher a steht auf einer Isolierschicht b die becherförmige Zinkelektrode c mit dem Poldraht d. Der Kohlestab e ist von einer Mischung f aus Braunstein und Graphit als Depolarisator umgeben, die sich in einer Hülle g aus Nesselgaze befindet. Der Depolarisator wird von dem Elektrolyten h durchsetzt. Zink und Kohle sind in die den Boden bedeckende Asphaltschicht eingedrückt. Der pastenförmige Elektrolyt h befindet sich zwischen der inneren Zinkwandung und dem Kohlestab. Falls der Zinkbecher nicht selbst die Wandung des Gehäuses darstellt, ist der Zwischenraum mit Reisspreu oder Sägespänen ausgefüllt. Als Abschluß des Zinkbechers dient eine dünne Paraffinschicht i. Über dieser Schicht liegt der sog. Gasraum k, der gleichfalls mit Reisspreu oder Sägespänen gefüllt ist, und nach außen durch den Pechverschluß l, in dem ein Gasabzugsröhrchen m steckt, abgeschlossen ist.

Neben dem oben beschriebenen Trockenelement sind sog. „Luftsauerstoffelemente" gebräuchlich, bei denen der Sauerstoff der Luft in Verbindung mit bestimmten Chemikalien die Depolarisation bewirkt. Diese Elemente besitzen noch ein zweites Röhrchen, durch das der Sauerstoff der Luft Zutritt hat.

(26) Der innere Widerstand von Elementen

Wie aus dem Ohmschen Gesetz zu ersehen ist, wird die Größe des elektrischen Stromes wesentlich vom Widerstand des Stromkreises beeinflußt[64]). Die Größe

[64]) Vgl. Ziffer (13) dieses Bandes.

eines elektrischen Widerstandes ist nach Formel (10a) abhängig vom Querschnitt des Leiters, von der Länge des Leiters und von einer Stoffkonstanten, dem spezifischen Widerstand. Nach Ziffer (7) kennen wir Leiter und Nichtleiter; die elektrischen Leiter wieder können unterteilt werden in Leiter erster Klasse (Metalle und Kohle) und in **Leiter zweiter Klasse (in Wasser gelöste Salze und Säuren).** Die **Elektrolyte sind demnach Leiter zweiter Klasse.**

Der Widerstand eines äußeren Schließungsbogens wird nach Formel (10aI) berechnet zu:

$$\text{(10aI)} \quad \boxed{R = \frac{\varrho \times l}{F}} \; .$$

Der innere Schließungsbogen eines galvanischen Elementes hat demnach auch einen Widerstand, den **inneren Widerstand** *Ri*, der auch nach Formel (10aI) berechnet werden kann.

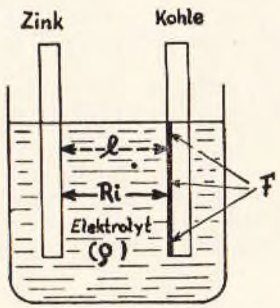


Abb. 51

Unter dem **inneren Widerstand** eines Elementes, einer Batterie oder einer anderen Spannungsquelle versteht man den Widerstand, der im **Inneren** einer Spannungsquelle besteht, im Element also den Widerstand **zwischen den Elektroden** (vgl. Abb. 51). Auch hier spielen der Querschnitt, die Länge und die Stoffart eine Rolle. Der **Querschnitt** wird dargestellt durch die **wirksame Fläche der kleinsten Elektrode,** die in den Elektrolyten eintaucht. Die Länge wird bestimmt durch den **Abstand** der Elektroden, die **Stoffart** durch die **Zusammensetzung des Elektrolyten.** Ist der Abstand der Elektroden gegeneinander groß, ist der Widerstand auch größer gegenüber einem kleineren Abstand. Ist die wirksame Fläche der kleinsten Elektrode groß, so ist der Widerstand klein gegenüber einer kleinen Fläche.

Der innere Widerstand von Zink-Kohle-Elementen schwankt je nach Größe der Elemente zwischen 0,1 bis 0,5 Ω; der *Ri* von Zink-Kupfer-Elementen zwischen 1 und 5 Ω. Bei Alterung des Elementes wächst sein innerer Widerstand beträchtlich.

(26.1) Das erweiterte Ohmsche Gesetz

Der geschlossene Stromkreis eines Elementes besteht aus dem **äußeren** Schließungsbogen – dem **äußeren** Widerstand *Ra* – und dem **inneren** Schließungsbogen – dem **inneren** Widerstand *Ri*.

Die Kraft, die bestrebt ist, die Elektronen zum Bewegen zu bringen, und die an den **offenen** Klemmen eines Elementes herrscht, ist bekanntlich die elektro-

motorische Kraft *E* (Ziffer 24.2). Ein Stromfluß kann, wie wir wissen, nur zustande kommen, wenn ein **geschlossener Stromkreis** vorhanden ist, d. h. wenn ein äußerer und innerer Schließungsbogen besteht (vgl. Abb. 49). Nun haben sowohl der äußere als auch der innere Schließungsbogen einen Widerstand, nämlich *Ra* und *Ri* und beide liegen in dem Stromkreis **hintereinander geschaltet.** Das bedeutet, daß sowohl über dem äußeren als auch über dem inneren Widerstand ein Spannungsabfall (vgl. Ziffer 15 und Ziffer 15.1) auftritt, dessen Größe abhängig ist von der **Höhe der EMK** *E* und von der **Größe des Gesamtwiderstandes** *Ri* + *Ra* des Stromkreises. Über dem **inneren Widerstand** *Ri* fällt also ein **Teil der EMK** ab und nur der **Rest** bleibt für den **äußeren** Stromkreis als **Nutzspannung** übrig. Da diese Nutzspannung an den Klemmen des Elementes vorhanden ist, bezeichnet man sie als **Klemmenspannung,** und diese Klemmenspannung ist die Spannung *U*, mit der wir bisher gerechnet haben. Die Spannung, die über dem **inneren Widerstand** *Ri* des Elementes verloren geht, bezeichnet man als den **inneren Spannungsverlust** *Uv* oder auch den **Spannungsabfall über dem inneren Widerstand** (*Ui*).

Nach Formel (13aII) errechnet sich der Spannungsabfall zu:

$$U = I \times R.$$

Jetzt müssen wir nur noch unterscheiden zwischen der **Klemmenspannung** *U* und dem **inneren Spannungsverlust** *Uv*.

Die **Klemmenspannung** *U* errechnet sich zu:

$$\text{(26.1a)} \quad \boxed{U = I \times Ra} \; ;$$

der **innere Spannungsverlust** *Uv* zu:

$$\text{(26.1b)} \quad \boxed{Uv = I \times Ri} \; .$$

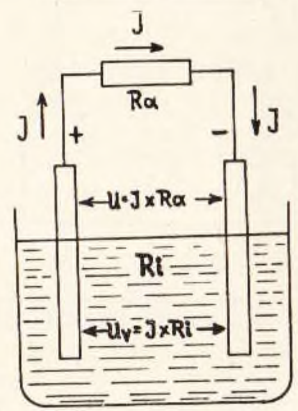


Abb. 52

Klemmenspannung *U* und innerer Spannungsverlust *Uv* sind in Abb. 52 dargestellt.

Wir sehen in Abb. 52 den Strom I dargestellt, der von + nach — über den äußeren Widerstand Ra fließt und der über diesem einen Spannungsabfall $U = I \times Ra$ erzeugt. Ferner erkennen wir den inneren Widerstand Ri, über den ein Spannungsabfall $Uv = I \times Ri$ entsteht. Beide Spannungsabfälle, U und Uv, zusammengezählt, ergeben nach Formel (15bI) die **EMK** E des Elementes, also:

(26.1c) $$\boxed{E = U + Uv}\ .$$

U ist aber $I \times Ra$ und $Uv = I \times Ri$, so daß man auch nach Formel (15bIII) schreiben kann:

(26.1cI) $$\boxed{E = I \times Ra + I \times Ri}\ .$$

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

Wie errechnen wir nun den Gesamtstrom I?

Nach dem (einfachen) Ohmschen Gesetz (Formel 13aI) ist $I = \frac{U}{R}$, wobei unter U **stets die Klemmenspannung** und unter R **stets der äußere Widerstand** Ra zu verstehen ist. Der **innere Widerstand** Ri ist hierbei **nicht** berücktichtigt.

Um den genauen Stromwert zu errechnen, müssen wir **beide** Widerstände, d. h. den **äußeren** (der aus mehreren parallel und hintereinander geschalteten Widerständen bestehen kann) und den **inneren** Widerstand der Spannungsquelle zusammenzählen, um damit den **gesamten im Stromkreis liegenden Widerstand** zu erhalten, also nach Formel (14.1c):

(26.1d) $$\boxed{R_{ges} = Ri + Ra}$$

und an Stelle der Klemmenspannung U **den Wert der EMK** E einsetzen. Es ist dann der Strom I:

(26.1e) $$\boxed{I = \frac{E}{Ri + Ra} = \frac{E}{R_{ges}}}\ .$$

Wir stellen jetzt die Formeln des erweiterten Ohmschen Gesetzes zusammen:

$$\boxed{\begin{aligned} E &= U + Uv; \text{ daraus ergibt sich:} \\ U &= E - Uv \text{ und} \\ Uv &= E - U \\ E &= I \times Ra + I \times Ri \\ I &= \frac{E}{Ri + Ra} \end{aligned}}\ .$$

Nach Formel (15.1a) verhalten sich in einem geschlossenen Stromkreis die Spannungsabfälle wie die zugehörigen Widerstände. Für den vorliegenden Fall folgt also:

(26.1f) $$\boxed{U : Uv = Ra : Ri}\ .$$

Aus dem Verhältnis $Ra{:}Ri$ können wir bei unterschiedlicher **Belastung einer Spannungsquelle** vier Zustände ableiten:

A Ist der äußere Widerstand in einem geschlossenen Stromkreis sehr groß im Vergleich zum inneren Widerstand einer Spannungsquelle, ist die Klemmenspannung U praktisch gleich der EMK E; der Strom I ist klein:

$Ra \gg Ri \rightarrow U = E \rightarrow Uv = 0.$

B Wird der äußere Widerstand verringert, steigt die Stromstärke an; der Spannungsabfall Uv über dem inneren Widerstand wächst, die Klemmenspannung U wird **kleiner** als die EMK E der Spannungsquelle:

$Ra > Ri \rightarrow U < E \rightarrow Uv > 0.$

C Ist der äußere Widerstand gleich dem inneren ($Ra = Ri$), ist der Spannungsabfall über dem äußeren Widerstand, d. h. die Klemmenspannung U, gleich dem Spannungsabfall über dem inneren Widerstand, d. h. gleich dem inneren Spannungsverlust Uv. U und Uv sind gleich der Hälfte der EMK:

$Ra = Ri \rightarrow U = Uv = \frac{E}{2}.$

D Ist der äußere Widerstand gleich Null (Kurzschluß!), wird die gesamte EMK über dem inneren Widerstand der Spannungsquelle verbraucht. Die Klemmenspannung U ist gleich Null, der innere Spannungsverlust Uv gleich der EMK:

$Ra = 0 \rightarrow U = 0 \rightarrow Uv = E.$

(27) Schaltung von Spannungsquellen

Wir betrachten in diesem Abschnitt die Schaltung von Elementen. Das hier Gesagte gilt jedoch auch für alle anderen Arten von Spannungsquellen.

Elemente können wie Widerstände geschaltet werden:

a) Hintereinander (in Reihe),
b) nebeneinander (parallel) und
c) gemischt[65]).

(27.1) Hintereinanderschaltung von Elementen

Bei der Hintereinanderschaltung von Elementen werden die ungleichnamigen Pole des vorhergehenden und nachfolgenden Elementes miteinander verbunden, z. B. der Minuspol des ersten Elementes mit dem Pluspol des zweiten, der Minuspol des zweiten mit dem Pluspol des dritten usw. (vgl. Abb. 53). Hierdurch wird die Gesamt-EMK um die Anzahl der hintereinandergeschalteten Elemente vervielfacht.

[65]) Vgl. Ziffer (14) dieses Bandes.

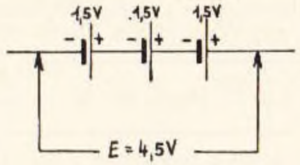


Abb. 53

Ist E die EMK **eines** Elementes und n die Anzahl der Elemente, so errechnet sich die Gesamt-EMK (E_{ges}) zu:

$$\text{(27.1a)} \quad \boxed{E_{ges} = n \times E} \; ^{66}).$$

Im Beispiel Abb. 53 sind drei Zink-Kohle-Elemente hintereinandergeschaltet. Die EMK jedes Elementes beträgt bekanntlich 1,5 V, die Gesamt-EMK ist dann

$$E_{ges} = 3 \times 1{,}5 = \mathbf{4{,}5\ V.}$$

Die Ausführung einer solchen Schaltung zeigt Abb. 54.

Bei einer **Hintereinanderschaltung** von Elementen, die man eine **Batterie** nennt, **erhöht sich aber auch der innere Widerstand der Anordnung** um die **Summe der einzelnen Widerstände,** weil hier die inneren Widerstände auch hintereinandergeschaltet sind. Der gesamte innere Widerstand Ri_{ges} ist gleich

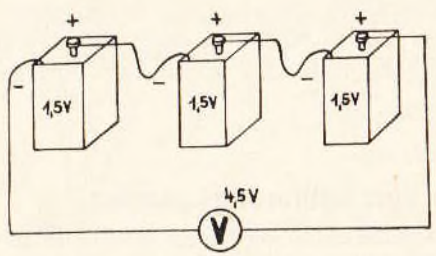


Abb. 54

dem Produkt aus der Anzahl n der Elemente und dem inneren Widerstand eines Elementes, falls alle Elemente den gleichen inneren Widerstand haben:

$$\text{(27.1b)} \quad \boxed{Ri_{(ges)} = n \times Ri\ [\Omega]} \; ^{67}).$$

Hat jedes der dargestellten Elemente einen inneren Widerstand von 0,3 Ω, so ist der innere Widerstand der Batterie:

$$Ri_{(ges)} = 3 \times 0{,}3 = \mathbf{0{,}9}\ \Omega.$$

[66]) Vgl. Formel (14.1c).

[67]) Vgl. Formel (14.1c).

Sind die inneren Widerstände der einzelnen Elemente **nicht** gleich, dann errechnet sich der innere Widerstand der Batterie aus der Summe der einzelnen inneren Widerstände.

Beispiel:

4 Zink-Kohle-Elemente sind hintereinanderzuschalten. Ri des ersten Elementes beträgt 0,5 Ω, des zweiten 0,4 Ω, des dritten 0,6 Ω, des vierten 0,5 Ω. Wie groß ist die EMK der Batterie? Wie groß ist ihr innerer Widerstand? (Abb. 55 und 56).

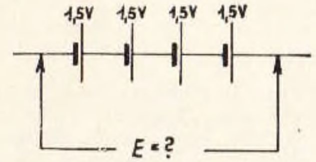


Abb. 55

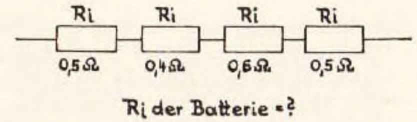


Abb. 56

Lösung:

Die EMK der Batterie errechnet sich zu

$$E_{ges} = n \times E = 4 \times 1{,}5 = \mathbf{6\ V,}$$

Ri der Batterie gleich

$$0{,}5 + 0{,}4 + 0{,}6 + 0{,}5 = \mathbf{2}\ \Omega.$$

(27.2) Parallelschaltung von Elementen

Bei der Parallelschaltung von Elementen werden die gleichnamigen Pole der parallel zu schaltenden Elemente miteinander verbunden, d. h. Minuspol mit Minuspol und Pluspol mit Pluspol. Abb. 57 zeigt eine Parallelschaltung von drei Elementen als Schaltung, Abb. 58 als Ausführung.

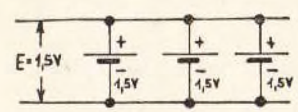


Abb. 57

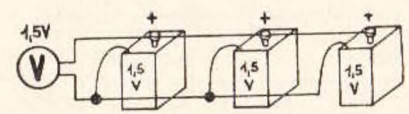


Abb. 58

Bei der Parallelschaltung bleibt die EMK der Batterie gleich der EMK eines Elementes.

Da bei der Parallelschaltung die inneren Widerstände jedes Elementes auch parallel geschaltet werden, **verringert** sich der innere Widerstand der Batterie. Bei gleichem inneren Widerstand jedes Elementes wird der innere Widerstand der Batterie gleich dem inneren Widerstand eines Elementes geteilt durch die Anzahl n der Elemente:

$$\text{(27.2a)} \quad \boxed{Ri_{(ges)} = \frac{Ri}{n}\ [\Omega]} \; ^{68}).$$

[68]) Vgl. Formel (14.2g).

Beispiel:
Fünf Zink-Kohle-Elemente sind parallel zu schalten. Der innere Widerstand jedes Elementes beträgt 0,5 Ω. Wie groß sind EMK und *Ri* der Batterie?

Lösung:
Die EMK der Batterie ist gleich der EMK eines Elementes, nämlich 1,5 V. Der innere Widerstand wird um das Fünffache kleiner als der eines Elementes:

$$Ri_{(ges)} = \frac{Ri}{n} = \frac{0,5}{5} = \mathbf{0,1\ \Omega.}$$

Aus Belastungsbeispiel A (Ziffer 26.1 – Seite 67) geht hervor:

> **Je geringer der innere Widerstand ist, um so weniger beeinflußt er die Klemmenspannung, so daß man bei kleinen inneren Widerständen ihren Wert im allgemeinen vernachlässigen kann. In diesen Fällen rechnet man nur mit dem einfachen Ohmschen Gesetz, wobei $E = U$ und $Ra = R$ zu setzen ist.**

Aus diesem Grunde wird die Parallelschaltung von Elementen häufig angewendet, um den inneren Widerstand einer Batterie möglichst klein zu halten und so die Batterie selbst belastungsunabhängig zu machen.

(27.3) Die gemischte Schaltung von Elementen

Unter der gemischten Schaltung von Elementen versteht man eine Zusammenfassung von Reihen- und Parallelschaltung[69]). Abb. 59 zeigt eine solche gemischte Schaltung, bei der je drei Reihen zu drei hintereinandergeschalteten Elementen zueinander parallel geschaltet sind.

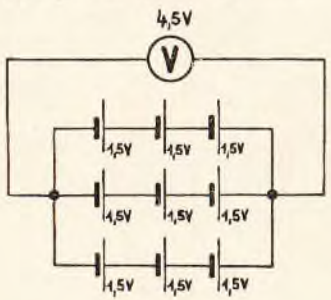


Abb. 59

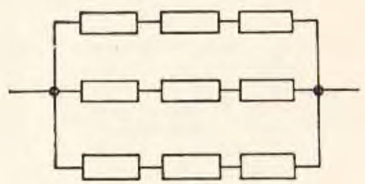


Abb. 60

Die EMK einer solchen Batterie ist gleich der EMK **einer** Reihenschaltung, in diesem Beispiel $3 \times 1,5 = 4,5$ V. Infolge der Parallelschaltung der Reihen wird der innere Widerstand der Batterie genauso ermäßigt wie bei der Parallelschaltung von Einzelelementen. Abb. 60 zeigt die inneren Widerstände jedes Elementes in Form einer Widerstandsordnung. Je drei hintereinandergeschaltete Widerstände bilden eine Reihenschaltung und die drei Reihenschaltungen liegen wiederum parallel.
Infolge des großen Aufwandes an Spannungsquellen wird diese Schaltung heute kaum angewandt, so daß wir sie nicht näher zu behandeln brauchen.

[69]) Vgl. Ziffer (14.3).

(28) Sekundärelemente oder Akkumulatoren (Sammler)

(28.1) Allgemeines

Im Gegensatz zu den bisher besprochenen Elementen, die man **Primärelemente** nennt, weil sie **direkt** durch chemische Umsetzung eine EMK liefern, versteht man unter **Sekundärelementen** oder **Akkumulatoren** (auch **Sammler** genannt) solche Elemente, bei denen die chemische Umsetzung durch **zugeführten** elektrischen Strom erfolgt. Erst **nach** dieser Umsetzung sind Sekundärelemente in der Lage, ihrerseits Strom abzugeben.
Zwei Elektroden aus ursprünglich **gleichem** Stoff werden durch die Einwirkung des elektrischen Stromes chemisch umgeformt (Ladung), so daß nach Abschluß des Umformungsvorganges zwei Elektroden sich gegenüberstehen, die nun in ihrer chemischen Zusammensetzung unterschiedlich sind. Diese Elektroden haben jetzt eine Spannung (eine EMK) gegeneinander, so daß sie in der Lage sind, ihrerseits wieder elektrische Energie abzugeben. Diese Energieabgabe (die Entladung) geschieht so lange, bis die Rückbildung der Elektroden in ihre ursprüngliche chemische Zusammensetzung erfolgt ist.

> **Bei Sekundärelementen wird zuerst elektrische Energie in chemische Energie umgesetzt (Ladevorgang). Umgekehrt kann nach der chemischen Umwandlung der Elektroden chemische Energie wieder in elektrische umgeformt werden (Entladung).**

(28.2) Der Bleiakkumulator (Bleisammler)

Um die Vorgänge bei der Ladung und Entladung eines Bleiakkumulators zu verstehen, müssen wir uns einige chemische Grundkenntnisse aneignen[70]).
Wir unterscheiden zwischen Grundstoffen oder chemischen Elementen (nicht zu verwechseln mit galvanischen Elementen) und deren Verbindungen. Ein Grundstoff oder Element ist chemisch nicht zerlegbar, sie behält ihre chemischen Eigenschaften stets bei. Grundstoffe sind z.B. Kupfer, Blei, Eisen, Schwefel, die Gase Wasserstoff, Sauerstoff usw. Die kleinsten Teilchen eines Grundstoffes nennt man **Atome.** Nun können ein oder mehrere Atome eines Grundstoffes eine sog. **chemische Verbindung** mit ein oder mehreren Atomen anderer Grundstoffe eingehen. Das kleinste Teilchen einer solchen chemischen Verbindung nennt man das **Molekül.**
Der Chemiker verwendet zur Abkürzung der Grundstoffe Formelzeichen, von denen wir uns einige merken müssen. Kupfer hat das Formelzeichen Cu, Blei Pb, Zink Zn, Wasserstoff H, Schwefel S, Sauerstoff O.
Chemische Verbindungen werden gleichfalls durch Formelzeichen dargestellt. Wasser ist eine Verbindung von zwei Atomen Wasserstoff (dargestellt durch das Formelzeichen H mit dahintergesetzter 2, also H_2) und einem Atom Sauerstoff (O). Das Formelzeichen für Wasser wäre demnach H_2O. Schwefelsäure hat das Formelzeichen H_2SO_4, schwefelsaures Blei (Bleisulfat) $PbSO_4$.
Nach diesen Erkenntnissen können wir über den Bleiakkumulator (Bleisammler) sprechen.
Wir tauchen zwei Bleiplatten, deren Farbe silbergrau ist, in verdünnte Schwefelsäure ($H_2O+H_2SO_4$), nehmen sie nach einiger Zeit heraus und stellen fest, daß sich die Farbe der Oberfläche verändert hat; sie ist jetzt schmutziggrau, mehr ins Schwarze übergehend. Die Oberfläche der Platten hat sich mit einem Teil der Schwefelsäure zu Bleisulfat ($PbSO_4$) verbunden. Dann werden die mit $PbSO_4$ überzogenen Platten wieder in die verdünnte Schwefelsäure gestellt und mit einer

[70]) Vgl. auch Band Ib, Abschnitt III.

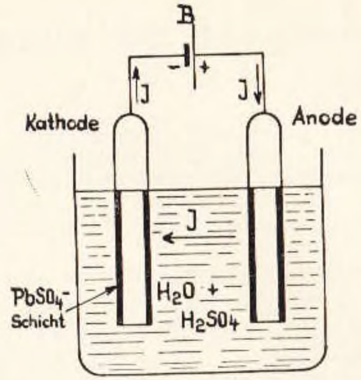


Abb. 61

Gleichspannungsquelle verbunden (Abb. 61). Es fließt nun ein Strom I von + der Batterie B über die rechte Platte, die man **Anode** nennt, durch den Elektrolyten zur linken Platte, die **Kathode** heißt, und von dort zum —Pol der Batterie.

Die **Anode** (positive Elektrode) liegt stets am Pluspol der Spannungsquelle, während die **Kathode** (negative Elektrode) immer am Minuspol liegen muß. Infolge des Stromflusses tritt eine chemische Zersetzung des Elektrolyten und eine chemische Umwandlung der Bleisulfatelektroden ein. Diesen Vorgang betrachten wir unter Verwendung chemischer Formelzeichen.

Es stehen sich vor Beginn des Ladevorganges zwei $PbSO_4$ — (Bleisulfat-)Platten gegenüber, die in verdünnter Schwefelsäure ($H_2SO_4 + 2 \times H_2O$) stehen:

— negative Elektrode **Kathode**	**Elektrolyt**			+ positive Elektrode **Anode**
$PbSO_4$ (Bleisulfat)	**H_2SO_4** (Schwefelsäure)	**H_2O** (Wasser)	**H_2O**	**$PbSO_4$** (Bleisulfat)

H_2SO_4 zerfällt zum Teil in H_2 und SO_4. H_2 wandert zur Kathode (—Pol), entreißt dem Bleisulfat ($PbSO_4$) das SO_4 und verbindet sich zu Schwefelsäure (H_2SO_4). Die Kathode wird dadurch in reines Blei (Farbe silbergrau) umgewandelt. Das SO_4 entreißt dem Wasser die Wasserstoffatome und verbindet sich mit diesen zu H_2SO_4. Weitere freie H_2-Moleküle entreißen dem $PbSO_4$ der Anode das SO_4 und verbinden sich auch zu Schwefelsäure, während die frei gewordenen Sauerstoffatome sich an Stelle des SO_4 setzen und mit dem Blei Bleisuperoxyd (PbO_2) bilden. Diese Platte nimmt eine tief-schokoladenbraune Farbe an.

Das folgende Schemata (Abb. 62) zeigt diesen Vorgang auf je ein Molekül $PbSO_4$, ein Molekül H_2SO_4 und zwei Moleküle Wasser (H_2O) bezogen:

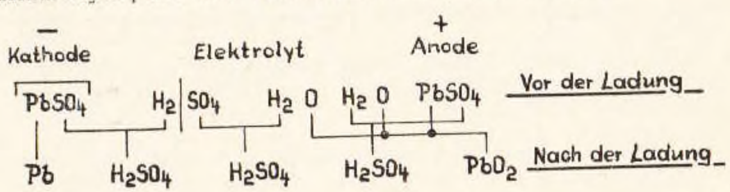


Abb. 62

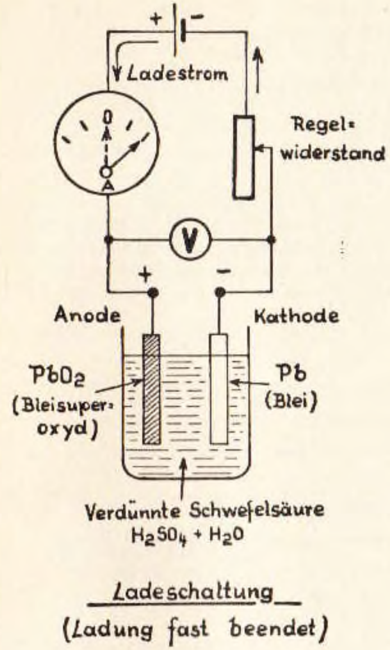


Abb. 63

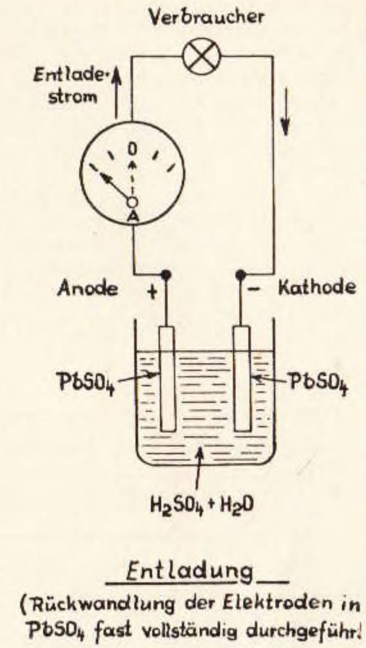


Abb. 64

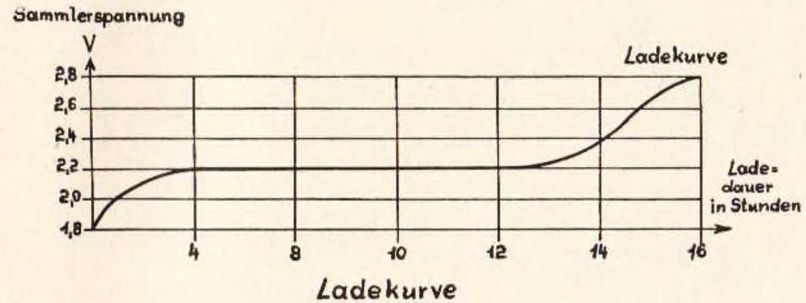


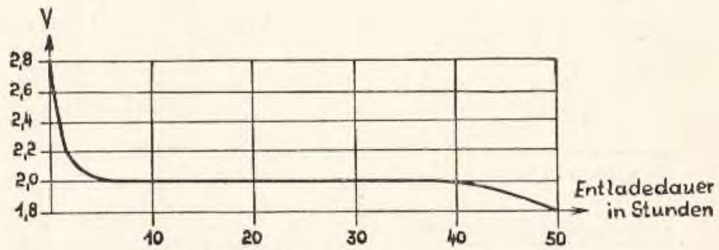
Abb. 65

Nach der Ladung stehen sich zwei Elektroden **verschiedener** chemischer Zusammensetzung (Pb und PbO_2) gegenüber. Werden sie durch einen äußeren Schließungsbogen miteinander verbunden, so fließt auch hier ein Strom, der dem Ladestrom **entgegengesetzt** gerichtet ist. Dieser Vorgang – die Entladung – bewirkt, daß eine Rückbildung der Elektroden in ihre ursprüngliche chemische Zusammensetzung erfolgt, so daß sich zuletzt wieder zwei Elektroden aus Bleisulfat gegenüberstehen.

Ladung und Entladung sind in einfachster Form in Abb. 63 und 64 dargestellt. Angenommen ist hierbei, daß sowohl die Ladung als auch die Entladung fast vollständig beendet ist.

Die EMK eines Sammlers beträgt im Durchschnitt 2 V. Kurz vor Beendigung der Ladung steigt sie auf 2,7 bis 2,8 V; es muß dann mit dem Laden aufgehört werden, weil jetzt die chemische Umwandlung der Elektroden vollzogen ist. Das Verhalten der Spannung zeigt die Ladekurve Abb. 65. Die Ladedauer beträgt hier 16 Stunden.

Am Verlauf der Kurve kann man erkennen, daß die Spannung kurz nach Beginn der Ladung auf etwa 2,2 V ansteigt, längere Zeit konstant bleibt, um zum Schluß den Wert von etwa 2,8 V zu erreichen. Bei der Entladung sinkt die EMK rasch auf 2 V ab und bleibt dann längere Zeit konstant. Sinkt im Laufe der Zeit die EMK auf 1,8 V, so muß mit der Entladung aufgehört werden, um eine Zerstörung der Bleiplatten zu verhindern (s. Entladekurve Abb. 66).



Entladekurve

Abb. 66

Aus den Ausführungen über den Ladevorgang ist ersichtlich, daß sich der Anteil an Schwefelsäure im Elektrolyten vergrößert, d. h. daß sich das spezifische Gewicht[71]) vergrößert hat. Man sagt hierzu, daß die **Säuredichte** wächst. Die beendete Ladung läßt sich durch Messung der Säuredichte am sichersten feststellen. Die Messung geschieht mit einer Senkspindel, die man auch Aräometer oder Dichtemesser nennt. Der Dichtemesser wird in den Elektrolyten eingetaucht und sinkt so tief ein, wie das spezifische Gewicht der Flüssigkeit es zuläßt. Der Dichtemesser ist entsprechend seinem Verwendungszweck in spezifischen Gewichten geeicht, bei Schwefelsäure z. B. zwischen 1,15 und 1,30 g/cm³ oder (für genauere Messungen) zwischen 1,15 und 1,24 g/cm³. Die Eichung in diesem Meßbereich ist dadurch bedingt, daß die Säuredichte bei einem **geladenen** Akkumulator für Fernmeldezwecke **1,20 bis 1,21** betragen soll. Sinkt die Säuredichte auf **1,18**[72]), so muß mit der Entladung aufgehört werden.

> **Die Säuredichte ist das zuverlässigste Maß für das Erkennen des Ladezustandes eines Akkumulators.**

[71]) Unter spezifischem Gewicht (Artgewicht, Wichte) versteht man das Gewicht eines Körpers oder einer Flüssigkeit verglichen mit der *gleichen* Raummenge Wassers von + 4° Celsius. Im allgemeinen bezieht man sich auf ein Kubikzentimeter (cm³). 1 cm³ Wasser bei + 4° Celsius wiegt ein g. Hat 1 cm³ eines anderen Stoffes, z. B. Kupfer, das Gewicht von 8,9 g, so ist auch sein Artgewicht 8,9.

[72]) Bei einigen Sammlern besonderen Fabrikates 1,15.

Ein weiteres Merkmal für das Erkennen der beendeten Ladung ist das „Gasen" oder „Kochen" des Elektrolyten. Dieses „Gasen" wird dadurch hervorgerufen, daß die chemische Umwandlung des Bleisulfates in Blei bzw. Bleisuperoxyd beendet ist und nunmehr der frei werdende Wasserstoff bzw. Sauerstoff in dichten Blasen aufsteigt und somit die Flüssigkeit in Wallung bringt.

Die beendete Ladung eines Bleiakkumulators erkennt man demnach an vier Erscheinungen:

- **a) An der Höhe der EMK (2,7 bis 2,8 V),**
- **b) an der Säuredichte (1,20 bis 1,21, bei Autosammlern 1,24),**
- **c) an starker Gasentwicklung (dem Gasen),**
- **d) an der Farbe der Platten (+ Platte tiefdunkelbraun, − Platte silbergrau).**

Den entladenen Zustand eines Bleiakkumulators erkennt man an drei Erscheinungen:

- **a) An der Höhe der EMK (1,8 V),**
- **b) an der Säuredichte (1,18),**
- **c) an der Farbe der Platten (+ Platte rotbraun, − Platte grau).**

(28.3) Die Aufnahmefähigkeit (Kapazität) eines Akkumulators

Die in Ziffer 28.2 geschilderte chemische Umwandlung der Platten eines Akkumulators bedingt die Zuführung einer gewissen Elektrizitätsmenge (elektrische Energie), die um so größer ist, je größer die Fläche und die Anzahl der Platten eines Akkumulators sind. Die Einheit der Elektrizitätsmenge ist das Coulomb oder die Amperesekunde[73]). Wird einem Akkumulator von Beginn bis Beendigung der Ladung eine bestimmte Elektrizitätsmenge zugeführt, so ist die Zahl der Amperesekunden ein Maß für das Aufnahmevermögen oder die **Kapazität** eines Sammlers. Da die Amperesekunde eine verhältnismäßig kleine Einheit darstellt, hat man den Begriff Amperestunde (Ah)[74]) eingeführt. 1 Ah ist gleich 3600 mal einer Amperesekunde. Hat ein Sammler die Kapazität von 10 Ah, so bedeutet das, daß in ihm eine Elektrizitätsmenge von $10 \times 3600 = 36000$ Amperesekunden oder Coulomb aufgespeichert ist. Diese Elektrizitätsmenge kann nun bei der Entladung (von den auftretenden Verlusten abgesehen) dem Akkumulator wieder entnommen werden, wobei es gleichgültig ist, ob man in 10 Stunden 1 A, 20 Stunden lang 0,5 A usw. entnimmt. Das Produkt aus der Stromstärke I mal der Zeit t in Stunden $(I \times t)$ muß der Kapazität des Sammlers entsprechen[75]).

> **I (in Ampere) $\times$ t (in Stunden) = Ah (Amperestunden) ist die Kapazität eines Akkumulators.**

(28.4) Die Sammlerzelle

Ein Sammler besteht im allgemeinen nicht nur aus **zwei** Platten, sondern aus **mehreren,** bei denen die entsprechenden positiven und negativen Platten parallel geschaltet werden. Hierdurch wird die wirksame Fläche um die Anzahl der parallel

[73]) Vgl. Ziffer (2) und Formel (4b I).

[74]) Stunde: lateinisch hora (h).

[75]) Die Lieferfirmen geben oft die Kapazität für dreistündige und zehnstündige Entladung an.

geschalteten Platten vergrößert. Damit die positive Platte, die am meisten der chemischen Umwandlung ausgesetzt ist ($PbSO_4$ in PbO_2) nicht einseitig beansprucht wird und sich dadurch verbiegt, stellt man je eine positive Platte zwischen zwei negative Platten (Abb. 67). Durch Isolierstoffe, Holz, Glas oder Rillen im Gehäuse sind die Platten gegen Berührung untereinander geschützt. Eine solche Anordnung wird **Akkumulatorzelle** genannt. Gleichgültig, wieviel Platten zu einer solchen Zelle zusammengefaßt werden, bleibt die EMK stets 2 V. **Durch das Parallelschalten mehrerer Platten erhöht sich lediglich die Kapazität des Akkumulators.** Die Kapazität richtet sich wiederum ausschließlich nach der Anzahl und der Größe der **positiven** Platten.

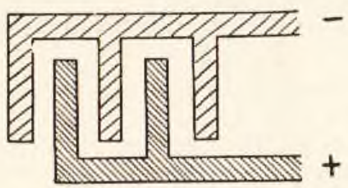


Abb. 67

Bei der DBP hat man – insbesondere für die Stromversorgung in den Ämtern – genormte Platten eingeführt, nämlich Platten der Größen I, II, IV und VIII. Die Platten der Größe I haben eine Kapazität von 36 Ah, die der Größe II 2 × 36 = 72 Ah, die der Größe IV 4 × 36 = 144 Ah und die der Größe VIII 8 × 36 = 288 Ah. Durch entsprechende Parallelschaltung der Platten kann die Kapazität einer Zelle jeweils um ein Mehrfaches von 36 Ah erhöht werden, z. B. haben die Heizbatterien in Verstärkerämtern u. U. eine Kapazität von rund 6400 Ah.

(28.5) Lade- und Entladestromstärke von Bleiakkumulatoren

Jeder Akkumulator darf nur mit einer bestimmten höchstzulässigen Stromstärke geladen und auch entladen werden. Diese Stromstärken richten sich nach der Größe der Platten und sind von den Herstellerwerken vorgeschrieben. Zu hohe Ladestromstärke hat starkes Gasen zur Folge. Von der + Platte werden Teile der wirksamen Masse abgerissen, an der − Platte wird die Umwandlung des Bleisulfates in Blei erschwert, wenn nicht gar unmöglich gemacht. Zu hohe Entladestromstärken zerstören die Platten ebenfalls.

Als Faustformel kann gelten, daß die Entladestromstärke bei Sammlern im Fernmeldedienst etwa 10% der Kapazität nicht überschreiten darf. Hat ein Akkumulator z. B. eine Kapazität von 36 Ah, so beträgt der höchste Entladestrom etwa 3,6 A. Ferner ist die wirksame Oberfläche der positiven Platten auch ein Maß für die höchstzulässige Lade- und Entladestromstärke: 1 dm^2 Plattenoberfläche gestattet einen Höchststrom von 0,8 A bei stationären und von 1,1 A bei transportablen Akkumulatoren.

(29) Technischer Aufbau der Platten von Bleisammlern

Bei der Verwendung **einfacher** Bleiplatten würde sich an deren Oberfläche unter dem Einfluß der Schwefelsäure nur eine dünne Bleisulfatschicht bilden. Die Aufnahmefähigkeit (die Kapazität) eines Sammlers ist aber nicht nur von der Größe der Platten, sondern auch von der Menge des vorhandenen Bleisulfates abhängig.

Diese Sulfatschicht kann durch aufeinanderfolgende Ladungen und Entladungen allmählich verstärkt werden. Dieses Verfahren nennt man **Formieren** der Platten. Um aber von Beginn an eine genügende Aufnahmefähigkeit der Akkumulatoren zu erreichen, gibt man den Platten eine möglichst große Oberfläche, indem man sie durch ein besonderes Gießverfahren so herstellt, daß sie aus vielen eng aneinander liegenden dünnen Bleistreifen bestehen, die durch einen äußeren Rahmen zusammengehalten und bei größeren Platten durch Längs- oder Querrippen gestützt werden. Derartige Platten haben ihrer großen Oberfläche wegen, die durch besondere Kunstgriffe (chemische Auflockerung) noch erhöht werden kann, eine genügende Anfangsaufnahmefähigkeit. Man nennt sie **Großoberflächenplatten.**

Erheblich größer ist die Kapazität der sogenannten **Masseplatten.** Diese bestehen aus einem gegossenen Bleigitter in einem starken Bleirahmen. In dieses Gitter (meist sind es zwei gegeneinander verschobene Gitter) wird eine aus Bleisalzen (Mennige oder Bleiglätte), Schwefelsäure und geeigneten Quellmitteln bestehende Paste eingestrichen (**Gitterplatte**), oder die Platte ist durch starke Längs- und Querrippen in Fächer eingeteilt, die auf der einen Seite der Platte durch ein durchlöchertes Bleiblech abgeschlossen sind. Die so entstandenen Kästen werden mit der gleiche Masse gefüllt wie die Gitterplatte und dann auch auf der anderen Seite mit einem durchlöcherten Bleiblech verschlossen (**Kastenplatte**).

Die **Masseplatte** kann daher entweder eine **Gitter-** oder eine **Kastenplatte** sein. Die DBP verwendet für ihre Akkumulatoren als positive Platte meist Großoberflächenplatten, als negative Masseplatten.

(30) Verwendung von Bleiakkumulatoren

Bleiakkumulatoren werden überall dort verwendet, wo sie laufend gewartet werden können, also in den Stromversorgungsanlagen der DBP zum Betrieb von handbedienten Vermittlungsstellen und Wählvermittlungen, Verstärkerämtern, Telegraphenämtern, bei größeren Nebenstellenanlagen usw.

Der Vorteil von Bleiakkumulatoren besteht in ihrer Eigenschaft, verhältnismäßig stark belastet werden zu können und – solange die Entladung nicht zu weit getrieben wird – in der gleichbleibenden EMK.

Der innere Widerstand von Sammlern ist sehr niedrig, so daß er nicht berücksichtigt zu werden braucht, solange die zulässige Entladestromstärke nicht überschritten wird. In diesem Falle ist die Klemmenspannung U immer gleich der EMK E.

Der innere Widerstand einer Sammlerzelle schwankt, je nach Größe, zwischen 0,01 und 0,001 Ω.

Zusammenstellung wichtiger Formeln

(4aI) $Q = I \times t\,[\mathrm{C} = \mathrm{As}]$ (11a) $G = \frac{1}{R}\,[\mathrm{S}]$ (11e) $\varkappa = \frac{1}{\varrho}$

(10aI) $R = \frac{\varrho \times l}{F}\,[\Omega]$ (11b) $R = \frac{1}{G}\,[\Omega]$ (11f) $\varrho = \frac{1}{\varkappa}$

(12aIII) $R_w = R_k\,(1 + \alpha \times \Delta\,T)\,[\Omega]$

(13aI) $I = \frac{U}{R}\,[\mathrm{A}]$

(14.1b) $R_g = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots + R_n = \Sigma\,R\,[\Omega]$

(14.2b) $G_e = G_1 + G_2 + G_3 + \ldots + G_n = \Sigma\,G\,[\mathrm{S}]$

(14.2d) $\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots + \frac{1}{R_n} = \Sigma\,\frac{1}{R}\,[\mathrm{S}]$

(15b) $U = U_{v1} + U_{v2} + U_{v3} = \Sigma\,U_v = \Sigma\,I \times R\,[\mathrm{V}]$

(15.1a) $U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3$

(17a) $I = I_1 + I_2 + I_3 = \Sigma\,I_{\mathrm{Teil}}\,[\mathrm{A}]$

(17bI) $\Sigma\,I_{zu} = \Sigma I_{ab}$

(17.1a) $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$

(20.1a) $A = P \times s\,[\mathrm{mkg}]$

(20.2a) $N = \frac{A}{t}\left[\frac{\mathrm{mkg}}{\mathrm{s}}\right]$

(21.1a) $N = U \times I\,[\mathrm{W}]$

(21.2a) $A = N \times t = U \times I \times t\,[\mathrm{Ws}]$

(22b) $Q = 0{,}24 \times U \times I \times t\,[\mathrm{cal}]$

(23aII) $\eta = \frac{N_{ab}}{N_{zu}}$

(23b) $\eta_g = \eta_1 \times \eta_2$

Spezifischer Widerstand ϱ, spezifischer Leitwert $\varkappa$, Temperaturkoeffizient α und spezifisches Gewicht γ wichtiger elektrischer Leiter

Werkstoff	ϱ	$\varkappa$	α	γ
Aluminium	0,0287	34,8	+0,004	2,7
Eisen (WM 13)	0,13	7,7	+0,0048	7,9
Kupfer	0,018	57,1	+0,0038	8,9
Nickel	0,10	10,0	+0,004	8,7
Quecksilber	0,95	1,01	+0,0009	13,6
Silber	0,016	62,5	+0,00377	10,5
Wolfram	0,055	18,2	+0,0041	19,1
Zink	0,06	16,5	+0,0037	7,1
Konstantan	0,50	2,0	—0,000005	8,9
Neusilber (WM 30)	0,30	3,3	+0,0004	8,7
Nickel-Chrom-Stahl	1,0	1,0	+0,00025	8,3
Messing	0,074	13,5	+0,0015	8,6
Retortenkohle	100	0,01	—0,0004	2,0
Graphit	50	0,02	—0,0004	2,0

UNION-DRUCKEREI · FFM