

Grundwissen des Fernmeldedienstes

Band Ib

*Einführung
in die Grundlagen der Elektrotechnik*



Herausgeber: Deutsche Postgewerkschaft • Hauptvorstand

Frankfurt am Main • Verlag „Deutsche Post“

Grundwissen des Fernmeldedienstes

Band I b

Einführung in die Grundlagen der Elektrotechnik

Teil II

Herausgeber: Deutsche Postgewerkschaft · Hauptvorstand

Frankfurt am Main · Verlag „Deutsche Post“

Vorwort

Dem vielfach geäußerten Wunsche unseres großen Leserkreises, eine Erweiterung und Vertiefung des im Band Ia (den bisherigen Band I) behandelten Stoffes zu bringen, ist durch die Auflage dieses Bandes entsprochen worden. Hier ist der Versuch unternommen, die Gleichstromlehre, die zum Ohmschen Gesetz führt, nicht als gegebene Tatsache, sondern als Folge von Überlegungen darzustellen. Darüber hinaus sind die chemischen Vorgänge, die zur Erzeugung einer elektrischen Spannung führen, näher erläutert. Die Lehre von den ruhenden elektrischen Ladungen (der früheren Elektrostatik) ist in diesem Band nach modernen Gesichtspunkten aufgebaut und vermeidet weitestgehend ein Zurückfallen in veraltete Anschauungen, wie sie zum Teil noch in verschiedenen Lehrbüchern zu finden sind. Die in diesem Abschnitt vorkommenden Maßeinheiten sind — wie in allen bisher erschienenen Bänden — auf das technische Maßsystem soweit wie möglich abgestimmt. Dem elektrischen Feld ist in diesem Band ein ebenso breiter Raum eingeräumt worden wie dem magnetischen Feld im Band II a. Die Theorie des elektrischen Feldes führt zum Kondensator und seinem Verhalten in Gleich- und Wechselstromkreisen, ähnlich wie in Band II a beim magnetischen Feld das Verhalten einer Selbstinduktionsspule in Gleich- und Wechselstromkreisen dargestellt wird.

Frankfurt a. M., im August 1954
Untermainkai 70—76

Inhaltsverzeichnis

	Ziffer	Seite
I. Einleitung zur Elektrizitätslehre		7
Atome und Elektronen	1	7
Periodisches System der Elemente	1	7
Ordnungszahlen im Periodischen System	1	7/8
Die elektrische Ladung eines Elektrons	2	8
Positive und negative Ladungen	2	8
Nachweis der elektrischen Ladung		
Elektrisches Grundgesetz	3	9
Elektroskop	3	10
II. Der elektrische Strom, die Spannung und der Widerstand sowie ihre Beziehungen zueinander		
Freie Elektronen	4	10
Der elektrische Strom als Elektronenbewegung	4	10
Leiter und Nichtleiter	5	11
Elektrizitätsmenge und elektrischer Strom	6	11
Einheit Amperesekunde (As)	6	11
Bestimmung der Einheit der Stromstärke	6	12
Die elektrische Spannung U	7	12
Energie der Lage und Bewegung	7	13
Die elektrische Spannung als Energie der Lage	7	13
Spannung und Stromstärke	8	15
Strom und Widerstand	9	15
Verhältnis zwischen Widerstand, Leitfähigkeit und Strom		
Strom, Spannung und Widerstand	10	16
Die Stromwärme	11	17
Das Joulesche Gesetz	11	18
Die Einheit der Wärmemenge (cal)	11	18
Abhängigkeit der Stromwärme in erster Linie vom Quadrat der Stromstärke	11	19
III. Elektrische Spannungserzeuger		
Möglichkeiten der Spannungserzeugung	12	20
Die Elektrolyse	13	20
Begriff Molekül	13	20
Dissotiation	13	21
Ionen	13	21
Chemische Vorgänge beim galvanischen Element	14	22
Die Polarisation (Gaszelle)	15	23
Polarisation bei elektrischen Elementen	16	24
Depolarisation	17	24
Sekundärelemente oder Akkumulatoren		
Allgemeines	18	25
Alkalische Akkumulatoren	19	25
Der Wirkungsgrad η	20	26
Erläuterung der Hintereinanderschaltung von Elementen und Sammlerzellen	21	26
IV. Thermo-, Photo- und Piezoelektrizität	22—24	27—29

Ziffer Seite

V. Ruhende elektrische Ladungen

Nachweis des Spannungszustandes	25	29
Das Braunsche Elektrometer	25	29/30
Das Zweifaden-Elektrometer	25	31
Übertragbarkeit des Spannungszustandes	25	31
Das elektrische Feld	26	32
Feldveränderung bedeutet Stromfluß	26	33
Elektronenbewegung abhängig von Feldrichtung	26	33
Lage des elektrischen Feldes zum magnetischen Feld	26	33
Elektrische Kraftlinien	26	34
Darstellung des elektrischen Feldes	26	35
Das Messen der elektrischen Feldstärke	27	36
Das elektrische Potential	28	38
Potentialdifferenz = Spannung	28	38
Die elektrische Beeinflussung oder Influenz	29	39

VI. Der Kondensator

Aufbau und Wirkungsweise des Kondensators, Begriff		
Kapazität	30	41
Was versteht man unter „Kapazität“	30	41
Abhängigkeit der Kapazität	30	42
Die Dielektrizitätskonstante	30	42
Berechnen der Kapazität C eines Kondensators	30	43
Die Maßeinheiten der Kapazität (F , μF , nF , pF)	31	43
Spannungsverhältnisse an Kondensatoren	32	44
Kondensatorschaltungen, Betriebs- und Prüfspannungen	33	45
Parallelschaltung von Kondensatoren	33	45
Reihenschaltung von Kondensatoren	33	46
Kapazitive Spannungsteilerschaltung	33	47
Bauarten der Kondensatoren	34	49

VII. Der Kondensator im Gleich- und Wechselstromkreis

Aufladung eines Kondensators	36	50
Ladestromkurve	36	51
Wirkung des Widerstandes beim Laden eines Kondensators	36	51
Auf- und Entladung eines Kondensators	37	52
Entladestromkurve	37	53
Lade- und Entladekurve eines Kondensators bei zerhacktem Gleichstrom	38	53
Lade- und Entladestromkurven	38	54/55
Mittlerer Stromwert I_m	38	55
Der Kondensator läßt Gleichstrom „scheinbar“ hindurch	38	56
Das Messen der Kapazität eines Kondensators	39	56
Abhängigkeit des mittleren Gleichstromwertes I_m von der Größe der Kapazität	40	57
Das Verhalten eines Kondensators im Wechselstromkreis	41	58
Abhängigkeit des „scheinbaren“ Stromes von der Frequenz f und der Kapazität C	41	58

Einführung in die Grundlagen der Elektrotechnik

Teil II

I. Einleitung zur Elektrizitätslehre

Die Frage nach dem Wesen der Elektrizität hat die Forscher seit Kenntnis dieser Naturerscheinung ständig bewegt. In neuerer Zeit ist es in langer, mühevoller Arbeit gelungen, Licht in das Dunkel, das sie umgab, zu bringen. Nach heutigen Erkenntnissen besitzt auch die Elektrizität **Teilchencharakter**. Die kleinsten, selbständig auftretenden Teilchen nennt man **Elektronen**. Mit ihnen haben wir es bei allen Erscheinungen der bewegten und der ruhenden elektrischen Ladungen zu tun.

(1) Atome und Elektronen

Schon im Altertum vertraten griechische Gelehrte, insbesondere Demokrit, die Auffassung, daß sich jeder auf der Erde vorkommende Stoff aus sehr kleinen Teilchen, die **Atome** genannt wurden, zusammensetzt. Diese Auffassung ist durch die moderne Wissenschaft (allerdings in abgewandelter Form) erhärtet und belegt. Danach setzt sich jeder Stoff, der auf der Erde und im Weltall vorkommt, aus insgesamt 92 Grundstoffen oder Elementen*) und deren chemischen Verbindungen zusammen. Für die Bezeichnung der kleinsten Teilchen dieser 92 Elemente ist der Name Atom beibehalten worden. Diese Atome sind winzig klein. Wäre es möglich, ein Übermikroskop herzustellen, dessen Vergrößerung beliebig weit getrieben werden könnte, so würde man in der Lage sein, bei einer Vergrößerung auf das 10^8 -fache ($10^8 =$ eine Eins mit acht Nullen), also auf das Hundertmillionenfache, die Atome erkennen zu können. Man nahm vorerst an, daß diese Atome unteilbar, d. h. nicht weiter zerlegbar seien. Die Forschung hat jedoch festgestellt, daß die Atome nicht das letzte Glied im Aufbau der Elemente darstellen, sondern daß das Atom aus einem **Kern** besteht, um den in großem Abstand die **Elektronen** kreisen.

Das Atom kann man mit einem Planetensystem vergleichen, in dem der Atomkern die Sonne, die um diese kreisenden Elektronen die Planeten darstellen. Der Kern des Atoms und die um diesen kreisenden Elektronen halten sich das elektrische Gleichgewicht. Man sagt, das Atom ist elektrisch **neutral**, d. h. nach außen hin unelektrisch.

Daß der Atomkern seinerseits auch kein Ganzes bildet, sondern wiederum aus kleinsten Teilchen, aus sog. Protonen und Neutronen besteht, ist zunächst als letztes Glied der Erkenntnisreihe anzunehmen.

Die kleinsten Teilchen, aus denen sich jeder Grundstoff (oder Element) zusammensetzt, nennt man A t o m e. Jedes Atom besteht aus dem Atomkern und den um ihn kreisenden Elektronen.

Da es 92 verschiedene (natürliche) Grundstoffe oder Elemente gibt, gibt es auch 92 verschiedene Atomkerne, die sich voneinander nur durch die in ihnen vorhandene Anzahl der Protonen und Neutronen unterscheiden. Diese 92 Elemente sind in dem sog. „Periodischen System“, auf das hier nicht näher ein-

*) Anm.: Neben den 92 „natürlichen“ Elementen gibt es noch einige „künstliche“, die in der Natur nicht vorkommen. Sie sind Produkte aus der Atomumwandlung bzw. Atomzertrümmerung, z. B. Plutonium, Neptunium usw.

gegangen werden soll, zusammengefaßt und geordnet. Es genügt zu wissen, daß die Elemente im Periodischen System u. a. nach sog. „Ordnungszahlen“ geordnet sind, die von 1 bis 92 gehen, und daß jeder Ordnungszahl ein Element in der Reihenfolge seines Kernaufbaues zugeordnet ist. Wasserstoff als das leichteste Element hat die Ordnungszahl 1, Uran als das schwerste die Ordnungszahl 92. Die Ordnungszahl gibt gleichzeitig die Anzahl der im Kern vorhandenen Protonen an. Die Anzahl der Neutronen ist aus der Zahl nicht erkennbar; hierzu dienen andere Angaben im Periodischen System. Zu **jedem** Proton gehört **ein** Elektron; beide halten sich das elektrische Gleichgewicht: sie wirken elektrisch neutral. Da der Wasserstoff die Ordnungszahl 1 hat, also **ein** Proton besitzt, gehört zu diesem auch nur **ein** Elektron, das den Kern umkreist. Uran mit der Ordnungszahl 92 hat 92 Protonen und demnach 92 Elektronen, die in geschlossenen Bahnen und in verschiedenen Abständen, auf den sog. „Schalen“, den Atomkern umkreisen.

(2) Die elektrische Ladung

Die elektrische Eigenschaft eines Elektrons ist seine **elektrische Ladung**. Diese ist für jedes Elektron immer **gleich groß** und erhält ein negatives (—) Vorzeichen. Die Ladung **eines** Elektrons nennt man die **elektrische Elementarladung**, die man auch zahlenmäßig bestimmt hat.

Da die elektrische Elementarladung sehr klein ist, hat man $6,29 \times 10^{18}$ (6,29 mal einer Eins mit 18 Nullen) zu einer größeren Ladungseinheit zusammengefaßt, die die Benennung 1 Coulomb*) (Formelzeichen Cb) erhalten hat, ähnlich wie man 1000 Gramm zu einem Kilogramm zusammenfaßt. Die Ladung **eines** Elektrons (die Elementarladung) beträgt demnach

$$\frac{1}{6,29 \times 10^{18}} \text{ Coulomb.}$$

Eine Anhäufung von Elektronen beliebiger Menge wird allgemein als Elektrizitätsmenge Q bezeichnet. $Q = 1 \text{ Cb}$ bedeutet demnach, daß die Elektrizitätsmenge Q von einem Coulomb ($6,29 \times 10^{18}$ Elektronen) vorhanden ist.

Wenn man einem zunächst elektrisch ungeladenen (neutralen) Körper die Elektrizitätsmenge Q in Form von Elektronen **zuführt**, so daß eine **Anhäufung** von Elektronen entsteht, so trägt er die **negative** elektrische Ladung Q . Wenn man dagegen dem Körper die Elektrizitätsmenge Q **entzieht**, indem man ihm **Elektronen entführt**, dann hat er einen **Elektronenmangel** und damit die **positive** Ladung Q .

Negative Ladung = Elektronenanhäufung = Elektronenüberschuß

Positive Ladung = Elektronenmangel

(3) Nachweis der elektrischen Ladung

Elektrische Ladungen können in der einfachsten Form dadurch erzeugt werden, daß man einen Hartgummistab mittels eines Wollappens oder einen Glasstab mittels eines Lederlappens reibt. Im ersten Fall erhält der Hartgummistab einen Elektronenüberschuß, demnach eine negative Ladung, während der Wollappen einen Elektronenmangel aufweist. Im zweiten Falle zeigt der Glasstab eine positive Ladung, während der Lederlappen negativ elektrisch geworden ist. Hängt man einen mit einer negativen Ladung behafteten Hartgummistab an einem gut isolierenden Seidenfaden auf und nähert ihm einen weiteren, mit einer negativen Ladung behafteten Hartgummistab, so bemerkt man, daß der aufgehängte Stab **ausweicht** (Abb. 1 a).

*) Anm.: Zu Ehren des französischen Physikers Coulomb.

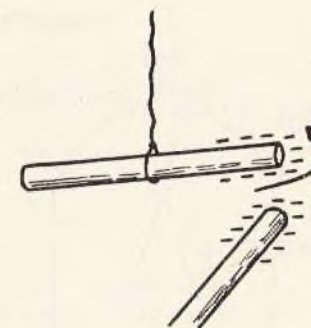


Abb. 1 a

Nähert man jedoch dem Hartgummistab einen durch Reibung positiv geladenen Glasstab, so bemerkt man, daß der aufgehängte Hartgummistab sich dem Glasstab **nähert** (Abb. 1 b).

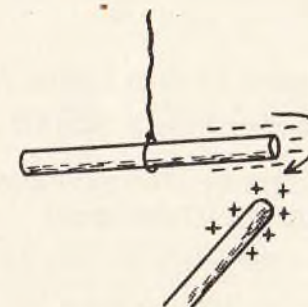


Abb. 1 b

Wir ziehen daraus den Schluß:

gleichnamige Ladungen stoßen sich ab,
ungleichnamige Ladungen ziehen sich an.

Wir haben hiermit das **elektrische Grundgesetz** ermittelt.*)

Die Erklärung für diese Vorgänge ist aus Abschnitt V, Ziffer 26, „Das elektrische Feld“ zu ersehen.

Ein einfaches Gerät zum Nachweis elektrischer Ladungen ist das **Elektroskop**, das gem. Abb. 2 aufgebaut ist. Zwei leichte Streifen aus Aluminiumfolie sind an einem Metallstab befestigt. Diese Anordnung ist in einem Glasgefäß, von diesem gut isoliert, angebracht. Wird auf den Metallstab eine elektrische Ladung gebracht, so verteilt sie sich infolge der abstoßenden Wirkung gleichnamiger Ladungen gleichmäßig auf ihn und auf die Aluminiumfoliestreifen,

*) Anm.: Vgl. Bd. II a, magnetisches Grundgesetz.

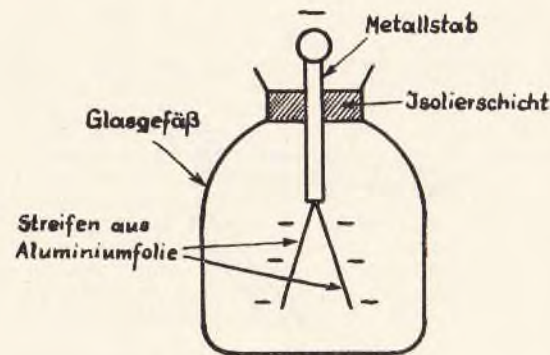


Abb. 2
Elektroskop

die sich auf Grund der abstoßenden Wirkung gleichnamiger Ladungen spreizen. Je größer die aufgebrauchte Ladung, also die Elektrizitätsmenge Q ist, um so größer ist der Spreizungswinkel, der demnach als grobes Maß für die Größe der aufgebrauchten Ladung dienen kann.

II. Der elektrische Strom I , die Spannung U und der Widerstand R

(4) Der elektrische Strom als Bewegung von (negativen) elektrischen Ladungen (Elektronen)

Neben den im Atom immer **gebundenen** Elektronen besitzen die festen Grundstoffe eine ihnen eigentümliche Anzahl von Elektronen, die ihren Platz **verlassen** können. Wir nennen sie **freie Elektronen**. Die freien Elektronen können sich in dem für die Größenverhältnisse der Elektronen vorhandenen großen freien Raum zwischen den einzelnen Atomen ungeordnet **bewegen**. Bei dieser Bewegung stoßen sie mit den äußeren Elektronen benachbarter Atome zusammen und tauschen sich mit diesen aus. Diese freien, beweglichen Elektronen sind es, die, in geordnete Bewegung versetzt, den elektrischen Strom bilden. Wird nämlich auf einen festen Körper, der zum besseren Verständnis der Vorgänge die Form eines Drahtes haben möge, ein (elektrischer) Druck ausgeübt, so ordnen sich die regellos umherwandernden freien Elektronen und bewegen sich in **einer Richtung**: es fließt ein elektrischer Strom.

Der elektrische Strom ist eine Bewegung von Elektronen in einer Richtung.

Die Stärke, die ein Strom annehmen kann, ist zunächst abhängig von der Anzahl der freien Elektronen, die in einem Stoff vorhanden sind. Hat ein Stoff viele freie Elektronen, dann kann die Anzahl der durch den elektrischen Druck in Bewegung gesetzten freien Elektronen groß werden und damit auch die Stromstärke. Ist jedoch die Anzahl der in einem Stoff vorhandenen freien Elektronen gering, so können nur diese wenigen bewegt werden: die Stromstärke ist klein. Hieraus ergibt sich, daß die durch einen Stoff fließende Gesamtzahl der Elektronen, die transportierte **Elektrizitätsmenge Q** , abhängig ist von der dem Stoff eigentümlichen Menge an freien Elektronen.

(5) Leiter und Nichtleiter

Stoffe, die über freie Elektronen verfügen, in denen sich also eine Elektrizitätsmenge bewegen läßt, nennt man **Leiter**. Hier unterscheidet man wiederum zwischen **guten Leitern**, das sind Stoffe, die über eine sehr große Menge freier Elektronen verfügen, wie z. B. Silber, Kupfer, Aluminium, und **Halbleitern**, die über eine geringere Menge freier Elektronen verfügen, wie z. B. Leinen, Baumwolle, Holz. Ferner gibt es **Nichtleiter** oder **Isolatoren**, wie Fette, Öle, Porzellan, Gummi, Glimmer, trockene Luft usw., die fast gar keine freien Elektronen besitzen. Einen absoluten stofflichen Nichtleiter gibt es **nicht**. Die Anzahl der freien Elektronen eines Stoffes bestimmt demnach dessen **Leitfähigkeit**.

Viele freie Elektronen = gute Leiter,
wenige freie Elektronen = schlechte Leiter.

(6) Elektrizitätsmenge und elektrischer Strom

Wir vergleichen die Elektrizitätsmenge mit einer Wassermenge und den elektrischen Strom mit einem Wasserstrom. Der Wasserstrom ist, wie der elektrische Strom, eine in einer bestimmten Richtung bewegte (Wasser)menge. Wie man die große Zahl von $6,29 \times 10^{18}$ Elektronen zu einem Coulomb zusammenfaßt, so wollen wir eine sehr große Zahl von Wassertropfchen zusammenfassen und sie ein Liter nennen. Die Stärke des Wasserstromes kann man in folgender Weise beurteilen:

Man denkt sich in einer Rohrleitung ein kleines Fenster, durch das man ein Zählwerk beobachten kann. Dieses Zählwerk gibt die Literzahl des durchströmenden Wassers an. Stellt man fest, daß in einer Sekunde ein Liter Wasser vorbeiströmt, dann sagt man, der Wasserstrom hat die Stromstärke 1. Fließen 2 l vorbei, dann hat man die Stromstärke 2 usw.

Entsprechend verfährt man in der Elektrizitätslehre:

Wenn an einer Stelle eines Leiters in einer Sekunde die Elektrizitätsmenge Q von einem Coulomb vorbeifließt, dann sagt man, die Stromstärke I beträgt ein Ampere.

$$1 \text{ A} = \frac{1 \text{ Cb}}{1 \text{ V}} \quad \text{allgemein ausgedrückt}$$

$$I = \frac{Q}{t} \quad (t \text{ Formelzeichen für die Zeit in Sekunden})$$

Die Stromstärke I ist gleich der Elektrizitätsmenge Q geteilt durch die Zeit t in Sekunden.

Die Umstellung der Formel nach Q ergibt

$$Q = I \times t$$

oder, auf die Einheiten 1 Coulomb, 1 Ampere und 1 Sekunde bezogen

$$1 \text{ Cb} = 1 \text{ A} \times 1 \text{ s} \text{ oder } 1 \text{ Cb} = 1 \text{ As}$$

Aus diesem Grunde wird in der Technik die Einheit der Elektrizitätsmenge mit **Amperesekunde** statt der physikalischen Benennung Cb bezeichnet.

Die Einheit der elektrischen Stromstärke I ist das Ampere (A). Diese Stromstärke ist vorhanden, wenn die Elektrizitätsmenge Q von einem Coulomb oder einer Amperesekunde in einer Sekunde eine bestimmte Stelle eines Drahtes durchfließt.

(7) Die elektrische Spannung U

Wir sprachen davon, daß zur Fortbewegung der Elektronen ein elektrischer Druck vorhanden sein muß. Aus der Erfahrung wissen wir, daß dieser Druck durch ein elektrisches Element oder eine Dynamomaschine, kurz, durch einen elektrischen Generator bewirkt wird. Wie diese Generatoren ihre Aufgabe erfüllen, soll an einem Wasserbeispiel klar werden. In der Abbildung 3 bedeutet P eine Pumpe, die Wasser aus dem Gefäß 1 in das höher gelegene Gefäß 2 pumpt. Die Druckhöhe, die dabei erreicht werden kann, sei h . Sie wird bestimmt durch die Konstruktion der Pumpe. Ist die Höhe h erreicht, dann steigt das Wasser nicht mehr in Gefäß 2. Die jetzt noch laufende Pumpe bewirkt nur noch, daß das Wasser nicht mehr durch P nach 1 zurücklaufen kann. Durch die Arbeit der Pumpe befindet sich das Wasser in 2 in einem Zustand, der es ihm ermöglicht, nach Öffnung des Hahnes H durch die Leitung L nach 1 zurückzufließen. Der Wasserspiegel in 2 sinkt, und die Pumpe kann wieder Wasser aus 1 nach 2 fördern. Wir bekommen so

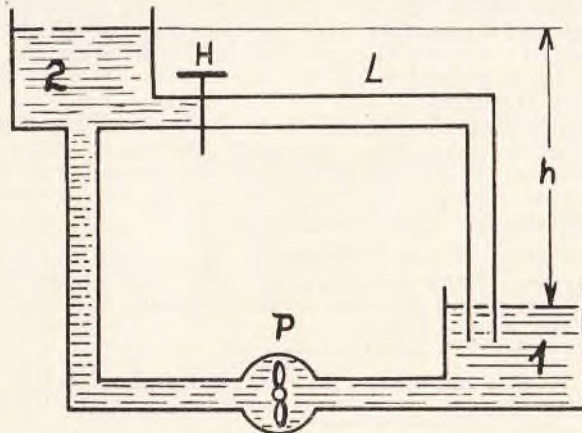


Abb. 3

durch die Leitung L einen Wasserstrom, solange die Pumpe arbeitet. Der Druckunterschied zwischen dem Wasser in 2 und dem in 1 wird dadurch erzeugt, daß die Pumpe jedes Wassertröpfchen auf die Höhe h hebt. Damit wird aber jedem Wassertröpfchen potentielle Energie oder Energie der Lage (s. weiter unten) vermittelt. Diese Energie kann das durch L strömende Wasser wieder nutzbar abgeben, wenn man in L eine Turbine einbauen würde.

Wir müssen an dieser Stelle, um die Begriffe der „Arbeit“ und „potentielle Energie“ verstehen zu können, auf diese näher eingehen.

Unter „Arbeit“ im physikalischen Sinne versteht man die längs eines Weges aufzuwendende **Kraft**: Arbeit (A) gleich Kraft (P) mal Weg (s):

$$A = P \times s^*)$$

Die Einheit der Arbeit ist das Meterkilogramm (mkg). **) Wenn ich ein Kilogramm einen Meter hoch hebe, dann habe ich eine Arbeit von 1 mkg geleistet; hebe ich 10 kg 2 Meter hoch, so habe ich eine Arbeit von 20 mkg geleistet. Ich habe also eine

*) Anm.: Vgl. Band I a, Ziffer 36.

**) Anm.: Neuerdings Kilopond (kp) genannt.

Kraft P aufgewendet, um einen Körper um den Weg s hochzuheben, also der Anziehung der Erde entgegenzuwirken. Abb. 4 zeigt einen sog. „Rambären“, ein Gerät, mit dem z. B. Baumstämme in die Erde getrieben werden. In der einfachsten Form besteht ein Rambär aus einem Eisengerüst mit Führungsschienen a , in denen ein schwerer Eisenklotz b gleiten kann. Der Klotz b kann mittels einer festen Rolle r und eines Seiles s hochgezogen und eingeklinkt werden, so daß er sich in der obersten Lage hält. Zum Hochziehen des Eisenklotzes muß ich eine Arbeit aufwenden, die um so größer ist, je höher das Gerüst und je schwerer der Klotz ist. Ist der Klotz, nachdem er hochgezogen ist, eingeklinkt, so besitzt er seinerseits die Fähigkeit, Arbeit zu leisten; die an ihm aufgewendete Arbeit ist in ihm als **Energie der Lage** oder **potentielle Energie** aufgespeichert. Wird der Klotz ausgeklinkt, so bewegt er sich abwärts; die in ihm aufgespeicherte Energie der Lage setzt sich in **Energie der Bewegung** (kinetische Energie) um, d. h. der Klotz hat nun seinerseits die Fähigkeit, Arbeit zu leisten, und treibt den Baumstamm c in die Erde.

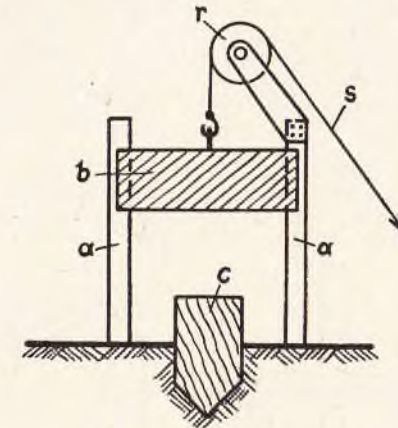


Abb. 4

In diesem Beispiel ist also Arbeit aufgewendet worden, die in potentielle Energie umgeformt worden ist, und diese potentielle Energie hat ihrerseits die Fähigkeit, Arbeit zu leisten.

Ein weiteres Beispiel zur Erläuterung des Begriffes „potentielle Energie“ ist der Stausee. Wasser, das den Stausee füllt, besitzt gegenüber dem Turbinenhaus potentielle Energie, die ihrerseits — gewissermaßen tröpfchenweise — in Bewegungsenergie umgesetzt wird, um damit Turbinen anzutreiben, also Arbeit zu leisten.

Was kennzeichnet nun die Tätigkeit der Pumpe P in Abb. 3? Offenbar ist charakteristisch für sie die Arbeit, mit der sie jedes Tröpfchen belädt, wenn sie es auf die Höhe h hebt. Diese Arbeit je Tröpfchen wollen wir kurz **Spannung** nennen. Sie erzeugt damit jenen Zustand, der die Tröpfchen befähigt, von 2 nach 1 zurückzufließen, wenn der Hahn geöffnet wird. Ist die an einem Tröpfchen getane Arbeit groß, dann ist auch der Höhenunterschied zwischen 1 und 2 groß, und wir sprechen von einer hohen Spannung. Im entgegengesetzten Falle (bei kleiner Arbeit je Tröpfchen) ist auch h klein und damit die Spannung niedrig.

Übertragen wir die gewonnenen Erkenntnisse auf die elektrischen Vorgänge, dann treten an die Stelle der Wassertröpfchen die elektrischen Ladungen und an die Stelle der Pumpe ein elektrischer Generator. Die Aufgabe des letzteren ist es dann, jeder Ladungseinheit einen solchen Arbeitsbetrag zu übergeben, wie es seiner Konstruktion entspricht. Dadurch wird dann jener elektrische Zustand herbeigeführt, der die Elektronen in Bewegung setzt, wenn eine Leitung vorhanden ist, und den wir elektrischen Druck nannten. Die Arbeit je Ladungseinheit, die der Generator entsprechend seiner Bauart liefert, hat man wegen des dadurch bewirkten elektrischen Druckes elektrische Spannung genannt. Sie ist potentielle Energie je Ladungseinheit. Man gibt ihr das Symbol U und mißt sie in Volt. Ein Generator, der eine große Arbeit je Ladungseinheit aufbringen kann, erzeugt somit eine hohe Spannung; im entgegengesetzten Falle ist seine Spannung gering.

Die Gefäße 1 und 2 entsprechen den Polen des Generators. An dem einen Pol herrscht also ein Elektronenüberschuß und an dem anderen ein Elektronen-

mangel. Stellen wir eine Verbindung zwischen den Polen her — das entspricht dem Öffnen des Hahnes H — dann strömen die Elektronen von dem einen Pol zum anderen. Um den Strom aufrecht zu erhalten, muß der Generator dauernd Arbeit an die Elektronen abgeben. Diese Arbeit nimmt der Generator entweder im Falle der Dynamomaschine aus der Antriebsmaschine oder im Falle des elektrischen Elementes*) aus chemischen Vorgängen. Bei offener Außenleitung beansprucht der Generator keine Arbeit, denn nachdem einmal der Spannungszustand hergestellt ist, braucht er nur aufrechterhalten zu werden**).

Die Geschwindigkeit, mit der sich der elektrische Druck beim Einschalten in einer Leitung fortpflanzt, ist nach Art der Leitung sehr verschieden. Der höchstmögliche Wert wäre 300 000 km/sec. Dieser Wert wird an guten Freileitungen beinahe erreicht, während die Elektronen, die durch diesen Druck angetrieben und bewegt werden, eine Geschwindigkeit von nur wenigen Millimetern oder gar Bruchteilen von Millimetern in der Sekunde haben. Wenn man sagt, daß die Elektrizität sich mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzt, so ist dies zumindest eine ungenaue Ausdrucksweise. Ein Wasserbeispiel mag dies erläutern.

In einem zylindrischen Gefäß (Abb. 5), das oben durch einen Kolben abgeschlossen und unten an eine Rohrleitung angeschlossen ist, befindet sich Wasser. Das Wasser selbst besteht physikalisch aus einer Unzahl kleiner Wassertröpfchen, die miteinander in Berührung stehen. Wird der Kolben

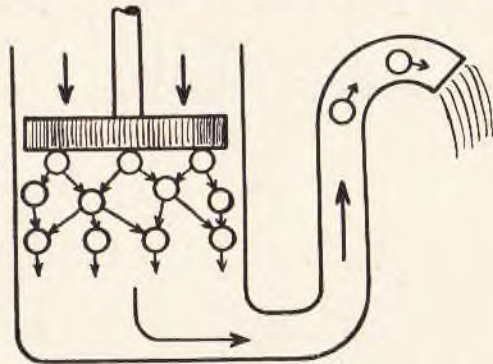


Abb. 5

abwärts bewegt, so drückt er mit seiner Druckfläche auf die obersten Wassertröpfchen, die sich um so weit nach unten bewegen, wie die vom Kolben zurückgelegte Strecke beträgt. Dieser Druck teilt sich den benachbarten, d. h. unterhalb der vom Kolben berührten Tröpfchen mit, so daß sich diese um die gleiche Strecke nach unten bewegen. Diese Tropfen stoßen wiederum die benachbarten bzw. nachfolgenden an, so daß in fast dem gleichen Augenblick der Druck die vor dem Rohraustritt befindlichen Tröpfchen herausdrückt: es entsteht ein Wasser(tröpfchen)fluß. Der Druck, der die Wasserteilchen zum gegenseitigen Anstoßen erregt hat, treibt also die Wassertröpfchen vor der Öffnung in fast dem gleichen Augenblick hinaus wie der Kolben die Abwärtsbewegung angetreten hat. Es liegt auf der Hand, daß die ausgetretenen Wassertröpfchen nicht dieselben sein können, die von dem Kolben angestoßen worden sind; diese werden vielmehr als letzte das Rohr verlassen.

*) Anm.: S. Ziffer 14.

**) Anm.: EMK, s. Bd. Ia, Ziffer 21

Vergleichen wir die Wassertröpfchen mit den Elektronen, so wird es klar, daß es nicht die Elektronen sein können, die mit Lichtgeschwindigkeit durch den Draht fließen, sondern daß diese Geschwindigkeit die der Druckfortpflanzung ist.

(8) Spannung und Elektronenfluß (Stromstärke)

Aus dem unter (7) aufgeführten Wasserbeispiel (Abb. 5) ist weiter zu ersehen, daß die Geschwindigkeit, mit der die Wassertröpfchen sich bewegen, um so größer ist, je mehr sich der Kolben in einer bestimmten Zeit nach unten bewegt, d. h. je größer der Arbeitsaufwand je Tröpfchen ist. Nehmen wir an, daß bei einer Bewegung des Kolbens um 1 cm in 1 sec 1 l Wasser herausgedrückt wird. 1 l Wasser möge — um nur eine Zahl zu nennen — 1 000 000 Wassertröpfchen enthalten. Wird der Kolben in der gleichen Zeit (1 Sekunde) infolge größeren Arbeitsaufwandes je Tröpfchen um 2 cm bewegt, so tritt eine Wassermenge von $2\text{ l} = 2\,000\,000$ Wassertröpfchen aus: die doppelte Wassermenge ist bewegt worden. Übertragen auf den Elektronenfluß heißt das: Die Elektronen oder die Elektrizitätsmenge (vergleichbar mit der Menge der Wassertröpfchen), die in einer bestimmten Zeit durch den Draht getrieben werden, ist um so größer, je höher die Spannung U ist. Fließt in einer Sekunde die Elektrizitätsmenge Q von 1 Cb (oder Amperesekunde), so beträgt bekanntlich die Stromstärke 1 A. Erhöhen wir den elektrischen Druck (die Spannung) auf das Doppelte, so wird die doppelte Elektrizitätsmenge in der gleichen Zeit (1 sec) durch den Draht fließen: die Stromstärke beträgt 2 A. Wird der Druck auf die Hälfte des ursprünglichen Wertes verringert, so beträgt die Stromstärke I auch nur die Hälfte, nämlich 0,5 A. Man ist demnach in der Lage, durch Wahl der Spannung die Stromstärke beliebig zu beeinflussen.

Die Stärke des Elektronenflusses (die Stromstärke I) ist abhängig von der elektrischen Spannung (U).

Hohe Spannung = starker Elektronenfluß = große Stromstärke.

Niedrige Spannung = kleiner Elektronenfluß = kleine Stromstärke.

Zu bemerken ist, daß eine Spannungsquelle keine Elektronen liefert, sie sorgt nur für den Umlauf der elektrischen Ladungen.

(9) Elektronenfluß (Strom) und Widerstand

Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß ein enges Rohr, durch das ein Wasserstrom fließt, unter gleichen Druckverhältnissen eine geringere Wassermenge hindurchläßt als ein weites. Das enge Rohr setzt dem Wasserstrom einen größeren Widerstand entgegen, d. h. es hat eine kleinere (Wasser-)Leitfähigkeit.

Leitfähigkeit und Widerstand stehen im umgekehrten (reziproken) Verhältnis zueinander.

Bei dem Elektronenfluß herrschen ähnliche Verhältnisse. Die in der Zeiteinheit (1 sec) bewegte Elektrizitätsmenge, also der elektrische Strom I , wird um so geringer sein, je kleiner der Querschnitt des Leiters ist. Wie in Ziffer 5 gesagt wurde, ist die Anzahl der freien Elektronen bestimmend für die Leitfähigkeit eines jeweiligen Stoffes.

Um das oben Gesagte an Hand eines Wasserbeispiels verständlicher zu machen, müssen wir — gleichbleibenden Wasserdruck vorausgesetzt — nicht nur den Querschnitt und die Länge eines Wasserrohres betrachten (vgl. Band Ia, Ziffer 8, 1. Absatz), sondern auch die Oberflächenbeschaffenheit der

Innenwandung. Eine sehr raue und unebene Innenwandung des Wasserrohres vergrößert den Widerstand, der sich dem Wasserfluß entgegensetzt, mehr als die glatte Oberfläche. Dieses Beispiel könnte als Vergleich zu der elektrischen Leitfähigkeit dienen, die — ebenfalls bei gleichbleibender Spannung — durch die Anzahl der freien Elektronen bestimmt ist.

Ist in einem Stoff die Zahl der freien Elektronen gering, so kann nur ein geringer Elektronenfluß stattfinden, der Widerstand des Stoffes ist also groß. Umgekehrt ist der Widerstand eines Stoffes gering, wenn er über viele freie Elektronen verfügt, die Leitfähigkeit daher groß ist.

Viele freie Elektronen = hohe Leitfähigkeit = geringer Widerstand.
Wenige freie Elektronen = geringe Leitfähigkeit = hoher Widerstand.

Daraus ergibt sich:

Kleiner Widerstand = starker Strom	} bei gleichbleibender Spannung
Hoher Widerstand = schwacher Strom	

Stromstärke und Widerstand stehen demnach im umgekehrten Verhältnis zueinander.

(10) Strom, Spannung und Widerstand

Ein Hindernis (Widerstand), der sich dem Elektronenfluß entgegensetzt, kann nur dann in gewünschtem Maße überwunden werden, wenn der Druck entsprechend hoch ist. Ein weiteres Wasserbeispiel mag zur Erläuterung beitragen.

Durch ein weites Rohr fließt ein Wasserstrom unter dem Druck des in Abb. 6a dargestellten Kolbens. An dem Punkt P fließt die Wassermenge von einem

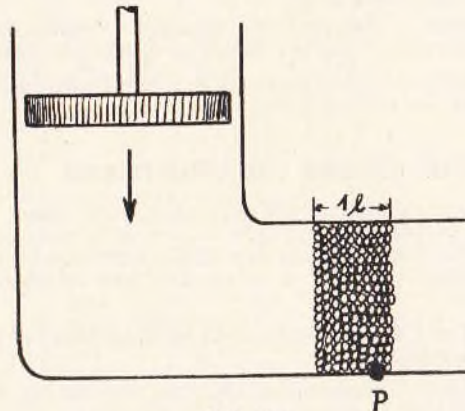


Abb. 6a

Liter in einer Sekunde vorbei; die Geschwindigkeit des Wasserstromes ist gering, die Wassermenge groß.

Verglichen mit dem elektrischen Strom, ist Kolbenarbeit je Tröpfchen = Spannung, Wassermenge von 1 l = Elektrizitätsmenge von 1 Cb, daher Stromfluß oder Stromstärke = 1 Ampere.

Der Querschnitt des Wasserrohres wird um die Hälfte verkleinert (Abb. 6b), der Kolbendruck bleibt unverändert. Es ist leicht einzusehen, daß die Wassermenge, die in 1 sec an dem Punkt P vorbeifließt, nur die Hälfte der vorherigen sein kann (vgl. Ziffer 9). Um die gleiche Wassermenge von 1 l in 1 sec an dem Punkt P vorbeifließen zu lassen, muß der Druck auf das Doppelte erhöht werden.

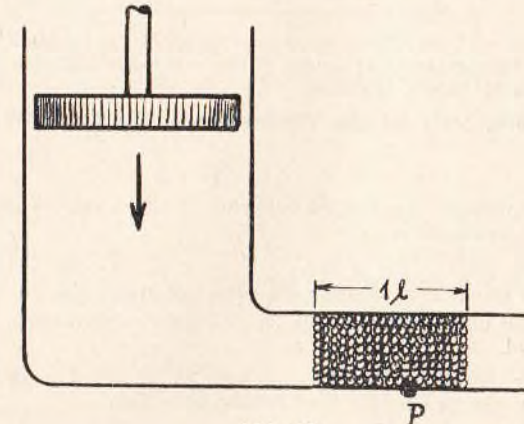


Abb. 6b

Übertragen auf die Elektrizität: Tritt ein Widerstand auf, so wird die Geschwindigkeit des Elektronenflusses abgebremst, sofern nicht die Spannung erhöht wird. Höherer Widerstand verlangt also, um die gleiche Elektrizitätsmenge wie ursprünglich in der gleichen Zeit durch den Draht zu treiben, höhere Spannung.

Anders ausgedrückt:

Wird der Widerstand in einem Stromkreis größer, muß, um gleichbleibende Stromstärke zu erhalten, die Spannung erhöht werden.

Das bisher (insbesondere in Ziffer 10) Aufgeführte ist durch den deutschen Physiker Ohm in seinem für die Elektrizitätslehre grundlegenden Gesetz, das **Ohmsche Gesetz**, formelmäßig festgelegt worden, das im Bd. Ia ausführlich behandelt ist.

(11) Die Stromwärme

In Band Ia, Ziffer 35, hatten wir festgestellt, daß bei Durchgang des elektrischen Stromes durch einen Widerstand Wärme entsteht. Wir hatten ferner gesehen, daß die Wärmeentwicklung um so größer wird, je stärker der Strom ist, der den Widerstand durchfließt.

Da Wärme eine Energieform darstellt, muß, um diese Wärmeenergie zu erzeugen, elektrische Arbeit umgesetzt werden: sie wird verbraucht.

Die elektrische Arbeit errechnet sich gem. Band Ia, Ziffer 38, zu:

$$A = N \times t = U \times I \times t$$

Die Einheit der elektrischen Arbeit ist die Wattsekunde (Ws), die in der Physik 1 Joule (sprich: dschau) nach dem englischen Physiker Joule genannt

wird. Joule hat die durch den elektrischen Strom erzeugte Wärmemenge Q ermittelt und das nach ihm benannte **Joulesche Gesetz** festgelegt. Es lautet:

$$Q = 0,24 \times N \times t \text{ [cal]}$$

Die Einheit cal (in eckigen Klammern) ist uns nicht ganz unbekannt. 1 cal ist die Einheit der **Wärmemenge** Q (nicht zu verwechseln mit der **Elektrizitätsmenge** Q) und heißt **kleine Kalorie**.

Eine kleine Kalorie (cal) ist die Wärmemenge, die 1 cm³ Wasser um 1° C erwärmt.

Beispiele:

- a) Welche Wärmemenge in cal wird verbraucht, um 1 cm³ Wasser von 10° C auf 20° C zu erwärmen?

Lösung: 10 cal.

Um 1 cm³ Wasser um 1° C zu erwärmen, benötigt man 1 cal.

Um 1 cm³ Wasser um 10° C (10° bis 20° = 10°) zu erwärmen, braucht man $10 \times 1 \text{ cal} = 10 \text{ cal}$.

- b) 20 cm³ Wasser mit einer Temperatur von 35° C werden auf 50° erhitzt. Welche Wärmemenge (in cal) wird hierzu benötigt?

Lösung: 300 cal.

50° — 35° = 15°. Da 1 cal 1 cm³ Wasser um 1° C erwärmt, benötigen wir, um 20 cm³ um 1° C zu erwärmen, $20 \times 1 \text{ cal} = 20 \text{ cal}$. Da wir aber 20 cm³ um 15° C erwärmen müssen, ergibt sich folgende Rechnung:

$$20 \times 1 \times 15 = 300 \text{ cal}$$

Die nächst größere Einheit der Wärmemenge ist die „große Kalorie“ oder „Kilokalorie (Cal oder kcal)“. Eine kcal erwärmt 1 kg (1 l) Wasser um 1° C.

Die auf die kleine Kalorie (cal) bezogenen Beispiele gelten sinngemäß auf 1 kg Wasser und 1 kcal.

Wir kommen nun auf unsere Formel $Q \text{ [cal]} = 0,24 \times N \times t$ zurück. $N \times t$ ist die elektrische Arbeit in W oder kW. Da $N = U \times I$ ist, können wir einsetzen:

$$Q \text{ [cal]} = 0,24 \times U \times I \times t \text{ (in sec)}$$

U ist aber nach dem Ohmschen Gesetz $I \times R$. Wir können daher schreiben:

$$\begin{aligned} Q &= 0,24 \times I \times R \times I \times t \\ &= 0,24 \times I \times I \times R \times t \\ &= 0,24 \times I^2 \times R \times t \text{ [cal]} \end{aligned}$$

und haben damit eine andere Form des Jouleschen Gesetzes entwickelt.

Aus diesem Gesetz erkennen wir, daß der elektrische Energieverlust infolge Umsetzung in Wärme in erster Linie von der Stärke des Stromes abhängig ist, der durch einen Widerstand fließt.

Wir nehmen an, daß der Widerstand R eines Verbrauchers unverändert bleibt, z. B. 10 Ohm. Eine Spannungsquelle liefert (innerer Widerstand soll unberücksichtigt bleiben) eine EMK von 40 V. Nach dem Ohmschen Gesetz fließt ein

Strom von $I = \frac{U}{R} = \frac{40}{10} = 4 \text{ A}$. Die an den Widerstand abgegebene Wärmemenge beträgt nach 1 Minute:

$$\begin{aligned} Q &= 0,24 \times I^2 \times R \times t \text{ (t in sec!)} \\ &= 0,24 \times 4^2 \times 10 \times 60 \\ &= 0,24 \times 16 \times 10 \times 60. \end{aligned}$$

Da wir die Faktoren vertauschen können, setzen wir das Produkt

$0,24 \times 10 \times 60 = 144$ vorweg und das Quadrat der Stromstärke ($I^2 = 4^2 = 16$) zuletzt. Es ergibt sich:

$$\begin{aligned} Q &= 144 \times 16 \\ &= 2304 \text{ cal} \end{aligned}$$

Wir erhöhen die Spannung auf das Doppelte. Der Strom I beträgt jetzt $I = \frac{U}{R} = \frac{80}{10} = 8 \text{ A}$, die an den Widerstand R in 1 Minute abgegebene Wärmemenge demnach

$$\begin{aligned} Q &= 0,24 \times R \times t \times I^2 \\ &= 0,24 \times 10 \times 60 \times (2 \cdot 4)^2 = 144 \times 8^2 = 144 \times 64 \\ &= 9216 \text{ cal} \end{aligned}$$

Wir nehmen eine Stromstärke von $16 \text{ A} = 2 \times 8 \text{ A}$ an. An den Widerstand R von 10 Ohm wird in 1 Minute jetzt folgende Wärmemenge abgegeben:

$$\begin{aligned} Q &= 0,24 \times R \times t \times I^2 \\ &= 0,24 \times 10 \times 60 \times 16^2 \\ &= 144 \times 16^2 \\ &= 144 \times 256 \\ &= 36864 \text{ cal} = 36,864 \text{ kcal}. \end{aligned}$$

Zur Erläuterung:

0,24 ist eine unveränderliche Größe, also eine Konstante. Andererseits ist das Produkt aus $R \times t$ in den obigen Beispielen ebenfalls eine Konstante, nämlich $10 \times 60 = 600$. Für die erhebliche Erhöhung der Wärmemenge in diesen 3 Fällen ist das Quadrat der Stromstärke daher allein maßgebend. Bezeichnen wir die Konstante $0,24 \times 10 \times 60 = 144$ mit k und den ursprünglichen Wert der Stromstärke mit a , so ist im Beispiel 1 die Wärmemenge Q zu errechnen zu

$$k \times a^2,$$

im zweiten Beispiel (Verdoppelung der Stromstärke a):

$$k \times (2a)^2 = k \times 2^2 \times a^2 = k \times 4a^2$$

und im dritten Beispiel (Verdoppelung der Stromstärke $2a$):

$$k \times (4a)^2 = k \times 4^2 \times a^2 = k \times 16a^2$$

Hieraus ersehen wir, daß — neben dem Ohmschen Widerstand R und der Zeit t (in sec) — das **Quadrat der Stromstärke I (I^2)** der maßgebliche Faktor für die Erhöhung der Stromwärme ist.

Aus obigen Überlegungen folgern wir:

Der Energieverlust, der über einem Widerstand entsteht, und der sich in Wärme umsetzt, ist in erster Linie abhängig von dem Quadrat der Stromstärke (I^2). Die hierbei entwickelte Wärmemenge Q errechnet sich nach dem Jouleschen Gesetz zu

$$\begin{aligned} Q &= 0,24 \times I^2 \times R \times t \text{ (in sec) [cal]} \\ (1 \text{ cal} &= \frac{1}{1000} \text{ kcal, } 1 \text{ kcal} = 1000 \text{ cal}) \end{aligned}$$

Wir müssen demnach dafür sorgen, daß I^2 so klein wie möglich gehalten wird, damit unnötige Energieverluste durch Wärmeabgabe vermieden werden. Beispiele hierzu finden wir im Band II a, 1. Auflage, Ziffern 77 und 78; 2. Auflage, Ziffern 39 und 40.

III. Elektrische Spannungserzeuger

(12) In Abschnitt II ist das Wesen der strömenden Elektrizität so eingehend erläutert worden, daß auf grundlegende Erklärungen in diesem Abschnitt verzichtet werden kann. In den Ziffern 4 und folgenden wurde von dem „elektrischen Druck“ oder der „Spannung“ gesprochen, ohne daß die Erzeugung dieser Spannung geschildert worden ist. Sie kann auf folgenden Wegen hervorgerufen werden:

- Durch chemische Umsetzung bestimmter Stoffe in sogenannten **elektrischen Elementen (galvanische Elektrizität)**. (Das Wort „Element“ in diesem Zusammenhang darf nicht mit dem Begriff „Grundstoff“ [Abschnitt I] verwechselt werden.)
- Durch Umsetzung mechanischer Arbeit in elektrische infolge Induktion (Dynamomaschinen)
- Durch Wärme (Thermoelektrizität)
- Durch Licht (Photoelektrizität)
- Durch Druck (Druck- oder Piezoelektrizität)
(i und e getrennt aussprechen)

In diesem Abschnitt soll die Spannungserzeugung auf chemischem Wege erläutert werden, soweit sie nicht im Band Ia beschrieben worden ist. Vorerst besprechen wir einen elektrochemischen Vorgang, den man „**Elektrolyse**“ nennt.

(13) Die Elektrolyse

Im Anfang des Abschnittes I wurde dargelegt, daß die kleinsten Teilchen eines Grundstoffes die Atome sind. Ein Grundstoff ist chemisch nicht weiter zerlegbar. Der größte Teil aller auf der Erde vorkommenden Stoffe besteht jedoch nicht aus Grundstoffen allein, sondern aus Verbindungen zweier oder mehrerer Grundstoffe, den **chemischen Verbindungen**. Die kleinsten Teilchen der chemischen Verbindungen, die aus zwei oder mehreren Atomen verschiedener Grundstoffe bestehen, nennt man **Moleküle**. Diese können durch bestimmte chemische und elektrische Maßnahmen in ihre Grundstoffe zerlegt werden (Analyse). Für die 92 Grundstoffe (und auch für die „künstlichen“ [siehe Anmerkung S. 7]) sind chemische Formelzeichen geprägt worden. Z. B. ist das Formelzeichen für Wasserstoff H, für Sauerstoff O, für Schwefel S, für Zink Zn, für Kupfer Cu, für Blei Pb, für Kohlenstoff (chemisch reine Kohle) C usw.

Der chemische Aufbau einer Verbindung wird durch Formelzeichen dargestellt.

Nun besteht eine chemische Verbindung nicht allein aus je **einem** Atom zweier oder mehrerer Grundstoffe, sondern es können **mehrere** Atome ein und desselben Grundstoffes mit **mehreren** Atomen anderer Grundstoffe in eine chemische Verbindung eingehen. Die **Anzahl** der Atome eines Grundstoffes in einer chemischen Verbindung wird durch eine **tiefgestellte Zahl** rechts neben dem Formelzeichen des Grundstoffes bezeichnet.

Das Formelzeichen für Wasser ist z. B. H_2O , d. h., daß in **einem** Molekül Wasser zwei Atome Wasserstoff (H) und ein Atom Sauerstoff (O) vorhanden sind. Schwefelsäure z. B. hat das Formelzeichen H_2SO_4 . PbSO_4 ist das Formelzeichen für das Bleisalz der Schwefelsäure (Bleisulfat), CuSO_4 für das Kupfersalz der Schwefelsäure (Kupfersulfat) usw.

Sämtliche Formelzeichen einer chemischen Verbindung beziehen sich auf ein Molekül dieser Verbindung.

Werden in ein Gefäß, das mit verdünnter Schwefelsäure ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$) gefüllt ist, zwei von der Schwefelsäure nicht angreifbare Elektroden (z. B. Platin) gestellt und diese Elektroden mit den Polen einer Spannungsquelle verbunden, so tritt folgender chemische Vorgang ein (s. Abb. 7):

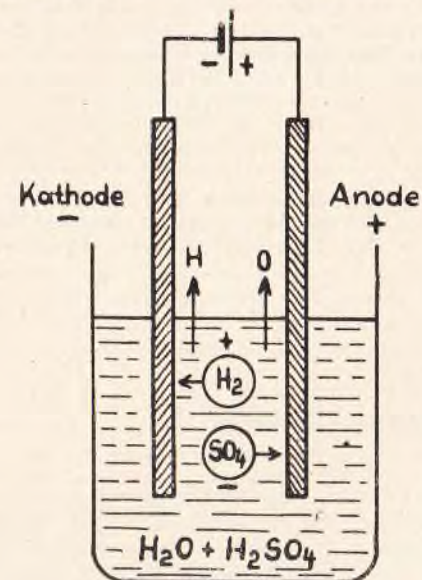


Abb. 7

Ein Teil der Schwefelsäure zerfällt sofort bei Berührung mit Wasser in zwei Bestandteile, nämlich in Wasserstoff (H_2) und den sogenannten „Säurerest“ (SO_4)*. Man nennt diesen Vorgang **Dissotiation**. Das ursprünglich elektrisch neutrale H_2SO_4 -Molekül weist bei seinen Spaltungsteilen elektrische Eigenschaften auf, und zwar ist das H_2 positiv, der Säurerest SO_4 negativ elektrisch. Zwischen den Elektroden herrscht infolge der angelegten Spannung ein elektrisches Feld (vgl. Ziffer 26). Unter dem Einfluß dieses Feldes wandern die (positiv geladenen) H_2 -Moleküle zu der negativ geladenen Elektrode, geben dort ihre (positive) Ladung ab und steigen als Wasserstoffgas hoch. Der (negativ geladene) Säurerest SO_4 wandert zu der positiv geladenen Elektrode, gibt seine Ladung ab und wird dadurch — wie man sagt — chemisch reaktionsfähig, d. h. er kann eine neue chemische Verbindung eingehen. Da die sogenannte „chemische Verwandtschaft“ (Affinität) zwischen dem Säurerest und dem Wasserstoff des Wassers größer ist als die zwischen dem Wasserstoff und dem Sauerstoff, verbindet er sich mit dem H_2 des Wassers wieder zu H_2SO_4 . Der Sauerstoff (O) des Wassers ist nun frei geworden und steigt als Gas an der positiven Elektrode hoch. Auf diesem Umwege ist praktisch das Wasser in seine Bestandteile H_2 und O mittels des elektrischen Stromes zerlegt worden.

Die elektrisch geladenen Molekülteilchen (in diesem Falle H_2 und SO_4) werden **Ionen**, d. h. die Wandernden, genannt, wobei zu merken ist, daß Wasser-

* Anm.: In der Chemie auch „Radikal“ genannt.

stoff und Metalle **positive** Ladungen aufweisen und **mit** dem Strom, die negativen Ionen **gegen** den Strom wandern.

Eine Anlage, in der chemische Verbindungen mittels des elektrischen Stromes zerlegt werden, nennt man eine **Zersetzungszelle**. Die Elektroden einer Zersetzungszelle erhalten bestimmte Bezeichnungen, und zwar wird die Elektrode, die mit dem **Pluspol** der Batterie in Verbindung steht, **Anode**, und die Elektrode, die mit dem **Minuspol** der Batterie in Verbindung steht, **Kathode** genannt. Die Flüssigkeit, in die die Elektroden ragen, bezeichnet man auch hier mit **Elektrolyt**. Der Stromdurchgang durch einen Elektrolyten geschieht durch Wanderung von Ionen. Die Spaltung in Ionen tritt sofort bei der Auflösung eines Salzes oder bei der Verdünnung einer Säure durch Wasser ein.

In einem geschlossenen Stromkreis ist der Stromfluß im äußeren Stromkreis eine Elektronenbewegung (technische Stromrichtung + nach -), innerhalb des Elektrolyten eine Wanderung von Ionen.

Wenn im folgenden von einem **Stromdurchgang** durch einen Elektrolyten die Rede ist, so handelt es sich hierbei immer um eine Wanderung von Ionen. Man nennt die zur Anode wandernden Ionen **Anionen** und die zur Kathode wandernden **Kationen**.

(14) Die elektrischen Elemente

Taucht man einen Zinkstab in eine Zinksulfatlösung ($\text{Zn SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$), dann treten Zinkionen (Zn^{+}) in die Lösung. Dieses Lösungsbestreben haftet mehr oder weniger stark allen Metallen an und wird **elektrolytischer Lösungsdruck** genannt. Andererseits befolgen die in die Lösung gegangenen Ionen das Gesetz des „osmotischen Druckes“, nach dem das Bestreben besteht, die Lösung zu verdünnen. Elektrolytischer Lösungsdruck und osmotischer Druck wirken also einander entgegen. Die Konzentration der Lösung ist für das Überwiegen des einen oder des anderen Druckes mit entscheidend. Da wir es bei diesen Vorgängen mit der Abgabe von Metallionen, d. h. positiv geladenen Ionen, zu tun haben, ist der abgebende Teil immer negativ geladen gegen den aufnehmenden. In der Grenzschicht zwischen Stab und Lösung entsteht deshalb ein elektrisches Feld*, das dem Abwandern der Ionen entgegenwirkt. Es stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein, der dadurch gekennzeichnet ist, daß zwischen dem Metallstab und der Flüssigkeit eine bestimmte elektrische Spannung besteht, deren Größe durch den elektrolytischen Lösungsdruck des Metalls und die Konzentration der Lösung bestimmt wird. Zink hat einen verhältnismäßig hohen elektrolytischen Lösungsdruck und ist deshalb negativ geladen gegen die Zinksulfatlösung. Kupfer dagegen hat einen sehr niedrigen Lösungsdruck, so daß schon bei normaler Konzentration der Kupfersulfatlösung der osmotische Druck den Lösungsdruck des Kupfers übertrifft. Der Kupferstab ist deshalb gegen die Kupfersulfatlösung positiv geladen.

Die Bestimmung der Spannung eines Metalls gegen die Lösung bereitet große Schwierigkeiten, weil man keine Elektrode kennt, deren Spannung gegen die Lösung Null ist. Man mißt daher die Spannungen der Metalle gegen eine künstlich hergestellte Wasserstoffelektrode. Auf diese bezogen, hat Zink eine Spannung von $-0,76$ Volt, Kupfer $+0,34$ Volt, Sauerstoff $+0,41$ Volt. Dem Wasserstoff spricht man die Spannung 0 Volt zu. Stellt man gleichzeitig einen Kupfer- und einen Zinkstab in die Flüssigkeit ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$), dann ergibt sich zwischen beiden nach Abbildung 8 eine Spannung von $0,34 + 0,76 = 1,1$ Volt.

Verbindet man beide Metalle leitend, dann gleichen sich die Ladungsunterschiede aus, d. h., es fließt ein elektrischer Strom.

Der durch den Stromfluß bewirkte Ladungsausgleich stört das oben festgestellte Gleichgewicht. Die Zinkplatte kann deshalb wieder Ionen in die Lösung geben und löst sich bei längerer Dauer des Stromflusses allmählich auf. Solange der Zinkstab vorhanden ist, wird also der Spannungszustand durch Abgabe von Zinkionen aufrecht erhalten. Wir erhalten auf diese Weise einen Spannungserzeuger (einen Generator) auf chemischer Grundlage. Man nennt Generatoren dieser Art elektrische Elemente. Da bei der Auflösung von Zink Wärme frei wird, findet man diese in der Energie, die der elektrische Strom in Form von Wärme und sonstiger Arbeit nach außen abgibt (vgl. Ziffer 11).

* Anm.: S. Ziffer 26.

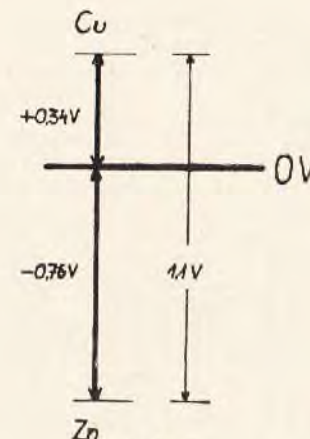


Abb. 8

Da eine Spannung zwischen den Elektroden nur auftreten kann, wenn diese gegen die Lösung verschiedene Spannungen haben, müssen die Elektroden eines elektrischen Elementes immer aus verschiedenen Stoffen bestehen (vgl. Voltasche Spannungsreihe, Band Ia, Ziffer 19).

(15) Die Polarisation (Gaszelle)

Das durch die Elektrolyse des Wassers mit Hilfe verdünnter Schwefelsäure gewonnene Wasserstoff- bzw. Sauerstoffgas steigt nicht nur an den Elektroden **auf**, sondern **bedeckt** diese auch mit einer entsprechenden Gasschicht. Es ist also die Kathode mit Wasserstoffgas, die Anode mit Sauerstoffgas bedeckt, so daß sich nunmehr nicht zwei Elektroden aus dem **gleichen** Stoff gegenüberstehen, sondern zwei verschiedenartige, nämlich eine Wasserstoff- und eine Sauerstoffelektrode.

In Abb. 9 stehen zwei Platinelektroden*) in verdünnter Schwefelsäure. Eine Batterie B ist mit ihrem Pluspol mit einer Elektrode und mit ihrem Minuspol über einen Umschalter U und ein Galvanometer G (ein Meßinstrument, das elektrische Ströme sowohl nach ihrer Stärke als auch nach ihrer Richtung anzeigt) mit der zweiten Elektrode verbunden. Es fließt nun ein Strom I_1 von + der Batterie, rechte Elektrode (Anode), Elektrolyt, linke Elektrode (Kathode), Galvanometer G, Umschalter U, über I zum Minuspol der Batterie. Das Galvanometer zeigt die Stromrichtung an, indem es nach **rechts** ausschlägt. Infolge der in Ziffer 13 geschilderten Vorgänge bedecken sich die beiden Elektroden mit Wasserstoff- bzw. Sauerstoffgas. Wird der Umschalter U auf Stellung II umgelegt, so schlägt das Galvanometer G nach **links** aus und zeigt damit an, daß ein Strom I_2 fließt, der dem Strom I_1 **entgegengesetzt** gerichtet ist. Da ein Strom nur zustandekommen kann, wenn eine Spannung vorhanden ist, muß die EMK, die den Strom I_2 verursacht, in der stofflichen Verschiedenheit der Wasserstoff- und Sauerstoffschicht zu suchen sein. Der Strom I_2 verursacht eine **Rückbildung** der Elektroden in ihren ursprünglichen Zustand, d. h. der Wasserstoff als auch der Sauerstoff gehen in den Elektrolyten über und bilden Wasser, bis sich zuletzt wieder zwei

* Anm.: Für unsere Versuche können auch Kohleelektroden verwendet werden.

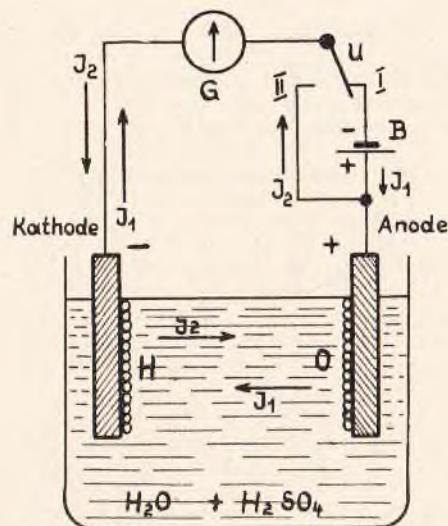


Abb. 9

Platinelektroden gegenüberstehen. Damit ist keine Spannung mehr vorhanden, der Stromfluß hört auf.

(16) Polarisation bei elektrischen Elementen

Wird an die Elektroden eines elektrischen (galvanischen) Elementes ein äußerer Schließungsbogen angelegt, so fließt gemäß Ziffer 14 ein elektrischer Strom. Dieser verursacht im Elektrolyten Polarisationerscheinungen, wie sie unter Ziffer 15 behandelt worden sind. In einem Zink-Kupferelement z. B., das als Elektrolyt verdünnte Schwefelsäure enthält, wandert der frei werdende Wasserstoff der Schwefelsäure im Elektrolyten mit dem Strom und setzt sich an der Kupferelektrode in Form von Wasserstoffbläschen ab, während der Säurerest (SO_4) sich mit dem Zink der negativen Elektrode zu Zinksulfat (ZnSO_4) verbindet. Das Zink geht also mit der Zeit in die Lösung über und wird in ZnSO_4 umgewandelt (vgl. Ziffer 14). Bei länger anhaltendem Stromfluß bedeckt sich die Kupferelektrode mit der Zeit völlig mit Wasserstoffbläschen, so daß sich zuletzt eine Zink- und eine Wasserstoffelektrode gegenüberstehen. Da der Wasserstoff bei Berührung mit der verdünnten Schwefelsäure negativ gegenüber dem Zink erscheint, bildet sich mit größer werdender Wasserstofffläche ein steigender Gegendruck (Gegen-EMK genannt). Die EMK des Elementes nimmt bei vollständig mit Wasserstoff bedeckter Elektrode deshalb den Wert Null an. Dieser Vorgang wird gleichfalls mit **Polarisation** bezeichnet.

(17) Depolarisation

Die Polarisation innerhalb eines Elementes verhindert, daß ein ständiger Strom gleichbleibender Stärke in einem geschlossenen Stromkreis fließt. Unter einem geschlossenen Stromkreis versteht man den Weg, den der elektrische

Strom als Elektronenfluß im äußeren Schließungsbogen und als Ionenwanderung im Elektrolyten zurücklegt. Ein Element ist demnach für eine andauernde Stromentnahme ungeeignet, solange die Polarisation nicht verhindert wird.

Man könnte sich vorstellen, daß an der Kupferplatte des Elementes eine mechanische Einrichtung angebracht wird, die — ähnlich dem Scheibenwischer eines Kraftwagens — die Elektrode von den lästigen Wasserstoffbläschen befreit, also eine **De- oder Entpolarisation** bewerkstelligt. Auf chemischem Wege gelingt jedoch die Depolarisation viel einfacher. Bringt man nämlich in den Elektrolyten eine stark sauerstoffhaltige chemische Verbindung, die sehr leicht Sauerstoff abzuspalten vermag (Depolarisator), so wird sich dieser Sauerstoff mit dem freien Wasserstoff an der positiven Elektrode zu Wasser (H_2O) verbinden. Die Elektrode bleibt von Wasserstoffbläschen frei.

Beim Zink-Kohleelement (Band Ia, Ziffer 24) besteht der Depolarisator aus einem Überoxyd des Mangans (MnO_2), Braunstein genannt.

Sekundärelemente oder Akkumulatoren

(18) 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, deren zwei Elektroden aus ursprünglich **gleichem Stoff** bestehen. Sie werden durch die Einwirkung des elektrischen Stromes umgeformt, so daß nach Abschluß des Umformungsvorganges zwei Elektroden sich gegenüberstehen, die nun in ihrer chemischen Zusammensetzung **unterschiedlich** sind.

Die Wirkungsweise der Sekundärelemente beruht also auf der **Polarisation**. Die in Ziffer 15 behandelte Gaszelle stellt bereits ein Sekundärelement dar. Die Elektroden haben nach einiger Zeit eine EMK gegeneinander, so daß sie in der Lage sind, ihrerseits wieder elektrische Energie abzugeben. Diese Energieabgabe geschieht so lange, bis die Rückbildung der Elektroden in ihre ursprüngliche chemische Zusammensetzung stattgefunden hat. In der Praxis wird allerdings die Rückführung nicht vollständig durchgeführt.

Bei einem Sekundärelement 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).

Der bei der DBP am häufigsten gebrauchte Sammler ist der **Bleiakkumulator**. Hierüber wäre im Band Ia ab Seite 55 nachzulesen.

(19) Alkalische Akkumulatoren

Alkalische Akkumulatoren werden bei der DBP nur beschränkt verwendet. Sie sollen daher nur kurz gestreift werden.

Die Platten von alkalischen Sammlern bestehen aus einer Nickelverbindung (+ Platte) und einer Eisen- oder Cadmiumverbindung (— Platte). Als Elektrolyt wird Kalilauge verwendet.

Alkalische Akkumulatoren sind im Gegensatz zu Bleiakkumulatoren weit weniger empfindlich, auch können sie, ohne daß die Plattensubstanz beschä-

digst wird, stark belastet werden. Selbst ein Kurzschluß schadet ihnen wenig oder gar nicht.

Die EMK beider Arten (Nickel-Eisen- bzw. Nickel-Cadmiumsammler) beträgt etwa 1,2 V.

Alkalische Akkumulatoren werden wegen ihrer langen Lebensdauer und ihrer Unempfindlichkeit gern in beweglichen Fernmeldeanlagen, wie z. B. in Funkwagen, verwendet.

(20) Der Wirkungsgrad η

Bei jeder Übertragung bzw. Umwandlung von Energie entstehen Verluste. Bei Maschinen entstehen sie in erster Linie durch Lagerreibung und Luftwiderstand, bei Akkumulatoren durch die chemische Umwandlung, bei der ein Teil der zugeführten elektrischen Energie in Wärme umgesetzt wird. Die Energie, die man einer Maschine oder einem Akkumulator entnehmen kann, ist stets um einen Betrag **kleiner** als die zugeführte. Man kann beide, die aufgenommene und die zugeführte Energie, ins Verhältnis setzen und gelangt dann zu dem Begriff des „Wirkungsgrades“.

Der Wirkungsgrad (Formelzeichen η [Eta]) ist gleich dem Verhältnis der entnommenen zur zugeführten Energie.

Gemäß Ziffer 11 und Band Ia, Ziffer 38, ist die elektrische Arbeit gleich $N \times t$. Bezeichnet man die entnommene Energie mit $N_2 \times t$ und die zugeführte mit

$N_1 \times t$, so ist $\eta = \frac{N_2 \times t}{N_1 \times t}$. Da sich t gegen t kürzt, so verbleibt:

$$\eta = \frac{N_2}{N_1}$$

Der Wirkungsgrad ist immer eine **Zahl kleiner als 1** (< 1) und kann entweder als Dezimalbruch geschrieben oder in Prozenten ausgedrückt werden.

Beispiel: Zugeführte Leistung $N_1 = 1,2$ PS
Entnommene Leistung $N_2 = 1,0$ PS

$$\eta = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1,0}{1,2} = 0,83 \text{ oder } 83\% \text{ (83 v. H.)}$$

Bei Akkumulatoren liegt η etwa bei 0,75 bis 0,80.

(21) Erläuterung der Hintereinanderschaltung von Elementen und Sammlerzellen

Wie früher erläutert, bedarf es einer gewissen Spannung, um einen Strom durch einen Widerstand zu treiben. Ist die Spannung gering, so wird durch einen Widerstand nur ein verhältnismäßig kleiner Strom fließen. Soll durch den gleichen Widerstand ein stärkerer Strom fließen, so muß die Spannung erhöht werden.

Da ein Zink-Kohle-Element nur eine EMK von 1,5 V und eine Sammlerzelle eine EMK von 2 V aufweisen, wird diese EMK in den weitaus meisten Fällen nicht genügen, einen Strom in erforderlicher Stärke zu erhalten.

Ein Mittel, um eine Spannung auf die notwendige Höhe zu bringen, besteht in der **Hintereinanderschaltung** von Elementen oder Sammlerzellen. Hierdurch

wird die Spannung um die Anzahl der hintereinandergeschalteten Elemente bzw. Sammlerzellen erhöht (s. Bd. Ia, Ziffer 27).

Man verbindet den negativen Pol des ersten Elementes mit dem positiven Pol des zweiten, dessen negativen Pol mit dem positiven Pol des dritten usw. (Abb. 10).



Abb. 10

Bei drei hintereinandergeschalteten Zink-Kohle-Elementen herrscht zwischen dem Pluspol des ersten Elementes und dem Minuspol des dritten eine Spannung von $3 \times 1,5 \text{ V} = 4,5 \text{ V}$, bei drei Sammlerzellen $3 \times 2 \text{ V} = 6 \text{ V}$.

Zur Erläuterung betrachten wir Abb. 11. Hier sind gleichfalls drei Zink-Kohle-Elemente wie in Abb. 10 hintereinandergeschaltet. Den Pluspol des ersten Elementes wollen wir erden; er hat gemäß Ziffer 28 das Potential Null. Der

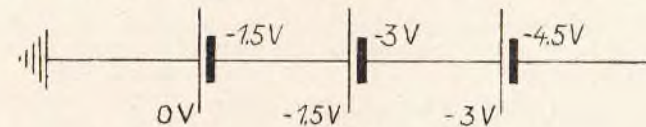


Abb. 11

Minuspol dieses Elementes hat gegenüber dem Pluspol ein Potential von $-1,5 \text{ V}$, und somit hat der mit ihm in leitender Verbindung stehende Pluspol des zweiten Elementes auch das Potential $-1,5 \text{ V}$, sein Minuspol dagegen ein um $-1,5 \text{ V}$ höheres Potential, also das Potential -3 V . Der mit dem Minuspol des zweiten Elementes verbundene Pluspol des dritten Elementes wird dadurch auf das Potential -3 V gebracht, so daß nunmehr sein Minuspol gleichfalls ein um $-1,5 \text{ V}$ höheres Potential erhält, also -3 V und $-1,5 \text{ V} = -4,5 \text{ V}$.

Bei sechs hintereinandergeschalteten Sammlerzellen wird also zwischen dem Pluspol der ersten Zelle und dem Minuspol der sechsten Zelle eine Spannung von $6 \times 2 \text{ V} = 12 \text{ V}$ herrschen. Näheres über die Hintereinanderschaltung von Spannungsquellen, den hierdurch sich vergrößernden inneren Widerstand usw. s. Band Ia, Ziffer 27. Hier wäre auch über die Parallel- und Gruppenschaltung (gemischte Schaltung) nachzulesen.

IV. Thermo-, Photo- und Piezoelektrizität

(22) Thermoelektrizität

Erwärmt man die Lötstelle zweier Drähte aus verschiedenen Metallen (Bimetallstreifen), so entsteht in ihr eine EMK und in dem Schließungsbogen, der die Bimetallstreifen miteinander verbindet, ein Strom, den man **Thermostrom** nennt (Abb. 12).

Eine solche Anordnung wird **Thermoelement** genannt. Die EMK ist jedoch sehr gering und ist abhängig von der Art der Metalle. Wie bei der Voltaschen Spannungsreihe, hat man hier eine **thermoelektrische Spannungsreihe** aufgestellt. Die größte Spannung (0,01 V) besteht zwischen Antimon (+) und Wis-

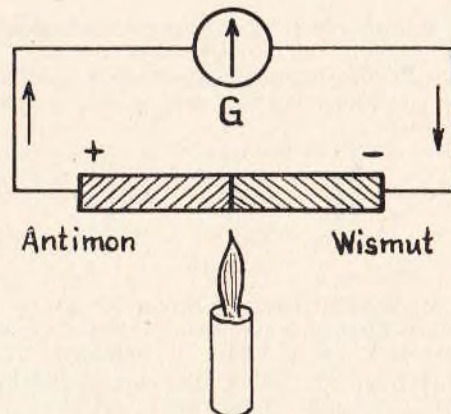
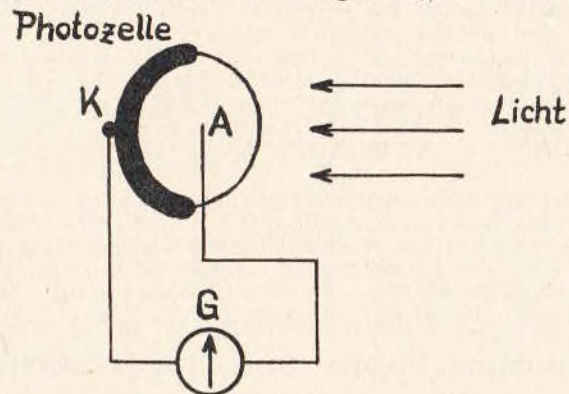


Abb. 12

mut (—). Die Spannung kann durch Hintereinanderschaltung mehrerer Thermoelemente zu einer **Thermosäule** erhöht werden.

(23) Lichtelektrizität (Photoelektrizität)

Treffen Lichtstrahlen auf bestimmte Stoffe, insbesondere auf das Metall Cäsium (Photozelle als Vakuum- oder Edelgaszelle), so werden durch die auf-



K = Kathode (Metall)

A = Anode

Bei Auftreffen von Licht auf Kathode:
Stromfluß Kathode - Anode - Galvano-
meter - Kathode

Abb. 13

prallenden Lichtteilchen (Photonen) Elektronen aus dem Metall frei. Es entsteht ein elektrischer Strom (Abb. 13), dessen Stärke der Stärke des auftretenden Lichtes proportional ist. Starkes Licht verursacht einen stärkeren Stromfluß als schwach einfallendes Licht. Die Stromstärken sind in allen Fällen sehr niedrig, genügen aber, um elektrische Wirkungen zu erzielen.

(Anwendung: Bildtelegraphie, Tonfilm, Fernsehen, elektrischer Belichtungs-
messer).

(24) Druck- oder Piëzelektrizität

Druck- oder Piëzelektrizität tritt auf, wenn auf bestimmte Kristalle, z. B. Quarz oder Turmalin, ein mechanischer Druck ausgeübt wird. Auch hier ist die EMK sehr klein; sie schwankt mit der Stärke des aufgewandten Druckes.

V. Ruhende elektrische Ladungen

(25) Nachweis des Spannungszustandes

Während man das Vorhandensein eines elektrischen Stromes an seinen Wirkungen erkennen kann, ist der Nachweis eines Spannungszustandes bei **offenen** Leitern nur mit besonderen Mitteln, die in der Praxis nicht häufig gebräuchlich sind, möglich.

In Abbildung 14 sind zwei leicht bewegliche, senkrecht aufgehängte Leiter, deren Enden sich nicht berühren (offene Leiter), dargestellt. Legt man an die



Abb. 14

befestigten Enden eine Gleichspannungsquelle, zwischen deren Polen eine hohe Spannung herrscht (in Abbildung 14 durch (+) und (—) dargestellt), so findet ein Transport von Elektronen auf den rechten Leiter statt (—), während der linke Leiter einen Elektronenmangel (+) aufweist: es herrscht nun zwischen beiden Leitern eine Spannung. Als Folge dieser Spannung bemerkt man, daß die Leiter sich **aufeinander zu bewegen** (in Abbildung 14 durch Pfeile dargestellt), und zwar, wie messende Versuche zeigen, um so stärker, je höher die Spannung ist.

Ein verhältnismäßig einfaches Gerät zum Messen einer Spannung ist das Braunsche Elektrometer (Abbildung 15).

In einem Gehäuse G ist eine Leichtmetallschiene S gut isoliert befestigt. Leitend mit der Schiene S ist ein leicht drehbarer, gleichfalls aus Leichtmetall

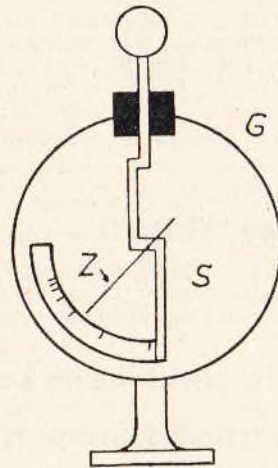


Abb. 15

bestehender Zeiger Z angebracht, dessen einer Arm über eine in Volt geeichte Skala gleitet. Wird nun die Leichtmetallschiene mit einem Pol einer Gleichspannungsquelle und das Gehäuse mit dem anderen Pol verbunden, so schlägt der Zeiger aus, und die Höhe der Spannung kann in Volt abgelesen werden. Der Ausschlag ist um so größer, je höher die angelegte Spannung ist.

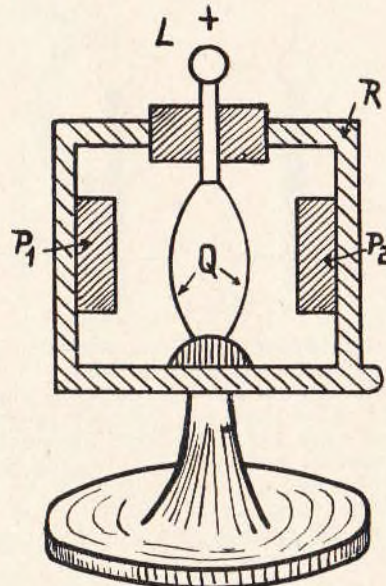


Abb. 16

Wir betrachten ein weiteres Instrument zum Nachweis eines Spannungszustandes, das sogenannte Zweifaden-Elektrometer (Abbildung 16).

Zwischen zwei Metallplatten P 1 und P 2, die durch einen isoliert aufgestellten Rahmen R in leitender Verbindung stehen, hängen zwei von dem Rahmen gut isolierte metallisierte Quarzfäden Q, die über einen Leiter L an einen Pol einer Spannungsquelle angeschlossen werden können. Der andere Pol der Spannungsquelle steht mit den Platten P 1 und P 2 in leitender Verbindung. Wird z. B. an die Platten P 1 und P 2 eine negative Spannung und an die Quarzfäden ein positive Spannung angelegt, so spreizen sich die Quarzfäden. Die Größe der Spreizung ist ein Maß für die zwischen den Platten und den Quarzfäden herrschende Spannung.

Wir betrachten die Anordnung Abbildung 17. Zwei Leiter, L 1 und L 2, wer-

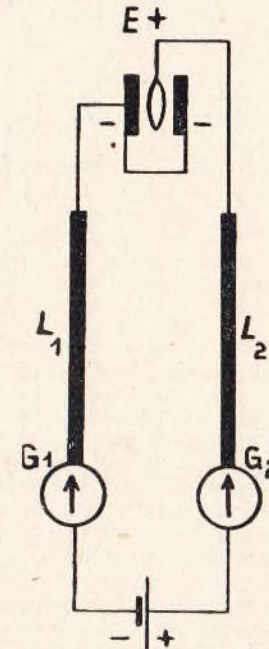


Abb. 17

den über zwei Galvanometer an eine Gleichspannungsquelle gelegt. An den offenen Enden der Leiter befestigen wir ein Zweifadenelektrometer E. Es findet ein Elektronentransport von dem negativen Pol der Spannungsquelle auf den Leiter L 1 statt, während der Leiter L 2 einen Elektronenmangel aufweist. Für die (sehr kurze) Zeit des Elektronentransportes schlagen beide Galvanometer aus und zeigen damit an, daß ein Elektronenfluß stattgefunden hat. Das Elektrometer, dessen Platten mit dem negativen Pol und dessen Quarzschlinge mit dem positiven Pol der Spannungsquelle verbunden ist, zeigt an, daß zwischen L 1 und L 2 eine Spannung besteht. Wird die Gleichspannungsquelle abgeschaltet, so zeigt das Elektrometer an, daß zwischen L 1 und L 2 die Spannung bestehen bleibt. Der Spannungszustand ist also übertragbar.

Hieraus erwachsen für die Praxis Gefahrenmomente, weil die Spannung zwischen zwei gut isolierten Leitern (Kabel, Freileitungen) auch nach Abschaltung der Spannungsquelle erhalten bleibt. Bei Arbeiten an Hochspannungsleitungen ist also in jedem Falle größte Vorsicht geboten.

(26) Das elektrische Feld

Zwischen zwei unter Spannung stehenden Platten hängt eine negativ aufgeladene Holundermarkkugel an einem gut isolierenden Seidenfaden (Abb. 18).

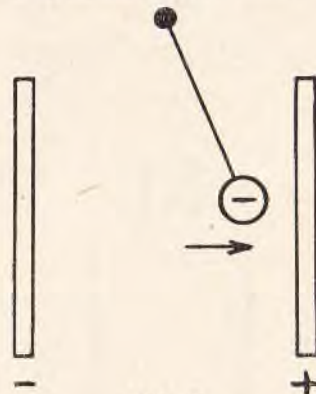


Abb. 18

Die Holundermarkkugel wird von der mit Elektronenmangel behafteten (positiven) Platte angezogen. Je höher die Spannung zwischen beiden Platten ist, um so größer ist der Ausschlag der Holundermarkkugel. Verbindet man die beiden Platten durch einen Leiter, so gleichen sich die entgegengesetzten Ladungen aus, die Platten werden elektrisch **neutral**, und die Holundermarkkugel geht wieder in die Ruhelage zurück. Ladet man die Platten wieder auf, so wiederholt sich der gleiche Vorgang: die negativ aufgeladene Holundermarkkugel bewegt sich wieder auf die positive Platte zu. Zwischen den geladenen Platten findet also eine **Kraftwirkung** auf die geladene Holundermarkkugel statt.

Dieser Versuch zeigt, daß der Raum zwischen den beiden mit entgegengesetzten Ladungen behafteten Platten eine **Zustandsänderung** erfahren haben muß, und den jetzigen Zustand des Raumes nennt man das **elektrische Feld**.

Das elektrische Feld ist der Zustand des Raumes, in dem auf eine elektrische Ladung eine Kraft ausgeübt wird.

In Abb. 14 (Ziffer 25) äußert sich diese Kraft darin, daß sich die beiden **ungleichnamig** aufgeladenen Leiter **aufeinander** zu bewegen, und daß in Abb. 18 die negativ geladene Holundermarkkugel sich der positiven Platte nähert. Diese Kraftwirkung ist abhängig von der **Höhe der Spannung** zwischen zwei elektrisch geladenen Körpern; sie **nimmt mit steigender Spannung zu**.

Wie in Abb. 17 und den Erläuterungen hierzu dargestellt, ist die Aufladung des Leiters L 1 mit einem Elektronenfluß verbunden, so daß sich auf ihm eine Elektronenanhäufung bildet, wohingegen der Leiter L 2 einen Elektronen-

mangel aufweist. Die Spannung zwischen L 1 und L 2 ist gleich der Spannung zwischen den Polen der Gleichspannungsquelle. Wird deren Spannung vergrößert, dann tritt eine Erhöhung der Elektronenansammlung auf L 1 auf: die Spannung zwischen L 1 und L 2 hat sich gleichfalls vergrößert und damit auch die Stärke des elektrischen Feldes zwischen L 1 und L 2. Umgekehrt: Wird die Spannung kleiner gewählt, dann ist die Elektronenansammlung auf L 1 gleichfalls kleiner und somit die Stärke des elektrischen Feldes geringer. Da weiterhin die Anhäufung von Elektronen auf einem offenen Leiter mit einem Elektronenfluß (von allerdings sehr geringer Dauer) verbunden ist (erkenntlich an dem Ausschlag der Galvanometer), bedeutet jede **Veränderung der Spannung bzw. des elektrischen Feldes** jedesmal einen **Stromfluß**.

Wir denken uns die negativ geladene Holundermarkkugel Abb. 18 in der Mitte zwischen den Leitern L 1 und L 2 der Abb. 17, die wir als Platten ansehen wollen, aufgehängt. Durch Verringern des Abstandes von L 1 und L 2 oder durch Erhöhen der Spannung verstärken wir die auf die negative Holundermarkkugel wirkenden Kräfte, so daß die Kugel ihre Ladung an die rechte (positive) Platte abgibt und daher gegenüber der negativen Platte positiv geladen erscheint. Da nach dem elektrischen Grundgesetz (Ziffer 3) gleichnamige Ladungen sich abstoßen und ungleichnamige sich anziehen, wird die Holundermarkkugel sich zur negativen Platte hin bewegen und von ihr eine weitere negative Ladung aufnehmen. Jetzt wiederholt sich das Spiel: die nunmehr negativ geladene Kugel wandert in Richtung des elektrischen Feldes zur positiven Platte, gibt dort ihre Ladung ab und wandert wieder zur negativen Platte. Es findet somit ein Transport von elektrischen Ladungen in dem Raum zwischen den beiden Platten längs der Kraftrichtung des elektrischen Feldes statt. **Ein Transport von elektrischen Ladungen, also von Elektronen, bedeutet einen elektrischen Strom.**

Durch diesen Versuch haben wir deutlich gemacht, was in Ziffer 4 geschildert worden ist:

Der elektrische Strom ist die Bewegung von Elektronen (negativen Elementarladungen) in einer Richtung. Diese Richtung wird bestimmt durch die Richtung des elektrischen Feldes.

Schalten wir die Spannung, also den Generator, ab, so bleibt vorerst der Spannungszustand zwischen den Platten gem. Ziffer 25 bestehen. Durch den wiederholten Transport der auf der Holundermarkkugel befindlichen (negativen) Ladungen auf die positive Platte nimmt aber die Höhe der Spannung und damit die Feldstärke ab. Zuletzt hat ein Ausgleich der Spannung stattgefunden: beide Platten sind nunmehr elektrisch neutral.

Folgerung: Beim Fließen eines elektrischen Stromes wird das elektrische Feld abgebaut. Bleibt aber der Generator an den Platten angeschlossen, so bleibt der ursprüngliche Spannungszustand erhalten, der Ladungstransport findet weiterhin statt.

Da (abgesehen von dem obigen Versuch) der elektrische Strom in der Praxis durch einen **Leiter** fließt, müssen wir aus dem Vorhergesagten den Schluß ziehen, daß sich das elektrische Feld **längs** eines Leiters aufbaut. **Quer** zu dem Leiter liegt bei Stromfluß das **magnetische Feld** (vgl. Band IIa, Ziffer 48, [1. Auflage], Ziffer 10 [2. Auflage]).

Das elektrische Feld eines stromdurchflossenen Leiters steht stets im rechten Winkel zum magnetischen Feld.

Das elektrische Feld läßt sich durch bestimmte Maßnahmen darstellen. Zwischen zwei Platten mit ungleichnamiger Ladung erscheint das Feld in Form von Linien, die **zueinander** streben, zwischen zwei Punkten gleichnamigen Ladungszustandes in Form von Linien, die **auseinander** gehen (Abb. 19 a und b). *)

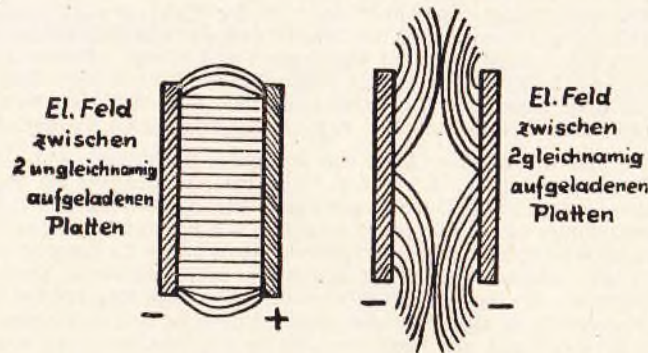


Abb. 19 a

Abb. 19 b

Die Feld- oder Kraftlinien sind in Wirklichkeit nicht vorhanden, da der **gesamte Raum zwischen den Platten lückenlos** von dem Zustand betroffen wird. Sie dienen jedoch als wichtiges zeichnerisches Mittel, um Krafrichtung und -größe im elektrischen Feld anschaulich darstellen zu können.

Wir legen folgendes fest (vgl. Abb. 20):

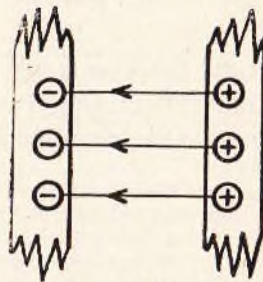


Abb. 20

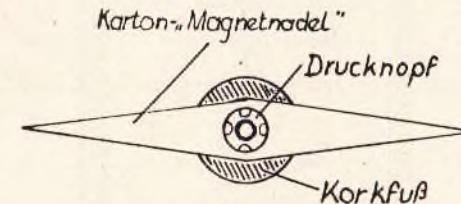
Die **Pfeile** an den Kraftlinien geben uns die **Richtung** an, in der die positive Ladung bewegt wird. Die **Zahl der Kraftlinien pro cm^2** gibt Aufschluß über die **Größe der Kraft**, die an der positiven Ladung angreift.

Ist also die Zahl der Kraftlinien je cm^2 groß, so ist die Kraftwirkung auf eine im elektrischen Feld befindliche Ladung größer als bei geringerer Feldliniendichte je cm^2 (vgl. Kraftflußdichte in einem magnetischen Feld, Band II a). Zwischen zwei eng benachbarten Platten mit ungleichnamigen Ladungen verlaufen die Feldlinien parallel. Man spricht hier von einem **gleichartigen** oder **homogenen Feld**. An den Rändern verlaufen die Feldlinien bogenförmig. Man spricht hier von einem Streufeld.

*) Anm.: Vgl. auch magnetisches Feld, Band II a, Ziffer 5 (43).

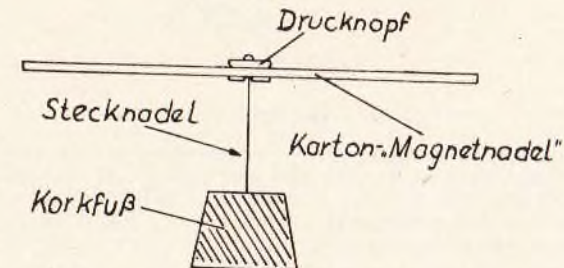
Einen sehr anschaulichen Versuch zur Darstellung des elektrischen Feldes wollen wir besprechen.

Aus kräftigem Zeichenkarton schneiden wir Stückchen heraus, denen wir die Form von Magnetnadeln geben, wie eine solche in Band II a (1. Auflage Abb. 77 d, 2. Auflage Abb. 1 d), gezeigt ist. Als Lagerhütchen für diese „Magnetnadeln“ benutzen wir Druckknöpfe (s. Abb. 21 a). Aus scheibenförmig geschnittenen Korkstückchen fertigen wir Füße an und führen durch deren Mitte Stecknadeln (s. Abb. 21 b). Auf diesen Spitzen ruhen unsere Karton — „Magnetnadeln“.



Draufsicht

Abb. 21 a



Seitenansicht

Abb. 21 b

Die „Magnetnadeln“ stellen wir in den Raum zwischen den beiden Platten auf (s. Abb. 22). Legen wir keine Spannung an die Platten, so liegen die „Magnetnadeln“ ungeordnet. Schließen wir die Platten an eine Hochspannungsquelle (Influenz-Elektrieremaschine, Bandgenerator oder Hochspannungsgleichrichter), so stellen wir fest, daß sich die „Magnetnadeln“ gem. Abb. 22 ordnen. Zwischen den Platten verlaufen die Längsachsen der „Magnetnadeln“ parallel und zeigen damit an, daß ein „homogenes“ (gleichartiges) elektrisches Feld vorhanden ist. An den Rändern der Platten stellen sich die „Magnetnadeln“ in einen bestimmten Winkel zu den Platten. Hieran erkennen wir, daß das elektrische Feld „streut“. Die Abb. 22 entspricht somit der Abb. 86 a im Band II a (1. Auflage) bzw. Abb. 10 a (2. Auflage). Bezüglich der Ausdehnung und Richtung des magnetischen Feldes und des elektrischen Feldes bestehen keine wesentlichen Unterschiede.

Bei diesem Versuch wird uns der Unterschied zwischen dem magnetischen und dem elektrischen Feld klar:

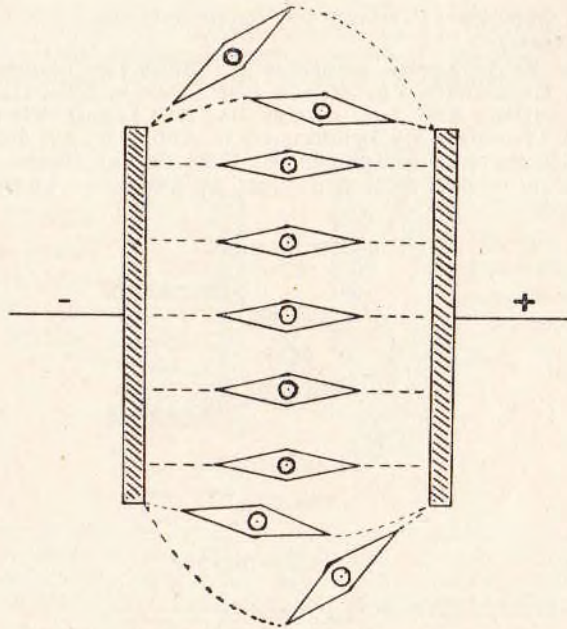


Abb. 22

Das magnetische Feld ist der Zustand des Raumes, in dem auf **Magnetpole** eine Kraft wirkt. *) Das elektrische Feld ist der Zustand des Raumes, in dem auf **elektrische Ladungen** eine Kraft wirkt.

Der Grund, warum Isolierstoffe, in diesem Falle Kartonstückchen, sich durch ein elektrisches Feld beeinflussen lassen, ist aus Ziffer 29 (elektrische Influenz) zu ersehen.

(27) Das Messen der Feldstärke

Die Einheit der Feldstärke $\mathcal{E}$ ist das Volt pro cm Feldlinienlänge. $\mathcal{E} = 20 \text{ V/cm}$ bedeutet, daß zwischen zwei Punkten eines elektrischen Feldes, die 1 cm voneinander entfernt sind, eine Spannung von 20 V herrscht. Abb. 23 dient zur Erläuterung. Zwischen zwei Platten P_1 und P_2 besteht in Abhängigkeit von der angelegten Spannung ein elektrisches Feld. Bringt man in das Feld eine weitere Platte P_3 und schaltet man zwischen P_1 und P_3 ein Elektrometer E , so zeigt das Elektrometer an, daß zwischen P_1 und P_3 auch eine Spannung herrscht. Die Höhe dieser Spannung ist abhängig von der Entfernung der Platte P_3 von der Platte P_1 . Berühren sich P_1 und P_3 , so ist keine Spannung vorhanden. Berühren sich jedoch P_2 und P_3 , so zeigt das Elektrometer die zwischen P_1 und P_2 herrschende **Gesamtspannung** an. Zwischen

*) Anm.: Vgl. „Magnetisches Feld“ und Versuche hierzu, Band IIa, Ziffer 43 (1. Auflage), Ziffer 5 (2. Auflage).

P_1 und P_3 wird das Elektrometer eine Spannung anzeigen, die je nach dem Abstand von P_1 einen Wert **zwischen Null** und der **Gesamtspannung** annimmt. Die Gesamtspannung teilt sich demnach in diesem Beispiel in zwei Teilspannungen auf, deren Summe der Gesamtspannung entspricht, nämlich in die Teilspannung zwischen P_1 und P_3 und die zwischen P_3 und P_2 .

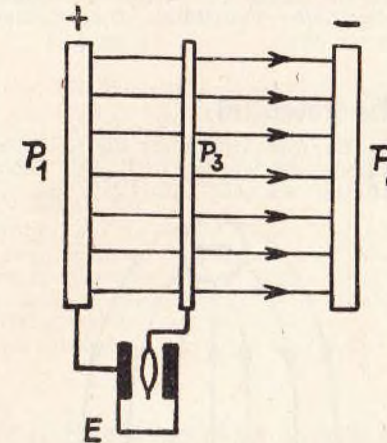


Abb. 23

Es herrscht also zwischen **jedem Punkt** des elektrischen Feldes gegenüber der Platte mit positiver Ladung eine Spannung, die ihren höchsten Wert an der Platte mit negativer Ladung aufweist. Wie oben dargelegt, ist die Spannung an der positiven Platte gleich Null, bei der negativen Platte hat sie ihren Höchstwert erreicht. Man spricht daher von einem **Spannungsabfall** und bringt damit zum Ausdruck, daß eine Spannung von ihrem Höchstwert auf den Wert Null abfällt. *) In einem homogenen Feld verläuft der Spannungsabfall geradlinig (Abb. 24). In dieser Abbildung ist angenommen, daß die Platte P_2 mit -3000 V geladen ist. Zwischen P_1 und P_2 besteht demnach eine

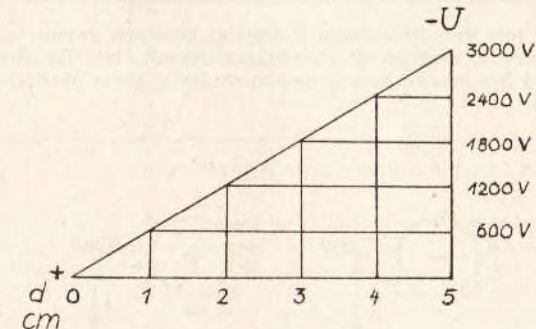


Abb. 24

*) Anm.: Vgl. Band Ia, Ziffer 15.

Spannung von 3000 V. Der Abstand 0 bis d der beiden Platten betrage 5 cm. Denkt man sich die Platte P_3 1 cm von der positiv geladenen Platte P_1 entfernt, so hat die Spannung zwischen P_1 und P_3 den gleichen Wert wie zwischen cm 3 und 2 oder zwischen cm 1 und Null, in Abb. 24 jeweils 600 V. Man sagt, daß in diesem Falle der Spannungsabfall pro cm 600 V beträgt. Dieser Spannungsabfall pro cm Feldlinienlänge ist das praktische Maß für die in diesem Beispiel vorhandene elektrische Feldstärke. Ihre Einheit ist das Volt pro cm ($\frac{V}{cm}$).

(28) Das elektrische Potential

Wie in Ziffer 7 erläutert, ist unter Spannung die Arbeit zu verstehen, die an eine Ladungseinheit aufgebracht werden muß. Wir denken uns eine Kugel, die über der Erdoberfläche schwebt (Abb. 25) und nehmen jetzt einen

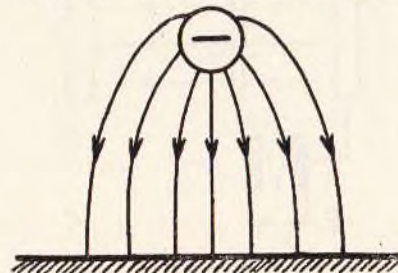


Abb. 25

Ladungstransport von der Erde zur Kugel vor. Dadurch entsteht ein elektrisches Feld zwischen der Kugel und der Erde. Je größer die auf die Kugel gebrachte Elektrizitätsmenge ist, um so mehr Arbeit ist aufzuwenden, um gegen das Feld neue Ladungen auf die Kugel zu bringen; es baut sich in steigendem Maße eine Spannung gegen Erde auf. Da gleichzeitig durch den Transport der Ladungen Energie der Lage (potentielle Energie, s. Ziffer 7) gespeichert wird, nennt man die Spannung gegen Erde auch das **Potential** eines Punktes, wobei man der Erde das Potential Null gibt.

Zwei Punkte mit verschiedenem Potential besitzen gegeneinander eine Potentialdifferenz, und diese Potentialdifferenz ist die Spannung U . Potential und Spannung haben demnach die gleiche Maßeinheit, nämlich das Volt.

Die Abbildungen 26 a bis d dienen zur Erläuterung.

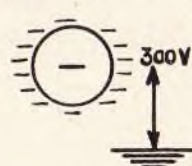


Abb. 26 a

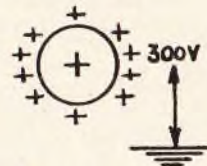


Abb. 26 b

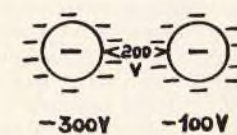


Abb. 26 c

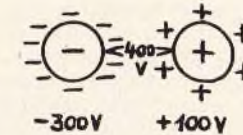


Abb. 26 d

Abb. 26 a zeigt einen mit 300 V negativ gegen Erde aufgeladenen Körper (Potential -300 V). In Abb. 26 b hat ein positiv geladener Körper ein Potential von $+300$ V. In Abb. 26 c beträgt die Spannung (die Potentialdifferenz) zwischen zwei gleichnamig aufgeladenen Körpern (-300 V und -100 V) gleich 200 V, in Abb. 26 d zwischen zwei ungleichnamig aufgeladenen Körpern (-300 V und $+100$ V) gleich 400 Volt.

Zum besseren Verständnis sei als Vergleich das Thermometer aufgeführt, das bekanntlich die Temperaturen auf den Gefrierpunkt des Wassers (Null Grad) bezogen, anzeigt. Temperaturen unter dem Nullpunkt sind bekanntlich Minus-Temperaturen (vgl. Abb. 26 a), solche über dem Nullpunkt Plus-Temperaturen (vgl. Abb. 26 b). Der Temperaturunterschied zwischen -10° und -5° beträgt 5° (vgl. Abb. 26 c) und der zwischen $+15^\circ$ und -10° gleich 25° (Abb. 26 d).

(29) Die elektrische Beeinflussung oder Influenz

Auf der Wirkung des elektrischen Feldes beruht eine elektrische Erscheinung von besonderer Bedeutung, die man **elektrische Beeinflussung** oder **Influenz** nennt.

Abb. 27 zeigt zwei Platten P_1 und P_2 , zwischen denen sich ein isoliert befestigter Metallkörper M befindet, der keinen Ladungszustand aufweist, also elektrisch neutral ist. Dieser Metallkörper trägt drei Elektroskope A, B und C. Da kein

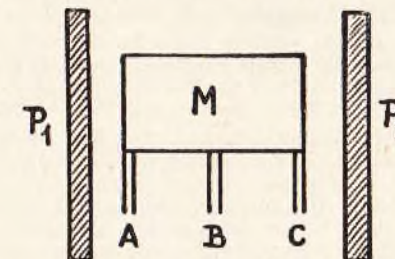


Abb. 27

Ladungszustand auf dem Metallkörper besteht, sind die Elektroskope in Ruhe, d. h. ihre Blättchen sind nicht gespreizt. Die beiden Platten P_1 und P_2 werden nun in einen entgegengesetzten elektrischen Ladungszustand versetzt, so daß zwischen ihnen ein elektrisches Feld aufgebaut wird (vgl. Ziffer 26). Wir bemerken, daß sich die Blättchen der Elektroskope A und C spreizen, während das Elektroskop B in Ruhe verbleibt (Abb. 28).

Wir wollen zur leichteren Erklärung des Nachfolgenden den Elektronenmangel (positive Ladung) als etwas Selbständiges auffassen. Wir nehmen also an, daß

positive Ladungen auch beweglich sind. Ein ungeladener (elektrisch neutraler) Körper hätte demnach genau soviel positive wie negative Ladungen.

Das Spreizen der Blättchen der Elektroskope A und C besagt uns demnach, daß der ursprünglich neutrale Metallkörper in einen elektrischen Ladungszustand übergeführt worden sein muß, bei dem sich die Ladungen an den **Enden** des Körpers befinden. Entfernen wir jetzt den Metallkörper aus dem Raum zwi-

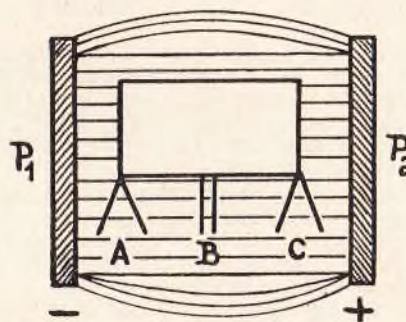


Abb. 28

schen den Platten, indem wir den Körper selbst nicht berühren, sondern lediglich die Isolation, so fallen die Elektroskopblättchen zusammen. Das ist ein Zeichen dafür, daß der Metallkörper wieder in den elektrisch neutralen Zustand versetzt worden ist. Bringen wir den Metallkörper wieder zwischen die Platten, so schlagen die Blättchen der Elektroskope A und C wieder aus. Die Ursache dieser Erscheinung ist also im elektrischen Feld zwischen den Platten zu suchen.

Wir nehmen jetzt an Stelle des Metallkörpers zwei Metallplatten, die an isolierten Griffen befestigt sind, führen sie in das elektrische Feld und achten darauf, daß sich die Platten berühren. Nun nehmen wir eine der beiden Platten aus dem Feld und prüfen mittels eines Elektrometers die Polarität der Ladung. Jetzt nehmen wir die zweite Platte heraus und prüfen ebenfalls ihre Polarität. Wir stellen fest, daß die Polarität dieser Platte **entgegengesetzt** der ersten ist, weil der Zeiger des Elektrometers auf Null zurückgeht.

Die Erklärung ist aus Abb. 29 ersichtlich. Unter dem Einfluß des elektrischen Feldes zwischen den Platten P_1 und P_2 tritt eine Scheidung der Ladungen des ursprünglich neutralen Körpers ein. Dieser Vorgang ist nur so zu erklären, daß die Ladungen bereits in dem Metallkörper bzw. in den Metallplatten vorhanden gewesen sind, sie sich aber nach außen hin nicht bemerkbar machen konnten (vgl. Ziffer 5 „freie Elektronen“). Infolge der gleichmäßigen Verteilung in dem Körper halten sich die Ladungen das Gleichgewicht; sie heben sich in ihren Wirkungen auf. Die im elektrischen Feld auf die Ladungen der Metallplatten wirkenden Kräfte verursachen, daß die Elektronen der Platten dem Zug des Feldes folgen. Dadurch tritt an der einen Seite Elektronenüberschuß (negative Ladung) und an der anderen Seite Elektronenmangel (positive Ladung) auf. Hieraus erklärt sich das Einstellen der Karton-„Magnetnadeln“ (Ziffer 26) in Richtung des Feldes. Trennen wir die Platten voneinander, solange sie sich im elektrischen Felde befinden und führen sie dann heraus, behalten sie ihre Ladungen, wie wir das am Elektrometer nachgewiesen haben. Dieser Vorgang der Trennung von Ladungen eines ursprünglich elektrisch neutralen Körpers nennt man **elektrische Beeinflussung** oder **Influenz**.

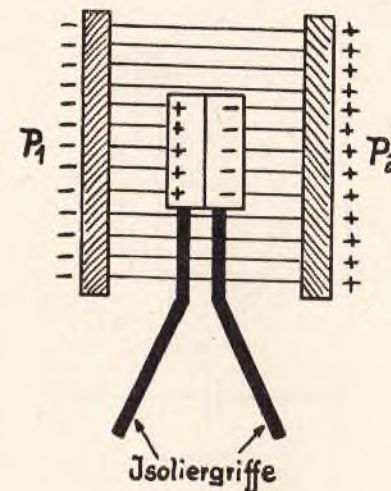


Abb. 29

Unter Influenz versteht man die Beeinflussung eines isolierten neutralen Leiters durch ein elektrisches Feld. Hierbei tritt infolge der Kraftwirkung des elektrischen Feldes eine Wanderung der freien Elektronen in entgegengesetzter Richtung zu den Feldlinien ein. Die Folge ist, daß an der einen Seite ein Elektronenüberschuß und auf der anderen Seite ein Elektronenmangel vorhanden ist.

VI. Der Kondensator

(30) Aufbau und Wirkungsweise des Kondensators, Begriff Kapazität

Jede Vorrichtung, die den Aufbau eines elektrischen Feldes ermöglicht, nennt man einen Kondensator. Zwei voneinander gut isolierte Drähte, wie z. B. zwei Kabeladern oder Freileitungen, stellen gleichfalls einen Kondensator dar, weil sich zwischen ihnen bei einer angelegten Spannung ein elektrisches Feld bildet. In seiner einfachsten Form besteht ein Kondensator aus zwei Platten, die einander gegenüberstehen und die durch eine Isolierschicht (Luft, Glimmer, Papier oder sonstiges Isoliermaterial) voneinander getrennt sind.

Abb. 17 stellt bereits einen Kondensator dar. Ist er mit einem Generator verbunden gewesen, so daß ein Transport von elektrischen Ladungen stattgefunden hat, dann nennen wir ihn „geladen“. Zwischen seinen Platten besteht jetzt die Spannung des Generators.

Abb. 30 zeigt einen Plattenkondensator, der an einem Generator angeschlossen ist. Die Spannung zwischen den Platten ist die des Generators, nämlich (in diesem Beispiel) 1000 V.

Die Eignung eines Kondensators für die Aufnahme elektrischer Ladungen bezeichnet man als seine **Kapazität** (Formelzeichen C).

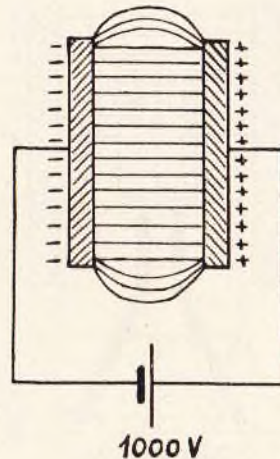


Abb. 30

Die Kapazität eines Kondensators hängt, wie messende Versuche zeigen, von drei Faktoren ab:

- von der wirksamen Fläche F der Platten
- vom Abstand d der Platten
- vom Material zwischen den Platten.

Mit der **Fläche wächst** die Kapazität eines Kondensators, während sie mit **größer werdendem Abstand d abnimmt**.

Das Material zwischen den beiden Platten nennt man das **Dielektrikum** und kennzeichnet seinen Einfluß auf die Kapazität durch eine Zahl ε (Epsilon), die man **Dielektrizitätskonstante** (abgekürzt DK) nennt.

Die Zahl ε ist für das Vakuum (luftleerer Raum) außerordentlich klein; man nennt sie ε_0 und hat den Wert $8,859 \times 10^{-14} = \frac{8,859}{10^{14}}$.

Wenn man an Stelle des Vakuums einen stofflichen Isolator zwischen die Platten bringt, dann wird die Kapazität größer. Die Zahl, die angibt, um wieviel Mal sie größer wird, nennt man die **relative Dielektrizitätskonstante ε_r** ; sie bezieht sich auf Luft (richtiger Vakuum) gleich 1. Das Produkt aus $\varepsilon_0 \times \varepsilon_r$ ergibt somit für jeden Stoff die absolute Dielektrizitätskonstante ε .*)

Einige relative Dielektrizitätskonstanten

Luft (richtiger Vakuum)	= 1	Glas	= 5,7
Hartgummi	= 2,7	Glimmer	= 6—7
Porzellan	= 4,5	Dest. Wasser	= 81

Einige keramische Werkstoffe, z. B. Kondensa, Calit, haben zum Teil eine sehr hohe DK.

$$\text{Beispiel: } \varepsilon \text{ für Porzellan} = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r = \frac{8,859 \times 4,5}{10^{14}} = \frac{39,87}{10^{14}} = 0,000\,000\,000\,000\,3987$$

*) Anm.: Vgl. Permeabilitätskonstante, Bd. IIa, Ziffer 54 (1. Auflage), Ziffer 16 (2. Aufl.).

Um die Kapazität C eines Kondensators rechnerisch ermitteln zu können, müssen die Faktoren, die diese bestimmen, in entsprechender Weise zu einer Formel zusammengefügt werden. Die Kapazität C eines Kondensators errechnet sich nach dem Vorhergesagten demnach zu

$$C = \frac{\varepsilon \times F}{d} \text{ [Farad]},$$

d. h. die Kapazität C ist gleich der absoluten Dielektrizitätskonstanten ε ($= \varepsilon_0 \times \varepsilon_r$) mal der Fläche F in cm^2 , geteilt durch den Abstand d in cm. ε und F sind der Kapazität C proportional. Vergrößert man ε oder F oder beide Größen, so wird der Wert von C größer, weil $\varepsilon \times F$ den **Zähler** eines Bruches darstellen (je größer der Zähler, um so größer ist der Wert eines Bruches). Der Abstand d ist umgekehrt proportional zu C . Ist der Wert von d groß, so wird C klein; umgekehrt, ist d klein, so wird C groß, weil d den **Nenner** eines Bruches darstellt. (Bei **kleinem** Nenner ist der Wert eines Bruches **größer** als bei einem großen, z. B. $\frac{1}{3}$ und $\frac{1}{1000}$).

(31) Maßeinheiten der Kapazität

Die Maßeinheit der Kapazität C ist das Farad (F)

Man hat festgelegt, daß ein Körper die Kapazität von einem Farad hat, wenn er bei einer Spannung von 1 V die Elektrizitätsmenge von einem Coulomb aufnimmt:

$$1 \text{ F} = \frac{1 \text{ Cb}}{1 \text{ V}}$$

Diese Einheit der Kapazität ist für praktische Zwecke zu groß. Man rechnet daher mit dem millionsten Teil, dem Mikrofarad (μF *) Auch das Mikrofarad ist für manche Fälle noch zu groß, so daß man als kleinere Werte das Nanofarad (nF), gleich dem tausendsten Teil eines μF , und das Picofarad (pF), gleich dem millionsten Teil eines μF , eingeführt hat. Zuweilen findet man noch als kleinste Einheit das cm. Es genügt zu wissen, daß das cm etwa den Wert eines pF hat (1 pF = 1,1 cm; 1 F = $9 \cdot 10^{11}$ cm, vgl. Band II b [Zehnerpotenzen]).

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

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

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

Die Umwandlung von pF bzw. nF in μF und umgekehrt ergibt sich aus obiger Aufstellung.

Erwähnt soll noch werden, daß die Abkürzung MF an Stelle von μF nicht richtig ist, weil das große M millionenmal und nicht ein Millionstel bedeutet. Richtig ist für den Wert ein Millionstel lediglich der griechische Buchstabe μ . Die Schreibweise MF anstatt μF hat sich leider auch in einigen Büchern eingebürgert.

Beispiel für die Errechnung der Kapazität eines Kondensators nach der Formel Ziffer 30:

*) μ spricht Mü.

Wie groß ist die Kapazität eines Plattenkondensators mit Glimmer als Dielektrikum, dessen Fläche 10 cm^2 beträgt und dessen Plattenabstand $0,1 \text{ mm}$ ist?

Nach Tabelle Ziffer 30 ist ϵ_r für Glimmer = 7

$$C = \frac{\epsilon \times F}{d} = \frac{\epsilon_0 \times \epsilon_r \times F}{d} = \frac{8,859 \times 7 \times 10}{10^{14} \times 0,01} = \frac{8,859 \times 70}{10^{12}} = 620 \times 10^{-12} \text{ F} = \underline{620 \text{ pF}}$$

(32) Spannungsverhältnisse an Kondensatoren

Setzen wir in die Formel $1 \text{ F} = \frac{1 \text{ Cb}}{1 \text{ V}}$ keine Einheiten, sondern allgemeine Werte für die Größen 1 F , 1 Cb und 1 V ein, nämlich C , Q und U , so erhalten wir die Formel

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

deren Umstellung nach U

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

ergibt. Diese Formel bedeutet, daß die Spannung U an einem Kondensator bei **gleichbleibender** Elektrizitätsmenge Q mit kleiner werdender Kapazität wächst und mit größer werdender Kapazität kleiner wird. Bei zwei Kondensatoren verschiedener Kapazität, z. B. 2 und $0,5 \mu\text{F}$, wird am Kondensator zu $0,5 \mu\text{F}$ — bei gleicher Elektrizitätsmenge — die vierfache Spannung herrschen wie an dem Kondensator zu $2 \mu\text{F}$.

Zum Vergleich betrachten wir Abb. 31. Hier sind zwei Gefäße dargestellt, die ein unterschiedliches Fassungsvermögen haben. Gefäß A ist breit und hat eine große Bodenfläche, Gefäß B ist klein und hat eine kleine Bodenfläche. In beide Gefäße füllen wir die gleiche Wassermenge, z. B. 1 Liter. Die Kraft je

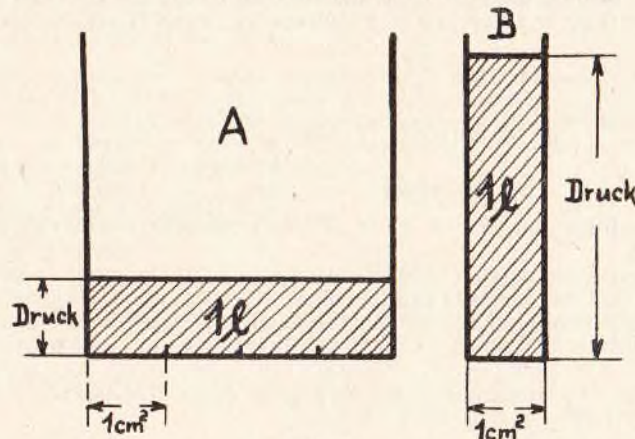


Abb. 31

Quadratzentimeter Bodenfläche (Bodendruck), den die niedrige Wassersäule im Gefäß A ausübt, ist kleiner als der Bodendruck im Gefäß B, weil hier die Wassersäule erheblich höher ist.

Wenn wir den Bodendruck der Wassersäulen mit der Spannung U vergleichen und die Wassermenge von je einem Liter mit der Einheit der Elektrizitätsmenge Q , ferner das Fassungsvermögen der Gefäße mit der Kapazität C , so ergibt sich durch den Vergleich mit dem Wasserbeispiel, daß die Spannung U bei **gleicher** Elektrizitätsmenge in einem Kondensator kleiner Kapazität **größer** ist als in einem Kondensator größerer Kapazität.

(33) Kondensatorschaltungen, Betriebs- und Prüfspannungen

Kondensatoren können sowohl

- nebeneinander (parallel) als auch
- hintereinander (in Reihe) geschaltet werden.

Zu a).

Bei der Parallelschaltung (Abb. 32) wird die wirksame Fläche der Anordnung vergrößert, und zwar um die Summe der Einzelflächen. Stellt man

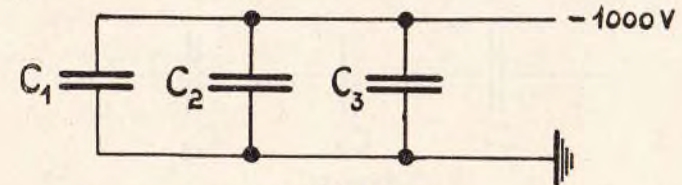


Abb. 32

sich in Abb. 32 vor, daß die drei Kondensatoren C_1 , C_2 und C_3 so dicht zusammenliegen, daß ihre Flächen sich berühren, so sieht man auf den ersten Blick, daß man jetzt einen Kondensator vor sich hat, dessen Fläche um die Summe der Flächen der Einzelkapazitäten größer geworden ist.

Die Gesamtkapazität C_g bei Parallelschaltung von Kondensatoren ist gleich der Summe der Einzelkapazitäten.

$$C_g = C_1 + C_2 + C_3 \dots \text{ usw.}$$

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

Lösung: $C_g = C_1 + C_2 + C_3$
 $= 2 + 0,5 + 0,25 = \underline{2,75 \mu\text{F}}$

Auch ein weiteres ist aus Abb. 32 zu erkennen: Die angelegte Spannung liegt auf jeder Kondensatorplatte in voller Höhe. Hier liegt an jeder oberen Platte der drei Kondensatoren eine Spannung von 1000 V gegen Erde. Dieses stellt keinen Widerspruch zu dem in Ziffer 32 Gesagten dar, weil hierbei die Spannungsquelle ohne Rücksicht auf die Kapazität der Kondensatoren so viele Elektronen auf die Platte drückt, daß an jedem Kondensator die gleiche Spannung liegt. Bei **unterschiedlichen** Kapazitätswerten in Parallelschaltung

sind also die **Elektrizitätsmengen** auf jedem der Kondensatoren so **verschieden**, daß auf allen die **gleiche** Spannung herrscht. An einen Kondensator sind daher bezüglich der Durchschlagfestigkeit gewisse Anforderungen zu stellen, um zu verhindern, daß die Spannungen sich über die isolierende Zwischenschicht, dem Dielektrikum, ausgleichen und damit den Kondensator unbrauchbar machen. Aus diesem Grunde erhält jeder Kondensator einen Aufdruck, aus dem die höchst zulässige Betriebsspannung und die sogenannte „Prüfspannung“ ersichtlich ist.

Unter Prüfspannung versteht man die Spannung, mit der der Kondensator nach der Herstellung kurzfristig auf Durchschlagfestigkeit geprüft wird; sie beträgt im allgemeinen das Dreifache der Betriebsspannung. Die Kondensatoren in Abb. 32 müssen demzufolge eine Betriebsspannung von mindestens 1000 V vertragen. Die Prüfspannung ist in diesem Falle 3000 V. Der Aufdruck, den jeder Kondensator tragen muß, hat demzufolge neben der Angabe der Kapazität in μF , nF oder pF gemäß Beispiel noch die Zahlen 1000/3000 V zu tragen (siehe Abb. 35). Auf keinen Fall dürfen Kondensatoren an eine Spannungsquelle angeschlossen werden, deren Spannung höher ist als die auf dem Kondensator aufgedruckte höchstzulässige Betriebsspannung. Bei Anschluß eines Kondensators an Wechselspannungsquellen muß man besonders vorsichtig sein und lieber einen Kondensator mit einer Betriebsspannung wählen, die etwa um die Hälfte größer ist als die in Wechselstromnetzen angegebene Spannung.*)

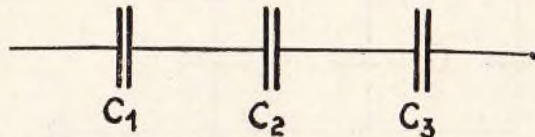


Abb. 33

Zu b) siehe Abb. 33.

Bei der Hintereinanderschaltung von Kondensatoren wird die Gesamtkapazität kleiner als die des kleinsten Kondensators.

Sie wird berechnet nach der Formel:

$$C_g = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

Beispiel: Drei Kondensatoren zu 0,5, 2 und 4 μF sind hintereinanderschalten, die Gesamtkapazität ist zu berechnen.

$$C_g = \frac{1}{\frac{1}{0,5} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4}} = \frac{1}{2 + \frac{2+1}{4}} = \frac{1}{2 + \frac{3}{4}} = \frac{1}{\frac{11}{4}} = \frac{4}{11} = 0,364 \mu\text{F}$$

Bei nur **zwei** hintereinanderschaltenden Kondensatoren kann man die Gesamtkapazität auch berechnen nach der Formel

$$C_g = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

*) Anm.: Vgl. Effektivwerte und Höchstwerte von Wechselspannungen, Band IIb.

Beispiel: Zwei Kondensatoren zu 0,5 und 2 μF sind hintereinanderschalten. Wie groß ist die Gesamtkapazität?

$$\text{Lösung: } C_g = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} = \frac{0,5 \times 2}{0,5 + 2} = \frac{1}{2,5} = 0,4 \mu\text{F}$$

Zum Beweise, daß bei Hintereinanderschaltung von Kondensatoren die Gesamtkapazität kleiner ist als die des kleinsten Kondensators, betrachten wir Abb. 34, in der zum besseren Verständnis die hintereinandergeschalteten Kondensatoren entsprechend ihrer Kapazität mehr oder weniger groß gezeichnet sind.

Die Elektrizitätsmenge Q , die auf die Kondensatoren gebracht wird, ist abhängig von der Höhe der angelegten Spannung U . Sie ist für alle drei Kondensatoren die **gleiche**.

Gemäß Ziffer 32 ist $U = \frac{Q}{C}$. U beträgt in dem Beispiel Abb. 34 1000 V. Diese

Spannung teilt sich auf in die Teilspannungen U_1 , U_2 und U_3 . Die Elektrizitätsmenge, die auf jeden Kondensator gebracht wird, ist Q . (In Abb. 34 durch 4 — bzw. 4 + Zeichen dargestellt.) Demzufolge ist die Teilspannung U_1 über $C_1 = \frac{Q}{C_1}$, die Teilspannung U_2 über $C_2 = \frac{Q}{C_2}$, und die Teilspannung U_3 über $C_3 = \frac{Q}{C_3}$. Die Gesamtspannung U ist demnach gleich der Elektrizitätsmenge Q geteilt durch die Gesamtkapazität C_g der Anordnung. Weiter ist die Gesamtspannung U auch gleich der Summe der Teilspannungen, nämlich $U = U_1 + U_2 + U_3$. Folglich ist $\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$.

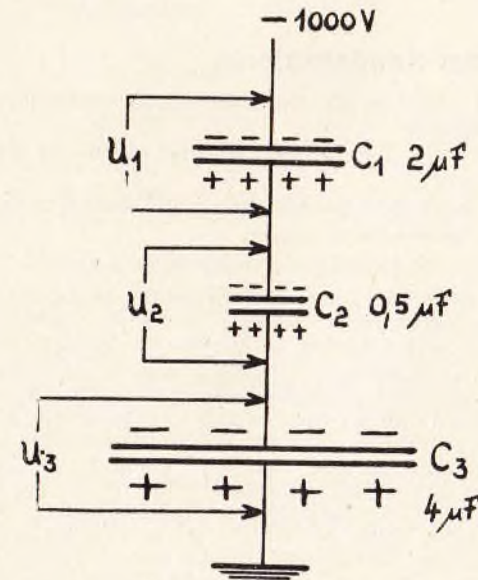


Abb. 34

Da aber Q als Zähler aller vier Brüche den gleichen Wert hat, ist der Zahlenwert von Q für die **Ableitung** der Formel ohne Bedeutung, und wir setzen

$$Q = 1. \text{ Demnach ist } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Da aber $\frac{1}{C}$ der Kehrwert der Kapazität C ist, müssen wir, um zu dem Wert C_g zu gelangen, Zähler und Nenner vertauschen oder, anders ausgedrückt, den Bruch $\frac{1}{C}$ als Nenner eines weiteren Bruches auffassen, dessen Zähler 1 ist, also:

$$C_g = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

Die Ausrechnung im Beispiel ergab, daß die Gesamtkapazität kleiner ist als die des kleinsten Kondensators und $0,364 \mu F$ gegenüber $0,5 \mu F$ des kleinsten Kondensators beträgt.

Aus dieser Rechnung ergibt sich ferner, daß bei Hintereinanderschaltung von Kondensatoren die Frage der Prüfspannungen bei den **kleinsten** Kapazitäten Beachtung finden muß, weil bei der Hintereinanderschaltung von Kondensatoren die Gesamtspannung sich umgekehrt proportional der Größe der Einzelkapazitäten aufteilt und am kleinsten Kondensator die höchste Spannung liegt. Daher:

Bei Reihenschaltung von Kondensatoren teilt sich die Gesamtspannung in entsprechende Teilspannungen auf, die sich umgekehrt wie die Teilkapazitäten verhalten (kapazitive Spannungsteilerschaltung).

(34) Bauarten der Kondensatoren

Man unterscheidet zwischen Kondensatoren mit **unveränderlicher** und mit **veränderlicher** Kapazität.

Kondensatoren mit unveränderlicher Kapazität werden in der Hauptsache in zwei Arten hergestellt:

- als sogenannte Rollkondensatoren (Roll- oder Wickelblocks),
- als sogenannte Becherkondensatoren.

Beide unterscheiden sich lediglich durch die äußere Form.

Der Rollblock ist zylindrisch geformt, während der Becherkondensator äußerlich durch ein quaderförmiges Gehäuse aus Eisen- oder Aluminiumblech erkenntlich ist. Der innere Aufbau ist bei beiden Arten gleich:

Aus langen Bändern aus Stanniol (Zinnfolie) oder Aluminiumfolie bildet man die Kondensatorbeläge, die gegeneinander mittels ölgetränktem Papier, das als Dielektrikum dient, isoliert werden. Das so entstandene Kondensatorband wird auf einen Dorn aufgewickelt und nach Herausnehmen des Dornes in die entsprechende Form gepreßt. Das Band wird dann, um alle Feuchtigkeit auszutreiben, in Isoliermasse getaucht und in den entsprechenden Behälter gesteckt, der dann mit Paraffin ausgegossen wird. Die Enden der Beläge werden herausgeführt und bei Becherkondensatoren an Lötösen befestigt (Abb. 35). Besonders hochwertige Kleinkondensatoren mit unveränderlicher Kapazität stellen die Kondensatoren dar, die als Dielektrikum keramische Werkstoffe (Calit, Condensa usw.) besitzen.

Die Beläge werden durch aufgebrannte Silberschichten dargestellt. Diese Kondensatoren sind besonders beständig in ihren Kapazitätswerten.

Drehkondensatoren dienen zur Einstellung **verschiedener** Kapazitätswerte. Sie bestehen aus einer Anzahl von Messing- oder Aluminiumplatten. Eine Hälfte der Gesamtzahl der Platten bildet ein feststehendes Paket, **Stator**

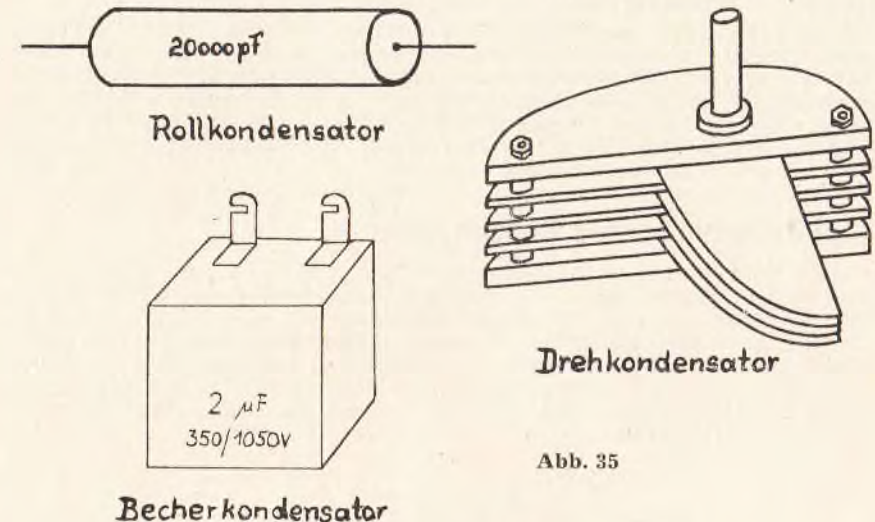


Abb. 35

genannt. Die andere Hälfte, der **Rotor**, ist drehbar auf einer Achse angebracht und kann in den Stator eingedreht werden. Die jeweilige Stellung des Rotors zum Stator bestimmt die Kapazität des Kondensators. Wird der Rotor völlig in den Stator hineingedreht, so ist die Kapazität des Kondensators am größten; sie ist am kleinsten bei völlig herausgedrehtem Rotor.

Als Dielektrikum zwischen den Stator- und den Rotorplatten dient Luft (Luft-drehkondensatoren) oder ein Isolierstoff in Form dünner Blättchen (Glimmer, Trolitul).

Eine besondere Stellung unter den Kondensatoren mit unveränderlicher Kapazität nehmen die **Elektrolytkondensatoren** ein. Diese bestehen aus einer Belegung aus Aluminiumfolie und einer Oxydschicht, die als Dielektrikum dient. Als Gegenbelag dient mit Chemikalien getränktes Fließpapier. Die isolierende, als Dielektrikum dienende Oxydschicht bildet sich unter dem Einfluß einer Gleichspannung. Sie ist äußerst dünn, daher haben Elektrolytkondensatoren eine sehr hohe Kapazität und beanspruchen wenig Raum. Sie dürfen jedoch nur an **Gleichspannungen** betrieben werden, wobei auf die Polarität zu achten ist. Anschluß an + oder — sind auf dem Gehäuse angegeben. Für den Betrieb in Wechselstromkreisen sind Elektrolytkondensatoren ungeeignet, sie werden daher in der Fernmeldetechnik nur in besonderen Fällen verwandt, insbesondere als Glättungs- und Siebkondensatoren in Gleichrichterschaltungen (Siebketten).*)

*) Anm.: Über Siebketten wäre im Band II b und im Band XI nachzulesen.

VII. Der Kondensator im Gleich- und Wechselstromkreis

(35) In den Ziffern 30–33 wurde der Kondensator in seinem Aufbau und seinen Schaltungsmöglichkeiten behandelt, ohne näher auf sein Verhalten in Gleich- und Wechselstromkreisen einzugehen.

Im Band II a (1. Auflage ab Ziffer 85, 2. Auflage ab Ziffer 47) ist das Verhalten eines **induktiv** belasteten Stromkreises erläutert worden. Hier soll die Rede davon sein, wie ein **Kondensator** sich in einem Gleich- oder Wechselstromkreis verhält, oder, anders ausgedrückt, wenn ein Stromkreis **kapazitiv** belastet ist. Ganz allgemein können wir sagen, daß eine Kapazität ¹⁾ sich **umgekehrt** verhält wie eine Induktivität. Wir wollen zunächst das Verhalten eines Kondensators in einem Gleichstromkreis behandeln.

(36) Aufladung eines Kondensators

Um die Vorgänge bei der Aufladung eines Kondensators sichtbar machen und erläutern zu können, bauen wir eine Versuchsanordnung gemäß Abb. 36 auf. Wir erkennen hier eine Gleichspannungsquelle mit einer EMK von 200 V, deren Pluspol geerdet ist. Der Minuspol ist über einen Schalter Sch, einen Widerstand R, einen Strommesser I (Meßbereich 2 mA) mit dem einen Belag eines Kondensators C, dessen Kapazität $2 \mu\text{F}$ beträgt, verbunden. Der andere Belag des Kondensators liegt über einem weiteren Strommesser II (Meßbereich 2 mA) an Erde.

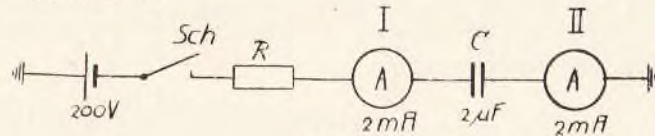


Abb. 36

Der Widerstand R möge vorerst einen Wert von $0,1 \text{ M}\Omega = 100\,000 \Omega$ haben. Wir schließen jetzt den Schalter Sch und stellen fest, daß sowohl der Zeiger des Instrumentes I **als auch der des Instrumentes II** auf einen bestimmten **gleichen** Wert ausschlagen und dann **langsam** in die Nullstellung zurückgehen. Der Kondensator ist jetzt „geladen“ (vgl. hierzu Ziffer 30 Abs. 2). Es hat also ein Transport einer bestimmten Elektrizitätsmenge Q auf den einen (hier linken) Kondensatorbelag solange stattgefunden, wie die Kapazität des Kondensators, die angelegte Spannung und die Größe des Widerstandes R es zulassen. Von dem anderen Belag fließt die **gleiche** Elektrizitätsmenge über den Strommesser II nach dem elektrischen Grundgesetz (vgl. Ziffer 3) zur Erde ab ²⁾. Zwischen den Belägen des Kondensators hat sich ein elektrisches Feld aufgebaut, das den Ladungszustand des Kondensators auch bei geöffnetem Schalter Sch aufrecht erhält (vgl. hierzu Ziffern 25, Abb. 17 und 30, Abb. 30). Wir wollen diesen Vorgang näher beleuchten. Aus dem Zeigerausschlag des Instrumentes I bei Schließen des Schalters können wir entnehmen, daß die bewegte Elektrizitätsmenge Q, also der elektrische Strom, sich im ersten

Augenblick so verhält, als ob der Kondensator in dem Stromkreis überhaupt nicht vorhanden ist. Die Stromstärke würde sich demnach gemäß dem Ohmschen Gesetz errechnen zu

$$I = \frac{U}{R} = \frac{200}{100\,000} = \frac{2}{1000} = 0,002 \text{ A} = 2 \text{ mA} \text{ } ^{1)}$$

Je mehr Elektronen auf den linken Kondensatorbelag durch die Spannung der Spannungsquelle gedrückt werden, um so mehr nimmt der Kondensator Gegenspannung an, bis zuletzt die Spannung am Kondensator gleich der Spannung der Spannungsquelle (hier 200 V) ist. Der Ladestrom wird also mit zunehmender Gegenspannung immer geringer, bis er schließlich den Wert Null erreicht. Hieraus erklärt sich das langsame Zurückgehen des Zeigers. In unserem Versuch benötigt der Zeiger etwa eine Sekunde, um die Nullage zu erreichen ³⁾.

Wir können uns diesen Vorgang an Hand einer Stromkurve, der Kurve des Ladestromes, veranschaulichen (Abb. 37).

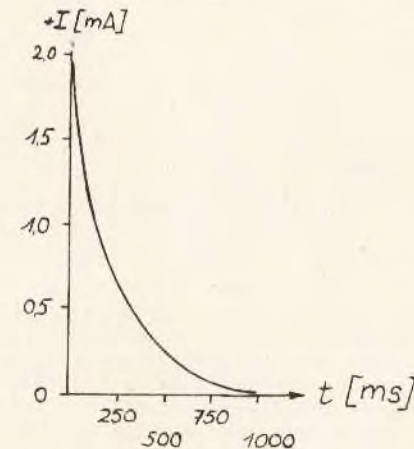


Abb. 37

Wir erkennen in dieser Abbildung die Stärke des Ladestromes I (in mA) in Abhängigkeit von der Zeit t (in ms). Beim Einschalten, also in der Zeit Null ms, erreicht der Ladestrom **sofort** seinen Höchstwert, um dann **langsam** (hier nach etwa 1000 ms = 1 sec) den Wert Null zu erreichen.

Schalten wir einen Widerstand R mit **kleinerem** Wert als $0,1 \text{ M}\Omega$ ein, so wird die Ladekurve steiler, d. h., daß sich der Ladevorgang schneller vollzieht. Bekanntlich wirkt sich die „bremsende“ Wirkung eines Widerstandes gegenüber dem Stromfluß um so weniger aus, je kleiner der Widerstand ist. Machen wir den Widerstand R sehr klein oder lassen wir ihn ganz fort, so werden wir am Instrument kein **langsames** Zurückgehen des Zeigers auf Null mehr feststellen, weil der Ladestromstoß von sehr kurzer Dauer ist und die Trägheit des

¹⁾ Das Instrument selbst wird diesen Wert jedoch nicht anzeigen, weil es zu träge ist. Der Zeiger kann sich nicht so schnell auf diesen Wert einstellen, weil die Zeitdauer hierfür zu kurz ist.

²⁾ Voraussetzung für das einwandfreie Gelingen dieses Versuches sind Meßinstrumente, deren Trägheit gering ist.

¹⁾ Man gebraucht den Ausdruck „Kapazität“ — trotzdem sie eine elektrische Größe darstellt — auch für einen Kondensator oder eine Kondensatoranordnung, ohne dabei stets die Größe der Kapazität zu meinen (vgl. hierzu die Anmerkung zu Band II a, Ziffer 85 bzw. 47, „Induktivität“).

²⁾ Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.

Instrumentes das schnelle Abklingen des Stromes nicht mehr anzuzeigen gestattet. Der Ladestrom erreicht dann nach dem Ohmschen Gesetz einen erheblichen Wert.

Um eine Ladekurve eines Kondensators in Abhängigkeit von der Ladezeit t genau aufnehmen zu können, muß man sich eines Kathodenstrahloszillographen bedienen, wie das auch bei der Aufnahme einer Stromkurve eines induktiv belasteten Stromkreises (vgl. Band IIa, Ziffer 38, 1. Auflage, Ziffer 50, 2. Auflage) ebenfalls erforderlich war.

(37) Auf- und Entladung eines Kondensators

In dieser Ziffer wollen wir uns in erster Linie mit der **Entladung** eines Kondensators befassen. Hierzu bauen wir eine Versuchsanordnung gemäß Abb. 38 auf. Wir benutzen die gleichen Teile wie im Versuch Abb. 36, nur daß wir jetzt an Stelle des Ein- und Ausschalters einen **Umschalter** Sch benutzen und in die Leitung zum Kondensator ein Galvanometer G legen.

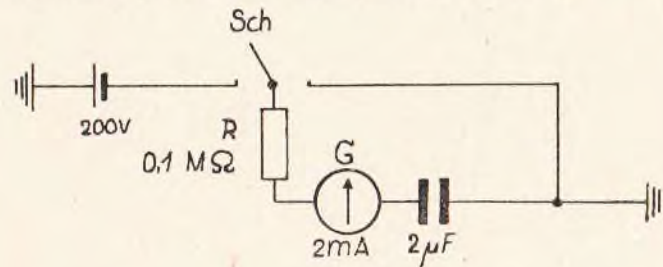


Abb. 38

Legen wir diesen Umschalter nach **links** um, so wird der Kondensator in der gleichen Weise geladen, wie es in Ziffer 36 beschrieben ist. Die **gleichnamige** Elektrizitätsmenge Q fließt vom anderen Belag zur Erde ab. Auf dem linken Kondensatorbelag haben wir demnach eine Elektronenanhäufung mit einem Potential von Minus 200 V (vgl. Ziffer 28). Legen wir den Umschalter Sch von der Spannungsquelle ab, so bleibt dieses Potential bestehen. Legen wir nun den Schalter nach **rechts** um, so fließt die auf dem linken Kondensatorbelag befindliche Elektrizitätsmenge Q über das Galvanometer und den Widerstand $0,1\text{ M}\Omega$ zur Erde ab: der Kondensator ist „entladen“. Wir stellen bei diesem Versuch fest, daß der Zeigerausschlag des Galvanometers bei der Entladung die **gleiche** Weite wie bei der Ladung, aber **entgegengesetzte Richtung** hat. Im ersten Augenblick der Entladung haben wir den Höchstausschlag. Der Zeiger geht dann langsam zurück, bis er nach 1 sec — wie bei der Ladung — den Nullpunkt erreicht. Hieraus ergibt sich, daß **Ladungsdauer** gleich **Entladungsdauer** ist.

Da der Entladestrom die **entgegengesetzte** Richtung hat wie der Ladestrom, müssen wir dieses auch zeichnerisch zum Ausdruck bringen. In Band IIa, Abb. 105 (1. Auflage), Abb. 29 (2. Auflage), ist gezeigt worden, wie bei einem Wechselstrom die verschiedenen Stromrichtungen dargestellt werden. Von der Null-Linie ausgehend, verläuft die positive Stromkurve nach oben, die negative nach unten. Wenn wir also in Abbildung 37 die Ladestromkurve bezogen auf die Zeit- oder Null-Linie **oberhalb** dieser Linie dargestellt haben, so muß die Entladungskurve, weil der Strom umgekehrte Richtung hat wie bei der Ladung, **unterhalb** der Zeitlinie gezeichnet werden. Abb. 39 zeigt die Entladestromkurve.

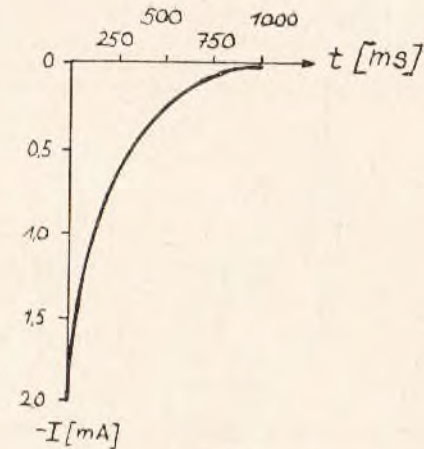


Abb. 39

Sie hat die gleiche Form wie die Ladestromkurve, weil die Spannung des geladenen Kondensators gleich der Spannung der Batterie (200 V) ist und in dem Stromkreis der gleiche Widerstand ($0,1\text{ M}\Omega$) liegt. Auch hier ist die Dauer der Entladung genau so abhängig von der Größe des Widerstandes R wie bei der Ladung. Die **Dauer** der Entladung des Kondensators bei obigem Versuch ist demnach um so **kürzer**, je **kleiner** dieser Widerstand ist; die Kurve wird dann immer steiler.

(38) Lade- und Entladekurve eines Kondensators bei zerhacktem Gleichstrom

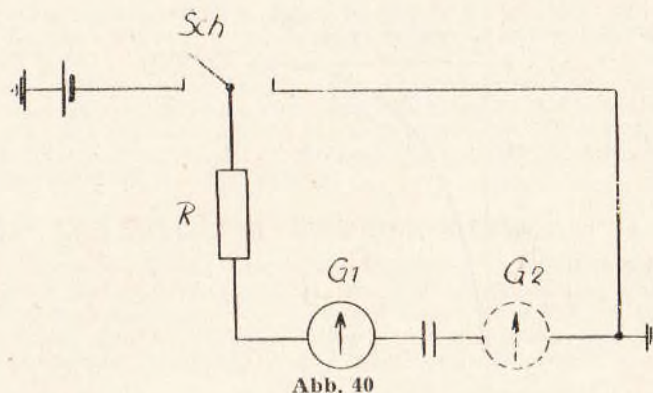
In den Ziffern 36 und 37 wurde besprochen, wie die Form der Lade- und Entladekurve eines Kondensators zustande kommt. Ferner hatten wir festgestellt, daß die Lade- bzw. Entladedauer in sehr starkem Maße abhängig ist von der Größe des in dem Stromkreis vorhandenen Ohmschen Widerstandes R und der Spannung der Spannungsquelle. Weiter ist sie auch abhängig von der Größe der Kapazität C des Kondensators, wie wir später noch sehen werden. Wir können jetzt den Schluß ziehen, daß ein Kondensator in einem Gleichstromkreis — abgesehen von dem kurzen Ladestromstoß — dem Gleichstrom einen fast unendlich hohen Widerstand entgegensetzt; ihn also praktisch sperrt.

Ein Kondensator sperrt Gleichstrom

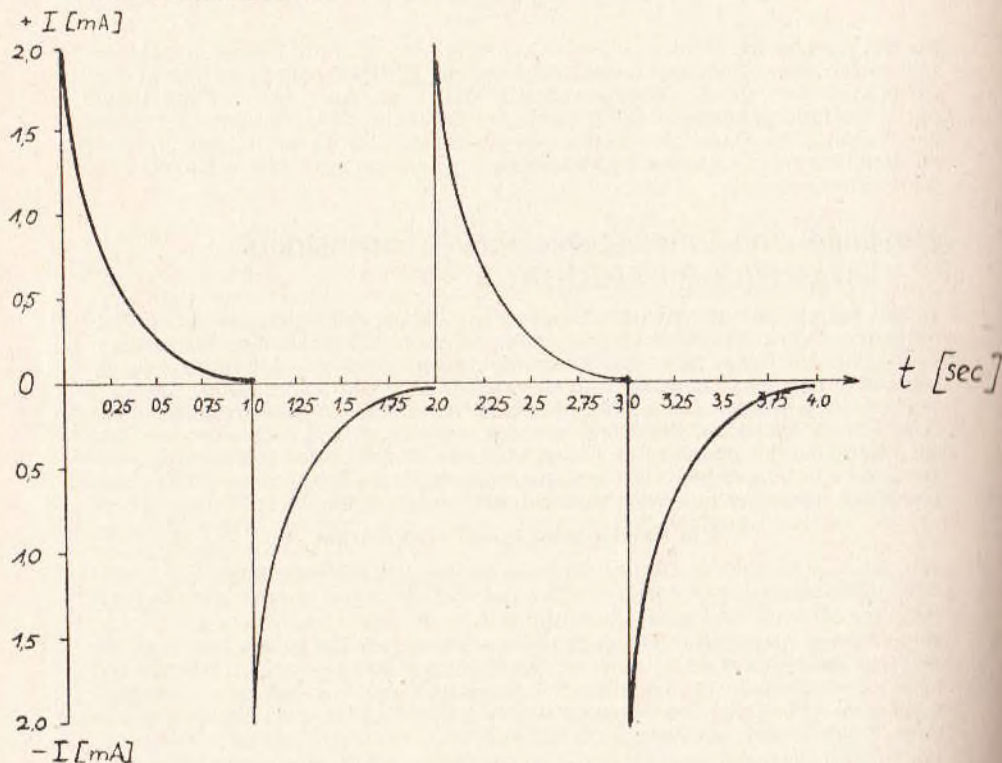
Wir schalten in die Anordnung Abb. 38 ein zweites Galvanometer G_2 wie in Abb. 40 dargestellt und legen den Schalter Sch fortlaufend nach jeweils einer Sekunde abwechselnd nach links und rechts um.

Beim Umlegen des Schalters nach links erhalten wir die Ladekurve Abb. 37, die vom Höchstwert ($+I$ [hier $+2\text{ mA}$]) bis auf den Wert Null in einer Sekunde abfällt. Beim Umlegen des Schalters nach rechts erhalten wir die Entladekurve Abb. 39, die von ihrem Höchstwert ($-I$ [hier -2 mA]) ebenfalls in einer Sekunde auf den Wert Null abfällt.

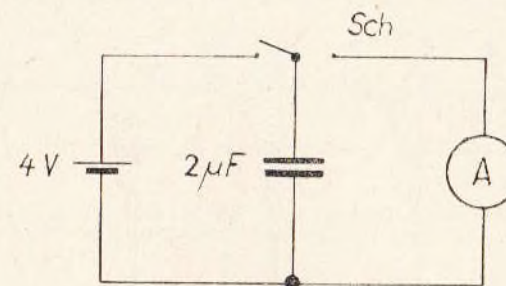
Die Zeiger der Instrumente werden im Rhythmus der Schalterbewegungen um den Nullpunkt hin- und herpendeln und dabei die Ladung und Ent-



ladung des Kondensators anzeigen. Die hierbei entstehenden Lade- und Entladekurven zeigt Abb. 41.



Wir wollen jetzt untersuchen, wie sich unser Kondensator verhält, wenn wir die Ein- und Ausschaltgeschwindigkeit vergrößern. Hierzu bauen wir eine Versuchsanordnung gem. Abb. 42 auf.



Die Schaltung unterscheidet sich gegenüber der Abb. 40 dadurch, daß wir das Meßinstrument in den Entladekreis des Kondensators legen und den Widerstand R fortlassen.

Bei Umlegen des Schalters Sch nach links wird der Kondensator geladen, bei Umlegen nach rechts entladen. In dem Stromkreis: oberer Belag des Kondensators, umgelegter Schalter nach rechts, Meßinstrument, unterer Belag des Kondensators fließt nur der Entladestrom des Kondensators (Gleichstrom). In dem Stromkreis, in dem der Kondensator liegt, wird — je nach Lage des Schalters Sch — ein Lade- und Entladestrom, d. h. ein Strom wechselnder Richtung fließen.

Was geschieht, wenn wir, wie oben geschildert, den Schalter Sch in je 1 sec nach links und rechts umlegen? In der ersten Sekunde lädt sich der Kondensator auf; wir erhalten eine Ladekurve gem. Abb. 41. In der zweiten Sekunde entlädt sich der Kondensator. Der Strommesser A schlägt aus und zeigt uns für den Bruchteil einer Sekunde den Entladestromstoß an, dessen Kurve ebenfalls aus Abb. 41 ersichtlich ist. Durch diesen Versuch haben wir lediglich das noch einmal festgestellt, was in den Ziffern 36 bis 37 behandelt worden ist, nämlich, daß ein Kondensator Gleichstrom sperrt, wenn wir von dem kurzen Lade- und Entladestromstoß absehen.

Wir ersetzen jetzt den handbedienten Umschalter Sch durch einen rotierenden, der mit einem Elektromotor gekuppelt ist. Durch Regelung der Umdrehungsgeschwindigkeit des Motors haben wir es in der Hand, die Umschaltgeschwindigkeit beliebig zu vergrößern. Wir regeln die Schaltgeschwindigkeit des Umschalters zunächst so ein, daß er alle fünfzigstel Sekunde umschaltet. Der Kondensator wird gem. Abb. 43 zwischen der Zeit 0 und $1/50$ sec aufgeladen und in der Zeit zwischen $1/50$ und $2/50$ sec entladen.

Zwischen $2/50$ und $3/50$ sec fließt ein neuer Ladestrom und zwischen $3/50$ und $4/50$ sec der Entladestrom usw.

Wie oben erwähnt, messen wir mit dem Strommesser A nur den **Entladestrom**. Da jedoch Ladestromstärke gleich Entladestromstärke ist, spielt es keine Rolle, welche Stromrichtung wir messen. Der Strommesser A im Entladestromkreis stellt sich bei den vielen Entladestromstößen infolge seiner Trägheit auf einen bestimmenden Wert ein, den wir mit „mittleren Stromwert“ (I_m) bezeichnen wollen.

Vergrößern wir die Umschaltgeschwindigkeit auf das Doppelte, d. h. auf $\frac{1}{100}$ sec, so zeigt uns der Strommesser den doppelten Wert an wie bei einer Umschaltgeschwindigkeit von $\frac{1}{50}$ sec. Es ist so, als ob der Kondensator den Gleichstrom „hindurchläßt“, und zwar um so mehr, je schneller wir ihn in der

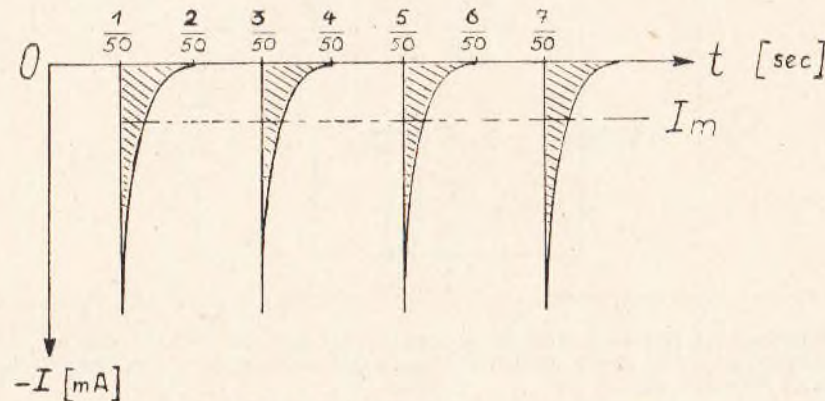


Abb. 43

Zeiteinheit (1 sec) laden und entladen. Da jedoch, wie wir oben gesehen haben, ein Kondensator Gleichstrom sperrt, kann es sich nur um eine **scheinbare** Stromdurchlässigkeit handeln.

Wir wissen, daß die Stromstärke durch die Elektrizitätsmenge Q , die in der Zeiteinheit fließt, bestimmt wird. Wenn wir den Schalter Sch in Abb. 42 in jeder Sekunde einmal öffnen und schließen, so wird nur eine bestimmte Elektrizitätsmenge Q bewegt werden, deren Größe von der angelegten Spannung (hier 4 V) und der Kapazität des Kondensators (hier $2 \mu\text{F}$) abhängig ist. Der Zeiger des Strommessers hat Zeit, immer auf Null zurückzugehen. Laden und entladen wir den Kondensator in einem Zeitraum von je $\frac{1}{50}$ sec, so wird ihm in einer Sekunde die 50fache Elektrizitätsmenge zu- oder abgeführt. Der Strommesser im Entladestromkreis findet jetzt nicht mehr die Zeit, die Nullstellung einzunehmen. Sein Zeiger stellt sich demzufolge auf einen bestimmten mittleren Wert ein. Laden und entladen wir den Kondensator 100 mal in 1 sec, so wird ihm in der Zeiteinheit die 100fache Elektrizitätsmenge zu- oder abgeführt. Hieraus erklärt sich der Ausschlag des Zeigers auf das Doppelte gegenüber der Schaltgeschwindigkeit von $\frac{1}{50}$ sec.

In dem Entladestromkreis messen wir also den mittleren Wert der in der Zeiteinheit bewegten Elektrizitätsmenge, d. h. die mittlere Stärke des Entladestromes (Gleichstrom!). Der Kondensator hat seinen ursprünglich fast unendlich großen Widerstand scheinbar verloren: er wird mit größer werdender Umschaltgeschwindigkeit kleiner.

(39) Messen der Kapazität C eines Kondensators

Mit Hilfe der Anordnung Abb. 42 sind wir in der Lage, die Kapazität eines Kondensators recht genau zu bestimmen.

Der Mittelwert I_m des Entladestromes gem. Ziffer 38 ab vorletztem Absatz ist ein gedachter Gleichstrom gleichbleibender Stärke, weil in der gleichen Zeit die gleiche

Elektrizitätsmenge bewegt wird, wie bei dem tatsächlichen, aber ungleichmäßig fließenden Entladestrom. Die schraffierten Flächen in Abb. 43 sind das Maß für die bewegte elektrische Ladung ($I \times t$ [As]). Zeigt der Strommesser 1 A an, dann werden in 1 sec 1×1 As (oder Cb) bewegt, z. B. $0,0004 \text{ A} \times 1$ [As].

Ersetzen wir z. B. den handbedienten Schalter Sch in Abb. 42 durch ein Relais, das 50mal in 1 sec umschaltet, so beträgt die bei einer Entladung bewegte Elektrizitätsmenge $Q = \frac{I_m \times 1}{50}$ [As]. Da gem. Ziffer 32 $C = \frac{Q}{U}$ ist, setzen wir für Q (in As) den

obigen Wert $\left(\frac{I_m \times 1}{50}\right)$ ein, und wir erhalten für C aus

$$C = \frac{Q}{U} \\ C = \frac{I_m \times 1}{50 \times U}$$

1. Beispiel:

Bei einer angelegten Spannung von 4 V und einer Umschaltgeschwindigkeit von 50 mal je sec messen wir einen Strom I_m von 0,4 mA = 0,0004 A.

$$C = \frac{Q}{U} \\ = \frac{0,0004 \times 1}{50 \times 4} \\ = \frac{4}{10000 \times 200} \\ = \frac{4}{2000000} \text{ F} \\ = \frac{2}{1000000} \text{ F} \\ C = 2 \mu\text{F}.$$

2. Beispiel:

Wir erhöhen die Umschaltgeschwindigkeit auf das Doppelte und messen einen Strom I_m von 0,0008 A. Wie groß ist bei einer Spannung von 4 V und einer Umschaltgeschwindigkeit von 100 mal je sec die Kapazität C ?

$$C = \frac{Q}{U} \\ = \frac{0,0008 \times 1}{100 \times 4} \\ = \frac{8}{10000 \times 400} \\ = \frac{8}{4000000} \\ = \frac{2}{1000000} \text{ F} \\ C = 2 \mu\text{F}.$$

(40) Abhängigkeit des mittleren Stromes I_m von der Größe der Kapazität C

Wir haben bislang bei unseren Betrachtungen eine Kapazität C des Kondensators von $2 \mu\text{F}$ angenommen.

Erhöhen wir die Kapazität des Kondensators Abb. 42 auf das Doppelte, so ist es ohne weiteres ersichtlich, daß die doppelte Elektrizitätsmenge Q in der Zeiteinheit t transportiert werden muß, um den Kondensator voll aufzuladen. (Gemäß Ziffer 30 wächst die Kapazität eines Kondensators u. a. mit zunehmender Fläche F). Die mittlere Stromstärke I_m (s. Abb. 43) steigt damit gleichfalls um das Doppelte an. Dieses bedeutet wiederum, daß der scheinbare

Widerstand des Kondensators bei einer Umschaltgeschwindigkeit von 50 mal je sec um die Hälfte gegenüber einer Kapazität von $2\mu\text{F}$ gesunken ist.

Der scheinbare Widerstand eines Kondensators wird mit größer werdender Kapazität bei gleichbleibender Umschaltgeschwindigkeit geringer.

(41) Das Verhalten eines Kondensators im Wechselstromkreis

Aus den Ziffern 38 und 40 läßt sich das Verhalten eines Kondensators im Wechselstromkreis leicht erläutern. Wir haben im Vorhergehenden festgestellt, daß der gemessene Mittelwert I_m in seiner Stärke von der Anzahl der Entladestöße je Zeiteinheit sowie von der Größe der Kapazität des Kondensators abhängig ist. Anders ausgedrückt: je mehr Ladungen in der Zeiteinheit bewegt werden, um so höher liegt der Wert von I_m .

Schalten wir an Stelle der Gleichspannungsquelle Abb. 42 eine Wechselspannungsquelle und tauschen den Gleichstrommesser A gegen einen Wechselstrommesser A aus, so kommen wir zur Abb. 44. Den Umschalter Sch können wir fortlassen, weil der Wechselstrom selbst umschaltet.

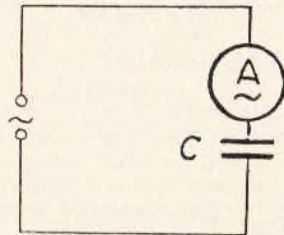


Abb. 44

Es findet ein dauernder Ladungstransport wechselnder Richtung auf den Begleitungen des Kondensators statt. An Stelle der Umschaltgeschwindigkeit des Schalters Sch in Abb. 42 können wir die Frequenz f des Wechselstromes setzen. Der mittlere Stromwert, der von dem Wechselstrommesser A angezeigt wird, ist demnach ebenso abhängig von der Frequenz f des Wechselstromes wie von der Umschaltgeschwindigkeit des Schalters Sch in Abb. 42. Ferner ist er auch abhängig von der Größe der Kapazität C .

Ein weiterer Versuch soll die letzte Behauptung beweisen (Abb. 45).

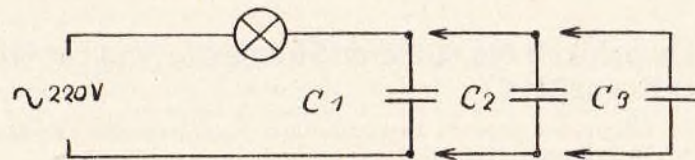


Abb. 45

$$C_1 = 2\mu\text{F}$$

$$C_2 = 2\mu\text{F}; C_1 + C_2 = 4\mu\text{F}$$

$$C_3 = 4\mu\text{F}; C_1 + C_2 + C_3 = 8\mu\text{F}$$

In Reihe mit einer Wechselspannungsquelle von 220 V werden eine Glühlampe 220 V/15 W und ein Kondensator C zu $2\mu\text{F}$ geschaltet. Die Lampe leuch-

tet dunkel. Mit zunehmender Vergrößerung der Kapazität, d. h. durch Parallelschalten mehrerer Kondensatoren, leuchtet die Lampe immer heller auf, ein Beweis dafür, daß mit größer werdender Kapazität (parallel geschaltete Kondensatoren, s. Ziffer 33) der scheinbare (Wechselstrom)-Widerstand der Anordnung kleiner geworden ist.

Eine Kapazität in einem Wechselstromkreis verhält sich umgekehrt wie eine Induktivität (vgl. hierzu auch Band IV, Abschnitt III).

Hohe Frequenz und große Kapazität = kleiner Wechselstromwiderstand, niedrige Frequenz und kleine Kapazität = großer Wechselstromwiderstand.

Der Abschnitt VI behandelt nur das **Grundsätzliche** über das Verhalten eines Kondensators in Wechselstromkreisen. Weitere Ausführungen über dieses Gebiet finden wir im Band II b (Wechselstromlehre).

Hier ist insbesondere von der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, von der Wechselstromleistung sowie von der praktischen Anwendung von Kapazitäten und Induktivitäten in der Fernmeldetechnik die Rede.



Druck: Union-Druckerei und Verlagsanstalt GmbH, Frankfurt a. M.

