

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Elementare Vorlesungen über Elektrizität und Magnetismus

Thompson, Silvanus Phillips

Tübingen, 1897

Kapitel VIII. Wärme, Licht und Arbeit erzeugt durch elektrische Ströme

KAPITEL VIII.

WÄRME, LICHT UND ARBEIT ERZEUGT DURCH ELEKTRISCHE STRÖME.

XXXVI. VORLESUNG: *Wärmewirkungen der Ströme.*

421. Wärme und Widerstand. Ein Strom kann Arbeit verschiedener Art verrichten, chemische, magnetische, mechanische und Wärmearbeit. Ueberall, wo ein Strom Arbeit verrichtet, wird dieselbe auf Kosten eines Teiles der Energie des Stromes verrichtet. Wir haben gesehen, dass der von einer gegebenen Batterie erzeugte Strom nach dem Ohm'schen Gesetze durch jede Vermehrung des äusseren Widerstandes geschwächt wird. Aber die Stromstärke kann auch in gewissen Fällen durch eine andere Ursache verringert werden, nämlich durch das Auftreten einer entgegengesetzt gerichteten elektromotorischen Kraft an irgend einer Stelle des Stromleiters. Wenn z. B. ein Strom durch ein Voltameter hindurchgeht (Art. 232), so tritt infolge der entgegengesetzt gerichteten elektromotorischen Kraft (»Polarisation«), welche entsteht, während die chemische Arbeit verrichtet wird, eine Schwächung ein. Ebenso, wenn ein Strom dazu benutzt wird, einen elektrischen Motor (Art. 438) zu treiben, erzeugt die Rotation des Motors selbst einen rückwärts gehenden Strom, welcher die Stromstärke vermindert. Jeder Strom jedoch, welcher auf diese Weise nicht zur äusseren Arbeit verwendet wird, *wird in Wärme umgesetzt*, sei es innerhalb der Batterie, oder in

einem Teile des Stromleiters oder in beiden. Nehmen wir an, eine Elektrizitätsmenge würde in einem geschlossenen Stromleiter in Bewegung gesetzt. Wäre kein Widerstand vorhanden, der sie hemmte, so würde dieselbe für ewige Zeiten zirkulieren, gerade so wie ein Eisenbahnwagen, der längs eines kreisförmigen Schienenstrangs in Bewegung gesetzt ist, ohne Aufhören im Kreise herumfahren würde, wenn derselbe nicht infolge der Reibung zur Ruhe käme. Wenn ein in Bewegung befindlicher Körper infolge der Reibung gehemmt wird, so wird die Energie seiner Bewegung durch die Reibung in Wärme umgesetzt. Wenn eine in Bewegung befindliche Elektrizitätsmenge durch einen Widerstand gehemmt wird, so wird die Energie ihrer Bewegung durch den Widerstand in Wärme umgesetzt. Wärme tritt in der That überall da auf, wo der Stromleiter dem Strome einen Widerstand entgegenstellt. Werden die Enden einer Batterie durch einen kurzen, dicken Draht von geringem Widerstande verbunden, so wird der grösste Teil der Wärme in der Batterie entwickelt; wird aber ein dünner Draht von bedeutendem Widerstande in den äusseren Stromleiter eingeschaltet, so erwärmt sich derselbe, während die Batterie selbst verhältnismässig kühl bleibt.

422. Gesetze der Wärmeentwicklung; das Joule'sche Gesetz. Um die Wärmeentwicklung durch einen Strom zu untersuchen, verwendeten Joule und Lenz Apparate wie in Fig. 220, bei denen ein dünner, zwei dicke Leiter verbindender Draht sich innerhalb eines mit Alkohol gefüllten Glasgefässes befindet, in welches ein Thermometer taucht. Da der Widerstand des Drahtes bekannt ist, so kann sein Verhältnis zu den andern Widerständen berechnet werden. Joule fand, dass *die Zahl der Wärmeeinheiten, welche in einem Leiter entwickelt werden, proportional ist:*

- 1) seinem Widerstande;

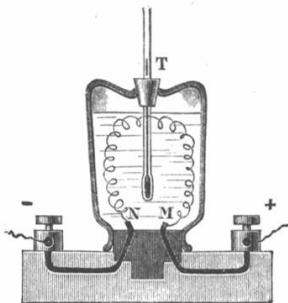


Fig. 220.

- 2) dem Quadrate der Stromstärke; und
- 3) der Zeit, während welcher der Strom fliesst.

Die Gleichung, welche diese Beziehungen ausdrückt, ist unter dem Namen des Joule'schen Gesetzes bekannt und lautet

$$U = C^2 \cdot R \cdot t \times 0,24,$$

wo C die Stromstärke in Ampère, R den Widerstand in Ohm, die Zeit in Sekunden und U die Wärme in Kalorien bedeuten, nämlich diejenige Wärmemenge, welche ein Gramm Wasser um 1° C. erwärmt (Art. 276).

Diese Gleichung sagt aus, dass *ein Strom von 1 Ampère, der durch einen Widerstand von 1 Ohm fliesst, hierin 0,24 Kalorien pro Sekunde entwickelt*. Der Beweis dieses Satzes findet sich in Art. 434. Die Wärme, welche auf diese Weise in einem Widerstande durch Abnahme der Energie erzeugt wird, heisst bisweilen *Ohm-Wärme* zum Unterschiede von der umkehrbaren Peltier-Wirkung (Art. 415).

Die elektrische Wärmeeinheit, das Joule, beträgt nur 0,24 einer gewöhnlichen Wärmeeinheit oder einer Kalorie, und eine Kalorie ist gleich 4,2 Joule.

Das zweite der obigen Gesetze, dass die Wärme unter sonst gleichen Verhältnissen dem *Quadrate* der Stromstärke proportional ist, erscheint dem Anfänger anfangs sonderbar, welcher erwartet, dass die Wärme der einfachen Stromstärke proportional sei. Dabei sei daran erinnert, dass der Verbrauch des Zinks ebenfalls dem Quadrate des Stromes proportional ist. Angenommen, wir verdoppeln den Strom, welcher sich durch einen grossen Widerstand durcharbeitet (so dass alle Wärme ausserhalb der Batterie entwickelt wird) dadurch, dass wir die Zahl der Elemente verdoppeln, so wird in jedem Elemente doppelt so viel Zink konsumiert, wie vorher, und da wir zweimal so viel Elemente haben, ist der Verbrauch des Zinks *4 mal* so gross wie vorher.

423. Favre's Versuche. Favre stellte eine Reihe von äusserst wichtigen Versuchen an über das Verhältnis der Energie eines Stromes zu der von ihm entwickelten Wärme. Er wies nach, dass die Anzahl der entwickelten Wärmeeinheiten = 18,682,

wenn 33 Gramm (1 Äquivalent) Zink in verdünnter Schwefelsäure aufgelöst werden (aus welcher Wasserstoff ausgeschieden wird). Er gelangte zu dieser Zahl, indem er den Prozess sich in einem Gefässe vollziehen liess, welches sich in einer Höhlung seines Calorimeters befand, eines Apparates, der einem sehr grossen mit Quecksilber gefüllten Thermometer glich, dessen Ausdehnung der ihm mitgeteilten Wärme proportional war. Wurde ein Smee'sches Element in denselben Apparat eingeführt, so beobachtete er, dass die Auflösung derselben Zinkmenge von der Entwicklung von 18,674 Wärmeeinheiten begleitet war (also einer mit der früher beobachteten Menge fast gleichen) und diese Menge war dieselbe, gleichviel ob die Entwicklung in dem Elemente der Batterie stattfand, wenn der Stromkreis durch einen kurzen, dicken Draht geschlossen war, oder ob dieselbe in einem langen, dünnen Drahte stattfand, der in den äussern Stromkreis eingeschaltet war. Er stellte alsdann 5 Smee'sche Elemente hinter einander, in Hohlräume des Calorimeters und sandte ihren Strom um eine kleine elektromagnetische Maschine. Die während der Auflösung von 33 Gramm Zink sich entwickelnde Wärmemenge wurde dann in 3 Fällen beobachtet: 1) wenn die Maschine in Ruhe war; 2) wenn die Maschine in Bewegung war, jedoch weiter keine Arbeit verrichtete, als dass sie die Reibung an ihren Achsen überwand; 3) wenn die Maschine dazu benutzt wurde 13,124,000 Gramm-Zentimeter ($= 12,874 \times 10^6$ Erg) Arbeit zu verrichten, indem sie ein Gewicht an einer über eine Rolle führenden Schnur emporhob. Die Wärmemengen, welche in dem Stromleiter in diesen 3 Fällen entwickelt wurden, waren 18,667; 18,657 und 18,374 Einheiten. Im letzten Falle erklärt sich die Abnahme der im Stromleiter erzeugten Wärme durch die verrichtete Arbeit. Addieren wir das Wärmeäquivalent der verrichteten Arbeit zu der im letzten Falle entwickelten Wärmemenge, so müssten wir denselben Wert, wie vorher, erhalten. Indem wir die $12,874 \times 10^6$ Erg der Arbeit durch das mechanische Wärmeäquivalent dividieren, ausgedrückt in »absolutem« Maße (42×10^6), so erhalten wir als das Wärme-

äquivalent der verrichteten Arbeit 306 Wärmeeinheiten. Nun ist $18,374 + 306 = 18,680$ eine Grösse, welche mit derjenigen der ersten Beobachtung fast identisch ist und vollständig innerhalb der Grenzen unvermeidlicher experimenteller Fehler liegt.

424. Temperaturerhöhung. Die Erhöhung der Temperatur eines Widerstand leistenden Drahtes hängt von der *Natur* des Widerstandes ab. Ein kurzer dünner Draht kann genau so grossen Widerstand bieten als ein langer dicker Draht. Beide haben die Entwicklung derselben Zahl von Wärmeeinheiten zur Folge, aber im ersten Falle wird der Draht sehr warm, da die Wärme zur Erhitzung eines kurzen dünnen Drahtes von geringer Masse verwandt wird, wogegen im zweiten Falle die Masse des langen dicken Drahtes vielleicht nur bis zu einem nicht merkbaren Grade erwärmt wird. Wiegt der Draht w Gramm und hat derselbe die spezifische Wärmekapazität s , so ist $U = s \cdot w \cdot \theta$, wo θ die Temperaturzunahme in (hundertteiligen) Graden bedeutet. Folglich:

$$\theta = 0,24 \times \frac{C^2 R t}{s w}.$$

Da der Widerstand der Metalle bei steigender Temperatur zunimmt, so leistet ein dünner, durch den Strom erwärmter Draht grössern Widerstand und erwärmt sich immer mehr, bis das Verhältnis des Wärmeverlustes durch Leitung und Ausstrahlung in die umgebende Luft dem Verhältnis der Wärmezufuhr durch den Strom gleichkommt.

Der folgende hübsche Versuch illustriert die Gesetze der Erwärmung. Der Strom einiger Elemente wird durch eine Kette geschickt, welche abwechselnd aus Gliedern von Silber- und Platindraht besteht. Die Platinglieder sind rotglühend, während die Silberglieder verhältnismässig kühl bleiben. Dies erklärt sich daraus, dass der spezifische Widerstand des Platins ungefähr 6 mal grösser ist als der des Silbers und seine Wärmekapazität ungefähr halb so gross; folglich ist die Temperaturzunahme in Drähten von gleicher Dicke, durch welche derselbe Strom fliesst, für Platin annähernd 12 mal grösser als für Silber.

Dünne Drähte erwärmen sich viel schneller als dicke, da die Temperaturzunahme in verschiedenen Teilen desselben Drahtes (welchen derselbe Strom durchfliesst) bei verschiedenen Dicken, der vierten Potenz des Durchmessers umgekehrt proportional ist.

Nehmen wir z. B. an, dass ein Draht an einer beliebigen Stelle auf die Hälfte seines Durchmessers reduziert wird, so hat der Querschnitt eine Fläche, welche den vierten Teil von derjenigen am dickern Ende beträgt. Der Widerstand ist hier 4mal grösser, und die Anzahl der entwickelten Wärmeeinheiten ist 4mal so gross wie in einer gleichen Länge des dickern Drahtes. Aber das 4fache der Wärmemenge, auf $\frac{1}{4}$ der Metallmasse verwendet, erwärmt dasselbe 16 mal stärker. Je wärmer nun ein Körper wird, desto stärker strahlt er Wärme an seine Umgebung aus. Bei Drähten aus gegebenem Material ist der Strom, welcher erforderlich ist, sie auf gleiche Temperatur zu bringen, der Quadratwurzel aus der dritten Potenz des Durchmessers proportional. Nach dieser Regel bestimmt man die Dicke des Drahtes, der beim elektrischen Lichte als Sicherheits-schmelzer benutzt wird. Dieselben bestehen aus Zinndrähten, welche in den Stromkreis eingeschaltet werden, damit sie zum Schmelzen gelangen, wenn der Strom etwa übermässig stark werden sollte.

425. Cardew's Voltmeter. Fliesst der Strom durch einen langen dünnen Platindraht, welcher zwei Punkte eines Stromkreises mit einander verbindet, so lässt sich durch denselben die Potentialdifferenz zwischen diesen beiden Punkten messen. Infolge seiner Erwärmung dehnt er sich aus und diese Ausdehnung setzt einen Zeiger in Bewegung, welcher über einer graduierten Scheibe spielt, so dass Ablesungen in Volt möglich sind. (Fig. 221.)

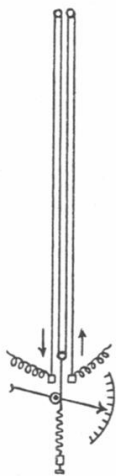


Fig. 221.

426. Für chirurgische Zwecke wird bisweilen ein dünner Platindraht, der von einem Strome bis zur Weissglühhitze erwärmt wird, statt eines Messers ver-

wendet, wie z. B. bei der Operation der Amputation der Zunge beim Zungenkrebs. Platin wählt man wegen seiner schweren Schmelzbarkeit, doch selbst Platindrähte werden durch einen zu starken Strom geschmolzen. Von den Leitern widersteht die Kohle allein dem Schmelzen.

427. Sprengungen durch Elektrizität. Infolge dieser Wärmewirkungen lässt sich die Elektrizität dazu verwenden, um Minen in Brand zu stecken, indem starke leitende Drähte von einer geeigneten Batterie aus grösserer Entfernung nach einem besondern *Zünder* geführt werden, bei welchem ein sehr dünner Platindraht in den Stromleiter eingeschaltet ist. Dieser Draht erwärmt sich, wenn der Strom fliesst, und da er an einer leicht brennbaren Masse liegt und so als Zünder dient, so zündet er diese an und lässt die Pulverladung explodieren. Torpedos können auf diese Weise unter dem Wasser in beliebiger Entfernung von der Batterie gesprengt werden.

428. Zusammenschweissen durch Elektrizität. Werden zwei Drähte oder Metallstäbe mit hinreichend starkem Druck gegen einander gehalten und schickt man dann einen kräftigen Strom hindurch, so entwickelt sich an der Verbindungsstelle eine bedeutende Wärme, so dass die Stäbe schmelzen und zusammengeschoeisst werden. Diese Methode hat Elihu Thomson weiter ausgebildet, welcher zu diesem Zwecke Wechselstrom-Transformatoren (Art. 475) verwertete und bei einer Potentialdifferenz von wenigen Volt Ströme von mehreren 100 Ampère erzeugte. Eine eigentümliche Erscheinung beobachtet man, wenn zwei Eisenstäbe mit den Polen einer kräftigen Batterie von einigen 50 Volt verbunden und dann in Wasser getaucht werden. Der als Kathode dienende Stab überzieht sich alsdann mit einer glänzenden Schicht und wird augenblicklich rotglühend. Guthrie, welcher diese Erscheinung im Jahre 1876 zuerst untersuchte, schrieb die Erwärmung dem Widerstande einer Wasserstoffschicht zu. Neuerdings hat man hierauf eine neue Methode des Zusammenschweissens basiert.

429. Kochen durch Elektrizität. Nachdem die Ab-

gabe von Elektrizität allgemein eingeführt ist, sind elektrische Oefen, Kochapparate etc. Handelsartikel geworden. Die Erwärmung wird dadurch bewerkstelligt, dass man den Strom durch Widerstand leistende Drähte schickt, welche von Zement oder andern geeigneten Isolatoren umgeben sind.

XXXVII. VORLESUNG: *Elektrische Energie: Zufuhr und Messung derselben.*

430. Elektrische Energie. Ein elektrischer Strom führt Energie von einer Batterie oder einer Dynamo nach irgend einer andern Stelle des Schliessungsbogens, wo dieselbe wieder in Arbeit umgesetzt wird, in mechanische, chemische oder thermische. Es soll jetzt untersucht werden, wie diese elektrische Energie erzeugt oder transformiert wird.

Kraft ist angesammelte oder verbrauchte Energie. Dieselbe kann in Fusspfunden oder in Erg pro Sekunde angegeben werden. James Watt nahm an, dass die durchschnittliche Arbeit eines Pferdes 550 Fusspfund pro Sekunde beträgt. Da 1 Fuss = 30,48 cm und 1 Pfund = 453,6 g. 981 = 445,000 Dyn ist, so beträgt eine Pferdekraft 7,460,000,000 Erg pro Sekunde (oder $746 \cdot 10^7$).

Wird eine elektrische Menge Q durch eine Potentialdifferenz V bewegt, so folgt aus der Definition des Art. 258, dass die geleistete Arbeit gleich $Q \cdot V$ ist. Geschieht dies bei einer Batterie oder einer Dynamo, so repräsentiert $Q \cdot V$ die chemische oder mechanische Arbeit, welche an dem System verrichtet wird, oder die von dem System angesammelte Energie. Nehmen wir an, dass dies in der Zeit t geschehen ist, so ist $\frac{Q \cdot V}{t}$ das Verhältnis, in welchem die Energie dem Schliessungsbogen mitgeteilt worden ist. Nach Art. 157 ist aber $\frac{Q}{t} = C$; folglich ist die dem Stromleiter mitgeteilte Kraft $= C \cdot V$.

Dies rechtfertigt den Satz, dass die Kraft eines elektrischen Stromes, womit derselbe nützliche Arbeit verrichtet, sei es beim

Beleuchten, oder beim Erhitzen oder bei mechanischen Wirkungen, *proportional ist sowohl der Stromstärke als auch der ihn treibenden elektromotorischen Kraft.* Mit andern Worten: Kraft ist sowohl den Ampère als auch den Volt proportional. In ähnlicher Weise ist die Kraft einer Dampfmaschine nicht allein der benutzten Dampfmenge, sondern auch dem Drucke proportional, unter welchem der Dampf zugeführt wird. Die elektrische Kraft-einheit ist die Kraft eines Stromes von 1 Ampère, der durch einen elektrischen Druck von 1 Volt getrieben wird. Diese Einheit heisst Volt-Ampère oder Watt.

Da 1 Volt = 10^8 absoluten Einheiten der E.M.K. und 1 Ampère = 10^{-1} absoluten Stromeinheiten ist (Art. 349), so folgt, dass 1 Watt = 10^7 absoluten Krafteinheiten ist (d. h. 10^7 Erg pro Sekunde). Nun ist aber eine Pferdekraft = $746 \cdot 10^7$ Erg pro Sekunde, folglich auch = 746 Watt. Unter einem Kilowatt versteht man 1000 Watt. Dasselbe ist annähernd gleich $1\frac{1}{3}$ Pferdekraften.

Um die Anzahl Watt zu bestimmen, welche eine Dynamo oder eine Batterie zuführen, multipliziere man die Anzahl der Ampère mit der Anzahl der Volt, durch welche der Strom getrieben wird. Dieselbe Regel dient auch dazu, um die Kraft zu berechnen, welche auf elektrischem Wege an einen Motor, eine Lampe, einen Akkumulator etc. abgegeben wird.

Beispiel. Wird ein Strom von 20 Ampère einer grossen Bogenlampe unter einem Druck von 56 Volt zugeführt so beträgt die Grösse der dabei absorbierten Kraft 1120 Watt oder $1\frac{1}{2}$ Pferdekraften.

431. Aufnahme und Abgabe der Kraft. Bei jeder Batterie, Dynamo oder Thermosäule wird Kraft in den elektrischen Schliessungsbogen aufgenommen. Bei jedem Motor, jeder Lampe oder irgend einer Stelle des Stromkreises, wo chemische Arbeit verrichtet wird (elektrische Versilberung, Gaszersetzung, oder Laden von Akkumulatoren) oder an jeder Stelle, wo Wärme entwickelt wird, wird von dem elektrischen Stromkreise Kraft abgegeben. Ueberall, wo Energie in den Stromkreis aufge-

nommen wird, ist eine E.M.K. *in derselben Richtung* wie der Strom vorhanden, welche denselben treiben hilft. Ueberall, wo Energie vom Stromkreise abgegeben wird, ist eine E.M.K. vorhanden, welche dem Strome entgegengesetzt gerichtet ist ¹⁾.

Der Ausdruck Abgabe, in Anwendung auf Dynamomaschinen u. s. w., bezeichnet die Anzahl Watt oder Kilowatt, welche die Maschine leistet oder leisten kann. Wenn z. B. eine Dynamo 300 Ampère bei 100 Volt abgeben kann (d. h. bei einer disponibelen E.M.K. von 100 Volt), so schreibt man derselben eine Abgabe von 30 Kilowatt zu.

432. Kraftmessung. Um die Kraft zu messen, welche auf elektrischem Wege einem Teile *ab* eines Stromkreises von einem konstanten Strome abgegeben wird, genügt es, den Strom mit einem Ampèremeter (Art. 216) und die Potentiale längs jenes Teiles mit einem Voltmeter (Art. 215, 285) zu messen, wobei dieser natürlich als Nebengeleis wie in Fig. 222 geschaltet ist. Das Produkt der Volt und Ampère giebt die Watt. Auch lässt sich ein Wattmeter wie folgt benutzen.

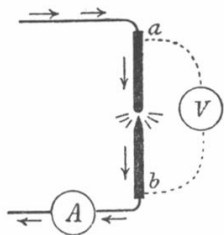


Fig. 222.

433. Wattmeter. Das Produkt der Ampère und Volt lässt sich direkt mit Hilfe eines Wattmeters bestimmen. Mit diesem Namen bezeichnet man eine besondere Form des Elektrodynamometers (Art. 389), bei welchem die festen und beweglichen Rollen zwei besondere Stromkreise bilden, von denen

1) In der Mechanik haben wir etwas ähnliches bei der Kraftübertragung von einer Rolle zur andern mittelst eines Treibriemens. Die Wirkung der treibenden Rolle hat dieselbe Richtung wie die Bewegung des Treibriemens. Die Wirkung bei der getriebenen Rolle ist der Bewegung entgegengesetzt gerichtet. Dieser Fundamentalsatz erklärt die rückwärts gerichteten E.M.K., welche bei Motoren und Akkumulatoren beim Laden auftreten. Daher wissen wir (Art. 161), dass der Sitz der hauptsächlichen E.M.K. bei einem Volta'schen Elemente an der Oberfläche des Zinks ist und dass Wismut (Art. 417) in thermo-elektrischer Beziehung positiv in Bezug auf Antimon ist.

der eine ein dicker Draht von geringem Widerstande ist, welcher die Ampère führt, während der andere ein dünner Draht von hohem Widerstande ist, um einen den Volt entsprechenden

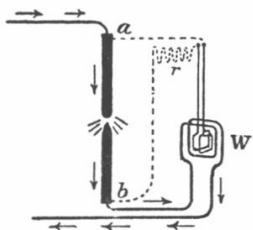


Fig. 223.

Strom aufzunehmen. Der letztere Stromkreis ist als Nebengeleis mit demjenigen Teile *ab* des Schliessungsbogens zu verbinden, bei welchem die zugeführte Kraft gemessen werden soll. In Fig. 223 ist der Teil *ab* eine Bogenlampe. Der Hilfs-widerstand *r* wird in den Stromkreis mit dünnem Drahte eingeschaltet, indem der gesamte Strom durch den Strom-

kreis mit dickem Drahte fließt.

Wattmeter werden sowohl nach dem Muster der Siemens'schen Dynamometer (Art. 390) angefertigt, als auch nach dem Muster der Kelvin'schen Wagen (Art. 391).

Wenn Kraftmessungen bei Wechselströmen angestellt werden sollen, so hat man nicht, wie in Art. 432, besondere Apparate zur Volt- und Ampère-Messung anzuwenden. Denn infolge der Phasendifferenzen (Art. 467) zwischen Volt und Strom sind die scheinbaren Watt, welche sich durch Multiplizieren der einzelnen Ablesungen ergeben, grösser als die wirklichen durch einen Wattmeter gemessenen Watt.

434. Kraft, welche beim Erwärmen verloren geht.

Wird ein Strom *C* durch den Widerstand *R* getrieben, so ist nach dem Ohm'schen Gesetze die dazu erforderliche Anzahl der Volt:

$$V = C \cdot R.$$

Die auf diese Weise verbrauchte Kraft hat keinen weiteren Erfolg, als den Widerstand zu erwärmen. Ersetzen wir *V* durch den angegebenen Wert, so ergibt sich:

$$\text{Verbrauche Watt} = C \cdot V = C^2 \cdot R = \frac{V^2}{R}.$$

Dauert demnach der Verbrauch *t* Sekunden, so beträgt die in Wärme verwandelte Energie:

$$\text{Energie} = Q \cdot V = C \cdot t \cdot V = C^2 \cdot R \cdot t.$$

Die Netto-Kraft einer Dynamomaschine oder einer Batterie ist immer geringer als ihre Totalkraft, infolge des innern Widerstandes. Ist letzterer $= r$, und E die gesamte elektromotorische Kraft, so ist $V = E - C \cdot r$ die Anzahl der Netto-Volt. Die Totalkraft beträgt $E \cdot C$ Watt, dagegen die Nettokraft $V \cdot C = E \cdot C - C^2 r$. Daher sind die zur Verfügung stehenden Watt gleich den im ganzen erzeugten Watt, vermindert um die bei der innern Erwärmung verbrauchten Watt.

Um das Joule'sche Wärmegesetz (Art. 422) zu beweisen, sei daran erinnert, dass das mechanische Wärmeäquivalent 42 Millionen Erg beträgt, d. h. $W = J \cdot U$, wo W die in Erg ausgedrückte Arbeit ist, U die Wärme in Kalorien, und $J = 4,2 \cdot 10^7$. Folglich ist $U = \frac{C^2 R \cdot t}{J}$. Um jedoch die Arbeit auf Erg zu reduzieren, müssen wir $C^2 R \cdot t$ mit 10^7 multiplizieren. Folglich $U = C^2 \cdot R t \cdot 0,24$.

435. Abgabe der elektrischen Energie. Elektrische Energie wird jetzt im grossen Maßstabe zu Beleuchtungs- und Heizungszwecken, sowie als bewegende Kraft abgegeben. Grosse *Zentralstationen* werden an geeigneten Orten erbaut mit Dampfmaschinen oder Turbinen (falls Wasserkräfte zur Verfügung stehen), um Dynamomaschinen oder Wechselstrommaschinen zu treiben. Von der Zentralstation gehen starke Kupferdrähte aus, welche in das Netzwerk der Konduktoren einmünden, die von Haus zu Haus gehen.

Die Zufuhrsysteme sind verschieden, je nachdem mit niedriger Spannung operiert wird, d. h. mit 100—300 Volt, oder mit hoher Spannung, d. h. mit 300—3000 Volt, oder mit extra hoher Spannung, d. h. mit mehr als 3000 Volt. Die Systeme mit niedriger Spannung benutzen in der Regel Gleichströme, die mit hoher Spannung benutzen meist (doch nicht notwendig) Wechselströme und Transformatoren (Art. 475), um an der Verbrauchsstelle auf niedrige Spannung zu transformieren.

Da die Kraft eines Stromes von der Spannung abhängt,

mit welcher er geliefert wird, so basiert die gesetzlich anerkannte *Zufuhreinheit* auf der Krafteinheit, dem Watt (Art. 430) und wird definiert als 1000 Watt, geliefert für eine Stunde.

436. Bedingungen der elektrischen Zufuhr. Elektrische Energie wird fast immer unter einer der beiden Bedingungen geliefert, entweder

- a) bei konstanten Volt, oder
- b) mit konstantem Strome.

Im ersten Falle ist der Stromleiter verzweigt, und der Strom wird (gewöhnlich bei 100 Volt) allen Lampen oder Motoren *parallel* zugeführt (Art. 404), wobei jede Lampe u. s. w. von allen andern unabhängig ist und der Strom genau im Verhältnis zum Anspruch reguliert wird.

Im zweiten Falle, welcher selten eintritt, ausgenommen bei Reihen von Bogenlampen, ist der Stromleiter unverzweigt, und der Strom (gewöhnlich 10 Ampère) fließt durch alle Lampen in Serien (Art. 163). Werden Lampen ausgeschaltet, so hat man die Anzahl der Volt zu vermindern, damit der Strom konstant bleibt.

437. Zufuhrmaße. Es giebt verschiedene Arten von Maßen, um die Zufuhr an die Konsumenten zu messen.

a) *Chemische Maße.* Der Strom oder ein bekannter Bruchteil desselben wird durch einen elektrolytischen Becher geführt, um dort Kupfer abzusetzen (Edison's Methode) oder Zink aufzulösen (Jehl's verbesserte Methode). Die Grösse der chemischen Wirkung ist den Ampère-Stunden proportional,

b) *Integrationsmaße.* Eine gleichförmig gehende Uhr treibt ein Zählwerk mittelst einer Hebelvorrichtung, die durch den Strom in Thätigkeit versetzt wird, und zwar in der Weise, dass, wenn der Strom schwach ist, das Zählwerk nur wenig weiter bewegt wird, dagegen schneller, wenn der Strom stark ist. Ein Integrator mit Scheibe und Walze oder ein Wellbaumintegrator sind die gebräuchlichsten Mechanismen, deren Bewegungen durch die Bewegung eines Ampèremeters bestimmt werden.

c) *Motormaße.* Geht der Strom durch die Armatur eines

kleinen Motors (Art. 438), welcher ein konstantes Feld hat, so ist seine Geschwindigkeit in jedem Augenblicke dem Strome proportional. Daher kann ein solcher Motor, falls er in geeigneter Weise mit einem Räder-Zählwerk verbunden wird, als Elektrizitätsmesser dienen, wobei die gesamte Anzahl der Umdrehungen den Ampèrestunden proportional ist. Bei dem Messer von Perry (1893) besteht der rotierende Teil aus einer kupfernen Glocke, welche in Quecksilber taucht und welche um einen zentralen Magnetpol rotiert (vergl. Fig. 195). Dieselbe ist von einem äussern S-Pol umgeben, welcher gerippte Ausläufer trägt, um die Wirbelströme zu befördern. Bei dem Schallenberger'schen Maße für Wechselströme treibt der Motor einen Fächer. Bei dem Messapparate von Elihu Thomson, welcher die Watt-Stunden verzeichnet, besteht die rotierende Armatur aus dünnem Drahte von grossem Widerstande, welcher als Nebengeleis verbunden ist, während die festen als Feld-Magnet dienenden Rollen den gesamten zugeführten Strom aufnehmen. Dann ist das Drehungsmoment den Watt proportional. Eine Kupferscheibe rotiert zwischen Magnetpolen und erhält die Geschwindigkeit dem Drehungsmomente proportional.

d) *Gehemmte Uhren.* Man kann den Strom auf den Gang einer Uhr einwirken lassen, indem man ihn in eine Rolle unter der magnetisierten Pendellinse einströmen lässt. Eine Kraft, welche auf diese Weise die Schwerkraft unterstützt oder z. T. aufhebt, hat zur Folge, dass die Uhr schneller oder langsamer geht. Ayrtton und Perry machten den Vorschlag, die elektrische Zufuhr durch die Anzahl der Stunden zu bestimmen, welche eine Uhr vor- oder nachgeht. Der Aron'sche Elektrizitätszähler, welcher auf diesem Prinzipie beruht, hat eine doppelte Uhr mit 2 Pendeln, von denen nur das eine durch den Strom beeinflusst wird. Ein Getriebe von Zählrädern wird durch eine Hebelvorrichtung in Bewegung gesetzt und verzeichnet die Differenz zwischen beiden Uhren.

XXXVIII. VORLESUNG: *Elektromotoren. (Elektromagnetische Maschinen.)*

438. Elektromotoren. Elektromagnetische Maschinen oder Elektromotoren sind solche Maschinen, bei denen die be-

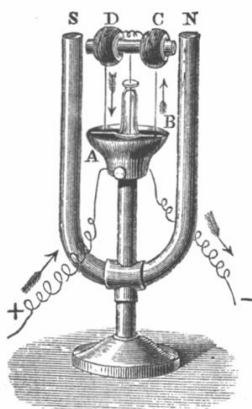


Fig. 224.

wegenden Kräfte von elektrischen, auf Elektromagnete wirkenden Strömen herühren. Im Jahre 1821 zeigte Faraday einen einfachen Fall der Rotation, welche von einem Magnet und einem elektrischen Strome erzeugt wurde. Barlow erzeugte Rotation bei einem Sternrade, und Sturgeon bei einer Kupferscheibe, wenn dieselbe längs des Radius von einem Strome durchflossen wurde und sich dabei zwischen den Polen eines Hufeisenmagnets befand. Im Jahre 1831 konstruierte Henry und 1833 Ritchie elektromagnetische Maschinen, welche auf

elektromagnetischem Wege eine Rotation zu Stande brachten. Fig. 224 zeigt eine Modifikation des Elektromotors von Ritchie. Ein Elektromagnet DC balanziert auf einer vertikalen Achse zwischen den Polen eines festen Magnets (oder Elektromagnets) SN. Ein durch eine geeignete Batterie erzeugter Strom wird durch Drähte in zwei Quecksilberschalen A und B geleitet, in welche die Enden der Spirale des beweglichen Elektromagnets CD tauchen. Geht ein Strom durch die Spirale von CD, so dreht sich der Elektromagnet derart, dass er sich in der Richtung der Verbindungslinie von N und S befindet. Bei dieser Drehung gehen jedoch die Drähte, welche in die Quecksilberschalen tauchen, von einer Schale zur gegenüberliegenden, so dass in dem Augenblicke, wo C sich S nähert, der Strom in CD umgekehrt wird und C von S abgestossen und von N angezogen wird, indem der durch CD gehende Strom bei jeder halben

Umdrehung umgekehrt wird. Bei grössern Elektromotoren werden die Quecksilberschalen durch einen Kommutator ersetzt, welcher aus einem Messingringe besteht, der in zwei oder mehrere Teile geteilt ist und an zwei gegenüberliegenden Punkten durch ein Paar Metallfedern oder »Kontakt-Bürsten« berührt wird.

Bei einer andern, von Froment erfundenen Form des Elektromotors werden Eisenstäbe, die an dem Umfange eines rotierenden Cylinders befestigt sind, von einem Elektromagnet angezogen, bei welchem der Strom auf automatische Weise unterbrochen wird, wenn alle Stäbe ganz dicht bis zu seinen Polen angezogen sind. Bei einer dritten Art zieht ein Elektromagnet ein Stück weiches Eisen abwechselnd auf und ab, in ähnlicher Weise wie sich der Kolben einer Dampfmaschine bewegt, und diese Bewegung wird dann mittelst einer Kurbelstange in eine rotierende umgesetzt. Hier tritt dann die Schwierigkeit auf, dass die anziehende Kraft eine wirksame Bewegung nur auf sehr kleine Entfernungen erzeugen kann, da die Anziehung eines Elektromagnets dem Quadrate des Abstandes von seinen Polen umgekehrt proportional ist.

Page konstruierte von 1838 bis 1850 verschiedene Motoren, bei welchen eiserne Kolben in hohle Drahtspulen gezogen wurden, durch welche er Ströme in periodischen Intervallen hindurchschickte.

Im Jahre 1839 trieb Jacobi auf der Neva ein Boot mit einer Geschwindigkeit von $2\frac{1}{4}$ Meilen pro Stunde mittelst einer elektromagnetischen Maschine von circa einer Pferdekraft, welche durch eine Batterie von 64 grossen Grove'schen Elementen getrieben wurde.

Jacobi scheint zuerst (im Jahre 1850) erkannt zu haben, dass die Wirkungsweise des elektrischen Motors einfach [das Umgekehrte von der der Dynamomaschine ist. Jeder magneto-elektrische Generator oder Dynamo, wie dieselben zur elektrischen Beleuchtung verwandt werden, kann auch als Motor wirken, welcher mechanische Kraft abgibt, wenn demselben aus irgend einer andern Quelle elektrische Ströme zugeführt

werden. In der That sind die als Generatoren bestimmten Dynamomaschinen bedeutend wirkungsvollere Motoren, als alle elektromagnetischen Maschinen älterer Art, welche wenig mehr als blosse Spielereien waren.

Im Jahre 1882 wurde auf der Themse mit einer Geschwindigkeit von 8 Meilen pro Stunde ein eisernes Schraubenboot in Bewegung gesetzt, dessen Tragfähigkeit 12 Personen war und welches von zwei solchen Motoren getrieben wurde, mit einer Stärke von circa 3 Pferdekraften; die Elektrizität wurde von 45 Akkumulatoren beschafft. Jetzt liegt auf der Themse eine ganze Flotille elektrischer Boote.

439. Die modernen elektrischen Motoren sind von zweierlei Art: 1) diejenigen für den Gebrauch von Gleichströmen, 2) diejenigen für den Gebrauch von Wechselströmen. Die erstern werden genau nach dem Principe der Gleichstrom-Dynamomaschinen (Art. 457) konstruiert und haben feste *Feld-Magneten* und eine rotierende *Armatur*. Letztere wird zur Rotation gebracht durch die gegenseitige Wirkung der Ströme, welche in den Kupferkonduktoren fliessen, und des magnetischen Feldes, in welchem die Konduktoren sich befinden. Wie in Art. 335 auseinandergesetzt wurde, ist die Kraft, welche seitlich auf die Konduktoren wirkt, dem Produkte des Stromes und des Feldes proportional. Werden also sehr kräftige Feld-Magnete benutzt, so lässt sich ein grosses Drehungsmoment erzielen, ohne dass ein sehr starker Strom in die Armatur gesandt zu werden braucht. Die beiden Faktoren der mechanischen Rotationskraft sind das Drehungsmoment und die Winkelgeschwindigkeit. Wird das Feld des Motors konstant erhalten, so ist das Drehungsmoment dem Strome und die Geschwindigkeit den Volt proportional. Ist E die in der rotierenden Armatur erzeugte elektromotorische Kraft (in der dem Strome entgegengesetzten Richtung Art. 431) und ist C der ihr zugeführte Strom, so sind die elektrischen und mechanischen Ausdrücke für die der Armatur mitgetheilten Kraft (Watt)

$$C \cdot E = a \cdot n \cdot T,$$

wo n die Umdrehungen pro Sekunde bezeichnen, T das Drehungsmoment und a eine von den gewählten Einheiten abhängige Konstante.

Wird der Strom der Armatur bei konstanten Volt zugeführt, so hat eine Verstärkung des magnetischen Feldes eine Abnahme der Geschwindigkeit zur Folge und umgekehrt. Die Beschreibung von Wechselstrommotoren findet sich in den Art. 479—481.

440. Nutzeffekt der Elektromotoren. Wird ein Amperemeter in einen Stromleiter mit einer Batterie und einem Elektromotoren eingeschaltet, so ergibt sich, dass der Strom *schwächer* ist, wenn der Elektromotor in Thätigkeit ist, als wenn derselbe in Ruhe ist, und dass der Strom der Batterie um so schwächer wird, je stärker der Elektromotor arbeitet. Dies ist die Folge der in der rotierenden Armatur des Motors erzeugten E.M.K., welche notwendigerweise dem Strome entgegengesetzt ist (Art. 431). Wenn der Motor nur eine geringe rückwärts gerichtete E.M.K. ausübt, so kann derselbe von der Kraft des Stromes nicht viel nutzbar machen. Bezeichnet V die Anzahl der Volt, mit denen der Strom zugeführt wird, E die rückwärts gerichtete, vom Motor erzeugte E.M.K. und C den Strom, so ist VC die totale zugeführte Kraft und $E \cdot C$ die nutzbar gemachte Kraft; durch Division erhalten wir hieraus den elektrischen *Nutzeffekt* des Motors, nämlich $\frac{E}{V}$. Um einen mög-

lichst grossen Nutzeffekt zu erzielen, muss man den Motor derart einrichten, dass E nahezu gleich V ist (entweder durch Verstärkung des magnetischen Feldes oder durch grössere Umdrehungsgeschwindigkeit). In diesem Falle macht der Motor fast die ganze ihm zugeführte Energie nutzbar. Da aber nach dem Ohm'schen Gesetze der Strom $= \frac{V-E}{r}$ ist, wo r der innere

Widerstand des Motors ist, so folgt, dass in dem Falle, wo E nahezu gleich V wird, der Strom auf einen geringen Bruchteil des bei still stehendem Motor gelieferten Stromes reduziert wird. Nachstehendes Diagramm (Fig. 225) macht die

Sache anschaulich. Die Linie OV möge die zugeführten Volt darstellen und OE die in der Armatur erzeugten Volt, der Geschwindigkeit und dem Felde proportional.

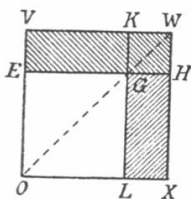


Fig. 225.

Ueber OV beschreibe man das Quadrat $OVWX$, ziehe die Diagonale und EH und KL . Dann ist die Fläche $EVWH$ der totalen Kraft proportional und ist $= V(V-E)$, und die Fläche $GLXH$ ist der nutzbar gemachten Kraft proportional und ist $= E(V-E)$. Wenn E annähernd gleich V ist, so sind diese beiden

Flächen fast gleich, obgleich sie dann sehr klein sind. Die Fläche $GLXH$, die Netto-Kraft des Motors, ist für $E = \frac{1}{2}V$ ein Maximum; doch würde in diesem Falle der Nutzeffekt nur 50 Prozent betragen.

Der Umstand, dass bei kleinem E der Strom ungeheuer gross ist, ist von grossem Vorteil für das Anlaufen der Motoren; denn in diesem Augenblicke erzeugt die grosse Kraft des Stromes (welche bei längerer Dauer den Motor zerstören würde) ein grosses Drehungsmoment, so dass der Motor schnell eine grosse Geschwindigkeit annimmt und auf diese Weise den Strom auf Arbeitsstärke reduziert.

441. Elektrische Lokomotiven. Ein Motor, auf einen Eisenbahnwagen oder auf eine besondere Lokomotive gebracht, vermag dieselben zu treiben, falls die nötige Kraft zugeführt wird. Dies kann in verschiedener Weise zu stande kommen:

1) Man stellt eine Batterie oder geladene Akkumulatoren auf dem Wagen auf.

2) Der Strom wird von der Zentralstation an einer geeigneten Stelle den Schienen zugeführt, auf welchen die Wagen laufen und welche als Zu- und Rückleiter wirken. Dieselben sind isoliert. Die Wagen, welche isolierte Räder haben, beziehen ihren Strom von den Schienen.

3) Der Strom wird von der Zentralstation einer dritten von der Erde isolierten Schiene mitgeteilt. Aus dieser nimmt der Wagen den Strom auf, während die gewöhnlichen Schienen als Rückleiter dienen.

4) Der Strom wird von der Zentralstation einer oberirdischen Linie mitgeteilt, welche mit dem Wagen in leitender Verbindung steht, mittelst eines an einer langen Stange befestigten Laufrades.

Die erste Methode ist wegen des grossen Gewichts der Akkumulatoren nicht zu empfehlen. Die zweite Methode wandte Siemens im Jahre 1879 bei der ersten in Berlin erbauten elektrischen Bahn an. Die dritte Methode findet in England bei verschiedenen grössern Bahnen Anwendung, wo der Strom an Lokomotiven von 200 bis 400 Pferdekraften geliefert wird. Die vierte Methode hat man besonders in den Vereinigten Staaten benutzt, wo man heutzutage derartig eingerichtete Eisenbahnen von vielen tausend Meilen Länge findet.

442. Elektrische Kraftübertragung. Auf elektrischem Wege lässt sich die Kraft auf grosse Entfernungen übertragen, von einem Stromerzeuger an dem einen Ende eines Stromkreises nach einem Motor am andern Ende. Ein Bergstrom kann dazu benutzt werden, eine Turbine zu drehen, welche ihrerseits eine Dynamo- oder Wechselstrommaschine treibt, deren Strom mittelst isolierter Drähte einem in einem Verkehrsmittelpunkte aufgestellten Motor zugeführt wird, welcher die elektrische Kraft wieder in mechanische umwandelt. Während der Frankfurter Ausstellung im Jahre 1891 wurden 140 Pferdekraften von den Neckarfällen bei Lauffen 117 Meilen weit durch 3 Drähte übertragen, welche nur 4 mm Durchmesser hatten, mit einem Nutzeffekt von 74 Prozent, einschliesslich aller Verluste.

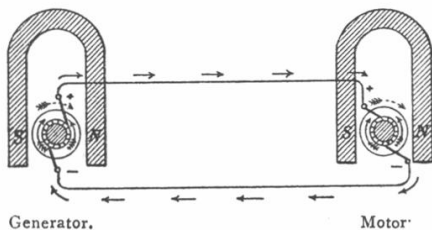


Fig. 226.

Fig 226 veranschaulicht einen einfachen Fall der Kraftübertragung zwischen zwei Maschinen. Bei der einen treibt die

E.M.K. den Strom, bei der andern wirkt sie dem Strome entgegen. Die erste wirkt als Stromerzeuger (Art. 431), die zweite als Motor. Sind ihre E.M.K. bezüglich E_1 und E_2 , so ist der Nutzeffekt der Kraftübertragung $= E_2 : E_1$.

Weil innerhalb der Linie wegen ihres Widerstandes ein Teil der Kraft verloren geht und weil Kupferdrähte, welche starke Ströme führen sollen, ohne überhitzt zu werden, sehr teuer sind, so sind solche Kraftübertragungen nicht immer rentabel. Die Watt, welche in einer Linie vom Widerstande R verloren gehen, sind nach Art. 434 gleich $C^2 \cdot R$ und die nutzbar gemachten Watt nach Art. 430 gleich $C \cdot V_M$, wo V_M die Volt am Motor bedeuten. Folglich beträgt die Kraft, welche in die Anfangsstation der Linie einströmen muss, $C^2 R + C \cdot V_M$ Watt. Nun ist klar, dass man den Verlust $C^2 R$ konstant erhalten und dabei doch die Kraft, welche übertragen wird, dadurch vermehren kann, dass man die Grösse V_M vermehrt, indem man einen Motor mit hoher Spannung und dementsprechend auch einen Stromerzeuger mit hoher Spannung verwendet. Ist V_G die Spannung an dem Ende der Linie, wo der Stromerzeuger steht, so ist $C = R(V_G - V_M)$. Nun können wir C konstant erhalten (und daher auch $C^2 R$) und dabei doch die Anzahl der Volt erhöhen, vorausgesetzt, dass $V_G - V_M$ sich nicht ändert.

Beispiel. Angenommen, eine Kupferdrahtlinie von 20 Meilen Länge habe einen Widerstand von 100 Ohm. Ein in ihr fliessender Strom von 6 Ampère verbraucht 3600 Watt oder annähernd 5 Pferdekkräfte. Um 6 Ampère durch 100 Ohm zu schicken, ist eine Potentialdifferenz von 600 Volt erforderlich. Es sei $V_G = 1000$ und $V_M = 400$, also $V_G - V_M = 600$. Die Anzahl der hineingesandten Watt ist $CV_G = 6000$ und die übertragenen Watt $C \cdot V_M = 2400$. Von 8 verwandten Pferdekkräften werden also nur ungefähr $3\frac{1}{4}$ übertragen und der Nutzeffekt ist $V_M : V_G = 40$ Prozent. Wird aber V_G auf 2000 Volt erhöht und V_M auf 1400, so ist $V_G - V_M = 600$, $C = 6$ Ampère und $C^2 R = 3600$ Watt, wie vorher; dagegen betragen die benutzten Watt

jetzt 12,000 und die übertragenen Watt 8400. Demnach ist der Nutzeffekt jetzt 70 Prozent.

Es ist also klar, dass alles von der Grösse der Spannung abhängt bei der Uebertragung der elektrischen Energie auf grosse Entfernungen, sei es zu Beleuchtungszwecken oder zur Kraftabgabe. Bei der Kraftübertragung von den Fällen bei Tivoli, behufs Erleuchtung der 16 Meilen entfernten Stadt Rom, hat man eine Spannung von 5000 Volt mit Erfolg benutzt und bei dem Projekte in Betreff der Ausnutzung der Niagara-Fälle hat man eine Spannung von 30,000 Volt vorgeschlagen.

XXXIX. VORLESUNG: *Das elektrische Licht.*

443. Der Elektrische Bogen. Werden zwei Kohlen-
spitzen durch Drähte mit den Polen einer kräftigen Volta'schen Batterie oder eines andern Erzeugers elektrischer Ströme verbunden, einen Moment lang zur Berührung gebracht und dann wieder bis auf einen kleinen Abstand von einander entfernt, so entsteht zwischen den Kohlenspitzen eine Art elektrische Flamme, der **Volta'sche Bogen** genannt, und ein glänzendes Licht strahlt von den Elektroden der weissglühenden Kohlenspitzen aus. Diese Erscheinung wurde zuerst im Jahre 1800 von Humphrey Davy beobachtet und kann auf folgende Weise erklärt werden: Vor der Berührung reicht die Potentialdifferenz der Kohlenspitzen nicht aus, um einen Funken durch die Luft überspringen zu lassen, selbst wenn der Abstand nur $\frac{1}{400}$ Millimeter beträgt; werden jedoch die Kohlenspitzen zur Berührung gebracht, so entsteht ein Strom. Beim Trennen der Kohlenspitzen verflüchtigt der Oeffnungsfunke einen geringen Teil der Kohle zwischen den Spitzen. Da Kohlendampf ein Halbleiter ist, so kann der Strom unausgesetzt die Lücke überspringen, falls dieselbe nicht zu gross ist; da aber der Kohlendampf einen sehr grossen Widerstand bietet, so wird derselbe durch den Durchgang des Stromes stark erwärmt, und die Kohlen-

spitzen werden ebenfalls heiss. Nun strahlen feste Körper das Licht besser aus als gasförmige, folglich geben die Kohlenspitzen weit mehr Licht von sich, als der Bogen selbst, obgleich jene nicht so heiss sind. Die Temperatur des Bogens entspricht der Temperatur, bei welcher sich Kohle verflüchtigt; nach Violle 3500°C . Innerhalb des Bogens schmelzen die am schwersten schmelzbaren Körper, wie Kiesel und Diamant; und in seiner intensiven Hitze verflüchtigen sich ohne weiteres Metalle wie Gold und Platin. Wird der Bogen im luftgefüllten Raume erzeugt, so brennen die Kohlenspitzen langsam weg auf dem Wege der Oxydation. Man hat auch beobachtet, dass Kohleteilchen von der + Elektrode abgelöst werden, welche dadurch in Form eines Kraters ausgehöhlt wird, und einige dieser Kohleteilchen werden an der — Elektrode abgesetzt, welche dadurch die in Fig. 227 veranschaulichte Gestalt annimmt. Der Widerstand des Bogens variiert je nach Umständen von 0,2 Ohm aufwärts, je nach der Länge und dem Querschnitt der Flamme. Man hat auch gefunden, dass der Bogen eine besondere entgegengesetzt gerichtete elektromotorische Kraft besitzt, bis gegen 35 Volt, wenn Gleichströme benutzt werden und der Bogen ruhig ist. Wird der Bogen unbeständig und fängt er an zu zischen, so ist die entgegengesetzt gerichtete E.M.K. viel geringer. Der Sitz dieser letztern ist die Oberfläche des Kraters, wo das Verflüchtigen der Kohle vor sich geht.

Um ein befriedigendes elektrisches Licht zu erzeugen, ist mindestens eine elektromotorische Kraft von 40 bis 50 Volt erforderlich, falls Gleichstrom benutzt wird. Bei Wechselströmen genügen 30 bis 35 Volt. Der gebräuchliche Strom für Bogenlampen in der Stärke von 1000 bis 2000 Kerzen beträgt 5 bis 10 Ampère. Mit schwächern Strömen oder geringerer E.M.K. einen beständigen Bogen zu unterhalten, ist unthunlich. Für Schiffslampen oder für Leuchttürme benutzt man Bögen von grösserer Stärke, indem man dickere Kohlestäbe verwendet und ihnen Ströme von 20 bis 100 Ampère zuführt oder noch mehr. Die gewöhnliche Grösse der verwendeten Kohlestäbe

beträgt 10 bis 11 mm Durchmesser; der Verbrauch beträgt annähernd $2\frac{1}{2}$ cm pro Stunde, wobei der + Pol viel schneller abgenutzt wird als der negative. Der innere Widerstand der gewöhnlichen Daniell'schen oder Leclanché'schen Elemente (wie solche in [der Telegraphie benutzt werden) ist zu gross, als dass sie zur Erzeugung des elektrischen Lichts benutzt werden könnten. Eine Batterie von 40 bis 60 Grove'schen Elementen

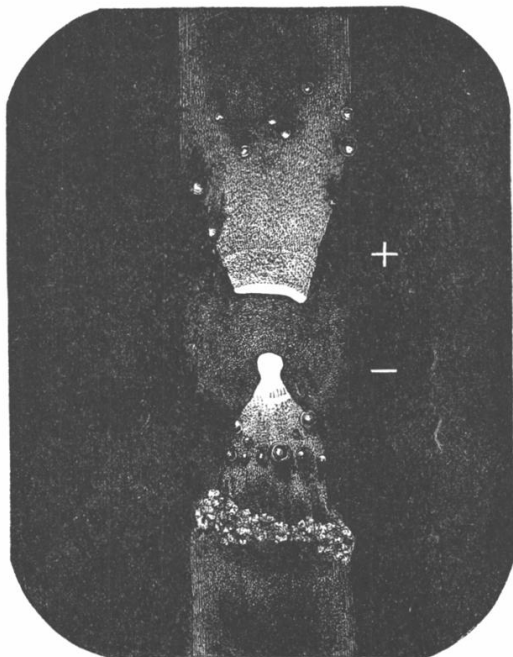


Fig. 227.

(Art. 177) genügt, dauert jedoch nicht länger als 2 bis $\frac{3}{4}$ Stunden. Eine dynamo-elektrische Maschine (wie eine solche in den Art. 456 und ff. beschrieben werden wird), welche durch eine Dampfmaschine in Bewegung gesetzt wird, ist der beste Stromerzeuger für praktische elektrische Beleuchtung.

Die Lichtmenge, welche von einer elektrischen Lampe aus-

gestrahlt wird, ist nicht in allen Richtungen dieselbe. Ist die + Kohle oben, so wird die grösste Lichtmenge unter einem Winkel von 45° (nach unten) ausgestrahlt. Das meiste Licht kommt von dem weissglühenden Krater, sehr wenig vom — Pole. Beim Wechselstrom-Bogen sind die Kohlenspitzen gleich und senden gleich viel Licht aus. Der Strom muss in der Sekunde wenigstens in 40 Perioden wechseln. Die gesamte ausgesandte Lichtmenge ist dem Strome, falls derselbe bei konstanten Volt zugeführt wird, nicht genau proportional, sondern nimmt in etwas stärkerem Verhältnis zu. Durch Verdopplung des Stromes erhält man etwas mehr als die doppelte Lichtmenge.

444. Bogenlichtlampen. Davy verwendete Holzkohle zu Elektroden, um das Bogenlicht zu erhalten. Später wurden von Foucault harte Gaskohlenstifte eingeführt. In allen neuern Bogenlichtlampen kommen Stifte einer dichtern und mehr homogenen, künstlichen Koalkkohle zur Verwendung. Dieselben nutzen sich regelmässiger und langsamer ab; doch ist noch eine Vorrichtung nötig, um die Kohlenspitzen mit der erforderlichen Geschwindigkeit gegen einander zu bewegen. Der Bogen muss durch den Mechanismus erregt werden, indem er die Stifte zur Berührung bringt und dann sie wieder bis auf die gehörige Entfernung trennt, um einen beständigen Bogen zu erzeugen; durch den Mechanismus muss auch dafür gesorgt werden, dass die Kohlenspitzen in dem Bogen in eben dem Maße wieder einander näher gerückt werden, wie sie verbraucht werden, und dass dieselben in automatischer Weise einander näher gerückt oder von einander entfernt werden, falls der Bogen zu klein oder zu gross wird. Auch muss der Mechanismus die Kohlenspitzen einen Moment lang zur Berührung gelangen lassen, um den Bogen von neuem zu erregen, falls derselbe zufällig ausgegangen sein sollte. *Bogenlichtlampen oder Regulatoren*, welche diese Bedingungen erfüllen, sind von verschiedenen Seiten konstruiert worden. Dieselben können folgendermaßen klassifiziert werden:

a) *Lampen mit Uhrwerk.* Fig 228 zeigt den Regulator Foucault's, wie derselbe von Duboscq konstruiert wird; bei

dieser Lampe werden die Träger der Kohlenstifte durch ein Uhräderwerk bewegt, welches durch eine Feder getrieben wird. Am untern Teile zieht ein Elektromagnet, durch welchen der Strom fließt, eine Armatur an und regelt das Uhrwerk. Ist der Strom zu stark, so wird die Armatur heruntergezogen und das Uhrwerk zieht die Kohlenstifte weiter auseinander. Wird der Strom durch den Widerstand des Bogens geschwächt, so wird die Armatur durch eine Feder aufwärts getrieben und ein zweites Räderwerk tritt in Wirkung und bewegt die Kohlenstifte näher aneinander. Lampen mit Uhrwerk sind auch von Serrin und Crompton konstruiert worden, bei denen der Mechanismus des Uhrwerks durch das Gewicht der Kohlenstifte getrieben wird.

b) *Lampen mit Bremsrad.* Jaspar und Crompton haben einen Mechanismus erfunden, welcher die Art und Weise, in der die Kohlen einander genähert werden, regelt und bei dem zu dem Räderwerke noch ein Bremsrad hinzutritt; die Bremse, welche das Rad hemmt, wird durch einen kleinen Elektromagnet getrieben, welcher das Rad etwas weiter rollen lässt, wenn der Widerstand des Bogens über seinen normalen Betrag zunimmt. In Fig. 229 ist *B* das Bremsrad, *L* der dasselbe regulierende Hebel, *C* ein Eisenkern der in den Stromkreis geschalteten Spule *S*. Wird der Strom hineingeschickt, so wird der Eisenkern aufwärts gezogen, wodurch *L* das Rad *B* etwas dreht, so dass die Kohlenstifte auseinander gehen und der Bogen erregt wird.

c) *Solenoid-Lampen.* Bei dieser Art von Bogenlichtlampen

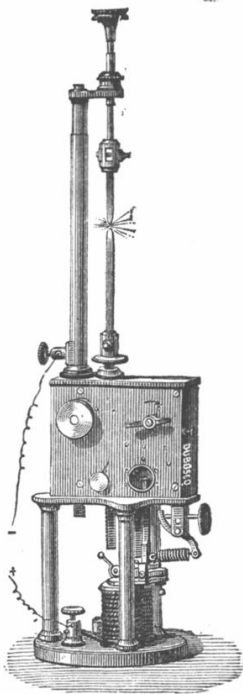


Fig. 228.

ist das eine Kohlenstück an einem eisernen Stabe befestigt, der sich innerhalb einer hohlen Spirale (Solenoid) vertikal auf und

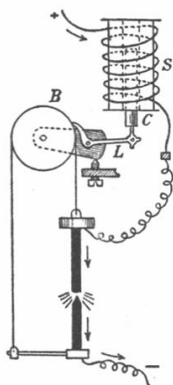


Fig. 229.

ab bewegen kann. Da diese vom Strom durchflossen wird, so reguliert sie die Stellung der Kohlen spitzen und die Länge des Bogens. Siemens verwendete zwei Solenoide, welche differentiell gegen einander wirkten, indem das eine in den Hauptstrom, das andere in einen Nebenschluss des Stromes geschaltet war. Letzteres wirkt als Voltmeter, um den Bogen zu überwachen und die Kohlenstifte vorwärts zu treiben, wenn die Volt zu gross werden.

d) *Lampen mit Klammern.* Eine etwas einfachere Vorrichtung ist der Gebrauch einer Klammer, welche das obere Kohlenstück in die Höhe zieht, während das untere fest bleibt. Bei dieser Art von Lampen wird die Klammer durch einen Elektromagnet in Bewegung versetzt, durch welchen der Strom hindurchgeht. Geht die Lampe aus, so lässt der Magnet die Klammer los und das obere Kohlenstück fällt durch sein eigenes Gewicht herab, und berührt das untere Kohlenstück. Sofort fließt der Strom um den Elektromagnet, wodurch letzterer auf die Klammer wirkt, welche das Kohlenstück ergreift und dasselbe wieder bis zu dem erforderlichen Abstände in die Höhe hebt. Sollte der Bogen zu lang werden, so gestattet die verminderte Anziehung der Klammer dem Kohlenstück, etwas fortzurücken.

e) *Motor-Lampen.* Bisweilen werden kleine elektrische Motoren verwandt, um den Gang der Kohlenstücke automatisch zu regeln.

445. Gruppierung der Bogenlampen. Wird der Strom bei konstanten Volt zugeführt, so müssen die Bogenlampen *parallel* geschaltet werden. Sollen dieselben in *Serien* aufgestellt werden, wobei derselbe Strom nach und nach durch jede Lampe fließt, so ist ein Strom von konstanter Stärke erforder-

lich. Auch muss in diesem Falle jede Lampe einen Nebenschluss haben.

446. Elektrische Kerzen. Um die Kosten und den komplizierten Mechanismus solcher Regulatoren zu vermeiden, haben Jablochkoff, Wilde und andere elektrische *Kerzen* erfunden. Fig. 230 stellt die *Jablochkoff'sche Kerze* dar, welche aus zwei parallelen harten Kohlenstiften besteht, die durch eine dünne Schicht von Wolfswurzpflaster getrennt sind und von einer vertikalen Stütze getragen werden. Der Bogen bildet sich oben an der Spitze zwischen den beiden Kohlendochten. Damit beide Kohlenstücke gleichmässig verbraucht werden, müssen alternierende Ströme in Anwendung kommen.

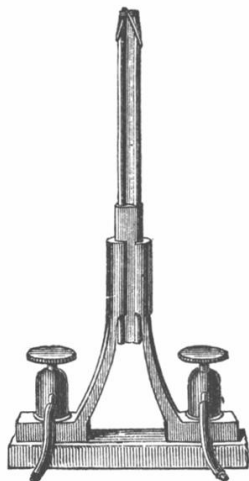


Fig. 230.

447. Elektrische Glühlampen. Volta'sche Bögen, deren Leuchtkraft weniger als 100 Kerzen beträgt, können praktisch nicht beständig unterhalten werden und sind auch unvorteilhaft. Für kleinere Beleuchtungen ist es einfacher und billiger, einen dünnen kontinuierlichen Draht oder einen Faden eines unschmelzbaren Leiters zu benutzen, welcher beim Stromdurchgang bis zur Weissglühhitze erwärmt wird. Dünne Platindrähte sind zu diesem Zwecke häufig in Vorschlag gekommen, doch ist bei ihnen Gefahr des Schmelzens vorhanden. Iridiumdrähte und dünne Kohlenstreifen sind ebenfalls von einigen Erfindern vorgeschlagen. Im Jahre 1878 erfand Edison eine Lampe, welche aus einer Platinspirale bestand, die mit einem Nebenschluss verbunden war, damit der Strom von der Lampe abgelenkt werden könnte, falls dieselbe überhitzt würde. Swan zeigte im Februar 1879 eine Lampe mit Kohlefaden in einer luftleeren Kugel. Edison erfand im Oktober 1879 eine Vakuum-Lampe mit einem spiralförmig gewundenen Faden, der aus

Lampenruss und verkohltem Teer besteht. Swan verfertigte im Januar 1880 Fäden aus in Schwefelsäure getränkter Baumwolle, welche er dann verkohlen liess. Edison ersetzte im Jahre 1880 den Kohlefaden durch einen schmalen Streifen aus verkohltem Bambusrohr. Lane Fox benutzte im Jahre 1879 verkohlte Pflanzenfasern. Crookes verwendete einen aus Seide oder Pflanzenstoff präparierten Faden, der mit Kupferammoniak-Chlorür behandelt war.

Die modernen Glühlampen haben gewöhnlich dünne Kohlen-
drähte, die aus Cellulose hergestellt und dann in einem geschlossenen Gefässe verkohlt werden. Sie werden mit Platindrähten eingefasst, welche in eine Glaskugel führen, wo sie festgesiegelt werden; dann werden aus den Glaskugeln die Luft und andere Gase möglichst vollkommen durch Gebrauch von besondern Quecksilberluftpumpen entfernt. Kohle eignet sich zu diesem Zwecke besser als Platin oder andere Metalle, theils wegen ihrer schwierigen Schmelzbarkeit und ihres grössern Widerstandes, theils wegen ihrer bemerkenswerten Eigenschaft, bei hohen Temperaturen einen geringern Widerstand zu bieten,

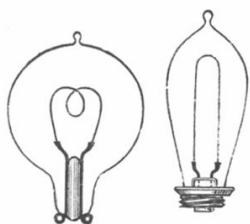


Fig. 231.

als bei niedrigen Temperaturen. Zwei gebräuchliche Formen von Glühlampen zeigt Fig. 231; die Swan'sche, in England gebräuchliche und die von Edison vervollkommnete, in Amerika verwendete Form. Der Widerstand solcher Lampen variiert je nach Grösse und Länge des Fadens. Eine moderne

Lampe von 16 Kerzen Lichtstärke beansprucht bei Anwendung eines Stromkreises von 100 Volt ungefähr 0,6 Ampère, d. h. ihr Widerstand beträgt ungefähr 166 Ohm, wenn sie erhitzt ist, (oder mehr als 200 Ohm, wenn sie kalt ist), und sie absorbiert circa 60 Watt. Das entspricht einem Verhältnisse von weniger als 4 Watt pro Kerze. Unter diesen Umständen hält sie durchschnittlich mehr als 1000 Brennstunden vor. Benutzt man einen dünnern und etwas kürzern Faden, so geben die Lampen das-

selbe Licht und gebrauchen weniger Strom; doch ist dann ihre Dauer nicht so lange. Die Oberfläche verwittert mit der Zeit, falls die Lampe zu viel Licht aussenden soll. Die Kraft, welche erforderlich ist, um 12 solche 60-Watt-Lampen zu unterhalten, beträgt 720 Watt oder circa eine Pferdekraft.

Die folgende Tabelle enthält einige Angaben über eine 50-Volt-Lampe von 10 Kerzen bei verschiedener Spannung:

Volt.	Ampère.	Watt.	Lichtstärke.	Watt pro Kerze.	Wahrscheinliche Dauer (in Stunden).
48	0,77	37	8	4,3	3200
50	0,81	40,5	10	4,05	1500
53	0,87	46,4	14,5	3,2	800
55	0,92	50,6	18,5	2,7	480
58	0,99	57,5	25,5	2,2	250
61	1,06	64,7	35,5	1,8	150

Das Licht ist ungefähr der 6ten Potenz der Volt proportional, die verbrauchte Energie der zweiten Potenz. Doch nimmt die Lebensdauer einer Lampe sehr schnell ab, wenn man die Volt nur sehr wenig erhöht.

Für besondere Lampen von grosser Lichtstärke, von 800 bis 1000 Kerzen, können dünne Fäden nicht gebraucht werden. Man verwendet in diesem Falle flache Streifen oder dicke Drähte von Kohle; bei gleichem Kraftaufwand geben sie viel weniger Licht als eine Bogenlampe.

448. Gruppierung der Glühlampen. Glühlampen werden gewöhnlich *parallel* geschaltet (Fig. 232), zwischen Hauptleitern, welche auf konstanten Volt erhalten werden. Der gebräuchliche Betrag der Potentialdifferenz zwischen dem + und — Hauptstrange beträgt

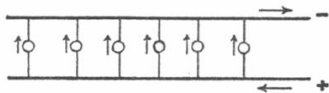


Fig. 232.

100 Volt. Der in den Hauptsträngen zirkulierende Strom teilt sich und fließt durch jede Lampe selbständig. Wenn eine

Lampe eingeschaltet wird, so wird dadurch der Strom in den andern nicht verringert, denn das Einschalten einer neuen Bahn hat nur zur Folge, dass die Elektrizitätsquelle einen entsprechend stärkern Strom abgibt. Die Methode der Gruppierung in *Serien* (Art. 163) findet bei Glühlampen selten Anwendung; jede Lampe erfordert alsdann einen automatischen Ausschalter, damit nicht etwa, falls eine Lampe erlischt, auch die übrigen Lampen der Reihe ausgehen.

Das *Drei-Draht-System*, bei dem ein dritter oder neutraler Draht zwischen dem + und — Hauptstrange liegt, hat den Zweck, eine grössere Anzahl von Volt benutzen und auf diese

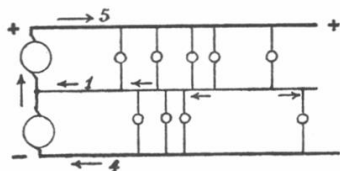


Fig. 233.

Weise die doppelte Anzahl von Lampen mit einem geringen Mehraufwand von Kupfer anzünden zu können. Um die Lampen auf der einen Seite des Stromkreises (Fig. 233) von denen auf der andern Seite unabhängig

zu machen, falls nicht zufällig dieselbe Anzahl gleichzeitig eingeschaltet wird, wird der mittlere Draht, welcher nur so dick zu sein braucht, dass er einen Strom gleich der Differenz der Ströme in den beiden äussern Drähten führt, nach der Station zurückgeleitet und auf einem mittleren Potential zwischen den beiden äussern Drähten erhalten, indem man nicht eine, sondern zwei Dynamomaschinen verwendet.