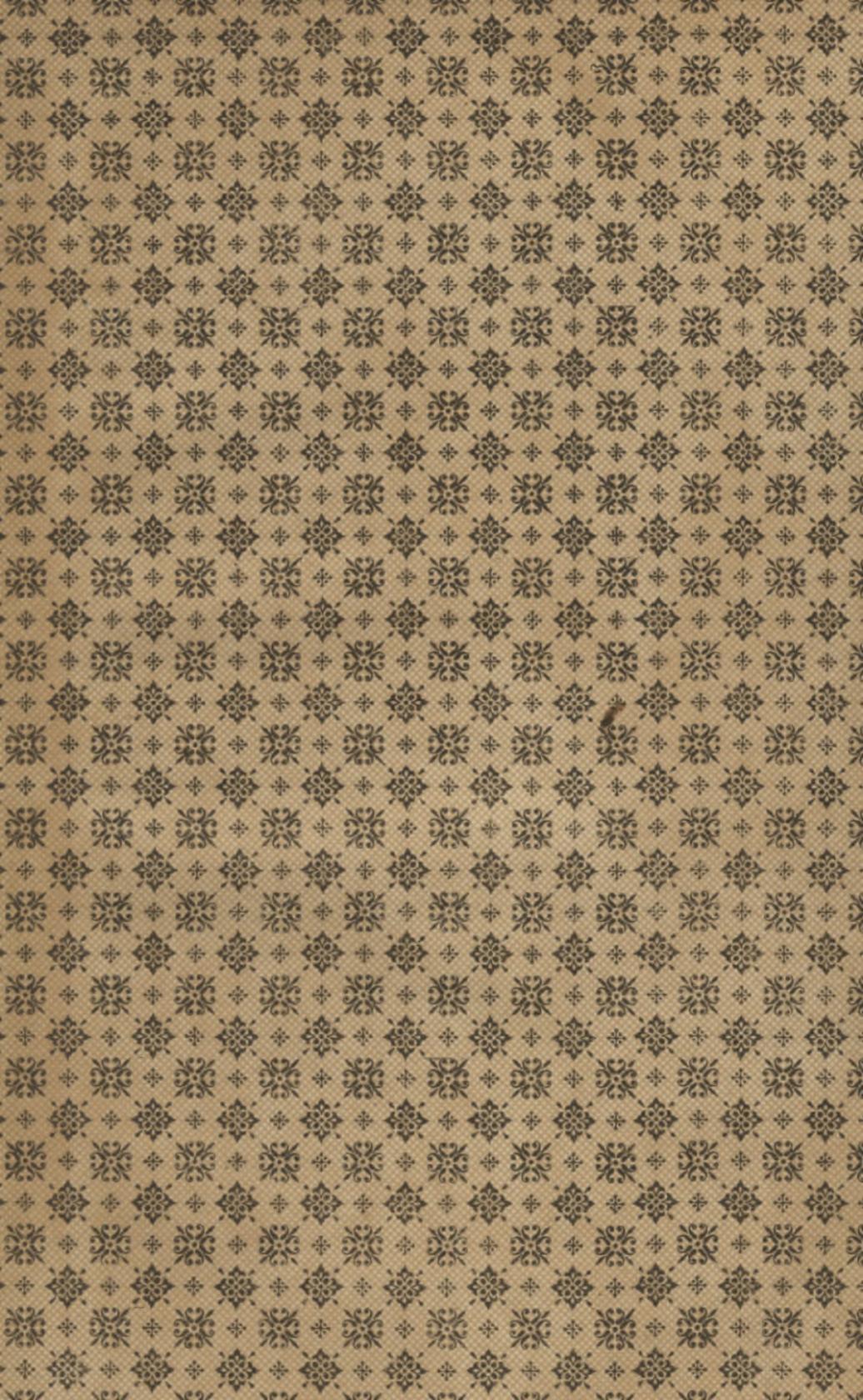


Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000299123



Ueberblick

über die

Elektrotechnik.

Sechs populäre Experimental-Vorträge

gehalten im

Physikalischen Verein zu Frankfurt a. M.

von

Dr. J. Epstein.

Zweite, vermehrte Auflage.

Mit 36 Abbildungen.

F. Nr. 19323.



Frankfurt a. M.

Verlag von Johannes Alt.

1894.

VIII 2

x
H 1.059



II 5499

Das Recht der Uebersetzung in fremde Sprachen bleibt vorbehalten.

Vorwort.

Die im Folgenden wiedergegebenen Vorträge wurden von mir als einleitende elektrotechnische Vorlesung im Physikalischen Verein zu Frankfurt a. M. gehalten. Es kam mir darauf an, vor einem Kreis von Nichtfachleuten die bemerkenswerthesten elektrotechnischen Erscheinungen vorzuführen und an diesen die wichtigsten Begriffe des Gebietes zu entwickeln.

Die Vorträge erschienen zuerst im Jahresbericht des Physikalischen Vereins und als Separatabdruck aus demselben.

Die Vortragsform habe ich im Interesse einer anschaulicheren Darstellung gewahrt. Auch Wiederholungen, insbesondere am Schluss und zu Beginn der Vorlesung, welche bereits Durchgenommenes unter neuen Gesichtspunkten zusammenfassen oder das Material für einen weiteren Aufbau übersichtlich neben einander stellen, wurden beibehalten; sie erleichtern erfahrungsgemäss das Verständniss.

Die zweite Auflage ist durch Hinzufügung einer grösseren Reihe von Figuren erweitert. Sie haben weniger den Zweck, specielle, in der Praxis übliche Formen zu veranschaulichen, als dem an das Experiment sich anlehenden Texte als Erläuterung zu dienen.

Dem in der Zwischenzeit erfolgten Fortschritt der rasch voranstrebenden Technik wurde bei der neuen Auflage gebührend Rechnung getragen.

Frankfurt a. M., Institut des Physikalischen Vereins,
im October 1893.

Dr. J. Epstein.

Inhalt.

	Seite
Vorwort	III
Erster Vortrag.	
Grundbegriffe. Stromrichtung. Gleichstrom. Wechselstrom. Stromstärke (Ampère), Spannung (Volt)	1
Zweiter Vortrag.	
Widerstand (Ohm). Chemische Wirkungen des Stromes. Galvanostegie. Accumulatoren. Elemente	18
Dritter Vortrag.	
Elektromagnetismus. Telegraph. Telephon	35
Vierter Vortrag.	
Gramme'scher Ring. Dynamo-elektrisches Princip. Gleichstrommaschine. Elektromotor	48
Fünfter Vortrag.	
Wechselstrommaschine. Glühlicht, Bogenlicht. Transformator. . . .	61
Sechster Vortrag.	
Elektrischer Effect (Volt-Ampère, Watt). Vertheilungssysteme (Trans- formatorensystem, Dreileitersystem, Drehstromsystem)	75

Erster Vortrag.

**Grundbegriffe. Stromrichtung. Gleichstrom. Wechselstrom.
Stromstärke (Ampère), Spannung (Volt).**

Die rasche Ausbreitung, welche die Elektrotechnik gefunden hat, die Bedeutung, die sie dadurch für immer weitere Kreise gewinnt, wecken allenthalben den Wunsch nach Kenntniss ihrer Grundlagen. In der Neuheit der Elektrotechnik ist es begründet, dass sich der Nichtfachmann ihr gegenüber fremder fühlt, als gegenüber anderen Gebieten von gleicher, zuweilen geringerer Bedeutung. Ein Jeder glaubt zu wissen, was ein Kilogramm, was ein Kilometer, eine Atmosphäre, eine Pferdekraft ist. Selbst wer die eigentliche Definition dieser Begriffe nicht kennt, verbindet doch mit diesen Worten der Wahrheit mehr oder weniger nahe kommende Vorstellungen. Volt, Ampère, Ohm und ähnliche Bezeichnungen dagegen sind Worte, bei denen man kaum glaubt, etwas denken zu dürfen. Es genügt aber nicht, sich zur Erklärung dieser Thatsache mit dem Hinweise, dass die Elektrotechnik eine neuere Errungenschaft, die Elektrizitätslehre gleichfalls ein jüngerer Zweig der Physik ist, abzufinden. Diese Thatsache wurzelt, ebenso wie die Empfindung, dass wir allen diesen Begriffen fremder gegenüber zu stehen glauben, als ähnlichen Begriffen auf anderen Gebieten, darin, dass uns im Leben die Erscheinungen der Elektrizität in geringerer Zahl, in geringerer Mannigfaltigkeit entgegentreten.

Der Weg, auf dem wir überhaupt zu bestimmten Begriffen gelangen können, ist einzig und allein der Weg der Erfahrung. Wir verbinden mit dem Worte Temperatur einen bestimmten Be-

griff, da wir aus Erfahrung wissen, dass Körper einen gewissen Zustand annehmen können, der in uns bei der Berührung eine eigenartige Sinnesempfindung wachruft. Wir verbinden einen bestimmten Begriff mit dem Worte Kraft, weil wir selbst im Stande sind, eine Kraft auszuüben, und weil wir eine Vorstellung von der Grösse der Kraft haben, die beispielsweise zum Halten eines Gewichtes von 10 Kilogramm erforderlich ist. Aber was ein elektrischer Strom von 5 Ampère ist, dafür scheint uns von vornherein jedes Verständniss zu mangeln. Wollen wir nun auch hierüber bestimmte Vorstellungen erlangen, so müssen wir Gelegenheit nehmen, die

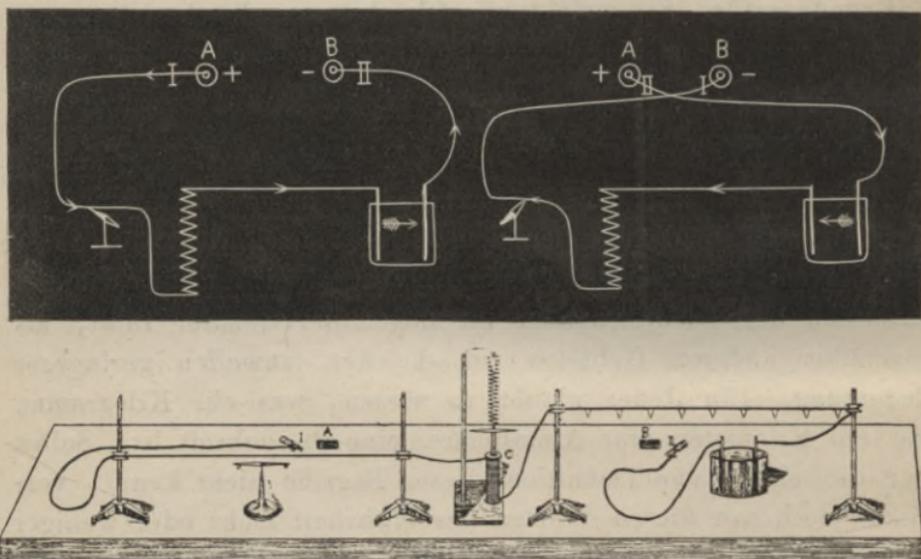


Fig. 1.

entsprechenden Erscheinungen in Verbindung mit ihren Maassbeziehungen kennen zu lernen. Treten wir ohne weiteres an diese Aufgabe heran!

Wir sehen auf dem Tische ein zusammenhängendes System von Drähten ausgespannt (Fig. 1). Die beiden Enden sind an zwei Metallstöpseln I und II befestigt, die in zwei entsprechende Bohrungen A und B des Tisches passen. Das Drahtsystem selbst ist nicht ganz einheitlicher Natur. Von dem Anschluss-Stöpsel I ausgehend, führt der Draht oberhalb einer Magnetnadel nach der Spule C, die er in vielen Windungen umkreist. Ueber dieser Spule schwebt, an einer Spiralfeder aufgehängt, ein Eisenstück. An die Spule schliesst sich ein gerade ausgespannter Draht, der

durch aufgesetzte Papierstreifen sichtbar gemacht ist. Er endet an einer Kupferplatte, die in einem mit einer grünen Flüssigkeit, einer Nickellösung, gefüllten Glasgefäße steht. Dieser Kupferplatte gegenüber steht in demselben Gefäße eine zweite, von der ein Draht zum Stöpsel II führt. An der Zusammenstellung ist zunächst nichts Ausserordentliches bemerkbar. Nun werden die beiden Stöpsel in die entsprechenden Bohrungen des Tisches gesteckt und im gleichen Augenblick sehen wir allenthalben eine Aenderung eintreten. In dem Momente der „Einschaltung“, wie wir diese Operation nennen, wird die Magnetnadel aus ihrer bisherigen Lage abgelenkt, der aufgehängte Eisenkern wird in die Spule hineingezogen. Rauchwölkchen, die aufsteigen, weisen auf ein Verkohlen der auf den ausgespannten Draht aufgesetzten Papierstreifen, und wir schliessen daraus auf eine Erwärmung des Drahtes. Wir beobachten auch, dass der Draht in Folge seiner Ausdehnung sich gesenkt hat — eine Erscheinung, die gleichfalls nur auf eine Erwärmung des Drahtes zurückzuführen ist. Aus der Nickellösung in dem Glase endlich sehen wir Gasblasen aufsteigen. Lösen wir wieder die Verbindung mit den Anschlussstellen durch Herausziehen der Stöpsel — „schalten“ wir „aus“ —, so sehen wir überall wieder den ursprünglichen Zustand eintreten und finden — von einer Stelle abgesehen — nirgends eine bleibende Veränderung. Wir hatten in die Nickellösung zwei völlig gleiche Kupferplatten eingetaucht; nehmen wir sie jetzt heraus, so finden wir die eine unverändert, die andere jedoch mit einem schwärzlichen Ueberzuge bedeckt.

Fassen wir die beobachteten Erscheinungen schärfer in's Auge! Die Magnetnadel drehte sich, sodass sich die eine von beiden Spitzen rückwärts, die andere vorwärts bewegte. Hätte nicht auch eine Drehung in entgegengesetztem Sinne eintreten können? Desgleichen bemerkten wir an anderer Stelle einen Vorgang, der möglicherweise auch in zweierlei Richtung hätte verlaufen können; Warum ist gerade die eine Kupferplatte geschwärzt worden und nicht die andere? Wäre es nicht möglich, dass bei einer anderen Anordnung des Versuchs umgekehrt diese Platte sich mit dem Niederschlage bedeckte und jene unverändert bliebe?

Vertauschen wir die Aufeinanderfolge der Apparate, wechseln wir den Standpunkt des Beobachters, des Tisches, um uns von

rechts und links, von vorn und hinten unabhängig zu machen, so wird der Versuch doch stets in ein und derselben Weise verlaufen. Es wird sich stets auf derselben Kupferplatte der Niederschlag bilden, die Magnetnadel genau in derselben Richtung ausschlagen. Um den Versuch in anderer Richtung verlaufen zu lassen, bietet sich nur eine Möglichkeit. Wir haben gesehen, dass das System von Apparaten dadurch in einen veränderten Zustand gerieth, dass wir die Verbindung mit den Stellen A und B herstellten. Man kann nun die Verbindung des Systems mit den beiden Anschlussstellen kreuzweise ändern, indem man das Ende, das am Stöpsel I befestigt ist und das vorher mit der Anschlussstelle A verbunden war, nunmehr mit B verbindet und umgekehrt. Bevor ich dies ausführe, bringe ich jedoch das System in den ursprünglichen Zustand, indem ich die geschwärzte Kupferplatte durch eine frische ersetze.

Nachdem ich die Verbindungen hergestellt habe, sehen wir jetzt die beobachteten Erscheinungen in derselben Weise eintreten wie vorher, aber mit dem Unterschiede, dass an denjenigen Stellen, die eine gewisse Wirkungsrichtung erkennen liessen, diese Richtung sich geändert hat. Die Magnetnadel, die vorhin in einem bestimmten Sinne abgelenkt wurde, schlägt jetzt nach der entgegengesetzten Seite aus; bedeckte sich vorhin die linke Kupferplatte mit einem Ueberzuge, so bleibt diese jetzt blank, und an ihrer Stelle wird die rechte geschwärzt; jedesmal geschah dies mit der Platte, die direct mit der Anschlussstelle B in Verbindung stand.

Suchen wir nun die Erscheinungen unter Anwendung der elektrischen Terminologie zu deuten, so haben wir zu sagen: Die hier verwandten Apparate waren ursprünglich in ihrem natürlichen Gleichgewichtszustande; infolge Verbindung mit zwei besonderen Stellen des Tisches, in deren Bohrungen die Stöpsel eingesteckt wurden, ward dieses System von einem „elektrischen Strom“ durchflossen, und hierin erblicken wir die Ursache für alle Erscheinungen, die wir zu beobachten Gelegenheit hatten. Wenn aber diese Erscheinungen in bestimmter Richtung verlaufen können, sodass einmal der Niederschlag zur Linken, ein andermal zur Rechten sich bildet, der Ausschlag der Nadel einmal im einen, das andere Mal im entgegengesetzten Sinne erfolgt, dann werden wir auch der Ursache dieser Erscheinungen,

als die wir den elektrischen Strom erkannt haben, eine bestimmte Richtung zuerkennen müssen. Wir sprechen daher von der „Richtung“ des elektrischen Stromes. Bei beiden Versuchen floss ein elektrischer Strom durch den aufgestellten Apparat, aber die beiden Ströme unterschieden sich durch ihre Richtung. Bleiben wir nun bei dem Bilde des Stromes und denken an einen unserer natürlichen Ströme, so werden wir nie im Zweifel sein, was wir unter seiner Richtung zu verstehen haben: der Strom fließt von der Quelle zur Mündung. Anders hier! Wir haben keinen Grund, eine Richtung zu bevorzugen: es ist nicht eine Richtung ohne weiteres als Bewegungsrichtung des Stromes gekennzeichnet. Wenn wir gleichwohl von einer Richtung des elektrischen Stromes sprechen, so ist das also nicht etwas, das sich mit Nothwendigkeit aufdrängt, sondern es ist eine Vereinbarung. Vergewärtigen wir uns den früheren Versuch! Es wurde eine Kupferplatte mit einem Niederschlage bedeckt. Dieser Niederschlag bestand aus Nickel. Wir wollen uns nun vorstellen — wie es auch den thatsächlichen Verhältnissen entspricht —, dass das Nickel bei Stromdurchgang in der Lösung zu der Platte hinwanderte. Der Versuch wäre in ganz gleicher Weise verlaufen, wenn wir an Stelle der Nickellösung eine andere Metallösung, z. B. eine solche eines Kupfer- oder Silbersalzes, für das Kupferblech ein anderes Material genommen hätten, immer wäre das Metall in gleichem Sinne gewandert. Man ist übereingekommen, unter Richtung des Stromes diejenige Richtung zu verstehen, in der bei der elektrischen Zersetzung einer Metall-Lösung, der „Elektrolyse“, das niederzuschlagende Metall wandert.

Warum nun der Strom das eine Mal in der einen, das andere Mal in der anderen Richtung zu Stande kam, das ist eine Frage, die aufs Engste mit der Frage nach der Ursache für das Zustandekommen eines elektrischen Stromes überhaupt zusammenhängt. Erinnern wir uns an den beobachteten Vorgang! An dem System selbst wurde nichts geändert; es entstand ein Strom, als die beiden Enden des Systems mit den gekennzeichneten Stellen des Tisches in Verbindung gesetzt wurden. Also müssen wir in der Verbindung der Enden des Systems mit den beiden Anschlussstellen, den „Polen“, wie wir sie nennen wollen, den Grund

für das Zustandekommen des Stromes erblicken. Um zu verstehen, dass dann der Strom in einer bestimmten Richtung zu Stande kommt, müssen wir annehmen, dass die beiden benützten Pole nicht vollständig gleichwerthig sind, ähnlich, wie ein Wasserstrom in einer bestimmten Richtung zu Stande kommt, weil die Stelle, wo er entspringt, und die Stelle, zu der er fließt, verschiedenartig sind. Es unterscheiden sich somit die beiden Pole in einer gewissen Weise, und zwar so, dass, wenn man I mit A und II mit B verbindet, ein Strom in der Richtung von I nach II zu Stande kommt; wechselt man um, verbindet II mit A und I mit B, so fließt der Strom von II nach I, in entgegengesetzter Richtung. Wenn diese Bedingungen erfüllt sind, dann bezeichnen wir, wiederum auf Grund einer willkürlichen Uebereinkunft, die Klemme bei A als die „positive“, die Klemme bei B als die „negative“. Auf Grund dieser Uebereinkunft haben wir unter positivem Pol diejenige Stelle zu verstehen, von welcher der Strom — wenn die Möglichkeit für das Zustandekommen eines solchen gegeben ist — zu dem anderen Pol, dem negativen fließt. Bei der Verbindung von II mit A und I mit B fließt der Strom in anderer Richtung wie vorher, nämlich über II nach I, aber doch genau wie vorher von der positiven zur negativen Klemme.

Wir haben somit als erste Eigenschaft des elektrischen Stromes seine Richtung kennen gelernt. Die Richtung hing von der Polarität der Anschlussklemmen ab. Nun aber brauchen sich die Klemmen nicht so zu verhalten, wie bisher, d. h. so, dass die eine Klemme dauernd positiv, die andere aber dauernd negativ ist, sondern es kann vorkommen, dass zwar in einem bestimmten Moment die eine Klemme positiv, die andere negativ ist, im darauffolgenden aber die Pole wechseln, d. h. die vorher positive Klemme negativ wird und umgekehrt. In der That befinden sich hier am Tische noch ein paar weitere Klemmen, bei denen dies der Fall ist. Verbinde ich die Enden des Leitungsweges mit diesen Klemmen, dann können wir sehen, dass die vorher beobachteten Erscheinungen theilweise wieder eintreten, aber auch nur theilweise. Bei genauestem Zusehen werden wir keine Einwirkung auf die Magnetnadel wahrnehmen. Der weiche Eisenkern wird dagegen in genau derselben Weise beeinflusst,

wie vorher; auch der gerade ausgespannte Draht erwärmt sich wieder, wie wir an dem Verkohlen der Papierstreifen sehen. Betrachten wir aber unsere Metallplatten, so werden wir keine Veränderung entdecken können. Warum? Diese beiden Klemmen hier befinden sich im Allgemeinen stets in verschiedenem elektrischen Zustande, sie wechseln aber ihre Rolle periodisch, nämlich in einer Secunde etwa hundertmal. Es kommt in einem bestimmten Momente ein Strom in der einen Richtung zu Stande, nach einer hundertstel Secunde ist die Richtung des Stromes die entgegengesetzte, es wird somit eine bestimmte Richtung des Stromes nicht überwiegen und diejenigen Wirkungen, welche wir ihrer Art nach als von der Richtung des Stromes abhängig kennen lernten, haben keine Zeit, im einen oder anderen Sinne einzutreten. Einen solchen Strom, dessen Richtung periodisch wechselt, nennen wir einen „Wechselstrom“. Ein Strom, der seine Richtung dauernd beibehält, heisst „Gleichstrom“.

Verfolgen wir nun von Neuem die beobachteten Erscheinungen im Einzelnen! Wir betrachteten die Ablenkung der Magnetnadel und fragten uns, warum wird diese Magnetnadel gerade nach der einen Seite abgelenkt und nicht nach der anderen? Wir erkannten, dass der Grund dafür in der zufälligerweise gewählten Stromrichtung lag. Die Magnetnadel wird nun aber nicht nur nach einer bestimmten Richtung, sondern auch in eine ganz bestimmte Lage abgelenkt, in der sie so lange verharrt, als der Strom andauert. Warum wird die Nadel nicht stärker, warum nicht weniger stark abgelenkt? Der an einer Feder aufgehängte Eisenkern wird, wenn ein Strom durch die unter ihm befindliche Spule fliesst, bis zu einer bestimmten Tiefe in die Spule hineingezogen. Warum gerade bis zu dieser Tiefe? Ferner erkannten wir vorhin, dass der stromdurchflossene Draht erwärmt wird. Wir bemerkten es in dem einen Fall an der eingetretenen Verlängerung des Drahtes. Warum wird der Draht nur bis zu dieser Grenze erwärmt; warum nicht stärker, etwa gar bis zur Rothglut? Bei der beobachteten Elektrolyse wurde eine bestimmte Menge Nickel in der Secunde niedergeschlagen. Warum keine grössere oder kleinere Menge? Kurz, wir bemerken, alle Erscheinungen, die wir als Wirkungen des elektrischen Stromes

kennen lernten, sind einer Abstufung fähig. Sollte es nicht auch möglich sein, sie mittels des elektrischen Stromes in verschiedenen Abstufungen zu erhalten? In der That überzeugt uns ein abgeänderter Versuch, dass dies der Fall ist: Wir können beobachten, dass die Nadel jetzt stärker abgelenkt wird, als vorher; der Eisenkern wird tiefer in die Spule hineingezogen; der gerade ausgespannte Draht senkt sich stärker, ja, er beginnt sogar zu erglühen; endlich lässt eine regere Gasentwicklung in der Nickellösung darauf schliessen, dass auch hier eine Steigerung in der Wirkung eingetreten ist. Ich kann den Versuch wieder ändern, sodass die beobachteten Erscheinungen alle wieder in geringerer Stärke auftreten. Diese Beeinflussung des Grades der Wirkung erstreckt sich auf alle Wirkungsstellen in gleicher Weise.

Hatten wir als Ursache für das Zustandekommen aller dieser Erscheinungen den elektrischen Strom kennen gelernt, hatten wir ferner beobachtet, dass alle diese Erscheinungen einer gradweisen Abstufung fähig sind, so müssen wir ein Gleiches von dem Strome annehmen, der als Ursache dieselben Abstufungen durchlief, wie die durch ihn hervorgebrachten Wirkungen, und gelangen so zum Begriff der „Stromstärke“.

Als Ursache, dass sich der Draht das eine Mal nur um wenige Grade erwärmte, dass sich seine Temperatur das andere Mal bis zur Rothglut steigerte, dass einmal eine schwache, das ein anderes Mal eine stärkere Anziehung des Eisenkernes stattfand u. s. w., nehmen wir die verschiedene Stärke des Stromes an und hätten somit als ein zweites Charakteristikum die Stromstärke kennen gelernt. Wir überzeugen uns leicht durch Wiederholung der Versuche, dass die gleichen Beziehungen auch für solche Ströme gelten, welche nicht eine bestimmte Richtung dauernd beibehalten, sondern welche als Wechselstrom ihre Richtung periodisch ändern. Was ist nun der Grund all der beobachteten Vorgänge? Kurz gesagt der: Es existirt ein Etwas, das wir als elektrischen Strom bezeichnen. Dieser elektrische Strom ist im Stande, bestimmte Wirkungen hervorzubringen. Als solche Wirkungen wollen wir uns zunächst die Beeinflussung von Magneten merken, dann das Hineinziehen eines Eisenkernes in eine vom Strom umflossene Spule, „magnetische“ Wirkungen des Stromes. Wir haben weiter

gesehen, dass der elektrische Strom im Stande ist, eine Wärmeentwicklung hervorzubringen und schliesslich eine Wanderung von Metallen durch Lösungen zu bewirken. Alle diese Wirkungen sind von der Stromstärke abhängig, und zwar derart, dass bei einem bestimmten Körper ein und dieselbe Wirkung jederzeit durch ein und dieselbe Stromstärke hervorgebracht wird.

Wollen wir denselben Versuch an einem anderen Tage und Ort in gleicher Weise wiederholen, so müssen wir uns ein Urtheil über die Stärke des angewandten Stromes bilden. Dies führt zu der Nothwendigkeit der Einführung eines bestimmten Strommaasses, wie wir auch Maasse bedürfen, um die Länge eines bestimmten Drahtes, das Gewicht desselben oder andere seiner Eigenschaften festzulegen.

Das Maass für die Stärke des elektrischen Stromes führt den Namen „Ampère“. So gut wir einen bestimmten Begriff mit der Angabe verbinden können, dass ein Weg eine Länge von 20 Kilometer besitzt, so gut haben wir in der Elektrotechnik eine bestimmte Vorstellung bei der Angabe zu gewinnen, dass ein Strom eine Stärke von 20 Ampère besitze. Warum verbinden wir mit der Länge „20 Kilometer“ eine bestimmte Vorstellung? Seien wir ehrlich und gestehen uns, dass wir im Allgemeinen gar keine bestimmte Vorstellung davon haben, wenn wir nicht etwa auf der Fussreise oder bei anderer Gelegenheit Strecken unter Beachtung der Kilometerzahl zurückgelegt haben. Die Vorstellung „ein Kilometer“ stammt aus der Erfahrung. Gäbe es nicht noch ein andere Möglichkeit, sie zu erwerben? Ein Kilometer ist die tausendfache Länge eines Meters, ein Meter ist der vierzigmillionste Theil des Erdumfangs. Es wird Niemand gegen die Richtigkeit dieser Angaben etwas einwenden können. Dass wir aber so zu einer Vorstellung von der Länge von 20 Kilometer kommen, wird Niemand behaupten. Es ist ein ander Ding, die Definition einer Maasseinheit zu verstehen und ein ander Ding, mit solchen Maasseinheiten bestimmte Begriffe zu verbinden. Ebenso wenig, wie die wissenschaftliche Ableitung des Metermaasses zum Erfassen der Längeneinheit geeignet erscheint, wäre es mit der Ableitung des Ampère der Fall. Sie würden, wollte ich sie Ihnen geben, eine Definition erhalten, die zum Verständniss in keiner Weise förderlich wäre. Wir wollen statt dessen versuchen,

durch Kenntnissnahme der Stromstärken bei uns bekannten elektrischen Vorgängen uns ein Urtheil über die Grösse eines Ampère zu bilden.

Es ist hier eine Bogenlampe aufgehängt. Damit sie in Thätigkeit trete, muss sie mit unserer Elektrizitätsquelle in Verbindung gesetzt werden. Die Bogenlampe bietet nämlich für den elektrischen Strom einen Weg. Soll ein elektrischer Strom diesen Weg durchlaufen, so ist dies nur möglich, wenn dessen Enden mit zwei Stellen in Verbindung gesetzt werden, die sich in einem bestimmten, von einander verschiedenen elektrischen Zustande befinden. Ich will die Verbindung der Bogenlampe mit den beiden Anschlussklemmen herstellen. Ich thue dies durch Einsetzen der mit der Lampe durch Zuleitungsdrähte verbundenen Stöpsel in die bekannten Bohrungen des Tisches, ich schalte ein, und die Lampe erglüht. Wenn Sie nun hören, dass zur Erzielung der auftretenden Helligkeit eine Stromstärke von 8 Ampère erforderlich ist, so kann diese Angabe z. Z. nicht dazu dienen, Ihnen ein Urtheil über den Strombedarf der Lampe zu geben, sondern Sie sollen vielmehr an deren Vorstellung den Begriff der Grösse des Ampère gewinnen. Ich löse die Verbindungen der Bogenlampe mit den Stellen — ich schalte aus — und schalte eine Glühlampe von der gleichen Art ein, wie deren mehrere zu einer Krone vereinigt zur Erleuchtung des Hörsaales dienen. Der Strombedarf dieser Glühlampe ist ein weit geringerer, als derjenige der Bogenlampe. Er beträgt nur ungefähr $\frac{3}{4}$ Ampère.

Es ist weiter noch ein Telegraphen-Apparat aufgestellt. Hier ist der Strombedarf noch viel geringer als bei der Glühlampe. Er lässt sich nicht nach ganzen Ampère messen, sondern nur nach Tausendsteln von Ampère, nach „Milliampère,“ einem Maass, welches sich zu einem Ampère wie ein Millimeter zu einem Meter verhält. Ebensowenig können wir die Stromstärke, welche ein Telephon bedarf, nach Ampère messen; es handelt sich hier um eine Stärke, welche nach Bruchtheilen von Milliampère zu zählen ist.

Wie aber sind wir im Stande, Stromstärken überhaupt zu messen? In genau entsprechender Weise, als wir eine Länge messen, indem wir einen Maassstab ansetzen, der eine bekannte Länge, z. B. von einem Meter, besitzt.

Nachdem wir gesehen haben, dass ein und dieselbe Stromstärke an demselben Objekt ein und dieselbe Wirkung hervorruft, ist es ein Leichtes, eine Stromstärke nach der hervorgebrachten Wirkung zu schätzen. Hätten wir z. B. hinter dem Eisenkern, der in die Spule ragt, eine Skala angebracht und schickten durch die Spule einen elektrischen Strom von bekannter Stärke, z. B. von 5 Ampère, so würde der Eisenkern bis zu einer bestimmten Tiefe in die Spule hineingezogen werden. Wir brauchen nur diese Stelle mit 5 zu bezeichnen, um, wenn wir wieder einen Strom durchleiten und finden, dass der Kern bis zu derselben Stelle hineingezogen wird, zu wissen, dass seine Stärke wieder 5 Ampère beträgt. Zum gleichen Zwecke hätte sich auch die Beeinflussung eines Stahlmagneten benutzen lassen und geschieht dies bei den Galvanometern. Ein solches besteht aus einem leichten Magneten, der an einem Coconfaden aufgehängt ist und sich in der Nachbarschaft von Leitern befindet, die von elektrischen Strömen durchflossen werden. Um die Empfindlichkeit zu steigern, das Instrument für Messung schwacher Ströme geeignet zu machen, führt der Draht nicht einmal an dem Magneten vorbei, sondern ist in Hunderten von Windungen um ihn herumgeführt.

Sie sehen hier ein Instrument, bei dem die vorher charakterisirte Wirkung benutzt ist (vgl. Fig. 2, 3 Seite 14 und 15). Ein Eisenkern wird in eine Spule hineingezogen, und der Fabrikant hat bezeichnet, welche Stromstärke erforderlich ist, um dem Zeiger eine bestimmte Stellung zu geben. Genau so, wie man an einem Thermometer abliest, es herrscht eine Temperatur von 15° , weil die Quecksilbersäule bis zu der mit der Zahl 15 bezeichneten Stelle reicht, entnehmen wir, dass z. Z. durch das Instrument ein Strom von 6 Ampère fließt. Ein Instrument, das zur Messung von Strömen dient und eine hierauf bezügliche Aichung in Ampère besitzt, heisst „Ampèremeter“. Auch chemische Wirkungen des Stromes können ebenso wie die Wärmewirkungen desselben zu Messungen seiner Stärke benutzt werden.

Fassen wir den Inhalt der bisherigen Betrachtungen zusammen! Alle uns bekannt gewordenen Wirkungen des elektrischen Stromes waren einer gradweisen Abstufung fähig, als deren Grund wir die Verschiedenheit der Stromstärke kennen lernten.

Als Eigenthümlichkeit vieler Ströme haben wir kennen gelernt, dass sie eine stets gleich bleibende Richtung besaßen, die sich darin bekundete, dass gewisse Wirkungen immer in gleichem Sinne verliefen. Wir hatten uns geeinigt, unter der Richtung des Stromes diejenige zu verstehen, in welcher bei der elektrochemischen Zersetzung des Metallsalzes das Metall wandert. Wie wir nun vorher fragten, durch welche Eigenthümlichkeit des Stromes es bedingt werde, dass die Wirkung einmal in geringerem, ein anderes Mal in stärkerem Grade auftritt und als Grund die Stromstärke kennen lernten, wie wir uns gefragt haben, woher kommt es, dass die Wirkung einmal im einen, das andere Mal im anderen Sinne verläuft, und als Grund dafür die Stromrichtung kennen gelernt haben, so werden wir jetzt weitergehend uns die Frage vorlegen, woher kommt es, dass der Strom einmal diese, ein andermal jene Stärke besitzt, woher kommt es, dass der Strom einmal diese, ein andermal jene Richtung besitzt? Wir gelangen damit zu der Frage nach der Ursache des Zustandekommens des elektrischen Stromes.

Eine vorläufige Beantwortung dieser Frage liegt bereits vor. Wir erhielten jedesmal einen elektrischen Strom, so oft wir die Apparate mit zwei hierfür geeigneten Polen in Verbindung setzten. Wir werden nun fragen, was ist es, was diese beiden Pole auszeichnet? Wir können kurz antworten, es ist der elektrische Zustand, durch den sie sich unterscheiden. Es befindet sich die Anschlussstelle A in einem anderen elektrischen Zustande, als die Stelle B, in ähnlicher Weise, wie sich z. B. ein Theil einer Gasflamme in einem anderen Wärmezustande befindet, als ein Theil eines Wasserleitungsrohres. Wollte ich eine Verbindung herstellen und das kalte Rohr durch irgend einen Weg, der für Wärme passirbar ist, etwa durch eine Kupferstange, mit der Gasflamme verbinden, so würde Wärme von der heissen Seite nach der kalten fließen, wir würden das bekommen, was wir folgerichtig als einen „Wärmestrom“ zu bezeichnen hätten. In vollkommen entsprechender Weise unterscheiden sich diese beiden Stellen durch ihren elektrischen Zustand, welchen man ihr „Potential“ nennt. Wir können sagen, dass sich die eine Seite in einem höheren elektrischen Zustande befinde, ein höheres elektrisches „Potential“ besitze, als die andere und

darin einen Grund finden, warum der Strom von der einen Seite nach der anderen fließt, wie im analogen Fall die eine Stelle eine höhere Temperatur besass, als die andere, und darum ein Wärmestrom von ihr zur andern floss.

Betrachten Sie ein galvanisches Element. Es besteht im speciellen Fall aus einem Glasgefäß, das mit Salmiaklösung gefüllt ist; in diese taucht ein Zinkstab und ein aus einem Gemische von Braunstein und Kohle gefertigter Cylinder. Zinkstab und Kohle befinden sich unter diesen Verhältnissen in verschiedenem elektrischen Zustande; wenn wir beide durch einen Leitungsweg verbinden, will sich dieser Zustandsunterschied ausgleichen, und wir erhalten einen elektrischen Strom. Wenn sich aber elektrische Ströme, wie wir gesehen haben, in Stärke und Richtung unterscheiden können, dann müssen auch die Ursachen für das Zustandekommen von Strom eine Specialisirung nach diesen beiden Seiten zulassen. Und in der That, so oft und in welcher Weise wir auch die Verbindung ausführen, wird stets der Strom im Nutzstromkreis vom Braunstein-Kohlen-cylinder zum Zink fließen, und wir sagen daher, der Kohlen-cylinder bilde den positiven, das Zink den negativen Pol. Hier sehen Sie weiter einige Accumulatoren. (Vgl. Fig. 3, Seite 15.) Jeder einzelne besteht aus zwei verschiedenartigen Theilen, einem dunkelbraunen und einem hellen Plattensatz, deren einer auf Grund seiner Beschaffenheit stets ein höheres Potential besitzt, als der andere, im Verhältniss zu diesem einen positiven Pol bildet.

Gehen wir dazu über, einen Strom auf Grund der Verschiedenheit im elektrischen Zustande zweier Stellen zu Stande kommen zu lassen, deren Quelle nicht in so mystischer Weise unseren Blicken verborgen ist, wie bisher. Ich werde einen einzigen Accumulator benutzen und will, um ein Urtheil über die Stärke des Stromes zu ermöglichen, den Stromkreis aus einer Glühlampe und einem Ampèremeter zusammensetzen (Fig. 2). Die Lampe erglöhkt kaum sichtbar; das Instrument zeigt eine Stromstärke von 1—2 Ampère. Wir wollen nun den Stromkreis, statt mit den Polen eines Accumulators, mit den Polen einer Batterie von Accumulatoren verbinden (Fig. 3). Wir sehen jetzt das Ampèremeter eine bei weitem grössere Stromstärke — von 6 Ampère — anzeigen und die Wärmewirkung, welche durch diese 6 Ampère in der

Lampe hervorgebracht wird, ist eine so bedeutende, dass sie jetzt in voller Helligkeit erglüht. Woher kommt das? Es ist eine Bestätigung der Forderung, die wir vorhin aufstellten. Wollen wir durch einen bestimmten Leitungsweg verschiedene Ströme erhalten, so müssen sich bereits die elektrischen Quellen unterscheiden. Als ich vorhin den Leitungsweg mit den Klemmen eines Accumulators verbunden hatte, fand durch den Leitungsweg hindurch der Ausgleich eines bestimmten Unterschiedes im elektrischen Zustande statt. Ich erhalte jetzt einen Strom auf Grund des Ausgleiches der Verschiedenheit des elektrischen Zustandes zweier anderer Stellen. Dieser Ausgleich vollzieht sich jetzt in weit bedeutenderem Maasse, und ich schliesse daraus, dass der Zustandsunterschied zwischen den Klemmen der Accumulatorenbatterie ein grösserer ist als zwischen denen des einzelnen Accumulators. Wenn aber diese Zustandsunterschiede sich von einander dem Grade nach unterscheiden können, wenn dieser Grad für die in einem bestimmten Stromkreis auftretende Stromstärke massgebend ist, so brauchen wir auch hier eine Bezeichnung und ein Maass.

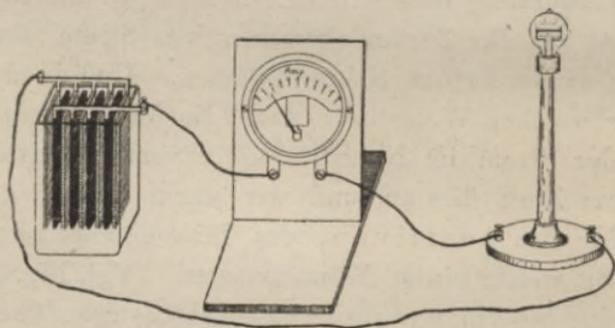


Fig. 3.

Wir nennen den Grad des Unterschiedes im elektrischen Zustande zweier Stellen „Spannung“. Eine Spannung bestand zwischen den Anschlussklemmen, den Polen, und war bestrebt, sich längs des gebotenen Leitungsweges auszugleichen. Dieses Ausgleichbestreben gab sich als elektrischer Strom längs des Weges kund. Von dem Werth der Spannung zwischen den Anschlussklemmen kann ich Ihnen wiederum durch eine Zahlenangabe z. Z. keine Vorstellung geben. Umgekehrt werden die

folgenden Angaben nur den Zweck haben, Sie mit der Maass-einheit für die Spannung vertraut zu machen. Die Maasseinheit hierfür bildet das „Volt“. Der elektrische Zustand der beiden Pole irgend eines galvanischen Elementes differirt z. B. um 1—2 Volt. Die Spannung zwischen den Polen eines einzelnen Accumulators beträgt ungefähr 2 Volt.

Versuchen wir nun, uns darüber Rechenschaft abzulegen, wie durch Vereinigung mehrerer Accumulatoren zu einer Batterie eine gesteigerte Spannung erhalten werden kann.

Wie bereits erwähnt, besteht jeder Accumulator aus zwei wesentlich verschiedenen Hälften, deren Verhältniss es bedingt, dass z. B. bei der getroffenen Aufstellung die rechte Klemme des ersten Accumulators ein um 2 Volt höheres Potential besitzt, als

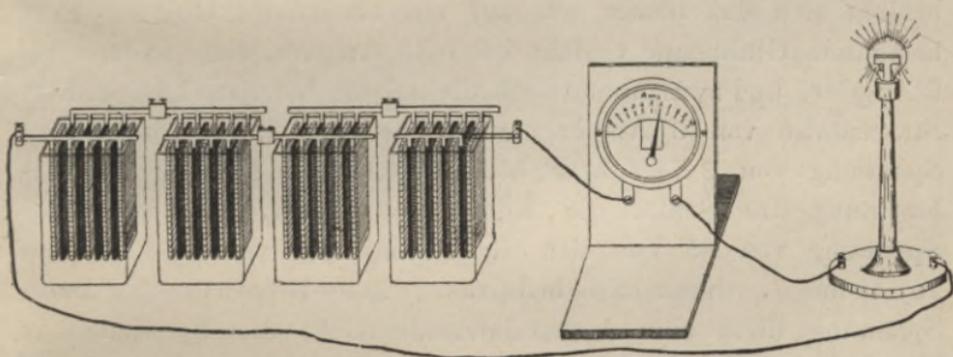


Fig. 3.

die linke, dass zwischen beiden eine Spannung von 2 Volt besteht. Die rechte Klemme des ersten bildet aber die linke des zweiten Accumulators, und auch dieser ist so aufgestellt, dass vermöge der Wirksamkeit seiner Theile die rechte Klemme, seinen positiven Pol bildend, ein um 2 Volt höheres Potential hat, als die linke. Zwischen ihr, der positiven Klemme des zweiten Accumulators und der negativen des ersten besteht somit eine Spannung von 4 Volt, zwischen den äussersten Klemmen der dritten und der ersten Zelle eine Spannung von 6 Volt u. s. w. Eine solche Schaltung von mehreren Elektrizitätsquellen, durch die eine Summirung der von den einzelnen erreichten Spannungen bewirkt wird, heisst „Hintereinanderschaltung“.

Bei unserem vorigen Versuche erzeugten wir durch Hinter-

einanderschaltung von 4 Accumulatoren eine Spannung von 8 Volt, welche durch die eingeschaltete Glühlampe einen Strom von ungefähr 6 Ampère hervorbrachte, eine Stromstärke, die erforderlich war, um die Lampe hell erglühen zu lassen. Diese Thatsache scheint einer früher gemachten Bemerkung zu widersprechen. War doch vorhin davon die Rede, dass eine Glühlampe etwa nur $\frac{3}{4}$ Ampère brauche, und jetzt beobachten wir, dass diese Lampe erst bei einer Stromstärke von 6 Ampère erglüht. Der Grund hierfür liegt in der verschiedenartigen Construction der beiden Glühlampen. Die eine ist derart construirt, dass sie bereits bei 0,85 Ampère erglüht, die andere aber so, dass ihr eine Stromstärke von 6 Ampère zugeführt werden muss, um sie erglühen zu lassen. Wenn wir als Hauptresultat geben können, dass die Stromwirkung durch Stromstärke und Stromrichtung eindeutig bestimmt ist, so bezieht sich das immer nur auf ein bestimmtes Object. Eine bestimmte Glühlampe erglüht bei 0,85 Ampère, eine andere bei 6 Ampère, und zwar nimmt sich die zuletzt benutzte Lampe diese Stromstärke von 6 Ampère, wenn zwischen ihren Enden eine Spannung von 8 Volt herrscht, während die Lampen zur Erleuchtung des Saales die Eigenschaft haben, erst bei einer Spannung von 65 Volt sich die Stromstärke von 0,85 Ampère zu nehmen, deren sie bedürfen. Zur Unterhaltung dieser Spannung dient eine Accumulatorenatterie, die 33 Zellen in Hintereinanderschaltung enthält. In Beleuchtungsanlagen pflegt man im Allgemeinen mit Spannungen von 65 oder 110 Volt zu arbeiten und hat eine dementsprechende Lampensorte zu verwenden.

Wenn wir nunmehr das bisher Gesagte nochmals kurz zusammenfassen, so haben wir eine Reihe von Vorgängen kennen gelernt, die wir als Wirkungen des elektrischen Stromes aufgefasst haben: Wärmewirkungen, magnetische, chemische Wirkungen. Alle diese Wirkungen finden in der Technik ausgedehnte Verwendung. Die magnetische Wirkung haben wir an Messinstrumenten verwandt gefunden; wir werden ihr bei dem Elektromotor, der Dynamomaschine, im Signalwesen begegnen. Wir erkennen die Wärmewirkung des Stromes im Glühlicht, die chemische Wirkung in der Galvanoplastik und Galvanostegie. Die Wirkungen des Stromes an einem bestimmten Object konnten dem Grade nach

sich unterscheiden, die Ursache war eine Verschiedenheit in der Stromstärke. Die Maasseinheit führte den Namen Ampère. Der Verlauf der Wirkung konnte sich der Richtung nach unterscheiden; die Ursache war eine verschiedene Stromrichtung. Wir bezeichneten als Stromrichtung die Richtung, in der bei einer Elektrolyse das niedergeschlagene Metall wandert. Diejenige Stelle, von der der Strom nach der anderen Seite lief, nannten wir den positiven Pol, die andere den negativen Pol. So war bei dem erwähnten Element der Kohlepol der positive. Wir haben weiterhin gesehen, dass die Ursache für das Zustandekommen eines Stromes in dem Ausgleichsbestreben verschiedener Zustände, verschiedener Potentiale, in einer Spannung zwischen den Enden der Leitung besteht. Diese Spannung konnte wieder dem Grade nach verschieden sein. Wir hatten eine Maasseinheit für sie nothwendig, und diese Einheit war das Volt. Wir sahen hierbei, dass für einen gegebenen Leitungsweg die Stromstärke bestimmt ist, wenn zwischen seinen Enden eine bestimmte Spannung dauernd unterhalten wird. In welcher Eigenschaft aber eines bestimmten Leitungsweges — z. B. einer Glühlampe — es begründet ist, dass sie als Ausgleich einer gegebenen Spannung — z. B. 65 Volt — eine bestimmte Stromstärke — in diesem Falle ungefähr $\frac{3}{4}$ Ampère — zu Stande kommen lässt, mit dieser Frage uns zu beschäftigen, wird eine der Aufgaben der nächsten Vorlesung sein.

Zweiter Vortrag.

**Widerstand (Ohm). Chemische Wirkungen des Stromes.
Galvanostegie. Accumulatoren. Elemente.**

Wir haben gesehen, dass für den Grad der eintretenden elektrischen Wirkung die Stärke des Stromes, die Zahl der Ampère, maassgebend war. Die Stromstärke, die auf Grund des Ausgleichsbestrebens einer bestimmten Spannung durch einen gegebenen Weg hindurch zu Stande kam, war ihrerseits von der Grösse dieser Spannung abhängig. Wenn z. B. zwischen den beiden Anschlussstellen des Experimentirtisches eine Spannung von 65 Volt besteht und ich eine geeignete Glühlampe mit ihnen in Verbindung bringe, so erglüht sie mit einer bestimmten Helligkeit. Würde aber zwischen den beiden Stellen eine höhere Spannung herrschen, so würde auch die Lampe mit einer höheren Helligkeit erglühen, weil dann die Stromstärke, die durch die Lampe fliessen würde, die sich die Lampe gewissermassen nähme, eine grössere wäre.

Er fragt sich nun: welcher Zusammenhang besteht zwischen der Höhe einer Spannung und der durch sie zu Stande kommenden Stromstärke? Ehe wir dieser Frage näher treten können, müssen wir wissen, wie wir überhaupt im Stande sind, Spannungen zu messen. Um Stromstärken zu messen, brauchten wir nur irgend ein Instrument zu benutzen, das verschiedenen starken Strömen den Durchgang gestattete und welches mit einem Zeiger und einer Theilung versehen war, so dass die Theilstriche bei jeder Zeigerstellung die zu deren Hervorrufung erforderliche Stromstärke angaben. Wir hatten ein derartiges Instrument als ein Ampère-

meter bezeichnet. Nun hängt, wie wir gesehen, die auf einem gegebenen Wege zu Stande kommende Stromstärke von der Spannung ab, die zwischen seinen Enden bestand. Als wir nämlich eine Glühlampe zwischen die Pole einmal eines einzigen Accumulators und nachher einer Reihe von vier Accumulatoren eingeschaltet hatten, beobachteten wir, dass, je höher die Zahl der verwendeten Accumulatoren war, je grösser mithin der Zustandsunterschied war, der sich längs der Lampe ausglich, eine desto grössere Stromstärke zu Stande kam. Wir können somit aus der in einem bestimmten Wege eintretenden Stromstärke einen Rückschluss auf die Grösse der Spannung machen, die diese Stromstärke unterhält. Man wird daher in ähnlicher Weise, wie man ein Instrument nach dem Strom, der es durchfloss, aichen kann, ein anderes auch nach der Spannung aichen können, die zwischen seinen Klemmen vorhanden sein muss, um die betreffende Stromstärke durch das Instrument hindurch zu unterhalten.

Ein Instrument, welches durch die Stellung seines Zeigers die in Volt gemessene Spannung angiebt, die zwischen seinen Klemmen besteht — denn die Spannung ist nicht etwas, was in dem Instrument herrscht, wie die Stromstärke, welche hindurchfliesst —, ein solches Instrument führt den Namen „Spannungsmesser“ oder „Voltmeter“.

Es kann nun befremden, dass man auf demselben Princip Instrumente baut, mittelst deren man Grössen wesentlich verschiedener Art messen kann, deren eines eine Angabe in Ampère, deren anderes eine Angabe in Volt enthält. Es lässt sich zeigen, dass diese Schwierigkeit eigentlich nicht besteht, und dass wir auf anderen Gebieten ähnliche Verhältnisse haben. Ein Analogon, das verständlicher ist, weil es einem bekannteren Gebiete zugehört, bietet das Aräometer. Die Tiefe, bis zu der ein schwimmender Körper in eine Flüssigkeit eintaucht, hängt bekanntlich von deren specifischem Gewicht ab. Je geringer das specifische Gewicht der Flüssigkeit, um so tiefer sinkt das Aräometer ein. Es lässt sich daher eine Theilung darauf anbringen, welche besagt, welches specifische Gewicht einem Einsinken des Aräometers bis zu der betreffenden Marke entspricht, und das Instrument gestattet so die Messung specifischer Gewichte. Man kann aber ein solches Instrument auch für andere Zwecke benutzen.

In ähnlicher Weise, wie die Stromstärke von der Spannung abhängig ist, die sie hervorbringt, hängt das specifische Gewicht einer Lösung, z. B. von Alkohol in Wasser, von deren Procentgehalt ab. Daher kann man, indem man ein Aärometer in Spiritus eintauchen lässt, indirect einen Rückschluss auf dessen Procentgehalt machen und kann das Instrument mit einer Theilung versehen, welche nicht nach specifischem Gewicht, sondern nach Procentgehalt Spiritus fortschreitet. Man erhält so ein Alkoholometer. Analog nun, wie man im Stande ist, mit einem solchen Alkoholometer, welches streng genommen das specifische Gewicht einer Lösung angiebt, einen Rückschluss auf deren Zusammensetzung zu machen, in ähnlicher Weise sind wir im Stande, mit Hilfe eines Voltmeters, das streng genommen nur auf die Stromstärke anspricht, die durch das Instrument fliesst, einen Rückschluss auf die Spannung zu machen, welche zwischen den Enden des Apparates herrscht. Sobald ich die Enden des Voltmeters mit den Anschlussstellen des Tisches in Verbindung setze, stellt sich der Zeiger auf eine bestimmte Stelle ein, welche der Zahl 65 entspricht; auf die nämliche Stelle hat sich der Zeiger in der Fabrik, aus der das Instrument hervorgegangen ist, eingestellt, als zwischen seinen beiden Klemmen eine Spannung bestand, von der man wusste, dass sie 65 Volt betrug.

Wir besitzen somit ein Maass für die Spannung und haben das Mittel kennen gelernt, es anzuwenden. Kehren wir nun, ohne auf die constructiven Einzelheiten des Baues der Voltmeter einzugehen, zu der Frage zurück, welche Beziehungen bestehen zwischen Spannung und der Stromstärke, die sie in einem bestimmten Wege hervorbringt. Diese Beziehung ist, wenn wir immer denselben Weg für den Ausgleich haben, im Allgemeinen eine überaus einfache: Die Stromstärke ist in diesem Falle der Spannung direct proportional, d. h. wächst die Spannung zur doppelten Grösse an, dann verdoppelt sich auch die Stromstärke; wird die Spannung verdreifacht, dann erhöht sich auch die Stromstärke auf das Dreifache u. s. w. Diese Beziehungen allein genügen aber noch nicht für alle Fälle, wir müssen uns vielmehr noch mit der Frage beschäftigen, wie liegen die Verhältnisse, wenn sich eine bestimmte Spannung, also etwa eine solche von 65 Volt, auf verschiedenen Wegen auszugleichen

sucht? Wird auch dann unter allen Umständen die gleiche Stromstärke zu Stande kommen? Wir bedürfen keines neuen Experiments, um diese Frage zu beantworten. Die Antwort ist bereits in den Versuchen des letzten Vortrags gegeben. Wir erinnern uns, dass alle Versuche, die wir zu beobachten Gelegenheit hatten, durch Ströme zu Stande kamen, hervorgebracht als Ausgleich der Zustandsverschiedenheit der zwei Stellen am Tische, und dabei hatte dieselbe, abgesehen von den ersten Versuchen, wo wir mit wechselnden Spannungen arbeiteten, jederzeit den gleichen Werth von 65 Volt. Als diese 65 Volt Gelegenheit fanden, sich durch den in der Bogenlampe gebotenen Weg auszugleichen, brachten sie eine Stromstärke von 8 Ampère hervor. Als die nämlichen 65 Volt sich durch die Glühlampe hindurch ausglich, erzeugten sie eine Stromstärke von nur 0,85 Ampère. Und wenn die nämliche Spannung von 65 Volt Gelegenheit hat, sich auf demjenigen Wege auszugleichen, der durch den Kronleuchter des Hörsaales geboten ist, so thut sie es mit einer Stromstärke von 15,3 Ampère. Wollte ich aber den 65 Volt gestatten, sich durch meinen Körper auszugleichen, so würden sie das mit einer Stromstärke thun, die wir höchstens nach Tausendsteln von Ampère, nach Milliampère, bemessen könnten. Woher kommt es nun, dass der Ausgleich ein und derselben Spannung mit so verschiedener Intensität erfolgt, d. h. Ströme von so verschiedenen Stärkegraden hervorruft, wenn er auf verschiedenartigen Wegen stattfindet? Die Ursache liegt in einer bestimmten Eigenschaft dieser Wege, welche mit der Arbeit zusammenhängt, die der Strom verrichten muss, wenn er den betreffenden Körper durchfließt. Jeder Körper, durch welchen ein elektrischer Strom fließt, wird durch denselben erwärmt, und in den meisten Fällen besteht die erwähnte Arbeit ausschliesslich in der Erwärmung des betreffenden Körpers. Die Ursache, welche für das Zustandekommen einer bestimmten Stromstärke als Ausgleich einer bestimmten Spannung zwischen den Enden des betreffenden Körpers maassgebend ist, erblicken wir im Allgemeinen in derjenigen Eigenschaft, welche wir als den „elektrischen Widerstand“ des betreffenden Körpers bezeichnen. Ebenso, wie wir ja auch mit einer gegebenen Kraft eine um so grössere Geschwindigkeit hervorzubringen im Stande sind, je geringer der Wider-

stand ist, der sich der Bewegung entgegensetzt, bringen wir mit einer gegebenen Spannung eine um so grössere Stromstärke hervor, je geringer der Widerstand ist, den der Körper dem Durchgang eines elektrischen Stromes entgegensetzt. So fliesst das Wasser unter einem gegebenen Ueberdruck mit um so grösserer Heftigkeit durch eine Leitung, einen je geringeren mechanischen Widerstand sie der Bewegung bereitet. Wir sagen jetzt, dass der Widerstand der zu einem Kronleuchter angeordneten 18 Glühlampen, die ja als Ausgleich der Spannung von 65 Volt einen Strom von etwa 15,3 Ampère zu Stande kommen liessen, bei weitem kleiner ist, als der Widerstand der einzelnen Lampe, die bei dem Ausgleich dieser Spannung einen Strom von 0,85 Ampère zu Stande kommen liess. Es hat sich als nothwendig erwiesen, auch für den Widerstand ein Maass einzuführen. Seine Einheit führt den Namen des „Ohm“.

Somit haben wir als dritten Begriff den des Widerstandes und als seine Einheit das Ohm kennen gelernt. Die Maasse Ampère, Volt und Ohm, deren wir uns künftig bedienen wollen, sind internationaler Art. Sie sind auf zwei internationalen Congressen zu Anfang der 80er Jahre in Paris vereinbart, aber der Gedankengang, der dem Aufbau des Systems zu Grunde liegt, ist weit älteren Ursprungs. Er wurzelt in den Arbeiten eines Gauss und Weber, in Arbeiten, die bis in die 30er und 40er Jahre unseres Jahrhunderts zurückdatiren. Man hat die Einführung dieses Maasssystems nicht vorübergehen lassen, ohne einigen um die Entwicklung der Elektrizitätslehre hervorragend verdienten Männern verschiedener Nation ein Denkmal zu setzen. So erinnern die Namen Ampère, Volt, Ohm an die drei grossen Physiker Ampère, Volta und Ohm.

Gehen wir nun dazu über, uns auch eine bestimmte Vorstellung von der Grösse eines Ohm zu bilden, so wollen wir mit hohen Widerständen anfangen und von vornherein bemerken, dass der Widerstand des menschlichen Körpers Tausende, ja Zehntausende von Ohm beträgt. Sie werden es dann begreiflich finden, dass der Strom, der als Ausgleich der Spannung von 65 Volt durch den menschlichen Körper hindurchfliesst, nur nach Milliampère zu bemessen ist. Der Widerstand, den die einzelne brennende Glühlampe besitzt, beträgt bei der hier gewählten

Lampensorte ungefähr 80 Ohm; dagegen verwendet man an anderen Stellen auch Lampensorten mit geringerem Widerstande, oder auch solche mit höherem. Der Widerstand, wie ihn die einzelne Zuleitung besitzt, muss ein überaus kleiner sein, und darum beträgt der Widerstand in der Leitung, die von dem Maschinenraum nach unserm Kronleuchter und zurück führt, etwa $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{15}$ Ohm.

Fragen wir uns nunmehr, wovon hängt denn der Widerstand eines bestimmten Körpers ab, warum ist der Lampenwiderstand gerade 80 Ohm, so geht es hiermit wie mit den anderen physikalischen Eigenschaften. Sie wurzeln einestheils in den Dimensionen — hier der Länge, dem Querschnitt des betreffenden

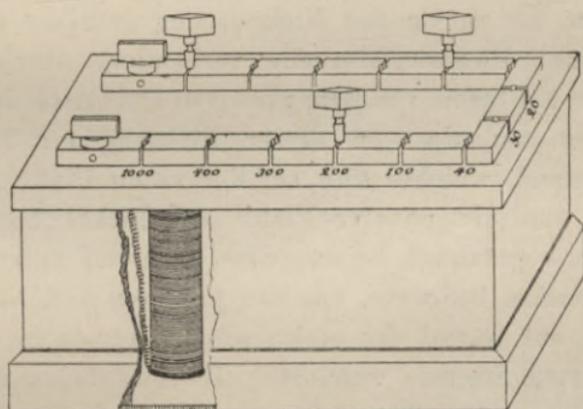


Fig. 4.

Körpers —, sie wurzeln anderentheils in dem Material, aus dem der Körper besteht. Von allen technisch verwerthbaren Materialien ist reines Kupfer dasjenige, das auf ein gegebenes Stück den geringsten Widerstand besitzt, und darum verwenden wir für elektrische Leitungen fast ausschliesslich das Kupfer. Wie man sich eines Gewichtssatzes zum Bestimmen verschiedener Massen zu bedienen hat, so muss sich der Elektriker und Physiker zur Messung unbekannter Widerstände bestimmter Sätze von Drahtrollen bedienen, welche einen bekannten Widerstandswert besitzen. Wir sehen hier einen solchen Widerstandsatz, oder „Rheostat“, vor uns (Fig. 4). Durch Ziehen von Verbindungsstüpseln zwingen wir den Strom, seinen Weg durch die zwischen den Klötzen befindlichen Spulen zu nehmen, welche aus Draht von ver-

schiedenen Dimensionen bestehen und so Widerstandswerte von 1000, 400, 300, 100 u. s. w. Ohm darstellen.

Versuchen wir uns nun die Beziehungen zwischen der Art des Weges, auf dem sich eine Spannung ausgleicht, dem Widerstand des Weges und der zu Stande kommenden Stromstärke durch Versuche klar zu machen. Ich benutze hierzu einen Vorgang, der uns auch noch von einem anderen Gesichtspunkte aus interessiren wird. Wir wollen nämlich, ausgerüstet mit den drei Grundbegriffen Stromstärke, Spannung und Widerstand, gleich zu einer Betrachtung der einzelnen Wirkungen des elektrischen Stromes übergehen, welche in der Technik eine besonders wichtige Verwendung finden, und wollen hierbei mit der chemischen Wirkung des Stromes beginnen. Sie erinnern sich, dass, als wir zwei Metallplatten, die in ein mit Nickellösung gefülltes Gefäss tauchten, mit einer Elektrizitätsquelle verbanden, durch diese Verbrauchsstelle ein Strom von dem positiven Pole nach dem negativen Pole hinfluss und dass in dieser Richtung ein Transport des Metalls stattfand, welches sich auf der einen Platte niederschlug. Hätten wir nun die positive Platte aus Nickel bestehen lassen, so würden wir gefunden haben, dass, während sich die negative Platte mit Nickel bedeckte, von der positiven sich Nickel ablöste, dass Nickel auf Grund des elektrischen Stromes in der Richtung des zugeführten Stromes wanderte. Zwei zunächst nur als Elektrizitätsquellen aufgestellte Accumulatoren erhalten zwei Punkte fortgesetzt in verschiedenem elektrischen Zustande (Fig. 5); sie sorgen dauernd dafür, dass von ihren Polen ausgehende Kupferdrähte jederzeit sich in verschiedenem elektrischen Zustande befinden, und zwar beträgt, wie das Voltmeter besagt, die Verschiedenheit dieser Zustände etwa 4 Volt. Zwischen den Kupferdrähten, die von den Accumulatoren ausgehen, herrscht also eine Spannung von ungefähr 4 Volt. Beachten wir aber wohl, diese 4 Volt drücken nicht eine Eigenschaft des einen Drahtes oder eine Eigenschaft des anderen Drahtes aus, sondern sie bezeichnen eine Differenz, eine Spannung, welche zwischen den beiden Drähten besteht. Der eine Draht, welcher an den positiven Pol angeschlossen ist, führt nun zu einem Instrumente, unserem bereits bekannten Ampèremeter, ein eventueller Strom kann hindurch fließen und gelangt dann zu einer Messingstange. Hieran hängen zwei Platten

von Nickel und tauchen in eine mit Nickellösung gefüllte Wanne. Der andere Draht führt an eine zweite, vorläufig leere Stange. Die beiden Stangen sind jetzt in verschiedenem elektrischem Zustande. Zwischen ihnen besteht Spannung, aber diese Spannung kann sich nicht ausgleichen, sie kann keinen elektrischen Strom hervorbringen, weil es an einem Weg für einen

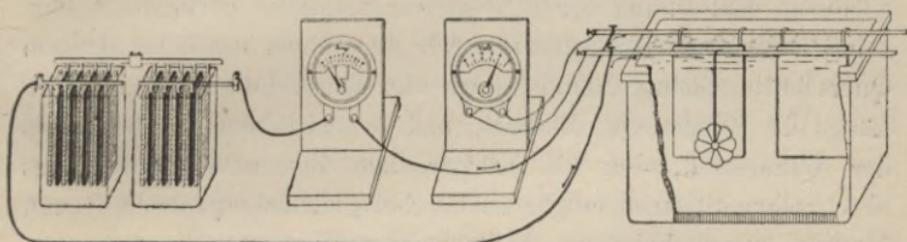


Fig. 5.

solchen zur Zeit noch fehlt. Hängen wir nun an die zweite Stange eine Lichtmanschette so auf, dass sie in das Innere des Bades, in die Lösung, eintaucht, so wird dadurch für einen elektrischen Strom als Ausgleich der Spannung ein Weg geschaffen, und wir sehen, dass in dem Moment des Eintauchens ein Strom zu Stande kommt. Der Zeiger am Ampèremeter schlägt aus und

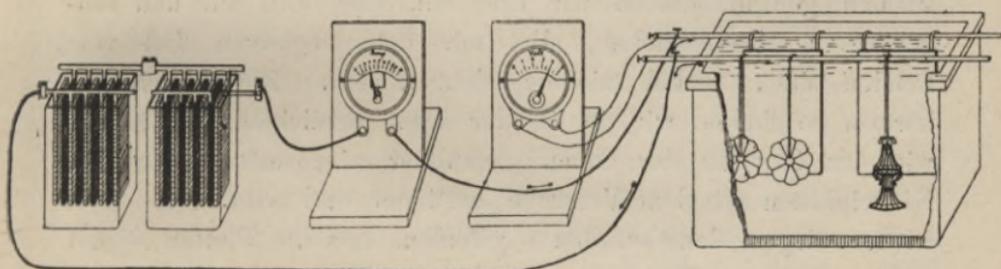


Fig. 6.

sagt uns, dass die auftretende Stromstärke $\frac{1}{2}$ Ampère beträgt (Fig. 5). Ich lasse eine zweite Manschette in ähnlicher Weise eintauchen, und wir sehen die Stromstärke sich ändern. Senken wir einen Leuchter ein, so ist eine weitere Stromstärke-Steigerung auf 3 Ampère bemerkbar (Fig. 6). Je mehr Körper wir hineinhängen, eine um so grössere Fläche bietet sich der Spannung zum Ausgleich, ein um so breiterer Weg dem resultirenden Strome. Was für andere Bewegungen gilt, gilt auch für den

elektrischen Strom: je breiter der Weg, desto geringer der Widerstand, der sich dem Ausgleich einer bestimmten Spannung bietet, und desto grösser die Stromstärke des Ausgleichs einer gegebenen Spannung. Wir erkennen somit, dass der Widerstand eines bestimmten Leitungsweges von seinem Querschnitt abhängt und um so geringer ist, je grösser der Querschnitt. Wenn wir auf eine gegebene Entfernung einen Weg von möglichst geringem Widerstand haben wollen, so müssen wir ihm einen möglichst grossen Querschnitt geben. Aehnlich, wie der Querschnitt, ist auch die Länge des Weges von Einfluss, und es zeigt sich hierbei, dass der Widerstand, den ein Körper dem Zustandekommen eines elektrischen Stromes entgegensetzt, bei gleichem Querschnitt und Material um so höher ist, je länger der Weg ist, den er in dem betreffenden Leiter zu durchlaufen hat.

Mit diesen Betrachtungen können wir die einleitenden Bemerkungen über den elektrischen Strom, über die Grundbegriffe und über ihre gegenseitigen Beziehungen als abgeschlossen betrachten und können uns nunmehr einer specielleren Betrachtung der elektrochemischen Vorgänge zuwenden.

Es ist jetzt einige Zeit hindurch ein Strom von ungefähr 3 Ampère durch das Bad gegangen. Nach dem, was wir bereits kennen gelernt, dürfen wir erwarten, dass sich auf den eingehängten Gegenständen, die mit dem negativen Pol verbunden sind, Nickel niedergeschlagen hat. Ziehen wir sie heraus, so finden wir sie in der That vernickelt, und hätten wir das Gewicht der ihnen gegenüber eingesenkt gewesenen Nickelplatten vor dem Versuche bestimmt und würden sie jetzt wieder wiegen, dann würden wir finden, dass die Platten Nickel verloren haben, während die eingehängten Waaren ebenso viel an Gewicht gewonnen haben. Von dieser Wirkungsart des elektrischen Stromes macht man eine ausgiebige Verwendung. Die Vernickelung, Versilberung, Vergoldung, Verkupferung u. s. w. stellt ja in der Galvanostegie ebenso wie die Galvanoplastik ein überaus reiches Anwendungsgebiet dar. Aber auch bei der Reinmetallgewinnung hat man vielfach von diesem Verfahren Gebrauch gemacht, da diese Gewinnungsweise der Metalle aus ihrer Lösung ein besonders reines Produkt liefert. So wird das Kupfer, das ja für den Elektriker von besonderem Interesse ist, vielfach auf diese

Weise, d. h. „elektrolytisch“ dargestellt. Wenn wir den beobachteten Vorgang messend verfolgten, so würden wir finden, dass der Nickelniederschlag um so stärker wird, je länger wir den Strom durchleiten und je stärker der durchgehende Strom ist. Wenn es sich darum handelt, möglichst grosse Mengen niederzuschlagen, so werden wir mit Elektrizitätsquellen arbeiten müssen, welche ausserordentlich starke Ströme geben und die Maschinen, welche z. B. unter Ausnutzung der Wasserkräfte des Rheines in Neuhausen zur Gewinnung von Aluminium auf elektrischem Wege verwendet werden, arbeiten mit Stromstärken, die nach Tausenden von Ampère messen. Bei dieser Gewinnung von Metallen ist man nicht immer auf die Benutzung einer wässerigen Lösung angewiesen; man ist soweit gekommen, auf elektrolytischem Wege Metalle aus feurig-flüssigem Zustande niederzuschlagen, und zwar bietet hier die Elektrizität selbst die Hilfsmittel, die Erze in den feurig-flüssigen Zustand überzuführen, wie es z. B. bei der bereits erwähnten Aluminiumgewinnung geschieht.

Erinnern wir uns nunmehr der Rolle der elektrochemischen Wirkung des elektrischen Stromes in der ersten Vorlesung, so fällt uns auf, dass die elektrochemische Wirkung eine solche ist, welche von der Richtung des verwendeten Stromes abhängt; je nachdem, ob ich den Strom in der einen oder anderen Richtung einführe, wird das Nickel nach der einen oder anderen Seite wandern. Wir werden im Allgemeinen finden, dass diejenigen Wirkungen des elektrischen Stromes, welche von der Richtung desselben abhängig sind, ihrerseits die Ursache für das Zustandekommen eines elektrischen Stromes bilden, wenn sie auf anderem Wege entstehen. Wir sind nicht nur im Stande, durch den elektrischen Strom chemische Prozesse hervorzurufen, wir sind umgekehrt auch im Stande, durch chemische Prozesse einen elektrischen Strom zu erzeugen.

Betrachten wir eine besondere Abart der elektrochemischen Vorgänge. Ein Glasgefäss ist mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt. Ich benutze weiter mehrere Streifen metallischen Bleies, welche von demselben Stück geschnitten sind und sich in nichts von einander unterscheiden, und tauche sie in die Schwefelsäure ein: Platten von demselben Blei in dieselbe Säure (Fig. 7). Wir dürfen nicht erwarten, dass dieselben sich durch irgend welchen Zustand

unterscheiden, und werden Sie daher nicht verwundert sein, dass, wenn ich diese beiden Platten durch eine Leitung mit einem kleinen Glühlämpchen verbinde, kein Strom durch das Glühlämpchen fließt. Diese Platten stimmen eben in allen irgendwie denkbaren Eigenschaften miteinander überein. Unter Vermittelung der eintauchenden Platten schicken wir jetzt einen elektrischen Strom durch das Gefäß, von dessen Vorhandensein wir uns durch ein eingeschaltetes Ampèremeter überzeugen. Wir beobachten einen Ausschlag, der uns besagt, dass der Strom z. Z. 10 Ampère beträgt. Wir lassen diesen Strom von 10 Ampère eine Minute durch die Zelle hindurchgehen. Wir beobachten ein Brausen, es tritt eine Zersetzung der Schwefelsäure ein und die Zersetzungs-

produkte treten an den beiden Polen in Beziehung zu den Bleiplatten. Die Folge davon ist, dass die Bleiplatten, welche ursprünglich vollständig gleicher Natur waren, nunmehr in einen chemisch verschiedenen Zustand übergehen. Ziehen wir daher nach

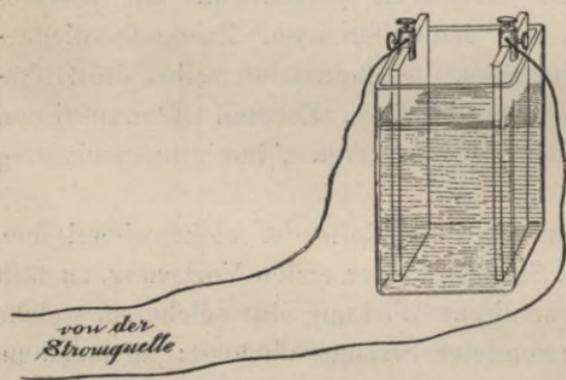


Fig. 7.

Unterbrechung des Stromes die Platten heraus, so finden wir, dass sie ein verschiedenes Aussehen angenommen haben. Die eine hat ihr vorheriges Aussehen kaum verändert, die andere aber hat sich mit einer bräunlichen Schicht überzogen (vgl. Fig. 8). Die beiden Platten stimmen somit in ihrem chemischen Zustande nicht mehr miteinander überein, und wenn ich jetzt diese beiden Platten in der Schwefelsäure belasse, so unterscheiden sie sich auch durch ihren elektrischen Zustand: Die mit der bräunlichen Schicht überzogene bildet gegenüber der grau gebliebenen einen positiven Pol. Bringen wir nun die Enden dieser Platten in Verbindung mit den Klemmen des Glühlämpchens, welches ausser aller Verbindung mit jedweder anderen Elektrizitätsquelle ist, so nehmen wir wahr, dass das Lämpchen in's Glühen geräth (Fig. 8). Wir haben also durch Einleitung des elektrischen Stromes in unserm

Apparat, bestehend aus Bleiplatten, eingetaucht in verdünnte Schwefelsäure, die betreffenden Platten in von einander verschiedenen Zustand übergeführt, und als wir der Verschiedenheit des chemischen Zustandes Gelegenheit boten, sich auszugleichen, brachte sie einen elektrischen Strom zu Stande, der seinerseits das Lämpchen erglühen liess. Aber wir bemerkten, dass die Zeitdauer des so gelieferten elektrischen Stromes eine verhältnissmässig kurze war: bald erlosch das Lämpchen. In der That war aber auch die Ursache eine begrenzte gewesen. Wir hatten ja nur während der Dauer einer Minute einen Strom durchgeleitet;

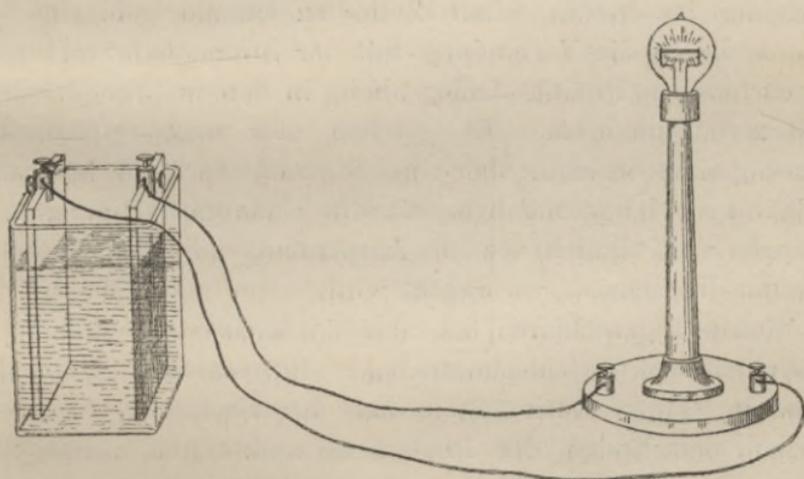


Fig. 8.

die Lampe würde länger haben erglühen können, wenn wir statt einer Minute den elektrischen Strom eine Stunde oder noch länger durch die Zelle geleitet hätten.

Was wir hier zu sehen Gelegenheit hatten, ist das Modell eines Accumulators. Durch den Strom werden die Bleiplatten in chemisch und elektrisch verschiedene Zustände übergeführt, eine Elektrolyse ähnlicher Art, wie wir sie unlängst kennen lernten, als die eine Kupferplatte sich mit Nickelüberzug bedeckte, die andere aber von Nickel freiblieb. Geben wir jetzt der Spannung zwischen den beiden Platten Gelegenheit, sich in Gestalt eines elektrischen Stromes auszugleichen, dann verschwindet durch diesen umgekehrt die Verschiedenheit des Zustandes: es verläuft derjenige Prozess, welcher die Ursache für das

das Hervorbringen eines verschiedenen Zustandes abgab, wieder rückgängig, und wenn wir den Prozess bis auf den Schluss fortsetzen könnten, würden die Bleiplatten wieder in ihren ursprünglichen Zustand zurückkehren. Wir haben einen Vorgang ähnlich dem der Anspannung einer Feder. Durch Aufwendung einer bestimmten Arbeit wird eine Feder gespannt. Erhält die gespannte Feder Gelegenheit, ihrerseits Arbeit zu leisten, etwa einen Bolzen vorwärts zu schnellen, so vollzieht sich der Prozess umgekehrt; indem sie durch ihre rückgängige Bewegung den Bolzen vorwärts treibt, kehrt die Feder in den ursprünglichen Zustand zurück. Durch den elektrischen Strom hatten wir einen Vorgang, eine Zersetzung im Innern einer Zelle zu Stande gebracht. Wir trennten darauf die Verbindung mit der Stromquelle und gaben dem chemischen Produkt Gelegenheit, in den ursprünglichen Zustand zurückzukehren. Es geschah dies unter gleichzeitiger Lieferung eines Stromes, aber eines Stromes von einer bestimmten Zeitdauer, so lange nämlich, bis die chemische Differenz aufgebraucht war, ähnlich wie die Anspannung der Feder beim Abschneiden des Bolzens verbraucht wird.

Welche Eigenschaften hat nun ein solcher Accumulator vom rein elektrischen Gesichtspunkte aus? Ein einzelner Accumulator beruht in seiner Wirksamkeit auf der Spannung, welche er zwischen den Enden der Platten zu unterhalten vermag; wir nennen diese seine „elektromotorische Kraft“. Wir können nun irgend einen Accumulator nehmen: sobald derselbe in der gleichen Weise zusammengesetzt ist, wie das benutzte Modell, so mag er eine Form, eine Grösse haben, welche er wolle, seine elektromotorische Kraft wird jederzeit dieselbe sein. Sie hängt lediglich von der Natur des sich abspielenden chemischen Prozesses ab, und dieser ist von der Form, die zufällig den betreffenden Platten gegeben ist, unabhängig. Für jedweden solchen Accumulator beträgt die Spannung, welche er unterhalten kann, ungefähr 2 Volt. Ob er nun im Stande ist, ein kleines Glühlämpchen eben aufleuchten zu lassen, oder wie derjenige, der zur Beleuchtung unseres Hörsaales dient, Tage lang diese Arbeit zu leisten vermag: die elektromotorische Kraft, die höchste Spannung der einzelnen Zelle, beträgt 2 Volt. Hingegen können sich Accumulatoren durch die Strommenge unterscheiden,

welche sie aufzuspeichern vermögen; mit einer Aufspeicherung von Energie haben wir es nämlich hier im Grunde genommen zu thun. Sie sahen, dass das benutzte Modell im Stande war, ein Lämpchen, welches einen Strom von einem Ampère bedarf, kaum eine Minute lang mit Strom zu versehen, und wir würden zu sagen haben, dass dieser Accumulator eine Strommenge von ungefähr einer „Ampère-Minute“ aufgespeichert hatte. Jede der Zellen, die wir bei unserm früheren Versuch benutzten, ist im Stande, Strommengen von etwa 40 „Ampère-Stunden“ aufzuspeichern.

Wodurch unterscheidet sich nun der Accumulator der Technik von unserem rohen Modell? Wenn wir an einen Accumulator die Aufgabe stellen, eine möglichst grosse Aufnahmefähigkeit, eine möglichst grosse „Capacität“ zu besitzen, so wird er über einen möglichst grossen Vorrath an wirksamer Masse verfügen müssen. Man hat gelernt, Accumulatoren in anderer Weise herzustellen, als dass man einfach metallische Bleiplatten nimmt und sie in der veranschaulichten Weise der Stromwirkung aussetzt. Würden wir nämlich das benutzte Modell ein zweites Mal nach der Entladung verwenden, so würden wir eine gesteigerte Leistungsfähigkeit bemerken können. Durch die vorgenommene Ladung und Entladung ist das feste metallische Blei in loseren Zustand übergegangen, wodurch es für eine Wiederholung des Prozesses in höherem Maasse befähigt, „wirksam“ geworden ist. Diesen Zustand pflegt man als „formirt“ zu bezeichnen. Man stellte früher den Accumulator aus metallischem Blei her und schickte Wochen und Monate lang abwechselnd ladend und entladend Ströme hindurch. Man bewirkte so eine allmähliche Auflockerung des Bleies und erhielt eine wirksame Schicht von bestimmter Tiefe. Dieser Prozess kann durch Erzeugung der wirksamen Schicht auf chemischem Wege abgekürzt werden. Man macht die Accumulatorplatten heutzutage vielfach nicht mehr aus massivem Blei, sondern aus einem Gitterwerk von Blei, in dessen Hohlräume man als wirksame Substanz gewisse Bleiverbindungen einknetet. Sie sehen hier Accumulatorplatten verschiedener Form vor sich, theils den rohen Bleikern, theils mit eingekneteter Masse und formirt (Fig. 9). Das Streben des Constructeurs geht im Allgemeinen

dahin, einen möglichst festen Zusammenhang zwischen festem Bleikern und aufgetragener Masse zu erzielen: darum diese gerieften und geriffelten Platten, ihre Ausbildung zum Gitter oder Doppelgitter, welches die Masse umschliesst. Neben den rohen Gittern und Plattenkernen sehen Sie zwei formirte Platten, die dunkelbraune wirkt als positive, die graue als negative.

Wie wir gesehen haben, beruht die Wirksamkeit des Accumulators auf Rückbildung des chemischen Prozesses. Wir sagten zunächst schlechthin, im Accumulator werde Elektrizität aufgespeichert. Das ist nur eine abgekürzte Redensart; in Wirklichkeit wird beim Laden des Accumulators elektrische Energie

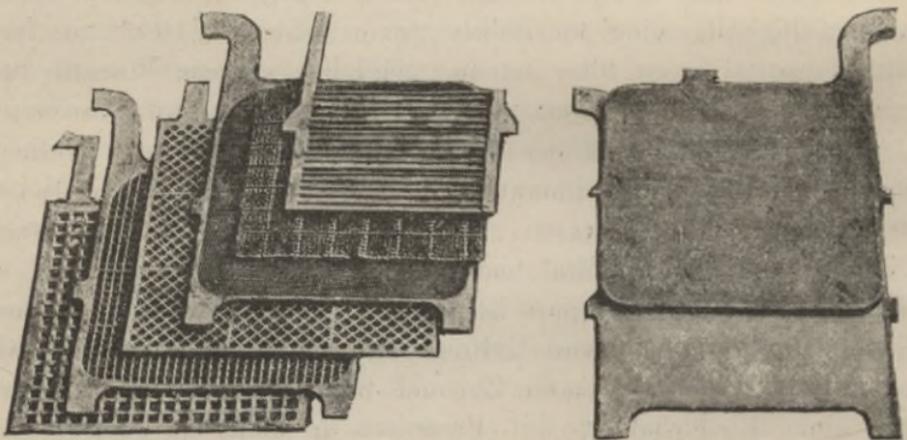


Fig. 9.

in chemische Energie übergeführt, und bei der Entladung chemische in elektrische. Dieser chemische Prozess der Rückbildung, die Thätigkeit des Strom gebenden Accumulators, kommt vermöge der gegenseitigen Berührung der wirksamen Flächen der Accumulatorplatten und der Schwefelsäure zu Stande, und darum ist es wichtig, diesen Berührungsflächen eine möglichst grosse Ausdehnung zu geben. Es wird dann der Prozess um so intensiver vor sich gehen, der Accumulator eine um so höhere Stromstärke geben können. Weiterhin haben wir aber gesehen, dass jeder Körper dem elektrischen Strome einen mehr oder minder grossen Widerstand entgegensetzt. Wenn bei unsern Versuchen zwischen den Enden der Zuleitungsdrähte eine bestimmte

Spannung besteht, so fliesst als Ausgleich der Spannung ein elektrischer Strom durch die Stromquelle und den Zuleitungsdraht. Dazu bedarf es aber auch bereits des Aufwandes einer bestimmten Spannung. Es wird ein bestimmter Bruchtheil der in der Elektrizitätsquelle wirksamen elektromotorischen Kraft erforderlich sein, um den Stromdurchgang durch jeden einzelnen Centimeter des Weges, ja durch die Elektrizitätsquelle selbst zu ermöglichen, und so stets ein bestimmter Betrag lediglich zum Transport der Elektrizität unnütz verwendet werden. Wir haben ein ähnliches Verhältniss wie bei der Locomotive. Auch hier wird nicht die gesammte Kraft auf den Eisenbahnzug übertragen, sondern ein bestimmter Theil der Kraft wird verwendet, um die Locomotive selbst fortzubewegen. Ein bestimmter Bruchtheil der elektromotorischen Kraft eines stromliefernden Accumulators wird bereits verwendet, um den elektrischen Strom durch ihn selbst hindurchzutreiben. Wollen wir also von der wirkenden elektromotorischen Kraft einen möglichst grossen Bruchtheil in dem äusseren Stromkreise, etwa für Beleuchtungszwecke, nutzbar verwenden, so müssen wir darnach trachten, dass auf dem Wege durch den Accumulator nicht allzuviel verloren gehe, dass der Accumulator selbst dem elektrischen Strome einen möglichst geringen inneren Widerstand entgegensetzt. Da wir gesehen haben, dass der Widerstand in einem Accumulator, bestehend aus Bleiplatten, die in eine Flüssigkeit hinabtauchen, um so geringer ist, je grösser der Querschnitt, je grösser die Fläche ist, so erkennen wir, dass es auch aus diesem Grunde vortheilhaft sein wird, dem Accumulator eine möglichst grosse Oberfläche zu geben.

Darum setzt man bei den Accumulatoren der Praxis nicht eine einzige Platte als positive und dieser gegenüber eine einzige andere negative in ein Gefäss, sondern man bringt noch eine zweite positive, daneben wieder eine zweite negative, eine dritte positive und noch eine dritte negative an u. s. f. und verbindet alle negativen einerseits, alle positiven Platten andererseits. Man hat dann die gleichen Verhältnisse, als ob man Platten z. B. von der dreifachen Fläche hätte. So sehen wir, dass die Accumulatoren, die wir bei unserem Versuch benutzten, je 4 positive und 5 negative Platten enthalten, die sich verhältnissmässig nahe gegenüberstehen. (Vgl. Fig. 5 und 6, Seite 25.)

Wir haben gesehen, dass der Accumulator im Stande ist, auf Grund des Umstandes als Stromquelle zu dienen, dass sich die Plattensätze in einem verschiedenen elektrischen Zustande befinden. Wir lassen ihn einen Strom liefern, und damit verschwindet die Verschiedenheit des Zustandes. Gleichzeitig spielt sich aber ein chemischer Prozess ab, und wir erblicken in dem chemischen Prozess das Entgelt für elektrische Energie. Aber dieser chemische Prozess hängt lediglich von der Natur der in Wirksamkeit tretenden Substanz ab, er ist durchaus unabhängig von der Art und Weise, wie diese Substanz entstanden ist. Wenn wir auf irgend einem anderen Wege zwei Bleiplatten mit dem wirksamen Ueberzug bedecken würden, welchen sie hier auf elektrischem Wege erhalten, so würden sie, in Schwefelsäure eingetaucht, in gleicher Weise im Stande sein, einen Strom zu liefern. Wir sind also, um einen Strom zu erhalten, nicht darauf angewiesen, durch vorheriges Einwirkenlassen eines Stromes die Bedingungen zu schaffen, wir können diese Bedingungen auch auf anderem Wege herstellen. So existiren neben den Accumulatoren, den Secundär-Elementen, auch Primär-Elemente, z. B. die Elemente von Bunsen, Leclanché, Meidinger u. s. w. Elemente, welche Flüssigkeiten enthalten, in welche die in chemische Action tretenden, ihrer Natur nach verschiedenen Platten, z. B. Zink und Kohle, hineintauchen, oder Elemente, bei welchen an Stelle der Flüssigkeit eine Gelatinemasse getreten ist, sogenannte Trockenelemente. Diese Elemente beruhen nun zwar im Allgemeinen nicht auf Verwendung von Blei, aber alle haben das eine gemeinsam, dass sie einen Strom auf Grund irgend eines sich in ihrem Innern abspielenden chemischen Prozesses liefern, und unterscheiden sich durch die Natur dieses Prozesses, sowie die Anordnung ihrer Theile. In der Telegraphie, im Signalwesen spielen sie, als die ältesten technisch verwendeten Elektrizitätsquellen, auch heute noch eine bedeutende Rolle, werden aber in der Telegraphie bereits mehrfach durch die Accumulatoren verdrängt.

Dritter Vortrag.

Elektromagnetismus. Telegraph. Telephon.

In unserer Beschäftigung mit speciellen Wirkungen des elektrischen Stromes und deren technischer Verwerthung fortgehend, wollen wir jetzt die magnetische Wirkung betrachten. Führt man über oder unter einer Magnetnadel oder an derselben vorbei einen elektrischen Strom, so wurde die Nadel abgelenkt, und zwar in je nach der Richtung des Stromes verschiedenem Sinne. Diese Wirkung war mithin durch Wechselstrom, d. h. mittels eines Stromes, der in sehr schnell aufeinander folgenden Zeitpunkten, z. B. nach je $\frac{1}{100}$ Secunde, seine Richtung wechselt, nicht zu erzielen. Wir hatten aber die magnetische Wirkung noch in einer zweiten Form kennen gelernt, indem wir den Strom veranlassten, in einer grossen Zahl von Drahtwindungen eine Spule zu durchlaufen. In diese Spule tauchte ein Kern von weichem Eisen, welcher, sobald die Spule vom Strom durchflossen war, trotz der Gegenwirkung einer Spiralfeder, an welcher der Kern aufgehängt war, eingezogen wurde. Diese Wirkung trat stets in gleicher Weise ein, von welcher Richtung wir auch den Strom wählen mochten, und daher war es leicht einzusehen, dass wir diese Wirkung auch erhalten mussten, wenn wir die Richtung des Stromes in schnell aufeinander folgenden Zeitperioden wechselten, wenn wir einen Wechselstrom verwandten.

Beginnen wir zunächst mit einer dieser verwandten Form der Wirkung, welche gleichfalls von der Stromrichtung und damit von der Stromart unabhängig ist. Wir benutzen ein in Hufeisenform,

oder genauer in Form eines U gebogenes Stück weiches Eisen; das Eisen besitzt vorläufig keinerlei magnetische Eigenschaften. Führen wir jedoch einen stromdurchflossenen Draht in einer grösseren Zahl von Windungen um den weichen Eisenkern herum und bringen jetzt ein Stück Eisen — einen „Anker“, wie wir es nennen wollen — an die beiden Enden des Hufeisens, so wird dasselbe mit einer gewissen Kraft, die in diesem Falle aber nicht sonderlich gross ist, festgehalten (Fig. 10). Diese Kraft, der Magnetismus, welchen der weiche Eisenkern annimmt, ist nämlich, einmal von der Stromstärke abhängig, welche durch die Windungen hindurchfliesst (von der Zahl der verwendeten Ampère, die, wie das Ampèremeter verräth, z. Z. $3\frac{1}{2}$ beträgt), sie ist ferner von der Zahl der Windungen abhängig, in welchen der Strom um den Eisenkern herumgeführt wird. Zum Beweis will ich

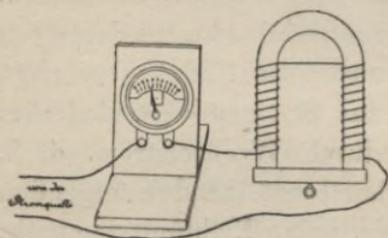


Fig. 10.

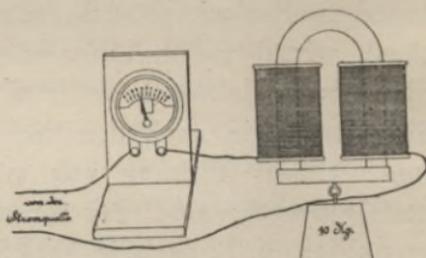


Fig. 11.

jetzt den Strom nicht 20 bis 25 mal um den Kern herumführen, ich will ihn vielmehr mehrere hundert Mal den Eisenkern umkreisen lassen. Da es zu lange aufhalten würde, diese Umwindungen vorzunehmen, bediene ich mich zweier Drahtspulen, welche in genau derselben Weise hergestellt sind, wie ich jene Windungen vollzogen habe. Ich schiebe die Spulen auf, befestige sie und schicke einen Strom hindurch.

Um die bedeutend grössere Kraft des jetzt erzeugten Magnetismus zu zeigen, wollen wir an den Anker ein Gewicht hängen. Der Anker trägt bis zu 10 kg; ein schwereres Gewicht kann er nicht halten. Wir arbeiteten hierbei — wie das Ampèremeter anzeigte — noch immer mit einer Stromstärke von $3\frac{1}{2}$ Ampère. Steigern wir die Stromstärke auf 9 Ampère, so verräth bereits der Ton des Aufschlages beim Anziehen des

Ankers die Steigerung der Wirkung: In der That vermag der Elektromagnet jetzt 20 kg zu tragen. Schalten wir aus, so verschwindet sichtlich mit dem Strome auch der Magnetismus: das getragene Gewicht fällt ab. Aber es würde voreilig sein, zu schliessen, dass das Eisen im Momente des Aufhörens des Stromes den Magnetismus vollständig wieder verloren hätte. Es ist dies nicht der Fall. Schliesse ich den Strom von Neuem, während nur der Anker anliegt, und unterbreche den Strom wieder, so fällt der Anker nicht ab. Jedes Eisen, das einmal magnetisch gewesen ist, behält stets einen bestimmten Rest als sogenannten „remanenten“ Magnetismus zurück. Dieser Rest ist ausserordentlich klein, so klein, dass er für viele Fälle der Praxis vernachlässigt werden kann. Je mehr wir vom gewöhnlichen Eisen zu der speciellen Sorte übergehen, welche man als Stahl bezeichnet, und besonders, wenn wir gehärteten Stahl wählen, um so besser können wir beobachten, dass nach Aufhören des magnetisirenden Stromes ein grosser Bruchtheil, ja fast der gesammte Magnetismus, zurückbleibt. Darum können wir aus Stahl permanente Magnete herstellen, die uns ja von Jugend auf bekannt sind. Merken wir uns nun, dass wir Eisen durch einen herumgeleiteten Strom magnetisiren können, dass dieser Magnetismus um so stärker ist, je grösser erstens die verwendete Stromstärke, zweitens die Zahl der Windungen, je höher — mit einem Ausdruck — das Produkt der Ampère und der Windungen, die Zahl der Ampèrewindungen ist, welche wir verwenden, und dass schliesslich einmal magnetisirtes Eisen nicht wieder in den ursprünglichen Zustand zurückkehrt, sondern einen bestimmten grösseren oder geringeren Rest remanenten Magnetismus behält.

Wenn ich mich zur Demonstration der magnetischen Wirkungen der Tragfähigkeit eines Magneten bediente, so geschah es nicht, weil diese in der Praxis eine ausgedehnte Verwendung findet — man würde sich zum Tragen von Lasten nicht eines Magneten, sondern etwa eines Seiles bedienen, welches in viel ökonomischerer Weise den zu stellenden Anforderungen entspricht —, ich habe diese Form vielmehr nur deshalb gewählt, weil sie mir am geeignetsten erschien, die gradweisen Abstufungen dieser Wirkung zu veranschaulichen. Davon, dass der Grad der Magnetisirung, d. h. die von einem

Elektromagneten auf ein anderes Stück Eisen, den Anker, ausgeübte Kraft von dem Vorhandensein eines Stromes und von dessen Stärke abhängig ist, wird nun in der That in der Technik ein ausgedehnter Gebrauch gemacht.

Da sich der elektrische Strom mit Leichtigkeit über grosse Entfernungen leiten lässt, so bietet er uns in seinen magnetischen Wirkungen ein überaus geeignetes Mittel, auf weithin Zeichen zu geben. Das elektrische Signalwesen, die Telegraphie und Alles, was damit zusammenhängt, beruht fast ausschliesslich auf den magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes.

Wir haben hier einen kleinen Elektromagneten, wie wir den weichen Eisenkern bezeichnen, der mit Windungen versehen ist, durch welche wir Ströme schicken. Seine Windungen stehen durch eine Leitung mit einem Element in Verbindung. Doch kann diese durch einen Ausschalter, der je nach der

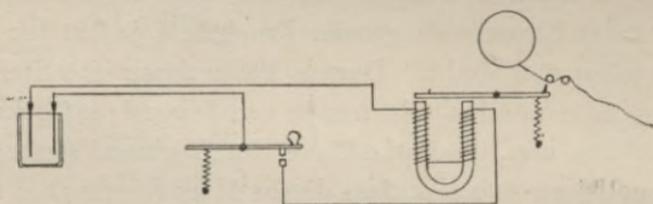


Fig. 12.

Stellung, die man ihm gibt, dem Strom einen Weg bietet oder nicht, in derselben Weise unterbrochen werden, wie man beim Drücken oder Loslassen eines Klingelknopfes einen Stromkreis schliesst oder öffnet (Fig. 12). Im Moment des Stromschlusses wird der Anker angezogen; dieser sitzt an einem Hebelarm, welcher um eine Axe drehbar ist. Geht der Anker herab, so geht das andere Ende in die Höhe, bei Unterbrechung des Stromes wird es durch eine Feder wieder herabgezogen. Mit Hülfe dieser Vorrichtung lassen sich nun in einer vereinbarten Zeichensprache Signale geben, z. B. könnte ein einmaliges Anziehen den Buchstaben „a“, ein zweimaliges Anziehen „b“, ein dreimaliges „c“ bedeuten, und wir hätten nur noch längere Pausen zwischen den einzelnen Buchstaben festzusetzen. Es bietet sich aber ein bei Weitem besserer Weg dar. Wir können den Anker nicht nur anziehen und loslassen, sondern ihn auch kürzere oder längere Zeit festhalten. Wir haben dadurch

zwei Zeichen, die wir in einfacher Weise combiniren können. Sollte es Bedenken erregen, so nur auf das Gehör oder die vorübergehend sichtbare Bewegung angewiesen zu sein, so steht nichts im Wege, am freien Ende des Hebels eine Schreibvorrichtung anzubringen. Diese steht einem Papierstreifen gegenüber, der sich bei Betrieb des Apparates mit gleichmässiger Geschwindigkeit von einem Rade abrollt. Wird der Hebel angezogen, so drückt der Schreibstift gegen das Papier, dieses bewegt sich darüber hinweg und es entsteht ein Strich. Die Länge des Striches ist von der Zeitdauer des ausgeübten Druckes abhängig und man hat es an der „gebenden Station“ in der Gewalt, an der „empfangenden Station“ abwechselnd oder in beliebiger Reihenfolge lange und kurze Striche, oder, wie man statt dessen ungenauer zu sagen pflegt, „Striche“ und „Punkte“ hervorzubringen und in dieser Zeichensprache Nachrichten zu übermitteln. Was ich hier zu veranschaulichen versucht habe, ist das Prinzip des Morse-Apparates, welcher auf den meisten deutschen Telegraphen-ämtern in Gebrauch ist. Eine damit ausgerüstete Station besitzt einen Taster, wie ich ihn bereits erwähnte. Durch längeres oder kürzeres Niederdrücken desselben werden Stromschlüsse von längerer oder kürzerer Dauer hervorgebracht. Ueber dem Elektromagneten der Empfangsstation spielt in genau derselben Weise, wie vorher erwähnt, ein Hebel. Dieser Hebel trägt an seinem Ende einen Stift und oberhalb desselben befindet sich eine Walze, welche einen Papierstreifen führt. Je nachdem der Taster längere oder kürzere Zeit gedrückt wird, entstehen längere oder kürzere Striche auf dem Papierstreifen, und auf Grund einer Uebereinkunft ist man im Stande, bestimmte Buchstaben herauszulesen. So hätte man z. B. übereinkommen können, einen kurzen Strich als „a“ anzunehmen, einen langen als „b“, kurzlang als „c“. In Wirklichkeit ist man natürlich anders vorgegangen; denn bei der Schaffung einer solchen Schriftsprache kommt es darauf an, möglichst die Buchstaben, die häufig vorkommen, kurz auszudrücken. Es ist wichtig, ein „e“ in kurzer Zeit zu telegraphiren, denn es kommt ausserordentlich häufig vor; ob ein „x“ oder „y“ längere Zeit erfordert, ist von untergeordneter Bedeutung.

Wir können so vermittels des elektrischen Stromes auf weite Entfernungen hin eine leichte mechanische Arbeit leisten. Es handelt sich aber häufig auch im Signalwesen darum, mechanische Arbeit hervorzubringen, welche grössere Stromstärke verlangt, als sich hier auf so weite Entfernungen zu verschicken empfiehlt. Da bietet sich nun ein einfaches Mittel dar. Wir brauchen die Stromwirkung nicht direct zu verwenden, um die Schrift hervorzubringen, wir können die Wirkung des Stromes dazu verwenden, einen zweiten Stromschlüssel zu öffnen oder zu schliessen. Wir stellen dazu an der empfangenden Station eine verhältnissmässig kräftige Batterie auf, und von der gebenden Station aus bewirken wir nur, dass diese zweite Batterie in Thätigkeit tritt oder nicht. Eine dazu dienende Vorrichtung führt den Namen eines „Relais“ (vgl. Fig. 13).

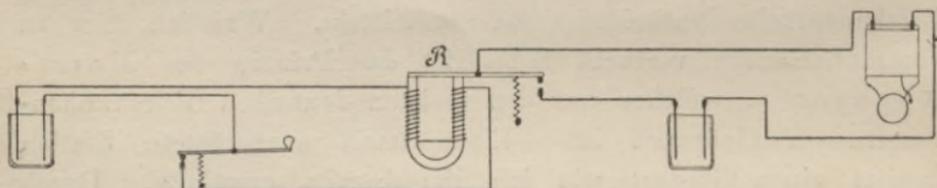


Fig. 13.

Stellen wir uns vor, es handelt sich um einen Eisenbahn-Signalapparat oder um einen Feuertelegraphen, bei dem es ganz besonders auf jederzeit unbedingte Betriebssicherheit, auch bei längerer Nichtbenutzung ankommt. Wäre die Leitung, welche von der Wohnung nach der Feuerwehrrstation führt, an irgend einer Stelle schadhaft, so könnte man bei der sonst üblichen Schaltung fortgesetzt auf den betreffenden Knopf drücken, ohne dass irgend ein Signal an der Empfangsstation ertönte. Diese Gefahr können wir durch eine andere Verwendungsart des elektrischen Stromes umgehen. Bei der bisher gewählten Form erhielten wir Zeichen, sobald der vorher offene elektrische Stromkreis geschlossen wurde. Wir wollen jetzt umgekehrt verfahren, sodass wir ein Zeichen bekommen, sobald der elektrische Stromkreis geöffnet wird. Denken Sie sich beim Morseapparat den Papierstreifen statt oben unten angebracht und ebenso den Bleistift nach unten, dann wird keinerlei Zeichen gegeben, so lange der Strom geschlossen

ist, es wird aber ein Zeichen sich bemerkbar machen, sobald der Strom unterbrochen wird, sobald er „Ruhe“ hat. Wir bezeichnen eine solche Schaltung, welche bei Stromunterbrechung arbeitet, im Gegensatz zu der vorher erwähnten, welche es bei Stromschluss that, als „Ruhestromschaltung“. Der Natur der Sache nach ist sie gerade für Betriebe sehr geeignet, bei denen die Sicherheit in erster Linie steht. Zur Veranschaulichung habe ich dünne Drähte ausgespannt, die von einem Element links nach einem Relais R führen (Fig. 13). So lange die dünnen Drähte stromdurchflossen sind, bleibt dessen Anker angezogen. Oeffne ich den dünnen Stromkreis durch Niederdrücken einer Taste, so lässt das Relais seinen Anker fahren, bewirkt dadurch den Schluss eines zweiten, durch stärkere Drähte gekennzeichneten Stromkreises und bringt eine Klingel zum Tönen. Dasselbe tritt aber bei jeder zufälligen oder muthwilligen Beschädigung des linken Stromkreises ein. Ich zerschneide den dünnen Draht und die Klingel ertönt. Auf diese Weise sind wir gegen die Gefahr geschützt, dass eine Sicherheitsleitung im Moment der Gefahr versage; tritt eine Unregelmässigkeit ein, so meldet sie sich freiwillig im gleichen Moment, indem sie das Warnungszeichen abgibt.

Eine solche Unterbrechung braucht sich aber nicht in brutaler Weise durch directe Leitungszerstörung zu vollziehen, wie dies etwa bei einem Einbruch der Fall sein könnte. Wir bedürfen zum Betrieb der Apparate der Stromquellen, als welche wir meist Batterien verwenden. Batterien sind von begrenzter Lebensdauer. Im Laufe der Monate und Jahre erschöpfen sie sich. Damit würde dann bei Ruhestromschaltung die Stromstärke heruntergehen, der Magnet wäre nicht mehr im Stande, den Anker festzuhalten, würde in dem Moment, wo die Batterie schwach zu werden beginnt, herabfallen und so das Zeichen geben, dass in der Anlage etwas nicht in Ordnung ist.

Ich sagte, dass der Elektromagnet für unsere meisten Signal-Apparate typisch sei. Als besondere Form dieser Signal-Apparate sollen auch noch die elektrischen Uhren betrachtet werden. Am meisten kommen hierbei die „sympathischen Zeigerwerke“ in Betracht; hinter dem Zifferblatt befindet sich ein Elektromagnet, welcher erregt wird, sobald der elektrische Strom geschlossen wird, und bei jeder Einschaltung rückt der Zeiger

um eine Minute vorwärts. Vielfach sind hier fälschlich so genannte Wechselstrom-Uhren in Gebrauch, die nicht mit Wechselstrom, sondern mit Gleichstrom arbeiten. Aber der Stromschluss erfolgt von Minute zu Minute in wechselnder Richtung, und zwar wird damit folgendes bezweckt: Wenn die Folge der Stromschlüsse durch eine elektrische Störung, z. B. eine atmosphärische Entladung, unterbrochen wird, rückt der Zeiger um eine Minute weiter, und so findet der nächstkommende Stromschluss seine Arbeit bereits gethan. Spricht dann die Uhr nur auf Impulse wechselnder Richtung an, so fällt einfach die Wirkung eines Impulses aus, bis wieder ein Strom in entgegengesetzter Richtung durchgegangen ist. Derartige Uhren sind z. B. vielfach in grösseren Bahnhöfen in Gebrauch. Ein einziges Gangwerk treibt sämtliche sichtbaren Zifferblätter. Das Gangwerk ist so eingerichtet, dass immer nach Schluss einer Minute ein Strom geschlossen wird, und zwar von Minute zu Minute in wechselnder Richtung. Man hat auch Uhren construirt, bei welchen der elektrische Strom diejenigen Arbeiten verrichtet, welche sonst die Feder oder das Gewicht zu vollziehen hat. Diese Uhren aber haben sich bisher nicht in dem Maasse eingebürgert, wie dies die sympathischen Zeigerwerke thaten, da es gerade unser Verkehr und unsere Industrie häufig verlangt, dass an einer Reihe von Orten stets übereinstimmende Zeiten vorhanden sind. Denken Sie an die Wartesäle, die Abfahrtshallen, denken Sie an die verschiedenen Orte einer Eisenbahnlinie, an verschiedene Stellen eines ausgedehnten Etablissements u. s. f. Schliesslich ist man in neuester Zeit mehrfach dazu gelangt, elektrische Uhren an bestehende Lichtcentralen anzuschliessen und von hier aus durch den Strom sowohl den Aufzug als die Regulirung besorgen zu lassen.

Zum einfachen Elektromagneten zurückkehrend, wollen wir uns vorstellen, dass der Stromkreis in bestimmter gesetzmässiger Weise sehr schnell abwechselnd geschlossen und geöffnet werde, so dass statt einmal von Minute zu Minute der Strom im Verlauf einer einzigen Secunde etwa 440 mal unterbrochen werde. Es würde der Anker dann sich 440 mal in einer Secunde auf- und abwärts bewegen. Diese 440 Schwingungen würden sich der Luft mittheilen und sich durch diese unserem Ohr übermitteln, das sie als einen musikalischen Ton empfände. Würden die

Unterbrechungen doppelt so schnell auf einander folgen, so dass wir statt 440 880 Schwingungen erhielten, so würden wir einen höheren Ton, die Octave des vorigen, erhalten. Wir besitzen im Telephon ein Instrument, welches auf dieser Eigenthümlichkeit fusst. Im Innern desselben erblicken wir zunächst einen Magneten, aber nicht einen einfachen weichen Eisenkern. Es kommt darauf an, dass die ausgeübte Wirkung eine möglichst kräftige sei, und dass sich die Wirkung möglichst schnell vollziehe. Man erreicht diesen Zweck in folgender Weise. Wir sehen einen Stahlmagneten (Fig. 14) und darüber einen weichen Eisenkern, der dann, wie Sie wissen, auch seinerseits magnetisch wird und ein zweites Stück anzuziehen vermag. Um das weiche Eisen herum sitzt eine Drahtspule von grosser Windungszahl. Schicken wir in diese Spule einen elektrischen Strom, so wird der Magnetismus des Eisens je nach der Richtung des betreffenden Stromes verstärkt oder geschwächt. Nun befindet sich in geringer Entfernung oberhalb des Eisenkernes ein dünnes Eisenblech. Wenn der Magnetismus verstärkt wird, wird dieselbe stärker angezogen werden, lässt er nach, infolge eines Nachlassens des Stromens oder der Ankunft eines Stromes von entgegengesetzter Richtung, so wird die Platte vermöge ihrer Elasticität zurückfedern und ebenso oft als ein Wechsel eintritt, wird sie angezogen oder abgestossen werden. Eine magnetische Wirkung ist hierbei streng genommen nur die Anziehung, während das Zurückfedern eine Folge der Elasticität der Platte ist.

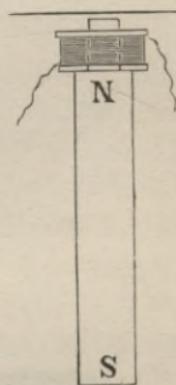


Fig. 14.

Schicken wir nun durch die betrachtete Spule einen Wechselstrom und zwar von beiläufig 80 Wechseln in der Secunde, so würde die Platte, wenn der Apparat keinen Magneten enthielte, 80 mal in der Secunde angezogen werden und wieder zurückfedern. So aber wird der Strom 40 mal in der Secunde, die Wirkung des Dauermagneten unterstützend, die Eisenmembran anziehen, 40 mal sie fahren lassen. Die Platte geräth also in Schwingungen, diese theilen sich der Luft mit und wir hören dieselben als Ton. Die Höhe dieses Tones hängt davon ab, wie

oft in der Secunde der elektrische Strom seine Richtung wechselt. Ich lasse diese Zahl verändern und wir hören die entsprechende Aenderung der Tonhöhe. Wir verstehen mithin, wie wir auf Grund magnetischer Wirkungen des elektrischen Stromes im Stande sind, im Telephon einen Ton zu empfangen.

Da wir die Wirkung des Stromes auf Stahlmagnete als eine solche kennen gelernt haben, die von der Richtung des elektrischen Stromes abhängig ist, so dürfen wir auf Grund des Inhaltes des vorigen Vortrages vermuthen, dass auch diese Wirkungen einer Umkehr fähig sind. Versuchen wir uns durch das Experiment davon zu überzeugen! Wenn wir einen starken elektrischen Strom über eine Magnetnadel leiten, so erhalten wir eine

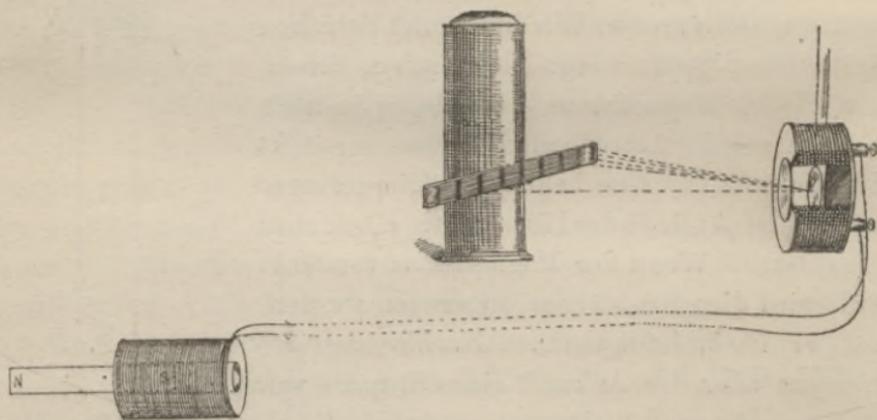


Fig. 15.

Bewegung der Nadel; wir könnten daraus folgern, dass, wenn wir umgekehrt unter einem solchen Draht eine Magnetnadel zwangsmässig bewegen, wir in dem Draht das Bestreben für das Zustandekommen eines elektrischen Stromes wachrufen. Mit Hülfe besonders feiner Messinstrumente könnten wir die so auftretende elektromotorische Kraft nachweisen. Wir wollen aber den Versuch in einer abgeänderten Form durchführen. Statt eines einfachen Drahtes benutzen wir eine Hunderte von Drahtlagen enthaltende Spule, und statt gegen eine solche eine schwache Magnetnadel zu bewegen, stosse ich einen starken Magneten in sie hinein (Fig 15). Zum Nachweis des entstehenden Stromstosses benutzen wir ein sogenanntes Spiegelgalvanometer. Dasselbe enthält einen Magneten in Gestalt einer kleinen Stahlscheibe, deren eine Fläche

polirt und als Spiegel ausgebildet ist. Hierauf fällt von einer aufgestellten Gaslampe ein Lichtstrahl, und wenn sich der Magnetpiegel bewegt, wird das auf eine Theilung zurückgeworfene Bild in gleicher Weise wandern, als wenn wir den Sonnenstrahl auffangen und mittels eines sich bewegenden Spiegels an die Wand werfen. Wir sind so im Stande, die geringste Bewegung des Spiegels zu erkennen. Sehen wir künftig das Lichtbild wandern, so schliessen wir auf eine Bewegung des Spiegels und damit auf das Auftreten eines elektrischen Stromes in den den Magnetpiegel umgebenden Galvanometerwindungen. Stosse ich jetzt den Südpol des Magneten in die Spule, so erfolgt eine Bewegung des Lichtbildes nach rechts, ziehe ich ihn wieder heraus, nach links. Vollführe ich jedoch die gleichen Bewegungen mit dem Nordpol, so beobachten Sie die entgegengesetzten Ausschläge. Belasse ich schliesslich den Magneten unbeweglich im Hohlraum der Spule, so tritt keinerlei Beeinflussung des Galvanometers, kein Strom auf.

Somit sehen wir, dass in der That die Wirkung des elektrischen Stromes auf Magnete mit bestimmten Polen umkehrbar ist, und wir bei gegenseitiger Bewegung von Magnet und Spule eine elektromotorische Kraft erhalten und durch diese einen Strom erzeugen können, dessen Richtung, erkennbar an dem Sinne des Ausschlages, von der Art der ausgeführten Bewegung abhängt. Es lässt sich allgemein zeigen, dass in einer Spule stets eine elektromotorische Kraft auftritt, wenn sich die magnetischen Verhältnisse in ihrem Innern in entsprechender Weise ändern.

Den bereits zur Demonstration des Telephons benutzten Aufbau wiederholend, setze ich auf einen Magnetstab einen weichen Eisenkern und schiebe eine kleine Spule darüber, die wieder an das Galvanometer angeschlossen ist. (Vgl. Fig. 14 Seite 43.) Die magnetischen Verhältnisse im Innern unserer Spule sind nun nicht nur von dem von ihr umschlossenen magnetisirten Eisenkern abhängig, sondern sie werden gleichzeitig auch von all' dem Eisen beeinflusst, das sich sonst in der Nähe befindet. Ich nehme eine Platte weichen Eisens und lege sie an die Spule an, in dem Moment bemerken Sie einen Ausschlag am Galvanometer; ebenso erfolgt, sobald ich die Platte entferne, ein Ausschlag, jedoch nach der entgegen-

gesetzten Seite. So oft ich die Platte nähere oder entferne, er giebt sich ein Stromstoss in analoger Weise, wie wir ihn zuvor durch Herausziehen oder Einschieben unseres Eisenkernes erzeugten.

Wenn ich nun diese Annäherung und Entfernung der Platte statt langsam in schnellerem Tempo, z. B. 400 mal in der Secunde, ausführe, erhalte ich eben so oft einen Wechsel in der Richtung des dadurch angeregten Stromes. Ich werde keinen Strom erhalten, wenn die Platte anliegt; ich erhalte auch keinen Strom, wenn die Platte entfernt ist, wohl aber, wenn die Platte sich nähert, wenn sie sich entfernt, so oft die Platte ihre Lage zur Spule verändert. In der Praxis sehen wir diese 400malige Näherung und Entfernung der Platten nicht von der Hand vollführt: wir überlassen es der menschlichen Stimme, durch Schall-schwingungen die abwechselnde Annäherung und Entfernung der Eisenplatte — welche sich als Membran im Telephon über der Spule, oberhalb des magnetischen Systems befindet — hervorzubringen und dadurch Wechselströme von entsprechender Wechselzahl zu erzeugen.

Wir sind so von dem Telephon als Empfänger zu dem Telephon als Geber gekommen. Wir hatten im Accumulator eine Vorrichtung, auf der chemischen Wirkung des elektrischen Stromes beruhend, kennen gelernt, welche gleich geeignet war, uns zur Veranschaulichung der chemischen Wirkung des elektrischen Stromes wie zur Veranschaulichung der Entstehung elektromotorischer Kraft und damit elektrischer Ströme durch einen chemischen Process zu dienen. Entsprechend haben wir jetzt im Telephon eine Vorrichtung kennen gelernt, welche uns zeigt, wie mechanische Bewegungen der Eisenmembran durch Stromschwankungen hervorgebracht werden, die uns ferner zeigt, wie die Erzeugung von Stromschwankungen durch mechanische Bewegung von Eisenflächen gegenüber einem Magneten stattfindet.

Das Telephon vereint somit im Kleinen das, was wir als einen „Elektromotor“, eine Vorrichtung zur Hervorbringung mechanischer Bewegungen bei Aufwand elektrischer Energie bezeichnen, und das, was wir im Grossen als eine „Dynamomaschine“, eine Vorrichtung zur Hervorbringung eines elek-

trischen Stromes, auf Grund aufgewandter mechanischer Energie bezeichnen. In der That ist das Princip der Hervorrufung einer elektromotorischen Kraft, welches wir bei dem Telephon kennen lernten — in der Physik unter dem Namen der „Induktion“ bekannt —, das gleiche, welches uns in der einen Richtung in der Dynamomaschine, in der umgekehrten Richtung in dem Elektromotor entgentreten wird.

Vierter Vortrag.

Gramme'scher Ring. Dynamo-elektrisches Princip. Gleichstrommaschine. Elektromotor.

In dem Studium der Wechselwirkungen zwischen Veränderungen im Magnetismus und Auftreten elektromotorischer Kräfte fortfahrend, benutzen wir für die anzustellenden Versuche einen mächtigen Elektromagneten (vgl. Fig. 16). Zwischen den Polen entsteht bei seiner Erregung ein Raum, in dem überall magnetische Kräfte auftreten. Wir nennen einen solchen Raum, den Wirkungskreis des Magneten, sein „magnetisches Feld“. Lassen wir darin eine Spule sich in geeigneter Weise bewegen, so erhalten wir gleiche Wirkungen, als wenn wir früher eine Spule auf den Stahlmagneten hinaufschoben. Die Enden eines einfachen Drahtbundes sind mit dem Galvanometer verbunden. Führe ich mit ihm zwischen den Polen des noch unmagnetischen Eisengestelles irgendeine Bewegung aus, so erhalten wir am Galvanometer keinen Ausschlag. Nun errege ich den Elektromagneten durch einen herumgeleiteten Strom und bringe jetzt die Rolle zwischen die Pole, es erfolgt ein Ausschlag des Galvanometers, ich ziehe die Rolle weg — Ausschlag nach der entgegengesetzten Seite. Durch eine fortwährend hin- und hergehende Bewegung einer einfachen Drahtrolle kann also in ihr eine Reihe von hin- und hergehenden Strömen, ein Wechselstrom erzeugt werden. Diese Methode, einen elektrischen Strom zu erzeugen, wäre aber eine mechanisch sehr ungeschickte. Wir sind in der Technik gewohnt, wenn möglich, statt mit hin- und hergehenden Bewegungen mit Drehbewegungen zu arbeiten. Könnten wir

nicht auch mit Hilfe einer drehenden Bewegung einen elektrischen Strom erzeugen? Versuchen wir es mit unserer Drahtrolle! Drehe ich sie in geeigneter Weise um eine Achse, die senkrecht zur Richtung des Magnetismus steht, so bekommen

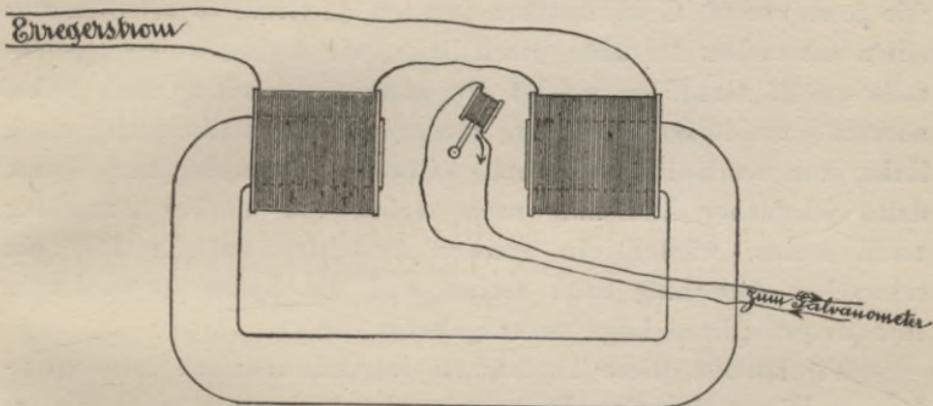


Fig. 16.

wir in der That Ausschläge am Galvanometer. Damit aber die einzelnen Lagen leichter zu unterscheiden sind, will ich mich einer kleineren Spule bedienen (Fig. 16). Ich bringe sie in das magnetische Feld und drehe sie zwischen den Polen: wir erhalten

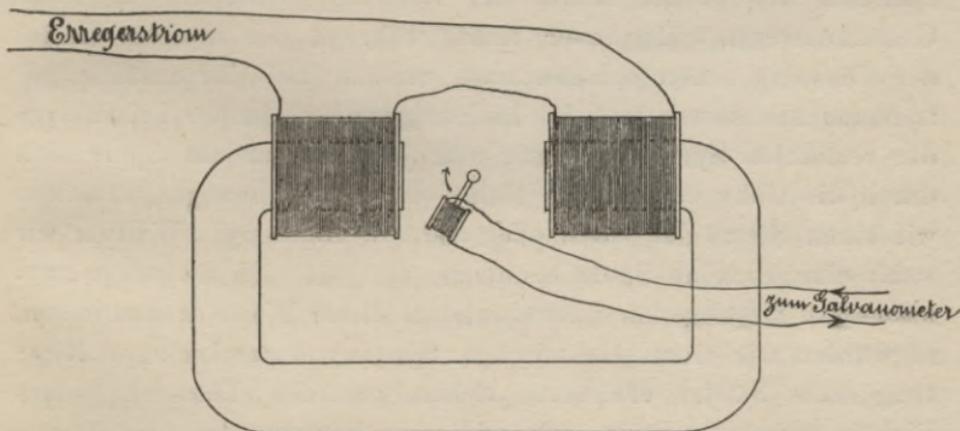


Fig. 17.

einen Ausschlag. Ich drehe die Rolle weiter und weiter und wir erhalten jedesmal einen Ausschlag (Fig. 17). Während die Ausschläge anfangs nach rechts gingen, gehen sie jetzt nach links. Ich drehe noch weiter, jedesmal um 90 Grad, ich bekomme wiederum

einen Ausschlag, aber nach links. So oft ich die Drahtrolle um 90 Grad drehe, beobachten wir jedesmal einen Stromimpuls als Wirkung einer elektromotorischen Kraft. Aber diese elektromotorische Kraft war während der beiden ersten Drehungen und während der zweiten Drehungen verschieden. Drehen wir nicht wie jetzt um 90 Grad, sondern nur um 45 Grad, so erhalten wir einen schwachen Ausschlag nach links, wir drehen weiter, gleichfalls um 45 Grad, es erfolgt ein starker Ausschlag nach links, abermals um 45 Grad gedreht, wieder ein starker Ausschlag nach links, nun bei weiterer Drehung schwacher Ausschlag nach links, dann schwacher Ausschlag nach rechts, ein starker Ausschlag nach rechts, wieder ein starker Ausschlag nach rechts, ein schwacher Ausschlag nach rechts, und die Spule ist wieder in ihre ursprüngliche Lage zurückgekehrt.

Wir können diese Thatsachen folgendermaassen zusammenfassen: Wenn sich eine Drahtspule innerhalb eines magnetischen Feldes in der beschriebenen Weise um ihre Achse bewegt, so erzeugt sie hierdurch eine elektromotorische Kraft, deren Betrag je nach der Stelle, welche die betreffende Spule gerade passirt, ein verschiedener ist. Ausser in Bezug auf Grösse ändert sich diese elektromotorische Kraft auch der Richtung nach; denn während der ersten Hälfte der Drehung erhielten wir einen Galvanometerausschlag nach links, während der zweiten Hälfte der Drehung einen solchen nach rechts. Bei der zufällig getroffenen Anordnung trat der Richtungswechsel immer bei Passage der vertikalen Symmetrieebene auf: je nachdem die Spule sich durch die linke oder rechte Hälfte des Feldes bewegte, erhielten wir einen Strom der einen oder anderen Richtung. Wollten wir somit eine einzelne Spule benutzen, und sie sich zwischen zwei mächtigen Magnetpolen fortwährend in dieser Weise drehen lassen, so würden wir einen elektrischen Strom von wechselnder Richtung und Stärke erhalten. Schon aus der Thatsache eines Richtungswechsels hätten wir schliessen können, dass die Stromstärke nicht die gleiche bleibt, denn wo wir bei einer Bewegung oder bei einer Kraftwirkung einen Uebergang von einer Richtung in die andere wahrnehmen, vollzieht sich dieser Uebergang in stetiger Weise, unter allmählicher Aenderung der Stärke der Bewegung oder Kraft. Lassen wir nun in unserm magnetischen

Felde statt einer Spule sich deren mehrere bewegen und fassen zunächst ein solches Spulenpaar ins Auge, dessen Spulen um 180 Grad von einander abstehen, so wird stets die elektromotorische Kraft in beiden entgegengesetzt gerichtet sein, weil sich dann die Spulen stets in entgegengesetzt wirkenden Hälften des Feldes befinden. Denn, wie Sie sich erinnern, ergab der Versuch eine — bei der gewählten Anordnung vertikale — Zone, bei deren Passage ein Richtungswechsel der elektromotorischen Kraft stattfand. Hingegen wirken elektromotorische Kräfte gleicher Richtung in solchen Spulen, welche sich durch dieselbe, z. B. durch die linke Hälfte des Feldes bewegen. Wir könnten darum diese Spulen sämtlich mit einander verbinden und sie würden sich alle in dem Bestreben unterstützen, einen Strom, in bestimmter Richtung die Spulenfolge durchstreifend, hervorzubringen. Spulen, welche gleichzeitig die andere Feldhälfte durchliefen, würden einen Strom, dem ersten in Bezug auf die Spulenfolge entgegengewirkend, hervorzubringen streben. Diese Beziehungen gelten nicht für den ruhenden „Anker“, wie wir ein solches System von Spulen nennen wollen, sondern für den Anker in Bewegung. Hierbei ist es vollständig gleichgültig, ob eine bestimmte Stelle gerade von der Spule A, B oder C passirt wird, da diese Spulen vollständig congruent hergestellt sein sollen. Die elektromotorische Kraft in der einzelnen Spule hängt dann nicht von deren Individualität ab, sondern von der Stelle des Feldes, die sie gerade passirt. Gelangt irgend eine Spule an eine um 180 Grad gegen die frühere abstehende Stelle des Weges im Felde, so erzeugt sie eine elektromotorische Kraft von entgegengesetzter Richtung als vorher. Befindet sich der Anker in Rotation, so wechselt mit ihrer Lage fortwährend die Rolle, die der einzelnen Spule zufällt, aber indem sie ihren Platz verlässt, tritt die nächstfolgende an ihre Stelle, bereit ihre Rolle zu übernehmen. Soll nun dieser grossen Zahl von Elektrizitätsquellen — denn jede einzelne Spule stellt eine solche dar — ein Strom entnommen werden, so kommt es darauf an, auch die Spulen, welche sich, wie die in der linken und die in der rechten Hälfte des Feldes, auf Grund ihrer Lage im betreffenden Moment, in Bezug auf Richtung der elektromotorischen Kraft verschieden verhalten, zu gemeinschaftlicher Thätigkeit zu vereinen. Zu dem Zweck wollen wir zunächst das Ende jeder ein-

nen Spule mit dem Anfang der nächstfolgenden verbinden, so dass wir ein geschlossenes Ganze erhalten. Suchen wir nun zu erkennen, was die beiden feindlichen Lager scheidet, so erkennen wir eine Verschiedenheit der Richtung der elektromotorischen Kraft, wenn wir sie im Sinne der Kreisbewegung betrachten, aber eine Uebereinstimmung für eine andere Anschauungsweise.

Diejenigen Spulen, welche sich gerade auf der linken Bewegungshälfte befinden, rufen elektromotorische Kräfte wach, welche von unten nach oben gerichtet sind und diejenigen Spulen, welche die rechte Hälfte passiren, rufen elektromotorische Kräfte wach, welche gleichfalls von unten nach oben gerichtet sind, und

oben treffen diese elektromotorischen Kräfte zusammen. Wir haben darum eine Reihe von Elektrizitätsquellen in der gleichen Anordnung, wie sie vielfach bei Batterien üblich ist und wie ich sie für 8 Elemente, A, B, C . . H, deren jedes eine elektromotorische Kraft von 1,2 Volt besitzt, schematisch ausführe (Fig. 18). Am positiven Pol des ersten Elementes A herrscht dann ein um 1,2 Volt höherer elektrischer Zustand als an seinem negativen,

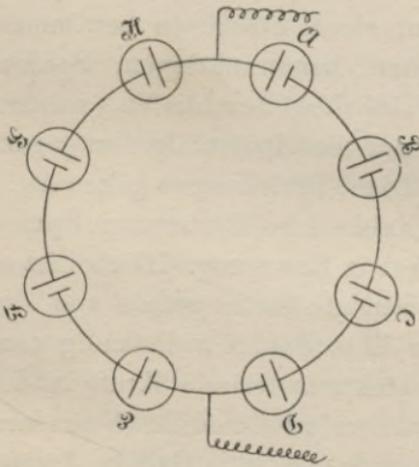


Fig. 18.

und wenn wir damit den negativen des zweiten Elementes B verbinden, so nimmt dieser den gleichen elektrischen Zustand an. Der positive Pol von B ist nun wieder um 1,2 Volt höher als der negative Pol von B und damit um 2,4 Volt höher als der negative von A. Ebenso besitzen der positive Pol der Elemente C, D um 3,6, 4,8 Volt höhere elektrische Zustände, als der negative Pol von A. Das Gleiche gilt aber für die vom Gesichtspunkt einer Kreisbewegung entgegengesetzt geschalteten Elemente E, F, G, H. Auch sie liefern nach dem positiven Pol von G einen 4,8 Volt höheren elektrischen Zustand, als er am negativen Pol von H herrscht. Verbinde ich die beiden Reihen von Elementen mit einander, so erhalte ich keinerlei elektrischen Strom, denn die verschiedenen

elektromotorischen Kräfte der einen Reihe und der anderen halten sich gegenseitig im Schach. Wenn ich aber jetzt den Spannungen, welche zwischen den Stellen A H und D E bestehen — und in dem Bestreben, diese Spannungen zu unterhalten, unterstützen sich die beiden Reihen von Elementen —, Gelegenheit gebe, sich etwa durch eine Lampe in Gestalt eines Stromes auszugleichen, so bekomme ich einen elektrischen Strom auf Grund einer gemeinschaftlichen Wirkung beider Reihen. Genau dieselben Verhältnisse ergeben sich für den betrachteten „Anker“ der „Dynamomaschine“, denn um einen solchen handelt es sich. Gelingt es, durch einen äusseren Stromkreis diejenigen Stellen, zwischen denen die maximale Spannung besteht, zu verbinden, so vereinigen sich die anscheinend feindlichen Parteien zu gemeinschaftlichem Wirken.

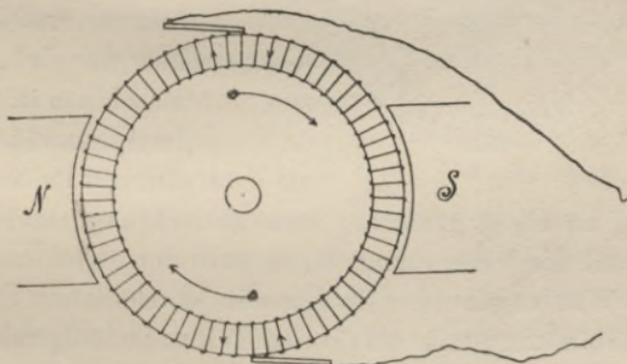


Fig. 19.

Beim Aufstellen zweier Batterien von Elementen in der beschriebenen „Parallelschaltung“ genügt es, das erste und das letzte Element jeder Reihe dauernd mit der äusseren Stromverbrauchsstelle in Verbindung zu setzen; anders bei dem rotirenden Anker. Wollen wir hier die beiden in Betracht kommenden Stellen fortwährend mit der äusseren Stromverbrauchsstelle in Verbindung halten, so müssen wir dafür Sorge tragen, dass diejenigen Stellen dauernd in Verbindung mit der äusseren Stromverbrauchsstelle bleiben, welche den Enden der Batterie unter Zugrundelegung der zufälligerweise gewählten Verhältnisse entsprechen. Wir hätten also mit dem äusseren Stromkreise — etwa einer Lampe — diejenigen Spulen dauernd in Verbindung

zu setzen, deren eine gerade die oberste, die andere die unterste Stelle passirt. Diese Aufgabe lässt sich in einfacher Weise lösen, indem man am äusseren Ankerrand den Spulendraht nicht isolirt, sondern blank nimmt und oberhalb der obersten Stelle und unterhalb der untersten schleifend zwei Metallflächen anordnet, die mit den Polen der Verbrauchsstelle in Verbindung stehen (Fig. 19). In der That hat man Maschinenanker in dieser Weise wirkend hergestellt, auf deren Aussenflächen Metallbürsten als Stromabnehmer schleifen. Es lässt sich aber diese Anordnung nur bei

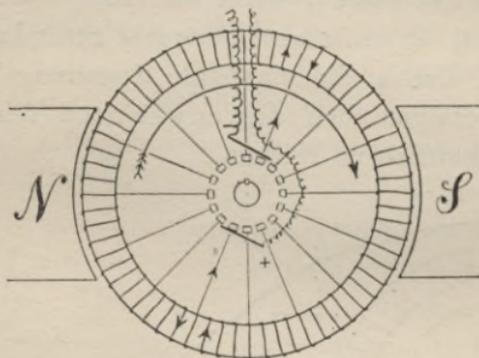


Fig. 20.

gewissen Maschinentypen, sogenannten Innenpolmaschinen, bei denen die Pole sich innerhalb des Ankers befinden, praktisch ausführen und ist auch hier nur bei grösseren Maschinen in Gebrauch. Im Allgemeinen hat man sich ein Princip der Arbeitstheilung zu eigen gemacht: man überträgt einem besonderen Maschinentheil die Verbindung der gerade die „neutrale“ Zone passirenden Windungen oder Spulen mit dem äusseren Stromkreis. Von der Verbindungsstelle zweier auf einander folgender Spulen führen wir einen Draht ab und lassen ihn in der Nähe der Welle in einem von den übrigen isolirten Stabe von Eisen, Kupfer, Messing oder Bronze enden. Sie sehen die Verbindung hier an einem groben Modell veranschaulicht, an welchem Sie die Verwirklichung der skizzirten Schaltungsweise erkennen werden (Fig. 20).

Auf diese Weise sind jederzeit alle einzelnen Elemente, alle einzelnen Windungen in Verbindung mit einander, und wenn wir dann auf dem hinzugefügten Stromabgeber — dem sogenannten „Collector“ — oberhalb und unterhalb geeignete Stromabnehmer in Gestalt von Blechen oder Metallbürsten schleifen lassen, so sind wir im Stande, auf diese Weise dauernd die verlangten Verbindungen mit der äusseren Verbrauchsstelle herzustellen. Der Anker kann sich beliebig drehen, es befindet sich

jederzeit die jeweilig oberste und die unterste Spule, die ja ihre Individualität wechseln, aber stets in Bezug auf ihre elektrische Wirkung die gleiche Rolle spielen, mit dem Nutzstromkreis in Verbindung.

Wir haben somit die gestellte Aufgabe gelöst. Mit Hilfe dieser Schaltung, welche den Namen des Gramme-Pacinotti'schen Ringes führt, sind wir im Stande, durch Drehen einer Reihe in geeigneter Weise mit einander verbundener Spulen einen Strom von stets gleicher Richtung nach einer äusseren Verbrauchsstelle hin zu liefern. Gemäss der gewählten Form der Bewegung haben wir für den Anker die Form eines Ringes erhalten; wenn wir aber an diejenige Form der Bewegung angeknüpft hätten, welche wir beim ersten Versuch hatten, als wir eine Drahtrolle um eine durch sie hindurchgehende Achse drehten und hätten hier statt der einen mehrere Rollen verwandt, die symmetrisch zu der gemeinsamen Drehungsachse lagen, so wären wir im Gegensatz zum „Ringanker“ zu der Form des „Trommelankers“ gelangt.

An der aufgestellten Maschine erkennen wir unschwer die bisher schematisch betrachteten Theile: den Anker, der sich zwischen zwei starken Magnetpolen bewegt, den Collector mit seinen Lamellen und Bürsten, die die Stromabgabe nach aussen vermitteln, indem sie im Verein mit dem Collector dafür sorgen, dass in jedem einzelnen Moment die gerade geeigneten Spulenden mit den Abnahmestellen verbunden sind. An die stromabführenden Drähte der Maschine ist ein kleines Glühlämpchen angeschlossen. Setze ich jetzt den Anker mit beliebiger Geschwindigkeit in Drehung, so können Sie keinerlei Wirkung wahrnehmen. Zur Zeit sind die Elektromagnete, welche die Pole darstellen, nur weiches Eisen. Wir müssen dieselben daher zunächst erregen und leiten zu dem Zwecke einen Strom um dieselben, den wir einer Batterie entnehmen. Die Magnete sind jetzt erregt, wie wir am Anziehen eines Eisenstückes bemerken. Drehen wir nunmehr, so erhalten wir einen Strom, das Lämpchen erglüht. Drehen wir schneller, so erglüht die Lampe heller. Die hervorgebrachte Wirkung ist also, wie auch schon von vornherein wahrscheinlich war, von der Geschwindigkeit der Drehung abhängig. Wir wollen jetzt bei einer

gewissen langsamen Drehungsgeschwindigkeit bleiben, bei der wir das Lämpchen nur sehr schwach erglühen sehen. Der Magnetismus wird durch einen um die Schenkel geleiteten Strom erregt. Dieser Strom ist einer Steigerung fähig. Lassen Sie uns durch Vermehrung der Zahl der eingeschalteten Elemente eine solche bewirken, und wir sehen das Lämpchen stärker erglühen als vorher. Wir können diese Steigerung noch weiter fortsetzen, indem wir immer noch mehr Elemente hinzunehmen, und eine sehr langsame Drehung genügt jetzt, um das Lämpchen hell erglühen zu lassen.

Der beobachtete Vorgang hat sich folgendermaassen abgespielt: Durch eine besondere Elektrizitätsquelle erregten wir einen Elektromagneten. Drehten wir zwischen dessen Polen den Dynamo-Anker, so erhielten wir einen Strom, der in seiner Stärke von der Stärke des wirkenden Magnetismus abhing. Somit scheint die Erzeugung eines Stromes von wahrnehmbarer Stärke auf dem betretenen Wege immerhin noch vorauszusetzen, dass von anderer Seite ein elektrischer Strom geliefert wird. Sollte es nun nicht möglich sein, statt dessen den von der Maschine selbst erzeugten Strom zur Schenkelerregung zu benutzen?

Führen wir den Versuch aus! Wir lösen jedwede Verbindung mit der äusseren Elektrizitätsquelle, so dass die Elektromagnet-Windungen von keinerlei äusserer Elektrizitätsquelle mit Strom versorgt werden können. Um jedoch den eventuell von der Maschine zu erzeugenden Strom zur Speisung der Feldmagnete zu benutzen, führen wir von den Klemmen der Maschine den gelieferten Strom nicht direkt in die Glühlampe, sondern veranlassen ihn, zunächst noch durch die Windungen des Elektromagneten zu fliessen, dann erst durch das Glühlämpchen und von hier zur anderen Bürste zurück. Drehen wir, so erglüht das Lämpchen, und der Versuch bestätigt, dass wir in der That im Stande sind, auch ohne irgendwelche Verbindung mit einer weiteren Elektrizitätsquelle einen elektrischen Strom zu Stande zu bringen, dass das Maschinchen befähigt ist, sich den zur Erregung seiner Magnete erforderlichen Strom selbst zu erzeugen. Wir haben hierin das „*d y n a m o - e l e k t r i s c h e P r i n c i p*“ kennen gelernt, auf welchem die Dynamomaschine beruht. Der Versuch hat uns dessen Richtigkeit in einwurfsfreier Weise bewiesen, und doch

erscheint es unserm Verständniss unbegreiflich, fast widersinnig. Die stromliefernde Maschine sorgt für Unterhaltung des Magnetismus, der seinerseits aber Voraussetzung ist, wenn überhaupt ein Strom zu Stande kommen soll. So erscheint der Magnetismus einerseits als Folge des Stromes, während andererseits das Zustandekommen des Stromes an ein Vorhandensein des Magnetismus geknüpft ist. Ist eins von beiden Elementen vorhanden, so begreifen wir die Erzeugung des anderen. Wer von beiden soll aber aus sich heraus den Anfang machen?

Erinnern wir uns an einen früheren Versuch! Wir unterbrachen den Strom in den Windungen eines Elektromagneten, ohne dass der durch den Magnetismus getragene Anker herabfiel. Wir entnahmen daraus, dass der Magnetismus des Eisens nicht nothwendig mit Verschwinden des ihn hervorrufenden Stromes verschwindet. Wir lernten dann weiterhin, dass Eisen, welches einmal magnetisch gewesen ist, seinen Magnetismus niemals wieder ganz verliert. So haben die Schenkel der benutzten Dynamomaschine, welche bereits des Oefteren magnetisch gewesen sind, einen kleinen Betrag von Magnetismus zurückbehalten. Er ist ausserordentlich schwach, aber ist doch genügend, um, wenn der Anker zwischen den beiden Schenkeln gedreht wird, einen auch seinerseits ausserordentlich schwachen Strom hervorzurufen. Dieser Strom reicht nicht aus, um das Lämpchen zum Glühen zu bringen. Aber indem er um die Schenkel fliesst, verstärkt er deren geringen Magnetismus; der Magnetismus erweist sich dankbar und erzeugt einen stärkeren Strom. Der Strom kommt wieder dem Magnetismus zu Hülfe, und so arbeiten sich beide gegenseitig in die Höhe. Bei einer Wiederholung des Versuches beachten wir, dass, wenn die Maschine in Bewegung gesetzt wird, einige Zeit verfliesst, bis Magnetismus und Stromstärke durch gegenseitige Unterstützung in der besprochenen Weise ihren normalen Werth erreicht haben. Indem wir uns von der Möglichkeit überzeugten, auf diesem Wege Ströme zu erzeugen, ohne an das vorherige Vorhandensein irgend welchen Stromes gebunden zu sein, sind wir zur eigentlichen „Dynamomaschine“ übergegangen, so bezeichnet zum Unterschied von der älteren „magnetelektrischen“ Maschine, welche Magnete in Gestalt permanenter Stahlmagnete oder von anderer Seite erregter Elektromagnete voraussetzte.

Die Versuche hatten gezeigt, dass die Leistung einer bestimmten Maschine noch von zweierlei abhängig ist, erstens von der Umdrehungszahl und zweitens von der Stärke des verwandten magnetisirenden Stromes.

In technischen Betrieben werden wir stets mit einer bestimmten unveränderlichen Umdrehungszahl arbeiten, z. B. arbeitet die Maschine, die für die Beleuchtung dieses Saales sorgt, mit einer Umdrehungszahl von 1200 Touren in der Minute. Wir verlangen von einer solchen Maschine nicht bloss, dass sie Elektrizität erzeuge, sondern dass sie Elektrizität von bestimmter Eigenschaft erzeuge: wir verlangen von der Maschine eine Spannung von bestimmter Grösse, z. B. im speciellen Falle eine solche von 65 Volt, weil sich nur unter dieser unsere Glühlampen diejenige Stromstärke nehmen, die sie in normaler Helligkeit erstrahlen lässt.

Während bei Maschinen, welche mit besonderer Erregung der Schenkel von einer fremden Elektrizitätsquelle aus arbeiten, diese Erregung stets in gleicher Weise vor sich geht, sind wir in Bezug auf die Erregung einer Dynamomaschine, bei welcher der gesammte Strom um die Schenkel geleitet wird, von der Stärke des entnommenen Stromes, d. h. von den Betriebsverhältnissen abhängig. Man bedarf deshalb noch besonderer Regulirungsvorrichtungen, damit man jederzeit diejenige Stärke des Magnetismus herstellen kann, welche bei der gegebenen Umlaufzahl der Maschine zur Erzielung der gewünschten Stromstärke beziehungsweise Spannung erforderlich ist.

Wenn wir Gelegenheit nehmen, eine elektrische Maschinenanlage zu besichtigen, erblicken wir stets diese besonderen Regulirungsapparate. Wir sehen an einer Schalttafel Instrumente, welche wir als Ampère- und Voltmeter erkennen werden und welchen die Aufgabe zufällt, dem Maschinisten anzuzeigen, ob die Maschine diejenigen Stromverhältnisse liefert, die gerade gebraucht werden. Ist dies nicht der Fall — weil z. B. eben durch Ein- oder Ausschalten einer grösseren Lampenzahl eine Veränderung in den äusseren Betriebsverhältnissen eingetreten —, so regulirt er mittels des „Regulirwiderstandes“ die die Schenkel umfliessende Stromstärke auf den nunmehr erforderlichen Grad. Die besprochene Verbindungsweise von Schenkeln, Anker und

äusserem Stromkreis ist nicht die allein mögliche, man verwendet bei einer Reihe von Maschinen nicht den gesammten Strom zur Erregung der Schenkel, sondern zweigt nur einen Theil dafür ab, während der Haupttheil direct in die Anlage fliesst. Die erste Art von Maschinen nennt man „Hauptstrommaschinen“, die zweite Art „Nebenschlussmaschinen“, eine dritte Art, welche sich innerhalb gewisser Grenzen selbst regulirt, nennt man „Compoundmaschinen“. Ohne in Einzelheiten einzugehen, ersehen wir, über welche Mannigfaltigkeit in Bezug auf die Schaltungsformen der Elektrotechniker verfügt, eine Mannigfaltigkeit, von der er in Rücksicht auf die Art der Aufgabe, die er mit seinen Maschinen zu erfüllen hat, Gebrauch macht.

Wir leisten in unserer Glühlampe eine gewisse Arbeit, welche nach dem Gesetz der Erhaltung der Arbeit irgendwoher stammen muss, woher aber? Es ist die gleiche Arbeit, welche die Hand bzw. im technischen Betrieb der Motor zu leisten hat, um den betreffenden Anker in Drehung zu erhalten. Darum ist eine grössere Arbeit aufzuwenden, wenn die Maschine einen Strom liefert, als wenn sie leer läuft. Versuchen wir die Maschine zu drehen, während das Lämpchen eingeschaltet ist und durch den von der Maschine gelieferten Strom glüht, so empfinden wir eine grössere Anstrengung als im anderen Falle. Dass eine Arbeit aufgewendet werden muss, um den stromdurchflossenen Anker im verlangten Sinne zu drehen, hat seinen Grund darin, dass der Anker bei Stromdurchgang zum Elektromagneten wird und sich derjenigen Drehung, welche ihm ertheilt werden muss, um einen Strom zu erhalten, widersetzt. Von der Richtigkeit dieser Auffassung können wir uns am einfachsten überzeugen, wenn wir den Anker zwar nicht drehen, wohl aber ihm und gleichzeitig den Schenkeln den betreffenden Strom zuführen. Dann muss sich, wenn die gemachten Anschauungen richtig sind, der betreffende Anker auf Grund der auftretenden magnetischen Kräfte im entgegengesetzten Sinne in Bewegung setzen. Leiten wir in unsere kleine Dynamomaschine den Strom einer anderen ein, so sehen Sie in der That den Anker in Rotation gerathen. Aendere ich die Stromstärke — was wir an dem eingeschalteten Ampèremeter feststellen können —, so beeinflussen wir damit die Geschwindigkeit der Umdrehung. Wir haben hier einen „Elektromotor“

vor uns, der heutzutage wegen seiner Einfachheit besonders für das Kleingewerbe empfohlen wird. Ein kleiner Elektromotor ist ohne Weiteres an jeder Stelle, wo sich eine Glühlampe befindet, anbringbar. Wir sehen, das Einstecken eines Stöpsels genügt, um ihn in Gang zu setzen.

Somit haben wir gesehen, dass auch die magnetischen Wirkungen, als Wirkungen, welche von der Richtung des Stromes abhängig waren, einer Umkehr fähig sind. Denn dass wir es bei der Dynamomaschine mit magnetischen Vorgängen zu thun haben, wird Ihnen um so klarer hervortreten, wenn ich hervorhebe, dass man nicht aus principiellen physikalischen, sondern aus technischen Gründen, um nämlich die Wirksamkeit der betreffenden Maschine zu erhöhen, alle Spulen des Ankers mit einem gemeinsamen, nach bestimmten physikalischen Gesichtspunkten hergestellten Eisenkern versieht.

Fünfter Vortrag.

Wechselstrommaschine. Glühlicht, Bogenlicht. Transformator.

Von der Gleichstrommaschine zu der Wechselstrommaschine übergehend, erinnern wir uns, dass, während der Gleichstrom in seiner Wirkung durch Richtung und Stärke eindeutig bestimmt war, von diesen Elementen beim Wechselstrom dasjenige der dauernden Richtung fortfiel. Denn wir verstanden eben unter einem Wechselstrom einen solchen Strom, welcher nicht einer bestimmten Richtung treu bleibt, sondern der diese in verhältnissmässig kleinen Zeiträumen periodisch wechselt. In einem bestimmten Augenblicke floss bei den früher damit angestellten Versuchen der Strom von der linken Anschlussklemme zur rechten; nach einer hundertstel Secunde jedoch hatte der Strom seine Richtung geändert und floss nun umgekehrt von der rechten zur linken Anschlussklemme. Die Dauer der Perioden, in denen sich dieser Uebergang vollzieht, wird für einen bestimmten Wechselstrom in ähnlicher Weise charakteristisch sein, als es die Richtung für einen Gleichstrom war. Man arbeitet in Wechselstromcentralen stets mit derselben Wechselzahl, und pflegt diese zwischen 80 und 130 Wechseln in der Secunde zu liegen. Der Wechsel zwischen der einen Richtung und der anderen vollzieht sich aber nicht plötzlich, so dass etwa zu einer bestimmten Zeit der Wechselstrom eine gewisse Stromstärke besässe und sofort darauf eine Stromstärke gleichen Betrages, aber entgegengesetzter Richtung hätte. Der Uebergang von einer Richtung zur andern vollzieht sich vielmehr in stetiger Weise. Die Stromstärke nimmt allmählig ab, erreicht

den Werth Null, und der Strom geht nunmehr in einen von entgegengesetzter Richtung über, um als solcher wieder zu einem gewissen Maximalwerth anzuwachsen, wieder zum Werth Null abzunehmen und so fort. Was ich jetzt langwierig beschreibe, ist der Vorgang, welcher sich bei dem Wechselstrom, wie er bei uns zur Beleuchtung benutzt zu werden pflegt, in $\frac{1}{80}$ bis $\frac{1}{130}$ Secunde vollzieht. Dieser Uebergang kann nun in verschiedener Weise stattfinden, und wir haben somit in der Art und Weise, wie er sich vollzieht, ein weiteres Characteristicum für einen bestimmten Wechselstrom. Gleichzeitig bemerken wir, dass der Begriff der Stromstärke in Bezug auf einen Wechselstrom nicht so einfacher Art ist, als bei Gleichstrom. Ein Gleichstrom, welcher z. B. eine Glühlampe durchfließt, besitzt während der ganzen Zeitdauer des Brennens stets ein und dieselbe Stärke, ebenso wie ein Hochplateau an allen Stellen die gleiche Erhebung über dem Meeresspiegel zeigt. Ein Wechselstrom dagegen besitzt zwar in einem bestimmten Moment eine bestimmte Stärke, diese Stärke ist aber von Moment zu Moment verschieden, je nachdem der Strom im Begriff steht, seine Richtung zu wechseln oder dieselbe noch geraume Zeit zu behalten. Die momentane Stärke eines Wechselstromes ist somit etwas von Moment zu Moment Wechselndes, in ähnlicher Weise wie die Höhe eines Gebirges von Stelle zu Stelle. Wir könnten von einer mittleren Höhe eines Gebirges sprechen, und in ähnlicher Weise messen wir die „mittlere Stärke“ eines Wechselstroms.

Wenn man bei einem Wechselstrom von der Stärke von 10 Ampère spricht, kann das daher nicht besagen, dass der betreffende Strom in jedem Moment genau dieselbe Stärke von 10 Ampère besitze; es kommen vielmehr Momente vor, wo die Stromstärke 0, 5, 10, 15 Ampère beträgt. 10 Ampère soll nur der Betrag der mittleren Stromstärke sein. In der That ist es auch diese mittlere Stromstärke, welche dann unsere Messinstrumente anzeigen, da sie nicht Zeit haben, den momentanen Pulsationen des Wechselstromes zu folgen.

Wir wollen jetzt zur Erzeugung von Wechselstrom unter Benutzung der Beziehungen zwischen Veränderungen in magnetischen Verhältnissen und Auftreten elektromotorischer Kraft übergehen. In ähnlicher Weise wie bei Betrachtung der entsprechen-

den Erzeugung von Gleichstrom benutzen wir eine Drahtspule, welche einen Eisenkern enthält und deren beide Enden mit einem Galvanometer verbunden sind. Drei Hufeisenmagneten sind so im Kreise angeordnet, dass abwechselnd Nord- und Südpol einander folgen. Ich nähere die Spule dem Nordpol (Fig. 21), und Sie sehen einen Ausschlag des Galvanometers nach links eintreten. Durch Nähern an den Nordpol änderten sich die magnetischen Verhältnisse im Innern der Spule, so dass eine elektromotorische Kraft in ihr entstand, bestrebt, einen Strom vom äusseren Spulende durch das Galvanometer über das innere Spulende zurück hervorzurufen, den wir an seiner Wirkung — Ausschlag nach links — erkannten. Bewegt sich jetzt die Spule vom Nordpol

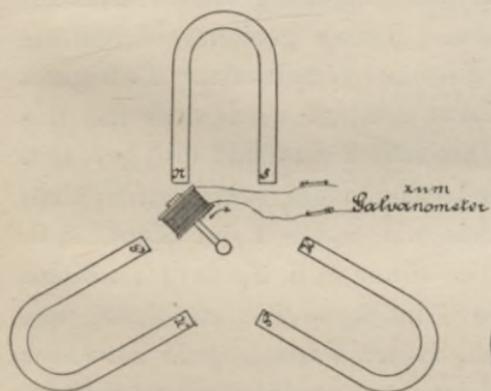


Fig. 21.

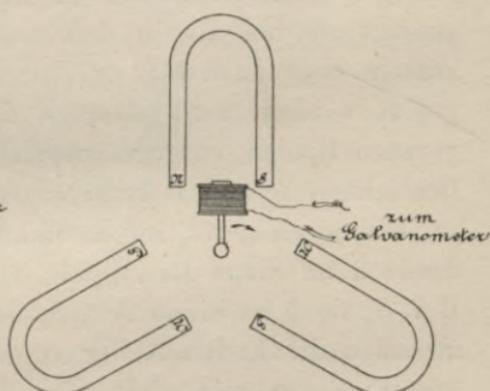


Fig. 22.

weg auf den Südpol zu (Fig. 22), so tritt die Aenderung des Magnetismus in ihrem Hohlraum in entgegengesetztem Sinne auf als vorhin. Die gelieferte elektromotorische Kraft, und damit der entstehende Strom, sind darum entgegengesetzt gerichtet: vom inneren Ende zum Galvanometer, über das äussere zurück, das Galvanometer schlägt nach rechts aus. Fahre ich in der kreisförmigen Bewegung der Spule fort, so beobachten wir Ausschläge des Galvanometers nach rechts oder links, je nachdem die Bewegung von einem Nord- auf einen Südpol oder umgekehrt gerichtet ist. Drehe ich schneller und schneller, so sehen wir die Galvanometer-Ausschläge dem entsprechend schneller wechseln. Und jetzt erfolgt der Wechsel so schnell, dass das Galvanometer den rasch in entgegengesetztem Sinne erfolgenden Antrieben nicht mehr zu folgen vermag: es bleibt in Ruhe. Bewegt sich die Spule in einer Secunde zwei-

mal über die sechs Pole hinweg, so bekommen wir, da dem Vorbeigang an einem Pol immer ein Wechsel in der Stromrichtung entspricht, einen Wechselstrom von 12 „Wechseln“ in der Secunde oder von 720 in der Minute.

Bedenken wir, dass über den sechs Magnetpolen sich zur Zeit nur eine einzige Spule bewegt, so erscheint die ganze Vorrichtung etwas mangelhaft, insofern von sechs vorhandenen Polen immer nur ein einziger ausgenutzt wurde. Es leuchtet ohne Weiteres ein, dass es möglich ist, über drei gleichnamige Pole gleichzeitig Spulen sich so hinweg bewegen zu lassen, dass sich die einzelnen Wirkungen summiren. Lassen wir ebenso über die anderen Pole Spulen sich bewegen, dann werden in diesen jederzeit elektromotorische Kräfte von entgegengesetzter Richtung erzeugt werden als in den ersten. Durch geeignete Schaltung können aber auch hier wieder alle zu gemeinsamer Thätigkeit geeint werden, wenn nämlich dafür gesorgt wird, dass die ungeraden Spulen entgegengesetzt geschaltet sind als die geraden. Bezeichnen A und B entsprechende Enden der einzelnen Spulen, so hätten einander im Stromkreis die Spule 1 im Sinne AB, Spule 2 im Sinne BA, Spule 3 im Sinne AB, Spule 4 im Sinne BA, Spule 5 im Sinne AB, Spule 6 im Sinne BA zu folgen, und zwischen die Enden A der ersten, B der letzten Spule wäre der äussere Stromkreis, z. B. eine Beleuchtungsanlage, einzuschalten. Um bei der wirklich ausgeführten Maschine diese Verbindung dauernd herzustellen, führt man jedes der beiden Enden nach einem isolirt auf der Achse der Maschine liegenden Ringe und lässt auf diesen wiederum Metallbürsten schleifen, welche mit der Verbrauchsstelle in Verbindung stehen. Man pflegt jedoch meist die Anordnung umgekehrt so zu treffen, dass die Ankerspulen der Maschine still stehen, die Magnetpole sich an ihnen vorbeibewegen. So besitzt die Wechselstrom-Maschine des Institutes sechs feststehende Spulen und einen sich drehenden sechspoligen Magnetstern (Fig. 23). Derselbe besteht allerdings nicht aus Stahlmagneten, sondern Elektromagneten. Da wir den Wechselstrom nicht ohne Weiteres zur Erregung dieser Magnete benutzen können, weil die Elektromagneten fortwährend ihre Polarität ändern würden, bedienen wir uns hierfür einer Gleichstrom Maschine. Die Stromzuführung zu den rotirenden Feldmagneten erfolgt in der vorher

für die Stromabnahme geschilderten Weise mittelst Bürsten und Schleifringen. Macht der sechspolige Magnetstern in einer Minute 1000 Umdrehungen, so erhalten wir einen Wechselstrom von 6000 Wechseln in der Minute oder 100 Wechseln in der Secunde.

Die Regulirung der Wechselstrom-Maschine vollzieht sich in gleicher Weise wie die der Gleichstrom-Maschine: der Maschinist hat es auch hier in der Gewalt, durch die verschiedene Wahl des

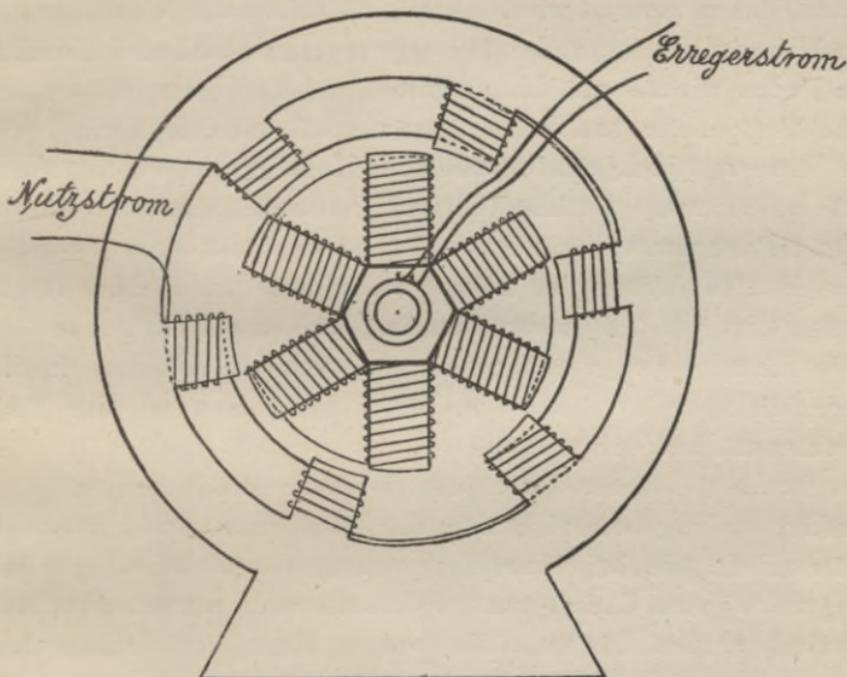


Fig. 23.

magnetisirenden Stromes Spannungen, Stromstärken verschiedener Beträge hervorzubringen und so die Leistung der Maschine den Anforderungen des Betriebes anzupassen.

Gehen wir, jetzt mit der Erzeugung von Gleichstrom und Wechselstrom auf maschinellm Wege bekannt, zu einer Betrachtung der Wirkungen der Stromarten über, so können wir von vornherein darauf rechnen, diejenigen Wirkungen, welche wir bei Gleichstrom als von der Stromrichtung durchaus unabhängig kennen gelernt haben, z. B. die Wärmewirkungen bei Wechselstrom unverändert, d. h. wie bei Gleichstrom, zu finden. Die Wärmewirkung des Stromes findet in der Glühlichtbeleuchtung

eine ausgedehnte Verwendung. Wir können somit eine Glühlichtbeleuchtung gerade so gut durch Wechsel- als durch Gleichstrom hervorbringen. Während unser Hörsaal im Allgemeinen mit Gleichstrom beleuchtet wird, erfolgt die Beleuchtung am heutigen Abend durch Wechselstrom; ich glaube nicht, dass Ihnen irgend ein Unterschied gegen sonst aufgefallen ist.

Die Glühlampe selbst besteht aus einem dünnen, überaus elastischen Kohlenfaden, welcher durch den elektrischen Strom in lebhaftes Glühen versetzt wird. Die den Kohlenfaden einschliessende Glasbirne ist luftleer, andernfalls würde erstens die Luft kühlend auf den Faden wirken und denselben bei gleichem Strom nicht eine so hohe Temperatur annehmen lassen, zweitens aber würde, wenn die Birne mit Luft erfüllt wäre, der Kohlenfaden in dem Sauerstoff verbrennen. Gerade in dem Umstande, dass der Kohlenfaden an der atmosphärischen Luft verbrennt, ist die ausserordentliche Feuersicherheit der Lampe selbst begründet. Man fürchtet häufig, dass das Glas zerbrechen und der dann freiliegende Glühfaden Brand erzeugen könnte, aber Sie sehen, dass in dem Augenblick, in dem ich den Ballon zerschmettere, der Faden durchbrennt und erlischt.

Ist das Glühlicht durch Gleich- oder Wechselstrom gleichwerthig, so ergeben sich für das Bogenlicht bemerkenswerthe Unterschiede, die bei einer Besprechung der verschiedenen Wirkungsweise von Gleich- und Wechselstrom nicht ausser Acht gelassen werden dürfen. Wir wollen diese Verhältnisse durch den Augenschein kennen lernen. Von zwei Kohlenstäben, die sich in ihrer Verlängerung gegenüberstehen, ist zunächst jeder mit einem Pol einer Gleichstromquelle verbunden. Nähere ich sie bis zur Berührung, sodass dadurch der Stromkreis geschlossen wird, und entferne sie dann um ein Geringes, so kommt die unter dem Namen des elektrischen „Lichtbogens“ bekannte Erscheinung zu Stande. Flüchtige Kohletheilchen bieten zwischen den glühenden Enden der Kohlen dem Strom eine Brücke dar. Durch eine Linse erzeugen wir an der Wand ein umgekehrtes Bild (Fig. 24). Das leuchtende Element daran ist, wie Sie bemerken, nicht der eigentliche bläuliche Lichtbogen zwischen den Kohlen, von dem die Erscheinung ihren Namen hat, sondern es sind die glühenden Kohlenenden. Die von beiden Enden ausgesandte

Lichtmenge ist nun keineswegs für beide Pole gleich, sondern es zeigt sich, dass z. B. in unserm Falle der obere besonders hell erglüht. Gleichzeitig bemerken wir, dass die Kohlenspitzen verschiedene Gestalt annehmen, dass sich die untere zuspitzt, die obere abstumpft. Die obere ist nun diejenige, welche an den positiven Pol der Batterie angeschlossen ist, und wir entnehmen daraus, dass die Erscheinung in ihrer Art von der Stromrichtung abhängt. Die positive Kohlenspitze höhlt sich aus, die negative Kohlenspitze spitzt sich zu, ein Vorgang, dem man durch passende Wahl des Kohlenmaterials zu Hülfe kommt, indem man als positive eine sogenannte Dochkohle verwendet, die eine Seele

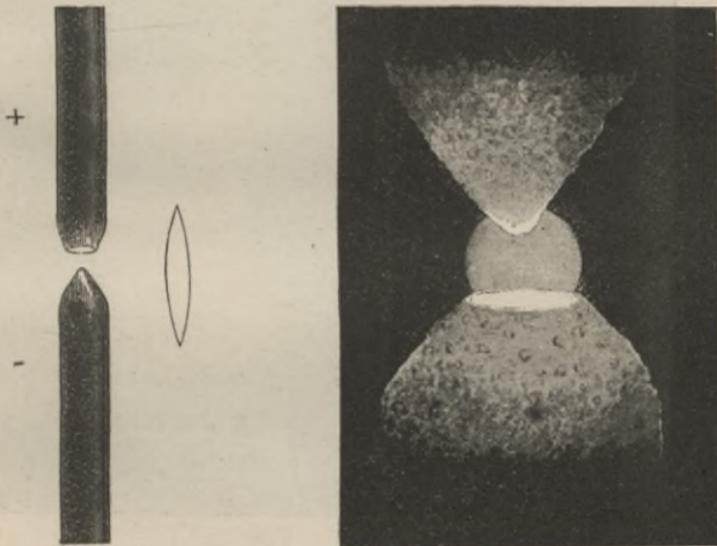


Fig. 24.

aus einem weicheren Material enthält. Gleichzeitig strahlt die positive Kohle die grössere Helligkeit aus. Man setzt darum diese Kohle, die sich aushöhlt und so gewissermassen einen längs seiner Fläche leuchtenden Reflector bildet, nach oben und erhält dadurch bei der Gleichstrom-Bogenlampe eine solche Lichtvertheilung, dass die grössere Menge des Lichtes nach unten fällt. So sehen wir eine aufgehängte Bogenlampe zur Zeit die Hauptmenge des Lichtes auf den Tisch werfen. Vertauschen wir die Pole, so erglüht die untere Kohle stärker, stumpft sich ab, die obere spitzt sich zu, wir erhalten eine Lichtvertheilung in entgegengesetztem Sinne, die Hauptmenge des erzeugten Lichtes fällt

nach der Decke. Wiederholen wir den Versuch, jedoch unter Verwendung von Wechselstrom, so wird keine von beiden Kohlen der anderen gegenüber eine hervortretende Rolle spielen; es wird die eine sich in genau gleicher Weise wie die andere verändern (Fig. 25). Das projecirte Bild des Lichtbogens zeigt dementsprechend keine Verschiedenheit der Pole. Das Licht der Wechselstrombogenlampe weist nicht mehr die vorher beobachtete einseitige Lichtvertheilung auf, die den Haupttheil des Lichtes in der üblichen Weise auf die unten zu beleuchtende Fläche zu werfen gestattet, sondern zeigt eine mehr gleichmässige Lichtvertheilung, welche

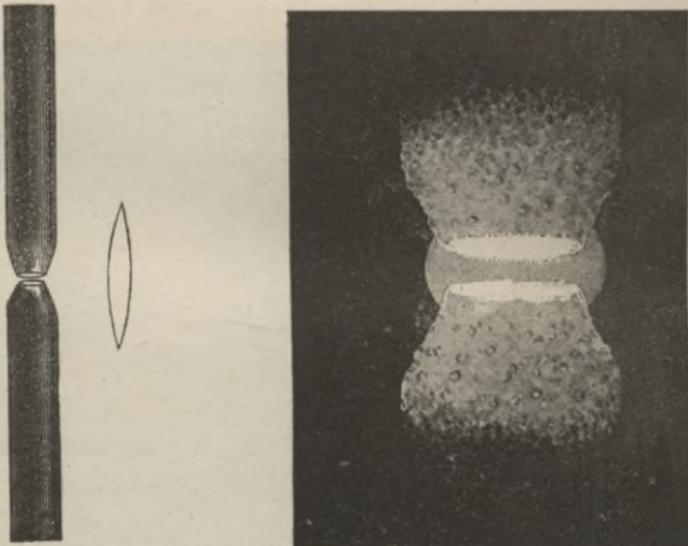


Fig. 25.

für gewisse Zwecke, z. B. öffentliche Platzbeleuchtung, der anderen gegenüber unterlegen ist.

Setzen wir diesen Versuch einige Zeit fort, so bemerken wir einen allmählichen Abbrand der Kohlenenden: Der Lichtbogen wird länger und länger und reisst schliesslich ab. Wollen wir die vom Lichtbogen ausgestrahlte Helligkeit als „Bogenlicht“ praktisch verwerthen, so muss ein allmählicher Nachschub der Kohlen stattfinden, der mit ihrem Abbrand gleichen Schritt hält. Um zu verstehen, wie das in der Bogenlampe selbstthätig geschieht, wollen wir den Vorgang messend verfolgen.

Durch momentane Berührung der beiden mit der Stromquelle verbundenen Kohlenstäbe lasse ich einen Lichtbogen zwischen ihnen entstehen. Die beiden Kohlen sind nun mit je einer Klemme eines Voltmeters verbunden, und dieses lehrt uns, dass zwischen ihnen zur Zeit eine Spannung von 40 Volt besteht (Fig. 26). Der Lichtbogen braucht für seinen Unterhalt einen bestimmten Spannungsbetrag, den wir eben zu 40 Volt massen. Indem aber die Kohlen abbrennen, der Zwischenraum, den der Lichtbogen zu überbrücken hat, sich vergrössert, steigt das Voltmeter — der Zeiger steht jetzt auf 45 Volt. Je weiter die Kohlenenden von einander abstehen, eine um so grössere Spannung muss zwischen ihnen dem Lichtbogen zu Verfügung stehen: die Lichtbogen-

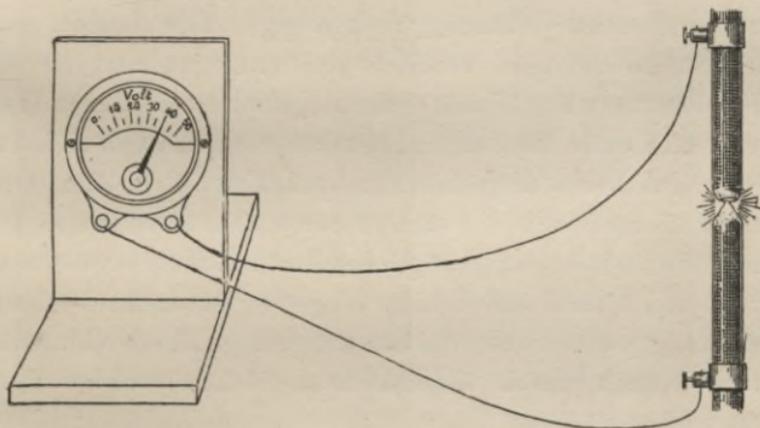


Fig. 26.

spannung hat jetzt den Betrag von 49 Volt erreicht. Wäre die Elektrizitätsquelle nicht im Stande, die erforderliche Spannung zwischen den Kohlen zu unterhalten, so würde bei der betreffenden Entfernung der Lichtbogen erlöschen, wie wir dies vorhin bei einem grösseren Abstand zu beobachten Gelegenheit hatten.

Wird nun an Stelle unseres Voltmeters ein Elektromagnet eingeschaltet, so ist die Stromstärke, die ihn umfließt und damit die Anziehungskraft, die er auf seinen Anker ausübt, um so stärker, eine je höhere Spannung zwischen seinen Enden herrscht, das heisst also in unserm Fall, je länger der Lichtbogen ist. Beginnt jetzt der Lichtbogen infolge des Abbrandes der Kohle seine normale Länge zu überschreiten, so wird der Elektromagnet genügend

kräftig, um den Anker, den sonst eine Gegenkraft z. B. in Gestalt einer Feder zurückhält, anzuziehen. Hierdurch kann dann ein Uhrwerk oder sonstiger Mechanismus ausgelöst werden, der die Kohlen nachschiebt, bis wieder der normale Abstand hergestellt ist. Derartige Bogenlampen sind Ihnen ja dem äusseren Ansehen nach wohlbekannt.

Als eine weitere Wirkung des elektrischen Stromes hatten wir die chemische Wirkung kennen gelernt. Sie war in so ausgesprochener Weise von der Richtung des elektrischen Stromes abhängig, dass sie im Allgemeinen durch Wechselstrom nicht hervorgebracht werden kann. Denn ist in einem gewissen Moment der Strom gerade in bester Arbeit, so macht schon nach einer hundertstel Secunde ein Strom von entgegengesetzter Richtung die hervorgebrachte Wirkung rückgängig. Die beiden sich ablösenden Stromrichtungen arbeiten sich entgegen, und nur für den einen Fall leuchtet ohne Weiteres die Möglichkeit ein, durch Wechselstrom eine bleibende Zersetzung hervorzubringen, wenn sich die Zersetzungsprodukte mit so grosser Geschwindigkeit von dem Orte der Wirkung entfernen, dass der nächste Stromstoss dieselben nicht mehr erreichen und sie in den ursprünglichen Zustand zurückversetzen kann. In der That ist man auf diesem Wege — unter Anwendung verhältnissmässig grosser Stromstärken auf geringe Elektrodenflächen — im Stande, auch durch Wechselstrom elektrolytische Vorgänge hervorzubringen.

Schliesslich hatten wir noch die magnetische Wirkung des Stromes kennen gelernt, wobei wir die Wirkung auf Dauermagnete und diejenige auf weiches Eisen getrennt zu betrachten hatten. Die Beeinflussung von Dauermagneten, z. B. einer Magnetnadel, ist von der Richtung des Stromes abhängig und kann daher durch Wechselstrom nicht hervorgebracht werden; denn leiten wir den Wechselstrom über eine Magnetnadel, so heben sich die rasch auf einander folgenden Impulse entgegengesetzter Richtung auf: die Nadel bleibt stehen, da sie nicht zu folgen vermag, wie wir das vorhin am Galvanometer zu sehen Gelegenheit hatten. Anders ist es mit den magnetischen Wirkungen auf einen weichen Eisenkern. Ich will in eine Spule einen Strom schicken und dafür zunächst Gleichstrom verwenden. Ein Eisenkern wird dann in die Spule eingezogen; ich unterbreche den Strom, der Eisen-

kern fällt heraus. Ich will nunmehr die Richtung des Stromes ändern. Ich vertausche die Anschlussstellen gegen einander und erhalte den Gleichstrom in entgegengesetzter Richtung. Der Eisenkern wird jetzt in gleicher Weise wie vorher eingezogen, wir haben somit in der Einziehung eines weichen Eisenkerns eine Wirkung, welche nicht wie die Ablenkung der Magnetonadel — wie die Wirkung auf Dauermagnete — von der Richtung des Stroms abhängig ist, welche sich vielmehr in gleicher Weise vollzieht, ob er von der einen oder anderen Richtung kommt. Mithin dürfen wir erwarten, die Wirkung auch bei Wechselstrom in genau der gleichen Weise sich vollziehen zu sehen.

Ich schicke Wechselstrom durch die Spule, der Eisenkern wird in der That wieder eingezogen. Sobald ich aber den Eisenkern auf dem Tische aufstehen lasse, vernehmen Sie ein eigenthümliches Geräusch. Von hundertstel zu hundertstel Secunde wechselt der Strom seine Richtung. Dabei verschwindet er jedesmal für einen Moment völlig. Während dieses Zeittheils hat der Eisenkern Zeit, eine ganz geringe Wegstrecke zurückzufallen und auf dem Tische aufzustossen und versetzt auf diese Weise die Tischplatte in Schwingungen, die wir als Schall wahrnehmen. Geht auch der Eisenkern, wenn er von einem Wechselstrom umkreist wird, in magnetischen Zustand über, so können wir doch an ihm eine bestimmte Polarität nicht nachweisen, denn jeder Nachweis einer solchen erfordert eine gewisse Zeitdauer, nach Secunden, aber — wie wir wissen — wechselt die Polarität in einer einzigen Secunde ausserordentlich oft.

Die so im Eisenkern auftretenden Schwankungen des Magnetismus erinnern uns an einen früheren Versuch, bei dem wir gerade mit solchen Schwankungen arbeiteten. Veränderten wir nämlich in geeigneter Weise den Magnetismus im Innern einer Spule, z. B. dadurch, dass wir einen Stahlmagneten einschoben, sie einem Magnetpole näherten oder von ihm entfernten, so trat in der Spule eine elektromotorische Kraft auf, die unter günstigen Umständen einen elektrischen Strom erzeugen konnte, und zwar solange, als im Magnetismus des Eisenkerns eine Aenderung vor sich ging. Wenn wir uns nun vor Augen halten, dass ein Wechselstrom seiner Natur nach von Moment zu Moment seine augenblickliche Stärke, in bestimmten Perioden

seine Richtung ändert, so leuchtet ein, dass in einem Wechselstrommagneten ein fortwährendes Vibriren des Magnetismus stattfindet, dass dieses Vibriren auch im Innern einer zweiten darauf befindlichen Spule statthat und in ihr eine elektromotorische Kraft beziehungsweise, wenn dafür ein geschlossener Weg vorhanden, einen Strom wachruft. Freilich wird dieser elektrische Strom in verschiedenen Momenten nach verschiedenen Richtungen verlaufen, je nachdem, ob gerade ein Anwachsen eines Nordmagnetismus oder Süd magnetismus stattfindet, denn die Verstärkung eines Nordpols im Innern der Spule ruft die entgegengesetzt gerichtete Wirkung hervor, als seine Schwächung oder Verstärkung eines Südpoles. Prüfen wir durch den Versuch die Richtigkeit unserer Folgerungen!

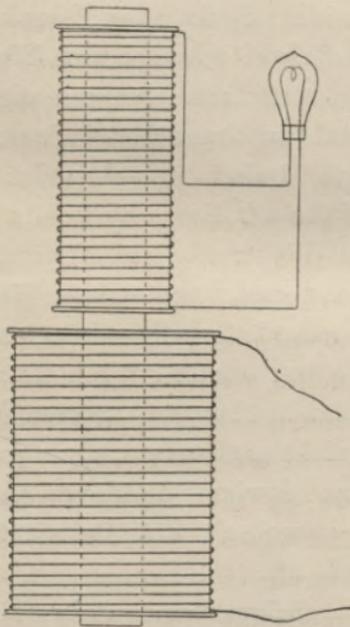


Fig. 27.

Aus naheliegenden Gründen können wir den entstehenden Strom nicht durch das Galvanometer nachweisen, da wir ja einen Wechselstrom erhalten werden. Ich will mich daher eines Glühlämpchens bedienen, das mit der aufzusetzenden Spule verbunden ist, aber ausser aller Verbindung mit der Wechselstrommaschine steht (Fig. 27). Ich schalte ein und errege die den Eisenkern magnetisierende Wechselstromspule. Ueber den Eisenkern schiebe ich, ausser

aller weiteren Verbindung mit der Magnetisirungs-Spule, die zweite Spule. Wir sehen, das Lämpchen beginnt allmählig zu glühen, um so heller, je weiter auf dem Kern sich die Spule befindet. In der zweiten, der „sekundären“ Spule, entsteht ausser aller Verbindung mit der „primären“ Spule ein Strom, hervorgebracht durch die elektromotorische Kraft, die darin auf Grund der Pulsationen des Magnetismus auftritt. Der Grösse nach hängt diese elektromotorische Kraft, wie wir uns leicht überzeugen können, von der speziellen Wahl der hierzu ver-

wendeten Mittel ab. Verwenden wir statt der bisherigen Secundärspule eine andere, die sich von ihr durch die grössere Zahl ihrer Windungen unterscheidet, so sehen Sie bei deren Aufbringung auf den durch Wechselstrom erregten Elektromagnetkern das jetzt damit verbundene Glühlämpchen bei Weitem heller erstrahlen als bei dem ersten Versuch.

Aus diesen Versuchen ersehen Sie erstens, dass wir im Stande sind, mit Hilfe einer solchen Vorrichtung einen Wechselstrom in einer zweiten Spule, die mit der ersten nichts als einen Eisenkern gemeinschaftlich hat, hervorzubringen, wenn die erste der beiden Spulen von einem Wechselstrom durchflossen wird, zweitens, dass der Betrag an elektromotorischer Kraft, welcher in der secundären Spule erzeugt wird, der Grösse nach von der Natur dieser Spule, insbesondere von ihrer Windungszahl abhängt. Durch Wahl der Spule könnten wir die zu erhaltende Wirkung beliebig weit steigern oder vermindern und bei einer Primärspule, die unter einer elektromotorischen Kraft von 100 Volt gespeist wird, in der Secundärspule je nach deren Windungszahl eine solche von 50, 100, ja 200 Volt erhalten. Wir haben somit hier eine Vorrichtung, um Wechselströme ausser aller leitenden Verbindung mit der Wechselstromquelle umzusetzen und in beliebigen Verhältnissen umzusetzen, denn das Umsetzungsverhältniss war im zweiten Falle ein anderes als im ersten. Eine solche Vorrichtung nun, welche den Zweck hat, einen Wechselstrom in einen solchen anderer Art umzusetzen, und welche auf der Beeinflussung einer secundären durch eine primäre Spule beruht, die einen Eisenkern mit ihr gemein hat, nennt man einen „Transformator“.

Was Sie in den beiden Spulen vor sich sehen, ist das Modell eines Transformators, was das Experiment demonstirte, die Wirkungsweise eines solchen. Die Formen der technisch ausgebildeten Transformatoren unterscheiden sich im Allgemeinen insofern von der des Versuchsmodelles, als der Eisenkern nicht aus einem geraden Stück besteht, sondern ringförmig gestaltet ist. Um den Eisenkern sind zwei von einander durchaus unabhängige Windungen gewickelt. Eine derselben besteht aus einer geringen Zahl von Windungen, die andere enthält deren eine ausserordentlich grosse Zahl. Die erste besteht aus starkem,

die zweite aus schwächerem Draht. Gelangt in die starken Windungen, als primäre, ein Strom, durch einer Wechselstromquelle von 100 Volt hervorgebracht, so kann man aus den dünnen Windungen, als secundären, gleichfalls einen Strom erhalten, aber einen solchen, welcher sein Dasein einer anderen elektromotorischen Kraft verdankt, und zwar, bei den speziell gewählten Wicklungsverhältnissen, einer solchen von 1000 Volt. Es gleicht dieser Transformator einem Hebel, mit dessen Hülfe mechanische Kräfte in dem durch die Construction des Hebels gegebenen Verhältnisse umgesetzt werden können. Wenn wir aber statt in die wenigen — starken — Windungen als primäre einen Strom, welcher seinen Unterhalt einer Spannung von 1000 Volt verdankt, in die vielen — dünndräftigen — Windungen leiten, so erhalten wir aus den wenigen starken Windungen als secundären eine elektromotorische Kraft von 100 Volt, eine Umkehrung wieder ähnlicher Art wie beim Hebel, der ja auch je nach Wahl der Angriffspunkte für Kraft und Last im einen oder anderen Sinne wirkend verwendet werden kann. Eine ausserordentlich wichtige Rolle spielt der Transformator gerade in der letzten Anordnung bei der Aufgabe, elektrische Energie über weite Strecken zu vertheilen, worauf näher einzugehen, wir später Gelegenheit finden werden.

Sechster Vortrag.

Elektrischer Effect (Volt-Ampère, Watt). Vertheilungssysteme (Transformatorensystem, Dreileitersystem, Drehstromsystem).

Wir haben uns einerseits mit den verschiedenen Wirkungen und Verwendungsarten der elektrischen Energie in Gestalt von Licht, Wärme, motorischer Arbeit und chemischer Energie beschäftigt und andererseits deren wichtigste Erzeugungsweisen kennen gelernt. Es erübrigt noch eine kurze Betrachtung derjenigen Gesichtspunkte, welche für die Vertheilung elektrischer Energie massgebend sind. Diese Gesichtspunkte sind um so wichtiger, als ein Hauptmoment zu Gunsten der elektrischen Energie gegenüber anderen Formen gerade in ihrer ausserordentlich erleichterten Vertheilbarkeit liegt. Ehe wir aber dieser Frage näher treten können, müssen wir uns darüber klar werden, wonach wir überhaupt eine elektrische Energie, einen elektrischen Effect zu messen haben.

Wir sind gewohnt, in der Stromstärke das Element zu erblicken, welches für den Grad der zu Stande kommenden Wirkung massgebend ist. Wir erinnern uns z. B., dass der Grad des Leuchtens einer gewissen Glühlampe dadurch bestimmt war, dass sie ein Strom von 0,85 Ampère durchfloss, der dann zu Stande kam, wenn zwischen ihren Klemmen eine Spannung von 65 Volt bestand. Aber es würde falsch sein, zu schliessen, dass jede Glühlampe diese Eigenschaft hat. Sie sehen hier eine Lampensorte, bei der bereits ein Strom von 0,5 Ampère zur Erzielung einer Helligkeit von 16 Normalkerzen genügt. Schalten wir nun die erste Lampe zwischen zwei Stellen ein,

zwischen denen eine Spannung von 65 Volt herrscht, so kommt durch sie ein Strom von 0,85 Ampère zu Stande, der sie normal leuchten lässt. Ich wiederhole den Versuch mit der zweiten Lampe, sie erglüht mit einer bei weitem geringeren Helligkeit: eine Spannung von 65 Volt genügt nicht, um sie mit der nöthigen Stromstärke von 0,5 Ampère zu speisen. Will ich sie mit 16 Normalkerzen erglühen lassen, so muss ich zwischen ihren Enden eine Spannung von 110 Volt bestehen lassen; dann erst nimmt sich die Glühlampe eine Stromstärke von ungefähr 0,5 Ampère und bringt einen Lichteffect von 16, d. h. einen Lichteffect, welcher sechzehnmal so stark ist als derjenige einer bestimmten vereinbarten Einheitslichtquelle, hervor. Die erste Lampe hatte die Eigenschaft, wenn zwischen ihren Enden eine Spannung von 65 Volt bestand, sich eine Stromstärke von 0,8 Ampère zu nehmen, und dann gleichfalls mit einer Helligkeit von 16 Normalkerzen zu erglühen. Die eine Lampe begnügt sich bei Leistung des gleichen Lichteffectes mit einer geringeren Stromstärke, verlangt aber bei ihrem höheren Widerstand eine höhere Spannung zur Unterhaltung dieses Stromes. Wir entnehmen hieraus, dass es in Bezug auf die Leistung weder allein auf den Betrag der Stromstärke, noch allein auf den Betrag der Spannung ankommt. Es ist vielmehr das Product aus beiden massgebend, ebenso wie für die Grösse einer Fläche weder Länge noch Breite allein, sondern deren Product, oder für die Leistung eines Dampfmaschinenkolbens oder eines Hebels weder Druck noch Geschwindigkeit allein, sondern ihr Product in Betracht kommt. 110 Volt bei 0,5 Ampère giebt 55 in einer Einheit, die man „Volt-Ampère“ zu nennen hätte, wofür auch der kürzere Ausdruck „Watt“, nach dem berühmten englischen Techniker, gebraucht wird. 65 Volt bei 0,85 Ampère giebt ebenfalls 55 Volt-Ampère. Sie sehen die gleiche Zahl in beiden Fällen. Wir können also 16 Normalkerzen bei einer Spannung von 110 Volt mit Hilfe eines Stromes von 0,5 Ampère oder bei einer Spannung von 65 Volt mit Hilfe eines Stromes von 0,85 Ampère hervorbringen. Massgebend für die zu erzielende Leistung ist das Product aus Volt und Ampère. Handelt es sich um eine bestimmte Lampe, ein bestimmtes Object, so war der Grad des zu erzielenden Effectes ausschliesslich von der Stromstärke oder mit dieser von

der Spannung abhängig, die zu deren Unterhalt erforderlich ist. Nehmen wir verschiedene Lampen, so werden wir im Allgemeinen finden, dass für jede Kerzenstärke, welche die Lampe ausstrahlt, der Aufwand eines elektrischen Effectes von ungefähr $\frac{55}{16}$, gleich $3\frac{1}{2}$ Volt-Ampère oder Watt nothwendig ist.

Wir wollen uns von diesen Verhältnissen noch in anderer Weise Rechenschaft ablegen. Nehmen wir an, wir wollen zwei gleiche Glühlampen zugleich leuchten lassen, so lässt sich dies auf zwei verschiedene Weisen erreichen. Wir könnten zunächst durch die eine Lampe einen Strom von 0,85 Ampère durchschicken, eine zweite folgen lassen, durch diese wiederum den gleichen Strom schicken und ihn von hier zur Elektrizitätsquelle zurückleiten, welche dauernd die 0,85 Ampère liefert (Fig. 28). Die erste Lampe gestattet aber diesem Strom den Durchgang auf Grund ihres Widerstands nur unter der Bedingung, dass

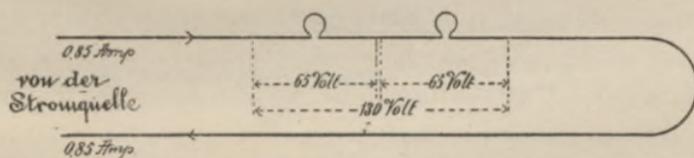


Fig. 28.

ihr 65 Volt zur Verfügung gestellt werden. Sie wird also 65 Volt vernichten. Die zweite Lampe verlangt für den Durchgang gleichfalls ihre 65 Volt, und sollen nun beide Lampen erglühen, so ist das nur dann möglich, wenn die Betriebsmaschine wirklich die verlangten 130 Volt liefert. Die Maschine hat dann bei „Hinter-einanderschaltung“ der Lampen 130 Volt bei 0,85 Ampère zu liefern, sie hat 110,5 Volt-Ampère zu leisten. Nun aber ist noch eine andere Schaltung möglich! Wie wir von früher wissen, brennt jede dieser Lampen richtig, wenn sie 65 Volt bekommt. Wir lassen also zwischen zwei Drähten eine Spannung von 65 Volt bestehen (Fig. 29). Dazwischen wird die erste Lampe eingeschaltet, findet 65 Volt und nimmt sich ihre 0,85 Ampère. Zwischen dieselben Drähte wird die zweite Lampe angeschlossen, auch sie findet die 65 Volt, die sie verlangt, und nimmt sich ihrerseits 0,85 Ampère. Die Maschine muss also $2 \times 0,85$ gleich 1,7 Ampère bei 65 Volt leisten oder $65 \times 1,7$ gleich 110,5 Volt-Ampère. Eine solche

Schaltung, bei der die einzelnen Verbrauchstellen zwischen dieselben Punkte geschaltet sind, von derselben Spannung gespeist werden, nennt man „Parallelschaltung“, und wir sehen, dass bei ihr durch jede unserer beiden Verbrauchstellen, unabhängig von der andern, diejenige Stromstärke fliesst, welche ihr gemäss der herrschenden Spannung und ihrem Widerstand zukommt. Vor Allem aber beachten wir, dass der aufzuwendende elektrische Effect in beiden Fällen der gleiche ist.

Wenn nun die Aufgabe gestellt ist, über einen gegebenen Raum einen bestimmten elektrischen Effect zu senden, z. B. die 18 sechzehnerzigen Lampen der Krone des Hörsaales mit elektrischer Energie zu versehen, so behalten wir im Auge, dass jede einzelne von ihnen 55 Volt-Ampère braucht. Es werden also 18×55 oder 990 Volt-Ampère und zwar im speciellen Fall in Gestalt von $65 \text{ Volt} \times 15,3 \text{ Ampère}$ gebraucht. Denn die verwandten

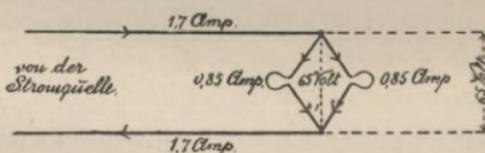


Fig. 29.

Lampen brennen nur bei 65 Volt richtig. Wäre die andere Lampensorte gewählt worden, welche bei 110 Volt richtig brennt, sich aber mit einer geringeren Stromstärke begnügt, so würde eine Stromstärke von 9 Ampère genügt haben, während in unserm Falle 15,3 Ampère nöthig sind.

In Bezug auf den Leuchteffect ist es vollständig gleichgültig, ob man bei jedesmal entsprechender Lampensorte die Kronleuchter mit 65 Volt bei 15,3 Ampère, oder mit 110 Volt bei 9 Ampère speist. Aber in Bezug auf den Transport ist es nicht gleichgültig, denn, wie wir früher gesehen haben, ist derjenige Betrag an Spannung, welcher als Zoll für den Hindurchgang eines Stromes durch irgend einen Leiter — hier durch die Kupferdrähte, welche den Strom dem Kronleuchter zuführen — abzugeben ist, ausser von dem Widerstand des Weges lediglich von der Stromstärke abhängig. Darum ist ein um so geringerer Tribut zu zahlen, mit je geringerer Stromstärke man auskommt, und wir ver-

lieren in unserem Falle weniger, wenn wir mit 9 Ampère, als wenn wir mit 15,3 Ampère arbeiten. Für so geringe Entfernungen wie sie eine Einzelanlage z. B. für diesen Hörsaal darbietet, kommt dieser Betrag bereits bei einer Betriebsspannung von 65 Volt nicht wesentlich in Betracht. Für die Vertheilung elektrischer Energie über grössere Flächen aber ergibt sich die Nothwendigkeit, mit hoher Spannung zu arbeiten, in gleicher Weise, wie das Entsprechende im Allgemeinen für jedwede Art von Energieversorgung gilt. Denken Sie an die Versorgung eines ausgedehnten Gebietes mit Energie in Gestalt von Druckwasser, so wird ein Kubikmeter Wasser eine um so grössere Arbeit verrichten können, je stärker der Druck ist, unter welchem er zur Verwendung gelangt. So arbeitet die hydraulische Anlage auf dem Hauptbahnhof zu Frankfurt a. M., eine der bedeutendsten Anlage dieser Art mit Wasser unter einem Drucke von 70 Atmosphären. Käme ein Druck von 35 Atmosphären in Anwendung, so würde man die doppelte Wassermenge zu transportiren haben, um den gleichen Effect zu erzielen, und hätte dementsprechend mit grösseren Druckverlusten zu rechnen oder eine entsprechend weitere und darum theurere Rohrleitung zu wählen.

Erörtern wir wegen der Wichtigkeit des Problems dasselbe noch an einem anderen, elektrischen Beispiel. Gelegentlich der Elektrotechnischen Ausstellung im Jahre 1891 wurde eine Leistung von 300 Pferdestärken, dem Neckar bei Lauffen entstammend, über eine Entfernung von 175 Kilometer nach Frankfurt a. M. übertragen. Rechnen wir auf jede Pferdekraft ungefähr 600 Volt-Ampère, so konnten die Maschinen 600×300 Volt-Ampère liefern, d. h. man hätte je nach Wahl der aufgestellten Maschinen 600 Volt bei 300 Ampère, oder 1200 Volt bei 150 Ampère, oder 2400 Volt bei 75 Ampère entnehmen können u. s. f. Wir wollen zunächst eine Spannung von 600 Volt bei 300 Ampère Stromstärke ins Auge fassen. Dieser elektrische Effect sollte durch eine Drahtleitung von im Ganzen 350 Kilometer übertragen werden. Nun wissen wir, dass Draht den Strom nicht umsonst durchlässt; er verlangt einen Zoll an Spannung, und wir wollen dafür von vornherein 10% des Betrages zur Verfügung stellen. Wir dürfen also auf dem Wege 60 Volt verlieren und fragen uns, wie wir die Leitung

zu wählen haben. Der Elektrotechniker weiss, dass 1 Meter Kupferdraht von 1 Quadratmillimeter Querschnitt einen Widerstand von ungefähr $\frac{1}{60}$ Ohm besitzt, d. h. wenn durch ihn hindurch ein Strom von 1 Ampère geht, bedingt dies eine Spannungsabgabe von etwa $\frac{1}{60}$ Volt. Für einen Strom von 300 Ampère verlangt der Draht auch die 300fache Abgabe an Volt. Nun aber nehmen wir den Draht nicht von einem Quadratmillimeter, wir kennen seinen Querschnitt überhaupt noch nicht und nennen ihn x . Wenn der Draht stärker ist, so gestattet er der Elektrizität entsprechend leichter den Durchgang, und wir erhalten einen Verlust von $\frac{1}{60 \times x}$ Volt für jedes

Ampère auf den Meter. Auf die 350 000 Meter erhielten wir bei einer Stromstärke von 300 Ampère einen Verlust von $\frac{300 \times 350\,000}{60 \times x}$

Volt. Damit dieser Betrag gleich 60 Volt werde, müssten wir $x = \frac{300 \times 350\,000}{60 \times 60}$ machen, d. h. den Querschnitt zu 29 000 qmm

wählen, der Leitung einen Durchmesser von ungefähr $\frac{1}{5}$ Meter geben! Davon kann natürlich keine Rede sein, und wir sehen, dass man die Energie in Gestalt von 600 Volt bei 300 Ampère über die gegebene Entfernung nicht hätte transportiren können, sondern eine geringere Stromstärke und darum andererseits höhere Spannung zu wählen hatte. Ueberträgt man die Energie unter 30 000 Volt, so kommt man mit einer Stromstärke von nur 6 Ampère aus, da 6 Ampère bei 30 000 Volt gerade so viel werth sind, wie 300 Ampère bei 600 Volt. Bei einer Stromstärke von 6 Ampère muss man für ihren Transport über den gleichen Weg nur den fünfzigsten Theil des Zolles zahlen, als bei der vorher gewählten Stromstärke von 300 Ampère. Ferner hätten wir jetzt eine Spannung von 30 000 Volt zur Verfügung und könnten als 10 % des Betrages 300 Volt hingeben. Das Resultat ist, dass wir mit einem Drahte auskommen würden, dessen Durchmesser etwa 4 mm beträge; ein schlagendes Beispiel für den wichtigen Grundsatz, sich für Fortleitung elektrischer Energie über grosse Entfernungen ihrer in Form hoher Spannung und dementsprechend geringerer Stromstärke zu bedienen. In Wirklichkeit lagen die Verhältnisse für die Lauffen-Frankfurter Leitung anders, als sie hier im Interesse der Einfachheit angenommen wurden, da das verwandte

„Drehstrom-System“, eine besondere Art von Wechselstromsystem sich statt der gewöhnlichen Hin- und Rückleitung einer dreifachen Verbindung von Stromerzeugungs- und Verwendungsstelle bediente.

Es handelt sich aber schliesslich nicht darum, die elektrische Energie nur zu transportiren, wir wollen sie vor Allem auch benutzen, und es fragt sich, könnten wir das mit elektrischer Energie, welche uns unter 30 000 Volt zugeführt würde, ebenso bequem wie mit solcher unter anderen Verhältnissen? Die Antwort wird von vornherein ein unbedingtes Nein sein. Denn in ähnlicher Weise, wie ja auch bei den zum Vergleich herangezogenen Druckkräften die Schwierigkeit, diese Kräfte auf denjenigen Wirkungskreis zu concentriren, welcher ihnen angewiesen ist, mit der Höhe des Druckes wächst, — wie es schwieriger ist, ein Rohr gegen 70 Atmosphären als gegen 5 Atmosphären zu dichten — so geht es auch bei der Elektrizität mit der Schwierigkeit der Isolation. Wie die hohen Druckverhältnisse auf mechanischem Wege in vielen Fällen mit Gefahr für die Personen, welche mit den betreffenden Apparaten zu thun haben, verbunden sind, ist dies ähnlich bei der Elektrizität der Fall. Es unterliegt keinem Zweifel, dass eine Spannung von Tausenden von Volt, zwischen Stellen des menschlichen Körpers wirkend, durch diesen einen Strom zu Stande kommen liesse, welcher tödtlich wäre. Es verbietet sich daher, derartig hohe Spannungen zwischen Stellen bestehen zu lassen, welche Personen leicht zugänglich sind. Aber weiterhin böte die Verwendung so hoher Spannungen noch Schwierigkeiten in Bezug auf die Construction der Apparate, welche mit ausserordentlich geringen Stromstärken arbeiten müssten, so dass es in vielen Fällen — z. B. bei Glühlampen — gar nicht möglich wäre, brauchbare Apparate zu bauen. Somit ergiebt sich die Forderung, an den Verbrauchsstellen mit niedriger, an den Vertheilungstellen mit hoher Spannung zu arbeiten, und wir bedürfen eines Apparates, welcher die Aufgabe löst, die hohe Spannung des Vertheilungsnetzes auf die niedere Spannung der Verbrauchsstelle zu reduciren. Diese Aufgabe ist es, welche der Transformator löst, dessen Wirkungsweise wir im letzten Vortrage verstehen lernten.

Zur experimentellen Darstellung der entwickelten Gesichtspunkte entnehmen wir der Maschine Wechselstrom unter 50 Volt Spannung und führen ihn von den Anschlussklemmen des Experimentirtisches nach den dünnadrächtigen Windungen des Transformators, in denen dann ein Strom, unterhalten durch jene 50 Volt, fließt. Infolgedessen unterliegt, wie früher besprochen, der Eisenkern des Transformators wechselnder Magnetisirung und inducirt dadurch in den secundären, starkdrächtigen Windungen eine elektromotorische Kraft, deren Betrag gemäss Bauart und Verwendungsweise des Transformators, wie uns ein an die secundären Klemmen angeschlossenes Voltmeter verräth, 5 Volt beträgt. Von diesen Klemmen führt eine kurze, starke Leitung nach einer Lichtstation im Kleinen, durch eine Glühlampe dargestellt, welche wir bei Einschaltung hell erglühen sehen. Ein eingeschaltetes Ampèremeter aber besagt, dass im secundären Netz eine Stromstärke von 10 Ampère herrscht, während im primären nur eine solche von 1 Ampère fließt. Zur besseren Veranschaulichung des besprochenen Einflusses der Verschiedenheit der Stromstärke auf den Betrag des sich durch den Widerstand der Leitung ergebenden Spannungsverlustes wähle ich bei der experimentellen Durchführung die Verhältnisse übertrieben. Sollte der hier verwandte Transformator die Maschinenstation einer Centrale, die Lampe die Verbrauchstellen andeuten, so will ich zwischen beide — in den Verbrauchstromkreis — einen Widerstand einfügen, der den Einfluss längerer Leitungen zeigen soll. Sie sehen jetzt ein ärmliches Erglühen der Lampe eintreten (Fig. 30). Der Widerstand der Leitung verlangt seinen Zoll, infolgedessen sinkt der für die Lampe verfügbare Betrag, damit die Stromstärke, die Lampe brennt dunkler. Das zu umgehen, müsste von vornherein ein entsprechend höherer Spannungsbetrag hinzugegeben werden, und zwar verschieden je nach der entnommenen Stromstärke. Nun wollen wir eine andere Zuführungsweise wählen, nämlich unter „hoher“ Spannung (50 Volt) zuführen, erst an der Verbrauchsstelle auf niedrigere Spannung (5 Volt) transformiren. Dann brauchen wir für die gleiche Energie durch den Widerstand, welcher die langen Leitungen ersetzen soll, nur eine Stärke von 1 Ampère unter 50 Volt statt 10 Ampère unter 5 Volt zu transportiren. Diese Spannung von 50 Volt können wir für die benutzte Lampe nicht

gebrauchen, darum stelle ich in der Nähe der Verbrauchsstelle den Transformator auf, und dieser verwandelt uns den schwachen Strom von 1 Ampère unter einer Spannung von 50 Volt in einen

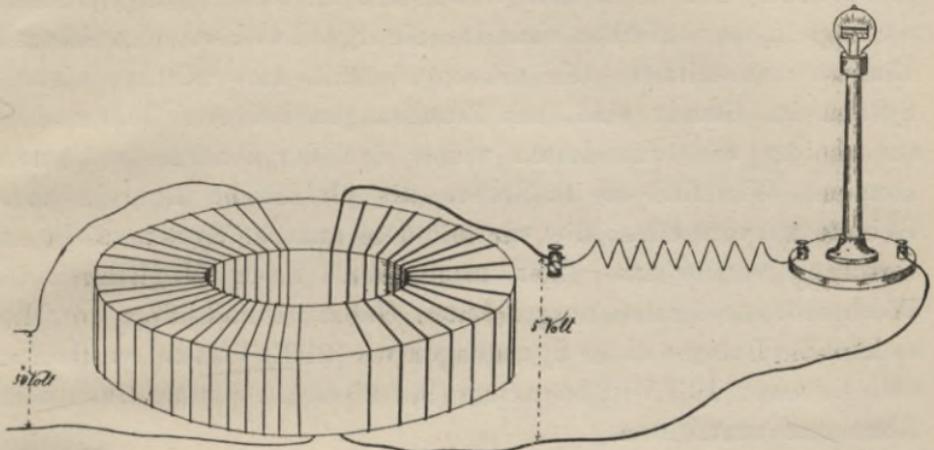


Fig. 30.

Strom von 10 Ampère unter 5 Volt. Zur Darstellung unterbreche ich die Verbindung mit der Haupt-Centrale (der Maschine im Keller) und schalte in den Weg nach dem Transformator, also in den primären Stromkreis, in welchem der elektrische Effect

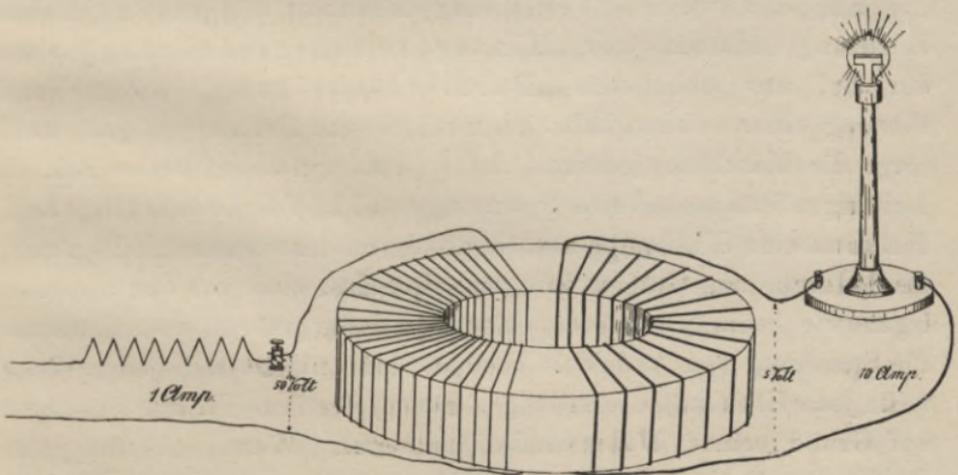


Fig. 31.

hohe Spannung, aber geringe Stromstärke hat, denselben Widerstand ein, der vorher so böse Folgen hatte, dass er unserer Lampe ein regelrechtes Erglühen nicht gestattete (Fig. 31). Jetzt schieke

ich also durch den gleichen Widerstand nicht den starken Strom der Verbrauchsleitung, sondern den verhältnissmässig schwachen Strom der „Hochspannungsleitung“. Ich schalte ein, die Lampe erglüht ungeschwächt. Ich kann den Widerstand an seiner jetzigen Stelle verdoppeln, vervierfachen, ohne dass Sie irgend welchen bemerkbaren Einfluss wahrnehmen. Sie erkennen somit, dass wir bei diesem System im Stande sind, mit Zuführungen höheren Widerstands zu arbeiten und uns darum weiter von der Centrale entfernen können. Wir sind so im Stande, die elektrische Energie über Gebiete zu vertheilen, die wir mit dem anderen System nicht zu versorgen vermöchten. Man macht von dieser Möglichkeit in Wechselstromcentralen ausgedehnten Gebrauch und pflegt dort die elektrische Energie unter Spannungen von 2000 Volt zu vertheilen und sie unter 100 Volt Spannung (bei 20 facher Stromstärke) dem Abnehmer zuzuführen.

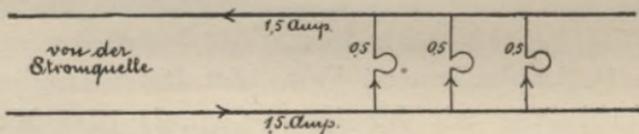


Fig. 32.

Für die weitere Vertheilung könnten wir uns zweierlei Schaltung bedienen, der „Hintereinanderschaltung“ oder der bei uns üblicheren „Parallelschaltung“. Zur Vorführung einer solchen habe ich zwei blanke Drähte gezogen, und sorgt die Maschine jederzeit dafür, dass zwischen diesen beiden Leitungen fortdauernd eine Spannung von 110 Volt besteht (Fig. 32). Ich kann eine Glühlampe nach der anderen dazwischen schalten und sie dadurch zum Glühen bringen, ohne dass eine von der anderen irgendwie beeinflusst würde. Es ist ja dafür gesorgt, dass dauernd die Spannung von 110 Volt besteht, dann nimmt sich jeder Weg, z. B. jede Glühlampe, denjenigen Strom, der ihm bei einer solchen auf Grund seines Widerstandes zukommt. Wenn ich nun jetzt die beiden Drähte durch einen Weg von sehr geringem Widerstande überbrücken wollte, z. B. durch einen Kupferdraht, der einen Widerstand von Hundertsteln von Ohm besitzt, so würde ich einen Strom von ausserordentlicher Stärke erhalten, und dieser Strom könnte in der Praxis durch die bedeutende Erwärmung

der Drähte im Innern bewohnter Räume gefährlich werden; es könnte benachbartes Holz in Brand gerathen. Wir bedürfen einer Vorrichtung, derartige Vorgänge unmöglich zu machen. Zu diesem Zwecke befinden sich in jeder Leitung leicht schmelzbare Metallstreifen, welche sich bei Durchgang des Stromes stärker erwärmen als diejenigen Theile, welche wir schützen wollen, und ist z. B. diese Vorrichtung hier so bemessen, dass sie nur einen Stromdurchgang von etwa 10 Ampère gestattet (Fig. 33). Steigt nämlich infolge irgend welcher Uncorrectheit der Strom über dieses Maass, so erwärmt sich die Vorrichtung derart, dass sie schmilzt und den Stromkreis unterbricht. Ich überbrücke die Drähte durch den blanken Draht, bewirke einen „Kurzschluss“, sofort schmilzt die „Sicherheit“ durch, unterbricht den Stromkreis, und jeder gefahrdrohenden Erwärmung ist die Möglichkeit abgeschnitten.

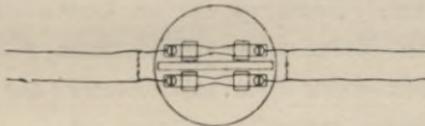


Fig. 33.

Wir haben in der ausgeführten Schaltung ein sogenanntes Zweileiter-System. Ein solches arbeitet mit derjenigen Spannung zwischen den einzelnen Theilen, welche die betreffende Verbrauchsstelle bedarf. Man ist in neuerer Zeit häufig zu Vertheilungsnetzen anderer Art übergegangen. Eine Dynamomaschine der Station liefert eine Spannung von 110 Volt, jede einzelne Lampe nimmt sich die ihr zukommende Stromstärke es fließt der entsprechende Strom im einen Leitungsstrang A von der Station nach dem Verbrauchspunkt, im anderen B vom Verbrauchspunkt nach der Station zurück (Fig. 34). Daneben wird eine zweite Dynamomaschine aufgestellt, von der wiederum ein Strom durch ein Kabel C aus der „Centralstation“ nach der „Stadt“ und durch D nach der Centralstation zurückfließt. Wenn nun im einen Netz ebensoviel Lampen brennen, als im anderen, so muss im Kabel C gerade soviel Elektrizität nach der Stadt geführt werden, als in dem daneben liegenden Kabel B aus ihr zurückfließt. Sollte man da nicht eine Vereinfachung eintreten lassen und den complicirten Hin- und Hertransport sparen können? In der That ist dies

möglich. Verbindet man die beiden „Mittelleiter“ B und C und wählt statt dieser beiden Kabel ein einziges, so braucht auf dem Mittelwege weder Elektrizität nach der Stadt, noch Elektrizität aus der Stadt zu fließen; wir sparen den Transport und dadurch an Spannung. Wir kommen entweder mit dem halben Spannungsabfall, oder wir kommen mit schwächeren Kabeln aus. Nach dieser Darstellung könnte der Mittelleiter als stromlos überhaupt

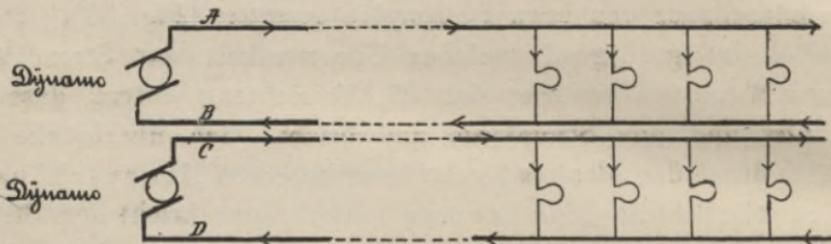


Fig. 34.

in Wegfall kommen. Aber es ist zu bedenken, dass in Wirklichkeit die beiden Netze nie vollkommen gleich belastet sein werden, und es fällt dann dem Mittelleiter die Aufgabe zu, den Unterschied der Belastungen an Strom zu führen. Nehmen wir z. B. an, in der einen Hälfte des Vertheilungsnetzes würden 200, in der anderen 180 Ampère gebraucht, so hätten die „äusseren“ Leitungen 200 beziehungsweise 180 Ampère, der Mittelleiter aber nur 20 Ampère zu führen (Fig. 35).

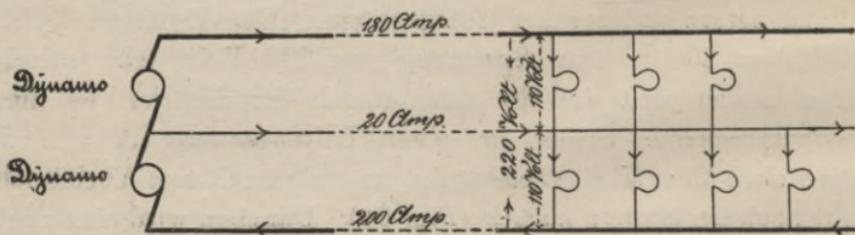


Fig. 35.

Das hier skizzierte Princip ist dasjenige, welches bei dem „Dreileitersystem“ verwendet wird. Worin ist es principiell begründet, dass wir mit geringerem Spannungsabfall oder schwächeren Kabeln auskommen? Wir erkennen, dass wir es hier im Vertheilungsnetz mit Verwendung einer erhöhten Spannung zu thun haben, denn zwischen den Kabeln A und B, beziehungsweise C

und D bestehen Spannungen von 110 Volt, mithin zwischen den beiden äussersten Stellen A und D eine solche von 220 Volt, aber an die einzelne Lampe, an die einzelne Verbrauchsstelle gelangt nur eine Spannung des einfachen Betrages, eine nutzbringende Verwendung findet direct nur der Betrag von 110 Volt. Um Ihnen das Princip im Kleinen zu veranschaulichen, habe ich zwei Accumulatoren und zwei Lämpchen aufgestellt. Jeder könnte sein Lämpchen mit voller Helligkeit erstrahlen lassen. Aber um einen merkbaren Spannungsverlust darin zu erzielen, habe ich die Zuleitungen etwas lang genommen, und darum sehen Sie die Lämpchen nur halbhell erglügen (Fig. 36). Ich verbinde die positive

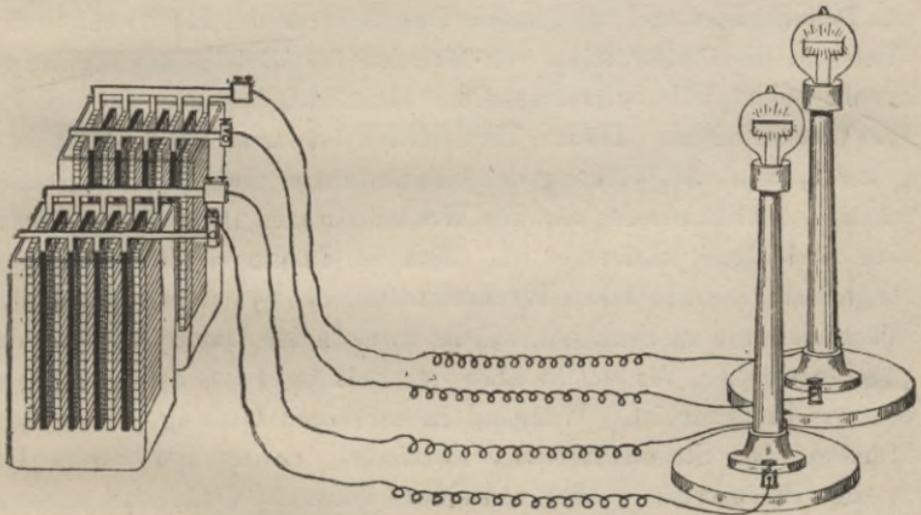


Fig. 36.

Klemme des einen mit der negativen des anderen, lasse die Mittelleiter zusammen fallen — verwandle die beiden selbständigen Zweileitersysteme in ein Dreileitersystem — und beide Lampen leuchten hell.

Konnten auch die Verhältnisse, welche für den Aufbau der Vertheilungssysteme maassgebend sind, hier nur gestreift werden, so wollte ich doch das Princip hervortreten lassen, dass es darauf ankommt, die Elektrizität unter hoher Spannung zu vertheilen und sie dem Consumenten in Gestalt geringer Spannung, aber grosser Stromstärke zugänglich zu machen. Dies geschah bei Gleichstrom durch das Dreileitersystem, über das hinaus man hie und da zum Fünfleitersystem übergegangen ist. Diese „Mehr-

leitersysteme“ bedingen aber ihrer Natur nach eine Complication der Anlage. Für Wechselstrombetrieb bildet der Transformator ein überaus einfaches Mittel, die unter hoher Spannung zu vertheilende elektrische Energie dem Consumenten in Gestalt geringerer Spannung, aber grösserer Stromstärke zugänglich zu machen. In dieser Eignung zur Transformation, welche bei Gleichstrombetrieb nur auf umständlicherem Wege möglich ist, liegt die hohe Bedeutung des Wechselstromes bei grossen Entfernungen begründet. In Bezug auf Verwendung sprechen jedoch wieder einige Punkte zu Gunsten des Gleichstromes: die Möglichkeit directer Aufspeicherung in Accumulatoren, welche auch gerade in Centralen ausgedehnte Verwendung finden, Vorzüge des Bogenlichtes und schliesslich Unterschiede der Elektromotoren. Während die Construction von Motoren für Gleichstrom von vornherein prinzipielle Schwierigkeiten nicht bot, ergaben sich solche für Wechselstrom. Dieser Unterschied ist zum Theil darin begründet, dass die Wirkung des Gleichstromes eine in sich gleichmässige, continuirliche, die des Wechselstromes ihrer Natur nach eine periodisch pulsirende ist. Man ist darum vielfach dazu gelangt, statt eines einfachen Wechselstromes ein System verschiedener Wechselströme zu benutzen, welche zwar in der Dauer der Periode übereinstimmen, für welche aber der Zeitpunkt des Stromwechsels ein verschiedener ist. Während in der einen Leitung gerade der Moment des Strommaximums stattfindet, besitzt der Strom im zweiten Stromkreis — der von einem anderen Wechselstromanker gespeist werde — den Werth Null. Man sagt dann, die beiden Wechselströme unterscheiden sich durch die „Phase“. Durch geeignete Verwendung verschiedenphasiger Wechselströme findet ein Ueberdecken der Stromschwankungen statt, und man ist so in den Stand gesetzt, den Gleichstrommotoren ebenbürtige Wechselstrommotoren zu erhalten. Diese Motoren haben von gewissen Wirkungen, die man bei geeigneten Vorkehrungen mit solchen mehrphasigen Wechselströmen erzielen kann, den Namen „Drehstrommotoren“, das betreffende Vertheilungssystem den Namen „Drehstromsystem“ erhalten. Das Drehstromsystem hat mit dem gewöhnlichen Wechselstromsystem den Vorzug einfacher Transformirung gemein, steht dem Gleichstromsystem in Bezug auf den Elektromotor nicht nach, nimmt aber als Mehrleitersystem die

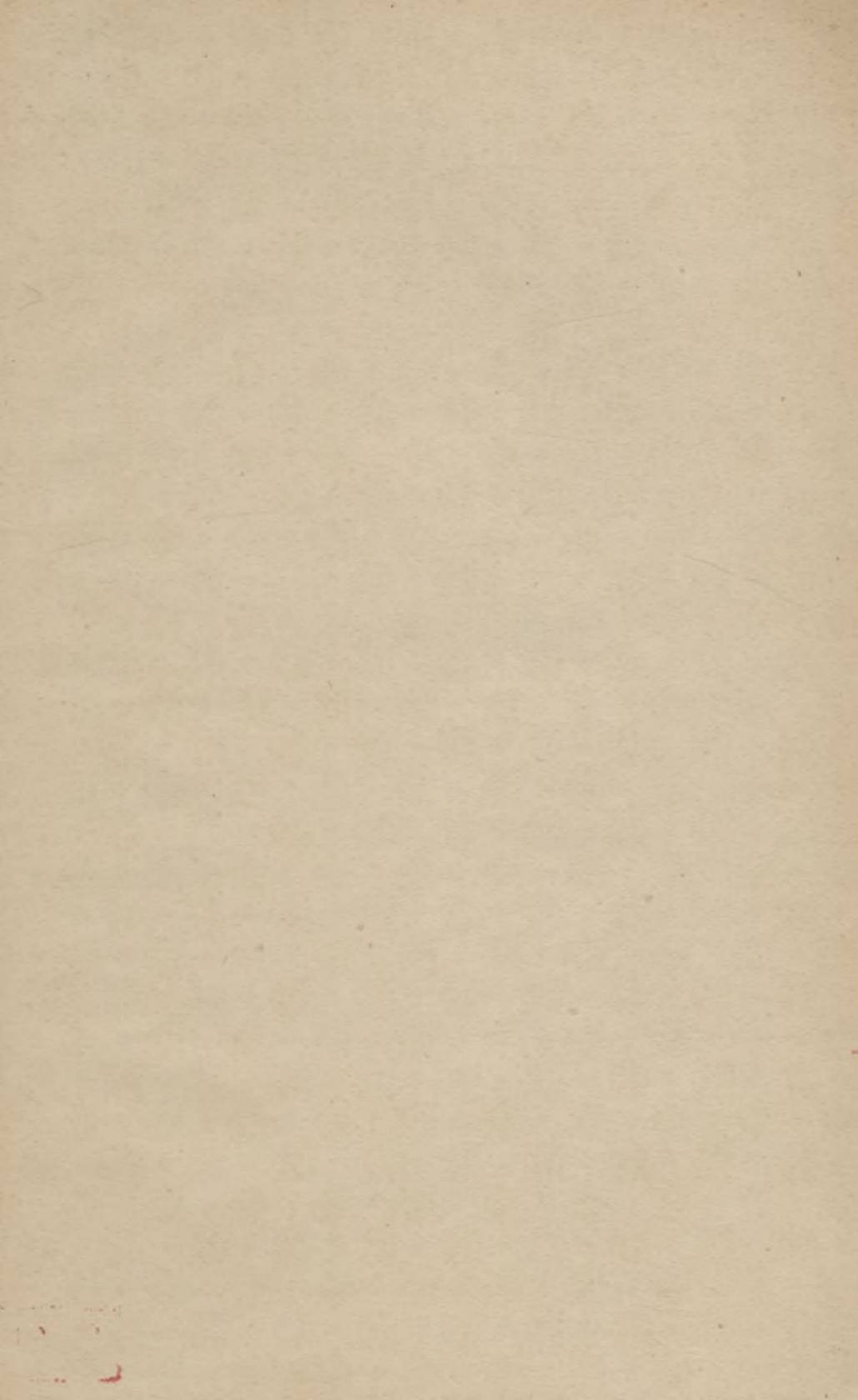
Complication der Leitung in Kauf, während es in Bezug auf Bogenlichtbeleuchtung gegenüber dem einfachen Wechselstromsystem keinen Unterschied aufweist.

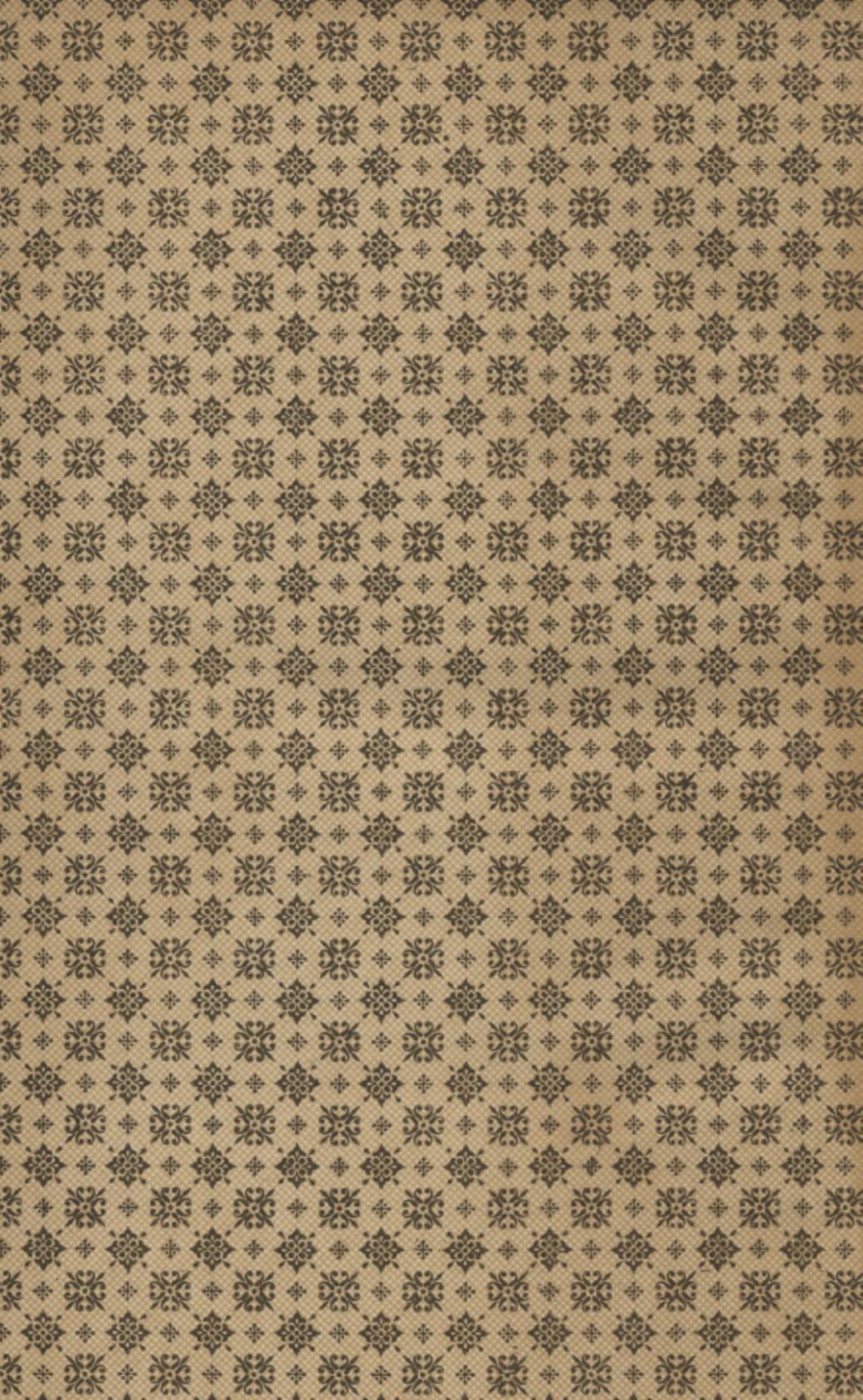
Wir wollen hiermit unsere gemeinschaftlichen Betrachtungen schliessen. Dieselben können keineswegs den Anspruch erheben, erschöpfend zu sein; es fiel ihnen lediglich die Aufgabe zu, dem Interesse für die physikalischen Grundlagen der Elektrotechnik Rechnung zu tragen und diejenigen Begriffe und Gesichtspunkte zu entwickeln, deren Verständniss die Möglichkeit eröffnet, dem weiteren Fortschritt zu folgen oder in spezielle Gebiete einzudringen.

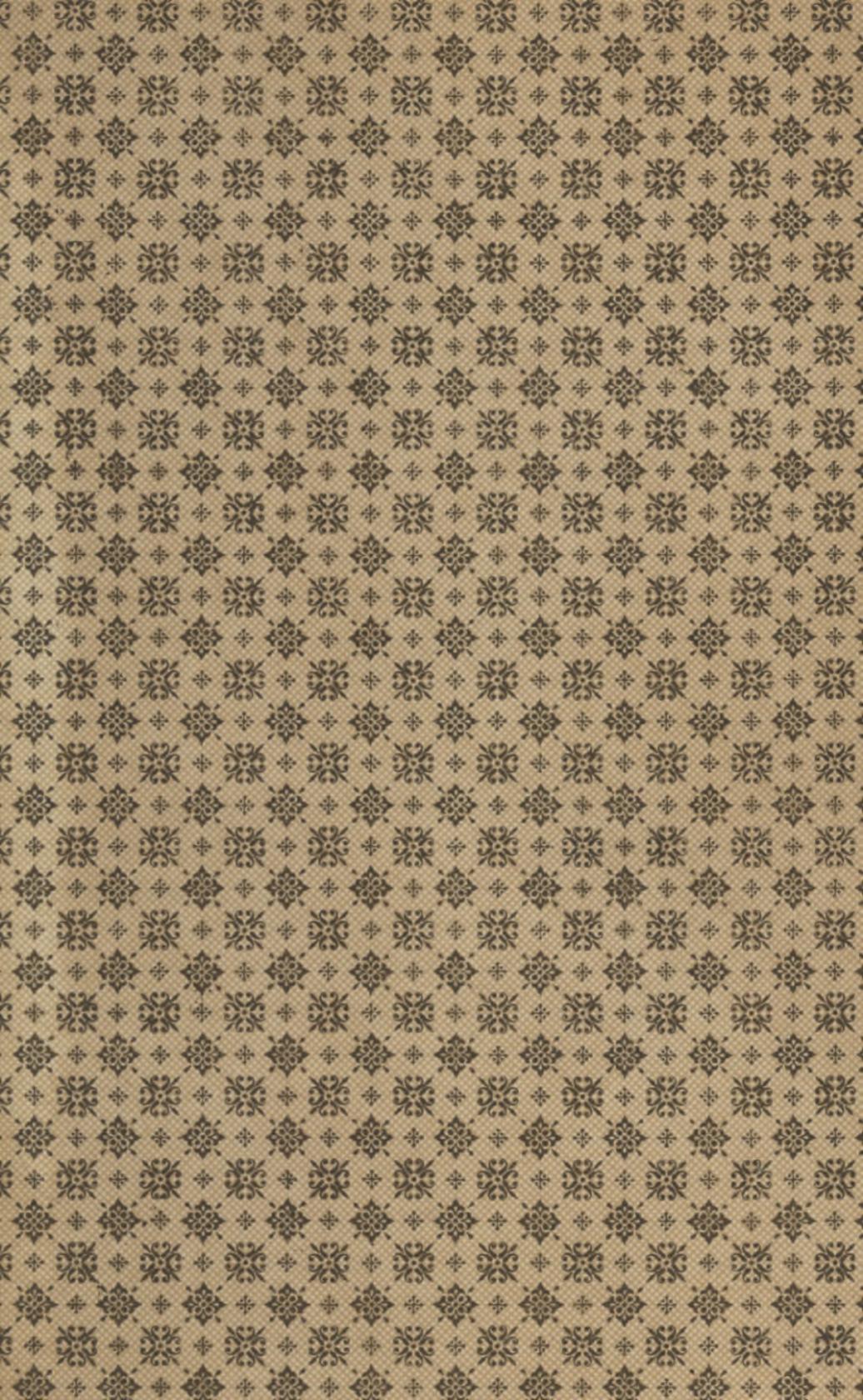


Pierer'sche Hofbuchdruckerei. Stephan Geibel & Co. in Altenburg.

S. 61







WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

II 5499

L. inw.

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000299123