

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

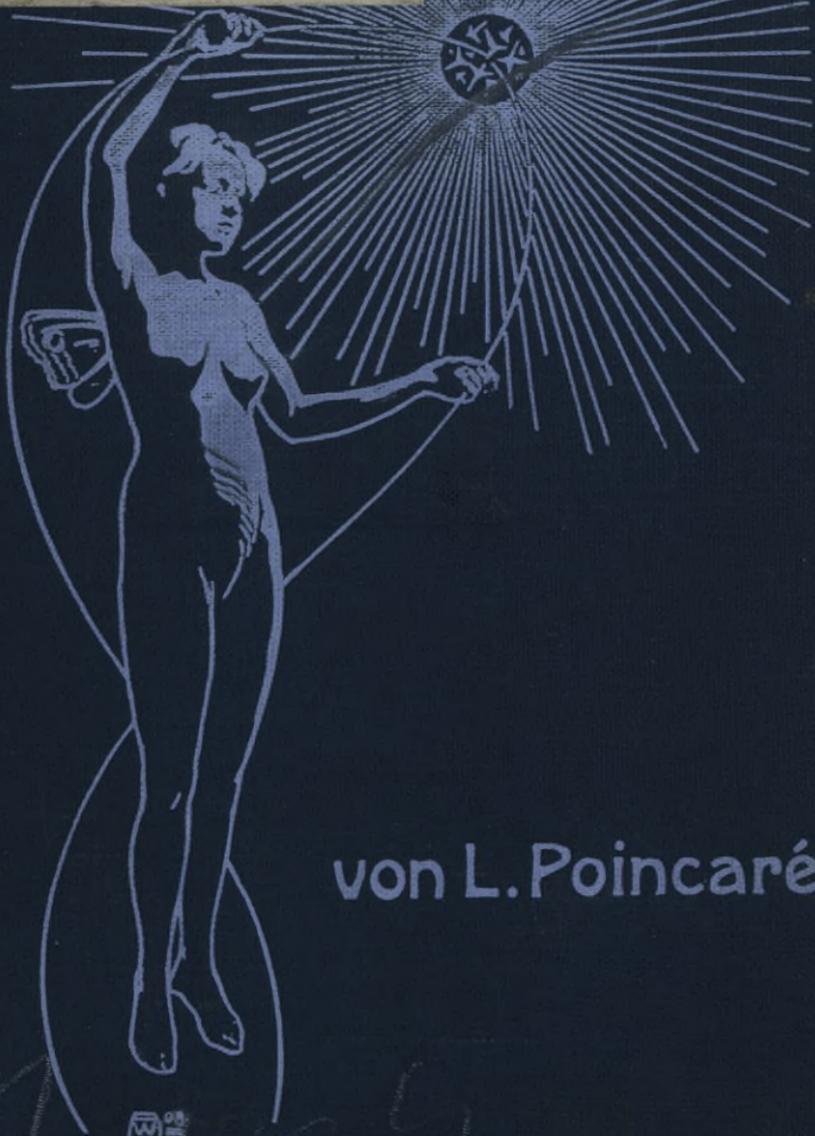
BIBLIOTEKA GŁÓWNA



L. inw.

5141

1104
TRIZITÄT



von L. Poincaré

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000299207

Die Elektrizität

von

L. Poincaré

Übersetzt von

Professor Dr. A. Kalähne



1909

Verlag von Quelle & Meyer in Leipzig

II 5141



Vorwort.

In meinem Buche „Die moderne Physik“ habe ich weder die verschiedenen Arten der Erzeugung und Nutzbarmachung des elektrischen Stromes noch die vielfachen Anwendungen untersucht, welche in das Gebiet der Elektrotechnik gehören. Dem Studium dieser vorher absichtlich beiseite gelassenen Fragen ist der vorliegende neue Band gewidmet.

Es gibt eine große Zahl von Werken über Elektrotechnik, von denen mehrere ganz ausgezeichnet sind. Die einen, wie z. B. die bewundernswerten „Vorlesungen über allgemeine Elektrotechnik“ meines vortrefflichen Freundes P. Janet, sind umfassende wissenschaftliche Werke, die anderen sehr interessante Versuche populärer Darstellung.

Ich beabsichtige nun nicht eine schon so oft ausgeführte Arbeit noch einmal und vielleicht weniger gut zu wiederholen, und habe keineswegs ein Buch schreiben wollen, das entweder nur für Fachleute allein Nutzen hat oder umgekehrt nur für unerfahrene Anfänger paßt.

Ich wende mich vielmehr an jenes, heute so zahlreiche, aufgeklärte Publikum, das sich für den Fortschritt der Wissenschaften interessiert, um ihm ein möglichst treues Bild vom gegenwärtigen Stande der Elektrizität zu entwerfen; ich habe dabei versucht, deutlich den Ausgangspunkt und den jetzt erreichten Punkt der Entwicklung zu kennzeichnen und

habe besonders auf die praktischen Folgerungen allgemeiner Art Wert gelegt, welche die Erfindungsgabe der Forscher aus den wissenschaftlichen Grundlagen zu ziehen verstanden hat.

Vielleicht darf ich hoffen, auch den Physikern einige Dienste zu leisten, denen noch allzuoft die Anwendungen nicht bekannt sind, welche die Techniker von den aus dem Laboratorium hervorgegangenen Entdeckungen gemacht haben, und andererseits auch den Technikern, welche zuweilen die wissenschaftliche Quelle etwas aus den Augen verlieren, aus der alle Wahrheit fließt.

Berücksichtigt man den Einfluß, den die Entwicklung der Künste und Wissenschaften auf die sozialen Verhältnisse ausgeübt hat, gesteht man zu, daß unsere Ideen und Theorien in Wirklichkeit sehr oft von den Sitten und Gewohnheiten des Lebens beherrscht werden, so wird man zweifellos auch der Ansicht sein, daß ein Buch, in welchem den technischen Anwendungen im Großen ein breiter Raum gewährt ist, in welchem ernstlich versucht wird, auf Grund bestimmter Tatsachen die Richtung der gegenwärtigen industriellen Entwicklung zu kennzeichnen, wohl in einer Sammlung seinen Platz finden darf, die für Darstellungen allgemein-wissenschaftlichen Inhalts bestimmt ist.

Paris, 1908.

L. Poincaré.

Vorwort des Übersetzers.

Die deutsche Lesewelt erhält hiermit in Übersetzung ein neues Buch des Verfassers der „Modernen Physik“, des französischen Physikers Lucien Poincaré, der sich durch das eben genannte, im gleichen Verlage erschienene Werk, auch in Deutschland vorteilhaft bekannt gemacht hat. Es bildet gewissermaßen die Fortsetzung und Ergänzung dieser auch bei uns günstig aufgenommenen Studie. Schon hierdurch rechtfertigt sich die Ausgabe einer deutschen Übersetzung auch des neuen Buches, aber wohl mehr noch durch Inhalt und Form der Darstellung, welche beide in keinem deutschen Originalwerk ein entsprechendes Gegenstück haben dürften. Die französische Ausgabe ist in der von Le Bon herausgegebenen „Bibliothèque de Philosophie scientifique“ erschienen, einer Sammlung mit ähnlicher Tendenz wie die verschiedenen im deutschen Buchhandel vorhandenen Sammlungen allgemein bildenden und populär-wissenschaftlichen Inhalts. Dem entspricht der Charakter des Poincaréschen Buches; sein Ziel ist die Darstellung der Entwicklung und des gegenwärtigen Standes der Starkstrom-Elektrotechnik und der für sie wich-

tigen physikalischen Fragen in allgemeiner Form. Bei der Übersetzung bin ich dem Original möglichst treu gefolgt, um nicht eine Überarbeitung zu geben, sondern den Verfasser selbst in seiner Eigenart sprechen zu lassen.

Danzig-Langfuhr, Oktober 1908.

A. Kalähne.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Vorwort	III
Kapitel I. Die elektrische Energie, und ihre industriellen Anwendungen	1
Kapitel II. Der Magnetismus.	
1. Magnete und magnetisches Feld	16
2. Die induzierte Magnetisierung	25
3. Magnetische Eigenschaften verschiedener Substanzen	33
4. Beziehungen zwischen den magnetischen und anderen Erscheinungen	40
5. Theorien des Magnetismus	46
Kapitel III. Die Induktion und der elektrische Strom.	
1. Die Induktion als elektrische Grunderscheinung	51
2. Die Theorien der Induktion	57
3. Der magnetische Kreis	64
4. Der Wechselstrom	71
5. Die mehrphasigen Ströme und das Drehfeld	87
Kapitel IV. Die Generatoren.	
1. Die Gleichstrom-Dynamomaschinen	95
2. Die Wechselstromgeneratoren	107
3. Kuppelung und Compoundierung	114
4. Das moderne elektrische Kraftwerk	121
Kapitel V. Die Motoren.	
1. Die Gleichstrommotoren	129
2. Die Synchronmotoren	137
3. Die Asynchronmotoren	142
4. Die Serienmotoren und die Repulsionsmotoren	147
Kapitel VI. Die Übertragung der elektrischen Energie.	
1. Die wirtschaftlichen Bedingungen der Übertragung	153
2. Die ruhenden Transformatoren	159

	Seite
3. Die polymorphen Transformatoren	166
4. Der Transport und die Verteilung der Energie . . .	173
5. Die elektrischen Bahnen	179
Kapitel VII. Chemische und elektrische Energie	
1. Galvanische Kette und Thermodynamik	186
2. Die Entstehungsweise der elektromotorischen Kraft .	194
3. Die Akkumulatoren	200
4. Die Elektrochemie	209
Kapitel VIII. Die elektrische Beleuchtung.	
1. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Beleuchtung .	220
2. Die Glühlampen	229
3. Die Bogenlampen	237
4. Der Quecksilberdampf-Lichtbogen und das kalte Licht	242
Kapitel IX. Die künftige Entwicklung der Elektrizität	247
Anmerkungen	252
Namenregister	254
Sachregister	257

Kapitel I.

Die elektrische Energie und ihre industriellen Anwendungen.

1.

Alle Welt vereint sich in der Behauptung, daß die Zukunft der Elektrizität gehöre, und sicherlich berechtigen auch die glänzenden Errungenschaften von gestern zu den umfassendsten Hoffnungen für morgen.

Innerhalb weniger Jahre hat die Anwendung des elektrischen Stromes unsere Beleuchtungsmethoden, unser Transportwesen, unsere chemische Industrie umgestaltet; Telegraph und Telephon haben die Bedingungen des sozialen Lebens vollständig verändert; die Entdeckungen auf dem Gebiete der Radiographie und der Hochfrequenzströme haben in der medizinischen Praxis tiefe Wandlungen hervorgebracht, und andererseits hat, wie jeder weiß, das Studium der radioaktiven Substanzen die Physiker zu kühnen Vorstellungen über die Konstitution der Materie und die Gesetze der Mechanik geführt. In den Augen vieler moderner Gelehrter stellt sich die Sache so dar, daß man den elektrischen Erscheinungen in Zukunft die führende Rolle in der Natur zuschreiben muß; das Elektrizitätsteilchen, das Elektron, würde gewissermaßen das universelle Substrat sein.

Alle diese Fortschritte geschahen so außerordentlich rasch, daß man, bei ihrer Betrachtung wahrhaft von Staunen

ergriffen, sich gern einmal aus dem Gebiet der wissenschaftlich festgegründeten Tatsachen herauslocken läßt und damit befaßt, von zukünftigen Anwendungen zu träumen, die noch wunderbarer sind als die heutigen.

Übrigens behält die Elektrizität für die meisten Menschen einen eigentümlich fremden Charakter; das Geheimnis, das sie umgibt, fordert die Einbildungskraft zu freiem Fluge heraus und treibt die zurückhaltendsten Geister zu Gedankengängen von einer Kühnheit, welche selbst den Verwegensten unbekannt ist, wenn es sich um andere, seit langem bekannte und nutzbar gemachte Naturvorgänge handelt.

Es ist gewiß nicht unangebracht, am Eingang einer Studie über die Elektrizität die Gründe etwas genauer zu prüfen, weswegen trotz so vieler erfolgreicher Forschungen dieser Teil der Physik noch immer als ein Gebiet erscheint, das mehr als jedes andere etwas geheimnisvolles und verborgenes behält, und es ist interessant, zu untersuchen, ob diese Vorstellung in der Wirklichkeit eine sichere und feste Stütze findet.

Um es geradeheraus zu sagen: der gelehrteste Physiker kann keine wirklich befriedigende Antwort geben auf Fragen, die dem Laien besonders einfach erscheinen, und trotz so vieler bewundernswerter Bemühungen ist er noch in tiefster Unkenntnis über die wahre Natur der elektrischen Erscheinungen. Was vermag er denen zu sagen, die sich einen elektrischen Strom in greifbarer Form vorstellen möchten, die da erwarten mit ihren Augen sehen zu können, was in dem Leitungsdraht vorgeht, oder die Kraftlinien eines Magnetfeldes gewissermaßen mit Händen fühlen zu können? Will er nicht sein Unvermögen eingestehen, so ist er genötigt Vergleiche zu benutzen, wissenschaftliche Umschreibungen, welche die Unkenntnis mit mehr oder weniger gut angepaßten und bequemen Gewändern umhüllen, sie selbst aber vollständig bestehen lassen,

Man braucht indeß nur ein wenig nachzudenken und

wird bemerken, daß die Verlegenheit, in welcher sich der Gelehrte befindet, ebenso groß sein würde, wenn er eine vollständige Erklärung irgend einer anderen, gleichviel welcher, physikalischen Erscheinung geben sollte, selbst wenn sie unter den bekanntesten ausgewählt wäre. Was sollte er z. B. dem neugierigen Frager antworten, der wissen möchte, warum der eine Körper wärmer ist als der andere, wie sich die Wärme in einem leitenden Stabe fortbewegt, wie sie entsteht und verschwindet, während andere Energieformen zerstört werden oder neu auftreten?

Wenn der Physiker vor einer der einfachsten und gewöhnlichsten Anwendungen des elektrischen Stromes, sagen wir etwa angesichts einer einfachen elektrischen Klingel, etwas in Verlegenheit gerät, sobald man ihn fragt, wie denn nun die Energie des galvanischen Elementes längs des Drahtes übertragen wird und welchen Veränderungen im Eisen die Magnetisierung des Elektromagneten entspricht: hat er nicht ganz recht darauf hinzuweisen, daß er keineswegs besser imstande sei, die Neugier desjenigen vollkommen zu befriedigen, der genau von den tiefen Gründen Rechenschaft haben möchte, aus denen die alte achtungswerte Klingel von ehemals einen Ton hören läßt, wenn man an der Schnur zieht?

In der Tat! will man sich nicht mit Worten begnügen und geht man der Sache auf den Grund, muß einem dann nicht die Existenz der festen Verbindungen zwischen den Teilchen, welche einen festen Körper bilden, und die die Übertragung der Spannung längs des Fadens ermöglichen, als höchst geheimnisvoll erscheinen, als unerklärt auch die Ursache der elastischen Rückwirkung, welche die Glocke zum Vibrieren bringt, und als ganz dunkel die Natur der Schwere, welche dem Klöppel seine schwingende Bewegung erteilt?

Selbst die erleuchtetsten Geister haben die ebenso natürliche wie irreleitende Neigung, zu glauben, daß sie die Ursache einer Erscheinung erfaßt haben, wenn eine Erklärung

diese Erscheinung auf irgend eine andere schon bekannte zurückführt, an die man seit langem gewöhnt ist.

So wirken Zufälligkeiten, Einflüsse der Umgebung mit, uns die Dinge mehr oder minder geheimnisvoll erscheinen zu lassen, je nach der Laune des Zufalls, der oft allein die Reihenfolge der Entdeckungen bestimmt hat. So werden Erziehung und vielleicht auch Vererbung wichtige Faktoren, welche den Grad unserer Wißbegier bestimmen.

Das Kind von heute, das von Geburt an die verschwenderische Fülle des elektrischen Lichtes zu sehen bekommen hat, das die Stimme des Telephons in sein Stammeln hat hineinklingen hören, das seine ersten Gehversuche auf straßenbahndurchfurchten Wegen gemacht haben mag: es wird ohne Zweifel diese Anwendungen, welche die vorige Generation mit Staunen erfüllt haben, nicht mehr als so wunderbar empfinden.

Das Geheimnis bleibt bestehen, aber es erscheint weniger fremdartig; indem es zu einer vertrauten Erscheinung geworden ist, läßt es sich schwerer erkennen, es gleicht darin jenen Geräuschen, gegen welche das an sie gewöhnte Ohr taub ist, jenen Gerüchen, welche der durch Gewohnheit abgestumpfte Geruchsinn nicht mehr wahrnimmt.

Vielleicht werden später sogar manche seine Existenz überhaupt verneinen, und man wird sie dann daran erinnern müssen, daß es, um dasselbe wirklich zum Verschwinden zu bringen, nicht genügt, es nicht mehr zu beachten. Es ist damit eben nicht so, wie es sich der Laienverstand vorstellt, und die tiefliegenden Gründe dafür sind dieselben, welche man bei der Prüfung aller Naturerscheinungen antrifft: die Unvollkommenheit unserer Sinne der Außenwelt gegenüber erklärt genugsam, warum wir kein Abbild schaffen können, das in vollkommener Übereinstimmung wäre mit der objektiven Wirklichkeit.

2.

Sobald es sich um Elektrizität oder Magnetismus handelt, offenbart sich diese Schwäche des Menschen besonders stark. Man kann wohl sagen, daß in diesem Falle unsere Sinne nicht nur unfähig sind, uns Wahrnehmungen zu vermitteln, welche mit den wirklichen Vorgängen in Einklang sind, sondern daß sie sogar vollkommen unempfindlich und stumm bleiben.

Ohne Zweifel vermögen wir sehr heftige elektrische Schläge zu fühlen, die sogar schmerzhaft und zuweilen tödlich wirken können; ohne Zweifel empfinden wir ein gewisses Unbehagen im Augenblick eines Gewitters, wenn sich unser Potential plötzlich ändert, aber wie verworren sind solche Eindrücke und wie unbestimmt die Erkenntnis, die sie uns vermitteln können.

Allerdings werden in der elektromagnetischen Theorie die Erscheinungen des Lichtes als elektrische Phänomene angesehen, allerdings besteht für die Anhänger der neuen Ideen die ganze Materie aus elektrisch geladenen Teilchen, und demzufolge sind vom Standpunkt des Physikers aus unsere Augen und die übrigen Sinnesorgane ebensovielen Empfangsapparate für elektrische Energie. Aber nichtsdestoweniger darf man mit Recht behaupten, daß diese Organe zum mindesten einfach ungeeignet sind, uns eine gut definierte Wahrnehmung zu vermitteln, wenn es sich um die gewöhnlichen Äußerungen der Elektrizität oder des Magnetismus handelt: in ein elektrisches Feld hineinversetzt erhalten wir nur sehr unbestimmte Eindrücke; im magnetischen Felde bleiben wir ganz ohne Empfindung.

Dieses Unvermögen ist zweifellos der Hauptgrund dafür, weswegen die Fortschritte der Elektrizität in der Vergangenheit so langsam und mühevoll erfolgt sind. Viele Jahrhunderte hindurch, in denen die Wissenschaft im Dunkeln tastete, in denen die Regeln der Experimentierkunst noch wenig bekannt waren und meist ungenau angewendet wurden, vermochte der

Mensch keinen erfolgreichen Versuch zum Eindringen in die unbekannte Welt zu machen, die sich in seiner unmittelbaren Nähe auftrat, deren Reichtümer er aber ebensowenig ahnte wie ihre Ausdehnung.

In dem Augenblick jedoch, wo die wahre physikalische Methode endlich festen Fuß faßte, verlor der Mangel spezieller Sinne, der bis dahin eine hemmende Ursache gewesen war, allen Einfluß, und ohne paradox zu werden, könnte man sogar behaupten, daß er fast zum Vorteil wurde.

In der Tat! Er veranlaßte die Physiker objektiver zu verfahren, er führte sie dazu, die wahren Gesetze der Erscheinungen aufzusuchen, er zwang sie genaue Definitionen zu geben, und so erhoben sich auf sicheren Grundlagen die schönen Gebäude der alten Elektrostatik und der Theorie des Magnetismus.

Nach den Entdeckungen Coulombs, brachten die Arbeiten eines Poisson, Green, Gauß die Theorie der elektrischen und magnetischen Gleichgewichtszustände fast zur Vollendung; diese Arbeiten bleiben dauernd vorbildlich für die Anwendung der Rechnung auf das Studium einer physikalischen Erscheinung; sie bilden ein wundervoll ineinandergefügt Ganzes und zeigen, wie man mittels der strengen und machtvollen Logik der mathematischen Analysis aus einigen sorgfältig beobachteten Grundtatsachen, einigen genauen Messungen an wohl definierten Größen eine staunenswerte Menge unerwarteter Schlüsse ziehen kann.

Ganz allein auf die Kraft des Verstandes angewiesen, wo es galt sich auf einem gewissermaßen ihren Sinnen verschlossenen Gebiet zurechtzufinden, verstanden es diese berühmten Gelehrten daselbst Wege zu finden, die um so größere Sicherheit bieten müssen, weil sie nur auf Grund feinsten und genauester Beobachtungen erschlossen wurden und ein unberechenbarer zufälliger Eindruck oder eine irreführende Sinnestäuschung daher keinen Einfluß haben konnte.

Auf den anderen Gebieten der Physik wurde im Gegensatz hierzu der Gang der Wissenschaft im allgemeinen durch die zufällige Form unsrer Sinnesindrücke vorgeschrieben und dadurch zuweilen verzögert: zu allen Zeiten haben z. B. die Menschen Wärme und Kälte empfunden, und seit langem haben die Physiker von mehr oder weniger hohen Temperaturen gesprochen; aber wieviel Jahrhunderte waren nötig, damit dieser Temperaturbegriff sich klar herauslösen und von den willkürlichen und wechselvollen Angaben unserer Sinne unabhängig darstellen konnte!

Jedermann kennt den Parallelismus¹⁾, welchen man im Elementarunterricht zwischen den Erscheinungen der Elektrizität und der Wärme aufstellt; man vergleicht die Elektrizitätsmenge mit der Wärmemenge, das elektrische Niveau oder Potential mit der Temperatur, die elektrische Kapazität mit der Wärmekapazität.

Solche Vergleiche mögen vielleicht auch für Schüler einen gewissen Nutzen bieten. Aber abgesehen davon, daß sie von vornherein mit einer gewissen Unbestimmtheit behaftet sind und immer sein werden, entsteht auch die Gefahr, daß sie bei übertriebener Anwendung zu Vorstellungen führen, die mit der wahren Natur der Dinge wenig in Einklang stehen; der Lehrer der sie mißbraucht, gleicht etwa dem Sehenden, der einem Blinden auf die Frage nach dem Sinn, welchen er mit dem Begriff des roten Lichtes verbindet, erklären wollte, daß dieses Licht dem Tone des Waldhorns ganz analog sei.

Für die Belehrung reiferer, schon mit erweiterten Kenntnissen ausgestatteter Personen, müssen diese pädagogischen Verfahren in die Acht getan werden, weil sie trotz des — in Wahrheit unzutreffenden — Anspruches, den sie erheben, tatsächlich nicht vom Einfacheren zum Komplizierteren fortschreiten, und weil sie uns den wertvollen Vorteil rauben, den wir haben, wenn wir bei der Behandlung irgend einer Erscheinung unsere Beweisführung nicht auf die gebrechliche Grundlage unserer Sinnesempfindungen zu stützen brauchen.

Mit Bezug hierauf darf man sogar behaupten, daß aus diesem Grunde unsere Kenntnis der elektrischen Erscheinungen in gewisser Hinsicht derjenigen von der Wärme überlegen ist.

In der Tat läßt sich das (elektrische) Potential sehr einfach und streng definieren, und mittels Rechnung können wir zwischen Elektrizitätsmenge und Potential eine einfache Beziehung aufstellen, was nicht möglich ist, sobald es sich um Wärmemenge und Temperatur handelt; mit anderen Worten: wir können die elektrische Kapazität eines Leiters berechnen, während wir kein Mittel haben, rechnerisch den Wert seiner Wärmekapazität zu bestimmen.

Warum also ein gekünsteltes Verfahren anwenden und Scheinbilder an die Stelle der Wirklichkeit setzen, wenn man sie entbehren kann? Warum die natürliche Reihenfolge umkehren und als einfacher ansehen, was in Wahrheit verwickelter ist?

Eine solche Methode kann nur unnützlich, ja sogar gefährlich sein.*) In dem angeführten Beispiel ist das Unzutreffende des Vergleichs übrigens geradezu in die Augen fallend; es ist nicht möglich, eine zahlenmäßig angebbare Beziehung zwischen einer Wärmemenge, die einer Energiemenge entspricht, und einer Elektrizitätsmenge aufzustellen, die erst mit einem Potential multipliziert werden muß, um eine Arbeitsgröße zu ergeben. Die Gleichsetzung ist also sehr wenig begründet und könnte zur Entstehung der schwersten Irrtümer Anlaß geben.

*) Man kann freilich einwenden, daß Ohm zu der grundlegenden Entdeckung der Gesetze über die Fortleitung der elektrischen Erscheinungen gelangt ist, indem er sich von der Analogie leiten ließ, welche diese Fortpflanzung mit dem Phänomen der Wärmeleitung darbietet. Aber dies Beispiel kann nicht als ein überzeugender Beweis gelten. Diese Gesetze wurden tatsächlich unabhängig davon und auf Grund rein elektrischer Versuche von Pouillet gefunden, und die Betrachtungen Ohms selbst stützen sich keineswegs auf unsichere Vergleiche, sondern auf die sicheren Ergebnisse einer rationellen Theorie, welche Fourier begründet hatte.

Gehen wir also mutig auf die Dinge selbst los und schauen wir sie nicht durch eine fremde Brille an. Wir brauchen uns unserer Sinnesmängel nicht zu schämen; im Gegenteil, wir dürfen stolz sein, daß wir etwas zu behandeln vermögen, von dem wir keine Sinneseindrücke erhalten können. Da es aber nun einmal so ist, daß unser edler Forschungstrieb keine volle Befriedigung erfahren kann, so wollen wir uns doch nicht mit groben Scheinbildern begnügen, lieber wollen wir uns wenigstens dem erhebenden Gefühl frei hingeben, daß es unserm Geist vergönnt ist, sich aus eigener Kraft nahezu ganz von den Fesseln zu befreien, welche die Natur ihm auferlegt hat.

3.

Handelt es sich darum, wie es im Plane dieses Buches liegt, insbesondere diejenigen Erscheinungen genauer zu betrachten, welche praktische Anwendung gefunden haben, so bedarf es gar keiner sehr umfangreichen Arbeit, um sich die Grundprinzipien anzueignen; ja, man kann sich sogar einer gewissen Überraschung nicht erwehren, wenn man sieht, wie wenig der Mensch von der ihn umgebenden Welt zu kennen braucht, um sie zu bändigen und seinem Willen dienstbar zu machen.

Man bewundert gewiß mit Recht alle die wertvollen Erfindungen der modernen Technik und staunt über die Schnelligkeit, mit der sie gemacht wurden; vielleicht dürfte man noch mehr überrascht sein, zu sehen, daß manche von ihnen erst einer so späten Zeit ihre Entstehung verdanken.

Unsere elektrischen Dynamomaschinen haben einen viel einfacheren Organismus als viele andere vor ihnen erfundenen Maschinen, und ihre Theorie setzt, wenn man sich an das Wesentliche hält, nur die Kenntnis einiger sehr einfacher, leicht verständlicher Prinzipien voraus, zu denen man logischerweise viel schneller hätte gelangen können. Ihre technische Anwendung hat jedoch den gewaltigen Aufschwung erst von dem Augenblick an genommen, wo Physiker und

Ingenieure unter Verzicht auf chimärische Hoffnungen klar erkannten, daß die elektrischen Phänomene ebenso wie die übrigen denselben allgemeinen Gesetzen unterstehen, welche alle Naturoffenbarungen beherrschen.

Mit einem Schlage wurde alles von Licht erfüllt, als an die Stelle der unbestimmten und unklaren Vorstellungen hypothetischer Fluida das Prinzip der Erhaltung der Energie in seiner ganzen erhabenen Einfachheit trat.

Von da an sprach man, statt die Elektrizität selbst zu betrachten und sich in unfruchtbare Erörterungen über ihre Natur zu verlieren, von elektrischer Energie, und studierte systematisch die Methoden der Erzeugung und Umformung dieser Energie.

Augenscheinlich genügt das Wort „Energie“ nicht, um das Geheimnis ganz zum Verschwinden zu bringen. Ein elektrisierter Körper (oder nach der Maxwellschen Vorstellung das umgebende Dielektrikum) enthält, so sagen wir, Energie in potentieller Form. Was geht dabei in diesem Körper vor? Wir können keine befriedigende Erklärung geben. Aber was geht denn in einer gespannten Feder vor, die jeden Augenblick durch ihre Entspannung mechanische Arbeit leisten kann, sowie wir den sperrenden Riegel lösen? Aus welchen verborgenen Gründen besitzt ein explosives Gemisch die Fähigkeit, so heftige mechanische oder thermische Wirkungen zu erzeugen, sobald wir ihm das für gewöhnlich so harmlose Zündhölzchen nähern?

Diese Fragen müssen, für den Augenblick wenigstens, ohne Antwort bleiben, und unsre Unkenntnis braucht uns, wenn wir elektrische Energie nutzbar machen wollen, nicht mehr zu kümmern als wenn wir mit mechanischer oder chemischer arbeiten.

Das Wesentliche liegt in der Erkenntnis, daß in allen Fällen die entwickelte Energie nur mittels eines gleichwertigen Aufwandes andrer Energie zu erhalten ist, daß z. B. ein Experimentator, der einen Kondensator lädt, Arbeit leistet, daß

sich irgendwo eine Turbine befinden muß, welche die Maschine in Drehung versetzt, deren Strom uns Licht erzeugt.

Daher haben auch diese beiden Worte „elektrische Energie“ für einen Physiker nichts Unbestimmtes an sich, denn sie entsprechen einer wohl definierten Maßangabe: die während der Zeiteinheit in dem Faden einer Glühlampe abgegebene Energiemenge ist das Produkt aus der Intensität des Stromes, welcher sie durchfließt, und der Potentialdifferenz zwischen ihren Polen; wir können genau angeben, welchen Sinn wir mit diesen verschiedenen Größen verbinden, weil wir Mittel haben, sie mit gleichartigen Einheiten zu vergleichen und zwischen ihnen und diesen Einheiten streng definierte Beziehungen aufzustellen.

Etwas eigenartig mag es erscheinen, daß es gerade diese uns so fremdartige Energieform ist, von der wir so viel Dienste erwarten. Da die elektrische Energie keinen unserer Sinne unmittelbar beeinflußt, so fragen wir wohl: welcher Anteil kommt ihr dann innerhalb unseres Lebenskreises zu? In welcher Hinsicht kann dem Blinden das Licht nützen? In der Tat ist es eine wirklich eigentümlich widerspruchsvolle und sehr beachtenswerte Erscheinung, daß diese Äußerungen des Naturgeschehens an sich gänzlich unnütz und doch zugleich die wertvollsten von allen sind, welche der Mensch zu seinem Gebrauch nutzbar zu machen verstanden hat.

Es ist heutzutage allgemein bekannt, daß die eigentliche Rolle der Elektrizität in der Technik diejenige des Vermittlers ist und daß sie sich in dieser Rolle als brauchbare und zuverlässige Dienerin erweist. Brauchbar, weil die elektrische Energie bequem auf Kosten anderer Energiearten zu erzeugen ist und ihrerseits mit bewundernswerter Leichtigkeit Wärme, Licht, mechanische und chemische Arbeit liefert; zuverlässig, weil sie in ihren mannigfachen Umwandlungen nichts für sich selbst zurückbehält, und — wenigstens im Prinzip — das ganze ihr anvertraute Arbeitsvermögen wieder abliefern.

Nimmt man übrigens die Einteilung an, zu der einige Physiker durch gewisse Betrachtungen auf Grund des Carnotschen Prinzips²⁾ gelangt sind, so erscheint die elektrische Energie als eine der höchststehenden von allen Formen, in welchen die Energie überhaupt auftreten kann; ohne Rest in mechanische Arbeit verwandelbar, nimmt sie in dieser besonderen Rangordnung eine sehr hohe Stufe ein; sie muß der kinetischen Energie an die Seite gestellt werden.

Aber man darf nicht aus den Augen verlieren, daß sie wie diese eine unangenehme Neigung besitzt: sie kann sehr leicht in Verfall geraten, sie läßt sich gern degradieren, und wenn man sie nicht schützte, würde sie ganz und gar in die niedrige Form der Wärme übergehen. Gegen dieses Streben muß man ankämpfen, und die Auffindung von Mitteln, die dies unabwendbare Übel natürlich nicht ganz unterdrücken, aber seine unheilvollen Wirkungen aufs trefflichste abschwächen, ist geradezu einer der Triumphe der modernen Technik.

Nehmen wir zu diesen unvergleichlichen Eigenschaften der Elektrizität noch die besondere Eigentümlichkeit der schnellen Fortpflanzung hinzu, welche es ermöglicht ohne Übertragung einer beträchtlichen mechanischen Arbeit in großer Entfernung und sozusagen augenblicklich irgend welche von fremden Kräften getriebenen Mechanismen ein- und auszuschalten; erinnern wir uns schließlich noch an die besondere Leichtigkeit, mit der die elektrische Energie sich teilen und bestimmten Gebieten zuweisen läßt, und ferner an die Gefügigkeit, mit der sie sich nach dem Willen des Ingenieurs unter den verschiedenen Formen darbietet, welche den verschiedenartigen elektrischen Strömen entsprechen und die jenachdem ihre Vorzüge haben bei der Lösung von praktischen Problemen: und wir werden verstehen, weswegen ein so geschmeidiger Organismus von dem Augenblick an, wo man ihn in Tätigkeit setzte, sich mit Notwendigkeit auch eine beherrschende Stellung im Kulturleben erobern mußte.

4.

Es hieße leeres Stroh dreschen, wollte ich hier darlegen, in welcher Weise und nach welcher Richtung hin die Anwendungen der Elektrizität die Praxis der Industrie von Grund aus umgeformt und dabei auch die sozialen Zustände tiefgreifend verändert haben.

Gerade in den letzten Jahren haben zahlreiche beredete Stimmen den Weg beschrieben, welchen diese Entwicklung seit dem Tage durchlaufen hat, an dem Volta seine Versuche der ersten Klasse des Instituts³⁾ vorlegte und an dem der erste Konsul die Meinung äußerte „daß dieser Teil der Physik der Weg zu großen Entdeckungen zu sein scheine.“

Man hat die Art und Weise gefeiert, in welcher mit Hilfe der Elektrizität der Gedanke die Ozeane durchheilt, die Stimme in einem Augenblick von einem Ende Frankreichs zum andern übertragen wird, man hat auf das allorts erstrahlende Licht hingewiesen, hat dargelegt, wie wir jetzt über jene unermeßlichen Schätze verfügen können, die sich als „weiße Kohle“ in den Gebirgsländern anhäufen und unablässig erneuern, wie endlich heute ungeheure noch ganz ungenutzte wilde Kräfte, gebändigt und folgsam gemacht, in unseren Tälern unzählbare friedliche Heerscharen von Maschinen bewegen können.

Mit Recht ist behauptet worden, daß die große Bewegung, die sich unter unseren Augen vollzieht, mehr und Besseres ist als nur ein technischer Fortschritt, daß sie als ein wahrhaft sozialer Fortschritt angesehen werden muß, weil die Kohle, die täglich seltener und schwerer zu beschaffen wird, hinfort nicht mehr die Hauptquelle des Reichtums ist, und daß man schon jetzt sehen kann, wie die Zeit herannaht, wo sich in der Nachbarschaft von Gletschern und Wasserfällen neue Arbeitsstädte aufbauen werden, wie sich früher die Industrieorte über Kohlenlagern erhoben.

In diesen Städten, die nicht durch schwarze Rauchwolken verdunkelt sein werden, und die mit ihrem lachenden

freundlichen Anblick zugleich die Vorzüge ihrer gesundheitlich so herrlichen Lage vereinigen, werden kleine Werkstätten der Hausindustrie entstehen, an welche die Betriebskraft reichlich und billig abgegeben wird.

Ich habe gewiß nicht die Absicht, zu wiederholen, was schon so oft und gut gesagt worden ist, sondern möchte in diesem Buche nur kurz die einzelnen Schritte auf dem Wege angeben, den der Physiker gegangen ist und der ihn auf so wichtige Probleme geführt hat; ich möchte insbesondere die speziellen Bedingungen genauer untersuchen, unter denen diese Probleme sich heute darbieten.

Es sei mir jedoch gestattet, meinerseits daran zu erinnern, daß es der engsten Zusammenarbeit des Gelehrten und des Ingenieurs bedurfte, um die weiterhin errungenen Resultate zu erhalten.

Diese immer inniger werdende Verschmelzung zwischen Theorie und Praxis, ist einer der bemerkenswertesten Züge in der gegenwärtigen Entwicklung der Wissenschaft und Technik, und dieser Zug tritt ganz besonders hervor, sobald es sich um die Elektrizität handelt.

Die Elektrotechnik erstand gewappnet und gerüstet in einem Augenblick, wo sich die Geister bereits von abergläubischen Vorurteilen befreit hatten, die den Erfinder früherer Zeiten so oft in die Irre geführt hatten. Sie konnte sich von Anfang an frei bewegen, weil sie sich nicht erst wie so viele andere Industriezweige von der drückenden Bürde veralteter Verfahren und empirischer Vorschriften zu befreien brauchte, die immer noch so schwer auf denjenigen Gewerben lastet, deren Geschichte in ferne Vergangenheit zurückreicht.

Und wenn ihre ersten Schritte auf diesem Siegeslauf von der Wissenschaft geleitet wurden, wenn sie jetzt noch jederzeit bei der Theorie mit ihren wertvollen Hinweisen Hilfe sucht: die Dankesschuld dafür hat sie auf jeden Fall in reichstem Maße erfüllt.

Von der Not des Augenblicks gedrängt, hat der Praktiker oft kühne, ja geradezu verwegene Lösungen finden müssen, die beim ersten Anblick den an langsamere und methodischere Arbeitsweise gewöhnten Gelehrten etwas verblüfften, in der Folge aber denselben Gelehrten zu den fruchtbarsten Gedankengängen anregten und ihn zu neuen Entdeckungen von großer Allgemeinheit hinführten.

So gewinnt das Studium der Anwendungen der Wissenschaft, das übrigens an sich schon so anziehend ist, für die Geschichte der Geistesentwicklung auch in philosophischer Beziehung einen wirklichen Wert,

Kapitel II.

Der Magnetismus.

1. Magnete und magnetisches Feld.

Während es zutrifft, daß in den deduktiven Wissenschaften, wie z. B. der Mathematik, der menschliche Geist wenigstens der Hauptsache nach einen Weg gegangen ist, der ihn vom Einfachen zum Zusammengesetzten geführt hat, während man dort aus einigen elementaren Vorstellungen immer kompliziertere Begriffe hergeleitet hat, ist es mit den Fortschritten auf dem Gebiet der Naturwissenschaften nicht ebenso gewesen.

Man kann im Gegenteil sagen, daß man im allgemeinen anfangs auf komplizierte Erscheinungen gestoßen ist, nämlich auf diejenigen, welche unsere unvollkommenen Sinne uns am bequemsten darbieten, übrigens unter Formen, die mit der objektiven Wirklichkeit wenig gemein haben; diese Erscheinungen schienen zuerst ohne gegenseitigen Zusammenhang zu sein; später erst kam man auf Grund geduldiger Forschungen, mühsamer Untersuchungen und nachfolgender kühner Schlüsse dazu, sie zu einem jener großen Komplexe zusammenzufassen, in denen unsre Kenntnisse heute geordnet dastehen, und da zeigte es sich, daß diese vorher kaum verstandenen und nach Gutdünken geordneten Tatsachen hinsichtlich ihrer mehr oder weniger großen Einfachheit in einer ganz anderen als der ursprünglich gewählten Anordnung auftraten.

So schien es z. B. bis zu dem berühmten Versuch von Oerstedt und den unsterblichen Untersuchungen von Ampère und Arago, als ob die magnetischen und elektrischen Erscheinungen miteinander nicht zusammenhingen.

Man hatte zwar beobachtet, daß der Blitz imstande ist, Eisen zu magnetisieren; Gassendi hatte z. B. auf die Tatsache hingewiesen, daß infolge eines Gewitters die Stange, welche das Kreuz des Glockenturms von Saint-Jean zu Aix-en-Provence trug, magnetisch geworden war; man hatte sogar festgestellt, daß ein Stück Eisen, z. B. ein Nagel, durch die Entladung einer Leidener Flasche einen recht beträchtlichen Magnetismus annimmt. Aber diese vereinzeltten Beobachtungen, die übrigens in einer verhältnismäßig späten Zeit gemacht wurden, waren ziemlich unbeachtet geblieben, und selbst noch am Anfang des vorigen Jahrhunderts, als man gewisse Analogien zwischen Magnetismus und Elektrizität zu ahnen begann, sah man in dem Magneten, von dem einige wesentliche Eigenschaften seit sehr langer Zeit bekannt waren, auch weiterhin ein unvergleichlich viel einfacheres Gebilde als z. B. in der Voltaschen Säule.

Erst infolge der glänzenden Arbeiten Ampères kam die Vorstellung auf, daß das Grundphänomen das elektrische sei, und daß alle Äußerungen des Magnetismus auf elektrischen Strömen beruhen.

Verhält es sich wirklich so, dann sollte in einer methodisch fortschreitenden Darstellung das Studium der elektrischen Ströme demjenigen der Magnete vorangehen; wir wollen uns jedoch nicht an eine Ordnung binden, die sich überdies nur in dem Fall unbedingt aufdrängt, wenn man die Vorstellungen Ampères oder andere gleichwertige Hypothesen als richtig gelten läßt; wir machen in keiner Weise Anspruch darauf, hier ein Lehrbuch darzubieten, das den Forderungen strengster Logik genügt. Ist ja doch auch für die Physiker, welche sich die Anschauungen von Maxwell und Hertz zu eigen machen, das einzige sicher Bekannte die Tatsache, daß die

beiden an einem Punkt des Raumes bestehenden Felder, das elektrische und magnetische, in einer sehr engen gegenseitigen Abhängigkeit stehen, und daß die Änderung des einen notwendigerweise die des anderen nach sich zieht; aber eben wegen dieser Gegenseitigkeit ist kein triftiger Grund dafür da, das eine dieser Felder zu bevorzugen und es in die erste Reihe zu stellen.

Bei den Maschinen der Technik ist übrigens die besondere Rolle, welche die Magnetisierung des Eisens spielt, gerade dasjenige, was zuerst die Aufmerksamkeit erregt, und es ist gewiß sehr bemerkenswert, daß dieses Metall, dessen Auffindung vielleicht den Anstoß gab zu den ersten Schritten der Menschheit auf dem Wege der Zivilisation, noch heute als Träger der Hauptrolle in dem bewundernswerten Schauspiel auftritt, das uns die moderne Elektrotechnik vorführt.

Man braucht sich nur einmal zu überlegen, was alles uns gegenwärtig fehlen würde, wenn das Eisen nicht in genügender Fülle an der Zusammensetzung der Erde beteiligt wäre, und man erkennt sofort, in welcher unmittelbarer Abhängigkeit von dem Boden, auf dem wir leben, unser ganzes materielles und sittliches Leben steht.

Worauf beruht diese besondere Eigentümlichkeit des Eisens, sich sehr viel stärker magnetisieren zu lassen als alle anderen Körper? Man kann es noch immer nicht sagen; die Physiker früherer Zeiten scheint diese Frage überhaupt nicht sehr interessiert zu haben.

Viele Jahrhunderte lang schien es, als seien der natürliche, Eisenfeilicht anziehende Magnet Eisenstein und mehr oder weniger reine Eisenstücke, denen man die gleiche Eigenschaft mitgeteilt hatte, nur eine Art Spielzeug, das gar kein wissenschaftliches Interesse erregte, und selbst noch lange, nachdem der Gebrauch der Magnetnadel sich völlig eingebürgert hatte, wurde kein ernsthafter Versuch zu einer Theorie des Magnetismus gemacht.

Man muß schon bis zu den Zeiten von Descartes gehen, um einigermaßen zusammenhängende Vorstellungen über diese Frage zu finden. Damals dachte man sich, um die Erscheinung der Anziehung magnetischer Körper zu erklären, daß von einem Magneten eine Art magnetischer Materie ausströmte, deren Teilchen sich aneinanderhängen oder sich gegenseitig abstoßen, je nach dem sich die Ausströmungen zweier Magnete treffen. Man nahm an, daß im Eisen eine Art Ventile vorhanden seien, die das Fluidum in der einen Richtung hindurchlassen, ihm aber den Weg in entgegengesetzter Richtung versperren.

Eine so unbestimmte Vorstellung konnte nicht zu bestimmten Ergebnissen führen; mit Rechnung war dabei nichts zu machen, weil man keine einzige genaue Zahlenangabe besaß.

Aepinus war der erste, welcher zur Erklärung der magnetischen Erscheinungen einfache Kräfte benutzte, die sich der Rechnung unterwerfen lassen, aber es fehlte die notwendige Grundlage, weil man das Gesetz noch nicht kannte, nach welchem die magnetischen Wirkungen sich mit der Entfernung ändern. Diese Frage scheint Newton besonders beschäftigt zu haben; er schloß aber nach recht rohen, aus seiner Zeit stammenden Versuchen, daß die Magnete aufeinander im umgekehrten Verhältnis der Kuben ihrer Abstände wirkten, ein Resultat, das übrigens durchaus richtig ist, wenn man unter gewissen Bedingungen die Resultante der Wirkungen beider Pole eines Magneten beobachtet, das aber nicht der Ausdruck des wirklichen Elementargesetzes ist.

Es ist bekannt, wie es Coulomb unter Verwendung langer und dünner, sorgfältig magnetisierter Magnete mit Hilfe der Drehwage gelang, das Gesetz der zwischen zwei Magnetpolen wirkenden Kraft aufzustellen und zu zeigen, daß die Abstoßung zwischen zwei Polen gleichen Vorzeichens im umgekehrten Verhältnis des Quadrates ihres Abstandes variiert.

Aus diesem Fundamentalgesetz ergibt sich die Möglichkeit in ganz bestimmtem einwandfreiem Sinne von der Mag-

netismusmenge zu reden, welche ein Magnetpol besitzt; denn diese Menge erscheint der Messung zugänglich, und man kann in aller Strenge Gleichheit und additive Zusammensetzung zweier Magnetismusklassen definieren.

Aus der Tatsache, daß man so dem Magnetismus die Bezeichnung als einer physikalischen Menge beilegt, darf man aber nicht voreilig schließen, daß diese Menge ein Stoff ist, und ebensowenig, daß sie es nicht ist, oder daß sie zu irgend einer schon bekannten Klasse von physikalischen Mengengrößen gehört. Vielleicht hat gerade der Erfolg der Hypothese von den beiden magnetischen Fluida bei manchen Physikern den Anlaß zur Entstehung gewisser Irrtümer über diesen Punkt gegeben.

Man mag durchaus in Anschlag bringen, daß die magnetische Materie sozusagen nur eine rein mathematische Bedeutung besitzt; sie bleibt trotzdem, welchen Namen man ihr auch geben mag, in jedem Falle zur Erklärung aller Erscheinungen geeignet, besonders wenn man sie definitionsgemäß mit allen den Eigenschaften ausstattet, die sie besitzen muß, um von den beobachteten Tatsachen Rechenschaft zu geben, wie z. B. mit denjenigen Eigenschaften, welche das klassische Experiment des zerbrochenen Magneten enthüllt.

Die vollkommene Übereinstimmung der Experimente mit der Theorie kann also nur immer von neuem die Coulombschen Gesetze bestätigen, sie darf aber keineswegs als Beweis für die Richtigkeit der Fluidumhypothese angesehen werden.

Wie es scheint, legten jedoch Coulomb und seine Nachfolger den Worten, mit denen sie ihre Gedanken ausdrückten, eine konkrete Bedeutung unter; für sie besaßen die Fluida eine reelle Existenz. Übrigens ist es ziemlich gleichgültig, welche Sprache man spricht, wenn nur die mit ihr ausgedrückten Vorstellungen klar und deutlich sind.

Im Sinne Coulombs enthalten alle magnetischen Körper innerhalb eines jeden ihrer Teilchen im natürlichen Zustand gleichgroße und zwar sehr beträchtliche Mengen süd- und

nordmagnetischen Fluidums. Diese Fluida sind anfangs gleichförmig verteilt, unter dem Einfluß einer äußeren Kraft aber scheidet sich das Element in zwei entgegengesetzte Gebiete, in welchen je ein Fluidum überwiegt. Poisson zeigte, indem er diese Hypothese der Rechnung unterwarf, daß sie von allen Eigentümlichkeiten der Wechselwirkung von Magneten, sowie der Wirkung von Magneten auf weiches Eisen Rechenhaft gibt.

Ampère zog die Vorstellung vor, daß alle Moleküle ebensoviele kleine permanente Magnete darstellen, die ursprünglich nach allen möglichen Richtungen orientiert sind, so daß ihre Wirkung nach außen anfangs Null ist, die sich jedoch um ihre Schwerpunkte drehen können und zwar ohne einen Widerstand zu finden, wenn es sich um ein Stück weiches Eisen handelt, dagegen unter Widerstand im Falle des Stahls.

Wir werden sehen, daß diese Vorstellung, die von Weber, dann von Maxwell wieder aufgenommen und von Ewing sozusagen populär gemacht wurde, die Mehrzahl der Erscheinungen zu deuten erlaubt. Übrigens hat Lord Kelvin der Theorie eine Form gegeben, die sie in Wahrheit von der Vorstellung eines Fluidums unabhängig macht; und welches nun auch der Ausgangspunkt sein möge, man gelangt durch die analytischen Entwicklungen zu gleichwertigen Darstellungen, in denen alle wesentlichen Eigenschaften eines Magneten vollkommen systematisch geordnet erscheinen.

Die Mathematiker, welche die ersten Erbauer dieser imposanten Gebäude waren, studierten besonders die Magnete selbst; in ihren Augen existierten innerhalb des umgebenden Raumes nur Mittelpunkte von Kräften, die in die Ferne wirken.

Faraday gehört unbestreitbar die erstmalige Durchführung des Gedankens, daß der Ursprung der magnetischen Phänomene tatsächlich in Vorgängen zu suchen sei, welche sich in dem die Magnete trennenden Medium abspielen. Lange

Zeit hindurch bildeten sich die Physiker zu Unrecht ein, daß die Faradaysche Vorstellungsweise und die Methode, welche die Mathematiker bei der Aufstellung ihrer Theorien befolgt hatten, miteinander gänzlich unvereinbar seien. Trotz aller Achtung, mit der man die Spekulationen dieses großen Geistes ansah, vielleicht des originellsten und fruchtbarsten von allen, welche den experimentellen Wissenschaften im 19. Jahrhundert ihren Glanz verliehen haben, trotz der vollendeten Klarheit, welche man seinen „Experimentaluntersuchungen über Elektrizität“ nachrühmte, war man etwas betroffen, um nicht zu sagen unangenehm berührt von einer gewissen Art die Dinge darzustellen, die nicht mit der herkömmlichen Form mathematischer Symbole in Einklang war.

Maxwell hat nachdrücklich auf die Tatsache hingewiesen, daß man durch Übertragung der Faradayschen Vorstellungen in streng mathematische Formen im allgemeinen zu ganz ähnlichen Schlüssen, ja sogar zu ganz gleichen Rechnungsausdrücken gelangt, wie sie Laplace, Poisson, Green und Gauß aus der Vorstellung von in die Ferne wirkenden Flüssigkeiten heraus entwickelt haben; er behauptet sogar mit Recht, daß mehrere der fruchtbarsten der von diesen Mathematikern ersonnenen Methoden im Rahmen der Faradayschen Vorstellungen eine Form annehmen können, die der ursprünglichen Darstellungsweise vorzuziehen ist.

Heute, nach den Hertz'schen Entdeckungen, hat übrigens die leitende Idee Faradays gesiegt; es ist ganz ausgeschlossen, die wesentliche Rolle des Zwischenmediums bei der Fortpflanzung elektrischer und magnetischer Wirkungen leugnen zu wollen. Wenn man daher einen irgendwo befindlichen Magneten betrachtet, so ist es ganz naturgemäß, daß man die Erscheinung gewissermaßen in das Außengebiet verlegt und sagt, die Gegenwart des Magneten habe im ganzen umgebenden Raume eine wichtige Veränderung herbeigeführt, der Magnet habe um sich herum ein „Feld“ erzeugt.

Worin besteht diese Veränderung? Man kann es gegenwärtig nicht bestimmt angeben, und vielleicht läßt sich die Frage überhaupt nicht beantworten.

Etwas jedoch ist sicher: das Magnetfeld besteht auch im leeren Raum, die Veränderung betrifft also vor allem eine gedachte Substanz, die fähig ist, selbst den leeren Raum zu erfüllen und zugleich auch die materiellen Körper zu durchdringen. Daher ist es durchaus natürlich, anzunehmen, daß diese Substanz nichts anderes sein kann als der Lichtäther; wie bekannt hat diese Annahme zu bemerkenswerten Beziehungen zwischen den Erscheinungen des Lichtes und des Magnetismus geführt.

Aber man stellt eine ganz in der Luft schwebende Hypothese auf, wenn man annimmt, daß die Veränderung, die in dem Äther vorgeht, eine mechanische sei, z. B. eine Torsion. Nichts weist darauf hin, daß das magnetische Phänomen auf ein mechanisches zurückführbar sein muß, und die Bilder, die man unter Zulassung dieser Forderung konstruieren kann, vermögen wohl dem Geiste eine Scheinbefriedigung zu gewähren, sie können sozusagen unseren Gedanken einen Halt geben, aber ihr Schicksal ist es zweifellos, daß sie weit von der Wahrheit entfernt bleiben.

Welches aber auch die innere Natur des magnetischen Feldes sein mag, es ist im übrigen durch seine wesentliche Eigenschaft vollständig bestimmt. Würde man nämlich den magnetischen Einheitspol an einen Punkt des Feldes bringen, so würde derselbe dort einer Kraft unterliegen, deren Intensität die Stärke dieses Feldes darstellt, und deren Richtung die Richtung des Feldes in dem betrachteten Punkte ist.

Ebenso kann man auch sagen, daß man einen gegebenen Raum als magnetisches Feld erkennt, wenn eine kleine freibeweglich aufgehängte Magnetenadel, die man an einen Punkt dieses Raumes bringt, sich in eine bestimmte Richtung einstellt, zu der sie nach einer Reihe isochroner Schwingungen zurückkehrt, wenn man sie aus dieser Gleichgewichtslage entfernt. Die

Richtung der Nadel, bestimmt durch die Verbindungsgrade ihrer beiden Pole, gibt die Feldrichtung in diesem Punkte an, das Quadrat der in der Zeiteinheit stattfindenden Zahl von Schwingungen, liefert ein relatives Maß der Feldintensität.

Wie der Leser wohl weiß, besitzt man in dem wohlbekannten Experiment der magnetischen Kraftlinienbilder ein sehr bequemes und anschauliches Mittel, die Verteilung der magnetischen Kräfte in irgend einem ebenen Querschnitt gewissermaßen abzubilden. Dieser Versuch erklärt sich sehr einfach. Jedes Stückchen Eisenfeilicht, das in die Umgebung des felderzeugenden Magneten gestreut wird, magnetisiert sich durch Influenz und wird gleichsam zu einer kleinen Magnetnadel, die sich auf einer Hervorragung des Stückchens dreht; da nun außerdem infolge der Anziehung, welche das Feilicht während des Streuens erleidet, die Feilspähne sich dort in größerer Zahl ansammeln, wo die Kraft intensiver ist, so erhält man im ganzen ein Bild, in dem die Feilspähne die Kraftlinien aufzeichnen, d. h. diejenigen Linien, welchen ein magnetisches Teilchen (das trägheitslos gedacht ist) im Felde folgen würde, und in dem die Dicke der Feilichtkitten annähert die relative Intensität der magnetischen Kraft längs dieser Linien angibt.

Diese Art der Darstellung ist also recht genau; sie leistet im Unterricht wertvolle Dienste, und ihre Anwendung hat mehreren Praktikern wirkliche Entdeckungen an die Hand gegeben. In der technischen Praxis ist es von Nutzen, daß man sich daran gewöhnt, diese gedachten Linien, welche das Feilichtbild greifbar darstellt, sozusagen im Geiste vor sich zu sehen. Doch darf man die Deutung dieses Versuchs nicht unberechtigterweise ausdehnen; der magnetische Kraftfluß, welcher eine Oberfläche senkrecht durchsetzt, ist das Produkt aus der Größe dieser Oberfläche und der Feldstärke; er ist keineswegs ein mehr oder weniger geheimnisvoller Ausfluß, den der felderzeugende Magnet dauernd aussendet; er gibt

uns nur eine Art Maßstab für die dauernde Veränderung, welche der Magnet in dem betrachteten Gebiet erzeugt.

2. Die induzierte Magnetisierung.

Wahrscheinlich gibt es keinen Körper, der nicht selbst ein Magnet wird, wenigstens temporär, wenn man ihn in ein Magnetfeld bringt. Betrachtet man den Körper für sich, so kann man sagen, daß er in jedem seiner Punkte eine Magnetisierung angenommen hat, deren Intensität im Falle des Eisens sehr hoch, bei den meisten anderen Substanzen sehr gering ist, und die man definiert als das Verhältnis des magnetischen Momentes eines um diesen Punkt beschriebenen Volumelementes zum Volumen dieses Elementes; diese Magnetisierungsintensität sieht man als eine gerichtete Größe an, deren Richtung in die magnetische Achse fällt, also als einen wohl definierten Vektor.

In den modernen Darstellungen zieht man es vor, die Vorgänge nicht mehr als Vorgänge in dem Körper selbst, sondern als solche in dem durch die Gegenwart des Körpers veränderten Feld anzusehen; man sagt demgemäß, daß in dem betrachteten Punkte das Feld ursprünglich eine gewisse Stärke hatte, und daß diese sich geändert habe, daß sie z. B. größer geworden sei; dieser neue Wert der Feldstärke*) ist das, was man magnetische Induktion nennt.

Den beiden Arten, die Dinge zu betrachten, entsprechen zwei verschiedene sehr wichtige Größen, denen Lord Kelvin anschauliche, heute bereits klassisch gewordene Namen gegeben hat. Das Verhältnis zwischen der Intensität der

*) Die Definition der Feldstärke in einem Punkt eines magnetischen Körpers ist ziemlich heikel. Um sie aufzustellen, muß man sich um den Punkt einen unendlich kleinen Hohlraum denken, und in dem Fall, den wir hier betrachten, muß dieser Hohlraum eine unendlich dünne Scheibe senkrecht zur Magnetisierungsrichtung sein.

Magnetisierung und der Feldstärke heißt die Suszeptibilität des Körpers, das Verhältnis zwischen Induktion und Feldstärke wird mit dem Wort Permeabilität bezeichnet. Diese beiden Größen stehen übrigens in einer einfachen Beziehung zueinander; sie haben beide um so höhere Werte, je stärker magnetisch der Körper ist, jedoch hat ein nichtmagnetischer Körper die Suszeptibilität Null, während seine Permeabilität gleich Eins ist, da ja in diesem Körper das Feld seine ursprüngliche Stärke behält.

Benutzt man das Bild der Kraftlinien, so muß man sich vorstellen, daß diese Linien in das Innere aller Substanzen eindringen können; in einer nicht magnetisierbaren Substanz behalten sie ihre anfängliche Verteilung, in einem Magneten werden sie dagegen zahlreicher und liegen enger beisammen. Bringt man z. B. ein Stück Eisen in ein anfangs homogenes Magnetfeld, so erfährt dies Feld eine tiefgreifende Veränderung: fast alle Kraftlinien streben zueinander hin, um das Eisenstück zu durchsetzen, der magnetische Kraftfluß ist daselbst nunmehr viel beträchtlicher als im umgebenden Raume.

Mit den Worten: „das Eisen ist zum Magneten geworden“, oder: „die Kraftlinien haben sich in ihm angehäuft“, drückt man offenbar dieselbe Tatsache aus, aber diese beiden Ausdrucksweisen entsprechen zwei verschiedenen Anschauungsweisen, und unbestreitbar eignet sich die zweite viel besser als die erste für alle im Innern der Dynamomaschinen stattfindenden Erscheinungen.

Lange Zeit hindurch beschäftigten sich die Physiker beim Studium des Magnetismus hauptsächlich mit der permanenten Magnetisierung; sie betrachteten fast ausschließlich die Magnete, die ihnen allein ein wirkliches Interesse zu verdienen schienen; heutzutage dagegen gelten die meisten Untersuchungen der magnetischen Induktion und der temporären Magnetisierung.

Bei den technischen Anwendungen werden die Eisenmassen, welche gewissermaßen das notwendige Skelett der

Maschinen bilden, der Wirkung eines Magnetfeldes unterworfen, das im allgemeinen periodisch variiert. Hieraus erklärt sich die neue Richtung, die zahlreiche Arbeiten hervor gebracht hat, daher stammen auch die so überaus bemerkenswerten Untersuchungen über Magnetisierungszyklen und über die Beziehungen zwischen der Magnetisierung und der Zeit. Neben vielen anderen bildet dieser Fall ein Beispiel für die Fortschritte, welche die reine Wissenschaft dem Zwange verdankt, die ihr von der Technik gestellten Probleme zu lösen.

Übrigens wurden systematische Untersuchungen über die Beziehungen zwischen Magnetisierung und induzierendem Feld erst von dem Augenblick an möglich, wo man ein bequemes Mittel besaß, diesem Felde genau bekannte und willkürlich veränderliche Werte zu erteilen. Dieses Mittel findet sich in der fundamentalen Entdeckung Aragos: ein elektrischer Strom erzeugt ein Magnetfeld, und das Laplace'sche Gesetz lehrt uns, daß dieses Feld der Stromintensität proportional ist.

Seitdem ist nichts leichter, als einen Körper, z. B. ein Stück Eisen, magnetischen Feldern zu unterwerfen, für deren Intensität man unmittelbar wenigstens ein relatives Maß hat: es genügt, ihn in eine Spule hineinzubringen, die von einem elektrischen Strome bekannter Intensität durchflossen wird will man jedoch außerdem die Induktion bestimmen, so stößt man auf ziemlich ernste Schwierigkeiten, die erst in den allerletzten Jahren überwunden worden sind.

Die gebräuchlichen Meßmethoden sind ziemlich verschiedenartig; einige, wie die magnetometrische und die ballistische eignen sich für den Fall, daß das Feld verhältnismäßig langsam variiert; andere, wie die Methode von J. und B. Hopkinson, gestatten unter ähnlichen Bedingungen zu arbeiten, wie man sie in der Technik antrifft, wo die Magnetisierungszyklen sehr rasch durchlaufen werden. Es gibt

auch Instrumente, die selbsttätig die Kurve aufzeichnen, welche die Variation der Magnetisierung als Funktion der Feldstärke darstellt, oder wenigstens eine punktweise Konstruktion dieser Kurve mit Hilfe einfacher Ablesungen ermöglichen; von dieser Art sind z. B. der Magnetograph von Ewing und der Apparat von Siemens & Halske.⁴⁾ Andere Anordnungen, die auch noch recht genaue Resultate liefern, empfehlen sich durch die Leichtigkeit und Bequemlichkeit ihrer Handhabung für die technische Praxis: das sind die Permeameter, z. B. das Permeameter von S. P. Thompson, oder endlich die magnetischen Wagen, wie die Du Bois'sche.

Dank diesen Instrumenten ist die Messung der Permeabilität des bei elektrotechnischen Konstruktionen angewandten Eisens eine ganz gewöhnliche Operation geworden; die Permeabilität wechselt je nach den Materialproben sehr beträchtlich, aber man kann dennoch einige allgemeine Sätze über dieselbe aussprechen.

In den ersten Zeiten glaubte man, daß die Magnetisierung merklich der Feldstärke proportional sei, mit anderen Worten, daß die Permeabilität unabhängig sei vom Felde. Dies war das Resultat sehr interessanter im Jahre 1844 von Lenz und Jacobi*) ausgeführter Versuche; man erkannte jedoch bald, daß dies Proportionalitätsgesetz nur ein empirisches Ge-

*) Bei diesen merkwürdigen Versuchen der beiden geschickten Physiker war eines der Hauptziele der Nachweis, daß es für die verschiedenen Stoffe, welche den Leitungsdraht einer Magnetisierungsspule bilden können, keinen spezifischen Magnetisierungskoeffizienten gibt; mit anderen Worten, daß die erzeugte Magnetisierung nur von der Feldstärke und nicht von der Natur der felderzeugenden Körper abhängt. Diese Frage kann uns als recht unnütz erscheinen, weil sie nicht auftritt, wenn wir die Dinge von modernen Gesichtspunkten aus betrachten, aber sie hat ihr Interesse gehabt, und von vornherein war die Antwort durchaus nicht sicher. Es bleibt immer lehrreich, sich zu vergegenwärtigen, welche verschlungenen Pfade man hat gehen müssen, bevor man den einfachen geraden Weg zur Wahrheit fand.

setz sei, das sich um so mehr von der Wahrheit entfernt, je höhere Werte die Feldstärke annimmt. Müller zeigte, daß es für jeden Stab aus weichem Eisen ein Maximum der Magnetisierung gibt, welches nicht überschritten werden kann, und diese Folgerung ist in offenbarem Widerspruch mit der Hypothese von der Konstanz der Permeabilität, da ja, wenn dieselbe richtig wäre, die Magnetisierung unbegrenzt wachsen müßte.

Zahlreiche Arbeiten, die hierüber gemacht worden sind, haben die Frage fast vollkommen aufgeklärt: man weiß heutzutage, daß beim Eisen die Permeabilität zuerst mit dem Feld wächst, ein Maximum erreicht, und zwar im allgemeinen bei einer Feldstärke von nur wenigen Einheiten, dann langsam abnimmt und der Einheit zustrebt. Demgemäß verliert also eine magnetische Armatur in sehr starken Feldern schließlich ihre besondere Eigenschaft und spielt dann dieselbe passive Rolle, welche den nichtmagnetischen Substanzen in Feldern von jeder beliebigen Stärke zukommt.

Die heikelsten Partien dieser Arbeiten sind einesteils wegen der Kleinheit der zu beobachtenden Wirkungen diejenigen, welche sich mit den schwächsten Feldern beschäftigen, und andererseits diejenigen, welche das andere Ende der Kurve, die Gegend der Sättigung betreffen, wegen der Schwierigkeit, sehr starke Felder von genügender Ausdehnung zu erzeugen und zu messen.

Ewing, Weiß, du Bois und andere Forscher, die hierüber besonders sorgfältige Versuche gemacht haben, sind zu Resultaten gelangt, welche so gut übereinstimmen, als es die Verschiedenheit der benutzten Eisenproben nur erwarten läßt.

Nicht nur an der Stelle selbst, welche die magnetische Substanz einnimmt, ändert sich das Feld durch ihre Einführung; der stärker als das umgebende Medium permeable Körper absorbiert eine große Anzahl Kraftlinien und ändert infolgedessen die Dichte der im Außenraum übrigbleibenden.

Ein kurzer Eisenstab, der in ein homogenes, seiner Achse paralleles Feld gebracht wird, verstärkt dieses z. B. in der Nähe seiner Enden, schwächt es aber sonst überall, weil die in dem Stab entstehenden Pole selbst ein dem ursprünglichen Felde entgegengerichtetes erzeugen; dieses neue Feld wird entmagnetisierendes Feld genannt.

Die Existenz eines derartigen Feldes besitzt ein besonderes Interesse, weil es einen gegebenen Raum gegen die Einwirkung eines Magnetfeldes zu schützen erlaubt; es genügt zu diesem Zweck, den Raum mit einem Eisenmantel zu umgeben, der sich so magnetisiert, daß seine Magnetisierung ein dem ursprünglichen gleiches aber entgegengerichtetes Feld erzeugt. So gelangt man mit Hilfe eines als magnetischer Schirm wirkenden Hohlzylinders dazu, Meßinstrumente gegen Felder zu schützen, deren Richtung senkrecht steht zu den Erzeugenden des Zylinders; in derselben Weise beseitigt man auch, wie wir später sehen werden, die störenden sekundären Erscheinungen in den Dynamos, indem man die Leitungsdrähte des Ankers in eine magnetische Armatur einbettet.

Die Betrachtung des entmagnetisierenden Feldes hat übrigens in manche andere, lange Zeit dunkel gebliebene Fragen Licht gebracht; so lehrt sie uns z. B. verstehen, warum die permanente Magnetisierung sich besser in einem geschlossenen als in einem offenen magnetischen Kreise erhält und klärt uns, wie Kirstaedter und Ascoli gezeigt haben, über die wahre Ursache auf, weswegen die längst von Jamin auf Grund unvollständiger und teilweise sogar ungenauer Beobachtungen vorgeschlagene Lamellenform sich besonders gut für die Herstellung kräftiger Magnetstäbe eignet.

So sind zahlreiche Untersuchungen über die permanente Magnetisierung ausgeführt worden, und dank den Arbeiten von Bouty, du Bois, Taylor, Madame Curie u. a. kennt man heute die besten Bedingungen der Herstellung kräftiger und zugleich konstanter Magnete recht genau.

Zu den interessantesten und nützlichsten aber auch schwierigsten Arbeiten auf dem Gebiet des Magnetismus gehört das Studium der Beziehungen zwischen Magnetisierung und Zeit.

Warburg darf mit Recht das Verdienst beanspruchen, als erster im Jahre 1880 gezeigt zu haben, daß, wenn man einen Eisendraht einem von Null bis zu einem gewissen Werte H wachsenden, dann von H bis Null abnehmenden Felde unterwirft, die Intensität der Magnetisierung für dieselbe Feldstärke größer ist, wenn das Feld abnimmt, als wenn es zunimmt, und daß nach mehrmaliger Wiederholung dieser Operation die graphische Darstellung der Magnetisierung als Funktion der Feldstärke eine geschlossene Kurve ergibt.

Ewing aber hat durch seine bedeutenden Arbeiten hauptsächlich dazu beigetragen, unsere Kenntnisse über diesen Gegenstand zu befestigen, und er ist es, der dieser Erscheinung, bei welcher ausgesprochenermaßen eine Verspätung der Wirkung gegenüber der Ursache auftritt, den bezeichnenden, heute allgemein angenommenen Namen „Hysteresis“ gegeben hat.

Ewing hat diese merkwürdigen Erscheinungen in allen ihren verwickelten Einzelheiten studiert. Es ist allgemein bekannt, was man unter einem Magnetisierungszyklus versteht, und ebenso kennt man die Form der Hysteresisschleife, welche periodischen Änderungen eines Feldes entspricht, das von einem beliebigen Wert H bis zu einem gleich großen Wert mit entgegengesetztem Vorzeichen $-H$ abnimmt, um dann wieder von $-H$ bis $+H$ zu wachsen; aber selten stellen sich die Dinge so einfach dar. Andere Erscheinungen, die nicht damit zusammengeworfen werden dürfen, lagern sich über das Hauptphänomen, so z. B. die Erscheinung der „magnetischen Zähigkeit“ (Nachwirkung), die sich besonders in schwachen Feldern bemerklich macht und darin besteht, daß die Magnetisierung eine gewisse Zeit braucht, um den der neuen Feldstärke entsprechenden Wert anzunehmen; so

ferner die von Induktionsströmen herrührenden Erscheinungen, die bei schnell variierenden Feldern sehr wesentlich sind.

Nur kurz erwähnen können wir hier die Untersuchungen, welche nach denen von Ewing den verwickelten Knäuel der Erscheinungen etwas zu entwirren ermöglichten; Lord Rayleigh, J. Hopkinson, E. Schmidt, Wilson, Weihe haben geschickt an diesem schwierigen Werke mitgewirkt; besonders hervorzuheben ist auch Maurain, der aus sinnreichen, nach einer ausgezeichneten Methode angestellten Versuchen sehr schöne bestimmte Resultate über den Einfluß der Schnelligkeit der Feldänderung auf die Form der Magnetisierungskurve erhielt.

Die Erscheinungen der Hysteresis haben in der Technik eine große Bedeutung, weil sie eine Zerstreung der Energie in Form von Wärme mitsichbringen und so die Hauptursache der Verschlechterung des Wirkungsgrades der Maschinen sind. Schon Warburg hatte gezeigt, daß der Flächeninhalt der geschlossenen Magnetisierungskurve die während einer Periode der Feldänderung zerstreute Energie mißt. Indem man also die Bedingungen aufsucht, unter denen diese Fläche die kleinstmögliche wird, kommt man dazu den besten Wirkungsgrad zu erzielen, und die Untersuchung der Magnetisierungskurve ergibt den Wert der verlorenen Energie.

Übrigens muß man die Frage sehr eingehend behandeln, wenn man zu vollkommen einwandfreien Schlüssen gelangen will; es sind zahlreiche Versuche gemacht worden, aus denen sich kein sicheres Ergebnis ziehen läßt, weil man, worauf Maurain hinweist, oft versäumt hat, die sehr verwickelte Rolle gebührend zu berücksichtigen, welche die Induktionsströme in den Eisenkernen spielen.

In der Praxis erhält man die während eines vollständigen Zyklus zerstreute Energie hinreichend genau, indem man nur die äußersten Werte der Magnetisierung mißt und für jede Eisensorte einen spezifischen Koeffizienten bestimmt. Stein-

metz hat in der Tat 1892 eine sehr bekannt gewordene Formel aufgestellt, welche mit Hilfe dieser Angaben den Energieverlust zu berechnen erlaubt.

Diese Formel kann aber nur als eine empirische Näherungsformel angesehen werden; verschiedene Autoren, Ewing, Miss Klaessen u. a. haben gezeigt, daß sie zu ungenauen Resultaten führen kann, besonders für sehr schwache Felder; Weiß hat auf Grund sehr interessanter Versuche angegeben, wie sie geändert werden muß, um z. B. die Erscheinungen wiederzugeben, die er bei Legierungen von Eisen und Antimon beobachtet hat.

Es gibt übrigens verschiedene, „Hysteresimeter“ genannte, Apparate von Ewing, Holden, Marcel Deprez und Blondel, welche mittels einfacher Ablesung einen ziemlich genauen Wert der durch Hysteresis im Innern von Eisenkernen verloren gehenden Energie ergeben, wobei dieselben sich unter ähnlichen Bedingungen befinden wie bei laufenden Maschinen.

3. Magnetische Eigenschaften verschiedener Substanzen.

Im leeren Raum können magnetische Kraftlinien bestehen; das Vakuum oder, wenn man diese Bezeichnung vorzieht, der Äther muß also als magnetische Substanz angesehen werden; man ist jedoch, übrigens ganz willkürlich, übereingekommen, die Permeabilität des Vakuums gleich der Einheit oder, was auf dasselbe hinauskommt, seine Suszeptibilität gleich Null zu setzen, und gemäß dieser Übereinkunft muß man sagen, daß ein gegebener Raum im freien Äther überhaupt keine Magnetisierung annehmen kann.

Anders ist es bei den wägbaren Substanzen; man hat Grund zu der Annahme, daß die Materie stets eine von Eins verschiedene Permeabilität besitzt, oder daß der Äther, wenn man diesem die Erscheinung zuschreiben will, indem er die Materie durchdringt, jedesmal seine Permeabilität ändert.

Seit langer Zeit hat man beobachtet, daß verschiedene Eisenverbindungen ebenso wie der Magneteisenstein oder das Eisen selber magnetische Eigenschaften besitzen. Im Jahre 1778 schrieb Brugmans: „omne ferrum, omneque corpus ferrum continens eo ipso dum trahitur, polos recipiat.“ Derselbe Beobachter bemerkte übrigens, daß ein Stück Wismuth sich umgekehrt wie ein Stück Eisen einstellte, wenn man beide einem Magneten näherte. Etwas später entdeckte man, daß Nickel und Kobalt, denen von Chemikern wie Vauquelin, Thénard, Laugier und Wenzel völlig aller Eisengehalt entzogen war, nichtsdestoweniger die Fähigkeit behielten, sich sehr beträchtlich zu magnetisieren, und gelangte so zu der Vorstellung, daß die zuerst dem Eisen allein zugeschriebene besondere Eigenschaft in Wirklichkeit eine allgemeine Eigenschaft der Materie sein könnte. Faraday war es, der um die Mitte des vergangenen Jahrhunderts durch seine klassischen Versuche dahin gelangte, diese Vorstellung endgiltig zu rechtfertigen und zu beweisen, daß jeder Stoff sich bezüglich seiner magnetischen Eigenschaften vom Vakuum unterscheidet.

Seitdem sind zahlreiche Messungen ausgeführt worden, und diese haben dazu geführt, alle Körper in drei getrennte Gruppen zu ordnen: die ferromagnetischen, paramagnetischen und diamagnetischen Körper. Man muß sich übrigens hüten, dieser Einteilung einen absoluten Wert beizulegen, sie hat nur einen praktischen Nutzen; eine vollkommen scharfe Grenze gibt es zwischen den verschiedenen Gruppen nicht, und, wie wir sehen werden, genügen schon Temperaturänderungen um einen stetigen Übergang zwischen ihnen herbeizuführen.

Die ferromagnetischen Substanzen haben eine beträchtliche Permeabilität und zeigen sehr ausgesprochen die Erscheinung der Hysterisis.

Von allen Körpern ist gegen magnetische Einwirkung

am empfindlichsten dasjenige Eisen, welches wegen der Leichtigkeit seiner Bearbeitung als weiches bezeichnet wird; es ist dies nahezu reines Eisen, das nach der Erhitzung auf Rotglut keine Veränderung mehr erfahren hat; jedoch die geringsten Spuren fremder Substanzen, die leisesten Veränderungen in seinen physikalischen Verhältnissen, z. B. die leichte Modifikation, welche eine Biegung erzeugt, beeinflussen seine magnetischen Eigenschaften in solchem Maße, daß es fast unmöglich ist, Zahlenwerte für die Magnetisierung desselben anzugeben.

Man kann jedoch wenigstens soviel sagen, daß die Hysteresisschleife sehr schmal und die Koerzitivkraft (d. h. diejenige Feldstärke, für welche die Magnetisierung beim Durchlaufen eines Zyklus Null wird) bemerkenswert gering ist. Wie immer variiert die Permeabilität sehr mit dem Feld; das im allgemeinen sehr ausgesprochene Maximum wird bei einem Felde von einigen Einheiten erreicht, man hat Eisenproben untersucht, für welche die Maximalpermeabilität fast 5500 erreichte. Unterwirft man ein Stück weiches Eisen mechanischen Einwirkungen, so wird es schwieriger zu bearbeiten, es verwandelt sich in hartes Eisen; im allgemeinen nimmt die Permeabilität ab in dem Maße wie das Eisen härter wird, es gehorcht dem Felde weniger gut, und die Koerzitivkraft erhält beträchtlichere Werte. Bei einem weichen Eisendraht konnte Ewing z. B. die Maximalpermeabilität von 3080 auf 670 erniedrigen.

Die Vereinigung des Eisens mit Kohlenstoff ändert seine magnetischen Eigenschaften tiefgreifend, jedoch spielt auch der physikalische Zustand, in welchem das Metall gewonnen wird, hierbei eine ebenso wichtige Rolle wie seine chemische Konstitution. Mit dem Namen „Stahl“ bezeichnet man bekanntlich Verbindungen von Eisen und Kohlenstoff, die zwischen ein Zehntel und zwei Prozent Kohlenstoff enthalten; der weiche kohlenstoffärmste Stahl unterscheidet sich also hinsichtlich der Zusammensetzung gar nicht von dem nahezu

reinen Eisen; der Unterschied stammt wesentlich von der Art der Aufbereitung her: der Stahl wird im allgemeinen geschmolzen und gegossen, während Eisen in geschmiedeten und geschweißten Stücken in den Handel kommt.

Weicher Stahl kann ungefähr dieselbe maximale Magnetisierung annehmen wie Eisen, aber diese wird viel langsamer erreicht; der hervorstechendste Unterschied ist der, daß die Koerzitivkraft einen beträchtlichen Wert hat, 30 bis 40mal so groß wie beim Eisen; übrigens erhöht sich dieselbe, während gleichzeitig die Permeabilität sinkt, sehr bedeutend bei der Härtung durch das Hämmern.

Steigt der Kohlenstoffgehalt, so verschlechtern sich die magnetischen Eigenschaften; die Härtung gewinnt großen Einfluß, sie verbreitert die Hysteresischleife und vergrößert die Koerzitivkraft.

Metall, das zwischen 2 und 3 Prozent Kohle enthält, wird nicht benutzt; oberhalb dieses Verhältnisses erhält man die verschiedenen Sorten Gußstahl und Gußeisen, die im allgemeinen weniger permeabel sind als weicher Stahl, obwohl gewisse Erzeugnisse der Kruppschen Werkstätten beträchtliche Permeabilität und geringe Koerzitivkraft besitzen.

In den letzten Jahren hat man nach verschiedenen Gesichtspunkten die Legierungen des Eisens mit anderen Metallen studiert, aber da die Zahl der möglichen Kombinationen fast unbegrenzt ist, so bilden diese immerhin schon recht zahlreichen Untersuchungen nur den ersten Schritt auf einem zweifellos sehr langen Wege.

Chrom, sowie besonders Molybdän und Wolfram beeinflussen die Magnetisierung selbst nur wenig (sie verringern sie etwas), dagegen erhöhen sie die Koerzitivkraft außerordentlich; Mangan übt, wie verschiedene Forscher, insbesondere Hopkinson, gezeigt haben, eine sehr störende Einwirkung aus, es raubt dem Eisen seine magnetischen Eigenschaften fast ganz.

Resultate, die ganz besonders interessant sind, weil sie eine geschlossene Gesamtheit von Einzeluntersuchungen bilden, hat Weiß an Legierungen aus Eisen und Antimon erhalten; dieser geschickte Experimentator hat die Änderung der Magnetisierung mit der Zusammensetzung studiert und gezeigt, daß die bei allen diesen Legierungen an sich schon schwache Permeabilität bei einem Antimongehalt von ungefähr 40 Prozent plötzlich noch weiter sinkt. Besondere Erwähnung verdienen noch die Eisen-Nickellegierungen (Nickelstahl), die wegen ihrer von Ch. Ed. Guillaume entdeckten, so merkwürdigen Eigenart in bezug auf mechanisches und thermisches Verhalten gewiß berufen sind, eine immer größere Rolle in der Technik zu spielen. Im allgemeinen, kann man sagen, verhalten sich diese Legierungen in magnetischer Hinsicht so, wie man es nach der Einteilung erwarten kann, die sich aus den schönen, hinfort als klassisch anzusehenden, Untersuchungen von Guillaume ergibt.

Wenn man auch noch nicht dahin gelangt ist, diese etwas verstreuten Spezialarbeiten durch ein theoretisches Band zu einem einzigen Ganzen zu vereinigen, so kann die Technik vorläufig wenigstens aus diesen Studien sehr wichtige Folgerungen für die Maschinenkonstruktion ziehen. Man begreift danach, daß es für die verschiedenen bei der praktischen Anwendung vorkommenden Fälle nicht gleichgiltig ist, welche Eisensorte man gerade benutzt.

Will man z. B. einen Dynamoinduktor bauen, d. h. ein Organ zur Erzeugung eines unveränderlichen magnetischen Kraftflusses, so empfiehlt es sich offenbar, auf hohe Permeabilität zu achten, während die Hysteresis nur wenig in Betracht kommt; man wird also Flußstahl nehmen, der unter ganz bestimmten Bedingungen hergestellt ist.

Handelt es sich dagegen um die Herstellung eines Dynamoankers, so hat hohe Permeabilität weniger Wert, weil der zur Magnetisierung des Ankers verbrauchte Anteil der magnetischen Erregung nur ein kleiner Bruchteil der gesamten Erregung

ist, dafür aber ist es von der allerhöchsten Wichtigkeit, die Hysteresis aufs äußerste zu verringern; man muß in diesem Fall Eisenblech nehmen, das in geeigneter Weise wiederholt erhitzt und gekühlt ist; indessen ist zu bemerken, daß auch derartiges Blech nach und nach durch den Gebrauch seinen Wert verlieren kann, es „altert“, wie man sich gewöhnlich ausdrückt.

Will man endlich einen permanenten und zwar besonders einen konstanten Magneten haben, so gilt es vornehmlich große Koerzitivkraft zu erzielen. Frau Curie, welche diese wichtige Frage eingehend studiert hat, zeigte, daß sich hierfür Stahl mit 1,2 Prozent Kohlenstoffgehalt eignet, daß Molybdän die Koerzitivkraft noch erhöht, und endlich, daß die Härtung bei hoher Temperatur stattfinden muß. Unter Befolgung aller dieser Vorschriften hat Frau Curie Magnete erhalten, deren Magnetisierung mehr als 15 Monate lang niemals um mehr als $\frac{1}{300}$ ihres Wertes geschwankt hat.

Zu den ferromagnetischen Substanzen sind gewisse natürliche Eisenverbindungen zu rechnen, an erster Stelle der Magnetit oder Magneteisenstein, dessen Magnetismus schon dem grauen Altertum bekannt war. Dies Mineral kristallisiert im kubischen System, und man sollte danach glauben, daß es nach allen Richtungen die gleichen magnetischen Eigenschaften besitzt. Abt und Du Bois hatten freilich schon auf gewisse Eigentümlichkeiten bei der Magnetisierung von Magnetitkristallen hingewiesen, besonders gründlich ist diese Frage aber in einer schönen Arbeit von P. Weiß behandelt worden; dieser treffliche Physiker zeigte, daß die Kurven für die Magnetisierung nach den verschiedenen Achsen charakteristisch ausgeprägte Unterschiede aufweisen, die im übrigen mit den Symmetrieverhältnissen durchaus vereinbar sind.

Andere gleichfalls sehr interessante Untersuchungen sind am Hämatit und Pyrrhotin ausgeführt worden; schon im Jahre 1882 hatte Streng auf die Tatsache hin-

gewiesen, daß diese Substanz „keine magnetische Polarität in der Achsenrichtung senkrecht zur hexagonalen Basis annimmt und sich nach allen Richtungen, die in der Basisebene liegen, wie Stahl verhält.“ Aber die Versuche dieses Gelehrten waren recht unvollständig, sie bezogen sich nur auf den remanenten Magnetismus und hatten einen lediglich qualitativen Charakter. Sicherlich gebührt Weiß die Ehre, klar und deutlich nachgewiesen zu haben, daß der Pyrrhotin sich nur in einer Ebene magnetisieren läßt, derart, daß eine Magnetisierung senkrecht zu dieser Ebene unmöglich ist. Weiß hat die Frage sehr ausführlich studiert und diese sonderbare Tatsache, deren Bedeutung sowohl für die Theorie der Kristallisation wie auch für diejenige des Magnetismus sehr erheblich sein dürfte, durch elegante Experimente ganz außer Zweifel gesetzt.

Diese Mineralien, deren magnetische Eigenschaften stufenweis schwächer werden, gestatten in gewissem Sinne stetig von den ferromagnetischen zu den paramagnetischen Körpern überzugehen, deren Magnetismus viel geringer ist, die keine Hysteresis zeigen und deren Permeabilität fast vollkommen konstant ist.

Viele Versuche mit paramagnetischen Substanzen sind durch die Gegenwart geringer Eisenmengen gefälscht worden; für die meisten von ihnen ist die Suszeptibilität von der Größenordnung „ein Milliontel“; daher genügt schon $\frac{1}{500}$ Prozent metallisches Eisen, um die magnetischen Eigenschaften zu verdecken, die man studieren will, und ein derartiger Eisengehalt findet sich nicht selten in den meisten Metallen.

Der Fehler wird übrigens kleiner, wenn man mit sehr starken Feldern arbeitet, in denen die Permeabilität des Eisens an Bedeutung verliert; es muß demnach in jeder Hinsicht interessant sein, die betreffende Substanz zwischen die Pole eines jener mächtigen Elektromagnete zu bringen, die man seit den Arbeiten von Weiß und Du Bois zu konstruieren

versteht. Man findet dabei, daß eine beträchtliche Anzahl einfacher und zusammengesetzter Körper paramagnetisch sind; doch hat man bisher noch keine Beziehung zwischen den magnetischen Eigenschaften und der molekularen Zusammensetzung aufstellen können.

Wie wir sahen, hat man schon vor nahezu 150 Jahren die Tatsache bemerkt, daß Wismuth sich entgegen dem Feld magnetisiert; letztere Eigenschaft gehört nicht diesem Körper allein an, sie scheint sogar recht allgemein verbreitet zu sein; Diamagnetismus findet sich bei vielen Substanzen. Man muß jedoch beachten, daß wegen des Paramagnetismus der Luft ein Körper, der weniger magnetisch ist als sie, in ihr diamagnetisch erscheinen kann, während er in Wirklichkeit im Vakuum sich schwach paramagnetisch erweist.

Bis jetzt hat man noch kein Gesetz gefunden, das vorherzusagen erlaubt, ob eine Verbindung von Stoffen, die ihrem magnetischen Verhalten nach bekannt sind, para- oder diamagnetisch sein wird; deshalb könnte man über diesen Gegenstand nur rein empirische Angaben machen, die kein allgemeineres Interesse darbieten. Indessen ist es angebracht, auf neuere außerordentlich sorgfältige Versuche von Meslin hinzuweisen, die auf diese Frage einiges Licht werfen, indem sie gewisse Hauptpunkte in der diamagnetischen Skala festlegen.

4. Beziehungen zwischen den magnetischen und anderen Erscheinungen.*)

Die verschiedenen physikalischen Veränderungen, welche ein Körper erleiden kann, beeinflussen auch seine magneti-

*) Ich übergehe hier vollkommen die bemerkenswerten Wirkungen, welche ein Magnetfeld auf die optischen Eigenschaften der Körper ausübt; dieselben haben in den letzten Jahren zu sehr wichtigen Arbeiten Veranlassung gegeben und hochinteressante Theorien entstehen lassen; alle diese Fragen habe ich jedoch in meinem Buche „Die moderne Physik“ behandelt.

schen Eigenschaften; unter diesen Einwirkungen gehören sowohl in theoretischer wie auch in praktischer Beziehung unzweifelhaft zu den wichtigsten diejenigen, welche durch Temperaturänderungen hervorgebracht werden.

Seit langem weiß man, daß ein auf Rotglut erhitzter Magnet seinen Magnetismus verliert, und stattlich ist die Reihe der Arbeiten über diesen Gegenstand von Gilbert und Coulomb an. Aus den letzten Jahren sind die Arbeiten von Ewing, Berson, Ledeboer, Le Chatelier u. a. anzuführen, die wichtigste größere Untersuchung ist jedoch diejenige von P. Curie aus dem Jahre 1895. Sie trägt wie alle anderen Werke dieses bewundernswerten Physikers die kraftvolle Spur seines tiefen, durchdringenden Geistes an sich; die Curieschen Versuche sind nach einer außerordentlich geistreichen und genauen Methode ausgeführt; die Substanzen wurden dabei in einem kleinen elektrischen Ofen erhitzt und ihre magnetischen Eigenschaften nach einem sehr originellen Verfahren bestimmt.

Curie fand die grundlegende Tatsache, daß von einer gewissen Temperatur an, die als „Umwandlungstemperatur“ bezeichnet wird, alle ferromagnetischen Körper sich nach Art der paramagnetischen verhalten, ihre Permeabilität wird bei festgehaltener Temperatur vom Felde unabhängig. Für Eisen liegt die Umwandlungstemperatur in der Nähe von 750° , für Magnetit ist sie etwa 535° .

Bei derselben Temperatur von 750° findet man auch für andere Eigenschaften des Eisens eine plötzliche Unstetigkeit, z. B. wie Pionchon sehr geschickt nachgewiesen hat, für die spezifische Wärme; alle diese Änderungen scheinen demnach einer wirklich eintretenden Zustandsänderung zu entsprechen. Übrigens ist beim Eisen diese Umwandlung nicht die einzige, denn Curie bemerkte, als er seine Versuche auf höhere Temperaturen ausdehnte, noch zwei weitere Umwandlungspunkte bei 950° und 1280° .

Für die sehr zahlreichen paramagnetischen Körper,

welche Curie untersucht hat, ist er zu einem außerordentlich wichtigen Gesetz gelangt, dem die Physiker durchaus mit Recht seinen Namen gegeben haben; er zeigte, daß sich die magnetische Suszeptibilität umgekehrt proportional der absoluten Temperatur ändert. Dies Gesetz bewährt sich sehr gut, sowohl bei festen Metallen, wie Palladium, als auch bei Gasen, wie z. B. Sauerstoff. Fleming und Dewar, welche sozusagen die Ergänzung zu den Curieschen Versuchen lieferten, indem sie den Magnetismus innerhalb eines weiten Temperaturintervalls, aber am entgegengesetzten Ende der Skala, nämlich von der Temperatur des schmelzenden Eises bis zu derjenigen der flüssigen Luft studierten, haben die Richtigkeit des Curieschen Gesetzes für tiefe Temperaturen bestätigt.

Endlich hat Curie auch die diamagnetischen Substanzen untersucht und gezeigt, daß (mit Ausnahme von Wismut und Antimon) die Magnetisierungskoeffizienten konstant bleiben, wenn das Feld variiert und auch, wenn die Temperatur steigt. Änderungen des physikalischen Zustandes und allotrope Modifikationen haben nur mäßigen Einfluß auf die diamagnetischen Eigenschaften; diese scheinen also nur von dem Zustand der kleinsten Teilchen und nicht von ihrer Anordnung abzuhängen.

Mechanische Beanspruchung übt auf die Magnetisierung der ferromagnetischen Körper eine sehr ausgeprägte Wirkung aus; wenn man aber bedenkt, wie unbestimmt unsere Kenntnis der mechanischen Eigenschaften fester Körper ist, so braucht man nicht zu erstaunen, daß wir trotz wertvoller Arbeiten in dem Studium dieser schwierigen Frage nur wenig vorwärts gedrungen sind. Beispielsweise hat man festgestellt, daß während eines gleichmäßigen schwachen Zuges die Magnetisierung des Eisens bis zu einem Maximum wächst, das bei einer gewissen kritischen Feldstärke erreicht wird; darauf nimmt sie wieder ab und wird schwächer, als sie ohne den Zug sein würde. Man weiß auch, daß ein longitudinal mag-

netisierter Draht, wenn er gedrillt wird, eine zirkulare Magnetisierung annimmt, und daß andererseits ein zirkular magnetisierter Draht bei Drillung sich longitudinal magnetisiert.

Alle diese und viele andere analoge Erscheinungen kann man bisher nur von speziellen Gesichtspunkten aus betrachten; um einen Überblick über das Ganze zu gewinnen, müßte man die Konstitution der magnetischen Kerne besser kennen, als es heute der Fall ist. Vielleicht werden Untersuchungen, wie die von Houllevigue und Maurain über die Magnetisierung von Eisen, das elektrolytisch abgeschieden wird und sich infolgedessen sozusagen Molekül für Molekül in einem Magnetfeld ablagert, uns eines Tages hierüber wertvolle Auskunft geben.

Unter den mannigfachen interessanten Einwirkungen, welchen die Magnetisierung unterliegen kann, ist eine, die eine sehr wichtige Anwendung gefunden hat, nämlich die Wirkung der elektrischen Wellen; Marconi hat dieselbe benutzt, indem er auf Grund der Rutherford'schen Untersuchungen die Branly'sche Röhre oder den Kohärer in der drahtlosen Telegraphie mit Erfolg durch magnetische Detektoren ersetzte.

Die von den Schwingungen ausgeübten Wirkungen sind sehr verwickelter Natur, im Grunde jedoch leichter zu verstehen als manche andere, welche zuerst einfacher scheinen. Sie beruhen im wesentlichen ganz offenbar auf einer durch die Feldänderungen erzeugten Magnetisierung.

Es hat sehr lange gedauert, bis man die Erscheinungen bei der Magnetisierung durch oszillierende Entladungen zu studieren begann; erst in den letzten Jahren haben J. J. Thomson, Pellat, Bjerkness, Klemencic u. a. beachtenswerte Abhandlungen hierüber veröffentlicht. Noch später haben Tissot, Piola, Lori, Eules u. a. gezeigt, in welcher Weise elektrische Schwingungen die Magnetisierungskoeffizienten und die magnetische Hysteresis beeinflussen; in einer ganz neuer-

dings erschienenen Arbeit gelang es Maurain nachzuweisen, wie man, falls die Schwingungen unter einfachen Bedingungen auf die Magnetisierung wirken, den Sinn der Einwirkung vorausbestimmen kann, und durch eingehende Analyse der Frage glückte es diesem außerordentlich geschickten Physiker, bestimmte Regeln aufzustellen, nach denen man die Wirkung quantitativ berechnen kann.

Hängen die magnetischen Eigenschaften eines Stoffes von seinem physikalischen Zustand ab, so kann man annehmen, daß umgekehrt auch die verschiedenen Eigenschaften desselben durch die Magnetisierung beeinflusst werden, und in der Tat ist die Zahl der durch Magnetisierung erzeugten Änderungen groß: Änderung des elektrischen Widerstandes, Änderung der zuerst von Lord Kelvin, später von Houllevigue studierten thermoelektrischen Phänomene, zahlreiche Änderungen im mechanischen Verhalten usw.

Von diesen letzteren sind es hauptsächlich die Längen- und Dichteänderungen der magnetischen Körper im Felde, mit denen man sich beschäftigt hat; es sind die als Magnetostriktion bekannten Erscheinungen; sie haben im besonderen den Gegenstand sehr schöner Untersuchungen eines japanischen Physikers, Nagaoka, gebildet, welcher zeigen konnte, wie die Anwendung der thermodynamischen Prinzipien interessante Beziehungen zwischen den durch Magnetisierung erzeugten Formänderungen und dem Einfluß mechanischer Einwirkungen auf die Magnetisierung herzuleiten gestattet.

Ebenfalls mit Hilfe von theoretischen, der Thermodynamik entlehnten Betrachtungen, stellte Janet zuerst den Satz auf, daß ein Körper durch Magnetisieren für Säuren weniger angreifbar werden muß als im neutralen Zustand; auf die Tatsache gestützt, daß die elektromotorischen Kräfte in gewissem Sinne als Maß für die chemischen Reaktionen dienen können, sah dieser Gelehrte voraus, daß allgemein das stärker mag-

netisierte Eisen als der eine Pol in einem galvanischen Element positiv sein muß gegen schwächer magnetisiertes, das als zweiter Pol dient.

Diese von Duhem verallgemeinerten theoretischen Schlüsse sind von verschiedenen Experimentatoren bestätigt worden, so von Lala und Fournier, Paillot und besonders von Hurmuzescu, der hierüber eine Reihe sehr schöner Untersuchungen veröffentlicht hat.

So spielt also der Magnetismus auch eine Rolle bei den chemischen Reaktionen; übrigens hatte schon ein amerikanischer Chemiker, Ramsen, und später Colardeau Erscheinungen beobachtet, welche diese Einwirkung offenbar machten; aber erst seit den Arbeiten von Janet gehört dieselbe zu denjenigen Erscheinungen, welche sich theoretisch bestens verfolgen lassen.

Die große Mannigfaltigkeit magnetischer Einwirkungen und die Rolle, welche sie bei chemischen Vorgängen spielen, lassen vermuten, daß sie vielleicht bei niederen Lebewesen eine Störung der Lebensfunktionen verursachen können. Diese Idee liegt um so näher, als O. Lehmann gezeigt hat, daß in den vielbesprochenen flüssigen oder plastischen Kristallen unter dem Einfluß eines Magnetfeldes ausgesprochene Neigung zu bestimmten Orientierungen vorhanden ist.

Aber Du Bois hat selbst in Feldern von mehr als 50000 Einheiten keine merkliche Wirkung auf Protozoen und Diatomeen beobachten können. Es ist also nahezu sicher, daß die primitiven Lebewesen keine magnetische Empfindlichkeit besitzen; und obwohl es nicht geradezu unsinnig ist, anzunehmen, wie es manche tun, daß höhere Tiere, wie z. B. die Brieftaube, magnetische Eindrücke empfangen, die sie zur Richtungsbestimmung benutzen, so erscheint diese Annahme zum mindesten ziemlich unwahrscheinlich. Übrigens ist es wirklich erstaunlich, daß wir keinen magnetischen Sinn besitzen, wenn man bedenkt, wie zahlreich die magnetischen Wirkungen sind, und Lord Kelvin hat sogar sehr mit Recht

behauptet, daß das Fehlen eines derartigen Sinnes ein wahres Wunder sei.

5. Theorien des Magnetismus.

Alle die mechanischen und physikalischen Veränderungen, welche magnetische Körper durch Magnetisierung erleiden, scheinen auf einer Zustandsänderung des Moleküls selbst zu beruhen, und es ist nur natürlich anzunehmen, daß die Elementarwirkung in einer Orientierung des Moleküls besteht.

So sieht man sich durch das vollständige Studium der Erscheinungen zu derselben Vorstellung zurückgeführt, von der wir ausgegangen sind, und die, wie schon gesagt, zuerst von Ampère, später in genauerer Fassung von Weber, Maxwell, Ewing u. a. ausgesprochen worden ist.

Wenn diese Anschauung richtig ist, so muß man die Unterschiede in den Eigenschaften des Stahls und des weichen Eisens durch Verschiedenheiten in der Orientierung der Moleküle erklären können, also durch Strukturverschiedenheiten. Bereits Bouty hatte bemerkt, daß die gegenseitige Unabhängigkeit der temporären und permanenten Magnetisierung eine Heterogenität in der Struktur des Stahls voraussehen läßt, aber heutzutage ist man im Besitz einer Methode, welche leichte und direkte Beobachtung ermöglicht: das ist die mikroskopische Untersuchung, welche schon der Metallurgie so große Dienste geleistet hat und nun auch nach der wissenschaftlichen Seite hin die wertvollsten Auskünfte liefert.

Die mikrophotographische Untersuchung der Stahlproben erlaubt gegenwärtig die Strukturänderungen zu verfolgen und hat zur Unterscheidung verschiedener Zustände im Eisen geführt. Osmond hat alle darüber bekannten gewordenen Angaben gesammelt und in einer Theorie vereinigt, welche zum mindesten ein sehr genaues Bild der Wirklichkeit gibt.

Man hätte danach beim Eisen verschiedene Modifikationen zu unterscheiden; erstens das magnetische α -Eisen, das bei gewöhnlicher Temperatur beständig ist, Kohlenstoff nicht auflöst und kein Koerzitivvermögen besitzt; zweitens das nichtmagnetische, nur bei sehr hohen und tiefen Temperaturen beständige γ -Eisen, welches Kohlenstoff auflösen kann. Enthält dieses γ -Eisen geringe Mengen Kohle oder gewisse Metalle, wie Mangan oder Wolfram, so wird es dadurch bei gewöhnlicher Temperatur beständig.

Unterhalb 700° ist ein Stück Eisen als eine Art Netzwerk mit dicht aneinandergereihten Zellen aufzufassen, deren Wände von bestimmten Verbindungen, wie z. B. dem Cementit (einem Eisencarbid von der Zusammensetzung Fe_3C) und von γ -Eisen gebildet werden; in dieses Netzwerk sind die Teilchen des α -Eisens eingebettet.

Bringt man dieses Stück Eisen in ein Magnetfeld, so werden die Teilchen des α -Eisens zu kleinen Magneten, die sich in die Feldrichtung einzustellen suchen; durch ihre Verkettung mit den das Netz bildenden Elementen ergibt sich dabei ein gewisser Widerstand, aus dem das Koerzitivvermögen folgt, und andererseits ein Hemmnis gegen die Rückkehr in die alte Lage, wenn das Feld verschwindet, woraus sich die Hysteresis und die permanente Magnetisierung erklärt.

Man erkennt, daß ein Sättigungszustand existieren muß, denn ein magnetischer Eisenkern kann augenscheinlich keine höhere Magnetisierung annehmen, als die, welche er besitzt, wenn alle seine Molekularmagnete die Richtung des magnetisierenden Feldes haben; damit erklärt sich auch leicht der Einfluß von Biegungen, welche stellenweise das Netz des γ -Eisens zerreißen und infolgedessen den remanenten Magnetismus verringern; man versteht auch die Wirkungsweise des „Abschreckens“, der plötzlichen Kühlung, die gewissermaßen das Eisen im nichtmagnetischen γ -Zustand festbannt, und es in einen Zustand des falschen Gleichgewichts überführt, ohne daß es sich der gewöhnlichen Temperatur entsprechend hätte

umwandeln können; und schließlich gibt diese Annahme Rechenschaft von der Wirkung des „Anlassens“, das bis zu einer noch unter der kritischen gelegenen Temperatur ausgeführt, eine mehr oder minder vollständige Rückbildung bewirkt und so die Wirkung des Abschreckens teilweise zerstört.

In Wirklichkeit muß man, um alle die verwickelten Eigentümlichkeiten der verschiedenen Stahlsorten darzustellen, noch andere Modifikationen einführen, wie das β -Eisen, das nur in einem sehr beschränkten Temperaturbereich zwischen 700° und 800° beständig ist, unmagnetisch ist, und Kohlenstoff nicht auflöst, und muß außerdem auch Verbindungen wie den Martensit u. a. mit berücksichtigen.

Die schönen Untersuchungen von Osmond werfen auf das komplizierte Problem der Magnetisierung helles Licht, aber vom Standpunkt des Physikers aus erschöpfen sie den Gegenstand nicht. Man kann noch nach der Natur der Verkettung fragen, welche auf die magnetisierten Teilchen wirkt; Ewing zog zu ihrer Erklärung nur die gegenseitigen magnetischen Wirkungen der Molekularmagnete heran und gelangte damit auch zu einer vollständigen Erklärung des Verhaltens der Magnetisierungskurven; aber bei dieser Betrachtungsweise sind die Unterschiede in den Eigenschaften der Kristalle nach den verschiedenen Richtungen hin schwer zu verstehen, und man muß daher vielleicht, wie es Wiedemann und andere Physiker getan haben, die Hypothese von mechanischen Molekularkräften zu Hilfe nehmen, deren Wirkung sich zu derjenigen der magnetischen Kräfte hinzugesellt.

Wie dem auch sei, schließlich bleibt noch zu erklären, wie und warum die Moleküle selbst Magnete sind. Bekanntlich würde nach Ampère jedes Molekül von einem geschlossenen Strome umkreist werden, der einem kleinen Magneten gleichwertig ist; diese von Weber vervollständigte, von Ewing wieder aufgenommene Theorie stellt die Tatsachen recht gut

dar; man begreift wohl, daß diese Ströme sich unter der Wirkung eines Feldes zu richten streben, man begreift auch, daß im Augenblick des Beginnes der Feldwirkung Induktionsströme entstehen, die dem Lenzschen Gesetz gehorchen und folglich den ursprünglichen Strömen entgegenlaufen; diese Ströme gestatten die Erscheinung des Diamagnetismus zu erklären.

Geht man jedoch auf die Einzelheiten ein, so trifft man auf Schwierigkeiten, denen auch Maxwell vergeblich auszuweichen versucht hat; desgleichen erheben sich neue Fragen, auf die man keine Antwort geben kann: woher kommen diese Elementarströme selbst? Welches ist der Ursprung der Energiemenge, die, so klein sie auch sein mag, doch von irgendwoher geliefert werden muß?

Langevin hat die Erscheinungen des Magnetismus mit den gegenwärtig so beliebten Vorstellungen in Beziehung zu bringen gesucht, nach welchen die Materie eine Anhäufung von elektrisch geladenen Zentren, bewegten Elektronen, sein soll; er hat so auf Grund sehr eingehender Untersuchung eine umfassende Theorie aufstellen können, die wie es scheint von den meisten Tatsachen Rechenschaft gibt und auf jeden Fall außerordentlich geistreich erdacht und gehaltvoll ist. Diese Theorie ist für den Magnetismus gewissermaßen dasselbe, was für das Studium der Eigenschaften der Gase die kinetische Theorie ist; übrigens stellt sie eine enge Verbindung zwischen magnetischen und thermischen Eigenschaften her, und ermöglichte es Langevin, rechnerisch die Curieschen Gesetze wiederzufinden, welche sich auf die Unveränderlichkeit der diamagnetischen Konstanten und die der absoluten Temperatur umgekehrt proportionale Änderung der paramagnetischen Suszeptibilität bei Temperaturänderungen beziehen. Sie rechtfertigt im übrigen die von dem Genie Curies vorweggenommene Idee, daß die Kontinuität zwischen Para- und Ferromagnetismus mit derjenigen zwischen dem gasförmigen und flüssigen Zustand Ähnlichkeit besitzt. Im einen wie im

anderen Falle spielen die Wechselwirkungen der Teilchen annähernd dieselbe Rolle.

In einer ganz neuerdings erschienenen, sehr beachtenswerten Arbeit zeigte P. Weiß, wie man die Theorie des Ferromagnetismus auf eine außerordentlich einfache Hypothese über diese Wechselwirkungen gründen kann; er gelangt damit in sehr befriedigender Weise zur Deutung der früher schon am Pyrrhotin beobachteten Eigentümlichkeiten, insbesondere der seltsamen Annahme einer Sättigungsmagnetisierung in einem äußeren Felde der Stärke Null.

Diesen auf Molekularhypothesen ruhenden Theorien haben andere Gelehrte, welche glauben, physikalische Theorien einzig und allein auf den allgemeinen Prinzipien aufbauen zu können, zu denen die experimentell ermittelten Tatsachen durch Induktion hinführen, ebenfalls beachtenswerte, synthetische Theorien gegenüber gestellt. So gelangte Duhem, gestützt auf die Hauptsätze der Thermodynamik, die allerdings durch einige Hypothesen ergänzt werden, zur Aufstellung eines festgeschlossenen theoretischen Systems, in dem insbesondere die Erscheinungen der Hysterisis in Verbindung gebracht werden mit einer Reihe analoger Tatsachen, und das somit die Verzögerungs- oder Nachwirkungserscheinungen umfaßt, die man bei vielen Eigenschaften der Materie antrifft. Ganz abgesehen von ihrem philosophischen Werte führt die Duhemsche Theorie auch zu Ergebnissen, die sehr gut mit den Versuchen selbst in komplizierten Fällen übereinstimmen, im besonderen z. B. mit den Resultaten von Maurain über die von einem oszillierenden Feld, das sich über ein rotierendes oder ein konstantes Feld überlagert, erzeugte magnetische Hysterisis.

Kapitel III.

Die Induktion und der elektrische Strom.

1. Die Induktion als elektrische Grunderscheinung.

Die moderne Elektrotechnik ist aus der Entdeckung der Induktionserscheinungen emporgewachsen; denn bis zu dem Augenblick, wo diese Phänomene den Physikern ein vorteilhaftes und bequemes Mittel zur Umwandlung mechanischer Energie in elektrische an die Hand gaben, konnten die Anwendungen des elektrischen Stromes sich nur zaghaft aus dem Bereich des Laboratoriums hinauswagen.

Die galvanischen Ketten lieferten wohl Elektrizität in sehr brauchbarer Form, aber die aufgewandte chemische Energie war zu teuer, und gar zu umfangreich, zu wenig handlich waren die Einrichtungen zur Stromerzeugung. Die älteste Art der Elektrizitätserzeugung durch Reibung und Influenz besaß wohl theoretisches Interesse, das die modernen Vorstellungen nur noch vergrößern können; aber bei ihnen war der Wirkungsgrad ganz kläglich, der größere Teil der aufgewandten Arbeit ging durch Reibung verloren, indem er sich in Wärme verwandelte, und außerdem erschien die elektrische Energie in einer schwierig auszunutzenden Form; ähnlich einem winzigen Wasserbächlein, das von schwindelnder Höhe herabstürzt, war die erzeugte Elektrizitätsmenge zu

klein, das Potential, von dem sie herabsinken mußte, dagegen zu hoch.

Die Induktionsgesetze gehören mit zu den am einfachsten zu formulierenden; die wissenschaftliche Grundlage, auf welcher so viele Anwendungen von ungeheurer Tragweite ruhen, ist von gewaltiger Festigkeit, jedoch wenig ausgedehnt, und leicht ist ihr Aufbau zu übersehen.

Betrachtet man einen Ring von irgend welcher Form, der von einem in ein Magnetfeld gelagerten Leitungsdraht gedildet wird, so entsteht in diesem Leiterring, wenn man, gleichviel auf welche Weise, den ihn durchsetzenden magnetischen Kraftfluß ändert, ein elektrischer Strom, dessen Dauer gleich derjenigen der Änderung des Kraftflusses ist; man kann auch sagen, der Strom verdanke seinen Ursprung der Entstehung einer elektromotorischen Kraft in dem Draht, nämlich der elektromotorischen Kraft der Induktion, die ihrerseits in sehr einfacher Weise von der zeitlichen Änderung des gesamten magnetischen Induktionsflusses abhängt, welcher den Leiterring durchsetzt. Wenn z. B. der Kraftfluß proportional der Zeit variiert, so ist die elektromotorische Kraft gleich, und dem Zeichen nach entgegengesetzt, der Änderung des Kraftflusses während der Zeiteinheit.

In diesen wenigen Worten haben wir alles ausgedrückt, was theoretisch zu wissen nötig ist um das Prinzip der modernen elektrischen Generatoren zu verstehen; aber diese Aussage setzt natürlich die vorläufige Kenntnis des elektrischen Stromes und der Hauptgesetze, die seine Ausbreitung regeln, voraus.

Historisch betrachtet haben sich die Dinge ganz anders folgendermaßen entwickelt: Zurzeit der von Faraday 1831 gemachten Entdeckung waren die Physiker seit mehr als einem Vierteljahrhundert an den von galvanischen Ketten erzeugten Strom gewöhnt, sie benutzten schon einige seiner Wirkungen, und etwa zehn Jahre früher hatte der Oerstedtsche Versuch die unsterblichen Arbeiten Ampères und Aragos veranlaßt.

Demgemäß hat sich auch die Tradition erhalten und trotz der überragenden Wichtigkeit, welche die Induktionserscheinungen erlangt haben, weist man ihnen fast durchweg bei der in den Lehrbüchern der Elektrizität üblichen Darstellung eine Rolle zweiten Ranges zu. Dies Verfahren hat vielleicht einen gewissen pädagogischen Wert; ja man kann sogar behaupten, daß nicht etwa bloß der Zufall die zeitliche Reihenfolge der Entdeckungen bestimmt hat, und daß es ohne die vorhergehende Erfindung des Galvanometers, das Ströme von sehr geringer Intensität nachzuweisen erlaubt, selbst einem Faraday schwer geworden wäre seine Versuche auszuführen.

Nicht weniger wahr ist es aber, daß die galvanische Kette ein außerordentlich kompliziertes Gebilde ist, dessen Kenntnis nicht unbedingt notwendig ist zum Verständnis der meisten Gesetze des elektrischen Stromes, und es ist wohl möglich sich vorzustellen, daß die Induktionserscheinungen vor den elektrochemischen und elektromagnetischen hätten studiert werden können. Wäre die Sache so verlaufen, so würden die dem Physiker sich darbietenden Fragen offenbar nicht in der Reihenfolge aufgetreten sein, in der man sie gewöhnlich untersucht; und vielleicht hat es, besonders wenn man hauptsächlich in die Grundlagen der modernen Elektrotechnik eindringen will, doch ein gewisses Interesse, die Dinge von der Seite anzusehen, die uns heutzutage über jede historische Betrachtungsweise hinaus als die rationellste erscheint.

Denken wir uns also einmal einen Experimentator, begabt mit großer Geschicklichkeit und sicherem Scharfblick, nehmen wir weiter an, daß er von der Elektrizität nichts weiß, aber Magnete zur Verfügung hat und eine Vorstellung vom magnetischen Felde besitzt; geben wir ihm, wenn wir so wollen, auch noch eine hohe technische Ausbildung und die Kenntnis des Energiebegriffs, wie wir ihn jetzt fassen.

Der grundlegende, allerdings wegen der Kleinheit der zu beobachtenden Wirkungen sehr schwierige, theoretisch jedoch denkbare Versuch, der diesen geschickten Experimentator auf den Weg führen würde, auf dem er soviel neue Tatsachen antrifft, bestände darin, in der Nähe eines zu einer geschlossenen Schleife gebogenen Metalldrahtes sehr schnell einen kräftigen Magneten zu verschieben und durch irgend eine empfindliche Beobachtungsmethode festzustellen, daß sich der Draht erwärmt.

Durch weiteres eingehendes Studium dieser Erscheinung würde er dann die Bedingungen festlegen, unter denen diese Erwärmung stattfindet. Er würde finden, daß die entwickelte Wärmemenge von der relativen Bewegung des Magneten gegen den Stromkreis abhängt, und man kann weiter annehmen, daß er, um stärkere Wärmewirkungen zu erhalten, auf den Gedanken kommen würde, den Draht in Spulenform aufzuwinden, sodaß der magnetische Induktionsfluß mit der Zahl der Windungen sich vervielfacht; und da der Experimentator die Erscheinungen der Magnetisierung sehr wohl kennen soll, so würde er ohne Zweifel auch daran denken, einen Eisenkern in die Spule einzuführen, um Dank der Permeabilität des Eisens die Änderung des Induktionsflusses zu vergrößern.

Nunmehr im Besitz eines Mittels zur Hervorrufung sehr merklicher Wirkungen, könnte er zu wirklichen Messungen schreiten, und wenn er in der uns geläufigen Sprache redete, so würde er seine Resultate durch die Aussage darstellen, dass für einen gegebenen Draht die während einer gewissen Zeit entwickelte Wärme proportional sei dem Quadrat der Differenz zwischen dem magnetischen Induktionsfluß, der zu Anfang und dem, der zu Ende den Drahtkreis durchsetzt.

Seine Wißbegier würde sich aber hiermit nicht begnügen; er würde weiter gehen wollen und versuchen, tiefer in den Mechanismus der Wärmeerzeugung einzudringen, deren Sitz der Draht ist; Schritt für Schritt würde er dazu geführt werden, die verschiedenen Eigenschaften des elektrischen Stromes aufzudecken.

Wenn ihm außerdem noch die alten Versuche aus der Elektrostatik bekannt wären, wenn er davon z. B. dasjenige wüßte, was die Physiker vor den Entdeckungen Voltas wußten, so würde er sicher nicht verfehlen, darauf hinzuweisen, daß zwischen der Entladung eines Kondensators und den Erscheinungen, die in der Spule vor sich gehen, eine bedeutende Ähnlichkeit vorhanden ist. Vielleicht würde durch einen glücklichen Zufall der Draht, der anfangs einen geschlossenen Stromkreis bildete, eines Tages zerreißen, und der zwischen den beiden Enden überspringende Funke oder auch ein schon ziemlich merkbarer Schlag würde ihm die elektrische Natur seiner eigenen Versuche enthüllen.

Übrigens liegt auch durchaus kein logischer Widerspruch in der Vorstellung, daß die Elektrostatik selbst aus der Entdeckung der Induktion hätte hervorgehen können, statt daß ihr Ausgangspunkt die Beobachtung der Anziehung gewesen ist, die ein an einem anderen Isolator geriebenes Dielektrikum ausübt. Zwischen den beiden Enden eines eine Schleife bildenden Drahtes tritt, wenn dieselbe einer Änderung des magnetischen Induktionsflusses ausgesetzt wird, etwas auf, was wir heute eine Potentialdifferenz nennen. Diese kann zur Ladung eines Kondensators benutzt werden, und ein geladener Kondensator stellt ja die elektrostatische Grundercheinung dar, deren Studium im wesentlichen die Quelle aller auf diesem Gebiete der Wissenschaft bis heute gemachten Entdeckungen bildet.

Wie dem auch sei, eine Tatsache würde die Aufmerksamkeit unseres genialen von den modernen Ideen durchdrungenen Experimentators auf sich ziehen und ihm um so seltsamer erscheinen, je klarer seine Vorstellung von dem Prinzip der Erhaltung der Energie wäre: Er würde bemerken, daß er bei der Ausführung seines Grundversuches in dem Drahte Energie erschaffen hat, und trotzdem würde er, zunächst wenigstens, nirgends eine gleichwertige Energievernichtung wahrnehmen.

Er würde sich also angesichts seiner Entdeckung in derselben Lage befinden, in der wir heutigen Tages die Physiker vor den Erscheinungen der Radioaktivität sehen, und müßte sich fragen, ob er dahin gelangt sei, das Prinzip der Erhaltung der Energie außer Kraft zu setzen, oder ob ihm nicht im Gegenteil noch übrig bliebe, eine neue die erste ergänzende Entdeckung zu machen.

Die Antwort würden ihm auch hier genaue messende Versuche liefern. Wenn man einen geschlossenen metallischen Stromkreis in einem Magnetfeld verschiebt, so muß man Arbeit aufwenden; alles geht so vor sich, wie wenn dieses Feld eine Art zähes Medium wäre; es ist gewissermaßen eine Reibung zu überwinden, und das Äquivalent der mechanischen, durch diese Reibung verzehrten Energie ist es, was man in dem Draht als elektrische, sich dort von selbst in Wärme umwandelnde Energie wiederfindet.

Doch woher stammen jene Kräfte, welche das Magnetfeld auf den Stromkreis ausübt?

Muß man nicht, da ein solches Feld nur auf Magnete wirken kann, sich vorstellen, daß der Draht, in welchem dies eigentümliche, als elektrischer Strom bezeichnete Phänomen vor sich geht, selbst einem Magneten gleichwertig geworden ist, und muß man nicht weiter annehmen, daß ein elektrischer Strom um sich herum ein Magnetfeld erzeugt?

Das Experiment würde es ermöglichen diese Vermutungen zu bestätigen, und in logischer Folge ergäbe sich so eine lange Reihe der wichtigsten Entdeckungen.

Man könnte noch weiter gehen und brauchte sich nicht mit einer bloß qualitativen Kenntnis der Tatsachen zu begnügen; mittels einfacher Rechnungen, die wir aber nicht ausführen wollen, könnte man aus dem Fundamentalgesetz der Induktion in der Form, wie wir es uns aus dem Experiment hervorgegangen dachten, und aus dem Prinzip der Erhaltung der Energie die Intensität des an irgend einem Punkt durch einen Stromkreis von gegebener Form, der von einem ge-

gebenen Strom durchflossen wird, erzeugten Feldes ableiten; oder man würde, wenn man dies vorzieht, leicht zur Herleitung des Laplaceschen Elementargesetzes gelangen, welches angibt, wie die Wirkung eines Stromelementes sein muß, damit man bei der Summation über alle diese Elementarwirkungen die von einem ganzen geschlossenen Kreise ausgeübte Wirkung richtig herausbekommt.

Mit anderen Worten: es wäre leicht, von der Kenntnis der Induktionserscheinungen aus jene schönen Kapitel der Physik neu aufzubauen, die als Elektromagnetismus und Elektrodynamik bezeichnet werden, und die in anderer Weise von dem Genius eines Laplace und Ampère ausgebaut worden sind.

2. Die Theorien der Induktion.

In Wirklichkeit fand der Fortschritt der elektrischen Wissenschaft in umgekehrter Folge statt, man wußte, daß ein elektrischer Strom auf Magnete wirkt, und kannte genau die Art dieser Wirkung, als Faraday seine berühmten Versuche ausführte. Dagegen kannte man das Prinzip der Erhaltung der Energie noch nicht, und diese Unkenntnis verhinderte es anfänglich, den in Wirklichkeit vorhandenen Zusammenhang zwischen den Erscheinungen des Elektromagnetismus und der Induktion klar zu erkennen.

Einige Jahre vor Faraday hatte Ampère beobachtet, daß in dem Augenblick, wo man einen Strom durch eine Spirale schickt, ein in der Nähe befindlicher kupferner Ring, der einem Magneten gegenübersteht, von diesem Magneten abgestoßen oder angezogen wird je nach der Richtung des erregenden Stromes und der relativen Lage der Pole; er war zu diesem Versuch durch die Vermutung gekommen, daß ein Strom auf entfernte Leiter eine Art Wirkung ausüben könnte, die den aus der Elektrostatik bekannten Influenzwirkungen analog ist. Aber Ampère und De La Rive, der

ihn bei dieser Untersuchung unterstützte, waren beide in der Vorstellung befangen, daß die Erscheinung eine dauernde sein müßte, eine Vorstellung die, wie wir heutzutage übersehen, in offenbarem Widerspruch steht mit dem Prinzip der Erhaltung der Energie; da sie entgegen ihrer Vermutung nur eine kurz dauernde Erscheinung beobachteten, so glaubten sie eine Nebenerscheinung vor sich zu haben, die keine weitere Untersuchung verdiente. So allgemein gilt die bekannte Wahrheit, daß selbst die tiefsten Geister nicht von der gewöhnlichen Regel abweichen und sich nicht immer von vorgefaßten Meinungen zu befreien vermögen, statt sich vor dem Experiment zu beugen, aus dem doch alle Wahrheit fließt. So geschah es, daß Ampère an Faraday den Ruhm einer Entdeckung abtreten mußte, die an Wichtigkeit seinen eigenen früher gemachten gleichkommt.

Faraday verdanken wir nicht nur die Kenntnis der Induktionsströme, sondern auch die jetzt übliche Behandlungsweise derselben; er schrieb sie klar und deutlich einem Vorgang in dem magnetischen Felde zu und betrachtete die Kraftlinien als Wahrzeichen einer Veränderung des Mediums, in dem sie verlaufen. Sobald die Linien, welche einen Stromkreis durchsetzen, irgend einem Wechsel unterliegen, gibt sich die neue Zustandsänderung des Mediums durch einen elektrischen Strom kund.

Die Physiker seiner Zeit zeigten jedoch kein Verständnis für diese Ideen; und viele Jahre lang bemühten sich hervorragende Gelehrte mit großem Scharfsinn um die Lösung von Fragen, die uns heute recht müßig erscheinen.

Indes war es in den ersten Zeiten keineswegs unnütz zu beweisen, daß die induzierten Ströme von gleicher Natur sind wie die von galvanischen Elementen erzeugten. Da man sie anfangs unter solchen Bedingungen erhielt, daß ihre Dauer sehr kurz war, und mit Spulen, bei denen die noch kaum verstandene Selbstinduktion eine große Rolle spielt, so boten sie ziemlich abweichende Eigentümlichkeiten dar.

Andererseits hatten gerade in demselben Augenblick, wo man diese Ströme entdeckte, Mellonis Untersuchungen ergeben, daß in der Wärme, die man bis dahin als etwas Einheitliches angesehen hatte, komplexe Strahlungen enthalten sind, und durch einen Analogieschluß, einen jener mißbräuchlich angewandten Vergleiche, hatte man sich zu dem Glauben verleiten lassen, daß auch der elektrische Strom unter sehr verschiedenen Gestalten und je nach seinem Ursprung abweichenden Eigenschaften auftreten könne.

Nicht immer bietet sich die einfachste Vorstellung, zuerst dar; aber wie auf anderen Gebieten, triumphiert sie doch auch hier schließlich.

Eine Methode, ähnlich derjenigen, welcher Ampère so schöne Erfolge verdankte, und die er selbst von Newton übernommen hatte, war es, welche die Mathematiker einschlugen, die zuerst eine Theorie der Induktion aufzustellen versuchten. Sie beruht darauf, daß man sich nicht mit der physikalischen Ursache der Erscheinung befaßt, sondern aus einigen experimentell genau festgelegten Gesetzen eine Formel ableitet, die es gestattet, für zwei unendlich kleine, irgendwie gelegene Leiterelemente die Intensität des in dem einen erzeugten Stromes zu finden, wenn das andere sich entfernt oder nähert, oder auch, wenn es von einem Strom mit veränderlicher Stärke durchflossen wird. Die so erhaltene Formel besitzt sozusagen nur mathematischen Wert, sie entspricht keinem realisierbaren Vorgang, da es unmöglich ist, zwei nicht geschlossene Ströme aufeinander wirken zu lassen, und da es ja, wenn man der Maxwellschen Anschauung folgt, überhaupt keine ungeschlossenen Ströme gibt. Ist man jedoch einmal im Besitz dieser Formel, so reduzieren sich alle Fragen, die man bezüglich der Induktion in geschlossenen Kreisen von bekannter geometrischer Form stellen kann, auf mehr oder minder einfache Integrationen; die Aufgabe des Mathematikers bleibt zuweilen noch schwierig, die des Physikers ist jedoch beendet.

F. Neumann und Weber haben Theorien ersonnen, die einst berühmt waren und jetzt noch interessant sind; Ausgangspunkt der Neumannschen Theorie war das als experimentell bewiesen angesehene Prinzip, daß der bei der relativen Bewegung zweier Systeme induzierte Strom während jeder sehr kurzen Zeit der jeweiligen Geschwindigkeit der Bewegung proportional ist; der berühmte Gelehrte gelangte damit zu dem Nachweis einer einfachen Beziehung zwischen der erzeugten elektromotorischen Kraft und der bei der Verschiebung aufgewandten Arbeit, die zur Überwindung der elektromagnetischen Wechselwirkungen zwischen den beiden Stromkreisen dient.

Die auf diese Weise hergestellte Verbindung zwischen Induktion und Elektromagnetismus war höchst interessant, aber sie konnte ihre wahre Bedeutung erst im Lichte des Prinzips von der Erhaltung der Energie bekommen.

Bekanntlich sind unabhängig von einander und fast zu gleicher Zeit zuerst Helmholtz und nach ihm Lord Kelvin zu dem gleichen Schluß gelangt: Die Anwendung des Prinzips der Erhaltung der Energie ermöglicht die Berechnung der elektromotorischen Kraft der Induktion, welche einer bekannten Änderung des einen Stromkreis durchsetzenden magnetischen Kraftflusses entspricht. In seiner berühmten Abhandlung über die „Erhaltung der Kraft“ gab Helmholtz zum erstenmal den fünf Jahre vorher von Robert Mayer ausgesprochenen Ideen eine strenge Fassung, und man kann wohl sagen, daß diese Anwendung des Energieprinzips auf die Erscheinungen der Induktion die erste feierliche Bestätigung des Wertes dieses Prinzips, und sozusagen sein erstes Auftreten in der Wissenschaft gewesen ist, in der es berufen war bald die erste Rolle zu spielen.

Lange Zeit hat man geglaubt, und oft wird es selbst in ausgezeichneten Werken über Elektrizität noch wiederholt, daß die Induktionserscheinungen als eine notwendige Folge der Kombination des Energieprinzips mit den Gesetzen des

Elektromagnetismus anzusehen seien. So ausgedrückt ist der Satz ungenau; es hieße nur den Sinn des Prinzips übertreiben, wollte man ihm eine so ausschließliche Herrschaft über die Natur zuerteilen. Wenn irgendwo in einem geschlossenen System eine Energiemenge auftritt, so muß anderswo eine gleichwertige Menge verschwinden; aber nichts in dem Prinzip weist diesem zweiten mit dem ersten parallel laufenden Vorgang einen besonderen Ort oder eine bestimmte Form an.

Ein Magnet zieht einen Strom an, es wird also mechanische Arbeit geleistet; aber woher stammt dieselbe? Das Prinzip sagt uns hierüber nichts; es könnte eine Abkühlung des stromführenden Drahtes, eine Zustandsänderung in dem den Stromkreis und den Magneten trennenden Medium oder irgend welche Veränderungen in dem Magneten selbst stattfinden. Ja noch mehr: selbst dann wenn wir nirgends etwas entdecken könnten, so hätten wir immer noch, um nicht unsere Verlegenheit offen eingestehen zu müssen, das Hilfsmittel uns mit Worten zu begnügen und zu sagen, die gewonnene Arbeit stamme von einer Verminderung der potentiellen Energie des Systems. Das ist ja auch die Form, in der man die Art und Weise darstellt — ich sage absichtlich nicht „erklärt“ — , nach welcher zwei permanente Magnete aufeinander wirken.

Aber wenn man einen Strom betrachtet, der sich unter der Wirkung elektromagnetischer Kräfte verschiebt, und dabei findet daß man auf diese Weise kontinuierliche Rotationen erhalten kann, so erscheint es wenig wahrscheinlich, daß die gewonnene Arbeit in diesem Falle von einem entsprechenden Verlust des Systems an potentieller Energie herrühren soll. Man müßte in der Tat annehmen, daß dieser Energiebetrag sozusagen einen unendlichen Wert hat; eine derartige Vorstellung widerstrebt aber geradezu dem gesunden Verstand. So werden wir also ganz naturgemäß zu der entgegengesetzten Annahme geführt: Die potentielle Energie bleibt ungeändert, und die mechanische Arbeit, welche wir gewinnen, hat ihr

Äquivalent in einer Verkleinerung der elektrischen Energie des Stromes oder, wenn man lieber will, in den Wirkungen einer elektromotorischen Kraft, die längs des Stromkreises entsteht, auf den die elektromagnetischen Kräfte wirken.

Nunmehr ist nichts leichter, als diese elektromotorische Kraft zu bestimmen, und das Prinzip der Erhaltung der Energie tritt jetzt bei der Berechnung derselben in seine Rechte. Es liefert uns dabei den schon früher angegebenen Wert für die gesamte in einem geschlossenen, von einem veränderlichen magnetischen Kraftfluß durchsetzten Stromkreis, und man wird demnach anzunehmen haben, daß diese elektromotorische Kraft die gleiche ist, welches auch die Intensität des bereits vorher in dem Draht fließenden Stromes sein möge, auch den Fall eingeschlossen, daß dieselbe anfangs Null ist.

Statt den ganzen Stromkreis ins Auge zu fassen, kann man auch ein einzelnes Element des Leitungsdrahtes betrachten, das sich in einem Magnetfelde verschiebt; es läßt sich leicht beweisen, daß für die elektromotorische Kraft in diesem Element als Maß das Volumen des Parallelepipeds gilt, das als Kanten drei Vektoren hat, von denen der erste die Intensität des Magnetfeldes, der zweite die Länge des Leiterstückes und der dritte die Geschwindigkeit der Verschiebung desselben darstellt.

In dieser Form ist das Gesetz leicht auf die Fälle anwendbar, die man am häufigsten in der Praxis antrifft.

Um die Bestimmung der elektromotorischen Kraft vollständig zu machen, muß man natürlich noch den Sinn angeben, in welchem sie wirkt; für diesen gilt immer das Gesetz, daß die induzierte elektromotorische Kraft der erzeugenden Ursache, welcher Art dieselbe auch sein möge, entgegen wirkt. Nach dem Prinzip der Erhaltung der Energie kann es auch gar nicht anders sein; aber die Tatsache ist älter als das Prinzip, sie wurde bekanntlich im Jahre 1833 von dem russischen Physiker Lenz beobachtet, der damit für einen

besonders interessanten Fall einen sehr allgemeinen Satz aussprach: „Immer und überall ist die Rückwirkung der Wirkung entgegengesetzt.“

Die Kenntnis des Fundamentalgesetzes der Induktion, eines Gesetzes, das auf diese Weise aus einem allgemeinen Prinzip folgt, genügt zur Behandlung aller Probleme, die heutzutage dem Ingenieur gestellt werden, jedoch befriedigt sie denjenigen nicht, der sich bestimmte Vorstellungen von den Erscheinungen machen will.

Wiederum ist es Faraday, welchem man die Grundidee verdankt, die alle von modernen Physikern erdachten Hypothesen beherrscht; er kam als erster auf die Vorstellung, daß der Ursprung der elektrischen Erscheinungen weniger in den Leitern als in dem dielektrischen Medium, das sie trennt, zu finden sei. Später, als die Bedeutung des Energiebegriffs vollkommen klar erkannt war, zeigte Maxwell, der den Ideen Faradays eine strenge Fassung gab, daß in jedem Punkte des Magnetfeldes Energie in einer uns unbekannt Form aufgespeichert ist, und zwar derart, daß die Verschiebung eines an diesem Punkt befindlichen Leitungsdrahtes infolge der Rückwirkungen, welche das magnetisch deformierte Medium auf diesen Draht ausübt, nur unter Aufwendung mechanischer Arbeit vor sich gehen kann. In neuerer Zeit hat dann der englische Mathematiker Poynting eine vollständige Theorie ausgebaut, in welcher er vollkommen streng zeigt, wie man das Medium, welches einen vom elektrischen Strom umflossenen Leiter umgibt, als den Hauptträger der Wirkungen ansehen kann, während sich in dem Leiter nur ihre letzte Phase kundgibt.

Bekannt ist es, welche wertvollen Früchte in unseren Tagen die Vorstellung Faradays gezeitigt hat; sie führte Hertz zu seinen genialen Versuchen über die Ausbreitung der Induktionserscheinungen und zur Entdeckung der elektrischen Schwingungen.

Ich will auf dieses Gebiet, das ich schon anderwärts behandelt habe, nicht weiter eingehen, und kann nur wieder auf mein Buch „Die moderne Physik“ hinweisen, wenn ein Leser etwa wissen möchte, wie sich die Induktionserscheinungen in den modernen Theorien z. B. in der Lorentzschen als Folge von Geschwindigkeitsänderungen der Elektronen ergeben.

3. Der magnetische Kreis.

Welche Theorie man auch annehmen mag, experimentell festgelegt ist die vollkommene Gegenseitigkeit zwischen den elektrischen und magnetischen Kräften; das elektrische und das magnetische Feld stehen in engster Beziehung zueinander, eine Änderung des einen von ihnen erzeugt unmittelbar und unumgänglich das andere.

Ein elektrischer Strom erregt also um sich herum ein Magnetfeld und ist daher einem Magneten vergleichbar; wie bekannt hat Ampère gezeigt, daß dieser gleichwertige Magnet eine von dem Stromkreis als Randlinie begrenzte magnetische Schale sein muß, deren Stärke zahlenmäßig gleich der Intensität des Stromes ist, und deren Nordpol, vom Strom aus gesehen, nach links weist.

In ähnlicher Weise läßt sich der Vergleich für die mechanischen Wirkungen durchführen, welche ein Strom im Magnetfelde erfährt, auch hierbei verhält sich der Strom wie die äquivalente Schale und seine Wirkungen lassen sich berechnen, indem man ihm die potentielle Energie erteilt, welche diese Schale haben würde; man muß jedoch, wie weiter oben ausgeführt worden ist, wohl beachten, daß dieses nicht der Wert der Energie ist, welche dem Strom wirklich als potentielle zukommt.

Statt in dieser Weise die elektromagnetischen Kräfte aus den Änderungen der potentiellen Energie herzuleiten, kann man sich auch, analog wie es bei der Berechnung der elektromotorischen Kraft der Induktion geschah, an ein

Elementargesetz wenden, welches die Wirkung auf ein von einem Strom bekannter Intensität durchströmtes Leiterelement in einem gegebenen Magnetfeld angibt; diese Kraft steht senkrecht auf der Ebene, welche die Feldrichtung und das Leiterelement enthält und wird gemessen durch das Volumen des Parallelepipeds, das zur Grundfläche ein aus der Feldstärke und dem Leiterelement gebildetes Parallelogramm und zur Höhe eine Länge gleich der Stromintensität besitzt.

Diese insbesondere für die Anwendung bequeme Formel ist, wie leicht ersichtlich, eine Folge des allgemeinen auf die Betrachtung der Energie gegründeten Gesetzes; sie ist zugleich gewissermaßen die Umkehrung der Laplaceschen Formel, welche den Ausdruck für das an einem gegebenen Punkt von einem bestimmten Leiterelement erzeugte Feld darstellt. In der Tat kann man zur Bestimmung des von einem Strom erzeugten Feldes auch analytisch vorgehen und, statt die Wirkung des ganzen einer magnetischen Schale vergleichbaren Stromes ins Auge zu fassen, kann man diese Wirkung als die Resultante von Elementarwirkungen betrachten, welche jedes der Stromelemente hervorbringt. Es ist wichtig, noch einmal darauf hinzuweisen, daß ein solches Verfahren bei den gegenwärtig geltenden Vorstellungen lediglich mathematischen Wert hat. Um ein Feld auszuwerten, kann man nicht etwa ein Stromelement auf einen Magnetpol wirken lassen, denn der Strom ist immer ein geschlossener, aber es ist möglich, ein Elementargesetz zu finden, welches bei der Summation über einen wirklichen geschlossenen Strom einen dem Experiment entsprechenden Ausdruck liefert. Das ist das Laplacesche Gesetz, welches der berühmte Gelehrte wie bekannt in derselben Sitzung veröffentlichte, in welcher Biot und Savart der Akademie das Resultat ihrer Messungen über die Wirkungen eines in einem geraden oder geknickten Leiter fließenden Stromes auf einen Magnetpol mitteilten.

Mag man nun das eine oder das andere Rechnungsverfahren benutzen, man kann in dem für die Anwendungen

wichtigsten Fall, dem Fall eines Solenoids oder, was praktisch auf dasselbe hinauskommt, einer Spule, das Feld leicht auswerten. Im Innern einer um einen unendlich langen Zylinder gewickelten Spule ist das Feld parallel zur Zylinderachse und seine Stärke ist proportional der Intensität des Stromes, der die Spule durchfließt, und außerdem proportional der Zahl der Windungen auf der Längeneinheit. Sind die Windungen regelmäßig längs eines Kreisringes angeordnet, so sind die Kraftlinien Kreise, und vorausgesetzt, daß der Radius des Querschnitts dieses Ringes oder Toroides klein ist im Verhältnis zum Umdrehungsradius des Ringes, ist das Feld an allen Punkten des Ringes konstant und hat den gleichen Wert wie in einem unendlich langen Zylinder. Angenommen, man bringt Eisen in das Innere dieses Ringes, so wird die Feldstärke wegen der größeren Permeabilität des Eisens wachsen.

Statt der Feldintensität kann man, wie wir es früher gemacht haben, den magnetischen Induktionsfluß betrachten, der in dem Eisenkern entsteht und für den man den Ausdruck erhält, indem man den Wert der Induktion mit dem Querschnitt des Kerns multipliziert. Aus diesen Betrachtungen folgt, daß der Induktionsfluß von einer gewissen Anzahl von Elementen abhängt, die man aber in zwei Gruppen teilen kann; die erste stellt gewissermaßen die erregende Ursache des Induktionsflusses dar, die zweite umfaßt die für das Medium charakteristischen Größen, in welchen derselbe entsteht. Die erste hat den Namen „magnetomotorische Kraft der Spule“ die zweite den Namen, „magnetischer Widerstand oder Reluktanz des Kreises“ erhalten, und man gelangt so zur Formulierung des folgenden Gesetzes: Der magnetische Induktionsfluß durch den Kern eines geschlossenen Solenoids ist gleich dem Quotienten aus der magnetomotorischen Kraft des Solenoides und dem magnetischen Widerstande des Kernes.

Der Wert der magnetomotorischen Kraft ist (im C. G. S.-

System) genau das Produkt $\frac{4\pi}{10}$ mal der Zahl der Ampèrewindungen der Spule (d. h. mal dem Produkt aus der Windungszahl und der Intensität des Stromes, der sie durchfließt in Ampère gemessen); die Reluktanz ist der Quotient aus der mittleren Länge des Toroids und dem Produkt aus Querschnitt und Permeabilität des Kernes.

In dieser Form tritt eine sehr auffallende Analogie zutage: Man kann die Sache so ansehen, als wenn der magnetische Kreis den magnetischen Induktionsfluß in ganz ähnlicher Weise leitet wie der elektrische Stromkreis nach dem Ohmschen Gesetz den elektrischen Strom leitet. Die magnetomotorische Kraft ist das Analogon der elektromotorischen Kraft des Generators, der den elektrischen Strom unterhält; die Reluktanz das Analogon des elektrischen Widerstandes; beide Größen sind direkt proportional der Länge und umgekehrt proportional dem Querschnitt des gegebenen Kreises, und ihr Wert hängt außerdem von einem Koeffizienten ab, welcher die mehr oder minder große Leichtigkeit charakterisiert, mit welcher das betrachtete Medium eine Strömung hindurchläßt, elektrische Strömung, wenn es sich um ein leitendes Medium unter der Wirkung einer elektromotorischen Kraft handelt, magnetischen Induktionsfluß, wenn man ein magnetisches Medium unter der Wirkung einer magnetomotorischen Kraft betrachtet.

Man darf jedoch dabei nicht aus den Augen verlieren, daß eine Analogie keine Identität ist; eine selbst sehr weitgehende Ähnlichkeit zwischen den Formeln schließt keineswegs eine wirkliche Gleichheit der Erscheinungen in sich.

Der magnetische Induktionsfluß und die elektrische Strömung vertragen in einem sehr wesentlichen Punkte keinen Vergleich. Der elektrische Strom muß in jedem Augenblick der Quelle, die ihn unterhält, Energie entnehmen, weil er seinerseits gemäß dem Jouleschen Gesetz in jedem Augenblick Energie in Form von Wärme zerstreut; die magnetomotorische

Kraft unterhält dagegen den magnetischen Induktionsfluß, ohne daß derselbe eine Wärmeentwicklung veranlaßt; der elektrische Strom, welcher in den Windungen der Spule fließt, ist wohl notwendig zur Unterhaltung des magnetischen Induktionsflusses, aber es braucht für diesen Zweck nicht der kleinste Bruchteil der Stromenergie aufgewandt zu werden.

Ein anderer Unterschied, der vielleicht weniger wichtig ist, wenn man nur die theoretischen Grundlagen betrachtet, jedoch im Hinblick auf die Praxis sehr viel Beachtung verdient, rührt daher, daß man nicht ganz berechtigt ist, Leitfähigkeit und Permeabilität zu vergleichen. Während nämlich der Koeffizient der Leitfähigkeit eine wirkliche Konstante ist, wenigstens solange die Temperatur sich nicht ändert, hängt der Koeffizient der Permeabilität im Gegenteil von dem magnetischen Zustand des Metalles ab und zwar in einer ziemlich komplizierten Weise.

Wie wir sahen, wächst er von dem endlichen Wert, den er bei schwacher Induktion besitzt, zunächst auch, wenn die Induktion steigt, geht dann für einen gewissen Wert derselben durch ein Maximum hindurch und nimmt schließlich wieder ab und nähert sich der Einheit, wenn die Induktion unendlich ansteigt.

Die Reluktanz ist also in Wirklichkeit nicht unabhängig vom magnetischen Induktionsfluß, wie der elektrische Widerstand unabhängig ist von der Stromintensität. Diese Veränderlichkeit macht die auf den magnetischen Kreis bezüglichen Probleme ganz eigenartig kompliziert.

Abgesehen von diesem Vorbehalt kann man sich jedoch ruhig von den Analogien leiten lassen, welche die beiden Kreise aufweisen, und so Fragen lösen, die sich ohne den elektrischen Leiterkreis recht schwer hätten aufklären lassen. Diese Art des Vorgehens hat anfangs nicht verfehlt, auf die Physiker, die immer nur dann vorwärts schreiten wollen, nachdem sie sich von der vollkommenen Sicherheit des betretenen Gebietes überzeugt haben, einen etwas gewagten Eindruck zu machen.

Sie sind hier von den Praktikern überholt und schließlich mitgezogen worden; Ingenieure und nicht Theoretiker waren es, die zuerst die Möglichkeit der Nebeneinanderstellung von magnetischem Kreis und elektrischem Strom erkannten, und in der Tat fand das kühne Vorgehen jener anfangs durchaus nicht die volle Billigung dieser.

Bis zur Erfindung des Grammeschen Ringes konnte deshalb auch die Betrachtung eines geschlossenen magnetischen Kreises kein Interesse darbieten; wozu sollte man sich auch mit einem Magneten beschäftigen, der keine Pole besitzt und keine Kraftlinien nach außen entsendet, wenn man nur äußere Erscheinungen ins Auge faßt, z. B. Anziehungsercheinungen oder auch die Erzeugung induzierter Ströme durch Verschiebung eines Leiters in dem den Magneten umgebenden Felde. In dieser Hinsicht ist der geschlossene Kreis wirkungslos, er zieht kein Eisenfeilicht an und bringt in dem umgebenden Raum keine Veränderung hervor, aber trotz dieses Fehlens äußerer Wirkungsfähigkeit ist er doch nicht einfach ein beliebiges Stück Eisen; wenn man das Eisen zerbricht und damit die Induktionslinien zerreißt, so erscheinen an den Bruchstellen Pole und in dem so geschaffenen Interferrikum zeigt das magnetische Kraftlinienbild die Existenz des Induktionsflusses an, der bis dahin auf den magnetisierten Ringkörper beschränkt war.

Und gerade wenn der Kreis in dieser Weise zu einem offenen gemacht wird, ist es zweckmäßig den Vergleich mit dem geschlossenen elektrischen Strom durchzuführen; man muß dabei beachten, daß der Induktionsfluß sich durch die Luft hindurch schließt, und kann dann auf diesen Fall die Formel anwenden, die in aller Strenge nur für den Fall einer unendlich langen Spule bewiesen war oder für eine Spule, deren beide Enden sich berühren.

Selbst dann, wenn der Draht nicht mehr gleichmäßig um den Ring gewunden ist, ja auch bei Unterbrechungen der Wickelung haben wir die nach Analogie mit dem Ohmschen

Gesetz verallgemeinerte Formel anzuwenden mit den Zusätzen, welche Kirchhoff für verzweigte Stromkreise abgeleitet hat.

So gelangen wir zu dem Satz, daß jedes Stück eines magnetischen Kreises eine gewisse Anzahl Ampèrewindungen zur Unterhaltung des entsprechenden Induktionsflusses benötigt und daß die Gesamtzahl der Ampèrewindungen gleich der Summe dieser Teile ist, und können uns daraufhin ein Bild davon machen, wie sich der Energieverbrauch infolge der in der Magnetisierungsspule entwickelten Wärme auf die verschiedenen Teile des magnetischen Kreises verteilt; insbesondere lernt man verstehen, wie selbst ein Interferrikum von geringer Dicke eine beträchtliche magnetomotorische Kraft verbraucht; in derselben Weise können wir auch an die wichtigen Probleme herangehen, die in dem Fall verzweigter magnetischer Kreise auftreten.

Ungefähr im Jahre 1866 begannen diese Vorstellungen über den magnetischen Kreis eine bestimmte Form anzunehmen und ein geschlossenes System zu bilden; zwei englische Gelehrte J. und L. Hopkinson dürfen mit Recht die Ehre beanspruchen, sie zuerst angewandt zu haben; dieselben ermöglichten es ihnen, eine wirkliche Theorie der Dynamomaschinen aufzustellen. Früher mußte man sich an empirische Formeln und langwierige Experimentaluntersuchungen halten, um einen Konstruktionsentwurf aufzustellen, und Mißgriffe kamen dabei recht oft vor; heute geht man bei der Berechnung ganz rationell vor und kann im Voraus sagen, wie groß im regelmäßigen Betriebe die elektromotorische Kraft und die Stromabgabe bei einer solchen rationell entworfenen Maschine sein wird.

Die Betrachtung des magnetischen Kreises hat uns zugleich auch eine bessere Kenntnis der Bedingungen vermittelt, die zu erfüllen sind, wenn man ein sehr kräftiges Magnetfeld haben will. Man kann so, wie es Weiß und du Bois sehr geschickt ausgeführt haben, außerordentlich kräftige Elektromagnete erhalten, die in Räumen von der Ordnung eines Centimeters Felder geben, welche 200 000 mal stärker sind als die Horizontalkomponente des Erdfeldes.

4. Der Wechselstrom.

Solange man als Generatoren nur die hydroelektrischen und thermoelektrischen Elemente hatte, war die einzig bekannte Stromform der Gleichstrom; es mußte zum mindesten nutzlos erscheinen, hätte man die Dinge komplizieren und irgend ein mechanisches Verfahren anwenden wollen, das die Richtung des von einem Element gelieferten Stromes umzukehren gestattet, um dann schließlich einen Strom zu erhalten, der ungeeignet ist zur Elektrolyse, unfähig zur Erregung eines Elektromagneten und ohne Wirkung auf ein gewöhnliches Galvanometer.

Die Entdeckung der Induktionserscheinungen änderte jedoch die Bedingungen, unter denen sich von Haus aus die elektrische Energie darstellt. Diese Erscheinungen stellen uns geradezu vor das Problem der Wechselströme.

Wenn man einen geschlossenen Leitungskreis in einem Magnetfeld — nehmen wir der Einfachheit halber an in einem homogenen Felde — verschiebt, so kann man einen Strom erhalten, indem man den Induktionsfluß, der ihn durchsetzt, variieren läßt. Die Ebene des Stromkreises sei z. B. anfangs senkrecht zu den Kraftlinien und man drehe sie um einen rechten Winkel, bis sie den Kraftlinien parallel ist. Der Induktionsfluß, der etwa von der rechten Seite her in den Kreis eintrat, war ein Maximum und ist jetzt Null geworden; dabei ist ein Strom entstanden aber von geringer Dauer. Will man den Versuch fortsetzen, so muß man notwendig die Drehung des Stromkreises fortsetzen; der Induktionsfluß tritt nun durch die andere, die linke Seite ein, er wird negativ, sein absoluter Wert wächst und geht durch ein Maximum hindurch. Drehen wir den Stromkreis weiter, um ihn in seine Anfangslage zurückzubringen, so nimmt der Induktionsfluß nunmehr ab, wird von neuem Null, wechselt dann sein Zeichen und wächst von neuem dem absoluten Betrage nach. Der erzeugte Strom hat folglich während der Dauer

der Umdrehung seine Richtung gewechselt; man hat einen Wechselstrom erhalten.

Diese Stromform erschien anfangs als ein eigenartiger Spezialfall, zwar brauchbar zur Hervorbringung ziemlich kräftiger physiologischer Wirkungen, jedoch theoretisch nur wenig interessant und für praktische Anwendungen kaum geeignet. Die ersten Bemühungen der Physiker und Maschinenkonstrukteure galten daher im Anschluß an die Faradayschen Entdeckungen der Auffindung von künstlichen Mitteln, um die Induktionsströme umzukehren und sie praktisch in Gleichstrom zu verwandeln; und wirklich nahm die Elektrotechnik erst von dem Tage an ihren Aufschwung, wo Gramme das Problem ebenso einfach wie elegant löste.

Erst viel später lernte man die großen Vorzüge der Wechselströme würdigen. Bis zum Jahr 1891 muß man die Literatur verfolgen, um eine bedeutende Arbeit über die technische Anwendung dieser Stromart zu finden; von dieser Zeit an hat sich die Kenntnis derselben intensiv entwickelt; die großen Schwierigkeiten, denen man anfangs bei der Energieverteilung durch Wechselströme begegnete, sind eine nach der andern verschwunden, und die besonderen Eigentümlichkeiten dieser Ströme konnten nach systematischem Studium rationell ausgenutzt werden.

Auch hierbei hat die reine Wissenschaft aus dem Fortschritt der Technik Nutzen gezogen; die Männer der Praxis haben den Gelehrten Fragen gestellt, an welche diese zweifellos niemals gedacht hätten, durch deren Lösung sie aber ihrerseits der Praxis die wertvollsten Dienste leisteten. So ergab sich zwischen Werkstatt und Laboratorium ein außerordentlich fruchtbares Zusammenwirken.

Um die gegenwärtig bei den Elektrikern übliche Sprache zu verstehen und sich von der Entstehungsursache einiger neuer Apparate Rechenschaft geben zu können, die speziell für Wechselströme geeignet und heutzutage sehr verbreitet sind, braucht man gewisse Definitionen.

Ein Wechselstrom ist ein Strom, der bald in einem, bald im entgegengesetzten Sinne fließt, die in der Praxis benutzten Wechselströme sind jedoch immer periodisch, d. h. die Intensität nimmt jeweils nach gleichen Zeitabschnitten wieder dieselben Werte an; die Periode des Stromes ist dabei die kürzeste Zeit, nach Ablauf deren der Strom identisch denselben Wert und dieselben Eigenschaften annimmt; die Frequenz ist die Zahl der Perioden in einer Sekunde.

Das erste zu messende Element bei einem Wechselstrom ist die Frequenz; hierzu hat man verschiedene Anordnungen vorgeschlagen. Kampf⁵⁾ benutzt zu diesem Zweck eine Resonanzerscheinung; ein von dem zu untersuchenden Strom erregter Elektromagnet läßt sich vor einer Reihe schwingender Zungen verschieben, von denen jede eine bekannte Anzahl Schwingungen in der Sekunde ausführen kann, und zwar variiert diese Zahl von einer Zunge zur andern. Wenn der Elektromagnet vor derjenigen Zunge ankommt, deren Frequenz gleich der des Stromes ist, so schwingt diese Zunge sehr energisch und gibt einen kräftigen Ton. P. Janet hat eine außerordentlich geistreiche Anordnung erdacht, welche außer der Frequenz noch andere Elemente des Stromes zu bestimmen erlaubt. Eine Registriertrommel wird mit Papier bekleidet, das mit einer Lösung von Ferrocyankalium und Ferrocyanamonium getränkt ist, und gegen dies Papier drückt ein Stahlstift mit etwas abgerundeter Spitze. Läßt man durch Vermittlung des Stiftes einen Wechselstrom durch das Papier hindurchgehen, so beobachtet man jedesmal, wenn das Potential der Spitze einen gewissen positiven Wert überschreitet, eine blaue Marke, die von der elektrolytischen Zersetzung des Cyanürs herrührt. Indem man die Trommel mit bekannter Geschwindigkeit rotieren läßt, kann man aus der Zahl der so aufgezeichneten kurzen blauen Marken die Periode des Stromes ableiten.

Zur vollständigen Kenntnis eines Wechselstromes sind noch andere Bestimmungsstücke nötig; man muß in jedem

Augenblick wissen, welche Intensität er hat und welche Spannung an den Enden des Kreises herrscht. Das erste brauchbare Verfahren zur Lösung dieses schwierigen Problems wurde im Jahre 1882 von Joubert angegeben; dieser hervorragende Physiker eilte damit in Wahrheit seiner Zeit voraus, er erkannte schon zu einer Zeit, als Wechselströme noch wenig benutzt wurden, ihre hohe Bedeutung und gab eine geistreiche und vollständig neue Methode zum Studium derselben an. Die Grundidee derselben besteht darin, die zur gleichen Phase gehörenden Wirkungen sich immer wiederholen zu lassen, so daß man dauernde Angaben erhält. Will man z. B. die Spannung eines Wechselstromgenerators untersuchen, so setzt man auf die Maschinenwelle einen Unterbrecher mit Momentankontakten so auf, daß dieselben in einer bestimmten Phase der elektromotorischen Kraft eine Verbindung mit einem geeigneten Elektrometer herstellen; die Elektrometernadel erfährt dann eine dauernde Ablenkung, welche der Potentialdifferenz in dieser Phase entspricht. Ist das Elektrometer ein Quadrantelektrometer, so muß man es natürlich in solcher Schaltung gebrauchen, daß die Richtung der Ablenkung unabhängig ist von der Richtung der elektromotorischen Kraft. Joubert hat zur Lösung dieses Problems ein Verfahren erdacht, das heute als klassisch gelten kann. Später hat P. Janet das Prinzip einer stroboskopischen Methode angegeben, die an Stelle der Joubertschen Methode benutzt werden kann, und in der Folgezeit sind noch andere ebenfalls interessante Methoden vorgeschlagen worden.

Z. B. hat Hospitalier einen eleganten Apparat konstruiert, dem er den Namen Ondograph gegeben hat, und der im wesentlichen aus einem rotierenden Kommutator besteht, welcher einen Kondensator zu laden und darauf über einen geeigneten Registrierapparat zu entladen gestattet, der jenachdem die Spannung oder die Intensität des Stromes angibt. Der Kommutator, welcher 999 Umdrehungen macht, während ein von dem zu untersuchenden Strom gespeister Motor de-

ren 1000 macht, nimmt das periodische Phänomen jeweils in einer Phase auf, die sich bei jeder Umdrehung um $\frac{1}{1000}$ verschiebt. Der Ausschlag des Registrierapparates erfolgt also langsam, sodaß er eine volle Periode beschreibt während der Zeit, in welcher der Strom selbst tausend Perioden ausführt. Die Methode gibt ausgezeichnete Resultate, ist aber augenscheinlich nur dann anwendbar, wenn die Erscheinung sich unverändert während einer großen Zahl von Perioden wiederholt.

Statt eine indirekte Methode zu benutzen, die sozusagen die Stromänderungen punktweise angibt, kann man direkte Methoden anwenden, die unmittelbar und möglichst zuverlässig die aufeinander folgenden Werte des Stromes aufzeichnen.

Um eine solche Aufzeichnung wirklich auszuführen, mußte man ein Galvanometer haben, dessen Ausschlag in jedem Augenblick der Stromintensität proportional ist; die gewöhnlichen Apparate genügen jedoch dieser Forderung nicht. Außer der von dem Strom herrührenden Direktionskraft unterliegt die Magnetnadel eines Galvanometers einerseits den Trägheitskräften, andererseits den dämpfenden Kräften, die von der Reibung und von Induktionserscheinungen herrühren. Blondel, der methodisch und mit großer Ausdauer über diesen Gegenstand eine Reihe bemerkenswerter Untersuchungen ausgeführt hat, fand auf diese Weise, welche Bedingungen man einhalten muß, um jene störenden Wirkungen möglichst zu verringern, und gelangte so zur Konstruktion seiner Oszillographen, die für den Fall der technischen Wechselströme mit 25 bis 100 Perioden in der Sekunde in sehr bequemer Form Aufzeichnungen mit einer für die Praxis durchaus hinreichenden Genauigkeit geben.

Eine theoretisch vollkommeneren Lösung gab im Jahre 1897 H. Abraham; seine Idee besteht darin, die störende Wirkung der Trägheits- und Dämpfungskräfte vollständig und zwar automatisch unschädlich zu machen durch gleiche ent-

gegenwirkende Kräfte, die von der wechselseitigen Induktion zwischen dem zu untersuchenden Stromkreis und dem Galvanometerkreis herrühren. Der Rheograph von Abraham und Carpentier verlangt eine vorsichtige Behandlung, aber in geübten Händen ermöglicht er nicht nur die Untersuchung gewöhnlicher Wechselströme, sondern auch der oszillierenden Entladungen mit Perioden von $\frac{1}{10\,000}$ Sekunde, was mit einem gewöhnlichen Oszillographen nicht möglich wäre.

Mit Apparaten wie den angegebenen oder ähnlichen, wie z. B. demjenigen von Ader und Cauro oder dem Braunschens, bei welchem eine geistvolle von Hess vorgeschlagene Idee verwirklicht ist, — nämlich die Anwendung eines trägheitslosen Indikators durch Benutzung der Ablenkung der Kathodenstrahlen im Magnetfeld — ist man heute imstande, mit ziemlicher Sicherheit die Stromkurve der in der Technik gebrauchten Dynamomaschinen aufzuzeichnen.

Man bemerkt dabei ohne weiteres, daß der Strom niemals die einfachste Form der periodischen Funktionen besitzt, nämlich die Form einer harmonischen oder Sinusfunktion. Jedoch kann nach einem berühmten Satz von Fourier jede periodische Funktion als Summe von Sinusfunktionen angesehen werden, deren Frequenzen ganze Vielfache der Frequenz einer von ihnen sind, und man kann sich die Aufgabe stellen, die einzelnen sinusförmigen Elementarschwingungen aufzusuchen, aus denen sich ein gegebener periodischer Strom zusammensetzt.

Das Problem ist demjenigen ganz ähnlich, welches Helmholtz bei der Analyse der Töne gelöst hat. Bekanntlich führte er die Klangfarbe eines Tones auf die Überlagerung verschiedener mehr oder minder starker Obertöne über den Grundton zurück, und ebenso wie man bei der akustischen Erscheinung entweder eine Methode zur Aufzeichnung der charakteristischen Klangkurve anwenden kann, aus der man auf analytischem Wege die einzelnen Partialtöne des Klanges ableitet, oder aber statt dessen Reso-

natoren benutzt, welche die Eigenschaft besitzen, gewisse Partialtöne besonders hervortreten zu lassen, ebenso ist es auf elektrischem Gebiete möglich, sich entweder des Oszillographen zu bedienen, der die Stromform liefert, oder aber Apparate zu verwenden, welche die elektrischen Partial-schwingungen verstärken.

Armagnat hat gezeigt, wie man dank der Resonanz mit zwei passend angeordneten Oszillographen die Amplitude und Phase einer bestimmten Partialschwingung erhalten kann, bezogen auf die gleichen Größen bei der Grundschiwingung; man erhält so die wertvollsten Aufschlüsse über die Zusammensetzung der untersuchten Ströme.

Wie im übrigen auch die Stromform sein mag, der Oszillograph gibt immer den Wert an, welchen die Intensität in jedem Augenblick besitzt, oder, wie man sagt, den Momentanwert der Intensität; die Kenntnis dieser Größe ist freilich sehr wichtig, viele Wirkungen des Stromes hängen jedoch von der sogenannten effektiven Stromintensität ab. Bekanntlich versteht man hierunter die Intensität desjenigen Gleichstromes, der in derselben Zeit und in demselben Widerstand dieselbe Wärmemenge entwickeln würde, oder wenn man lieber will, die Quadratwurzel aus dem quadratischen Mittelwert der Stromintensität. Dabei drängt sich unmittelbar die Idee auf, die effektive Intensität durch die in dem Stromkreis stattfindende Wärmeentwicklung zu messen; dies geschieht in den Hitzdrahtampèremetern, wie z. B. in dem Ampèremeter von Hartmann und Braun.

In gleicher Weise bezeichnet man als effektive Spannung zwischen zwei Punkten a und b, die auf einem von Wechselstrom durchflossenen Kreise liegen, die Quadratwurzel aus dem quadratischen Mittelwert der Spannung während einer Periode; diese Spannung wird mit Hilfe eines thermischen Voltmeters z. B. dem Hitzdrahtvoltmeter von Cardew gemessen oder auch mit Hilfe eines Quadrantelektrometers, bei welchem man die von Joubert angegebene Schaltung benutzt.

Effektive Intensität und effektive Spannung sind also in der Praxis diejenigen Größen, deren Kenntnis am meisten interessiert. Indessen darf man nicht übersehen, daß es gewisse Erscheinungen geben kann, die nicht von der effektiven Spannung sondern von einem speziellen Momentanwert derselben, insbesondere von dem Maximalwert, abhängen. Für einen sinusförmigen Strom übersteigt die Maximalspannung die von den Voltmetern angegebene effektive Spannung um 41,4 Prozent; daher muß man in einer elektrischen Leitungsanlage, die mit einer Spannung von 50000 Volt arbeitet, Isolationen anwenden, die nicht für diese Zahl sondern für 75000 Volt berechnet sind. Denn dieser Spannung unterliegen die Isolationen doppelt so viel mal als die Frequenz beträgt jeweils einen Augenblick.

In dem Falle des Gleichstroms ist die zwischen zwei Punkten zur Verfügung stehende Leistung das Produkt aus der Intensität und der Spannung oder Potentialdifferenz, die zwischen diesen beiden Punkten besteht. Im Falle des Wechselstromes ist offenbar die Leistung mit der Zeit veränderlich; für jede ganze Periode ist jedoch die Energie immer die gleiche, und man könnte also versucht sein anzunehmen, daß man die mittlere Leistung oder Energie pro Zeiteinheit erhält, indem man die effektive Spannung mit der effektiven Intensität multipliziert. Im allgemeinen ist das jedoch nicht richtig; man muß zwar, um die Leistung zu erhalten, das vorstehende Produkt bilden, aber man muß es noch mit einem Faktor multiplizieren, der immer kleiner ist als Eins und häufig als Leistungsfaktor bezeichnet wird.

Wenn wir also eine Dynamomaschine zur Speisung einer Leitungsanlage mit konstantem Potential benutzen, so wird uns dieselbe immer die gleiche Anzahl Volt und die gleiche Anzahl Ampère liefern; um jedoch die geleistete Arbeit zu berechnen, haben wir das Produkt aus der Zahl der Ampère und der Zahl der Volt mit einem Koeffizienten, kleiner als Eins, zu versehen, und die Leistungsfähigkeit

der Maschine muß scheinbar wachsen, wenn wir es so einzurichten verstehen, daß dieser Faktor sich mehr und mehr der Einheit nähert.

In den ersten Zeiten verstand man es noch nicht, mit Rücksicht hierauf die nötige Vorsicht walten zu lassen, und erhielt Leistungsfaktoren, die oft kleiner waren als 0,75; heute ist man durch rationelle Ausgestaltung der Apparate dahin gelangt, diese Faktoren bis gegen 0,90 hinaufzutreiben.

Um jedoch eine derartige Verbesserung zu erreichen, mußten die Techniker erst den Ursprung dieses Koeffizienten vollständig ergründen: er rührt von der Erscheinung der Selbstinduktion her. Wenn ein veränderlicher Strom eine Spule durchfließt, so entsteht außer der Spannung, welche der Strom selbst zwischen ihren Enden erzeugt, in dem Kreis eine elektromotorische Kraft der Induktion. Wir wissen ja bereits, daß ein Strom, der in einem Leiter fließt, einen magnetischen Induktionsfluß erzeugt; ist aber der Strom veränderlich, so ist es in gleicher Weise der Induktionsfluß, und wenn dieser variiert, so tritt eine elektromotorische Kraft auf. Diese elektromotorische Kraft ist natürlich um so größer, je stärker induktiv der Stromkreis ist, d. h. je größer die Änderung des Induktionsflusses ist; diese Änderung läßt sich vergrößern, indem man die Zahl der Windungen vermehrt, und indem man in die Spule einen Eisenkern einsetzt.

Unter diesen Umständen wird die Spannung an den Enden gleich der Summe der ursprünglichen und der von dieser elektromotorischen Kraft herrührenden. Handelt es sich um einen periodischen Strom, so sind beide Glieder der Summe gleichmäßig periodisch und haben alle beide die gleiche Frequenz wie der Strom; durch ihre Summation ergeben sie wieder eine Funktion von gleicher Periode, die aber gegen den Strom zeitlich verschoben ist.

Man begreift daher, daß Spannung und Strom nicht in gleicher Phase sind; wie zwei Pendel, welche gleiche Schwingungsdauer haben, aber nicht zur selben Zeit durch

die Vertikale gehen, werden Spannung und Strom nicht im gleichen Augenblick Null. Diese Phasenverschiebung ist es, welche in die Berechnung der Leistung den Faktor hineinbringt, von welchem die Rede war, und es läßt sich weiter sehr einfach beweisen, daß dieser Faktor der Cosinus der Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung ist.

Statt die Dinge so aufzufassen, pflegen manche Elektriker den Strom als aus der Übereinanderlagerung zweier Teilströme entstanden zu denken. Der eine, welcher stets der Spannung proportional und in Phase mit ihr ist und der in jeder Periode dieselbe Energie verbraucht oder freimacht wie der Gesamtstrom, führt den Namen Wattstrom; der andere, welcher gegen die Spannung um eine viertel Periode verschoben ist und in einer viertel Periode die Energie aufbraucht, die er in der folgenden wieder frei werden läßt, ist der wattlose Strom.

Diejenigen Erscheinungen, wie z. B. die Wärmeentwicklung oder die Arbeit eines Motors, bei denen in jeder Periode im Mittel eine Leistung entwickelt oder verbraucht wird, die nicht Null ist, muß man als Wirkungen der Wattströme ansehen; diejenigen dagegen, denen die mittlere Leistung Null entspricht, gehören den wattlosen Strömen an. So erfordern die Magnetisierung eines Körpers und die Ladung eines Kondensators wattlose Ströme.

Wie man die Sache übrigens auch ansehen mag, zur Bestimmung der Stromleistung muß man sich immer an den Versuch halten. Man kann sie aufs schnellste mit den als Wattmeter bezeichneten technischen Apparaten ausführen; man kann auch Methoden benutzen, die entweder drei Amperemeter oder drei Voltmeter erfordern, oder aber man schlägt, besonders in dem Fall, wenn die Ströme sich weit von der Sinusform entfernen, ein sehr geistreiches von Potier angegebenes Verfahren ein.

Wir haben uns eingehend mit dem Einfluß der Selbstinduktion auf den Wert der Leistung beschäftigt, weil es

besonders die Arbeit ist, die uns bei den praktischen Anwendungen interessiert. Man kann sich aber auch auf einen anderen Standpunkt stellen und zusehen, welche Änderungen die Erscheinungen der Selbstinduktion im Fall des Wechselstromes an den für Gleichstrom geltenden Gesetzen verursachen.

Bekanntlich ist nach dem Ohmschen Gesetz die Intensität eines Gleichstromes gleich dem Quotienten aus der in dem Kreise wirkenden elektromotorischen Kraft dividiert durch den Widerstand dieses Kreises. Hat man es mit einer periodischen elektromotorischen Kraft zu tun, so kann man annehmen, daß die Selbstinduktion zwei Wirkungen erzeugt: einerseits eine Phasenverschiebung des Stromes gegenüber der elektromotorischen Kraft, andererseits eine scheinbare Vermehrung des Widerstandes. Es läßt sich leicht zeigen, daß die effektive Intensität gleich ist dem Quotienten aus der effektiven elektromotorischen Kraft dividiert durch eine Größe, die den Widerstand übertrifft und die man Impedanz nennt.

Die Impedanz hat einen leicht zu berechnenden Wert: ihr Quadrat ist gleich der Summe aus dem Quadrat des gewöhnlichen Ohmschen Widerstandes und dem Quadrat des Produktes aus dem Koeffizienten der Selbstinduktion des Stromkreises mit der Pulsation des Stromes (als Pulsation wird das Produkt der Frequenz mit 2π bezeichnet). Dieser zweite Teil der Summe wird oft mit dem Namen Reaktanz bezeichnet.

Die Phasenverschiebung ist gleichfalls durch einen sehr einfachen Ausdruck gegeben; sie ist um so größer, je größer Selbstinduktion und Frequenz und je kleiner der Widerstand ist, genauer gesagt bleibt der Strom in der Phase hinter der elektromotorischen Kraft um einen Winkel zurück, dessen Tangente gleich dem Verhältnis der Reaktanz zum Ohmschen Widerstand ist.

Durch Betrachtung der beiden Grenzfälle, lernt man den Einfluß dieser verschiedenen Größen genauer kennen. Nehmen

wir an, die Selbstinduktion oder die Frequenz sei sehr klein im Verhältnis zum reinen Widerstand, dann ist die Reaktanz zu vernachlässigen und die Impedanz reduziert sich auf den Ohmschen Widerstand; die Phasenverschiebung andererseits ist Null. Der Strom verhält sich vollkommen wie ein Gleichstrom; es würde hier also nur der Wattstrom allein vorhanden sein.

Setzen wir dagegen den Fall, daß die Frequenz außerordentlich hoch, oder der Selbstinduktionskoeffizient sehr groß wird, so ist der Ohmsche Widerstand gegenüber der Reaktanz zu vernachlässigen und die Impedanz wird mit der Reaktanz identisch. Der Winkel der Phasenverschiebung andererseits wird ein rechter. Die Stromintensität bleibt um eine viertel Periode hinter der elektromotorischen Kraft zurück, nur der wattlose Strom würde hier bestehen.

So lassen sich die auf den ersten Anblick der Erfahrung widersprechenden Versuche, die man mit Hochfrequenzströmen anstellen kann, wie z. B. diejenigen von Elihu Thomson, leicht erklären. Die beträchtliche Vermehrung des scheinbaren Widerstandes äußert sich durch Erscheinungen, die ihrer Natur nach wohl dazu angetan waren, die nur an die Wirkungen des Gleichstroms gewöhnten Physiker zu überraschen; so kann sich z. B. ein einfacher Ring, der über eine von Hochfrequenzstrom durchflossene Spule gestülpt wird, trotz seines geringen Widerstandes sehr stark erhitzen.

Ein neuer wesentlicher Unterschied zwischen Gleichstrom und Wechselstrom ergibt sich, wenn man die Wirkungen untersucht, welche die Einführung eines Kondensators in den Stromkreis hervorbringt.

Im Falle des Gleichstroms stellt ein als vollkommen vorausgesetzter Isolator dem Stromdurchgang ein absolutes Hindernis entgegen; höchstens kann, wenn die Unterbrechung von der isolierenden Schicht eines Kondensators gebildet

wird, der schwache kurz dauernde Strom fließen, welcher der Ladung des Kondensators entspricht.

Denken wir uns dagegen, daß in dem Stromkreis eine alternierende Potentialdifferenz aufrecht erhalten wird, die wir der Einfachheit halber sinusförmig annehmen; dann wird der Leitungsdraht, auch wenn er durch das Dielektrikum unterbrochen ist, von dem Wechselstrom durchflossen, welcher den abwechselnden Ladungen und Entladungen des Kondensators entspricht. Übrigens kann man auch sagen, daß der Strom ebensowohl die isolierende Schicht wie die leitenden Teile des Kreises durchdringt, wenn man mit Maxwell annimmt, daß in dem Dielektrikum sich dielektrische Verschiebungen ausbilden, welche den Strom schließen.

Behandelt man die Frage mathematisch, so gelangt man ohne Schwierigkeit zu dem Satze, daß in dem allgemeinsten Falle, wo der Stromkreis einen Kondensator enthält und im übrigen Ohmschen Widerstand und einen gewissen Selbstinduktionskoeffizienten besitzt, die effektive Stromintensität immer gleich der effektiven elektromotorischen Kraft ist, dividiert durch eine Größe, welche die Rolle des Widerstandes spielt und die man wie früher Impedanz nennt. Man bezeichnet auch hier mit dem Namen Reaktanz die Größe, deren Quadrat man zu dem Quadrat des Widerstandes hinzufügen muß, um das Quadrat der Impedanz zu erhalten.

Der Ausdruck für die Reaktanz ist aber jetzt etwas komplizierter; er stellt sich als Differenz zweier Glieder dar: das erste hängt von der Kapazität und Frequenz ab, das zweite von der Selbstinduktion und Frequenz. Daraus folgt, daß diese beiden Glieder einander gewissermaßen entgegenwirken, oder wenn man lieber will, daß die Einführung einer Kapazität in einen Stromkreis wie eine Verminderung der Selbstinduktion wirkt.

Man kann sogar erreichen, daß die beiden Glieder den gleichen Wert annehmen und die Reaktanz also Null wird. Damit dies geschieht, muß das Produkt aus der Selbstinduk-

tion und Kapazität gleich dem umgekehrten Wert des Quadrates der Pulsation sein. Ist diese Bedingung, die man als Resonanzbedingung bezeichnet, erfüllt, so wirkt der zusammengesetzte Stromkreis ganz und gar wie ein einfacher Leiter, bei dem nur der Ohmsche Widerstand in Betracht kommt, und der Wechselstrom verhält sich ganz ähnlich wie Gleichstrom. In jedem Augenblick ist seine Intensität gleich dem Quotienten aus Spannung und Widerstand, und Phasenverschiebung ist nicht vorhanden.

So ergibt sich die Möglichkeit, die Wirkung der Selbstinduktion durch Einschaltung eines Kondensators aufzuheben. Es ist jedoch zu beachten, daß die hierzu geeignete Kondensatorkapazität von der Frequenz abhängt, und daß infolgedessen die Kompensation, wenn sie für eine bestimmte Frequenz verwirklicht ist, für eine andere nicht mehr stichhält.

Beachten wir schließlich noch, daß das zweite Glied der Reaktanz unter Umständen einen größeren Wert bekommen kann als das erste, die Induktanz also negativ werden kann; in diesem Fall wird auch die Phasenverschiebung negativ; es ist daher möglich, durch Einschaltung eines Kondensators in einen Wechselstromkreis ein Vorseilen des Stromes in der Phase gegen die elektromotorische Kraft herbeizuführen.

Dank dieser unserer Kenntnis der Rolle, welche Kapazität und Selbstinduktion spielen, ist es nunmehr möglich, die manchmal recht verwickelten Probleme zu behandeln, welche sich in der Praxis darbieten, z. B. vollständig den Stromverlauf in verzweigten Kreisen zu bestimmen.

So kann man den Versuch machen, in einem Teile eines Stromkreises, der Kondensatoren enthält oder auch nicht, einen Strom zu erhalten, dessen effektive Intensität unabhängig ist von der eigenen Impedanz dieses Teiles. Diese sehr wichtige Frage, von deren Lösung die Möglichkeit abhängt, mit Wechselströmen eine Energieverteilung mit konstanter Intensität

herzustellen, ist in sehr eleganter Form von Boucherot gelöst worden.

Derartige Rechnungen sind im allgemeinen recht mühsam; sie lassen sich aber durch Anwendung graphischer Methoden wesentlich vereinfachen. Man kann die elektromotorische Kraft oder die Intensität eines Wechselstromes durch einen Vektor darstellen, in dem man eine Länge gleich dieser elektromotorischen Kraft oder Intensität (maximale oder effektive) in einer Richtung aufträgt, die mit einer festen Achse einen Winkel bildet, welcher der Phase gleich ist. Die Resultante einer beliebigen Anzahl von Intensitäten oder elektromotorischen Kräften erhält man nach dem Gesetz der Zusammensetzung von Vektoren; der resultierende Vektor gibt durch seine Länge und Richtung die gesuchte Resultante nach Größe und Phase.

Es ist beachtenswert, daß dieses Verfahren mit demjenigen übereinstimmt, welches unmittelbar aus der von Fresnel aufgestellten Regel für die Zusammensetzung der Lichtschwingungen und die Lösung der Interferenz- und Diffraktionsprobleme folgt. Die Ähnlichkeit erklärt sich ganz natürlich: in beiden Fällen handelt es sich um periodische Erscheinungen, die durch dieselben Funktionen dargestellt werden. Nichts destoweniger ist es interessant zu stehen, wie man hier ein Beispiel für die wechselseitige Hilfe zwischen Theorie und Praxis antrifft. Die Art und Weise, wie die Physiker zur Lösung schwieriger optischer Probleme gelangt sind, hat den Ingenieuren als Vorbild gedient bei der Bestimmung der von elektrischen Verteilungsanlagen zu erfüllenden Bedingungen.

Oft benutzt man auch einen Kunstgriff, der auf der Anwendung imaginärer Größen beruht. Um die Lösung einer auf Wechselstrom bezüglichen Frage zu erhalten, braucht man nur die Ohmschen und Kirchoffschen Gesetze auf passend definierte imaginäre Größen anzuwenden; man gelangt damit zu einer bestimmten Zahl von Gleichungen, die

den für den Fall des Gleichstroms geltenden ganz ähnlich sind, und behandelt dieselben, wie wenn es sich in Wirklichkeit um Gleichstrom handelte. Die Lösungen sind imaginär; doch braucht man nur die reellen Teile allein beizubehalten, um die wirkliche Lösung zu erfahren. Im Grunde kommen beide Verfahren auf dasselbe hinaus, denn ein Vektor läßt sich ja, wenn man will, durch einen imaginären Ausdruck darstellen, und so oft uns die Rechnung einen imaginären Wert liefert, können wir ohne jede Zweideutigkeit auf Koordinatenpapier den entsprechenden Vektor zeichnen. So erklärt sich diese Art der Darstellung, die bei ihrem ersten Auftreten überraschte; Stromintensität und elektromotorische Kraft können als Größen angesehen werden, die bezüglich Größe und Phase durch Vektoren oder, wenn man lieber will, durch imaginäre Größen abgebildet werden, die ja diese Vektoren vollständig darstellen.

Steinmetz und viele andere Autoren haben von diesem Kunstgriff ausgiebigen Gebrauch gemacht und so die kompliziertesten und bedeutendsten Probleme lösen können. Jedoch darf man sich nicht verhehlen, daß diese Formeln für manchen etwas Geheimnisvolles behalten und bei der Anwendung leicht gefährlich werden können.

Die graphischen Methoden andererseits sind oft sehr mühsam; Lineal, Winkelmaß und Kompaß handhaben sich nicht immer leicht. Viele Elektriker ziehen deshalb gegenwärtig eine Methode vor, die sich auf die Trennung der Wattleistung oder reellen Leistung und der wattlosen oder magnetisierenden Leistung gründet. Es ist Boucherot, dem man dies außerordentlich bequeme Verfahren verdankt, das stets auf leichte Rechnung und einfache, der reellen Wirklichkeit entsprechende arithmetische Operationen führt. Man findet leicht, daß die reellen Leistungen sich algebraisch addieren, daß dasselbe für die Magnetisierungsleistungen gilt und daß die scheinbare Leistung in jedem Teil eines Netzes gleich der Quadratwurzel aus der Summe der Quadrate der

reellen und Magnetisierungsleistung ist. Dieser Satz, der zuerst für den Fall sinusförmiger Ströme bewiesen, von Swyngedauw und Nouguier auch auf andere Fälle ausgedehnt wurde, ist der Ausgangspunkt einer Methode, deren Einfachheit und Fruchtbarkeit Boucherot an schönen Beispielen erwiesen hat.

5. Die mehrphasigen Ströme und das Drehfeld.

Der Wechselstrom, von dem wir bisher gesprochen haben, ist der einfache Wechselstrom; ihn hat man bei den ersten elektrischen Anlagen benutzt; er eignete sich gut für Beleuchtungszwecke, denn wie im Falle des Gleichstroms genügen zwei Drähte, die eine einfache und ökonomische Stromverteilung gestatten. Noch heute ist diese Art der Verteilung sehr verbreitet, aber ein ernster Übelstand trat dabei auf, als sich die mechanischen Anwendungen der elektrischen Energie entwickelten.

Die Wechselstrommotoren sind unvollkommene Apparate. Wir werden auf die wichtige Frage der Motoren noch zurückkommen, aber jetzt schon können wir leicht übersehen, daß der Wechselstrom, indem er vor dem Richtungswechsel den Wert Null annimmt, während des entsprechenden Augenblickes auf den beweglichen Teil eines Motors zu wirken aufhört. Es gibt bei ihm also wirklich tote Punkte, die man nur dadurch beseitigen kann, daß man zwischen der Periode des Stromes und der Geschwindigkeit des Motors eine gewisse Übereinstimmung herstellt.

Nicht zu Unrecht hat man diese toten Punkte mit denen verglichen, welche man bei Dampfmaschinen und Explosionsmotoren kennt, nämlich den Punkten, wo der Kolben an den beiden Enden seines Weges halt macht. Und gerade so wie man im Falle der Wärmekraftmaschinen den störenden Einfluß dieser Punkte beseitigt, indem man mehrere Zylinder aneinander kuppelt, deren Kolbenstellungen

gegeneinander verschoben sind und zwar derart, daß in dem Augenblick, wo einer der Kolben nicht wirkt, weil er durch einen toten Punkt geht, die andern die gemeinsame Kurbelwelle, mit der sie alle verbunden sind, weiter drehen können: ebenso unterdrückt man die Wirkung der toten Punkte im elektrischen Gebiet, indem man mehrere Wechselströme miteinander verkettet, die in der Phase gegeneinander verschoben sind und deshalb nicht im gleichen Augenblick Null werden. Diese so verketteten Ströme sind die Mehrphasenströme.

Die wesentlichen Eigenschaften der Mehrphasenströme wurden im Jahr 1888 von dem italienischen Gelehrten Ferraris und fast zur selben Zeit von Tesla in Amerika aufgedeckt, doch dauerte es mehrere Jahre, bis sie praktisch angewendet wurden. Es sind besonders die Namen Maurice Leblanc⁶⁾ und Boucherot unter den Elektrikern hervorzuheben, deren bemerkenswerte Arbeiten die Nutzbarmachung dieser Ströme ermöglichten, und ebenso auch Potier, dem es gelang, eine einfache und klare Theorie derselben zu geben.

Ohne für den Augenblick auf die Einzelheiten der Konstruktion von Mehrphasengeneratoren einzugehen, läßt sich mit wenigen Worten die Art und Weise, wie man im Prinzip derartige Ströme erhält, auseinandersetzen. Denken wir uns eine Reihe von Magnetpolen in gleichem Abstand voneinander auf einem Kranz von kreisförmiger Gestalt angeordnet und zwar so, daß Nord- und Südpole miteinander abwechseln.

Nehmen wir jetzt eine Spule, die sich mit konstanter Geschwindigkeit vor diesen Polen vorbei bewegt; sie wird von einem wechselnden magnetischen Induktionsfluß durchsetzt und daher von einem Wechselstrom durchflossen, dessen Periode gleich der Zeit ist, welche zwischen dem Vorbeigang der Spulenmitte vor den Achsen zweier aufeinander folgender gleichnamiger Pole verfließt.

Wenn man statt einer Spule drei nimmt, deren Mitten um ein Drittel des Abstandes zweier benachbarter Nordpole voneinander entfernt sind, so übersieht man leicht, daß sie alle drei von Wechselströmen durchflossen werden müssen, die einander vollkommen ähnlich, aber gegenseitig um eine drittel Periode verschoben sind; diese Ströme bilden den Dreiphasenstrom. Augenscheinlich würde man übrigens, wenn man statt drei Spulen deren zwei, vier usw. nimmt, eine Kombination von zwei Phasen, vier Phasen usw. erhalten; in der Praxis wird jedoch bei Verteilungsanlagen mit mehrphasigen Wechselströmen fast ausschließlich Dreiphasenstrom benutzt.

Auf den ersten Anblick scheint es, als erforderte dies System der Energieübertragung drei verschiedene Leitungen d. h. sechs Drähte zwischen den beiden Stationen und brächte also kostspielige Komplikationen mit sich; durch einen einfachen, sehr geistreichen Kunstgriff kann man jedoch die Zahl der erforderlichen Drähte auf drei reduzieren.

Statt die drei Generatorspulen getrennt zu lassen, wollen wir sie mit ihren benachbarten Enden vereinigen; die in jeder derselben induzierten elektromotorischen Kräfte bleiben dabei gegeneinander immer um eine Drittelperiode verschoben. Führen wir nun die gemeinsamen Enden von Spule 1 und 2 zu einem ersten Schleifringe, die Enden von 2 und 3 zu einem zweiten und ebenso die gemeinsamen Enden von 3 und 1 zu einem dritten Ringe, so erzeugen wir an diesen Ringen dreiphasige Spannungen entsprechend den elektromotorischen Kräften. Lassen wir weiter auf diesen Ringen Bürsten schleifen, die mit drei Leitungsdrähten verbunden sind, so müssen wir in diesen Drähten Dreiphasenstrom erhalten, den wir auf der Empfangsstation in drei Stromkreisen, welche je zwei und zwei ein gemeinsames Ende haben und einen geschlossenen Kreis bilden, aufnehmen können.

Statt dieser Schaltung, welche man als Dreiecksschaltung

bezeichnet, kann man auch die vorderen Enden der drei Spulen miteinander vereinigen und die hinteren Enden zu drei Schleifringen führen, die ihrerseits mit drei Leitungsdrähten verbunden sind; natürlich wählt man für die Empfangsstation eine analoge Anordnung und hat dann eine sogenannte Sternschaltung.

Die beiden so definierten Schaltungen haben nicht genau die gleichen Eigenschaften. Bei der Sternschaltung werden die drei vorderen Spulenenden auf gleichem Potential gehalten, da sie einen Punkt gemeinsam haben, den man als neutralen Punkt bezeichnet; es läßt sich leicht zeigen, daß die effektive Spannung zwischen zwei Drähten $1,73$ mal so groß ist wie die effektive Spannung zwischen einem der Drähte und dem neutralen Punkt. Der Strom, welcher zwischen dem neutralen Punkt und einem der Schleifringe fließt, ist offenbar derselbe wie der, welcher in dem mit diesem Ringe verbundenen Draht der Leitung fließt.

Bei der Dreieckschaltung gibt es keinen neutralen Punkt, und da zu einem Draht der Leitung immer zwei Zweige des Dreiecks zusammenführen, so ist der Strom, der in diesem Draht fließt, offenbar stärker als der von einem Zweige kommende. Die Rechnung ergibt, daß er gerade $1,73$ mal so stark ist wie der Strom in jedem Zweige.

Die Bedingungen, unter denen die beiden Schaltungsweisen arbeiten, sind zueinander gewissermaßen reziprok, und man muß sich dies für die verschiedenartigen Anwendungen merken.

Im einen wie im andern Fall läßt sich die Leistung übrigens ohne Schwierigkeit berechnen; sie ist die Summe der Leistungen jedes der drei einfachen Wechselströme, und da die drei Phasen einander gleichwertig sind, so ist sie das Dreifache des Produktes aus Spannung, Stromstärke und Leistungsfaktor. Daraus folgt, welches auch die Art der Schaltung sei, daß die von einem Dreiphasengenerator gelieferte und

von einem dreiphasigen Verbrauchsapparat verzehrte Leistung immer dargestellt wird durch das Produkt, gebildet aus der Spannung zwischen je zwei der Leitungsdrähte, der Intensität des in einem dieser Drähte fließenden Stromes und dem Leistungsfaktor, das Ganze multipliziert mit 1,73.

Die große Bedeutung der Mehrphasenströme liegt, wie G. Ferraris gezeigt hat, darin, daß diese Ströme ein rotierendes Magnetfeld herzustellen erlauben, ohne daß es nötig ist, eine mechanische Rotation von Spulen oder Magneten zu benutzen.

Rotierende Felder oder Drehfelder sind seit langer Zeit bekannt, und ihre Haupteigenschaft wurde durch Aragos Forschungen acht Jahre vor der Entdeckung der Induktion durch Faraday bekannt, d. h. zu einer Zeit, wo diese Eigenschaft, die eine einfache Folge der Induktionsercheinungen ist, nicht verstanden werden konnte. Es ist interessant, daran zu erinnern, daß Poisson im Jahre 1826 eine offenbar unrichtige Erklärung des Rotationsmagnetismus gegeben hat; diese Erklärung hatte die Zeitgenossen hinreichend befriedigt, unter ihnen selbst einen so gut geschulten Geist wie Arago, so daß alle es für nutzlos hielten, der Frage noch weiter auf den Grund zu gehen. Aber dies vernachlässigte Phänomen enthielt im Keim die fundamentale Entdeckung der Induktion.

Wir sagen, an einem Punkt des Raumes existiert ein rotierendes Magnetfeld, wenn die Kraft, welche auf einen an diesen Punkt gebrachten Pol wirkt, in jedem Augenblick ihre Richtung in der Weise ändert, daß der sie darstellende Vektor konstant um seinen Anfangspunkt rotiert, indem er dabei immer in derselben Ebene bleibt.

Nichts ist einfacher als ein rotierendes Feld herzustellen,

denn es genügt dazu, die Pole eines Magneten rotieren zu lassen.

Der Fundamentalversuch von Arago bestand in dem Nachweis, daß eine beliebige Metallmasse in einem rotierenden Felde selbst eine Rotationsbewegung annimmt und, wenn sie keinen Widerstand findet, mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Feld rotiert.

Alles verhält sich so, als ob das an sich immaterielle Feld durch eine Art unsichtbarer Zähigkeit oder Reibung die Metallmasse in seine Rotation mit hineinzüge.

Die Erklärung ist sehr einfach: das Feld verursacht durch seine Rotation in dem Leiter die Entstehung von Induktionsströmen, welche denselben in sehr komplizierten Bahnen durchfließen; dies sind, wie man sie heute nennt, die Foucaultschen- oder Wirbelströme. Von der Form dieser Ströme kann man oft nur schwer Rechenschaft geben, jedoch haben sie immer eine solche Richtung, daß sie dem Lenzschen Gesetz gehorchen; sie widersetzen sich daher der Bewegung des Magneten, und infolge der elektromagnetischen Wechselwirkung zieht der Magnet, welcher seinerseits auf diese Ströme wirkt, sie an und nimmt durch sie auch die Metallmasse bei seiner Rotation mit.

Man erkennt also, daß man mit Hilfe eines Drehfeldes einen Körper ohne irgend einen materiellen Mechanismus und ohne jeden elektrischen Kontakt mit der Umgebung zum Rotieren bringen kann. Aber es ist andererseits klar, daß man ein praktisch wenig interessantes Resultat erhielte, wenn man zur Erzeugung des Drehfeldes erst einen Magneten rotieren lassen müßte; dann würde es ganz ebenso einfach sein, die Metallmasse direkt rotieren zu lassen. Die Eigenschaften der Mehrphasenströme aber lassen die Frage in ganz neuem Licht erscheinen.

Nehmen wir, um eine bestimmte Vorstellung zugrunde zu legen, drei Spulen, die so angeordnet sind, daß ihre

Achsen ein gleichseitiges Dreieck bilden, und denken wir uns jede dieser Spulen von einer Phase einer Dreiphasenanlage erregt. Im Mittelpunkt des Dreiecks ist dann ein Feld vorhanden, das in einem gegebenen Augenblick eine gewisse Richtung und Größe besitzt, und dieses Feld ist die Resultante der drei einzelnen von den drei Spulen erzeugten Feldern.

Nach Ablauf einer Drittelperiode haben die Stromintensitäten, die ja gegeneinander genau um eine Drittelperiode verschoben sind, gewissermaßen die Plätze in den Spulen getauscht derart, daß die zweite Spule in diesem Augenblick von demselben Strom durchflossen wird, welcher zu Anfang die erste durchfloß, und daß in der dritten jetzt derjenige Strom fließt, welcher vorher in der zweiten floß.

Der magnetische Kraftfluß ist dabei der Änderung der Ströme, welche ihn erzeugen, gefolgt, und man erkennt, daß sich im Mittelpunkt genau dasselbe Feld gebildet hat, das entstehen würde, wenn sich bei konstant bleibenden Stromstärken das System der drei Spulen wie ein starrer Körper um diesen Mittelpunkt gedreht hätte und zwar um einen Winkel von 120° ; mit anderen Worten: nach Verlauf einer Drittelperiode hat das Feld zwar seine Anfangsintensität behalten, es hat sich aber um einen Winkel von 120° gedreht. Man kann sich also denken, wie es kommt, daß ganz allgemein die Resultante der drei von den drei Phasen erzeugten Felder konstant nach Größe und Richtung variiert; sie rotiert in der Ebene, welche die drei Achsen enthält, und zwar so, daß sie während der Dauer einer Periode eine volle Umdrehung ausführt.

In Wiederholung eines schon einmal benutzten Vergleichs kann man sagen, daß das System der drei Spulen einer Kombination analog ist, die man oft bei Dampfwinden findet, wo drei gleiche Kolben auf eine Kurbelwelle arbeiten, welche mit drei um 120° gegeneinander versetzten Kurbeln versehen ist; die Hin- und Hergänge der drei Kolben sind

gegeneinander um 120° verschoben, die Rotation der Welle aber findet absolut gleichmäßig ohne tote Punkte statt.

Mit der elektrischen Kombination können wir einen Rotor genannten Apparat erhalten, welcher dank den Wechselwirkungen des Drehfeldes und der induzierten Ströme eine dauernde Rotationsbewegung annimmt, ohne daß man irgend eine materielle Verbindung zwischen ihm und der Umgebung herzustellen braucht.

Kapitel IV.

Die Generatoren.

1. Die Gleichstrom-Dynamomaschine.

Kurze Zeit nachdem Faraday seine Untersuchungen veröffentlicht hatte, konstruierte Pixii unter Ampères Leitung einen Apparat, um die Induktionswirkungen, die man mit Magneten erzeugen kann, im Großen zu zeigen. Der in dem Draht eines Elektromagneten durch die Rotation eines benachbarten Magneten erzeugte Strom ist natürlich alternierend; ein auf der Drehungsachse befestigter Kommutator gestattete die Induktionsströme umzukehren, bevor man sie in den äußeren Stromkreis schickte.

Dann ersannen Clarke und Page später etwas abweichende Maschinen, die bekanntlich für gewisse medizinische Zwecke Anwendung fanden, bei denen aber die Leistung viel zu gering und besonders der Wirkungsgrad zu schlecht war, als daß sie wirklich in die technische Praxis hätten Eingang finden können.

Viel größere Leistungen erhielt man, als man auf den Gedanken kam, Induktionsrollen hintereinander zu schalten wie man galvanische Elemente hintereinander schaltet, und fast ein halbes Jahrhundert ist es schon her, seitdem die Allianzgesellschaft in Frankreich Maschinen baute, welche auf dem Leuchtturm von La Hève elektrische Wechselstromlampen mit einer Lichtstärke von 10000 Carcel-Einheiten speisten. Aber um den Strom umzukehren, mußte

man diese Maschinen mit einem Kommutator versehen, einem diffizilen-Apparat, dessen unregelmäßiges Funktionieren von zerstörenden Funken begleitet war, die einen großen Teil der Energie verzehrten. In dieser Zeit hatte es indessen ganz den Anschein, als würde die Elektrizität erst dann wirklich in der Großindustrie Fuß fassen, wenn man ein praktisches Verfahren zur Erzeugung von Gleichstrom durch Induktion finden könnte; um die Lösung dieses Problems mühten sich lange Zeit viele Erfinder.

Unter den Arbeiten, welche die schließliche Entwicklung vorbereiteten, sind die von Siemens und Wilde zu erwähnen, und besonders ist an den umkehrbaren elektrischen Motor zu erinnern, den im Jahre 1864 der Italiener Pacinotti beschrieb; diese Maschine enthielt im Keim die Idee, welche Gramme einige Jahre später (1869) im Großen bei Maschinen von hoher Leistung zur Ausführung brachte.

Die von Gramme vorgeschlagene Lösung war scheinbar ganz widersinnig. Auf den ersten Anblick hätte man glauben können, daß unter den Bedingungen, mit welchen der geniale Erfinder arbeitete, überhaupt kein elektrischer Strom zustande käme, und das war wirklich im Anfang die Meinung der hervorragendsten Physiker. Ein klar denkender Amateur, der viel Zeit auf sehr interessante Experimentaluntersuchungen verwandt hat, Worms de Romilly, hatte etwas vor Gramme eine dessen berühmtem Ringe analoge Anordnung erdacht und eine Maschine konstruiert, die mittels dieser Anordnung einen kontinuierlichen Strom gab. Dieser Versuch hatte indessen keinerlei Unterstützung erfahren. Ich habe selbst einen Brief lesen können, den einer der berühmtesten französischen Gelehrten an de Romilly gerichtet hat und in dem derselbe auf Grund einer anscheinend strengen Überlegung nachweist, daß, wenn die Maschine Strom liefere, sie dies infolge irgend eines Mangels an Symmetrie tue, daß sie aber, genau den beabsichtigten Bedingungen gemäß konstruiert, vollkommen wirkungslos bleiben würde.

Gramme, ein einfacher Mechaniker, der wenig daran gewöhnt war, die Dinge theoretisch zu betrachten, jedoch viel mit elektrischen Apparaten zu tun gehabt hatte, kümmerte sich nicht um abstrakte Überlegungen und ließ sich auch nicht durch seine eigene Kühnheit einschüchtern, deren Tragweite er übrigens vollkommen übersah. Von einem richtigen Gefühl für die Wirklichkeit geleitet, konstruierte er seine Maschine, von der man wohl sagen darf, daß ihre Erfindung der Ausgangspunkt einer industriellen Bewegung geworden ist, so gewaltig, daß man bis zur Einführung des Dampfes zurückgehen muß, um ihresgleichen zu finden.

Man braucht nicht besonders anzuführen, daß die Grammesche Erfindung in Wahrheit keineswegs der Theorie widerspricht; wir finden jedoch hier wieder einen Fall, wo die übertriebene Vorsicht des Gelehrten, der erst nach Beseitigung aller Schwierigkeiten vorwärts gehen will, beinahe den Fortschritt ernstlich gefährdet hätte. Nachdem man einmal festgestellt hatte, daß die Maschine funktionierte, erkannte man auch leicht, an welcher Stelle die Überlegung, welche sie im Voraus zur Unbrauchbarkeit verurteilen wollte, fehlerhaft war.

Wir müssen übrigens hinzufügen, daß die Theorie, nachdem sie durch die unerwartete Hilfe eines handfesten Arbeiters auf den richtigen Weg gebracht worden war, sofort wieder in ihre Rechte trat; sie verstand es, ihrerseits die unentbehrliche Ratgeberin zu werden, auf deren lichtvolle Ratschläge der Ingenieur mit so viel Vorteil hört.

Es würde zweifellos wenig Nutzen bringen, hier eine elementare Darstellung der wohlbekannten Theorie der Gleichstrom-Dynamomas zu geben. Erinnern wir uns nur, bevor wir die neueren Fortschritte im Bau dieser Maschine ins Auge fassen, der Grundlagen, auf denen die einfache Lösung des wichtigen Problems — Umkehrung und Stetigkeit des Stromes — beruht.

Bei den Maschinen vor Gramme gingen alle Teile des Induktionskreises durch dieselben wechselnden Induktorfelder hindurch, und der Kommutator brachte eine sehr plötzliche Diskontinuität hinein, die sich in starken auf Selbstinduktion beruhenden Erscheinungen äußerte. Bei dem Grammeschen Anker dagegen unterliegen die verschiedenen Abschnitte des Kreises nacheinander und nicht mehr gleichzeitig denselben Änderungen des Induktionsflusses, und die Stromentnahme erfolgt immer an denjenigen Windungen, die in einer Stellung sind, wo der sie durchsetzende Induktionsfluß nahezu unverändert bleibt, d. h. zwischen deren Enden merklich die Potentialdifferenz Null herrscht. Die Diskontinuität, welche durch die Verbindung dieser Windungen mit dem äußeren Stromkreis herbeigeführt wird, ist zu vernachlässigen, und man erhält somit eine fast vollkommen konstante Potentialdifferenz zwischen den Kollektoren; diese Differenz ist die Summe der in den hintereinander geschalteten Windungen erzeugten Spannungen. Dank der symmetrischen Bauart der Maschine und der geschickten Anordnung des Ringes erfährt der magnetische Induktionsfluß durch die Rotation des Ringes keine wesentliche Veränderung; bei konstanter Geschwindigkeit bleibt der in der Zeiteinheit geschnittene Induktionsfluß konstant der gleiche und infolgedessen auch die gesamte Potentialdifferenz.

Die Gleichstrom-Dynamomaschine besitzt also die wesentliche Eigenschaft, daß die Stellen, wo die Ankerwicklung mit dem äußeren Kreis in Berührung steht, in bezug auf den Induktionsfluß feststehen. Zwei Fälle sind dabei möglich.

Entweder der Induktionsfluß rotiert; dann müssen die Stromabnehmer im gleichen Sinne rotieren und zwar mit gleicher Winkelgeschwindigkeit wie der Induktionsfluß. Diese Anordnung, welche rotierende Bürsten verlangt, bringt große mechanische Komplikationen mit sich und ist nur in einem speziellen Fall angewandt worden. Ein bekannter Schweizer Ingenieur Thury, der trotz der Erfolge des Wechselstroms

bei der Energieübertragung auf weite Entfernungen ein überzeugter Anhänger des Gleichstroms und so zu sagen der beharrliche und geschickte Vorkämpfer dieser Stromform geblieben ist, hat einen Generator mit festem Anker und beweglichen Induktormagneten sowie rotierenden Bürsten konstruiert, welcher eine Spannung von 25 000 Volt liefert.

Oder aber — und das ist die Regel — der Induktionsfluß ruht im Raum, die Induktormagnete sind unbeweglich, während der Anker rotiert; der Strom wird von Leitern aufgenommen, die auf dem Kollektor schleifen und die man als Bürsten bezeichnet.

Der Anker muß eine sehr große Permeabilität besitzen, um den von dem Feldmagneten erzeugten Induktionsfluß möglichst zu konzentrieren. Er besteht aus einem Gerippe von dünnen Blechen, die gegeneinander mittels Papier oder einfach durch eine Oxydschicht isoliert sind; diese Untertheilung ist nötig zur Vermeidung von Foucaultströmen, die sich in einem massiven und folglich leitenden Eisenkörper notwendig einstellen würden, da das Eisengerüst denselben Änderungen des Induktionsflusses unterliegt wie die Bewicklung, der es als Unterlage dient. Diese Foucaultschen Ströme würden wie eine Art Reibung wirken, welche einen großen Teil der zur Rotation des Ankers aufgewandten Arbeit verzehrt, was einen direkten Verlust bedeutet.

Bei den in der Technik angewandten Maschinen sind die Bleche mit Löchern versehen, um zu ermöglichen, daß die Luft im Innern des Ankers, der sich während des Ganges der Maschine stark erhitzt, zirkuliert und ihn abkühlt.

Um das Eisengerüst sind bei den großen Dynamomaschinen richtige Kupferbarren gewickelt, die sehr sorgfältig voneinander isoliert sind. Bekanntlich gibt es drei Wicklungsarten: die Ringwicklung, die Trommelwicklung und die heute wenig benutzte Scheibenwicklung. Bei den sehr

verbreiteten vielpoligen Maschinen wird die Wicklung durch die Vereinigung so vieler doppelpoliger Spulensysteme gebildet, wie Polpaare vorhanden sind, und diese Spulensysteme sind entweder in Serie oder parallel geschaltet.

Die Ankerdrähte werden meist in Bohrungen verlegt, welche die Masse des Eisenkerns durchsetzen. Diese Anordnung bietet bedeutende mechanische Vorteile. Die an der Peripherie des Ankers angebrachte Wicklung unterliegt dem Einfluß einer starken Zentrifugalkraft während der Rotation; sie hat daher das Bestreben, sich abzulösen, und muß durch sehr widerstandsfähige Eisenbänder festgehalten werden. Außer diesen radialen Beanspruchungen sind andererseits noch tangentialen vorhanden, die von den elektromagnetischen Kräften herrühren, und wenn die Windungen nicht geschützt wären, so würden sie den heftigen Wirkungen ausgesetzt sein, die das Feld auf den in ihnen fließenden Strom ausübt. Diese großen Kräfte, welche unter ungünstigen mechanischen Bedingungen auf Kupfer, d. h. ein wenig widerstandsfähiges Metall, ausgeübt werden, bildeten eine der Hauptschwierigkeiten, auf welche die ersten Konstrukteure stießen. Diese ernste Schwierigkeit wurde erst überwunden, als man die Ankerkonstruktion in einer den Gesetzen der Mechanik entsprechenden Form ausführen lernte, indem man die Leitungsdrähte in die magnetische Armatur einbettete.

Man sah sich dabei jedoch vor einen ganz merkwürdigen Fall der Induktion gestellt, den man anfangs nicht vollständig verstand, und über den auch heute noch manche unrichtigen Vorstellungen verbreitet sind. Der Leiter, der von einem Eisenzylinder umgeben ist, wird durch diesen gegen die Wirkung des Feldes geschützt, und wenn er von einem Strom durchflossen wird, so wird die Kraft, welche ohne Hinzufügung des Zylinders auf ihn wirken würde, in demselben Verhältnis verringert wie das Feld; der Betrag, um den sie kleiner geworden ist, findet sich übrigens in einer Kraft wieder, welche in derselben Richtung auf den schützenden

Eisenzylinder wirkt. Aus Messungen von Du Bois folgt, daß man in dieser Weise mehr als 90 Prozent der Wirkung, welche ohne den genannten Kunstgriff auf die Kupferdrähte ausgeübt wird, auf das Eisen übertragen kann.

Man könnte jedoch meinen, daß dieser Vorteil nur um den Preis eines viel größeren Nachteils erkaufte werde. Wenn das Feld so geschwächt wird, wird dann nicht auch die induzierte elektromotorische Kraft aus dem gleichen Grunde an ihrer Größe und folglich die Maschine an ihrer Leistung Einbuße erleiden? Zum Glück ist diese Befürchtung grundlos; man erkennt bei näherem Zusehen, daß die Kraftlinien, wenn sie in dem von dem magnetischen Schirm beschützten Gebiete weniger dicht sind, notwendiger Weise das Innere desselben schneller als das nicht geschützte Gebiet passieren müssen, damit der Induktionsfluß erhalten bleibt. Infolgedessen bleibt der geschnittene Induktionsfluß der gleiche, und die elektromotorische Kraft behält denselben Wert, als wenn die Ankerdrähte bloß lägen. Andererseits ergibt sich dadurch auch im Innern der Kupferlamellen eine bedeutende Verringerung der Foucaultströme, und dies bedeutet einen weiteren Vorteil. Indessen müssen wir doch noch hinzufügen, daß durch die Einbettung der Ankerdrähte in das Eisen ihre Selbstinduktion erhöht wird, und darin liegt der einzige Nachteil des Verfahrens. Man hilft demselben zum Teil ab, indem man eine gemischte Anordnung wählt, und benutzt häufig Anker mit Zähnen oder Nuten.

Zur Stromentnahme kann man praktisch nicht gerade allein die beiden Windungen, welche genau auf der neutralen Linie liegen, mit dem äußeren Kreis verbinden; die neutrale Linie oder Zone ist diejenige, an welcher der Strom seine Richtung wechselt und die in der Windung induzierte elektromotorische Kraft Null ist. In Wirklichkeit ist die ganze Wicklung in einzelne Abschnitte geteilt, von denen jeder mehrere Windungen

umfaßt, und die Enden dieser Teilspulen führen zu je zwei Kollektorlamellen. Diese Lamellen müssen sorgfältig isoliert sein, und die Schwierigkeit, eine genügende Isolation zu erhalten, ist eine der Ursachen, welche bei der Gleichstrom-Dynamomaschine die Höhe der Spannung begrenzt.

An dem Kollektor schleifen die Bürsten. Früher benutzte man Kupferbürsten, heute bedient man sich, abgesehen von gewissen Anwendungen für elektrochemische Zwecke, bei denen man starke Ströme und daher möglichst kleinen Widerstand braucht, fast ausschließlich der Kohlebürsten, die den Vorzug haben, daß sie wegen ihrer nur mittelmäßigen Leitfähigkeit und zweifellos auch wegen der Entwicklung von Kohlensäure an den auf hohe Temperatur erhitzten Kontaktstellen weniger Funken geben.

Diese Funken an den Bürsten sind noch immer sehr störend; in den ersten Zeiten waren sie sogar ein großes Hindernis für guten Wirkungsgrad und für die Haltbarkeit der Maschine. Wie bekannt, stammen sie von dem Vorgang der Selbstinduktion her, die hier wegen der Schnelligkeit, mit welcher sich der Strom in dem die neutrale Zone passierenden Wicklungsabschnitt umkehrt, eine außerordentliche Bedeutung erlangt. Die Spannungen, die sich dabei entwickeln, und die man als Reaktanzspannungen bezeichnet, müssen energisch bekämpft werden. Anfangs kannte man, um sie abzuschwächen, kein anderes Verfahren, als die Verstellung der Bürsten aus der neutralen Linie heraus im Sinne der Rotation; dieser Kunstgriff war jedoch ungenügend und hatte den Nachteil, daß man einen Teil der erzeugten elektrischen Leistung verlor.

Heute erhält man weit bessere Resultate, entweder durch ziemlich komplizierte Wicklungsmethoden, oder durch Anbringung von Elektromagneten, die von dem Gesamtstrom der Maschine durchflossen werden, in der neutralen Zone. Diese Methoden erfordern, um die gewünschten Wirkungen zu liefern, eine sehr genaue Kenntnis der Form des va-

riablen Stromes, der während der Kommutation in den verschiedenen Ankerwindungen fließt; diese Kenntnis kann aber nur aus Versuchen gewonnen werden, die den feinsten Messungen gleichen, welche der Physiker von Beruf ausführt. Hier müssen sich also wieder technische Werkstatt und wissenschaftliches Laboratorium gegenseitig unterstützen.

Der engen Verbindung der Kunst des Ingenieurs und Wissenschaft des Physikers verdanken wir auch wiederum die Theorie der Dynamo-Maschine, die heute eine solche Vollendung erreicht hat, daß man im voraus die Elemente einer Maschine berechnen kann, die einem bestimmten technischen Zweck dienen soll. Es war schon gesagt worden, daß die Grundzüge dieser Theorie von Hopkinson festgelegt wurden; seitdem haben viele Elektriker, unter denen besonders Picou zu erwähnen ist, daran gearbeitet und den in den Werkstätten benutzten Formeln sozusagen ihre endgültige Form geben. Diese Formeln sind nur die Übersetzung der einfachen physikalischen Gesetze, an die wir im Vorhergehenden erinnert haben; die Betrachtung des magnetischen Kreises und die Anwendung des Ohmschen Gesetzes und des Induktionsgesetzes genügen zur Schaffung einer festen Grundlage, auf der sich gewissermaßen eine Kodifikation der Konstruktionsregeln aufbauen kann.

Jedoch muß man zur Vorausberechnung der Elemente den physikalischen Gesetzen noch einige Zusätze beifügen, die jedenfalls von den durch die Kommutation geschaffenen Bedingungen herrühren; diese Bedingungen sind, wie wir soeben sahen, recht verwickelt und haben im Augenblick noch ein etwas empirisches Aussehen. Die nötigen Zusätze sind jedoch sehr einfach und wenig zahlreich. Man kann damit die geometrischen Abmessungen des Ringes und die Wicklung des Ankers bestimmen, die Größe des Interferrikums festlegen, welches Feldmagnete und Anker trennt, und auch erfahren, wie der Feldmagnet gebaut werden muß.

Der Feldmagnet oder Induktor wird gegenwärtig aus Flußstahl hergestellt, dessen magnetische Eigenschaften man sehr gut kennen muß, um den entstehenden Induktionsfluß berechnen zu können. Man hat zum Gebrauch für die Konstruktionsingenieure Hilfstafeln aufgestellt, welche die zur Erzeugung einer gegebenen Induktion erforderlichen magnetischen Kräfte geben. Diese Kräfte sind glücklicherweise dank der hohen Permeabilität des Stahles ziemlich schwach; wenn man nach Mordey den Energieverbrauch berechnet, welchen die Erregung des Induktionsflusses in den verschiedenen Teilen der Maschine verursacht, so findet man, daß die Erregung der Feldmagnete, die dabei noch dazu allein in Betracht kommt, nur ein Prozent des Gesamtverbrauchs beträgt. Es sind daher, so scheint es, hier noch viele Fortschritte möglich, aber alle Verbesserungen, die in dieser Hinsicht getroffen werden, können den gesamten Wirkungsgrad der Maschine, der jetzt schon ausgezeichnet ist, kaum merklich beeinflussen; der Energieverbrauch der Erregung ist so klein, daß dabei die Verschwendung keine Rolle spielt.

Die wirklichen Verluste in der Maschine stammen von anderen Ursachen, an die man vielleicht noch erinnern darf: Luftwiderstand und mechanische Reibung, Bürstenfunken, Hysteresis-Erscheinungen in dem Ringe, Foucault-Ströme in den massiven Teilen der Maschine, Erzeugung eines entgegengerichteten magnetischen Induktionsflusses durch den Strom, der die Ankerwicklung durchfließt, und Energiezerstreuung durch Joulesche Wärme in dieser Wicklung. Alle diese Ursachen erzeugen eine Spannungserniedrigung, die man gewöhnlich als Ankerrückwirkung bezeichnet; doch hindert diese Erniedrigung nicht, daß die Dynamo-Maschine leicht wenigstens 90 Prozent der zu ihrem Betriebe aufgewandten mechanischen Leistung in elektrischer Form wieder abgibt.

Um die besonderen Eigenschaften einer Dynamo-Maschine vollkommen zu bestimmen, benutzt man mit Vorteil eine graphische Methode, die schon vor langer Zeit von Marcel

Deprez angegeben wurde, sich seitdem aber außerordentlich entwickelt hat. Man zeichnet Kurven, die als Charakteristiken bezeichnet werden, und die das Funktionieren der Maschine unter verschiedenen Bedingungen darstellen. Diese Charakteristiken können für die fertige Dynamo-Maschine dazu dienen, ihren Betrieb rationell zu regeln; sie liefern aber außerdem ein Hilfsmittel zur Ausarbeitung des Konstruktionsplans, aus dem der Gang der Maschine unter bestimmten Umständen im voraus entnommen werden kann.

In ganz allgemeiner Form stellen derartige Kurven die Beziehungen zwischen der Erregung der Magnete und der an den Polklemmen erzeugten Potentialdifferenz dar; sie sind natürlich nicht gleich für die verschiedenen Arten der Erregung, denen sehr verschiedenartige Eigenschaften der Maschinen entsprechen: Getrennte Erregung, die nur in speziellen Fällen angewandt wird; Erregung in Serienschaltung, wo der gesammte Strom, der in dem Kreise zirkuliert, auch um die Feldmagnete fließt; Erregung im Nebenschluß oder „shunt“, bei der die erregenden Ampèrewindungen nur einen Teil des Gesamtstromes führen; Erregung in Compound-Schaltung, bei welcher Hauptstrom- und Nebenschlußampèrewindungen übereinanderliegen und welche, die Eigenschaften der beiden vorhergehenden vereinigend, Maschinen herzustellen erlaubt, bei denen die Spannung sich nur wenig mit der Belastung ändert.

In den letzten Jahren hat man mehrfach partielle Charakteristiken gezeichnet, die den verschiedenen Bestandteilen — Feldmagneten, Interferrikum, Anker — entsprechen, welche den magnetischen Kreis bilden. Diese Kurven sind besonders lehrreich und lassen die besondere Wirkung jedes dieser Bestandteile erkennen. Ihre Vereinigung gibt eine Übersicht über die Wirkung des Ganzen.

Es ist mehrfach behauptet worden, daß eine Technik wahrhaft wissenschaftlichen Charakter annehme, wenn sie dahin gelangt sei, für ihre Erzeugnisse eine endgültige Form festzulegen. In diesem Sinne schien noch vor kurzem die Technik der Erzeugung elektrischer Energie die höchste Vollendung erreicht zu haben; auf die unendliche Mannigfaltigkeit der ersten Anfänge war eine fast vollkommene Gleichförmigkeit der Typen gefolgt. Die Gleichstrom-Dynamo-Maschine schien endgültig festgelegt zu sein in der Form der mehrpoligen Maschine mit festen Feldmagneten und rotierendem Innenanker.

Aber die Dynamo-Maschine bildet nicht für sich allein den Erzeugungsapparat der Elektrizität, sie ist von vornherein an einen Motor gebunden, der die mechanische Leistung liefert, welche sie in elektrische umsetzt; und Fortschritte in der Konstruktion dieser Motoren können große Umgestaltungen in der elektrischen Konstruktion herbeiführen. Diese Änderungen sind um so tiefgreifender, als in den Elektrogeneratoren die Verbindung zwischen Antriebsmaschine und elektrischer Maschine sich immer enger gestaltet hat, und diese beiden eng verbundenen, für einander geschaffenen Teile in Zukunft ein einziges Ganzes bilden.

Man darf also erwarten, daß das Auftreten neuer Antriebsmaschinen eine Weiterentwicklung der Dynamo-Maschine erzeugen muß, und braucht nicht zu erstaunen, daß die Erfindung der Dampfturbinen gerade in dem Augenblicke alles umgestaltete, als man einen festen Zustand erreicht zu haben glaubte.

Die große Geschwindigkeit der Turbinen passt insbesondere für Wechselstrommaschinen, und diese letzteren haben daher hauptsächlich die Wirkung der Fortschritte zu spüren bekommen, auf Grund deren die Maschinenbauer derartige leistungsfähige und schnell laufende Antriebsmaschinen von geringem Umfang bauen konnten.

Die Gleichstrom-Dynamomaschine eignet sich wenig für

eine Rotationsgeschwindigkeit, die so zahlreiche Kommutationen erfordert; aber trotzdem gaben die Anhänger dieser Art der Stromerzeugung nicht alle Hoffnung auf, sie mit den neuen Bedingungen in Einklang zu bringen; sie nahmen eine alte Idee, die aber nur bei der Konstruktion sehr kleiner Maschinen angewendet worden war, wieder auf, und machten interessante Versuche, Dynamo-Maschinen zu bauen, bei denen die Feldmagnete nur mit einem Pole wirken und ein Kollektor nicht mehr nötig sein sollte.

2. Die Wechselstromgeneratoren.

Wie wir sahen, wurde der Wechselstrom noch vor etwa fünfzehn Jahren nur ganz ausnahmsweise angewandt, insbesondere in Frankreich konzentrierten sich alle Bemühungen auf die Gleichstrommaschine. Als man jedoch erkannte, daß der Wechselstrom sich viel besser als sein Nebenbuhler für den Energietransport auf große Entfernung eignet, weil bei ihm die Bedingungen für hohe Spannung viel günstiger liegen, warf man sich umgekehrt mit Eifer auf die Vervollkommnung der Erzeugungs- und Verbrauchsmaschinen für diese Form der elektrischen Energie. Die verlorene Zeit wurde schnell wieder eingeholt, und heute ist die Theorie der Wechselstromapparate fest und sicher begründet; auch für die Wechselstrommaschinen ist der Augenblick gekommen, wo sie ihre endgültige Form annehmen und ihr Aufbau nach Regeln erfolgt, die für alle Zeiten feststehen.

Um die wechselnden Änderungen des magnetischen Induktionsflusses zu bewirken, die in dem Anker den Wechselstrom erzeugen sollen, bietet sich als erstes und tatsächlich allgemein benutztes Verfahren die relative Verschiebung des Ankers gegen den felderzeugenden Apparat dar.

Man braucht jedoch nicht notwendig in dieser Weise zu verfahren. Wenn man vor einem festen Induktormagneten

einen Weicheisenklotz rotieren läßt, so variiert der magnetische Widerstand entsprechend der mehr oder minder großen Ausdehnung des Interferrikums in den verschiedenen Stellungen des Eisenklotzes, und man kann es so einrichten, daß der Induktionsfluß, der alsdann eine Wellenform annimmt, eine passend angeordnete Ankerwicklung durchsetzt.

Nach diesem Prinzip hat man Wechselstrommaschinen mit rotierendem Eisenkern konstruiert, die wegen des Fehlens beweglicher Wicklungen weder Schleifringe noch Bürsten erfordern und deswegen besonders einfach und leicht zu bedienen sind; aber die große Beliebtheit, deren sie sich einige Zeit hindurch erfreuten, hat abgenommen, und die Maschinen dieser Bauart verschwinden mehr und mehr; sie waren zu schwer für eine gegebene Leistung.

Man ist daher auf die Wechselstrommaschinen zurückgekommen, bei denen Anker und Induktor gegeneinander beweglich sind; eine Gleichstrommaschine ohne Kollektor, aber mit einfachen Schleifringen würde den Typus einer Wechselstrommaschine mit festem Induktor und beweglichem Anker darstellen. Diese Anordnung eignet sich nicht für hohe Spannungen, wie man sie jetzt verlangt; es wäre für die Bedienungsmannschaft sehr gefährlich und auch für die Instandhaltung der Maschine unzuweckmäßig, zur Abnahme des Stromes bewegliche Teile zu benutzen, die man nicht sicher isolieren kann. Daher wird bei nahezu allen modernen Wechselstrommaschinen der Technik die umgekehrte Anordnung gewählt; das System der Induktormagnete, welches nur niedere Spannungen führt, wird in Rotation versetzt vor einem festen Anker, dessen Wicklung zu ebenfalls festen Polklemmen führt, die mit dem Verteilungsnetz direkt verbunden sind.

Der Anker, der meistens außen angebracht ist, besteht aus ziemlich dünnen Blechen, die gegeneinander durch Papier oder Firniß isoliert sind, und ist entweder mit massiven

Kupferbarren oder aus dünnen Drähten zusammengeflochtenen Kabeln bekleidet, die eine Trommelwicklung bilden. Man muß dabei für sehr gute Isolierung sorgen, und damit die Bewicklung standhält, die Drähte zwischen Zähne oder auch in vollkommen geschlossene Bohrungen verlegen. Die Gestalt dieser Zähne ist dabei nicht gleichgültig; von ihrer Form hängt der Wert der Selbstinduktion des Ankers und folglich der des Leistungsfaktors ab.

Bei den zuerst ausgeführten Maschinen waren die Induktorpole permanente Magnete; heute aber besitzen die in der Technik gebräuchlichen Wechselstrommaschinen als Induktoren Elektromagnete, abgesehen von gewissen besonderen Fällen, wo man mit möglichst großer Sicherheit einen absolut gleichbleibenden Strom erzeugen will. Der Erregerstrom, der noch nicht ein Zwanzigstel der Leistung verbraucht, kann hier nicht mehr direkt von den Polen der Maschine selbst entnommen werden; denn die Erregung verlangt Gleichstrom, und die Maschine liefert Wechselstrom. Gewöhnlich nimmt man zur Erzeugung dieses Stromes eine besondere Quelle zu Hilfe, eine kleine Gleichstrom-Dynamomaschine, die von derselben Antriebsmaschine in Bewegung gesetzt wird wie der Wechselstromgenerator. Zuweilen erhält man den Magnetisierungsstrom, indem man mit Hilfe besonderer Apparate, von denen später die Rede sein wird, einen Teil des Wechselstromes umkehrt. Die Induktorpole, welche sich auf dem im Innern des Induktionskranzes rotierenden Induktorrade befinden, sind im allgemeinen ziemlich zahlreich: 60, 80 oder selbst 100; dies ist nötig, um bei langsamem Gange die Frequenzen 25 oder 50 zu erhalten, die man in der Praxis braucht, z. B. zu Beleuchtungszwecken, wo allzu geringe Frequenzen dem Lichte ein störendes Flackern verleihen würden.

Maschinen mittlerer Leistung erhalten häufig noch Riemenkuppelung; bei den Generatoren für hohe Leistung strebt man jedoch darnach, dieses störende Zwischenglied mehr

und mehr zu beseitigen und den Induktor geradezu zum Schwungrad der Antriebsmaschine zu machen; das große Trägheitsmoment der Induktorkränze paßt sehr gut für diesen Zweck, die Verbindungsart der verschiedenen Elemente derselben untereinander und mit der Achse erinnert vollständig an diejenige der gewöhnlichen Schwunräder.

Die meisten Übertragungen mechanischer Energie gehen von Wasserfällen aus, was dazu geführt hat, die Generatoren mit Wasserturbinen zu kuppeln. Durch die Turbogeneratoren waren die Elektriker schon an derartige Verbindungen gewöhnt, als die Dampfturbinen in der Technik Eingang fanden.

Um aber unter den veränderten Umständen Maschinenaggregate zur Elektrizitätserzeugung durch direkte Verbindung der elektrischen Maschine mit den neuen Antriebsmaschinen bilden zu können, war es nötig, den Konstruktionstypus der ersteren so umzuformen, daß er sich den durch die Fortschritte der Mechanik geschaffenen Bedürfnissen anpaßte; damit begann eine neue Entwicklung, die auch wieder eine Wirkung der äußeren Verhältnisse darstellt.

Die Dampfturbinen rotieren notwendigerweise sehr schnell, sie machen ungefähr 500—3000 Umdrehungen in der Minute, und diese große Geschwindigkeit bedingt eine beträchtliche Änderung der Induktorkonstruktion. Da Ströme von der gebräuchlichen Frequenz erzeugt werden sollen, und die Frequenz von der Zahl der Vorbeigänge eines Induktorpoles vor einer Ankerspule während der Zeiteinheit abhängt, so muß man; da die Rotationsgeschwindigkeit sehr viel größer geworden ist, die Anzahl der Pole verringern. Man erkennt leicht, daß unter diesen Umständen der Turbogenerator eine weniger schmiegsame Maschinenart darstellt als der Schwungradgenerator und daß seine Konstruktion strengeren Gesetzen unterliegen muß.

Bei diesen hohen Geschwindigkeiten ist es auch nicht

mehr zulässig, den großen Durchmesser beizubehalten, den man schließlich den Schwungradgeneratoren großer Leistung gegeben hat; die Zentrifugalkraft würde übermäßige Werte erhalten, durch welche sehr bald die Festigkeit der Maschine in Frage gestellt würde. Zu den mechanischen Kräften gesellen sich außerdem auch noch intensive magnetische Anziehungen, die ebenfalls dazu zwingen, Induktor und Anker recht stabil zu bauen, damit sie sich nicht unter dem Einfluß dieser starken Kräfte deformieren. Zum Glück hat die Metallurgie gerade in den letzten Jahren mit der Elektrotechnik Schritt gehalten und konnte in demselben Augenblick, wo man ihrer bedurfte, Materialien von einer solchen Zähigkeit liefern, daß man ohne Gefahr Geschwindigkeiten verzehnfachen durfte, die vor einigen zwanzig Jahren schon für übermäßig gegolten hätten. Z. B. hat man, um die in Nuten gelagerten Leitungsdrähte an ihrem Platz festzuhalten, mit großem Vorteil Bänder aus jenem Nickelstahl benutzt, von dem wir früher schon sprachen, und dessen Eigenschaften von Ch. Ed. Guillaume so gründlich untersucht worden sind.

Um den Konstruktionsplan einer zu erbauenden Wechselstrommaschine endgültig festzulegen oder bei einer bereits ausgeführten die Bedingungen zu bestimmen, unter denen man sie am vorteilhaftesten arbeiten läßt, benutzt man ähnliche Verfahren, wie wir sie bei den Gleichstrommaschinen in Anwendung sahen.

Die Frage ist hier jedoch etwas verwickelter, denn die Leistung hängt von der Stromstärke, der elektromotorischen Kraft und der Phasenverschiebung ab. Sie kann, wie wir wissen, in zwei Teile zerlegt werden: die reelle oder Wattleistung und die wattlose oder Magnetisierungsleistung, und je nach den Umständen ist es zweckmäßig, das Verhältnis dieser beiden Glieder zu ändern. Um eine Wechsel-

strommaschine vollständig zu bestimmen, genügt es übrigens nicht, Spannung, Stromstärke und Leistungsfaktor anzugeben, man muß vielmehr noch die Charakteristiken bei Leerlauf und bei Belastung kennen. Die Leerlaufscharakteristik stellt die effektive elektromotorische Kraft dar, welche für jede Intensität des Induktorstromes im Anker induziert wird; sie ermöglicht z. B. festzustellen, daß die Maschine einen um so gleichmäßigeren Strom liefert, je stärker die Induktormagnete erregt werden. Die Charakteristik bei Belastung ist die Kurve, welche die effektive Spannung an den Polklemmen als Funktion der effektiven Stromintensität im äußeren Kreise darstellt; sie kann außerordentlich verschieden ausfallen, je nachdem ob die Maschine auf Widerstände ohne Selbstinduktion arbeitet oder ob umgekehrt der Verbrauchskreis induktiv ist. Man kann gegenwärtig, noch bevor die Maschine gebaut ist, diese Charakteristiken nach verschiedenen Methoden bestimmen, unter denen die von Blondel⁷⁾, Picou und Potier hervorzuheben sind.

Der Strom, welchen eine Wechselstrommaschine in der Praxis liefert, ist niemals ein einfacher Sinusstrom, seine Form ist häufig sehr kompliziert. Die Apparate, von denen wir früher gesprochen haben, wie Oszillographen oder Ondographen, geben hierüber wertvolle Aufschlüsse und erlauben die Oberschwingungen zu bestimmen, deren Perioden Bruchteile der Grundperiode sind und durch deren Überlagerung über die Grundschwingung der wirkliche Strom zustande kommt.

Diese Oberschwingungen stammen teils von der Gestalt der Pole, teils von der Form der Ankerzähne, durch welche Schwankungen des Induktionsflusses entstehen; alle beide Einflüsse können außerordentlich schädlich wirken.

In der Tat geben sie Anlaß zur Entstehung von parasitären Strömen, welche die Verluste durch Joulesche Wärme erhöhen, und insbesondere können sie in dem Verbrauchskreis eine für alle angeschlossenen Apparate sehr gefährliche

Spannungserhöhung bewirken. Wir haben ja gesehen, daß für geeignete Frequenz eine Resonanzerscheinung stattfinden kann, indem die Wirkung der Kapazität diejenige der Selbstinduktion vernichtet. Diese Erscheinung tritt niemals bei der Grundschiwingung ein, weil die Kapazität der Leitung nicht groß genug ist; es ist aber nicht unmöglich, daß sie sich bei einer der Oberschwingungen zeigt. Daher wird ein sorgfältiges Studium der Form der Ankerzähne und der Polschuhe erforderlich, wenn man diese störenden Wirkungen verringern will. Man kann jedoch auch elektrische Methoden zur Dämpfung derselben benutzen; dies hat in sehr geistvoller Weise Maurice Leblanc mit Hilfe einer Anordnung erreicht, der er den bezeichnenden Namen „Oberschwingungsdämpfer“ (*étouffeur d'harmoniques*) gibt.

Mit Hilfe der von der Theorie gelieferten Fingerzeige ist es gelungen, die Verluste nach und nach immer mehr zu verringern, sodaß der Wirkungsgrad der Wechselstromgeneratoren heute bis zu 95 Prozent hinaufgeht; mehr kann man kaum verlangen. Es ist sogar in gewissen Fällen zweckmäßig, nicht nach dem Besseren zu streben, das in der Elektrizität ebenso wie anderswo immer der Feind des Guten bleibt. So würde man die Foucaultschen Ströme, die einen Teil der verlorenen Leistung verbrauchen, nicht ohne Nachteil ganz unterdrücken. Infolge der elektromagnetischen Kräfte, die sie nach dem Lenzschen Gesetz ausüben, können sie eine sehr nützliche Rolle spielen, indem sie die Pendelungen gekuppelter Wechselstrommaschinen dämpfen und den störenden Einfluß der Oberschwingungen vermindern.

In dem ganzen vorhergehenden Abschnitt haben wir Generatoren betrachtet, die gewöhnlichen Wechselstrom liefern; man braucht jedoch dem Gesagten fast nichts weiter hinzuzufügen, um damit auch die Maschinen für Mehrphasenströme zu behandeln. Will man Dreiphasenstrom haben, so muß der feststehende aus Blechen gebildete Eisenkranz des Ankers für jeden der auf den Speichen des Induktorrades sitzenden

Pole drei Bohrungen oder Nuten tragen. Indem man nun immer diejenigen Bohrungen zusammenfaßt, die um je drei voneinander entfernt sind, kann man drei Stromkreise bilden, die getrennt benutzt werden können, die man aber gewöhnlich, wie oben auseinandergesetzt wurde, in Stern- oder Dreieckschaltung verbindet.

Wie wir schließlich noch hinzufügen müssen, sind die Wechselstrommaschinen, von denen bisher die Rede war, sogenannte Synchrongeneratoren; es gibt noch eine andere Art — die Asynchrongeneratoren — die in gewissen Fällen große Dienste leisten können; das Prinzip derselben ist jedoch leichter zu verstehen, wenn wir vorher erst die Frage der Motoren behandelt haben.

3. Kuppelung und Compoundierung.

Wie groß auch die Leistung der modernen Maschinen sein mag (sie reicht heute bis zu 8000 Kilowatt hinauf), so darf man sich in einer Zentrale zur Erzeugung elektrischer Energie doch nicht mit einem einzigen Generator begnügen; man muß sich gegen die Möglichkeit eines Unfalles vorsehen und zugleich im Stande sein, sich den veränderlichen Anforderungen des Verbrauchs anzupassen, die an das Netz gestellt werden.

Man hat daher zu dem Auskunftsmittel gegriffen, mehrere stromliefernde Maschinenverbände nebeneinander aufzustellen, die je nach Bedarf in Dienst gestellt werden können, und ist damit auf ein neues Problem gestoßen, nämlich die Bestimmung der besten Schaltungsweise der Dynamomaschinen und der bei der Kuppelung zu beachtenden Vorsichtsmaßregeln.

Handelt es sich um Gleichstrommaschinen, so ist die Frage ziemlich einfach zu lösen. Zwei allgemeine Fälle gibt es dabei: entweder will man eine Verteilung mit konstantem Strom haben oder aber man wünscht umgekehrt eine unveränderliche Spannung.

Im ersten Fall sind Maschinen mit Hauptstromerregung oder mit unabhängiger Erregung anzuwenden; die letzteren verhalten sich genau so wie galvanische Elemente, und ihre Schaltungsweise wird durch die allbekannten Grundprinzipien geregelt. Die Parallelschaltung der Hauptstrommaschinen bietet einige Schwierigkeiten, man wendet sie jedoch selten an; dagegen benutzt man recht häufig die Hintereinanderschaltung. Jeder Generator, dessen Induktorwicklung von dem Gesamtstrom des Leitungsnetzes durchflossen werden kann, wird anfangs durch einen Schalter kurz geschlossen. Um ihn in Gang zu setzen, braucht man nur diesen Schalter zu öffnen; mit Hilfe eines Regulierwiderstandes⁸⁾ regelt man dann noch die Erregung so, daß alle Generatoren merklich dieselbe Spannung geben. Um eine der Dynamomaschinen auszuschalten, braucht man sie nur wieder kurz zu schließen; doch muß man natürlich vorher die Spannung an den Klemmen derselben sinken lassen, indem man die Erregung verkleinert.

Der zweite Fall ist vielleicht der häufigste; die Notwendigkeit konstanter Spannung ergibt sich immer bei Anlagen für Beleuchtungszwecke. Hierfür eignet sich die Nebeneinander- oder, wie man auch oft sagt, die Parallelschaltung von Nebenschlußmaschinen sehr gut. Zwischen zwei Schienen, d. h. zwischen zwei Leitern der Verteilungstafel soll eine unveränderliche Potentialdifferenz aufrecht erhalten werden. Nehmen wir an, daß die Anlage schon in Betrieb sei, und daß man eine neue Maschine in den Kreis einschalten will; man wird sie dann, bevor man sie an den Kreis anschaltet, zuerst leer laufen lassen und zwar so, daß sie die gewünschte Spannung gibt; dann erst wird man und zwar gleichzeitig ihre beiden Pole mit den Leitungsschienen verbinden; darnach wird man die Erregung aller Maschinen so regeln, daß sie alle merklich die gleichen Belastungen erhalten. Will man dagegen eine Maschine ausschalten, so macht man erst durch Verkleinerung der Erregung ihre Belastung nahezu

gleich Null und öffnet dann den Schalter. In diesem Augenblick bildet sich infolge der Selbstinduktion der Feldmagnete ein Lichtbogen, der einem starken Unterbrechungsstrom entspricht. Man kann diese Unannehmlichkeit vermeiden, indem man den Magnetstromkreis über große Widerstände schließt, die als Ausschaltwiderstände bezeichnet werden.

Oft schaltet man auch Maschinen mit Compounderregung zusammen; die Hintereinanderschaltung würde hier keinen Zweck haben, die Parallelschaltung jedoch wird viel angewandt, z. B. in den Straßenbahnzentralen. Bei dieser Schaltung ist unter Umständen zu befürchten, daß, wenn die Spannung einer der Maschinen die der andern übersteigt, sich die Pole der Hauptstromerregung umkehren. Um einen solchen Zufall unschädlich zu machen, muß man die gleichnamigen Pole des Erregerkreises durch einen Kompensationsdraht verbinden. Damit jedoch diese Vorsichtsmaßregel wirksam sei, ist es nötig, daß der Widerstand dieses Drahtes gegen den der Magnetwicklungen vernachlässigt werden darf, eine Bedingung, die nicht immer leicht zu erfüllen ist.

Ähnliche aber viel unangenehmere Fragen treten bei den Wechselstrommaschinen auf. Die Hintereinanderschaltung wird in diesem Falle praktisch nicht angewandt; Hopkinson behauptete sogar, daß man sie überhaupt nicht vollkommen verwirklichen könne. Indessen hat Boucherot gezeigt, wie man mit Hilfe von Kondensatoren eine Art Schaltung von Wechselstrommaschinen erhalten kann, die regelrecht in Serie wirken. Da jedoch, wie wir später sehen werden, die Spannung eines Wechselstromes mit Hilfe von Transformatoren leicht erhöht werden kann, so beansprucht diese Schaltungsweise in der Praxis nur geringes Interesse.

Die Parallelschaltung ist dagegen sehr gebräuchlich. Auf den ersten Anblick scheint es, daß sie nicht leicht herzustellen sei. Es ist ja nicht allein nötig, daß der Generator, den man in das Netz einschalten will, wie im Fall der Gleichstrom-Dynamomaschinen eine der Netzspannung gleiche

Spannung liefert, sondern diese beiden Spannungen müssen auch noch in Phase sein, d. h. sie müssen in jedem Augenblick gleich und gleichgerichtet sein, und außerdem müssen natürlich alle parallel geschalteten Maschinen genau die gleiche Frequenz haben. So erhält man also das erstaunliche Resultat, daß im Laufe eines Tages, wo die Maschinen Strom geliefert haben, dessen Richtung drei bis fünf Millionen mal gewechselt hat, doch keine einzige von ihnen eine Periode mehr gemacht haben darf als die anderen.

Zum Glück geben die Eigenschaften des Wechselstroms selbst eine Lösung an die Hand, welche mechanische Mittel allein zweifellos nicht liefern könnten. Zwei elektrisch gekuppelte Wechselstrommaschinen verhalten sich wie zwei durch eine elastische Kuppelung verbundene Maschinen; wenn eine von ihnen der anderen etwas vorauseilt, so muß sie eine größere Leistung abgeben, und diese Leistungserhöhung erzeugt ihrerseits eine Verlangsamung; es entstehen sogenannte Kompensations-, Ausgleichs- oder Zirkulationsströme, welche die eigensinnige Maschine wieder zur Phasengleichheit mit dem Netz zurückzuführen suchen.

Diese Rückkehr zum Gleichgewicht erfolgt jedoch nicht momentan. Wie ein aus seiner stabilen Gleichgewichtslage entfernter Körper, der nur unter Ausführung einer Reihe von Schwingungen dahin zurückkehrt, so stellt die mit einem Netz verbundene Wechselstrommaschine ein System im stabilen Gleichgewicht dar, das die Fähigkeit besitzt, Schwingungen auszuführen. Diese Schwingungen sind sehr schädlich; sie äußern sich z. B. bei den eingeschalteten Lampen durch unangenehme, den Abonnenten von Wechselstromkreisen wohlbekannte Intensitätsschwankungen, die sich bemerkbar machen, wenn die Zuschaltung nicht gut gelungen ist. Man hat versucht, sie möglichst schnell zu dämpfen; Leblanc hat in dieser Hinsicht ausgezeichnete Resultate erzielt durch ein ähnliches Verfahren, wie man es benutzt, um die Schwingungen des beweglichen Teiles der Galvanometer zu dämpfen.

Wenn die Schwingungen nicht rasch unterdrückt würden, so müßte man sehr ernste Zufälle befürchten, weil sich dann, wie bei allen schwingenden Systemen, Resonanzphänomene einstellen können, welche die Abweichung außerordentlich vergrößern und die Maschine außer Phase bringen. Man sagt in diesem Fall, daß die Maschine „außer Tritt“ geraten sei. Das ganze Netz kann dabei in Kurzschluß versetzt werden; in diesem Zustand werden die Störungen wahrhaft furchtbar, das Licht erlischt plötzlich und alle Maschinen des Kraftwerks, die nunmehr auf ein falsches Ziel arbeiten, können zerstörende und das Bedienungspersonal gefährdende Beschädigungen erleiden.

Die Frage nach der Stabilität der Kuppelung ist also von allergrößter Wichtigkeit, und man versteht ohne weiteres, daß sie gerade in den letzten Jahren eines der Hauptprobleme der Elektriker gewesen ist. Sie bildet den Gegenstand ausgezeichneter Arbeiten, unter denen besonders die von Leblanc, Boucherot, Blondel u. a. m. zu erwähnen sind.

Man befindet sich hier wieder auf einem Gebiet, wo der Gelehrte und der Ingenieur zusammentreffen; ihrer gemeinsamen Arbeit bedarf es, um ein Problem aufzuklären, das sich einerseits mit der Mechanik und Elektrizitätstheorie be- rührt, andererseits mit der Motortechnik und der Praxis der Dynamomaschinen in Verbindung steht. Eine genaue Untersuchung des Problems führt auf die Unterscheidung von dreierlei Arten möglicher Schwingungen, die, wie man sich wohl denken kann, nicht leicht alle zugleich zu vermeiden sind. Ohne hier auf die Einzelheiten der Rechnung einzugehen, läßt sich wenigstens die allgemeingiltige Schlußfolgerung angeben, daß es zur Aufrechterhaltung eines genauen Isochronismus der Wechselstrommaschinen zweckmäßig ist, sie nicht alle mit hochempfindlichen Geschwindigkeitsregulatoren zu versehen, welche nur die elektrischen Kräfte an der freien Entfaltung ihrer so nützlichen dämpfenden Wirkung hindern würden, die sie automatisch ausüben. Daher ist es

z. B. im Fall der Dampfmaschinen als Betriebskraft vorzuziehen, daß nur ein einziger Regulator benutzt wird, der an dem gemeinsamen Hauptdampfrohr angebracht ist.

Bei parallel geschalteten Maschinen erhält sich also der Gleichtritt dank den elektrischen Rückwirkungen, und man vermeidet heute leicht die Zufälle, welche ihn stören können; will man jedoch zwei Maschinen zusammenschalten, so ist noch eins nötig: daß man nämlich zu Anfang die Verbindung gerade in dem Augenblick herstellt, wo sie genau in Phase sind. Zu diesem Zwecke bedient man sich besonderer Apparate, die Phasenindikatoren genannt werden. Um z. B. festzustellen, ob zwei Maschinen gleicher Leistung in einem gegebenen Augenblick an einem ihrer Pole gleiches oder ungleichnamiges Potential besitzen, braucht man nur diese Pole durch einen Draht zu verbinden, in den man geeignete Lampen einschaltet; wirken die beiden Maschinen gegeneinander, so verlöschen die Lampen vollständig, und genau in diesem Augenblick muß man die Zuschaltung ausführen.

Es genügt jedoch in einer Verteilungsanlage nicht, daß alle Maschinen jederzeit vollkommen übereinstimmend laufen, sie sollen außerdem auch trotz aller Vorkommnisse in dem Netz an dasselbe, wenigstens in dem gewöhnlichen Fall, eine konstante Potentialdifferenz liefern. Wie wir sahen, kann man bei den Gleichstromgeneratoren diese Konstanz erreichen, indem man auf die Erregung wirkt. Bei der Erregung mit Compoundschaltung läßt sich die Unveränderlichkeit sogar selbsttätig erhalten, und seit dem Jahre 1881 ist hierfür eine von Marcel Desprez vorgeschlagene, sehr befriedigende Lösung bekannt.

Bei den Wechselstrommaschinen ist die Frage ganz eigenartig kompliziert; die zu regulierende Spannung ist alternierend, während die Erregung kontinuierlich ist. Eine

Compoundanordnung kann infolgedessen nur mit Hilfe von Zwischengliedern geschaffen werden. Um sie zu verwirklichen, muß man übrigens auch die Ursachen kennen, aus welchen die Spannung variiert; sie sind doppelter Art: erstens solche, welche auf Änderung der Energieabgabe wirken, zweitens solche, die Änderungen der Umdrehungsgeschwindigkeit hervorrufen.

Verschiedene Methoden sind dafür vorgeschlagen worden; eine der verbreitetsten, eine rein elektrische Methode ist die von Boucherot. Sie beruht im wesentlichen auf der Erregung der Induktormagnete durch einen Gleichstrom, der von einer eigenartig gebauten Dynamomaschine geliefert wird. Der Anker, welcher eine passend angeordnete Bewicklung trägt, wird durch ein Drehfeld in Rotation versetzt; dieses Feld stammt von stromdurchflossenen Spulen, deren Ströme selbst wieder von der Wechselstrommaschine induziert werden. Diese summarische Beschreibung genügt sicherlich nicht zum Verständnis des Systems, aber sie läßt wenigstens den Aufwand von Scharfsinn seitens des Erfinders ahnen, welcher zur Lösung eines so verwickelten Problems erforderlich war. Andere Verfahren, die von Blondel und Leblanc stammen, haben gleichfalls gute Resultate ergeben; man hat ferner elektromechanische Compoundierungsarten versucht, bei denen man Geschwindigkeitsregulatoren wirken lassen will, um die Erregung zu modifizieren.

Der Wert solcher Anordnungen ist sehr groß, nicht allein, weil es sehr wichtig ist, sofort etwaigen Spannungserniedrigungen zu begegnen, welche gewaltige Schwankungen in der Lichtintensität der Lampen eines Netzes oder ungenügende Leistung der angeschlossenen Motoren verursachen würden, sondern auch, weil die Herstellung einer guten Compoundanordnung eine sehr beträchtliche Ersparnis bei dem Bau von Wechselstromgeneratoren zuläßt. In der Tat erzielt man nur dadurch eine Verringerung des Materialverbrauchs, daß man Konstruktionen wählt, welche die Anker-

rückwirkung und folglich auch den Unterschied zwischen den Spannungen für verschiedene Belastungen groß machen. Sehr wirksame Regulierungsmittel sind daher für Wechselstromgeneratoren hoher Leistung durchaus notwendig, wenn man nicht auf gar zu kostspielige Konstruktionen kommen will. Die Wissenschaft, welche dabei von ihrem Standpunkt der rein objektiven Betrachtung herabsteigen muß, ist allein dazu fähig, hier der Technik die Regeln anzugeben, die sie befolgen muß, um ökonomisch zu arbeiten.

4. Das moderne elektrische Kraftwerk.

So jung die Elektrotechnik auch noch ist, so hat sie doch schon eine sehr merkliche Entwicklung durchgemacht. In den ersten schüchternen Anfängen erzeugte sie verhältnismäßig geringe Energiemengen, die in einem kleinen Bezirksrings um die Erzeugungsstelle verbraucht wurden; in dem Maße jedoch, wie sie sich weiter entwickelte, sieht man zuerst eine sehr rasche Zunahme der Zentralen mittlerer Größe, in denen elektrische Energie erzeugt wird, die an eine kleine Zahl von Abonnenten abgegeben oder auf kurzen Strecken zum Betriebe elektrischer Straßenbahnen benutzt wird. So hielt man es noch vor einigen zwanzig Jahren für notwendig, zur Beleuchtung einer gewöhnlichen Straße wie der Avenue de l'Opéra in Paris drei Stationen zu errichten: die erste an der Place de l'Opéra, die zweite an der Rue d'Argenteuil und die dritte in der Nähe der Place de l'Opéra.

Aber nicht lange konnte sich die Elektrotechnik dem allgemeinen Gesetz entziehen, nach welchem die Erzeugung im Großen immer vorteilhafter ist als die Erzeugung im Kleinen, und sie mußte, um zu leben und zu gedeihen, ihre Kräfte konzentrieren. Es trat deutlich zutage, daß große wie kleine industrielle Betriebe ein Interesse haben, die Energie, welche sie brauchen, einer Zentrale mit sehr großer Leistungsfähigkeit zu entnehmen. Die Kosten der

ersten Einrichtung, die von der Anschaffung der Motoren und Dynamomaschinen, dem Bau der Verteilungsschalttafel und der Gebäude herrühren, ebenso wie die Betriebskosten, welche die Gehälter des Bedienungspersonals, die Ausgaben für Kohlen, für die Unterhaltung und Reparaturen der Maschinen umfassen, schwanken sehr stark je nach der Größe der einzelnen Werke; z. B. hat man berechnet, daß für eine Straßenbahnzentrale der Selbstkostenpreis der Kilowattstunde in der Zentrale vom Einfachen auf das Doppelte steigt, je nachdem man Einheiten von 1000 oder 200 Pferdestärken anwendet.

Die Zentralstation mit großer Leistung ist also eine wirtschaftliche Notwendigkeit geworden, und aus diesem Bedürfnis heraus sind gerade in den letzten Jahren in der Umgebung aller großen Städte in Europa und Amerika großartige Anlagen geschaffen worden.

Derartige Zentralen müssen auf passend gewählten Plätzen errichtet werden, auf denen ihnen leicht und mit geringen Kosten die gewaltigen Mengen Brennstoff zugeführt werden können, welche sie verbrauchen, und auf denen ihnen auch das zur Speisung der Kessel und Kondensatoren nötige Wasser in genügender Menge zur Verfügung steht. Die neuen Pariser Zentralen und ebenso die von Antwerpen, New-York und Philadelphia sind aus diesen Gründen in der Nähe von Wasserläufen angelegt.

Bei den durch Dampfkraft getriebenen Anlagen wendet man noch sehr oft Kolbenmaschinen an, aber natürlich im allgemeinen Mehrfach-Expansions- oder Verbundmaschinen, d. h. Maschinen mit mehreren Zylindern. Meistens gehören sie dem Typ der horizontalen Tandemmaschinen an, die sich durch leichte Überwachung und bequeme Instandhaltung auszeichnen. Doch gilt dies nicht als allgemeine Regel. So besitzt die Zentrale der Pariser Untergrundbahn, des *Metropolitain*, am Quai de la Rapée vertikale Verbundmaschinen, und die New-Yorker Zentralen haben kolossale

Maschinen mit zwei Zylindern, einem horizontalen Hochdruck- und einem vertikalen Niederdruckzylinder, welche beide an derselben Kurbelwelle angreifen.

Diese gewaltigen Maschinen leiden aber an dem schweren Übelstand, daß sie sich über mehrere Stockwerke erstrecken; umfangreich, schwer, geräuschvoll und gefährlich wie sie sind, hat man schon in mehreren Orten begonnen, sie durch Turbinen zu ersetzen, welche dank ihrer großen Rotationsgeschwindigkeit bei gleicher Leistung unvergleichlich viel leichter und kompender sind; so sind z. B. die Turbinen in dem schönen Werk von Saint-Denis⁹⁾ 3,5 m hoch, 14 m lang und 4 m breit, während eine gleichwertige Kolbenmaschine den Raum eines dreistöckigen Hauses einnehmen würde. Das stromliefernde Maschinenaggregat mit Turbine wiegt im übrigen zwanzig mal weniger als ein Aggregat von gleicher Leistung mit der alten Betriebsmaschine.

Gegenwärtig trifft man in den Zentralen Turbinen von zwei verschiedenen Typen an: horizontale, wie die in der Zentrale von Saint-Denis benutzten Parsons-Turbinen, und vertikale, wie die besonders in Amerika gebräuchlichen Curtis-Turbinen. Die letzteren sind besser äquilibrirt, haben aber den Übelstand, daß das ganze Gewicht des Maschinenaggregates auf einem einzigen Lager ruht, und daß außerdem der Generator, der direkt über der Dampfmaschine liegt, eine lästige Temperaturerhöhung erfährt.

Gedenken wir schließlich noch der interessanten Anwendung der Rateau-Turbinen zwecks Ausnutzung der Energie, welche der Abdampf noch erhält, der aus gewöhnlichen Dampfmaschinen ohne Kondensation entweicht. So arbeiten z. B. in den Bergwerken von Bruay zwei mächtige Gleichstrom-Dynamomaschinen ganz umsonst, indem sie die Energie verwerten, die früher sozusagen zum Schornstein hinausging.

Der Dampf bleibt also in den elektrischen Zentralen

die Hauptenergiequelle; er ist von seinem Platze durch den furchtbaren Konkurrenten, der auf andern Gebieten gesiegt hat, nämlich den Explosionsmotor, nicht verdrängt worden. Aber er wird durch einen anderen Rivalen bedroht, den gewöhnlichen Gasmotor. Man findet in manchen Bergwerks-gegenden Maschinen von 6000 Pferdestärken, die von dem Gas gespeist werden, welches benachbarte Hochöfen liefern; doch ist der gewöhnliche Gasmotor sicherlich viel launenhafter und weniger anpassungsfähig als die Dampfmaschine.

Alle diese mächtigen Maschinen treiben heute gleich starke elektrische Generatoren. Dieselben Gründe der Sparsamkeit und eines möglichst guten Wirkungsgrades, welche dahin geführt haben, die Erzeugung gewaltiger Mengen elektrischer Energie in Kraftwerken größten Maßstabes zu zentralisieren, bewirken es, daß man in diesen selben Werken nur eine kleine Zahl sehr großer Maschineneinheiten benutzt. Man hat in den letzten Jahren Maschinen von einer immer weiter gesteigerten Leistungsfähigkeit bauen gelernt. Auf der Ausstellung von 1889 staunte man eine Dynamomaschine von 250 Kilowatt*) an, auf der von 1900 betrachtete man einen Wechselstromgenerator von 3000 Kilowatt als ein Wunder; heute ist man zu Maschineneinheiten von 8000 Kilowatt gelangt, von denen also jede eine Energiemenge liefern kann, derjenigen vergleichbar, welche die sieben Bezirke von Paris gemeinsam an die Gesamtheit ihrer Abonnenten abgeben.

*) Es sei daran erinnert, dass 1 Watt 0,102 Kilogramm-meter pro Sekunde entspricht, und 1 Kilowatt 1000 mal so groß ist; eine Pferdestärke entspricht 75 Kilogramm-meter pro Sekunde oder 0,736 Kilowatt.

Die Kilowattstunde, die Arbeit von 1 Kilowatt während einer Stunde, ist gleich 367200 Kilogramm-meter, während die Pferdestunde, die Arbeit von 1 Pferdestärke während einer Stunde, gleich 270000 Kilogramm-meter ist.

Es scheint für den Augenblick nicht nötig, eine derartige Leistung wesentlich zu überbieten; man darf es damit in einer Zentrale nicht zu weit treiben, und es wäre unvorsichtig, wollte man sich mit einer einzigen Maschinengruppe begnügen, von der die Stromversorgung einer ganzen Stadt abhängt.

Der Energiebedarf wächst übrigens mit gewaltiger Schnelligkeit; Straßenbahnen, Stadtbahnen, Vorortbahnen, Akkumulator-droschken, die verschiedenen Industrien, welche ihre Betriebskraft einer elektrischen Anlage entnehmen können, stellen immer größere Anforderungen, und ohne Übertreibung schätzt man die elektrische Energiemenge, welche binnen kurzem Paris und Umgebung jährlich wird verbrauchen können, auf 700 Millionen Kilowattstunden. Zwei bis drei Zentralen wie die von Saint-Denis würden für einen so ungeheuren Bedarf genügen; man fühlt sich wahrhaft ergriffen von der Größe der Änderungen, welche die industriellen Arbeitsbedingungen durch die Elektrizität erfahren haben, wenn man sieht, wie diese ganze Leistung unter der Aufsicht eines sehr mäßigen Bedienungspersonals entsteht; in Saint-Denis versehen siebzig Personen, Tag- und Nachtschichten dabei zusammengerechnet, den ganzen Dienst.

Dieses Wunder ist das Resultat des automatischen Betriebes, mit dem das Werk arbeitet, insbesondere was die Versorgung mit Brennstoff betrifft. Die Kohle, welche ein Krahn den Leichterschiffen auf der Seine entnimmt, wird von den Eimern eines Paternosterwerks in riesige Vorratskammern geschafft, von wo sie in gleichmäßigem Strom auf die Feuerroste von sechzig Kesseln mit 420 qm Heizfläche hinabfällt; Asche und Schlacken werden ebenfalls automatisch entfernt. Der Maschinist übt hier keine Dienerrolle mehr aus, er leitet und überwacht nur den Betrieb.

In solchen großen Kraftstationen ist der empfindlichste Teil wohl die Schalttafel, welche den von den Generatoren

gelieferten Strom empfängt und kontrolliert, und von wo er in die Verbrauchsleitungen weitergeht. Diese Tafeln bieten heute mit ihren blanken, auf großen Marmorplatten befestigten Kupferbarren einen sehr hübschen Anblick dar; sie sind luftig gebaut, d. h. die verschiedenen Apparate, welche sie tragen, sind möglichst weitläufig und gut beleuchtet angebracht.

Deshalb besitzen die modernen Schalttafeln häufig mehrere Stockwerke. Oben sind die Messapparate, die man gegenwärtig als sorgfältig geeichte, z. B. von dem Laboratorium der Société Internationale des Electriciens¹⁰⁾ geprüfte Präzisionsinstrumente baut; in diesem Stockwerk, wo sich wie ein Kapitän auf der Kommandobrücke der Ingenieur aufhält, dem alle jene Straßenbahnen, Werkstätten und Maschinen, welche Kraft und Licht von der Zentralstation entnehmen, untertan sind, ist gewöhnlich nur Niederspannungsstrom vorhanden, so daß das Personal, wie auch die empfindlichen Instrumente, gegen gefahrbringende Entladungen gesichert ist. Darunter sind die Transformatoren für die Apparate der Schalttafel angebracht; noch weiter unten die Ausschalter, die selbst wieder aus der Ferne bedient werden, um Unglücksfälle zu vermeiden; ganz unten, im tiefsten Stockwerk endlich liegen die von den Generatoren kommenden und die zu den Speisepunkten des Netzes führenden Kabel.

Bisher haben wir nur von den mit Dampf- oder Gaskraft betriebenen Zentralen gesprochen, aber neben ihnen entwickeln sich die Wasserkraftanlagen täglich weiter. Gegenwärtig übersteigt die in Frankreich durch Vermittlung der elektrischen Energie nutzbar gemachte Leistung der Wasserkräfte bereits 500 000 Pferdestärken, und es sind noch gewaltige Reserven vorhanden; so bewertet der Ingenieur Tavernier schon allein den in den französischen Alpen enthaltenen und vollkommen zugänglichen Energiereichtum auf 4 000 000 Pferdestärken. Diese Statistik vernachlässigt

sogar noch alle Wasserkräfte unter 200 Pferdestärken, deren Ausbeutung nicht gewinnbringend sein würde. Rhône und Arve zusammen könnten bei einer ganz leicht durchzuführenden Regulierung zwischen der Schweizer Grenze und Pyrimont dauernd eine Bruttoleistung von 80000 Pferdestärken geben. Es ist bekannt, welchen Einfluß auf die Industrie und das soziale Leben die Erschließung dieser neuen Geldquellen bereits gehabt hat, und schon früher haben wir von den Hoffnungen gesprochen, die man deswegen für die Zukunft hegen kann.

Um diese Energiemengen auszubeuten und die Dynamomaschinen in Bewegung zu setzen, bedient man sich der Wasserturbinen, die sich bei gleichbleibender Belastung mit ihrem vollkommen gleichmäßigem Gange ganz ausgezeichnet zur Erzeugung elektrischer Energie eignen; bei veränderlicher Belastung verlangen diese Motoren wegen der Wassermenge, deren Strömung dabei geändert werden muß, Regulierapparate, die nicht sofort vollkommen auf der Höhe waren; heute jedoch sind die selbsttätigen Regulatoren zu hoher Vollendung gebracht und arbeiten vollkommen befriedigend.

Sobald die Fallhöhe ungefähr fünf Meter erreicht, ersetzt man die alten Turbinen mit vertikaler Achse durch solche mit horizontaler, welche weder einen Wechsel der Achsenrichtung erfordern, der immer unbequem und heikel ist, noch die Anwendung von elektrischen Generatoren mit vertikaler Achse, deren Konstruktion schwierig ist.

In der Praxis können zwei Fälle vorkommen: entweder handelt es sich um die Ausnutzung eines niedrigen Gefälles mit großer Wassermenge, oder aber man hat hohes Gefälle mit geringer Wassermenge zur Verfügung. Niedrigen Fallhöhen werden im allgemeinen langsam laufende Maschinen entsprechen, während hohe sich leichter schnelllaufenden Wechselstrommaschinen mit rotierendem Anker anpassen.

Wie bei den Zentralen mit Dampfkraft, sind auch bei den Werken mit Wasserkraft die ökonomischen Bedingungen viel besser für große als für kleine Betriebe; in Frankreich hat man deshalb am Rhôneufer eine Zentrale projektiert, die fast zur Versorgung von Paris genügen würde, und in Amerika hat man die großartigste Wasserkraftanlage geschaffen, welche zur Stunde existiert, indem man einen Teil der 75 000 Pferdestärken benutzt, welche die Niagarafälle liefern können.

Kapitel V.

Die Motoren.

1. Die Gleichstrommotoren.

Die in praktischer und vielleicht auch theoretischer Hinsicht wichtigste der verschiedenen Formen, in welche elektrische Energie nutzbar umgewandelt werden kann, ist die mechanische Energie. Die Anwendungen, welche der Mensch zu allen Zeiten von der mechanischen Arbeit gemacht hat, sind für das gewerbliche wie für das soziale Leben höchst notwendig, und andererseits erscheint uns die mechanische Energie als eine der vornehmsten und höchsten Formen, welche die Energie überhaupt annehmen kann.

Den Rang, welchen die Elektrizität in der Großindustrie einnimmt, hat sie sich tatsächlich erst in dem Augenblick erobert, wo der Elektromotor zu einem anpassungsfähigen, praktischen Apparat wurde, der auf seiner Achse fast die ganze Leistung als mechanische Leistung wiedergibt, welche er empfängt, sobald er einen Strom von gewisser Stärke bei einer Spannung von einer gewissen Anzahl Volt absorbiert.

Vor sehr langer Zeit schon, etwa um 1838, kam der russische Physiker Jacobi zuerst auf den Gedanken, unter Benutzung des Elektromagneten eine Maschine zu bauen zur direkten Erzeugung fortgesetzter Rotationsbewegungen. Wenn man auf dem Umfang eines um eine horizontale Achse drehbaren Rades eine Reihe von Stäben aus weichem Eisen in

gleichen Abständen voneinander parallel der Achse anbringt, so übersieht man leicht, daß jeder dieser Stäbe einer Anziehung unterliegt, die dieselbe Wirkung erzeugt wie ein Arm, der das bewegliche Rad in Umdrehung versetzt, wenn man in gleicher Anordnung wie die Eisenstäbe außen sehr nahe dem Radumfang ebensoviele Elektromagnete anbringt, wie Stäbe vorhanden sind. Wenn die Stäbe vor den Polen der Elektromagnete anlangen, so überschreiten sie diese Stellung wegen der erworbenen Geschwindigkeit, und sorgt man nun dafür, daß der Strom in diesem Augenblick unterbrochen und erst wieder geschlossen wird, wenn die Stäbe in der Nähe der folgenden Elektromagnete angekommen sind, so muß man eine gleichmäßig andauernde Bewegung in demselben Sinne erhalten. Man kann dabei die Weicheisenarmaturen durch Elektromagnete ersetzen, die so angeordnet sind, daß sie den festen Magneten immer ungleichnamige Pole zukehren; doch muß man dann, um dem Rade eine dauernde Rotation zu erteilen, mit Hilfe eines geeigneten Kommutators beim jedesmaligen Passieren der Gleichgewichtslage die Richtung des Stromes umkehren.

In diesen beiden primitiven Systemen kann man schon entfernte Vorfahren einiger unserer jetzigen Motoren erkennen; doch versteht man es ohne weiteres, daß der abscheulich schlechte Wirkungsgrad und die sehr mäßige Leistungsfähigkeit keine wichtigeren Anwendungen gestatteten. Übrigens war in der Zeit, wo diese unentwickelten Apparate erfunden wurden, die zu ihrem Betriebe nötige elektrische Energie nur mit kostspieligen umfangreichen galvanischen Batterien zu erhalten.

Die erste Maschine, welche auf Jacobis Bemühungen hin konstruiert wurde und funktionierte, erreichte etwa eine Leistung von einer Pferdestärke; sie wurde dazu benutzt, das Schaufelrad eines kleinen Botes in Bewegung zu setzen, welches trotz heftigen Gegenwindes in Gegenwart einer zahlreichen staunenden Menge die Newa bei St. Petersburg aufwärts fuhr.

Man darf nicht etwa glauben, daß dieser heute etwas in Vergessenheit geratene Versuch unbeachtet blieb; er erregte im Gegenteil lebhaftere Aufmerksamkeit bei den Industriellen Europas und Amerikas und erweckte anfangs sogar große Hoffnungen, die freilich auf unrichtigen Vorstellungen beruhten.

Man hatte nämlich beobachtet, daß man mit einer gegebenen Batterie immer stärkere Elektromagnete erhalten konnte, indem man die Zahl der um den Eisenkern gelegten Windungen vermehrte, und bildete sich ein, daß man, ohne die Kosten zu vermehren, andauernd wachsende mechanische Wirkungen erzeugen könnte. Die Theorie der galvanischen Kette andererseits war noch ziemlich wenig bekannt; man dachte sich, daß die chemischen Reaktionen sozusagen unbegrenzte Mengen Elektrizität lieferten, und erkannte nicht, daß diese Mengen, die sich wegen des Widerstandes der Leitungen nicht plötzlich entwickeln können und nur von einer geringen Potentialdifferenz getrieben werden, in Wirklichkeit recht begrenzten Leistungen entsprechen.

Die Physiker dämpften diesen Enthusiasmus, der ihnen mit vollem Recht aus einer irrthümlichen Auffassung der Erscheinungen hervorgegangen schien, und wenn man auch heute finden mag, daß sie etwas übereilt verallgemeinerten und schlechte Propheten waren, als sie, wie es einer der gelehrtesten unter ihnen der berühmte Verdet z. B. tat, die Worte schrieben, „daß von der Zukunft der elektrischen Kraftmaschinen wenig zu hoffen sei“, so darf man doch nicht vergessen, daß im ganzen ihre Zurückhaltung nichtsdestoweniger recht vernünftig und ihre Kritik sehr treffend war. Auch muß man anerkennen, daß sie durch Aufdeckung der wissenschaftlichen Gründe, aus denen hervorgeht, wie kostspielig ein Motor wie der Jacobische arbeitet, den Boden ebneten, auf dem — freilich viel später — die Grundlagen zur Konstruktion so vieler ausgezeichneten Motoren gelegt werden sollten.

Das erste, worauf sie die Aufmerksamkeit lenkten, war die Rolle der Induktionserscheinungen in dem Elektromotor. Wenn die Maschine rotiert und die elektomagnetische Kräfte ins Spiel treten, so entsteht infolge der Wechselwirkung, auf die wir früher hingewiesen haben, eine induzierte elektromotorische Kraft, welche sich dem Durchgang des Stromes widersetzt; auf diese Weise verschwindet elektrische Energie, deren Äquivalent sich in der gewonnenen Arbeit wiederfindet. Ebensowenig wie irgend eine andere Maschine erzeugt der Motor Energie; er nimmt nur in Form elektrischer Energie auf, was er in mechanischer Form wiedergibt.

Wird der Strom, wie bei den Versuchen von Jacobi, von galvanischen Elementen geliefert, so ist im letzten Ende chemische Energie die Quelle der gewonnenen Arbeit; die klassischen Untersuchungen von Favre zeigen jedoch, wie schlecht diese Energie mit den alten Motoren ausgenutzt wurde, da man als mechanische Energie nur etwa ein Siebzigstel der durch die Auflösung des Zinks der Ketten entstehenden Wärmemenge wiederfindet; diese Wärmemenge kann dabei als Maß der verbrauchten chemischen Energie dienen.

Daher war auch der Anwendungsbereich der ersten Motoren sehr engbegrenzt; sie wurden in solchen Fällen benutzt, die keine großen Kräfte, dagegen exaktes Arbeiten, Schnelligkeit und Beweglichkeit verlangten, sei es zur Auslösung oder Hemmung einer Bewegung. Der Mechaniker Froment, dessen Meßapparate sich durch ihre Vollendung auszeichnen, ist vielleicht der erste Gewerbetreibende gewesen, der elektromagnetische Maschinen in seinen Werkstätten benutzt hat; er wandte sie mit Erfolg bei der Bewegung und Lenkung von Apparaten zur Graduierung von Kreisen und Teilung von Maßstäben an.

Jedoch der wirklich für die verschiedensten Zwecke brauchbare Motor wurde erst an dem Tage entdeckt, wo Gramme die Dynamomaschine erfand. Dieser wunderbare

Umformer funktioniert ebenso als Motor wie als Generator; je nach Wunsch liefert er elektrische Energie unter Verbrauch mechanischer Arbeit oder verbraucht umgekehrt jene, indem er diese wieder abgibt. Im Jahre 1873 stellte H. Fontaine auf der Wiener Ausstellung eine Gruppe von zwei Grammeschen Maschinen auf, die durch einen Leitungskreis verbunden waren, und von denen die eine als Generator wirkte und den Strom erzeugte, der die andere in Drehung versetzte. Dieser Versuch enthielt im Keim die ganze überreiche Ernte, welche seitdem auf dem Felde der Elektrizität gewachsen ist.

Die Theorie der als Empfängerin dienenden Dynamomaschine ist der als Generator wirkenden vollkommen entsprechend. Wenn die Maschine läuft, so entsteht in dem rotierenden Anker eine elektromotorische Gegenkraft, deren Maß in Volt die Zahl ist, welche die durch den Durchgang von 1 Coulomb in der Empfangsmaschine entwickelte mechanische Energie in „Joule“ darstellt. Der Strom, welcher in dem Motor fließt, gehorcht natürlich auch dem Ohmschen Gesetz und ist daher gleich dem Quotienten aus dem Überschuß der äußeren vom Netz gelieferten Spannung über die elektromotorische Gegenkraft, dividiert durch den Ankerwiderstand.

Man findet übrigens leicht einen Ausdruck für die elektromotorische Gegenkraft als Funktion der Maschinenkonstanten; es läßt sich sehr einfach zeigen, daß derselbe genau der gleiche ist wie der, welcher die elektromotorische Kraft derselben, als Generator wirkenden, Maschine mit dem Induktionsfluß, der Zahl der Ankerwindungen und der Rotationsgeschwindigkeit verbindet.

Aus den Induktionsgesetzen folgt auch die Regel, nach welcher man die Rotationsrichtung des Motors bestimmen kann. Nach dem Lenzschen Gesetz muß die als Motor wirkende Maschine gerade in entgegengesetztem Sinne rotieren, als wie sie als Generator rotieren müßte, um den Strom zu

erzeugen, der sie durchfließt; dies gilt wohlverstanden unter der Bedingung, daß die Pole der Induktor- oder Feldmagnete nicht vertauscht sind.

Aus dieser Regel kann man leicht die Folgerungen für die verschiedenen möglichen Fälle ziehen. Bei den übrigens selten angewandten Maschinen mit besonderer Erregung und bei den Maschinen mit permanenten Magneten, die noch zuweilen für Anwendungen im Kleinen benutzt werden, ist die Rotation in beiden Richtungen möglich und hängt von der Richtung des Stromes ab.

Bei den Maschinen mit Hauptstromerregung und denen mit Nebenschlußerregung muß man, um die Rotationsrichtung umzukehren, auch die Stromrichtung umkehren, entweder im Anker allein oder in den Feldmagneten allein. Übrigens wird es immer vorzuziehen sein, sie im Anker umzukehren, teils um nicht den Magnetisierungsstromkreis zu unterbrechen, was bei den Serienmotoren eine gefährliche Operation ist, teils um die Öffnungsströme zu vermeiden, die im allgemeinen bei den Feldmagnetspulen viel stärker sind als beim Anker.

Im Grunde genommen können also die Gleichstromdynamos aller Typen als Motoren gebraucht werden und vorwärts oder rückwärts laufen; indessen darf man nicht glauben, daß es gleichgültig ist, welche Maschine man in einem gegebenen Falle benutzt. Je nach der Art der Erregung sind die Eigenschaften sehr verschieden.

Der Hauptstrommotor hat ein sehr großes Anzugsdrehmoment, welches proportional ist dem Induktionsfluß und der Stromintensität, und eine Geschwindigkeit, die umgekehrt proportional dem Widerstandsmoment wächst. Dieser Motor eignet sich also ausgezeichnet für intermittierenden Betrieb mit wechselnder Beanspruchung; er wird daher mit Vorteil für Straßenbahnen und für den Betrieb der verschiedenen Arbeitsmaschinen angewandt. Wo es jedoch darauf ankommt, bei variablem Widerstandsmoment konstante Geschwindigkeit beizubehalten wie bei den Transmissionen in

Werkstätten und Fabriken, darf er keinesfalls benutzt werden.

In diesem Fall wird man sich im Gegenteil an die Nebenschlußmotoren halten, die zwar ein weniger großes Drehmoment besitzen, deren Geschwindigkeit dafür aber mit der Belastung nur wenig variiert. Die Motoren mit gemischter Erregung oder Compoundmotoren, welche beide Arten der Erregung besitzen, nehmen an den Vorzügen beider Systeme teil und auch an ihren Nachteilen; sie werden immer dort nützliche Dienste leisten, wo es sich darum handelt, häufig wechselnde Beanspruchungen auszuhalten, und wo eine Änderung der Geschwindigkeit mit der Belastung innerhalb gewisser Grenzen ohne Belang ist.

Die Wartung und Inangsetzung der Gleichstrommotoren verlangt gewisse Vorsichtsmaßregeln. Solange der Motor in Ruhe ist, erzeugt er keine elektromotorische Gegenkraft; wenn man ihn nun ohne weiteres an das Netz anschließen wollte, so würde sein Anker, dessen Widerstand immer sehr gering ist, von einem gewaltigen Strom durchflossen werden, und nach dem Jouleschen Gesetz würde eine Wärmeentwicklung stattfinden, welche den ganzen Apparat schwer beschädigen könnte. Es ist daher unbedingt notwendig, einen hinreichend großen Widerstand mit dem Anker in Serie zu schalten, den man später verkleinern kann in dem Maße, wie mit der Geschwindigkeit die elektromotorische Gegenkraft wächst. Diese Anlaßwiderstände sind entweder Flüssigkeitswiderstände oder Metallwiderstände mit magnetischem Gebläse zur Beseitigung der Unterbrechungslichtbögen, die sich an den Kontakten bilden.

Dieselben Widerstände können auch zur Geschwindigkeitsregulierung benutzt werden, doch verbrauchen sie einen ziemlich großen Teil der Leistung. Daher zieht man es oft vor, entweder auf den Induktionsfluß zu wirken, z. B. durch Vergrößerung oder Verkleinerung des Interferrikums, oder aber den Motor durch Vermittlung verschiedener Transformations-

apparate mit dem Netz zu verbinden. Man kann aber auch den Anker mit mehreren Wicklungen versehen, deren Windungszahlen verschieden sind; so wird häufig bei elektrischen Automobilen vermittlels Akkumulatoren ein interessanter Motor angetrieben, der im Volksmunde den charakteristischen Namen „Motor 5 und 3 ist 8“ führt, weil er zwei Wicklungen, die die eine mit fünf, die andere mit drei Windungen besitzt; man stellt damit Geschwindigkeiten her, die im Verhältnis 2 : 3 : 5 : 8 stehen, indem man teils eine Wicklung allein, teils beide entweder hintereinander oder gegeneinander geschaltet, benutzt.

Will man schließlich den Motor wieder außer Tätigkeit setzen, so darf man auch wie beim Ingangsetzen nicht plötzlich verfahren. Würde man die Magneterregung unterbrechen, während im Anker noch Strom fließt, so würde der Motor durchgehen und außerdem der Strom eine gefahrdrohende Stärke erhalten; man muß deshalb stets dafür sorgen, daß zuerst der Strom im Anker geöffnet wird.

Wenn man so die Verbindung zwischen dem Anker und dem Netz trennt und die Bürsten durch einen Widerstand verbindet, so beginnt die Maschine als Generator zu wirken, und die lebendige Kraft der mit dem Motor verbundenen mechanischen Systeme setzt sich in elektrische Energie um. Daraus ergibt sich eine sehr kräftige, manchmal sogar etwas zu kräftige Bremswirkung, die jedoch sehr brauchbar ist, wenn es gilt, die bewegte Last an einem bestimmten Punkt anzuhalten. Diese Eigenschaft hat sehr interessante Anwendungen erfahren; sie wird z. B. benutzt, um die Turmgeschütze zu richten oder Motorwagen zu bremsen und ihre Geschwindigkeit auf abschüssiger Bahn zu verringern.

Vergleicht man unter Anwendung der oben gegebenen Regel den Rotationssinn einer als Motor wirkenden Maschine mit demjenigen, welchen dieselbe Maschine als Generator besitzt, so erkennt man leicht, daß man zum Zweck des Bremsens bei dem Hauptstrommotor die Verbindung der Feld-

magnete mit den Bürsten kreuzweiß vertauschen muß, sonst würde die Maschine nicht angehen. Im Fall des Nebenschlußmotors hat man nur dafür zu sorgen, daß der Erregungsstromkreis mit der Speiseleitung verbunden bleibt.

Die Gleichstrommotoren sind also einfache Apparate mit sehr übersichtlicher Theorie und leichter praktischer Handhabung. Jedoch teilen sie die Fehler der Gleichstromgeneratoren; ihre Kommutation ist oft mangelhaft und das Vorhandensein der Bürsten gibt Anlaß zu Beschädigungen und sonstigen Störungen. Die für Wechselstrom bestimmten Motoren zeigen diese Nachteile nicht, aber ihre Ausführung ist oft viel umständlicher, und das Studium derselben unvergleich viel heikler und schwieriger.

2. Die Synchronmotoren.

Die Mannigfaltigkeit der Kombinationen, deren die einfachen und mehrphasigen Wechselströme fähig sind, ist natürlich viel größer als bei dem Gleichstrom; zwei Faktoren allein, nämlich Spannung und Energieverbrauch, genügen hier nicht mehr, um den Strom vollständig zu bestimmen, und der Konstrukteur kann hier nach Belieben über mehrere Variable verfügen.

Es ist daher verständlich, daß von dem Augenblick an, wo man den Wechselstrom besser kennen lernte, und das ungerechte Vorurteil gegen ihn fallen ließ, die Vorschläge, welche das Problem seiner Benutzung zur Erzeugung mechanischer Arbeit lösen sollten, sich in rascher Folge häuften.

Gegenwärtig gibt es sehr zahlreiche und mannigfaltige Arten von Wechselstrommotoren, und um sich in dieser fast übergroßen Menge zurecht zu finden, ist es nötig, eine Einteilung vorzunehmen. Aber wie bei allen derartigen Unternehmungen, sind sich die Autoren nicht ganz einig über die beste Methode der Anordnung ihrer Reichtümer. Doch ist es rationell, die Einteilung auf diejenigen charakteristischen

Eigenschaften zu gründen, welche als die wichtigsten erscheinen müssen, und das sind zweifellos einerseits die Natur des Magnetfeldes dieser Motoren, andererseits der mehr oder minder hohe Grad der Freiheit, die sie hinsichtlich der Geschwindigkeit besitzen.

Von diesem letzteren Standpunkt aus, auf den wir uns zuerst stellen wollen, scheiden sich die Wechselstrommotoren in zwei große Gruppen: „Die Synchronmotoren und die Asynchronmotoren.“

Für die ersteren ist die Zahl der Umdrehungen, welche der bewegliche Teil des Motors in einer gegebenen Zeit machen kann, unbedingt und in unveränderlicher Form an die Frequenz des Wechselstromes gebunden, der sie speist. Ihre Geschwindigkeit ist z. B. ganz genau gleich der des Generators, welches auch die von ihnen verlangte Leistung sei, vorausgesetzt allerdings, daß diese Leistung unter einer gewissen Grenze bleibt, jenseits deren die Motoren überhaupt nicht mehr rotieren können; aus diesem Grunde nennt man sie Synchronmotoren, damit andeutend, daß sie dieselbe Zeit wie die Stromerzeugungsmaschine zur Vollendung einer vollen Umdrehung brauchen. Die letzteren haben dagegen eine variable Rotationsgeschwindigkeit, die folglich in keiner notwendigen Beziehung zu der Frequenz des gegebenen Stromes steht; man sagt daher, sie seien asynchron.

Schon seit langer Zeit hat man Synchronapparate für Wechselstrom benutzt, zwar nicht um große Leistungen zu übertragen, aber doch immerhin, um recht bemerkbare und sehr wertvolle Wirkungen zu erhalten. So oft man in einem Unterseekabel elektrische Stromstöße von bald positivem, bald negativem Vorzeichen erzeugte, und an einem passend gedämpften Spiegelgalvanometer oder später an dem sehr sinnreich von Lord Kelvin konstruierten Registrierinstrument, das den Namen Siphon-Rekorder führt, die ruckweisen

sehr deutlich der jeweiligen Richtung des Stromes entsprechenden Bewegungen beobachtete, hatte man tatsächlich die synchrone Übertragung einer kleinen Menge mechanischer Energie verwirklicht. In gleicher Weise findet man in einem anderen mit vollstem Recht berühmten Apparat ein sehr charakteristisches Modell von synchronem Geber und Empfänger; ich meine das Bell'sche Telephon, bei welchem der Synchronismus gerade die Bedingung für die treue Wiedergabe der Sprache ist. Die kleine Platte aus weichem Eisen, gegen die man spricht, und die Spule, welche das Ende des Magnetstabes hinter der Platte umgibt, bilden ein vollkommenes Generatorsystem, das von den Schallschwingungen in Bewegung gesetzt wird; jede Bewegung der Platte ändert, indem sie die Magnetisierung des Stabes ändert, auch den Induktionsfluß, der die Spule durchsetzt, und aus diesen Veränderungen ergeben sich Wechselströme in der letzteren. Diese Ströme erregen einen dem ersten gleichen Apparat, welcher als Empfänger dient; sie verändern die Magnetisierung des korrespondierenden Magnetstabes und erzeugen dadurch Bewegungen der Telephonplatte von gleicher Periode.

Jedoch erst 1883 zeigte J. Hopkinson durch Versuche an den damals vorhandenen Maschinen, die sich übrigens für diesen Zweck sehr wenig eigneten, nämlich den magneto-elektrischen Maschinen von Méritens, daß ein Wechselstrom-generator als Synchronmotor arbeiten kann.

Diese Fähigkeit ist leicht zu verstehen. Angenommen man schickt durch einen mit einer gewissen Geschwindigkeit rotierenden Wechselstromgenerator mit konstantem Feld, das etwa mittels Gleichstrom erregt wird, einen Wechselstrom, der in jedem Augenblick entgegengesetztes Vorzeichen hat wie der Strom, den dieser Generator selbst erzeugen würde, wenn er durch äußere Kräfte in Bewegung gesetzt wird und dieselbe Geschwindigkeit besitzt: es machen sich dann zwischen Anker und Induktormagneten elektromagnetische Kräfte geltend entgegengesetzt denen, die sich zeigen, wenn

die Maschine als Generator wirkt. Nun haben die letzteren nach dem Lenzschen Gesetz eine solche Richtung, daß sie sich der Bewegung widersetzen; die elektromagnetischen Kräfte in dem zum Empfänger gemachten Generator sind daher treibende Kräfte und können Widerstände überwinden, die an seiner Achse angreifen, mit anderen Worten: der Generator spielt jetzt die Rolle des Motors.

Wir haben jedoch vorausgesetzt, daß der Motor von vornherein auf eine der Stromfrequenz entsprechende Winkelgeschwindigkeit, die Synchrongeschwindigkeit, gebracht worden sei. Er kann demnach in keinem Fall, selbst nicht unbelastet, von selbst anlaufen; außerdem muß er in dem Augenblick an die Leitung angeschlossen werden, wo er in Phase ist mit dem speisenden Strom, anderenfalls würde er rasch zur Ruhe kommen, er würde, wie man sagt, außer Tritt fallen. Beachten wir endlich noch, daß die Induktormagnete besonders mit Hilfe eines Gleichstromes erregt werden müssen, und daß der Motor bei einer ganz kurzdauernden Überlastung, die eine gewisse Grenze übersteigt, außer Tritt fallen würde, und wir werden verstehen, daß eine solche Anordnung nur in sehr speziellen Fällen benutzt werden kann und daß ihre Anwendung auch dann noch große Vorsicht erfordert.

Eine vollständigere Untersuchung führt jedoch zur Erkenntnis einer sehr interessanten Eigenschaft dieser Motoren. Infolge ihrer Selbstinduktion erzeugen sie eine Phasenverschiebung des Stromes gegen die Spannung; man übersieht daher leicht, daß ein solcher Motor unter bestimmten Bedingungen von einem wattlosen Strom durchflossen werden kann, der gegen die Spannung zwischen seinen Klemmen um eine Viertelperiode vorauseilt. In diesem Fall wird er die Rolle eines Kondensators spielen, d. h. er erhöht den Leistungsfaktor eines Netzes, zu dem er im Nebenschluß liegt. Zur Erzielung dieses Resultates muß der Motor übererregt werden, d. h. sein Feld muß verstärkt werden gegenüber demjenigen, welches man für die Belastung des Motors eigentlich braucht.

Andererseits verlangt die Mehrzahl der gewöhnlich an die Verteilungsnetze angeschlossenen Empfangsapparate wattlose Ströme, die gegen die Spannung verzögert sind. Die Parallelschaltung eines Synchronmotors, der von einem vorauseilenden wattlosen Strom durchflossen wird, ermöglicht es also, den gemeinschaftlichen Polklemmen der Empfänger nur wattführende Ströme zuzuführen, die sich unter die beiden Arten von Empfängern als wattlose Ströme geeigneter Form verteilen. Auf diese Weise kann man eine bedeutende Ersparnis an den Leitungsdrähten erzielen, die dabei merklich kleinere Stromintensitäten führen, als sie ohne diesen Kunstgriff aushalten müßten.

In den meisten Energieverteilungsnetzen benutzt man nicht einfache Wechselströme sondern im allgemeinen mehrphasige, daher macht man auch von den eben besprochenen Motoren wenig Gebrauch, während man öfter mehrphasige Synchronmotoren anwendet.

Das Prinzip dieser Maschinen ist dasselbe wie bei den Einphasenmotoren. Der Anker ist gewissermaßen eine Vereinigung so vieler Anker, als Phasen vorhanden sind; der bewegliche Induktorkranz muß auch hier auf die geeignete Geschwindigkeit gebracht und zur Erregung von einem Gleichstrom durchflossen werden. Diese Motoren können ebenfalls außer Tritt geraten, wenn sie nicht gut in Phase sind, oder wenn die Belastung zu groß wird, und dies an sich schon störende Außertrittfallen würde außerdem noch, wenn man sich nicht in acht nimmt, im Anker eine Erhöhung der Stromintensität erzeugen, infolge deren der Motor verbrennen könnte.

Die Mehrphasenmotoren sind jedoch stabiler als die einphasigen; das Drehmoment, welches sie erzeugen, nimmt eher einen merklich konstanten Wert an, und man kann, um sie in Gang zu setzen, dank den Eigenschaften der Mehrphasenströme leicht einen mehr oder minder unvollständigen Hilfsmotor anbringen, der von einem auf dem Induktor selbst

befestigten sekundären Kreis gebildet werden kann. Endlich können sie bei gleicher Leistung sehr viel leichter gebaut werden. Das sind alles besondere Vorzüge, die sie für Transmissionsanlagen in Werkstätten brauchbar machen.

3. Die Asynchronmotoren.

Gäbe es nur Synchronmotoren, so würden Wechselströme in den am häufigsten anzutreffenden Fällen, wo man variable Geschwindigkeit verlangt, nicht oder wenigstens nicht unmittelbar zur Übertragung mechanischer Energie benutzt werden. Wie gesagt, hat man jedoch asynchrone Motoren konstruiert, bei denen die Geschwindigkeit des rotierenden Teiles nicht notwendig an die Periode des Netzstromes gebunden ist.

Bei diesen Motoren heißt der feststehende Teil, der in den allermeisten Fällen mit dem Netz verbunden wird, Stator, während der Teil, welcher infolge der Wechselwirkung des Feldes und der Ströme rotiert, häufig als Rotor bezeichnet wird.*)

Der Stator kann die Rolle des Induktors oder des Ankers spielen; bei den Motoren dient er meist als Induktor, der das Feld erzeugt; dieses Feld kann je nach der Wicklung des Induktors ein Drehfeld oder statt dessen ein Wechselfeld sein, das periodisch seine Stärke ändert, aber stets dieselbe Richtung behält. Zur Erzeugung eines Drehfeldes benutzt man natürlich Mehrphasenströme. Die Theorie dieser Motoren ist im ganzen genommen ziemlich einfach; eine sehr vollständige Darstellung derselben hat Potier gegeben.

Der Stator ist ein Hohlzylinder aus unterteiltem Weich-

*) Manche Autoren bezeichnen als Stator den Induktor und als Rotor den Anker eines Asynchronmotors. Aus dieser Definition folgt, daß bei den Maschinen mit beweglichem Induktor der feststehende Teil nichtsdestoweniger Rotor und der bewegte Stator genannt wird; diese Bezeichnungen, die alsdann etwas seltsam erscheinen, rufen gelegentlich Verwirrung hervor.

eisen; er trägt, wenn man z. B. über Dreiphasenstrom verfügt, eine Anzahl von Nuten gleich einem Vielfachen von drei, in welche entweder in Stern- oder in Dreieckschaltung die drei Wicklungen verlegt sind, welche den drei Phasen entsprechen. Von dem Dreiphasenstrom erregt, erzeugt dieser Stator daher einen rotierenden Induktionsfluß, der in jeder Periode eine Umdrehung macht.

In dieses Feld wird der Rotor gebracht, der im allgemeinen ebenfalls ein Zylinder aus unterteiltem Weicheisen ist, dieselbe Achse hat wie der Stator und dessen äußerer Durchmesser einige Millimeter kleiner ist als derjenige des Stators. Der Rotor trägt gleichfalls Nuten parallel den Erzeugenden des Zylinders, in welche Barren aus gut leitendem Metall eingelassen sind. Wenn diese Barren an ihren Enden durch Ringe verbunden sind, so hat man das, was man wegen des Aussehens, das der Anker dabei besitzt, einen „Rotor in Käfigform“ nennt; in anderen Fällen bilden die Leiterstäbe eine gewisse Anzahl getrennter Stromkreise, die regelmäßig über das Eisengerüst verteilt sind.

Das Drehfeld des Stators erzeugt im Rotor induzierte Ströme, die nach dem Lenzschen Gesetz so gerichtet sind, daß sie sich der Bewegung des Feldes widersetzen; die elektromagnetischen Kräfte, welche auf diese Ströme ausgeübt werden, sind infolgedessen derart, daß das Feld den Anker in seine Rotation hineinzuziehen sucht. Es ist ganz so, als wenn eine Art Reibung zwischen Feld und Anker vorhanden wäre, und das System läßt sich mit einer Friktionskupplung vergleichen, bei welcher der auf der Motorachse festgekeilte Teil den auf der Arbeitswelle befestigten Teil mitnimmt. Bei einer derartigen Kupplung findet je nach dem mehr oder minder großen Haftvermögen der reibenden Substanzen eine Gleitung oder Schlüpfung des einen Teiles gegen den anderen statt. Ebenso bei dem Asynchronmotor; der Rotor rotiert langsamer als das Feld, und die Differenz der beiden Winkelgeschwindigkeiten heißt auch hier Schlüpfung

Man kann ohne Schwierigkeit das auf den Rotor wirkende Drehmoment berechnen; natürlich muß man berücksichtigen, daß das Feld, welches auf jede der Windungen wirkt, nicht allein das Statorfeld ist, sondern die Resultante aus diesem und dem von dem Rotor selbst erzeugten Feld. Der mathematische Ausdruck für dieses Drehmoment kann ziemlich kompliziert sein, aber der Gang der Erscheinung gleicht im allgemeinen immer dem des einfachen Falles, wo der resultierende Induktionsfluß ohne Änderung der Form und Stärke rotiert und der Rotor aus rechteckigen Rahmen besteht, von deren vier Seiten zwei parallel den Zylindererzeugenden liegen. In diesem Fall wird das Drehmoment, wenn man den Motor mit konstanter Spannung speist, proportional der Schlüpfung und umgekehrt proportional dem Widerstand der Rotorstromkreise; bei gleicher Schlüpfung und gleichem Widerstand ist das Moment proportional dem Quadrat der effektiven Spannung.

Es läßt sich voraussehen, daß das Drehmoment zur gleichen Zeit wie die Schlüpfung verschwinden muß, denn der Rotor, welcher dann mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Feld rotiert, hat dabei im Verhältnis zu diesem Feld die Geschwindigkeit Null, und es kann unter diesen Umständen kein Induktionsstrom mehr entstehen.

Damit tritt der große Unterschied zwischen Synchronmotoren und Asynchronmotoren klar zutage; bei den ersteren folgen das Induktorfeld und das induzierte Ankerfeld einander vollkommen, die Geschwindigkeiten beider müssen genau dieselben sein; bei den letzteren ist im Gegenteil die Schlüpfung notwendiges Erfordernis: ohne Schlüpfung liefert der Motor keine Leistung.

Vollkommener Synchronismus würde sich nur dann erreichen lassen, wenn der Motor vollständig leer lief und wenn man jegliche Reibung im Innern unterdrücken könnte; sowie die Belastung dazu kommt, wächst die Schlüpfung wie im Falle einer zu losen Kuppelung. Der Motor arbeitet also

stabil, da das Drehmoment mit der Schlüpfung wächst, wenn die Belastung plötzlich größer wird; jedoch könnte der Strom im Rotor dabei hohe Werte annehmen, die einer gefährlichen Wärmeentwicklung entsprechen.

In der Tat übersteigt die Schlüpfung meist nicht 3—4 Prozent der Winkelgeschwindigkeit, und die Asynchronmotoren bleiben praktisch sehr nahe am Synchronismus und rotieren normalerweise mit merklich konstanter Geschwindigkeit. Man kann jedoch verschiedene Kunstgriffe anwenden, um diese Geschwindigkeit zu variieren: Einschaltung von nichtinduktiven Widerständen in den Kreis eines Mehrphasenankers, wie Leblanc angegeben hat, Änderung der Polzahl des Induktors durch veränderte Schaltung der Wicklungen, Speisung mit Strömen verschiedener Frequenz sind Mittel, die je nach dem vorliegenden Fall mit Erfolg benutzt werden.

Soll der Motor belastet anlaufen, so würde er bei unveränderlichem Rotorwiderstand den sehr starken Strom, welcher ihn durchfließen würde, nicht aushalten können, ohne zu verbrennen. Im Jahre 1890 hat deshalb Leblanc ein heute fast allgemein angewandtes Verfahren angegeben, welches diesen Übelstand beseitigt; die Ankerwicklungen werden dabei mit isoliert auf der Maschinenachse sitzenden Schleifringen verbunden, und man kann auf diese Weise bequem Anlaufwiderstände einschalten. Wenn man jedoch den Vorteil nicht verlieren will, welchen die Maschinen mit Käfigrotor bieten, nämlich ohne jeden äußeren Kontakt rotieren zu können, so wählt man andere Anordnungen, z. B. die hervorragend sinnreichen Lösungen, welche Boucherot vorgeschlagen hat.

Läßt man bei einer Maschine wie der soeben beschriebenen, den Rotor mit Hilfe einer äußeren, z. B. von einer Dampfmaschine gelieferten Kraft so rotieren, daß er schneller läuft als das Statorfeld, so hat man ein System, dessen Theorie der des Motors vollkommen parallel läuft;

man erhält dieselben Formeln, aber die Schlüpfung ist jetzt negativ; das Drehmoment wirkt statt antreibend jetzt rücktreibend. Die Maschine arbeitet als Generator; an den Statorklemmen tritt eine Spannung auf, die sich über die Netzspannung überlagert, und dem Netz wird eine neue Energiemenge zugeführt.

Entdeckt hat Maurice Leblanc das Prinzip dieser Maschinen, die man asynchrone Generatoren nennt, weil sie einem Stromkreis Wechselströme von wohlbestimmter Frequenz liefern, obwohl sie mit einer über den Synchronismus hinausgehenden Geschwindigkeit rotieren. Natürlich muß in dem Kreise bereits ein regulärer Strom fließen, der von synchronen Generatoren geliefert wird, welche, wie Leblanc sich sehr malerisch ausdrückt, den Takt schlagen; diese Generatoren spielen gegenüber den Asynchrongeneratoren gewissermaßen die Rolle der Erregungsmaschinen; sie liefern die wattlosen Ströme, welche zur Unterhaltung des Drehfeldes nötig sind, während die Asynchrongeneratoren dem Netz Wattströme zuführen, welche die Energie desselben vergrößern.

Diese merkwürdigen, interessanten Maschinen besitzen auch noch andere wertvolle Eigenschaften, auf die Leblanc und Boucherot hingewiesen haben; sie ermöglichen eine sehr einfache Compoundierung, die für alle Belastungen bestehen bleibt, und wirken im Bahnbetrieb bei zu steilem Gefälle als Bremsmotoren. Es genügt bei der Abwärtsfahrt, die Geschwindigkeit über die normale Geschwindigkeit der Linie wachsen zu lassen, damit der zum Generator gewordene Motor einen Teil der von der Schwere geleisteten Arbeit aufnimmt und in Form elektrischer Energie an das Netz zurückliefert.

Statt eines Drehfeldes kann man ein einfaches feststehendes Wechselfeld als Induktorfeld nehmen, in welchem sich ein dem vorher beschriebenen analoger Rotor befindet,

der aus einem in sich kurz geschlossenen Ankersystem besteht; auf diese Weise erhält man asynchrone Motoren für einfachen Wechselstrom. Wieder war es Leblanc, der zeigte, daß man derartige Motoren herstellen kann. Potier, Blondel, Ricardo Arno haben die Theorie derselben gegeben, die im Grunde genommen ein besonderer Fall der allgemeinen Theorie der Drehfeldmotoren ist; der Anker wird von der Rotation des Induktionsflusses mitgenommen, der aus der Zusammenwirkung des alternierenden Induktionsflusses des Induktors und des von dem Anker selbst erzeugten Flusses resultiert. Brown und nach ihm mehrere andere Elektriker haben derartige Maschinen konstruiert, die in den Anlagen mit gewöhnlichem Wechselstrom benutzt werden, wie sie in Paris für die Bezirke der Champs-Élysées und der Rive Gauche vorhanden sind.

Jedoch besitzen diese Motoren gewisse Nachteile; das Material wird bei ihnen schlecht ausgenutzt, daher sind sie ziemlich schwer. Andererseits können sie nicht von selbst anlaufen, und man muß, um sie in Gang zu bringen, mehr oder minder umständliche Verfahren anwenden, z. B. auf dem Induktor Hilfswicklungen im Nebenschluß anbringen.

4. Die Serienmotoren und Repulsionsmotoren.

Trotz dieser übrigens recht umständlichen Kunstgriffe erfolgt das Anlaufen immer nur schwer und zuweilen unsicher; der wirklich leistungsfähige und praktische Wechselstrommotor mußte erst noch erfunden werden, und dieses Problem war hochwichtig; insbesondere würde es ja sehr vorteilhaft sein, den einphasigen Wechselstrom zum Bahnbetrieb zu benutzen, da er nur einen einzigen durch die Luft geführten Draht erfordert, wenn man die Schienen als Rückleitung verwendet.

In den allerletzten Jahren haben sich verschiedene Ingenieure nicht ohne Erfolg dieser interessanten Frage zuge-

wandt, und man ist heute im Besitz von Maschinen, die befriedigend funktionieren.

Seit langem schon hat man bemerkt, daß ein Hauptstrom- oder Serienmotor für Gleichstrom im Prinzip auch durch gewöhnlichen Wechselstrom gespeist werden kann. Wir haben ja gesehen, daß dieser Motor in demselben Sinne weiter rotiert, wenn man gleichzeitig im Feldmagneten und im Anker den Strom umkehrt; der bewegliche Teil ist dann dauernd einem pulsierenden Drehmoment unterworfen, welches von dem Quadrat der Stromintensität abhängt und dessen Vorzeichen bei Stromumkehr ungeändert bleibt.

In Wirklichkeit aber würden Hysteresis, Foucaultströme und Selbstinduktion das Funktionieren der Maschine verhindern, wenn sie nicht besonders konstruiert wäre. Dazu ist es erstens nötig, den Induktor oder Feldmagneten wie den Anker aus Blechen aufzubauen; wenn man aber auf diese Weise auch die Foucaultströme genügend verringert, so verbessert man keineswegs die Kommutation, die außerordentlich schlecht wird, sowie sich die Leistung nur etwas erhöht. Daher fanden Motoren dieser Art lange Zeit nur bescheidene Anwendung. Sie dienten z. B. zum Betrieb von Fahrstühlen; die Leichtigkeit, mit der sie anlaufen, macht sie für diesen Zweck sehr geeignet.

Wenn man aber einen nur einigermaßen hohen Leistungsfaktor haben will, so muß man den Raum des Interferrikums sehr verkleinern, und die Rückwirkung des Ankers wird dann ziemlich groß. Außerdem entstehen in den Ankerspulen, welche durch die Bürsten kurz geschlossen werden, alternierende elektromotorische Kräfte infolge der Schwankung des vom Feldmagneten herrührenden Induktionsflusses, und diese vermehren noch die Schwierigkeit der Kommutation. Um diesen ernsten Übelständen zu begegnen, kann man an verschiedene Mittel denken. Man kann z. B. den Feldmagneten mit einer transversalen Kompensationswicklung versehen, die einen dem Induktionsfluß des Ankers entgegengerichteten Fluß

erzeugt, und kann außerdem zwischen Kollektor und Anker Widerstände einschalten, um die Intensitätsschwankungen des Stromes bei Kurzschluß zu verringern.

Im Jahre 1901 gab Marius Latour ein anderes elegantes und sinnreiches Verfahren an zur Beseitigung der schädlichen elektromotorischen Kräfte; dieses Verfahren besteht in der Anwendung einer Hilfswicklung, welche ein in der Phase um einen rechten Winkel gegen das Hauptfeld verschobenes Magnetfeld erzeugt.

Eine sehr wertvolle Eigenschaft der Serienmotoren ist ihre Fähigkeit, mit ziemlicher Leichtigkeit ebensogut bei Gleichstrom wie bei Wechselstrom zu funktionieren; bei manchen Straßenbahnen wird dies ausgenutzt, indem man mit ihnen ohne Umstände von einer billiger arbeitenden Wechselstromleitung außerhalb der Stadt auf die ungefährlichere Gleichstromanlage innerhalb der Stadt übergeht.

Noch eine andere Art von Einphasenmotoren gibt es, die auf einem ganz abweichenden Prinzip beruhen und Repulsionsmotoren genannt werden.

Zwischen die Pole eines von Wechselstrom erregten Induktormagneten bringt man einen Anker gleich dem einer gewöhnlichen Gleichstromdynamomaschine, dessen Bürsten kurz geschlossen werden. Werden die Bürsten auf die neutrale Linie, d. h. die Verbindungslinie der Pole gestellt, so bleibt, wie man leicht übersieht, der Anker in Ruhe; wird ihre Achse jedoch um etwa 30 Grad gegen die Achse der Induktorkwicklung gedreht, so entsteht ein Drehmoment infolge der elektromagnetischen Kräfte, welche das Feld auf die in dem Ringe induzierten Ströme ausübt. Im Falle des Synchronismus besitzt dieser Repulsionsmotor eine ganz vorzügliche Kommutation, weil der Induktionsfluß mit derselben Geschwindigkeit rotiert wie der Anker. Bereits auf der Ausstellung von 1889 hatte Elihu Thomson eine derartige Maschine vor-

geführt, die aber wegen ihres recht mäßigen Wirkungsgrades keinen Anklang fand; seitdem ist dies System jedoch weiter entwickelt worden und in Aufnahme gekommen, und der Atkinsonsche Repulsionsmotor wird sehr viel benutzt.

Ganz neuerdings sind Marius Latour und nach ihm Winter und Eichberg auf den glücklichen Einfall gekommen, die Vorzüge des Serien- und des Repulsionsmotors gewissermaßen zu vereinigen, und haben auf diese Weise sogenannte kompensierte Repulsionsmotoren konstruiert, welche großes Anzugsdrehmoment und bei Synchrongeschwindigkeit ausgezeichnete Kommutation besitzen; bei dieser Geschwindigkeit ist im übrigen der Leistungsfaktor gleich Eins. Diese Maschinen tragen zwei Paar, oder allgemeiner zweimal soviel Bürstenreihen, wie der entsprechende Serienmotor. Die Bürsten des einen Paares sind mit dem Induktor und der Außenleitung hintereinandergeschaltet wie bei einem Serienmotor; die beiden anderen werden wie bei dem Repulsionsmotor kurz geschlossen.

Man hat für diese Motoren noch keine so vollendete Theorie, wie sie Potier für die Asynchronmotoren gegeben hat, aber trotzdem werden sie mit vollem Recht als die besten Motoren für einfachen Wechselstrom angesehen, und ihre Anwendung breitet sich mit jedem Tage weiter aus.

Die hier gegebene, den Umständen nach sehr gedrängte Darstellung genügt immerhin, um zu zeigen, daß die Technik gegenwärtig zahlreiche geeignete Mittel zur Umformung elektrischer Energie in mechanische besitzt, und daß die Elektrizität, dank ihrer außerordentlichen Schmiegsamkeit, sich sozusagen den verschiedensten Bedürfnissen des Menschen anpaßt.

Die Elektromotoren besitzen die wertvollsten Eigenschaften; wir sahen, wie man bei ihnen In- und Außergangsetzung sowie Geschwindigkeitsänderungen während des Laufes heute

in einfacher Weise bewirkt. Sie haben im Verhältnis zur Leistung geringes Gewicht und sind infolgedessen ziemlich billig; ein Motor von 100 Kilowatt wiegt z. B. nur 3000 bis 4000 Kilogramm. Ihr Wirkungsgrad ist ausgezeichnet, so daß sie von der empfangenen Energie leicht 92 Prozent wieder abgeben. Sie beanspruchen wenig Raum und sind gefahrlos zu bedienen. Ihre Konstruktion läßt sich vollkommen den verschiedenen Zwecken anpassen, welchen sie dienen sollen, und man kann bei ihnen leicht Vorausberechnungen anstellen, bei denen man keinen Fehlschlag zu fürchten braucht. Einmal installiert, lassen sie leicht Änderungen zu, welche durch etwaige Umgestaltungen des Betriebes nötig werden. Ihre Arbeitsweise ist immer mit Leichtigkeit zu kontrollieren. Sie gestatten genaue Messungen mit sehr einfachen Instrumenten und ermöglichen es, daß man mit vollendeter Sicherheit jedem Fabrikbetrieb folgen und ihn regeln kann. Alle diese Vorzüge haben bereits heute die Zahl ihrer Anwendungen ins Unermeßliche gesteigert.

Dank den Arbeiten verschiedener Techniker sind Maschinentypen entstanden, die sich ausgezeichnet für Transmissionsanlagen in Fabriken eignen; man findet heute viele große Betriebe, besonders Spinnereien und Webereien, in denen nicht mehr die bekannten schwerfälligen Transmissionswellen, gefahrbringenden Riemenscheiben und störenden Treibriemen vorhanden sind, die ehemals mit vielem Lärm den Arbeitsmaschinen Leben und Bewegung brachten.

Auf den Schiffen treiben Elektromotoren die Ankerwinden und bewegen die Panzertürme. Auf den Werften setzen sie die Krahe und Hebezeuge in Tätigkeit. In den Bergwerken verbreitet sich ihre Anwendung ebenfalls täglich mehr; seit geraumer Zeit schon dienen sie zum Betrieb der Pumpen, Ventilatoren und Förderwagen; seit kurzem benutzt man sie auch zur Betätigung der Fördermaschine selbst.

Auf der Lütticher Ausstellung¹¹⁾ konnte man in dieser Richtung jüngst eine Reihe sehr lehrreicher Zeichnungen

nebst Erläuterungen zu sehen bekommen. In Belgien und Deutschland ist der Fortschritt außerordentlich schnell erfolgt, in Frankreich dagegen bleibt noch viel zu tun, bis man sich die Vorteile der größeren Sicherheit, welche die Elektrotechnik für den Bergwerksbetrieb bietet, zunutze macht.

Schließlich müssen wir auch noch der staunenerregenden Entwicklung der Straßenbahnnetze und der Anwendungen der Elektrizität zum Bahnbetrieb gedenken, auf die wir später etwas genauer eingehen werden.

Gewährt aber die Gegenwart schon große Befriedigung, so scheint die Zukunft noch Glänzenderes zu versprechen. Wie ein hervorragender Elektriker, Hillairet, der durch seine eignen Arbeiten diese Zukunft wesentlich mit vorbereiten half, in einer beachtenswerten wissenschaftlichen Abhandlung über die Motoren gesagt hat: „Es wird vielleicht schon in naher Zukunft eine Zeit kommen, wo die Oberfläche von ganz Europa und vielen anderen Gegenden der Erde mit Energieverteilungsnetzen bedeckt sein wird, die dichter und engmaschiger sein werden als die Telegraphen- und Telephonnetze. Nach und nach werden die großen wie die kleinsten industriellen Betriebe den Vorteil erkennen, den der Anschluß an diese Verteilungsanlagen gewährt, welche dank ihrer Größe elektrische Energie billig abgeben können.“

So werden die Elektromotoren, nachdem sie zu leicht zu handhabenden und wohlfeilen Apparaten geworden sind, zweifellos Schritt für Schritt die anderen ungefügen und schwer zu bedienenden Motoren von ihrem Platze verdrängen.

Kapitel VI.

Die Übertragung der elektrischen Energie.

1. Die wirtschaftlichen Bedingungen der Übertragung.

Seit langer Zeit schon hat man bemerkt, daß die Energie sich in elektrischer Form ganz besonders leicht übertragen läßt; ein einfacher, auf isolierenden Trägern ausgespannter Leitungsdraht kann die von einem Generator gelieferte Energie, welche derselbe an einem Ort erzeugt, wo man über eine billige Betriebskraft verfügt, in weite Ferne leiten. Am anderen Endpunkt braucht man nur einen Empfänger aufzustellen, der die so zugeführte elektrische Energie aufnimmt und sie je nach Bedarf in thermische oder chemische Energie oder — und das ist der Fall, den wir hier näher ins Auge fassen wollen — in mechanische Arbeit umwandelt und abgibt.

In dem gleichen Augenblick, wo der elektrische Strom entdeckt wurde, erkannte man auch, daß die Elektrizität die Rolle eines Energieträgers spielen könne; aber erst in den letzten 25 Jahren erhielt dieselbe auf dem Schauplatz der Technik ihre wahrhaft große Bedeutung. Marcel Desprez gebührt das Verdienst, durch zahlreiche Veröffentlichungen zuerst die Aufmerksamkeit der Allgemeinheit auf

diese brennende Frage gelenkt zu haben, welche er „Kraftübertragung mittels Elektrizität“ nannte. Überdies führte er im Jahre 1882 einige schlagende Versuche aus, welche durch ihren unbestreitbaren Erfolg die Möglichkeit des Energietransportes auf große Entfernung mit ökonomisch brauchbarem Nutzeffekt bewiesen. Es ist hier nicht möglich, die Namen der vielen Elektriker aufzuzählen, die sich seit jener Zeit erfolgreich um die Lösung der zahlreichen Probleme bemüht haben, welche auftauchten, sobald die Elektrizität aller Orten immer mehr Anwendung fand; vielleicht ist es aber doch angebracht, an den deutschen Forscher Fröhlich zu erinnern, der mit bemerkenswerter Sicherheit die festen Grundlagen geschaffen hat, auf denen die Theorie der elektrischen Energieübertragung ruht.

Die Bequemlichkeit, welche die Elektrizität für diesen Zweck bietet, ist zu offensichtlich, als daß man noch besonders darauf einzugehen brauchte; aber in der Technik genügt es nicht, daß die Lösung eines Problems bequem ist, um sie annehmbar zu machen, sie muß auch vom ökonomischen Standpunkt aus gut sein. Und mag es sich nun um einen Großindustriellen oder einen bescheidenen Handwerker handeln, er muß immer prüfen, ob es in einem gegebenen Falle für ihn vorteilhaft ist, sich der auf elektrischem Wege der Fabrik oder Werkstatt zugeführten Energie zu bedienen, oder ob er sich besser an irgend eine andere Quelle hält, z. B. Dampfmaschinen oder Gasmotoren oder Wassermotoren, die an eine Wasserleitung angeschlossen werden.

Diese Prüfung ist in der Tat oft sehr heikel und man kann in der Praxis die zahlreichen und verwickelten dahin gehörigen Fragen unter sehr verschiedenen Gesichtspunkten betrachten. Selbstverständlich muß man, um die günstigsten Bedingungen ausfindig zu machen, zuerst nach dem industriellen Wirkungsgrad einer solchen Übertragung fragen, worunter man das Verhältnis der am Verbrauchsort wieder-

gewonnenen Leistung zu der am Erzeugungsort verfügbaren mechanischen Leistung versteht.

Wie sich leicht zeigen läßt, ist der gesuchte Wirkungsgrad das Produkt aus dem Wirkungsgrad des Generators und dem des Empfängers, multipliziert mit dem Verhältnis der an den Motorklemmen verfügbaren Leistung zu der an den Generatorklemmen vorhandenen.

Mit anderen Worten, man muß zur Beurteilung einer Energieübertragung drei Faktoren kennen, und jedem von ihnen den größtmöglichen Wert geben, wenn man gute Resultate erzielen will. Die Maschinen in ihrer Wirkung als Energieerzeuger und Empfänger haben wir schon betrachtet und wissen, daß ihr Wirkungsgrad leicht über 90 Prozent hinausgeht. Der Energieverlust in denselben ist also nicht groß; es sind treue Diener, die sparsam zu arbeiten verstehen. Der dritte Faktor jedoch, den man als Wirkungsgrad der Leitung bezeichnet, stellt sich oft weniger günstig; die Energie zerstreut sich unterwegs, und man muß suchen, diese schädliche Streuung möglichst zu verringern.

Die erste Vorsichtsmaßregel, deren Nutzen ganz augenscheinlich ist, besteht in einer möglichst sorgfältigen Isolierung der Leitung. Man könnte zunächst glauben, daß diese Aufgabe ganz allein dem Konstruktionsingenieur obliege, und daß die reine Wissenschaft an einer anscheinend so einfachen Frage kein Interesse habe. Die Bestimmung der besten Form für die Isolatoren, die Aufstellung geeigneter Tragepfosten bei den Luftlinien und die Verlegung gut isolierter Kabel bei unterirdischen Leitungen bilden auch wirklich den Gegenstand sehr interessanter Untersuchungen aus dem Gebiet der Technologie. Seitdem man aber zur Benutzung sehr hoher Spannungen übergegangen ist, haben gewisse bis dahin zu vernachlässigende Erscheinungen eine erhöhte Wichtigkeit erlangt, und zu deren Studium und zur Beseitigung ihres störenden Einflusses muß man genau die gleichen Methoden anwenden, mit denen der Physiker in seinem Laboratorium arbeitet.

Von einem durch die Luft geführten, auf hohes Potential gebrachten Leiter gehen heftige Büschelentladungen aus, und der Leiter verliert so durch Ausströmung einen Teil seiner elektrischen Energie. Nach den jetzt geltenden Vorstellungen nimmt man an, daß der Körper Elektronen aussendet, die sich durch den Raum verbreiten. Auch disruptive Funkenentladungen können zwischen den Leitungen einerseits und den Trägern der Isolatoren oder anderen Körpern der Umgebung andererseits auftreten, wenn der Abstand der Leiter kleiner ist als die Schlagweite. Ist der Draht von einem festen Isolator umgeben, so wird dieses Dielektrikum durchbohrt, wenn es keine genügende elektrische Durchschlagsfestigkeit besitzt, d. h. wenn der — für eine gegebene Substanz merklich konstante — Quotient der Entladungsspannung des Funkens zur durchschlagenen Schichtdicke für den gewählten Isolator nicht hoch genug ist. Alle diese Bedingungen sind oft schwer einzuhalten; um sie jedoch berücksichtigen zu können, ist es gut, wenn man die Arbeiten über die Elektronen kennt und ebenso auch die Abhandlungen, welche verschiedene Physiker, z. B. Bichat und Swyngedauw, über die Funkenschlagweite veröffentlicht haben, oder auch die schönen Versuche von Bouty über die elektrische Festigkeit der Gase.

Auf einen Punkt sei hier noch hingewiesen, daß nämlich eine sehr einfache Rechnung schon zu einer beträchtlichen Ersparnis führt. Bei einem Kabel unterliegt nicht die ganze Masse der isolierenden Hülle der gleichen Potentialdifferenz pro Zentimeter Schichtdicke; das Gefälle ist dicht am Leiter größer als am Außenrand des Isolators. Daher braucht man nur für die mittleren Partien kostspieliges Isoliermaterial mit großer elektrischer Festigkeit zu benutzen.

Aber trotz aller Vorsichtsmaßregeln der modernen, in dieser Weise von der Theorie beratenen Elektrotechnik wird der Wirkungsgrad der Leitung durch die Isolationsfehler immer etwas verkleinert werden; doch ist der aus dieser

Ursache stammende Energieverlust gering im Verhältnis zu der großen Energiezerstreuung, welche in Form von Wärme stattfindet.

Nichts vermag diese Entwertung der elektrischen Energie zu verhindern, das Joulesche Gesetz ist nicht zu beugen. Ein stromdurchflossener Leiter verliert während einer Sekunde in Form von Wärme eine Energiemenge gleich dem Produkt aus seinem Widerstand und dem Quadrat der Stromintensität. Soll also der Wirkungsgrad der Übertragung nicht gar zu schlecht werden, so ist es unbedingt nötig, den Wert dieses Produktes so weit wie möglich herabzudrücken, d. h. einen oder den anderen Faktor oder auch alle beide möglichst klein zu machen.

Um den Widerstand zu verringern, muß man für die Linie Leiter von kleinem spezifischen Widerstand wählen und ihnen einen sehr beträchtlichen Querschnitt geben; der Preis von so hergestellten Kabeln erreicht aber bald eine unerschwingliche Höhe. Nichts ist ferner einfacher als eine Erniedrigung der Stromintensität; wenn aber die Spannung dabei konstant bliebe, so würde man gleichzeitig die übertragene Leistung erniedrigen. Glücklicherweise hängt die elektrische Energie von zwei Faktoren ab, und wenn man die Spannung erhöht, während man gleichzeitig die Stromstärke verringert, so bleibt die übertragene Leistung konstant.

Der wirtschaftliche Vorteil, den man aus der Anwendung hoher Spannungen zieht, ist leicht zu berechnen. Nehmen wir ein Beispiel. Denken wir uns, wir wollten eine Leistung von 5000 Kilowatt auf 100 Kilometer übertragen, wobei ein Verlust von einem Fünftel zugelassen wird, und nehmen wir an, wir verfügten nur über eine Dynamomaschine, die 100 Volt liefert. Wir würden eine große Stromintensität und infolgedessen ein Kupferkabel von solchem Querschnitt brauchen, daß kein Pfosten es mehr tragen könnte; der Preis dieses Kabels würde mindestens zwei Millionen betragen.

Wenn wir dagegen die Übertragung mit hoher Spannung ausführen, etwa mit 50000 Volt, wie bei den Anlagen der Missouri-Kompagnie, so kann die Leitung aus einem Draht von 20 Quadratmillimeter Querschnitt bestehen, der nicht mehr als einige 40000 Francs kostet.

Jedoch die Fragen ökonomischer Natur, die der Ingenieur zu lösen hat, wenn es gilt, eine Anlage zur Energieübertragung einzurichten, beschränken sich nicht auf so einfache Betrachtungen; er muß vielmehr sorgfältig alle Faktoren dieses recht verwickelten Problems berücksichtigen. Zuerst muß er sich die Frage vorlegen, ob es wohl zweckmäßig ist, die Elektrizität zu benutzen, und um hierauf die Antwort zu finden, muß er die jährlichen Kosten der verschiedenen möglichen Systeme vergleichen. Ist dieser erste Punkt geklärt, so muß er die Typen und die Leistung der Generatormaschinen auswählen und die verschiedenen Bedingungen der Ausführung näher bestimmen, vor allem entscheiden, welcher Wirkungsgrad gewählt werden soll und welchen Querschnitt demgemäß der Leitungsdraht erhalten muß.

Verlangt man einen hohen Wirkungsgrad, so muß man dementsprechend ein größeres Kapital anlegen, da die Leitung für eine gegebene Spannung mehr Kupfer erfordert. Wünscht man dagegen für die Leitung nicht zu viel auszugeben, so muß man dafür ein anderes Opfer bringen und erhält eine geringere Nutzleistung am Verbrauchsort.

Lord Kelvin hat als erster zur Bestimmung der günstigsten Lösung eine sehr bemerkenswerte Regel aufgestellt, zu welcher er durch Rechnung gekommen ist. Gewiß ist nichts besser geeignet, den wissenschaftlichen Charakter der Entwicklung der zeitgenössischen Technik sozusagen handgreiflich zu machen, als ein solches Beispiel dafür, wie man Resultate, die vom ökonomischen Standpunkt aus hochwichtig sind, auf mathematischem Wege erhält! Die Regel, zu welcher der berühmte Physiker gelangt, lautet folgendermaßen: „Der Preis, welchen die jährlich in der Leitung verloren-

gehende Energie einbringen würde, muß gleich dem Betrage der Zinsen und der Tilgungssumme des Kapitals sein, welches für die Anlage der Leitung aufgewandt worden ist.“ Aus dieser Regel folgt, daß die Stromdichte, welche dem Minimum der Kosten entspricht, unabhängig ist von der Anfangsspannung, der zu übertragenden Energie und der Länge der Leitung.

Die Regel genügt nicht zur Lösung aller möglichen Fragen; man kann jedoch nach dem von dem berühmten Physiker ersonnenen Vorbild analoge Aufstellungen machen; eine von denselben würde speziell über die für die Übertragung günstigste Spannung Auskunft geben.

2. Die ruhenden Transformatoren.

Den Nutzen hoher Spannungen hat man schon seit langer Zeit erkannt, doch waren die alten Gleichstromdynamomaschinen zur Erzeugung höherer Potentiale nicht fähig; an den Bürsten traten bald Funken von gefahrdrohender Stärke auf und verhinderten die Erzielung guter Resultate.

Die Wechselstrommaschine liefert viel leichter hohe effektive elektromotorische Kraft, und dank dieser Eigenschaft hat der Wechselstrom seit etwa 20 Jahren Eingang in die Großindustrie gefunden. Ein ernster Übelstand würde jedoch sein Emporkommen verlangsamt haben, wenn sich nicht im Gefolge des Übels auch gleich das Heilmittel gefunden hätte: Bei effektiven Spannungen über 300 Volt ist der Wechselstrom im praktischen Betriebe nicht anwendbar, weil er die Personen, welche mit den stromdurchflossenen Leitern in Berührung kommen, sehr gefährdet. In den Verbrauchskreisen muß man also die Spannung erniedrigen, womöglich jedoch ohne Energie zu verlieren, und gerade diese Umformung ist es, welche die Eigenschaften des Wechselstroms zu verwirklichen erlauben und zwar mit einfachen, widerstandsfähigen, keine Überwachung erfordernden Apparaten, welche man Spannungstransformatoren nennt.

Bekanntlich erzeugt jede Veränderung des magnetischen Induktionsflusses in einem Leitungskreis eine induzierte elektromotorische Kraft. Bei den Maschinen wird diese Veränderung durch die gegenseitige Bewegung des Induktormagneten und des Ankers hervorgerufen, und man erhält als elektrische Energie das Äquivalent der bei dieser Bewegung aufgewandten mechanischen Arbeit. Man kann aber auch den Induktionsfluß, welcher einen induzierten oder sekundären Kreis durchsetzt, dadurch variieren lassen, daß man einfach die Stromintensität des induzierenden oder primären Kreises ändert, während beide Kreise vollkommen in Ruhe bleiben. In diesem Falle wird überhaupt keine mechanische Arbeit verbraucht oder erzeugt, nur elektrische Energie ist dem primären Kreise zur Unterhaltung der Intensitätsschwankungen des Stromes zugeführt worden, und im Sekundärkreis erhält man wieder elektrische Energie.

Diese Umformung geht von selbst und zwar dauernd vor sich, wenn der induzierende Strom ein Wechselstrom ist. Der von einem periodischen Induktionsfluß erzeugte Induktionsstrom ist ebenfalls periodisch. Hält man an den Klemmen des Primärkreises eine gewisse effektive Potentialdifferenz aufrecht; welche in dem Kreise eine gewisse effektive Stromintensität unterhält, so ergibt sich in dem sekundären Kreise auch ein Wechselstrom mit einer anderen effektiven Potentialdifferenz. Die Leistung wird sozusagen von der einen auf die andere Wickelung übertragen, und diese Übertragung, die freilich nicht ganz ohne Verlust von statten geht, ist unter Umständen sehr wertvoll, weil der relative Wert der beiden Faktoren, Potentialdifferenz und Stromintensität, von welchen die Leistung abhängt, dabei geändert werden kann. Z. B. läßt sich auf diese Weise ein anfangs vorhandener Strom, der bei hoher Spannung niedere Intensität besitzt, durch einen Strom mit niederer Spannung und hoher Intensität ersetzen.

Zur Verstärkung der Induktionswirkung ist es natürlich geboten, die beiden Spulen auf ein- und denselben Weich-

eisenkern zu wickeln, der in der Mehrzahl der Fälle*) einen geschlossenen magnetischen Kreis mit möglichst kleinem magnetischen Widerstand bildet.

Der Eisenkern wird von übereinander geschichteten dünnen Blechen gebildet, die voneinander durch einen isolierenden Überzug oder Papier getrennt sind, um so weit wie möglich die Foucaultströme zu beseitigen. Diese Bleche müssen sehr fest zusammengepreßt werden, eine Vorsichtsmaßregel, durch deren Vernachlässigung sich an dem Transformator ein unerwarteter Übelstand zeigen würde. Infolge der Richtungswechsel der elektromagnetischen Kräfte, welche den periodischen Stromänderungen entsprechen, würde der Apparat Töne von sich geben, die reich sind an sehr unangenehmen Oberschwingungen.

Die Wicklungen bestehen aus Kupferspulen; die benachbarten Windungen jeder Spule müssen sehr sorgfältig isoliert sein, weil zwischen ihnen hohe Potentialdifferenzen entstehen können; noch wichtiger ist es jedoch, die primäre Wicklung von der sekundären gut zu isolieren. Meist sitzen die Spulen außen auf dem Eisenkern; bei denjenigen Apparaten, welche dauernd an die Leitung angeschlossen bleiben müssen, benutzt man indessen eine Anordnung, bei der das Eisen fast vollständig das Kupfer umgibt; dies sind die Manteltransformatoren.

Der so außerordentlich einfache und geistreiche Gedanke der Transformation ist ziemlich alt. Man findet ihn im Keime schon in den Versuchen, welche der berühmte amerikanische Physiker Henry unmittelbar nach der Entdeckung Faradays ausführte; verwirklicht ist er bereits bei der Induktionsmaschine, welche Masson und Breguet im Jahr 1840 kon-

*) Früher baute man auch Transformatoren mit offenem magnetischen Kreis, und in Fällen, wo der sekundäre Stromkreis gelegentlich einem Kurzschluß ausgesetzt ist, kann eine solche Anordnung wohl zweckdienlich sein, indem sie eine gefährliche Erhöhung der Stromintensität verhindert.

struierten und vor allem in den berühmten Spulen von Page und Ruhmkorff,*) welche tatsächlich Transformatoren mit offenem Magnetkreis sind; Gaulard jedoch war es, der das Prinzip in die gesamte Industrie einführte. Er erkannte klar und deutlich, daß der von ihm vorgeschlagene Apparat auf elektrischem Gebiete eine ähnliche Rolle spielen könne wie auf dem Gebiet der Mechanik die einfachen Maschinen, Hebel und Rolle, die ja nach Belieben einen der beiden Faktoren der Arbeit, Kraft und Weg, zu vergrößern oder zu verkleinern erlauben, ihr Produkt aber nicht ändern können. Bekanntlich ist dieser geniale Erfinder arm und verkannt gestorben; es ist leider nicht nötig, in ferne Vergangenheit zurückzuschweifen, um in der Geschichte der Entdeckungen Beispiele grausamer Ungerechtigkeit zu finden; denn die Arbeiten Gaulards liegen kaum ein Vierteljahrhundert zurück.

Die Theorie der Transformatoren ist heute bereits klassisch. Durch einfache Anwendung der Induktionsgesetze läßt sich leicht zeigen, daß die effektive Spannung an den Klemmen des Sekundärkreises und diejenige an den Klemmen des Primärkreises in einem konstanten Verhältnis stehen, wenn man die magnetische Streuung nicht berücksichtigt, d. h. wenn man annimmt, daß der ganze magnetische Induktionsfluß innerhalb des Eisens bleibt, und wenn man außerdem noch den Widerstand der Stromkreise ziemlich klein voraussetzt, so daß der Ohmsche Potentialabfall gegen die Klemmspannung zu vernachlässigen ist. Dieses Verhältnis, welches als Transformationsverhältnis oder -koeffizient bezeichnet wird,

*) Die Entdeckung Röntgens und die Erfindung der Telegraphie ohne Draht haben in den letzten zehn Jahren sehr bemerkenswerte Untersuchungen über den Induktionsapparat, jenes bei der Erzeugung der X-Strahlen und der elektrischen Schwingungen unentbehrliche Werkzeug, hervorgerufen; wir übergehen hier diese spezielle Frage, die man in einem Buche von Armagnat ausführlich behandelt findet.

ist gleich dem Quotienten aus der Windungszahl des Sekundärkreises dividiert durch die Windungszahl des Primärkreises.

Der Beweis setzt keineswegs voraus, daß der induzierende Strom sinusförmig sei; in dem induzierten Kreis bildet sich stets eine in ihrer Form der primären ähnliche Spannung aus, gleichviel in welcher Weise letztere von der Zeit abhängt.

Abgesehen von seiner besonderen Wirkung in Bezug auf die beiden Faktoren der Leistung kann der Transformator auch noch die Rolle eines selbsttätigen Spannungsregulators versehen. In den Wechselstrom-Leitungsnetzen wird der von der Zentrale gelieferte Hochspannungsstrom von einer Unterstation aufgenommen, wo er in Strom mit niedriger Spannung umgeformt wird; dafür diese bei beliebiger Stromabgabe ungeändert bleibt, genügt es vollkommen, die Spannung an den Klemmen des Primärkreises konstant zu halten.

In der Praxis kann die Anwendung der Transformatoren nur dann Vorteile bringen, wenn ihr Wirkungsgrad hoch genug ist. Es ist daher von der größten Wichtigkeit, eine genaue Übersicht über die Energiemenge zu haben, die sie in Form von Wärme zerstreuen. Diese Verluste erfolgen an zwei Stellen, erstens im Eisen und zweitens im Kupfer.

Der Eisenkern ist der Sitz von Hysteresiserscheinungen, und außerdem wird er trotz der Unterteilung von Foucaultströmen durchflossen; das sind zwei Ursachen parasitärer Erwärmung in der Armatur.

Es ist leicht zu verstehen, daß der so verursachte Verlust ebensowohl stattfindet, wenn der Transformator leer läuft, d. h. wenn der Sekundärkreis offen ist und keinen Strom abgibt, als wenn er im Gegenteil belastet ist und der Sekundärkreis Strom liefert. Es läßt sich sogar zeigen, daß die Verluste im Eisen unabhängig von der Belastung immer die gleichen sind, wenn die Spannung an den Primärklemmen

konstant erhalten wird. Um diese Verluste zu verringern, muß man die Maximalinduktion, welcher das Eisen unterworfen wird, also auch den maximalen Induktionsfluß, der ja der Induktion proportional ist, so weit wie möglich verkleinern. Für einen gegebenen Primärstrom steht jedoch der Induktionsfluß im umgekehrten Verhältnis zur Windungszahl; diese muß man also vermehren und folglich, wenn man nicht das Transformationsverhältnis ändern will, auch die Zahl der Windungen im Sekundärkreis.

Unter diesen Umständen wird der Energieverlust im Eisen kleiner; man darf jedoch nicht glauben, daß dies einen sicheren Gewinn bedeutet. Indem man die Länge der beiden Wickelungen vergrößert, vergrößert man auch ihren Widerstand und damit die Energiezerstreuung im Kupfer in Form von Joulescher Wärme. Man kann nicht eine der Ursachen, welche den Wirkungsgrad verschlechtern, abschwächen, ohne Gefahr zu laufen, daß die andere noch mehr Schaden stiftet.

Es gilt daher eine mittlere Linie einzuhalten, und wiederum dient dabei die Rechnung als Führer, um die ökonomisch beste Lösung zu finden. Man gelangt leicht zu dem Ergebnis, daß der Wirkungsgrad ein Maximum wird, wenn die Verluste im Eisen denen im Kupfer gleichkommen; unter diesen Umständen kann derselbe 97 Prozent erreichen.

Trotzdem darf man nicht schließen, daß es immer angebracht ist, einen Transformator mit maximalem Wirkungsgrad zu benutzen. Die bei den Abonnenten aufgestellten Apparate bleiben dauernd in die Leitung eingeschaltet, weil die Handhabung eines Ausschalters im Primärkreis ernste Gefahren mit sich bringen würde; deshalb verliert man in dem Eisen, auch wenn man gar keinen Strom verbraucht, einen Teil derjenigen Leistung, welche bei Stromverbrauch verloren geht; und es kann vorteilhaft sein, es so einzurichten, daß dieser Teil (bei Leerlauf) weniger beträgt als die Hälfte des bei Belastung vorhandenen. Die Abonententransformatoren wird man also zweckmäßig so einrichten, daß sie den maximalen

Wirkungsgrad für einen mittleren Verbrauch besitzen, der durch den Versuch festgestellt werden muß; der Verlust im Kupfer wird also zum Beispiel doppelt so groß sein müssen wie im Eisen.

Anfangs baute man die Transformatoren etwas aufs Geratewohl; heute dagegen hat der Zufall nur noch einen geringen Anteil, und man kann einen Transformator, der einem bestimmten Zweck dienen soll, in allen seinen Einzelheiten im Voraus berechnen. Übrigens kann man sich leicht überzeugen, ob das Resultat mit der Rechnung übereinstimmt, denn man besitzt einfache Methoden zur Prüfung von Transformatoren. Diese Prüfung umfaßt zwei gleichwichtige Feststellungen; es ist nämlich zu untersuchen, ob der Wirkungsgrad gut ist und andererseits, ob der Spannungsabfall zwischen Leerlauf und voller Belastung nicht zu hoch ist. Diese letztere Bedingung ist sehr wichtig; es sind bei Beleuchtungsanlagen nur sehr kleine Abweichungen in der Spannung zulässig, und man muß daher sicher sein, daß man durch Konstanthaltung der Spannung an den Primärklemmen ganz automatisch die Unveränderlichkeit im Sekundärkreis sichert. Für die Praxis ermöglicht eine von Kapp stammende sehr bemerkenswerte Methode eine sehr einfache und vollkommen genügende Prüfung.

Das Arbeiten der Transformatoren erfolgt mit solcher Zuverlässigkeit, daß man dieselben einfach sich selbst überlassen kann; kein beweglicher Teil verlangt bei ihnen eine besondere Überwachung. Die einzige, zu befürchtende Gefahr ist eine übermäßige Erwärmung, denn die Transformatoren ventilieren sich natürlich nicht selbst, wie es eine rotierende Maschine tun würde; für etwas größere Leistungen muß man zuweilen Ventilatoren oder zirkulierende Kühlflüssigkeiten zu Hilfe nehmen. Übrigens kann man die Temperaturerhöhung vermeiden, indem man dem Apparat recht große Abmessungen gibt, aber allzu weitem Vorgehen auf diesem

Wege ist eine Schranke gesetzt durch die Herstellungskosten und die Verschlechterung des Wirkungsgrades.

Die Transformatoren, besonders diejenigen für Mehrphasenströme, welche natürlich für jede Phase eine besondere Wicklung erfordern, sind ziemlich kostspielig, und trotz ihres ausgezeichneten Wirkungsgrades sind die vorhandenen Verluste doch nicht ganz zu vernachlässigen. Daher hat man auch in manchen Anlagen die Transformatoren an der Erzeugungsstelle beseitigt und erzeugt die Hochspannungsströme unmittelbar in den uns schon bekannten Wechselstromgeneratoren. Freilich hat die Weglassung derselben auch ihre Nachteile. Der Transformator dient auf der Erzeugungsstation nicht allein zur Erhöhung der Spannung; er spielt gleichzeitig auch die Rolle des Beschützers der Maschinen gegen Überspannungen und Kurzschlüsse, die in den Leitungen entstehen können, und muß in dieser Rolle durch Anordnungen ersetzt werden, die häufig nicht ebenso sicher funktionieren.

3. Die polymorphen Transformatoren.

Die Transformation, welche in der Änderung der Spannung und Stromintensität besteht, ohne daß dadurch der Wert der Leistung ein anderer wird, ist nicht die einzige, die man an Wechselströmen vornehmen kann. Ganz allgemein kann man viel tiefer gehende Modifikationen erzeugen, welche die Natur des Stromes selbst angehen; so kann man sich einen Apparat denken, welcher mehrphasige Ströme liefert, die sich von den anfangs zur Verfügung stehenden Strömen durch die Zahl der Phasen, durch ihre Spannung und Frequenz unterscheiden.

Denken wir uns einen Asynchronmotor, dessen Rotor man eine Geschwindigkeit einprägt, die konstant auf einem passenden Wert erhalten wird; diesen Rotor versehen wir mit Mehrphasenwickelungen in der gewünschten Anzahl, aber statt diese Stromkreise in sich selbst kurz zu schließen,

führen wir die erzeugten Ströme zu Sammelschienen; auf diese Weise können wir alle verlangten Änderungen hervorbringen.

Man erkennt, wie sich bei dieser Auffassung der Begriff der Transformation erweitert; die gewöhnlichen ruhenden Transformatoren stellen die einfachste Gattung dar; es sind jedoch noch viele andere besondere Fälle denkbar. Hospitalier hat eine vollständige systematische Zusammenstellung aller dieser Transformatoren gegeben, denen er den Namen „polymorphe Transformatoren“ beilegt. Sie umfaßt eine große Zahl von Kombinationen, von denen mehrere wirklich praktisches Interesse besitzen und leicht herzustellen sind.

Es kann von Nutzen sein, die Zahl der Phasen zu verändern, z. B. um die der Leitungsdrähte zu verringern oder den Gebrauch einfacherer Motoren zu ermöglichen. So transformiert man am Niagara Dreiphasenstrom in Zweiphasenstrom und umgekehrt. Eine mögliche Lösung hat Scott dafür angegeben.

Betrachten wir zwei Wicklungen, die um zwei ganz gleiche Eisenkerne gelegt sind. Die eine dieser Spulen ist mit ihren beiden Enden an die Drähte angeschlossen, welche zwei von den Phasen der Dreiphasenleitung führen; das eine Ende der anderen Spule ist an den der dritten Phase entsprechenden Draht angeschlossen, während das letzte Ende mit der Mitte der Wickelung auf dem ersten Kern verbunden ist. Es läßt sich leicht zeigen, daß unter diesen Umständen der magnetische Induktionsfluß in den beiden Kernen zweiphasig wird. Wenn man also über jeden von ihnen einen Sekundärkreis legt, so erhält man Zweiphasenstrom. Man kann dies Verfahren verallgemeinern und in ganz analoger und immer einfacher Weise mit passend verbundenen Wicklungen die Zahl der Phasen beliebig ändern.

Augenscheinlich kann man übrigens zugleich auch die Spannung sehr leicht ändern, indem man den beiden Stromkreisen mehr oder weniger Windungen gibt.

Diejenige Umformung jedoch, welche für die Praxis die allergrößte Bedeutung besitzt, bleibt die Umformung des Wechselstromes in Gleichstrom. Wenn sich der Wechselstrom auch ausgezeichnet für die Energieübertragung eignet, so muß er doch dem Gleichstrom seine alte Überlegenheit bei der Speisung von Motoren überlassen, die oft anlaufen und mit verschiedenen Geschwindigkeiten arbeiten müssen; er ist ungeeignet zur Ladung von Akkumulatoren; er kann in der chemischen Industrie nicht benutzt werden; er kann sogar nicht einmal die Erregung der Wechselstrommaschinen liefern, von denen er seinen Ursprung nimmt. Apparate, die statt der von einer Leitung gelieferten Mehrphasenströme ohne Unkosten Gleichstrom abgeben, würden also in sehr vielen Fällen hervorragende Dienste leisten.

Eine Lösung, die sich natürlich ohne Weiteres aufdrängt, besteht darin, auf derselben Achse einen Motor für Mehrphasenstrom und einen Generator für Gleichstrom anzubringen. Man setzt den Motor mit den Strömen des Leitungsnetzes in Tätigkeit und nimmt an den Klemmen des Gleichstromgenerators den verlangten Gleichstrom ab.

Man muß dabei jedoch einige Vorsicht anwenden. Die beiden Maschinen müssen natürlich die gleiche Leistung besitzen und der Motor muß möglichst gleichmäßig laufen, weil seine Schwankungen noch viel größere Schwankungen in dem von der Dynamomaschine abgegebenen Strom nach sich ziehen würden. So gebildete Maschinengruppen arbeiten gut, aber die Lösung ist in ökonomischer Hinsicht nicht sehr besonders; die Anschaffung der beiden Maschinen ist kostspielig, und der Wirkungsgrad nicht sehr hoch.

Man erhält bessere Resultate, wenn man den Gleichstrom in demselben Anker erzeugt, der den Wechselstrom aufnimmt. Eine Maschine dieser Art wird als „rotierender Umformer“ (Einanker-Umformer) bezeichnet.

Mit einigen geringen Änderungen läßt sich eine Gramme'sche Maschine leicht in eine gute Umformermaschine

umwandeln. Wenn man die Ankerwicklung einer gewöhnlichen Dynamomaschine in eine beliebige Anzahl von Abschnitten teilt, die zu ebensoviel auf der Achse befestigten Schleifringen führen, an denen Bürsten schleifen, so erhält man an diesen Mehrphasenströme; die Zahl der Phasen ist dabei gleich der Zahl der Ankerabteilungen. Andererseits bleibt es immer möglich, die Kollektorbürsten mit den Enden eines äußeren Stromkreises zu verbinden, in welchen der Grammesche Ring Gleichstrom entsendet. Wenn die Maschine in dieser Weise in zwei verschiedenen Kreisen gleichzeitig Wechselstrom und Gleichstrom liefert, so wird augenscheinlich der Anker von einem variablen Strom durchflossen, und man muß erwarten, daß die Spannung an den Kollektorklemmen nicht ganz konstant ist. Daher läßt man sie nur selten beide Ströme gleichzeitig abgeben; diese Universal-Dynamos leisten in kleinen Anlagen nützliche Dienste, wo man sie je nach den Umständen in der einen oder anderen Weise benutzt.

Ihr wirklicher Wert besteht jedoch darin, daß sie leicht den Übergang von einfachem Wechselstrom oder Mehrphasenstrom zu Gleichstrom gestatten. Wenn man den Schleifringen Mehrphasenstrom zuführt, so dreht sich die Maschine, und man kann an den Bürsten Gleichstrom abnehmen; umgekehrt, wenn man durch die Kollektorbürsten Gleichstrom schickt, so erhält man in den mit den Schleifringen verbundenen Drähten Mehrphasenstrom.

Die Theorie dieser rotierenden Umformer ist heute vollkommen bekannt; sie ist in einfacher und dabei allgemeiner Form von Potier aufgestellt worden. In dem für die Praxis interessantesten Falle, nämlich dem der Umformung von Wechselstrom*) in Gleichstrom, ist der rotierende Umformer

*) Die meisten Umformer sind nicht für einphasigen Wechselstrom gebaut, sondern für den viel mehr verbreiteten Zwei- und Dreiphasenstrom. Im Falle des Dreiphasenstroms ist es zweckmäßig, die Zahl der Phasen im Anker zu verdoppeln, was leicht durch einen einfachen Kunstgriff bei der Verbindung der Wickel-

ein richtiger Synchronmotor und zeigt infolgedessen alle Vorzüge und Nachteile dieser Art von Motoren. Er besitzt in einem Netz, wo die Frequenz gut konstant bleibt, konstante Geschwindigkeit und erhöht den Leistungsfaktor des Netzes; dafür muß man aber, um ihn zum Anlaufen zu bringen, einen Kunstgriff anwenden, und wenn der von dem Kollektor abgegebene Gleichstrom zu stark wird, so kann der Umformer außer Tritt fallen und zu arbeiten aufhören. Andererseits zeigt auch der von den Bürsten gelieferte Gleichstrom, da er von einem Anker kommt, in dem variabler Strom fließt, schwach wellenförmige Schwankungen, die häufig sehr unangenehm sind. Der Wirkungsgrad großer Maschinen dieser Art erreicht unschwer 93 Prozent; das ist eine wertvolle Eigenschaft, die indessen nicht genügt, um alle Mängel auszugleichen, und daher kann man in gewissen Anlagen, wo unbedingte Gleichförmigkeit des Stromes gefordert wird, diese Umformer nicht anwenden.

Man kann alsdann andere Apparate benutzen, insbesondere die sehr scharfsinnig von Leblanc erdachten „Gleichrichter-Transformatoren“ (transformateurs redresseurs). Diese Transformatoren gestatten wie der Scottsche durch Verallgemeinerung des ihnen zu Grunde liegenden Verfahrens, von einem Stromsystem mit einer gegebenen Anzahl Phasen zu einem anderen mit anderer Phasenzahl überzugehen, und zwar lediglich mit Hilfe unberweglicher Organe; insbesondere jedoch liefern sie eine praktische und elegante Lösung für die Transformation von Wechselstrom in Gleichstrom oder, falls es nötig sein sollte, für die umgekehrte Transformation.

Der „convertisseur“ genannte Apparat besitzt ein Drehfeld, und sein Prinzip ist leicht zu verstehen. Denken wir uns den Stator eines asynchronen Wechselstrommotors von

lungen geschehen kann. Der Umformer mit sechsphasigem Stromkreis besitzt bei gleichem Materialaufwand eine Leistung, welche wenigstens um ein Viertel diejenige der Maschinen mit Dreiphasenanker übertrifft.

Dreiphasenstrom gespeist und setzen an die Stelle des Rotors einen festen Anker, der wie ein Grammescher Ring gewickelt ist, mit seinem Kollektor. Der rotierende Induktionsfluß des Stators erzeugt genau dieselben Induktionswirkungen wie ein rotierender Induktormagnet; aus dem Anker kann man daher Gleichstrom entnehmen, wenn man die Bürsten mit derselben Geschwindigkeit wie das Feld rotieren läßt. Diese Rotationsbewegung kann mit Hilfe eines kleinen Synchronmotors erfolgen, der von demselben Strom gespeist wird, welcher den Induktor erregt; die Stellung der Bürsten, die man zu Anfang reguliert, bleibt dann konstant reguliert; ein Außertrittfallen kann nicht vorkommen. Allerdings besitzt der Apparat den schwerwiegenden Fehler, daß er rotierende Bürsten trägt; aber auch diese Schwierigkeit kann man umgehen, indem man statt der Bürsten den passend angebrachten Kollektor bewegt.

Noch einfacher ist die Anordnung von Hutin und Leblanc. Sie erinnert an einen gewöhnlichen feststehenden Transformator für Mehrphasenstrom; jedoch muß der sekundäre Stromkreis eine spezielle Wicklung besitzen, die sich hier nicht einfach beschreiben läßt.

Neuerdings sieht man noch andere Apparate in der Technik auftauchen, welche wie der Arnoldsche Umformer unmittelbar Mehrphasenstrom hoher Spannung in Gleichstrom niederer Spannung umformen. Die Arnoldsche Maschine besteht im Wesentlichen aus einem Asynchronmotor und einer Gleichstrom-Dynamomaschine, die so mit einander vereinigt sind, daß die Rotorwicklung des Motors sich in diejenige des Dynamoankers fortsetzt; die Spulen des Rotors und Stators sind so berechnet, daß sie die gewünschte Spannungserniedrigung ergeben. In der „Kommutator-Gleichrichter“ (permutatrice) genannten Maschine von Rougé-Fayet findet man zum ersten Male einen Spannungstransformator mit sechsphasigem Sekundärkreis, welcher das Drehfeld im Stator erzeugt.

Wenn die Leistung des Wechselstroms nur einige Pferdestärken beträgt, so benutzt man häufig statt der Umformer-Maschinen zweckmäßiger elektrolytische Ventilapparate.

Die Grundlage dieser Apparate findet sich in einem merkwürdigen Versuch, den Buff im Jahre 1857 anstellte. Dieser Physiker beobachtete, daß, wenn man Wasser in einer Zersetzungszelle elektrolysiert, deren eine Elektrode aus Aluminium besteht, während die andere ein beliebiges Metall wie z. B. Blei ist, der Strom sehr leicht vom Blei zum Aluminium übergeht, daß er dagegen sehr stark geschwächt wird, wenn man die Richtung umkehrt, so daß das Aluminium Anode wird. Noch reinere Resultate erhält man, wie Pollak gezeigt hat, wenn man als Elektrolyten ein Alkaliphosphat nimmt. Die Einschaltung eines auf diese Weise gebildeten Voltameters in einen von Wechselstrom durchflossenen Kreis hat dieselbe Wirkung wie die Einfügung eines Ventils in eine Wasserleitung; nur diejenigen Ströme können hindurch, die in der geeigneten Richtung ankommen.

Dieser Vorgang hat übrigens nichts Geheimnisvolles an sich; er beruht auf der bei der Elektrolyse, wenn das Aluminium Anode ist, stattfindenden Erzeugung einer schlecht leitenden Substanz, wie es das Aluminiumphosphat ist, welche sich dem Durchgang der Elektrizität widersetzt; während, wenn der Strom durch das andere Metall eintritt, nur leitende Körper gebildet werden.

Diese Ventilzellen geben natürlich sehr stark schwankende Ströme, doch werden die Schwankungen geringer, wenn man in einem und demselben Leiter die Komponenten eines mehrphasigen Stromsystems vereinigt. Nach diesem Prinzip hergestellte Ventilzellen, wie z. B. die Nodonsche Anordnung, beginnen sich in der Technik einzubürgern, wo sie gute Dienste leisten.

Wir werden endlich später noch sehen, daß die Quecksilberdampflampen nach dem System Cooper-Hewitt als richtige Ventilzellen benutzt werden können, die bis zu

Spannungen von 1000 Volt hinauf funktionieren und deren Wirkungsgrad sehr hoch ist, nämlich ungefähr 98 Prozent; es ist dies ein außerordentlich interessantes Resultat, das in Zukunft sicherlich noch vielfache Anwendung finden wird.

4. Der Transport und die Verteilung der Energie.

Mit diesen verschiedenartigen Apparaten, die allen Bedürfnissen entsprechen, läßt sich heute die elektrische Energieübertragung unter den von der Theorie angegebenen wirtschaftlichen Bedingungen ausführen.

Im Jahre 1891 offenbarten die denkwürdigen Versuche zwischen Lauffen und Frankfurt die Möglichkeit der elektrischen Energieübertragung auf große Entfernung mittels hochgespannten Wechselstromes, und der große Erfolg dieses Aufsehen erregenden Versuches lenkte die Elektriker auf einen Weg, etwas abweichend von dem, welchen Marcel Desprez ihnen neun Jahre früher gewiesen hatte.

Eine in Lauffen a. Neckar mittels dreiphasigen Generators gewonnene Leistung von 300 Pferdestärken wurde 175 km weit durch Ströme übertragen, deren Spannung sich ohne Unfall bis auf 30000 Volt steigern ließ; der Wirkungsgrad betrug dabei 74 Prozent. Doch kann man wohl sagen, daß zu der Zeit, als diese Übertragung so glänzend gelang, der Augenblick doch noch nicht gekommen war, wo man in der Technik fortlaufend so hohe Spannungen benutzen konnte, und Energie auf so große Entfernungen zu transportieren brauchte. Dazu war auch die übertragene Leistung nicht groß genug, um die Operation wirklich gewinnbringend zu machen, und man besaß ferner noch nicht die Apparate und Mittel zur Isolation, welche heute die Anwendung hoher Potentiale ermöglichen.

Daher hielten sich in den folgenden Jahren die Anwendungen in den engsten Grenzen. In Frankreich insbesondere bestand ein gewisses Vorurteil gegen den Wechselstrom, dem

man gerne noch Mängel vorwarf, von denen er in Wahrheit schon frei war; er galt außerdem für sehr gefährlich, und dieser Ruf war — das muß man zugestehen — zu einer Zeit, wo man noch nicht alle notwendigen Vorsichtsmaßregeln zu treffen verstand, ganz berechtigt.

Von Amerika ging endlich gegen das Jahr 1897 jener Umschwung der Stimmung aus, welcher rasch alle zivilisierten Nationen ergriff; seitdem wächst die Zahl der Übertragungen auf große Entfernung täglich. Dabei erscheint das System des Dreiphasenstroms gegenwärtig als das verbreitetste, und die angewandten Spannungen sind immer weiter gestiegen. Auf der Ausstellung von 1900 war ein speziell für dieselbe konstruiertes Kabel zu sehen, das aber kaum für mehr als eine bloße Kuriosität galt. Dieses Kabel konnte 30000 Volt aushalten. Heute kann man welche herstellen, die einer Spannung von 100000 Volt widerstehen würden. In Amerika benutzt man im regelmäßigen Betriebe ohne jede Unzuträglichkeit Spannungen von 60000 Volt. Gegenwärtig erfolgt z. B. die Übertragung von Colgate und Electra nach San Francisco über eine Strecke von 353 km mit dieser Spannung. In Frankreich führt das Netz der elektrischen Energieverteilung der Mittelmeerküste eine Spannung, die ungefähr 30000 Volt erreicht.¹²⁾

Ohne Zweifel wird der Fortschritt noch weiter gehen, und es läßt sich vorhersehen, daß die mit Wechselstrom arbeitenden Linien sich noch erheblich entwickeln werden; doch ist es keineswegs sicher, daß der Wechselstrom in seinem Kampf gegen den Gleichstrom schließlich Sieger bleiben wird.

Ohne ihn mit Voreingenommenheit zu betrachten, wie man es anfangs allzu häufig tat, muß man doch zugestehen, daß er gewisse ihm eigentümliche Übelstände besitzt. Man muß bei ihm stets vor plötzlichen Stromunterbrechungen in Sorge sein, welche infolge der Selbstinduktion hohe elektromotorische Kräfte erzeugen können; ebenso muß man darauf

gefaßt sein, daß eine Oberschwingung infolge unerwarteter Resonanz übermäßige Bedeutung erlangt. In der Tat kann ja die Maximalspannung das Doppelte der effektiven erreichen, wenn die Generatoren keine sinusförmige elektromotorische Kraft geben. Aus allen diesen Gründen ist es trotz der Erfindung verschiedener Apparate zur Begrenzung der Spannung stets angebracht, die Isolation für weit höhere als die mittlere Spannung zu berechnen.

Daher haben die Anhänger des Gleichstroms auch keineswegs abgerüstet, und der Gedanke von Fontaine und Marcel Desprez ist nicht ganz in Vergessenheit geraten. Es wurde schon darauf hingewiesen, daß Thury die Konstruktion von Gleichstrommaschinen mit hoher Spannung gelungen ist, und an sehr schönen Beispielen hat dieser geschickte Ingenieur gezeigt, daß das System der Hintereinanderschaltung bei konstanter Stromintensität mit Gleichstrom hoher Spannung ebenfalls eine wirtschaftliche Energieübertragung auf weite Entfernung ermöglicht.

Bei diesem System durchläuft ein und derselbe Strom dauernd alle an den Stromkreis angeschlossenen Apparate; alle Generatoren einerseits, alle Verbrauchsapparate andererseits sind in Serie geschaltet; die Intensität wird konstant erhalten, welches auch die verlangte Leistung sein möge, und die Spannung ist es, die man je nach Bedarf an der Erzeugungsstation ändert. Soll ein Verbrauchsapparat ausgeschaltet werden, so ersetzt man ihn, ohne den Stromkreis zu unterbrechen, durch einen Leiter ohne merklichen Widerstand; um den Apparat in Tätigkeit zu setzen, beseitigt man einfach den Kurzschluß.

Das Thurysche Verfahren wird mit gutem Erfolg zwischen Saint-Maurice (an der Rhône) und Lausanne auf eine Entfernung von 56 km angewendet; die Leistung wird durch Gleichstrom übertragen, der konstant auf 150 Ampère gehalten wird, während seine Spannung zwischen Null und 23000 Volt variieren kann. Ganz neuerdings hat man in

Frankreich eine Übertragung von mehr als 40000 Kilowatt mit 57000 Volt Gleichstromspannung auf eine Entfernung von 180 km hergestellt zwischen der Zentrale der Volta-Gesellschaft bei Moutiers und Lyon zur Versorgung der Straßenbahnen dieser Stadt. Man kann wohl sagen, daß der kurze Zeit verlassene Gleichstrom augenblicklich wieder ein ernstlicher Konkurrent des Wechselstroms wird, und vielleicht verschaffen ihm die ausdauernden Bemühungen seiner Anhänger in naher Zukunft sogar den ersten Platz.

Neue Versuche von Thury haben gezeigt, daß es möglich ist, den Energieverlust bedeutend zu verringern, indem man nur einen Leitungsdraht anwendet und als Rückleitung die Erde benutzt. Die Verbesserung der Isolationsmethoden gestattet, Generatoren und Empfangsapparate auf einem Potential zu halten, das mindestens 50000 Volt beträgt.

Man hat auch ein System vorgeschlagen, bei welchem der neutrale Punkt der Erzeugungs- und Verbrauchsstation an Erde angelegt wird; auf diese Weise würde man die zu isolierende Spannung auf die Hälfte verringern, und zwei Leitungsdrähte der eine mit positivem, der andere mit negativem Potential würden dabei eine enorme Leistung auf große Entfernungen übertragen können. In einem bemerkenswerten, sehr gut durchgearbeiteten Projekt schlagen Blondel und Harlé dieses System vor, um die Leistung von 80000 Pferdestärken, welche die Rhône zwischen der Schweizer Grenze und Culoz abgeben kann, dauernd nach Paris zu übertragen; vom elektrotechnischen Standpunkt aus würde diese Übertragung, über deren wirtschaftlichen Nutzen man streiten kann, gegenwärtig keiner ernststen Schwierigkeit begegnen.

Auf welche Art man auch die Energie von der Stelle, wo man sie wohlfeil erzeugen kann, nach der Zentralstation überträgt, die sie verteilen soll, ohne Zweifel wird es immer am bequemsten erscheinen, diese Verteilung bei konstantem Poten-

tial vorzunehmen, und wenn das versorgte Gebiet etwas größer ist, so wird man für diesen Zweck nicht von dem Wechselstrom abgehen. So wird z. B. bei der Übertragungsanlage Saint Maurice—Lausanne, dem Typus des Systems mit Gleichstrom, die mittels Gleichstrom zugeführte Energie nachträglich durch Dreiphasenstrom verteilt.

Gegenwärtig erfolgt die Verteilung nach sehr verschiedenen Systemen. Der Dreiphasenstrom mit 50 Perioden in der Sekunde ist besonders anpassungsfähig; er läßt sich zur Beleuchtung, zur Arbeitsleistung, zum Bahnbetrieb benutzen und eignet sich gut zur Umformung mit billigen und wenig Platz beanspruchenden Apparaten; daher steht er sehr in Gunst.

Der Dreiphasenstrom mit 25 Perioden gestattet viel leichter die Anwendung von rotierenden Umformern, welche ihn in Gleichstrom umwandeln; auch der Zweiphasenstrom hat seine Anhänger, und der kurze Zeit verlassene Einphasenstrom kommt seit der Erfindung neuer Motoren wieder in Aufnahme. Neben diesen verschiedenen Arten des Wechselstromes entwickelt sich der Gleichstrom stetig weiter.

Bei Gleichstrom und einfachem Wechselstrom genügen zur Verteilung zwei Drähte*), an welche die Empfangsapparate in Parallelschaltung angeschlossen werden. Da jedoch die Spannungsdifferenz zwischen den Klemmen des letzten Anschlusses nicht all zu verschieden sein darf von derjenigen bei dem ersten, so muß man gewisse Hilfsmittel anwenden. Bei Gleichstrom benutzt man vielfach Leiter, welche direkt und ohne daß an sie Apparate angeschaltet werden, die weiter entfernten Punkte mit dem Generator verbinden und

*) Bei einer großen Zahl von Gleichstromverteilungsnetzen benutzt man jedoch Systeme von drei oder sogar fünf Drähten; dieselben ermöglichen, indem man zwei oder vier Generatoren auf Spannung schaltet, den Vorteil der Übertragung mit dem doppelten oder vierfachen der Spannung, die den Klemmen der Verbrauchsapparate zugeführt wird.

so das geschwächte Netz speisen; dies sind die sogenannten Speiseleitungen oder „feeders“. Aber dieses Mittel genügt noch nicht, und zur Vervollständigung des Systems muß man z. B. in jedes Speisekabel eine Maschine in Serie schalten, welche die Spannung um diejenige Anzahl Volt erhöht, welche längs des Kabels verloren geht; eine solche Maschine heißt „Zusatzmaschine zur Spannungserhöhung“ oder einfach „Zusatzmaschine“.

Bei Wechselstrom benutzt man besonders Verteilungsnetze mit festen Transformatoren. Man legt die Primärwicklungen so vieler Transformatoren, wie nötig sind, parallel zueinander an den Hochspannungskreis; jede der Sekundärwicklungen wird dann Ausgangspunkt einer Verteilungsanlage mit zwei Leitungsdrähten.

Bei Zweiphasenstrom, der im Grunde genommen zwei Verteilungsanlagen gleicher Leistung mit einfachem Wechselstrom entspricht, braucht man zwei Drähte zur Hinleitung und zwei zur Rückleitung oder zum mindesten drei, von denen der eine mit doppeltem Querschnitt wie die anderen zur Rückleitung dient; bei Dreiphasenstrom genügen, wie bereits auseinander gesetzt wurde, drei gleiche Drähte. Das ist ein Vorteil gegenüber dem Zweiphasenstrom; es ist jedoch nicht der einzige, denn die vollkommen symmetrischen Transformatoren, die in das Netz eingeschaltet sind, wirken auch noch ausgleichend, indem sie die Gleichheit der Belastung auf den drei Leitungen aufrecht halten. Diese einfache Art, die Regelmäßigkeit des Betriebes zu sichern, ist eine der Ursachen des Erfolges des Dreiphasensystems.

Es kann bei mehrphasigem Wechselstrom nötig werden, die Spannung zu stark belasteter oder zu langer Speiseleitungen zu erhöhen; dadurch ist man auf die Konstruktion besonderer Spannungserhöher geführt worden. Die einfachsten derselben sind feste „Zusatztransformatoren“, deren Primärkreis parallel zu dem Hauptnetz liegt, während der Sekundärkreis

mit dem Speisekabel verbunden ist, dessen Spannung erhöht werden soll. Andere kompliziertere Spannungserhöher bestehen aus richtigen Synchronmotoren mit ruhendem Rotor; ein solcher Apparat wirkt wie ein feststehender Transformator, und wenn man dem Rotor eine geringe Bewegung erteilt, so erhält man in einfacher Weise die gewünschte Spannungsregulierung.

Es sei schließlich noch hinzugefügt, daß man in vielen Verteilungsnetzen ganz analoge Apparate benutzt, die man jetzt „boosters“ nennt; dies sind Spannungserniedriger¹³⁾, dazu bestimmt, die Spannung zu verringern, wenn dies nützlich erscheint.

5. Die elektrischen Bahnen.

Eins der Gebiete, auf welches die Fortschritte der Verteilung elektrischer Energie den größten Einfluß ausgeübt haben, ist sicherlich dasjenige der Personen- und Güterbeförderung. In einem der vorhergehenden Kapitel haben wir bereits von den für Transportzwecke angewandten Motoren gesprochen. Es wird jedoch ganz nützlich sein, noch einige Bemerkungen über die Bestrebungen hinzuzufügen, die sich augenblicklich in der wichtigen Frage der Elektrizität als Zugkraft geltend machen.

Die städtischen Straßenbahnnetze entwickeln sich mit staunenswerter Schnelligkeit. Mehr als 100000 km sind gegenwärtig in Amerika im Betrieb, und wenn auch in anderen Ländern die Fortschritte etwas bescheidener sind, so bleiben sie dennoch im höchsten Grade bemerkenswert. Es ist hier nicht der Ort, technische Einzelheiten über Bau und Betrieb von Straßenbahnlinien anzugeben, weiß doch im allgemeinen heute jedermann, wie diese Art der Beförderung funktioniert.

Die Lösung des Problems ist überall nahezu die gleiche; der Strom, und zwar Gleichstrom von 500—600 Volt wird entweder mittels frei durch die Luft geführten Oberleitungen zuge-

führt, oder durch Leiter in unterirdischen Kanälen, oder endlich durch Kontakte im Straßenniveau, sogenannte Blockkontakte (plots), die nur in dem Augenblick Strom führen, wo der Wagen sie passiert. Der Strom, welcher durch die Trolley-Rolle oder durch Schleifbügel entnommen wird, kehrt zurück durch die Schienen, die durch einen möglichst kleinen Widerstand verbunden sein müssen und häufig sogar aneinander geschweißt werden. Die Motoren sind Hauptstrommotoren, deren Vorzug darin besteht, daß ihr Drehmoment proportional der Belastung ist, daß sie sich selbsttätig regulieren, geringen Umfang und mäßiges Gewicht haben und einen guten Wirkungsgrad besitzen. Im allgemeinen führt jeder Wagen eine Ausrüstung mit zwei Motoren von ungefähr 30 Pferdestärken. Da die Anker viel zu schnell rotieren, so werden sie nicht unmittelbar auf die Wagenachse gesetzt, sondern wirken auf dieselbe durch Vermittlung eines verlangsamenden Zahnradvorgeleges.

Zur Regulierung der Geschwindigkeit benutzt man Apparate, welche den Namen Fahrschalter oder Kontroller führen und die durch einfaches Drehen einer Handkurbel die Zusammenschaltung der beiden Motoren hintereinander oder parallel, mit oder ohne Hinzufügung von Widerstand ermöglichen.

Nachdem die Elektrizität auf kurzen Strecken die Probe bestanden hatte, ließ man sie, anfangs nicht ohne mancherlei Widerstand, weiter in das Gebiet des Transportwesens eindringen, und sie begann nunmehr sich auch auf längeren Linien einzurichten. Zuerst spielte sie schüchtern die bescheidene aber nützliche Rolle des Zwischenhändlers; so werden z. B. bei der Heilmannschen Lokomotive, von der vor einigen Jahren viel gesprochen wurde, die Räder durch Elektromotoren bewegt, die ihre Energie von der Dampfmaschine der Lokomotive entnehmen. Bei vielen Automobilen findet man heute noch ein analoges System; der Wagen besitzt eine stromliefernde Maschine, die von einem Petroleummotor in Bewegung gesetzt wird.

Man sah sich jedoch bald vor die Frage gestellt, ob es nicht in den Fällen, wo die Benutzung von Dampflokomotiven ernste Unannehmlichkeiten mit sich bringt, z. B. bei Untergrundbahnen, möglich sei, längs der Linie entlanggeführten Strom zu benutzen. Natürlich wählte man bei den ersten Anlagen das System, welches sich bei den Straßenbahnen so gut bewährt hatte. Handelt es sich jedoch darum, einen Zug auf weitere Entfernungen laufen zu lassen, so braucht man eine viel größere Energiemenge, und um in diesem Falle die Lösung vom wirtschaftlichen Standpunkt aus brauchbar zu machen, muß man notwendigerweise hohe Spannungen benutzen.

Da aber solche hohe Spannungen schwer direkt zu verwenden sind, so muß man zu dem Hilfsmittel der Unterstationen greifen. In fast allen Anlagen, die schon einige Jahre alt sind, wird die Energie diesen Unterstationen mittels einfachen oder dreiphasigen Wechselstromes hoher Spannung zugeführt. Hier erniedrigen Transformatoren die Spannung, und rotierende Umformer liefern Gleichstrom, der alsdann einer parallel den beiden Fahrschienen liegenden und sehr sorgfältig isolierten Leitungsschiene zugeführt wird. Breite, federnde Bürsten nehmen von diesem dicken Leiter den starken Strom ab, welchen eine gewöhnliche Speiseleitung nicht aushalten könnte.

Jedoch werden die Anlage- und Unterhaltungskosten dieser Unterstationen, deren Maschinen dauernd in Bewegung sind und deshalb ständige Überwachung erfordern, sehr hoch, sowie die Linie einigermaßen lang ist, und infolgedessen ergibt sich natürlich das Problem, den fahrenden Zügen direkt den hochgespannten Strom zuzuführen.

Seit dem Jahre 1893 kann man bei Lugano, nicht ganz so lange auch bei Evian mit Dreiphasenstrom getriebene Motorwagen fahren sehen; aber erst von 1902 ab bürgerte sich das System wirklich in der Praxis ein und wird gegenwärtig mit Erfolg auch im Veltlin und beim Simplon-Tunnel benutzt.

Es schien im Prinzip zunächst sehr kühn, die zur Be-

wegung eines ganzen Zuges nötige beträchtliche Leistung mit Schleifbügeln von den Leitungsdrähten abnehmen zu wollen; erst die berühmten Versuche auf der Militärbahn von Berlin nach Zossen zeigten, daß die Lösung nicht unmöglich ist. Bei diesen Versuchen erhielt jeder der Motorwagen Strom mit einer Spannung von 10000 Volt; derselbe wurde im Wagen selbst in Strom von 3000 Volt Spannung transformiert und trieb direkt die auf den Achsen sitzenden Dreiphasenmotoren an. Bekanntlich erreichte man auf diese Weise die unheimliche Geschwindigkeit von 200 km in der Stunde. Um in dieser Weise zu fahren, braucht man eine gewaltige Leistung, schon allein um den Widerstand der Luft zu überwinden, die vor den Wagen einen Druck von ungefähr 200 Atmosphären ausübt.

Das Dreiphasensystem hat unbestreitbare Vorzüge; es scheint sich ganz besonders für Gebirgsbahnen zu eignen wegen der Leichtigkeit, mit welcher die Motoren als Generatoren arbeiten und auf abfallender Strecke Energie wieder gewinnen können. Es hat aber auch seine Nachteile; es macht drei Leitungsdrähte nötig und erfordert zur Erzielung eines guten Leistungsfaktors Motoren mit schmalem Interferikum also von ziemlich empfindlicher Konstruktion; außerdem haben diese Motoren fast unveränderliche Geschwindigkeiten, und man muß recht komplizierte Anordnungen treffen, um die Fahrgeschwindigkeit zu ändern.

Daher bemerkt man auch seit zwei bis drei Jahren ein ziemlich ausgeprägtes Bestreben, die Bahnlinien mit Einphasenstrom auszurüsten; die Erfindung der neuen Motoren für gewöhnlichen Wechselstrom, von denen vorher die Rede war, hat dies System praktisch brauchbar gemacht.

Die erste derartige Anlage ist in Amerika ausgeführt worden; gegenwärtig gibt es in Deutschland und Belgien ziemlich viele, die sehr befriedigend funktionieren. Dabei ist nur ein einziger Draht erforderlich, da die Rückleitung durch die Erde erfolgen kann; in gewissen Fällen wird

freilich die Rückleitung durch einen zweiten Draht vorgeschrieben. Die Energie kann unter sehr hoher Spannung zugeführt werden, und zur Verteilung lassen sich gewöhnliche feststehende Transformatoren benutzen.

Diese Motoren haben eine leicht und ohne Energieverlust regulierbare Geschwindigkeit und, wie wir gesehen haben, noch den großen Vorzug, daß sie vorkommenden Falls mit Gleichstrom gespeist werden können, wodurch es ermöglicht wird, daß Motorwagen von Vorortlinien, die mit Wechselstrom arbeiten, bis ins Innere der Städte auf den städtischen mit Gleichstrom betriebenen Linien fahren können.

Dies System, das sicher eine Zukunft besitzt, ist augenscheinlich noch im Anfangsstadium; gewisse Unvollkommenheiten müssen noch beseitigt werden; insbesondere muß man, damit es auch für den Betrieb schwerer Züge in Betracht kommen kann, erst Motoren herstellen, die mit viel höheren Spannungen arbeiten können als die jetzigen.

Zur gleichen Zeit, da der gewöhnliche Wechselstrom auf diese Weise wieder in Gunst kam, erhielt auch der Gleichstrom dank den Verbesserungen, welche die Benutzung hoher Spannungen gestatten, in den Augen seiner Anhänger die Überlegenheit wieder, die er verloren zu haben schien. Im Jahre 1903 baute Thury in Frankreich die Linie von Saint-Georges de Commiers nach La Mure, bei der ein Strom mit 2400 Volt Spannung durch Schleifbügel vier hintereinander geschalteten Motoren zugeführt wird; die beiden Leitungsdrähte und die Fahrschienen bilden zusammen ein Leitungsnetz mit zwei Überbrückungen. Seitdem sind noch andere Linien in Cöln, in Sainte-Marie-aux-Chênes und in Bellinzona in gleicher Weise ausgebaut worden.

Bei mehreren dieser Anlagen hat man, gleichviel welche Stromart im übrigen benutzt wird, die von einer einzigen Lokomotive bewegten Züge durch solche aus lauter Motorwagen zu ersetzen begonnen. Die Vorteile dieses Tausches sind zahlreich und ganz augenfällig; man vermehrt auf diese

Weise die nutzbare Adhäsion, vermindert das Zuggewicht beträchtlich und verteilt die gesammte erforderliche Leistung auf mehrere Motoren, die leichter zu regulieren sind als ein einziger übermäßig großer und kräftiger Motor allein.

Unerläßlich ist es, daß die Regulierung für alle diese Maschinen zusammen ganz gleichmäßig erfolgt; man hat deswegen mittels Relais wirkende Fahrschalter angebracht, die ziemlich einfach funktionieren und mit welchen jeder dieser Wagen versehen ist; diese Fahrschalter können, da sie nicht mehr direkt auf den Betriebsstrom wirken, geringe Abmessungen haben, und man kann dabei nur bewundern, daß sich eine so große Leistung mittels so kleiner Apparate regulieren und verteilen läßt.

So scheint es, daß dank den Fortschritten der Elektrizität die Transportmittel, welche durch die Erfindung der Dampfmaschine bereits einmal von Grund aus umgestaltet waren, in eine neue Phase lebhafter Entwicklung eingetreten sind; nicht nur in besonderen Fällen wie im städtischen Verkehr oder bei Eisenbahnen in Tunnels tritt die elektrische Beförderung an die Stelle derjenigen mit Dampfkraft, das Problem der vollständigen Elektrisierung der Eisenbahnen macht sich heute bereits in seinem ganzen Umfange geltend.

Die schwedische Regierung macht gegenwärtig sehr eingehende Versuche mit Einphasenstrom in der Absicht, ihr ganzes Eisenbahnnetz mit elektrischer Energie zu betreiben, die mittels der in den Wasserfällen des Landes vorhandenen 100000 Pferdestärken gewonnen werden soll; auch in der Schweiz und in Italien unterliegen ähnliche Projekte der Prüfung.

Schon jetzt kann in Gegenden, wo Wasserkräfte vorhanden sind, der Verzicht auf Dampflokomotiven wirtschaftlich sein. Es läßt sich jedoch weiter voraussehen, daß es überhaupt, in vielen Fällen sogar bei Anwendung von Kohle, vorteil-

hafter sein wird, in einer Zentrale von großer Leistungsfähigkeit die nötige Energie zu erzeugen und sie von dort an die fahrenden Züge zu verteilen, statt dieselbe gewissermaßen bruchstückweise in Lokomotiven zu erzeugen, deren Wirkungsgrad mäßig, deren Gewicht ungeheuer und deren Bedienung schwierig ist und die außerdem sehr viel Raum beanspruchen, auch während der Aufenthalte Dampfverbrauch haben, der sich als reiner Verlust darstellt, und die ferner das Zugmaterial durch Rauch und Ruß beschmutzen und verderben.

Kapitel 7.

Chemische und elektrische Energie.

1. Galvanische Kette und Thermodynamik.

Die wunderbaren Fortschritte der Induktionsmaschinen haben die galvanischen Elemente, abgesehen natürlich von den Akkumulatoren, zum Range von Apparaten erniedrigt, die vielleicht für manche bescheidenen häuslichen Anwendungen brauchbar sind, jedoch gänzlich ungeeignet für die Zwecke der Großindustrie. Man würde aber einen schweren Irrtum begehen, wollte man annehmen, daß diese hundert Jahre alte Elektrizitätsquelle für immer alles praktische Interesse verloren habe.

In Wirklichkeit erscheint ganz im Gegenteil die galvanische Kette als der wunderbarste Energieumformer, den wir kennen; dank der unsterblichen Entdeckung Volta's können wir chemische Energie unmittelbar in elektrische umwandeln, und man muß unbedingt die heute zur Stromerzeugung benutzten Verfahren für recht roh halten, wenn man sich im Besitz eines solchen Mittels weiß. Ist es nicht ganz eigenartig ungeschickt, zuerst die chemische Energie zu entwerten und sie auf die Form von Wärme herabfallen zu lassen, darauf den bescheidenen Teil, welchen das Carnot-Clausius'sche Prinzip in Form mechanischer Energie daraus zu gewinnen erlaubt, in Arbeit umzuwandeln und schließlich in einer letzten Umformung diese Arbeit zur Erzeugung von Elektrizität zu benutzen?

Wenn aber auch bei diesem Vergleich der beiden Methoden, die zur Erzeugung des elektrischen Stromes dienen können, theoretisch der Vorteil auf Seite der galvanischen Kette ist, so sprechen leider finanzielle Gründe mit, die das schließliche Resultat umkehren. Die Kette nutzt zwar den gelieferten Brennstoff in bewundernswerter Weise aus, aber der Brennstoff ist im allgemeinen Zink und dieses kostet zwanzigmal soviel wie Kohle; außerdem sind auch die Säuren, welche man benutzen muß, offenbar viel teurer als der Sauerstoff der Luft, der sich in den Feuerungen unserer Dampfmaschinen mit der Kohle verbindet.

Es ist jedoch zu bedenken, daß diese Gründe morgen schon ihr Gewicht verloren haben können; vom theoretischen Standpunkt aus steht dem nichts entgegen, daß man ein galvanisches Element erfindet, welches die chemische Energie der Kohle und des Sauerstoffs unmittelbar in elektrische umsetzt. In dem Augenblick, wo ein Physiker das Glück hätte, diese sensationelle Entdeckung zu machen, würde der Dampfmaschine das Todesurteil gesprochen sein.

Zahlreiche Versuche sind gemacht worden zur Lösung dieses brennenden Problem; einige davon haben wenigstens Hoffnung auf Erfolg erregt; so erhielt Jablochkoff, indem er Kohle in geschmolzene Nitrate tauchte, schon vor langer Zeit galvanische Elemente, in denen die Kohle der angegriffene Teil war, und seitdem sind viele andere Kombinationen versucht worden, die eines gewissen Interesses nicht entbehren. Indessen erscheint es nicht zweckmäßig, hier die ganze lange Reihe von Versuchen aufzuzählen, die im Grunde genommen noch zu keinem Ziele geführt haben; es ist besser, darzustellen, wie man sich gegenwärtig die Arbeitsweise der galvanischen Kette vorstellt.

Obwohl mehr als hundert Jahre seit der Erfindung dieser wunderbaren Vorrichtung verflossen sind, so ergeben sich doch

heute noch Meinungsverschiedenheiten ähnlich denen, deren Andenken die Geschichte der Wissenschaft aus dem Beginn des letzten Jahrhunderts bewahrt hat. Ohne den Versuch zu machen, eine eingehende historische Darstellung aller nach einander vorgeschlagenen Theorien zu geben, möchte ich lieber die Punkte genau bezeichnen, die als endgültig festgelegt gelten können, und auf diejenigen hinweisen, bei denen eine weitere Aufklärung wünschenswert erscheint.

Bleiben wir bei dem Verfahren, an das wir uns bisher gehalten haben und nehmen wir an, daß ein Physiker, der im Besitz derjenigen Kenntnisse von der Elektrizität ist, die wir uns im Vorhergehenden darzulegen bemühten, plötzlich vor ein Experiment gleich dem Volta'schen gestellt wird. Der erste Umstand, der seine Aufmerksamkeit erregt, würde sicherlich der sein, daß die Kette Energie liefert, und es würde ihm ganz selbstverständlich erscheinen, zuerst einmal nach dem Ursprung derselben zu suchen.

Da er ohne Zweifel sehr bald die chemische Reaktion bemerken würde, die sich in der Kette während des Stromdurchganges abspielt, so würde er sich die Frage vorlegen, ob nicht die elektromotorische Kraft der Kette, die man unabhängig von dem Begriff der elektrostatischen Potentialdifferenz als die Energiemenge definiert, welche von diesem Generator der Einheit der ihn durchfließenden Elektrizitätsmenge mitgeteilt wird, — ob diese elektromotorische Kraft nicht gerade das Äquivalent ist für die Energie, welche bei dem chemischen Vorgang, der die Strömung dieser Elektrizitätsmenge erzeugt, in Freiheit gesetzt wird.

Diese Frage haben sich verschiedene Physiker schon vor längerer Zeit gestellt: Zuerst Edmond Becquerel, dann Helmholtz in seiner unsterblichen Arbeit „über die Erhaltung der Kraft“ und nach diesen Lord Kelvin, der zum ersten Mal das Problem genau umschrieb, es bejahend löste und eine Formel angab, nach welcher sich die elektromotorische Kraft eines Elementes berechnen läßt, indem man

sie proportional setzt der algebraischen Summe der chemischen Energiemengen, die bei den Reaktionen verloren gehen, welche in der Kette stattfinden, wenn dieselbe von der Einheit der Elektrizitätsmenge durchflossen wird.

Was die experimentelle Seite betrifft, so werden die Untersuchungen von Favre immer klassisch bleiben; er war der erste, der im Jahre 1858 zeigte, daß entgegen der Thomson'schen Formel die „chemische Wärmetönung“, d. h. diejenige Wärmemenge, die bei den chemischen Reaktionen, welche sich in dem galvanischen Element abspielen, frei werden könnte, und durch welche der Energieverlust der die Kette bildenden Körper gemessen wird, nicht notwendig gleich der galvanischen Wärme zu sein braucht, d. h. gleich der erzeugten elektrischen Energie, in Wärmemaß gemessen. Aber weder Favre noch Raoult, welche beide die gleiche Tatsache gefunden hatten, glaubten oder wagten wenigstens diesen Gedanken offen auszusprechen, daß die Differenz zwischen diesen beiden Wärmemengen eine in Wirklichkeit nicht wegzuschaffende Tatsache sei, und bemühten sich, parasitäre Reaktionen aufzufinden, durch welche sich dieser Unterschied erklären ließ. Edlund war es, der zuerst darauf hinwies, daß hier ganz sicher eine Abweichung vorliege, aber aufzuklären vermochte er sie auch nicht weiter.

So war denn nach den Arbeiten dieser hervorragenden Physiker experimentell die Tatsache gesichert, daß die chemische Energie nicht notwendig gleich der elektrischen der Kette sein muß; aber die Tatsache selbst blieb nach wie vor geheimnisvoll. Das Prinzip der Erhaltung der Energie wurde hierdurch übrigens keineswegs umgestoßen; denn je nachdem ob die Differenz zwischen den beiden Energiemengen positiv oder negativ war, beobachtete man, daß das Element sich während seiner Tätigkeit erhitzte oder abkühlte.

Heute kann es uns nur natürlich erscheinen, wenn man sich, um weiter zu kommen, an das Carnot-Clausius'sche Prinzip hält; seine Allgemeingiltigkeit ist unbestritten, es erscheint als ein Hauptsatz der energetischen Theorie. Aber zuerst mußte ein derartiger Gedanke allerdings recht kühn erscheinen. Vor einigen dreißig Jahren wandte man dieses Prinzip nicht gern anders als auf den besonderen Fall eines Wärmemotors an und noch dazu eines Motors, der einen Kreisprozeß ganz spezieller Art durchmacht. Daher wurden auch Anfangs nur ziemlich schüchterne Versuche in dieser Richtung gemacht, und noch lange erhielten sich bei den bedeutendsten Physikern gewisse Zweifel an der Gültigkeit der auf diesen Satz gegründeten Betrachtungen.

Sicherlich gebührt Gibbs das unsterbliche Verdienst, das Reich der Thermodynamik erweitert und in dasselbe die fruchtbaren Gebiete der physikalisch-chemischen und elektrochemischen Erscheinungen eingefügt zu haben. In einem Kapitel seines berühmten Werkes „Über das Gleichgewicht heterogener Substanzen“, betitelt „Änderung der Gleichgewichtsbedingungen durch die elektromotorische Kraft“ und in dem zweiten Teil mit der Überschrift „Allgemeine Eigenschaften eines vollkommenen elektrochemischen Systems“ wendet er das Carnot'sche Prinzip ganz offen auf die galvanische Kette an. Er bemerkt ausdrücklich, daß man zu Unrecht die Entropieänderung vernachlässigt, die infolge irgend welcher anderer Wärmeentwicklung in einer auf konstanter Temperatur gehaltenen reversiblen Kette stattfinden kann, wenn man auch dafür sorgt, daß die Joule'sche Wärme verschwindend klein wird, und gelangt so zur Erklärung der bekannten Tatsachen. Aber das wenig verbreitete Gibbssche Werk hätte vielleicht nicht den Einfluß auf die Entwicklung der Wissenschaft gehabt, den es seitdem gewonnen hat, wenn nicht von der anderen Seite Helmholtz, und zwar unabhängig davon, zu gleicher Zeit dieselbe Frage in Angriff genommen hätte, und daraufhin seine heute als klassisch geltenden Ab-

handlungen über die Thermodynamik der chemischen Erscheinungen veröffentlicht hätte.

Er behandelt zuerst den einfachen Fall eines galvanischen Elementes, das von zwei Elektroden aus derselben Substanz gebildet wird, die in zwei verschiedenen konzentrierte Lösungen eines und desselben Elektrolyten tauchen. Die Wirkung des Stromes ist dann ein einfacher Transport des Metalls und eine Änderung der Konzentration. Die Konzentration läßt sich, während die Wassermenge konstant bleibt, durch einen reversiblen Kondensations- oder Verdampfungsvorgang auf den Anfangswert zurückführen. Was die anderen, irreversiblen Vorgänge betrifft wie z. B. den Joule-Effekt und die Diffusion, so kann man sie so klein machen, wie man will, und infolgedessen steht man hier Erscheinungen gegenüber, bei welchen die unmittelbare Anwendung des Carnot-Clausius'schen Prinzips durchaus berechtigt erscheinen muß. Man braucht in der Tat nur hinzuschreiben, daß bei konstant bleibender Temperatur weder Umformung von Wärme in Arbeit noch von Arbeit in Wärme durch Vermittlung reversibler Vorgänge stattfinden kann. Daraus läßt sich leicht ableiten, daß die elektromotorische Kraft gleich der Arbeit ist, welche man aufwenden muß, um die Konzentration konstant zu erhalten; diese Arbeit hängt nur von der Spannung des von diesen Lösungen abgegebenen Dampfes ab, und man gelangt auf diese Weise leicht zu einer Formel, welche die elektromotorische Kraft des Elementes mit der Dampfspannung der Lösungen verbindet.

Helmholtz ist noch weiter gegangen. Indem er den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik auf ein beliebiges galvanisches Element anwandte, stellte er eine heute klassisch gewordene Beziehung auf, welche den Unterschied zwischen der chemischen und galvanischen Wärmetönung mit der Änderung in Verbindung bringt, welche die elektromotorische Kraft des Elementes mit der Temperatur erleidet. Ist diese Änderung Null, so haben die beiden Wärmemengen denselben Wert.

Man kann jedoch die Frage von einem sehr allgemeinen Standpunkte aus betrachten, und das hat Helmholtz in der Tat getan. Er zeigt, wie eine ganz natürliche Erweiterung der Hauptsätze der Thermodynamik dazu führt, daß man sich die Energie eines Körpersystems aus zwei Teilen zusammengesetzt denken kann; der eine ist die freie Energie, die infolge dessen im Stande ist, alle möglichen Umformungen zu erleiden, insbesondere sich in äußere Arbeit umzuwandeln; der andere Teil ist dagegen gebunden und offenbart sich nur durch Wärmeentwicklung. Nun gehört die elektrische Energie zu derselben Klasse wie die mechanische; diese beiden Arten wandeln sich ohne Rest ineinander um, sie sind freie Energien. Was die chemische Energie betrifft, so lassen wir sie gewöhnlich, wenn sie zur Wirkung kommt, in die thermische Form herabsinken und messen sie auf diese Weise. In Wirklichkeit aber umfaßt dieselbe zwei Teile, einen, welcher gebundene Energie ist und einen anderen, welcher freie, direkt in elektrische verwandelbare Energie darstellt.

Dieser Teil bestimmt die chemischen Reaktionen, und er allein bildet das Äquivalent der elektromotorischen Kraft.

Es kommt übrigens häufig vor, daß die freie Energie sehr nahe gleich der gesamten Energie ist; Lippmann hat gezeigt, unter welchen Bedingungen man vollkommene Gleichheit erhält. Es kann sogar der Fall eintreten, daß die freie Energie negativ und infolgedessen die galvanische Wärme größer ist als die chemische Wärmetönung. In allen diesen Fällen gilt die allgemeine Regel: Die galvanische Energie ist gleich der freien Energie der chemischen Reaktionen, wenn dieselben ohne Strom vor sich gehen, und folglich ist der Überschuß der chemischen Wärmetönung über die galvanische Wärme gleich der gebundenen Energie, welche die Reaktion begleitet. Diese Anschauungsweise führt ohne Weiteres auf die schon angegebenen Formeln; aber die bisherige Einschränkung fällt weg; die Betrachtung gilt auch für irreversible Elemente.

Eine Vorstellung von der größten Tragweite ergibt sich

übrigens aus dieser Helmholtzschen Auffassung: Nämlich die Einteilung der Energiearten nach ihrem Range. Wenn diese Vorstellung richtig ist, so müssen ihre Folgerungen allgemein gelten und in jedem beliebigen Element verwirklicht sein.

Die hohe Bedeutung der Helmholtzschen Theorie hat verschiedene Forscher zu Versuchen veranlaßt, ihre Richtigkeit nachzuweisen. Nächst zahlreichen Versuchen von J. Moser, Czapsky und Gockel sind besonders die von Jahn anzuführen, welche experimentelle Ergebnisse in sehr guter Übereinstimmung mit den aus der Formel berechneten ergeben haben.

Eine sehr wichtige Erscheinung ist von Duhem untersucht und aufgeklärt worden, der übrigens einer der ersten von denen war, welche die allgemeinen Resultate von Gibbs und Helmholtz sich zu eigen machten und ihnen eine bestimmtere Fassung gaben. Duhem zeigte, daß die elektromotorische Kraft eines Elementes mit dem Druck variiert, und stellte eine inzwischen von Gilbault als richtig nachgewiesene Formel auf, welche über diese Veränderung Auskunft gibt.

Es gibt Elemente, bei denen die Leitfähigkeit des Elektrolyten nicht durch Auflösung sondern durch Schmelzung erzeugt wird, und man kann nicht von vornherein behaupten, daß derartige Elemente den gewöhnlichen vollkommen gleich zu stellen sind; wenn man z. B. der Vorstellung der elektrolytischen Dissoziation folgt, so ist es durchaus nicht selbstverständlich, daß die Schmelzung eine Dissoziation hervorruft, welche der durch Auflösung erzeugten gleich ist. Die Wärme spielt hier eine ganz besondere Rolle, da ohne die zur Schmelzung nötige Temperaturerhöhung das Element überhaupt nicht existierte. Offenbar ist es wichtig, zu untersuchen, ob sich bei den proelektrischen Elementen alles so verhält wie

bei den hydroelektrischen Ketten. So viel ich weiß, bin ich selbst der Erste gewesen, der die pyroelektrischen Elemente unter diesem Gesichtspunkt betrachtet und den Nachweis ihrer Gleichheit mit den anderen zu erbringen versucht hat; ich habe zu diesem Zweck verschiedene Elemente mit geschmolzenen Elektrolyten untersucht und konnte an einigen derselben die Helmholtzsche Formel bestätigen. Seitdem haben sich noch mehr Physiker mit ähnlichen Elementen beschäftigt, z. B. Brown, und ganz neuerdings ist Vincenzo Buscemi dabei zu Resultaten gelangt, die mit den meinigen vollkommen übereinstimmen.

Die Bestätigung dieses Gesetzes unter so verschiedenen Umständen ist ein zwingender Beweis; man muß also das Helmholtzsche Gesetz endgültig als richtig anerkennen, und damit rechtfertigt sich a posteriori auch die Erweiterung des Carnotschen Prinzips.

2. Die Entstehungsweise der elektromotorischen Kraft.

Die Ergebnisse der Thermodynamik haben sehr allgemeinen Charakter. Sie geben uns einen Überblick über die Vorgänge in der Kette; da sie jedoch über die innere Natur der Dinge nichts voraussetzen, so bieten sie uns keinen Aufschluß über den Mechanismus der Stromerzeugung. Und doch fordert unsere Wißbegier mehr; selbst die vorsichtigsten Physiker, die nicht ohne Skrupel in einem viel einfacheren Fall, etwa dem der Induktionsströme, ähnliche Fragen anschneiden würden, und die sich dort statt jeder Erklärung mit den Resultaten begnügen, welche die Anwendung der Prinzipien der Energetik liefert, wollen hier mehr.

Bei der Elektrolyse beobachtet man materielle Vorgänge, nämlich Transport von Materie, ferner chemische Reaktionen und gleichzeitig, als einen Teil des ganzen Systems, elektrische

Strömung. Wird man da nicht versucht, die eine Erscheinung durch die andere zu erklären? Die Klugheit rät vielleicht zur Vorsicht; wenn wir kaum wissen, woraus eigentlich ein elektrischer Strom besteht, der ohne die Komplikation materieller Zustandsänderungen in einem Draht fließt, ist es dann nicht zu viel verlangt, wissen zu wollen, was in einem viel komplizierteren System vorgeht? Aber wenn die Wissenschaft nur auf die Stimme der Klugheit hörte, so würde sie überhaupt nicht weiter kommen; die kühnen Eroberer, welche ihr Gebiet vergrößert haben, besaßen stets ein gut Teil Verwegenheit.

Wenn man hier also weiter vordringen will, so muß man sich auf Hypothesen stützen, die notwendigerweise immer einen etwas kühnen Eindruck machen werden, weil eine unmittelbare Bestätigung derselben nicht möglich ist. Erweisen sie aber nicht ihre Berechtigung, wenn sie eine bequeme symbolische Darstellung aller bekannten Tatsachen liefern, und sind sie nicht als sehr nützlich zu bezeichnen, wenn sie zu neuen Entdeckungen führen?

Nernst ist es, der zuerst auf den Gedanken kam, daß die neuen Theorien der Elektrolyse, die so viele bekannte Tatsachen erklären, oder wenn man lieber will, zusammenzufassen erlauben, auch eine Erklärung für die Entstehungsweise der elektromotorischen Kraft würden liefern können.

Der berühmte Physiker wandte zuerst auf Elemente aus zwei gleichen Metallen, welche in den gleichen aber verschieden konzentrierten Elektrolyten eintauchen, die van't Hoff'schen Vorstellungen vom osmotischen Druck an. Um jedoch die Erscheinungen in den gewöhnlichen Ketten darzustellen, braucht man noch eine neue Hypothese; diese fand sich in der zwar kühnen, aber außerordentlich fruchtbaren, Vorstellung des Lösungsdruckes oder der Lösungstension, welche die Metalle in Berührung mit Flüssigkeiten zeigen.

Es ist bekannt, wie es Nernst mittels dieser Vorstellung*)

*) Ich habe diese Theorie in meinem Buch „Die moderne Physik“ Seite 157 (deutsche Ausgabe Seite 128) auseinandergesetzt.

gelang, den Wert der Kontaktpotentiale zwischen Elektroden und Elektrolyten zu berechnen und daraus weiter den Wert der elektromotorischen Kraft eines galvanischen Elementes als Funktion der osmotischen Drucke, oder wenn man lieber will der Konzentrationen abzuleiten.

Man mag immerhin die Nernstsche Hypothese für sehr kühn halten, ihre Originalität und Leistungsfähigkeit läßt sich nicht bestreiten. Steht sie übrigens wirklich weiter abseits als die anderen, welche man bei allen denjenigen Betrachtungen zu Grunde legen muß, bei denen die Kenntnis der Moleküle und molekularen Wirkungen vorausgesetzt wird? Man kann z. B. die Nernstsche Theorie mit denjenigen Theorien der Capillarität vergleichen, welche wie die Laplacesche auf den Mechanismus der Molekularkräfte selbst eingehen, während die Helmholtzsche Theorie derjenigen analog wäre, mittels welcher Gauß durch Anwendung des Prinzipes der virtuellen Geschwindigkeiten für dieselben Erscheinungen eine synthetische Darstellung gibt. Kann man etwa leugnen, daß die Laplacesche Theorie gute Dienste geleistet hat?

Nur hinweisen können wir an dieser Stelle auf die interessanten Arbeiten von Leblanc, welcher annimmt, daß jedes Ion die ihm eigene Ladung in Folge einer gewissen in Volt meßbaren Reaktionskraft festhält, die mit dem Namen Haftintensität bezeichnet wird. Ebenso können wir auch der Abhandlungen von Riecke nur kurz gedenken, der in den letzten Jahren eine auf ähnlichen Vorstellungen ruhende Theorie entwickelt hat.

Ebenso wie es mit der Helmholtzschen Theorie geschah, muß es wünschenswert erscheinen, nachzuprüfen, ob auch die eben dargelegten Vorstellungen auf pyroelektrische Elemente anwendbar sind. Offenbar muß ja eine befriedigende Deutung des Mechanismus, durch welchen die chemische Energie elektrische liefert, sich ebensogut den pyroelektrischen wie den hydroelektrischen Elementen anpassen;

denn in diesen wie in jenen gehorcht die Energieumwandlung, wie nachgewiesen ist, den gleichen Gesetzen.

Es ist freilich in dieser Richtung nur wenig geschehen. Indessen habe ich 1890 doch zeigen können, daß es hier analoge Ströme gibt wie die dort durch Konzentrationsunterschiede erzeugten; man erhält dieselben, indem man z. B. zwei Silberelektroden in zwei geschmolzene Gemische von Silbernitrat und Natriumnitrat eintauchen läßt, wenn diese Gemische die beiden Bestandteile in verschiedenen Verhältnissen enthalten. Zweifellos ist es nicht ausgeschlossen, daß hier die Wärme eine der elektrolytischen analoge Dissoziation hervorbringt. Ich konnte feststellen, daß die Maximalpolarisation von Silber-, Eisen- und Goldelektroden in den Alkalinitraten und -chloraten dem Nullwert zustrebt, wenn die Temperatur sich der Zersetzungstemperatur des Elektrolyten nähert, und gelangte so zu der Vorstellung, daß Nitrate, wie z. B. Natriumnitrat, infolge der Temperaturerhöhung zweifellos das Bestreben zeigen, sich von selbst unter Bildung der beiden Ionen Natrium und Salpetersäurerest zu zersetzen. Danach könnte man sicherlich auch auf geschmolzene Elektrolyte ähnliche Hypothesen anwenden, wie sie Arrhenius für den Fall der Lösungen erdacht hat.

Die Thermodynamik hat uns den Ursprung der elektromotorischen Kraft gezeigt; Hypothesen wie die von Arrhenius und Nernst belehren uns über den Mechanismus, durch welchen dieselbe entsteht; zuletzt taucht nun noch die Frage nach dem Sitz dieser elektromotorischen Kraft auf.

Es ist wichtig, sich zunächst einmal die Bedeutung dieser Frage klar zu machen; sie brauchte, im allgemeinen wenigstens, keinen bestimmten Sinn zu besitzen. Bei einem auf Induktionswirkung gegründeten Generator, etwa einem Grammeschen Ringe, würde man von keinem Punkte be-

haupten können: Hier ist der Sitz der erzeugten elektromotorischen Kraft. Derartige induzierte elektromotorische Kräfte lassen sich sehr wohl in Elektrolyten erregen; man könnte also durchaus ohne Widerspruch a priori annehmen, daß dasselbe bei der Umformung chemischer Energie in elektrische gilt und daß also die elektromotorische Kraft nicht lokalisiert werden kann. Der Versuch scheint jedoch zu beweisen, daß die galvanische Kette sich anders verhält.

In der Tat ergibt sich als Resultat der Beobachtungen, daß eine elektrostatische Potentialdifferenz zwischen den beiden Polen einer offenen Kette besteht; höchstens könnte man bezüglich derjenigen Versuche einen Vorbehalt machen, bei denen diese Potentialdifferenz erst mittels eines Kondensators nachgewiesen wird, der einen gewissen Ladungsstrom erfordert und vielleicht einen dauernden Strom zur Ausgleichung des Elektrizitätsverlustes nötig macht. Läßt man diesen Einwurf bei Seite, so ist man, da jeder der Leiter, aus denen die Kette besteht, ein konstantes Potential haben muß, zu der Annahme gezwungen, daß an den verschiedenen Kontaktstellen Potentialsprünge bestehen; danach würde die elektromotorische Kraft der Kette in Joule pro Coulomb durch dieselbe Zahl gemessen werden, welche die algebraische Summe dieser Potentialsprünge in Volt darstellt.

Es ergibt sich also die Aufgabe, zu bestimmen, ob an jeder Kontaktfläche eine solche Potentialdifferenz vorhanden ist, und wie groß sie ist. Damit haben wir das schon so oft behandelte Voltasche Problem, das übrigens etwas zu speziell ist, als daß es hier in seinen Einzelheiten besprochen werden könnte.

Wir wollen hier nur bemerken, daß die Vorstellung Voltas, der die Potentialdifferenz allein an die Kontaktfläche der Metalle verlegte, sicher unrichtig ist, da es Ketten gibt, bei denen beide Elektroden aus demselben Metall*) sind. Es

*) Es hat ein gewisses historisches Interesse, daran zu erinnern, daß dieser Gegenbeweis zuerst im Jahre 1843 von dem

hindert aber nichts, anzunehmen, daß in den gewöhnlichen Ketten der Potentialsprung an der Kontaktstelle der Metalle gegeneinander zu den übrigen Sprüngen hinzukommt; die klassischen Untersuchungen von Lord Kelvin und die beachtenswerten Arbeiten von Pellat scheinen denselben außer Zweifel zu setzen.

Die Thermodynamik liefert hierüber keinen Aufschluß; sie gibt ja nur die gesamte elektromotorische Kraft an, gleichviel welches ihr Ursprung und Sitz sein mag. Die Theorie von Nernst, ausgebaut auf der von dem ausgezeichneten Physiker angegebenen Grundlage, führt dagegen dazu, die Potentialdifferenz an den Oberflächen zu suchen, wo sich der Ionenaustausch vollzieht, und sie liefert sogar von vornherein den Wert dieser Potentialdifferenzen. Die experimentelle Bestätigung ist jedoch schwierig, wenn nicht unmöglich; tatsächlich geben die meisten Experimente nur eine Summe von mehreren solchen Differenzen, und wie Couette gezeigt hat, scheint es, daß wenigstens bei der Mehrzahl der Versuche die Bestätigung nur in den Fällen stichhält, wo die Folgerungen der Theorie mit denen der thermodynamischen Theorie identisch werden.

Die vorhergehenden Bemerkungen erlauben einige Schlußfolgerungen.

damaligen Prinzen Louis Napoléon, dem späteren Kaiser Napoléon III., während seiner Gefangenschaft in der Festung Ham erbracht worden ist (Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Bd. 16: Prüfung der physikalischen und der rein chemischen Theorie der galvanischen Kette, S. 1098 und 1180). „Ich baute mir“, sagt er, „nach dem Prinzip der konstanten Daniellschen Kette zwei Elemente, aber mit einem einzigen Metall; ich tauchte einen Kupferzylinder in eine Flüssigkeit aus Wasser und Salpetersäure; das Ganze stand in einem porösen Tonrohr. Ich umgab dieses Rohr in einem andern Zylinder mit Kupfer, welches in verdünnte Schwefelsäure tauchte usw.“ Er zog daraus den Schluß: „daß in einem galvanischen Element die Ursache der Elektrizitätserregung rein chemischer Natur ist, da zur Erzeugung eines Stromes nicht unbedingt zwei Metalle nötig sind.“

Die thermodynamische Theorie erscheint uns heute als fest und unerschütterlich begründet; sie ruht auf Grundlagen, die man nicht antasten darf, ohne das ganze Gebäude ins Wanken zu bringen, das von allen im vergangenen Jahrhundert errichteten das am festesten gefügte zu sein scheint. Diese durch das Experiment bestätigte Theorie stellt eine der merkwürdigsten und interessantesten Erläuterungen jener Prinzipie dar. In der erweiterten Form, wie sie seit Helmholtz besteht, vermag sie uns bemerkenswerte Beziehungen zwischen der elektromotorischen Kraft eines Elementes und anderen physikalischen Größen zu liefern, aber sie kann uns keine Auskunft weder über den Mechanismus der Erzeugung noch über den Sitz der elektromotorischen Kraft geben.

Es würde unvorsichtig sein, wollte man das Schicksal voraussagen, das die Zukunft denjenigen Theorien bereiten wird, welche wie die von Arrhenius, Ostwald und Nernst auf gewissen Hypothesen über die Konstitution der Materie ruhen. Sie sind offenbar an diese Vorstellungen gebunden, liefern aber Beziehungen, die zuweilen von den Hypothesen selbst unabhängig sind, und bilden sicherlich das beste Mittel, zahlreiche und wichtige bisher getrennte Tatsachen miteinander zu verknüpfen. Übrigens haben sie auch — und tun dies noch immer weiter — zu Arbeiten ersten Ranges angeregt. In dieser Hinsicht sind die Dienste, welche sie geleistet haben, unbestreitbar, und man kann gewiß ohne Übertreibung behaupten, daß sie in der Geschichte der Wissenschaft zu den geistreichsten und fruchtbarsten Hypothesen gezählt werden müssen, die jemals erdacht worden sind.

3. Die Akkumulatoren.

Während die primären galvanischen Elemente fast gar nicht mehr benutzt werden, nehmen im Gegenteil die sekundären Elemente oder Akkumulatoren einen hervorragenden Platz in der modernen Technik ein.

Mit Hilfe eines Akkumulators formt man die elektrische Energie eines Gleichstroms in potentielle um, die als chemische Energie aufgespeichert wird, und erhält in dem gewünschten Augenblick von demselben fast die gesamte Menge der ursprünglichen elektrischen Energie zurück.

In dem ersten Teile dieses Vorganges, bei der Ladung, wirkt der Akkumulator als Empfänger. Die beiden Polplatten, welche mit den Klemmen einer Dynamomaschine verbunden werden, polarisieren sich infolge der Elektrolyse der leitenden Flüssigkeit, in welche sie eintauchen; dabei tritt eine elektromotorische Kraft auf, welche dem Stromdurchgang entgegenwirkt, und auf diese Weise wird elektrische Energie verbraucht.

Wenn man die Verbindung mit der Dynamomaschine unterbricht und die beiden Platten durch einen Leiter verbindet, so entsteht ein Strom in entgegengesetzter Richtung; dies ist die zweite Phase, in welcher der Akkumulator Energie abgibt, indem er sich entlädt, wobei die chemischen Reaktionen, die sich in ihm abspielen, nach und nach alles in den ursprünglichen Zustand zurückführen.

Es ist kaum nötig zu bemerken, daß es Energie und nicht Elektrizität ist, was in dem Akkumulator aufgespeichert wird. Während der Ladung fließt die gesamte Elektrizität, welche hineinströmt, auch wieder heraus. Der Akkumulator ist im Grunde genommen ein galvanisches Element, das man mittels Stromdurchgang regenerieren kann; er bildet kurz gesagt ein reversibles Element.

Damit eine solche Anordnung wirklich Dienste leisten kann, muß die Kapazität einer Zelle, d. h. die Elektrizitätsmenge, die sie bei der Entladung praktisch abgeben kann, ziemlich groß und der Wirkungsgrad ebenfalls nicht gering sein, d. h. man muß den größten Teil der aufgewandten Energie wiedererhalten können.

Gegenwärtig wird noch fast ausschließlich der Bleiakkumulator benutzt. Um die ersten Anfänge dieser Sekundär-

elemente zu finden, muß man bis zum Jahr 1803 zurückgehen; damals hatte Ritter beobachtet, daß man mit Blei besonders ausgesprochene Wirkungen erhält; aber bis zu den Arbeiten von Planté blieb der Rittersche Versuch gewissermaßen bloß eine Merkwürdigkeit, die keine praktische Anwendung zu gestatten schien.

Es ist bekannt, wie nach der Entdeckung von Planté die Untersuchungen von Montaud, Kabath, Reynier, Faure und zahlreicher anderer Elektriker zu den jetzt gebräuchlichen Typen geführt haben, die sich in einigen Einzelheiten voneinander unterscheiden, in den wesentlichen Teilen aber stets übereinstimmen.

Bei dem Plantéschen System werden die Platten von einem Gerüst gebildet, das sich infolge zahlreicher Ladungen und Entladungen auf derjenigen Platte, die man als positive bezeichnen kann — denn sie bildet die positive Elektrode während der Ladung und wird zum positiven Pol während der Entladung — mit einer sehr dünnen Schicht Bleisuperoxyd bedeckt, während sich auf der negativen Seite reines Blei bildet, das lockerer ist als das ursprüngliche Metall.

Die Platten des Faureschen Systems werden von einem Gerüst aus einer nicht oxydierbaren Legierung von Blei und Antimon gebildet, das in Zellen geteilt ist, in denen sich in Form zusammengepreßter Kuchen die aktive Masse befindet, die aus Bleioxyd mit einem geeigneten Bindemittel besteht.

Die zahlreichen Arbeiten, die in den letzten Jahren über den Bleiakkumulator veröffentlicht worden sind, haben die gleich zu Anfang gegebene Deutung der in ihm stattfindenden chemischen Vorgänge bestätigt. Blei, Schwefelsäure und Bleisuperoxyd verwandeln sich in ein System bestehend aus Wasser und Bleisulfat, welches letztere die beiden Elektroden bedeckt. Diese Reaktion, die in gewöhnlicher Weise umkehrbar ist, erfolgt im umgekehrten Sinne, wenn das Element Strom abgibt. Aber die Anwendung der Ionentheorie erlaubt gewissermaßen, den Gesamtvorgang noch weiter in seine

Teile zu zerlegen; man kennt infolgedessen heute genau die Zusammensetzung der beiden Elektroden und des Elektrolyten in jedem Zustand der Ladung und Entladung.¹⁴⁾ Insbesondere Jumau hat in seinem ausgezeichneten Buch „die elektrischen Akkumulatoren“ den jetzigen Stand dieser Frage, die er selbst durch eigene Arbeiten hat aufklären helfen, sehr gut zusammenfassend dargestellt.

Man hat auf den Akkumulator ebensowohl die thermodynamische wie die osmotische Theorie angewandt. Beide Theorien haben wertvolle Aufschlüsse geliefert; insbesondere lehren sie den Einfluß der Konzentration auf die Größe der elektromotorischen Kraft kennen.

Infolge all dieser Bemühungen haben die Bleiakkumulatoren einen hohen Grad der Vollendung erreicht. Es gibt heute Akkumulatortypen, die 40 bis 50 Wattstunden pro Kilogramm Totalgewicht aufspeichern können. Der Wirkungsgrad, bezogen auf die Elektrizitätsmenge, erreicht bis zu 95 Prozent; auf die Energiemenge bezogen, ist er merklich geringer, da die Ladung immer bei höherem Potential stattfindet als die Entladung; in der Praxis beträgt er ungefähr 70 Prozent.

Die Akkumulatoren sind empfindliche Apparate, die vorsichtig behandelt werden müssen. Bei der Ladung wie bei der Entladung darf man eine gewisse Stromstärke nicht überschreiten. Außerachtlassen der Verhaltensmaßregeln, welche die Fabrikanten immer mitzugeben pflegen, führt eine rasche Zerstörung herbei. Die positiven Platten, welche zu starke Auflockerung erfahren, zerfallen zu Staub; übrigens ist ihre Lebensdauer immer viel kürzer als die der negativen Platten.

Zur Ladung einer Batterie kann man zwei verschiedene Verfahren einschlagen. Entweder man verbindet sie mit einer Dynamomaschine, deren Strom man konstant hält, deren Erregung man also variieren muß, weil die elektromotorische Gegenkraft in demselben Maße steigt wie die Ladung wächst. Oder aber man hält während des ganzen Ladungsvorganges

die Potentialdifferenz konstant auf dem Maximalwert, den die elektromotorische Gegenkraft am Ende der Ladung annehmen muß; in diesem Falle muß die Stromstärke sich ändern.

Die zweite Methode ist viel rationeller als die erste; sie gibt bei gleicher Ladungszeit einen besseren Wirkungsgrad, sichert den Platten längere Lebensdauer und erlaubt, die Akkumulatoren bei Bedarf viel schneller aufzuladen.

Mit der nötigen Schonung behandelt, liefert eine Batterie sehr gleichmäßige und befriedigende Resultate. Nichtsdestoweniger haften den Bleiakkulatoren einige Mängel an, die in ihrem Wesen begründet sind und nicht durch die Geschicklichkeit des Konstrukteurs beseitigt werden können. Die mangelnde Homogenität der Platten bringt verschiedene Übelstände mit sich. Es können sich lokale Ströme bilden, an den Lötstellen treten thermoelektrische Erscheinungen auf und Peltier-Wirkungen sind zu befürchten. Ersatz des Metalls durch Oxyde ist sehr vorteilhaft, weil er die Kapazität vermehrt; aber die Oxyde sind keine besonders guten Leiter der Elektrizität und in dieser Hinsicht den Metallen unterlegen. Das sind die Ursachen, welche den ziemlich großen Unterschied zwischen dem Wirkungsgrad bezüglich Ladungsmenge und dem bezüglich der Energiemenge bedingen. Ein sehr beträchtlicher Teil der Energie geht in Form von Wärme verloren sowohl bei der Ladung wie bei der Entladung.

Der den Akkulatoren am häufigsten gemachte Vorwurf ist der eines zu großen Gewichtes. Gewiß ist es sehr unangenehm, daß dasjenige Metall, welches die tiefgehendsten Veränderungen bei der Ladung erfährt und deshalb die größten Energiemengen aufspeichern kann, gerade das Blei sein muß, einer der dichtesten Körper der Chemie. Für diejenigen Zwecke, welche einen Transport der Elemente erfordern, ist dieser Übelstand sehr störend. Man darf jedoch seine Bedeutung nicht übertreiben.

Für Automobilzwecke baut man heute Batterien, die nur 30 Prozent des Gesamtgewichtes wiegen und ganz leicht ohne Neuladung gegen 100 km mit 20 km Geschwindigkeit in der Stunde zurückzulegen gestatten. Das ist schon eine sehr anerkennenswerte Leistung.

Trotzdem hat die Erfindung eines bei gleicher Kapazität leichteren oder mit besserem Wirkungsgrad arbeitenden Akkumulatorensystems seit einer Reihe von Jahren zahlreiche Erfinder beschäftigt. Es würde zu weit führen, eine historische Übersicht über alle Versuche, die gemacht worden sind, zu geben. Wir können nur kurz auf einige hinweisen. Entweder hat man unter Beibehaltung der Schwefelsäure als Elektrolyt, das Bleigerüst durch andere Metalle wie z. B. Zink zu ersetzen gesucht, oder man hat mannigfaltige Kombinationen gebildet, die zusammen mit verschiedenen Metallen verschiedenartige Elektrolyte, Chloride oder alkalische Lösungen, enthielten. G. Darrieus hat als erster daran gedacht, Sekundärelemente besonderer Art zu benutzen, bei denen der Elektrolyt nicht an den Reaktionen teilnimmt und nur die beiden Elektroden durch Ladung und Entladung sich ändern. Zu dieser Klasse von Elementen gehört der von Edison 1901 erfundene Akkumulator, der sicherlich die meisten Hoffnungen erregt hat.

Der Edison-Akkumulator ist ein Element bestehend aus Eisen, Kalilauge und Nickeloxyd; die chemischen Reaktionen in demselben sind noch sehr in Dunkel* gehüllt. Im allgemeinen kann man jedoch sagen, daß während der Ladung das Eisen sich oxydiert und das Nickeloxyd in eine niedrigere Oxydationsstufe übergeht, während bei der Entladung der umgekehrte Vorgang erfolgt. Die Pottasche bleibt ungeändert, und man kann ihre Menge ohne Nachteil verkleinern.

*) In einer bemerkenswerten Arbeit hat Jumau sehr übersichtlich die Fragen zusammengestellt, die noch in bezug auf diese Nickelakkumulatoren zu lösen sind, und hat selbst einige wichtige Punkte aufgeklärt.

Diese Elemente haben eine elektromotorische Kraft von ungefähr 1,5 Volt und eine Kapazität, welche merklich gleich der des Bleiakкумуляtors ist, aber einen zweifellos kleineren energetischen Wirkungsgrad. Ganz neuerdings hat Edison Untersuchungen über einen ähnlichen Akkumulator in Angriff genommen, bei dem das Nickel durch Kobalt ersetzt werden soll.

Es lassen sich noch andere Kombinationen anführen, die für die Praxis freilich nicht brauchbar sind, aber ein gewisses theoretisches Interesse bieten.

So haben Cailletet und Colardeau den geistreichen Gedanken gehabt, Sekundärelemente unter Druck herzustellen, und sind dabei zu Elementen mit ungeheurer Kapazität gelangt.

Bei einem Druck von 600 Atmosphären kann man bis zu 176 Ampèrestunden pro Kilogramm Metall erhalten, indem man als Elektroden Palladiumschwamm benutzt.

Leider verringert sich diese Kapazität außerordentlich, wenn man sie auf das Gesamtgewicht des Elementes bezieht, in welches der Gasbehälter mit eingeschlossen ist. Der Wirkungsgrad ist überdies mäßig, und da sich zur Herstellung von Akkumulatoren mit kondensiertem Gas, deren Kapazität mit dem Druck wächst, wie es scheint nur edle Metalle eignen, die durch die Berührung mit dem Elektrolyten und seinen Zersetzungsprodukten keine chemische Änderung erleiden, so ist der Preis dieser Elemente viel zu hoch, als daß dies interessante Experiment zu wirklich brauchbaren Ergebnissen führen könnte.

Es sei mir gestattet, an dieser Stelle daran zu erinnern, daß ich selbst eine besondere Klasse von reversiblen Elementen untersucht habe, welche die Besonderheit zeigen, daß die Elektroden während der Ladung wie auch während der

Entladung vollkommen metallisch bleiben, wodurch es theoretisch wenigstens möglich wird, die Energieverluste beliebig klein zu machen. Man erhält diese Ketten, indem man als Elektroden Quecksilber und als Elektrolyten die Lösung eines Alkalijodids, z. B. Jodnatrium, benutzt; vorausgesetzt daß die Stromdichte nicht zu groß ist und die positive Elektrode eine bedeutend größere Oberfläche besitzt als die negative, bildet sich kein Niederschlag auf der Anode, die vollkommen rein bleibt; die Flüssigkeit, welche das gebildete Quecksilberjodid in dem Alkalijodid gelöst enthält, bleibt klar, während das Natrium sich fast vollständig mit der Kathode verbindet, falls die Temperatur nicht zu hoch steigt.

Dieses Element besitzt eine elektromotorische Kraft von 1,85 Volt, die unabhängig ist von der Temperatur. Aus den Prinzipien der Thermodynamik folgt, daß unter diesen Umständen die ganze chemische Energie, welche man einer solchen Kette mitteilt, in elektrischer Form wiedergewonnen werden kann.

Es ist leicht einzusehen, daß bei flüssigen Elektroden die Reaktion sehr vollständig vor sich gehen kann, und daß man deswegen keine großen Quecksilbermengen zu verwenden braucht. Leider sind aber die Flüssigkeiten unbequem zu handhaben, und außerdem muß man, wenn man das Element vor der Benutzung geladen aufbewahren will, unbedingt das Amalgam entfernen, das sich an der Kathode in Berührung mit der Flüssigkeit bildet, die es auf die Dauer etwas angreift. Diese Umstände bewirken, daß die genannten Elemente wenigstens gegenwärtig in der technischen Praxis keine Verwendung finden können; vielleicht aber sind sie noch verbesserungsfähig.

Die verschiedenen Anwendungen der Akkumulatoren sind allgemein bekannt; man benutzt heute gern in den Laboratorien und Werkstätten, die nur zeitweise Strom

brauchen, kleine transportable Batterien. Die Automobile und manche Straßenbahnen machen von diesen wertvollen Apparaten Gebrauch.

In der Großindustrie haben sie indessen nicht ganz gehalten, was sie zu versprechen schienen. Man hatte sie z. B. als Transformatoren benutzen wollen, ein Gedanke, der leicht ausführbar erschien, da die Elemente, aus denen sich eine Batterie zusammensetzt, beliebig zusammengeschaltet werden können, um entweder die Spannung oder den Stromverbrauch zu ändern. Da sie aber nicht ohne starke Abnutzung solche verschiedenartigen Schaltungen ertragen können, so haben sie bei dieser Form der Benutzung schlechte Resultate ergeben. Gegenwärtig werden sie insbesondere zur Bildung sogenannter Pufferbatterien benutzt.

In jeder Anlage ist es zweckmäßig, eine Anordnung zu besitzen, vermittels deren man die Energie, welche zu gewissen Zeiten über den Bedarf hinaus erzeugt wird, aufspeichert, um sie in dem Augenblick abgeben zu können, wo der Verbrauch wächst.

Diese Idee ist bei den Wasserkraftanlagen in dem alten Mühlenwehr verwirklicht; bei den Dampfmaschinen spielen die Schwungräder in gewissem Sinne die Rolle des Energiereservoirs, durch welches die Nutzbarmachung des Überschusses an mechanischer Energie hinausgeschoben wird.

Wenn man eine Akkumulatorenbatterie parallel schaltet zu einem mit konstantem Potential arbeitenden Leitungsnetz, so wird sie ebenfalls bald Energie aufnehmen, wenn nämlich die elektromotorische Kraft der Dynamomaschine höher ist, bald dagegen Energie abgeben, indem sie die Maschinen unterstützt, wenn dieselben versagen.

In der Praxis ist es zwecks guter Ausnutzung dieser Batterien angezeigt, bei der Ladung einen Spannungserhöher und bei der Entladung einen Spannungserniedriger zu benutzen; welches die besten Bedingungen hierfür sind, hat Loppé sehr klar und bestimmt angegeben, und Thury hat

automatisch wirkende Apparate konstruiert, welche einen vollkommenen Spannungsausgleich in dem Leitungsnetz sichern.

4. Die Elektrochemie.

Man braucht mindestens ein ganzes Buch, wenn man, selbst nur in aller Kürze, eine getreue Schilderung der Anwendungen der Elektrizität in der Chemie geben wollte; die elektrochemische Industrie, die erst seit kaum dreißig Jahren besteht, ist mit unerhörter Geschwindigkeit emporgediehen und hat sich ein Gebiet erobert, das noch mit jedem Tage weiter wächst. Kaum jemals hat man eine so energische Entwicklung erlebt; die Fabrikationsmethoden fast aller gebräuchlichen Stoffe ändern sich, und überall dringt in der einen oder anderen Form die Elektrizität ein.

Wir können uns hier nicht an eine eingehende Untersuchung wagen, die übrigens nur ein Chemiker von Beruf wirklich ausführen könnte; wir werden uns vielmehr mit einigen kurzen Hinweisen begnügen, die einen Begriff davon geben sollen, welch tiefen Einfluß die Fortschritte der Elektrochemie auf die chemische Wissenschaft ausgeübt haben.

Die elektrische Energie wird in zwei scharf voneinander getrennten Arten benutzt. Entweder verwandelt man sie unmittelbar in chemische Energie, um auf elektrolytischem Wege teils reine Metalle, teils verschiedene mehr oder minder zusammengesetzte Verbindungen herzustellen; oder aber man läßt sie sich einfach in Wärme umformen, jedoch unter solchen Bedingungen, daß eine gewaltige Wärmemenge innerhalb eines beschränkten Raumes auftritt und die zu verarbeitenden Stoffe auf außerordentlich hohe Temperaturen bringt, bei denen dieselben sehr lebhaft aufeinander reagieren.

Die Elektrolyse, die natürlich Gleichstrom erfordert, hat schon vor langer Zeit ihren bescheidenen Einzug gehalten,

nämlich seit der Erfindung der Galvanoplastik. Es hat keinen Zweck, hier die verschiedenen Verfahren der Vernicklung, Verkupferung, Versilberung und Vergoldung eingehend zu behandeln, die sich ganz normal entwickelt haben, aber außer einigen Vervollkommnungen im einzelnen doch im ganzen dieselben geblieben sind, die sie zu Anfang waren. In den größeren Fabriken haben Dynamomaschinen die Elemente ersetzt, und da man nur Potentialdifferenzen zwischen 1 und 4 Volt zur Abscheidung der verschiedenen Metalle braucht, so sorgt man dafür, eine geeignete Anzahl von Zersetzungströgen hintereinander zu schalten, welche sich in die viel höhere von der Generatormaschine gelieferte Spannung teilen.

Eine besonders interessante Anwendung der Galvanoplastik ist die Reinigung des Kupfers. Bemerkenswerter Weise hängt die Bedeutung, welche in unseren Tagen die elektrolytische Reinigung des Rohkupfers erhalten hat, gerade mit den Bedürfnissen der Elektrizität aufs engste zusammen. Für die früheren Zwecke genügte das unreine, auf metallurgischem Wege gewonnene Kupfer fast immer; die Elektrizität verlangte jedoch mehr. Die Wickelungen der Maschinen erfordern Drähte von hoher Leitfähigkeit, und der Widerstand des Kupfers wächst stark, so wie es Verunreinigungen enthält. Auf diese Weise ist eine bedeutende Industrie entstanden, in der heute mehr als 250000 Tonnen Kupfer jährlich nach einem sehr einfachen Verfahren behandelt werden. Das unreine Kupfer dient als positive Elektrode in einem Bad von Kupfersulfat, und das Metall wird durch den Strom auf dünne Kupferplatten übertragen, welche die negative Elektrode bilden.

Trotz zahlreicher Versuche ist es noch nicht gelungen, im Dauerbetriebe die gebräuchlichen Metalle elektrolytisch darzustellen; die verwickelten sekundären Reaktionen, welche in der Mehrzahl der Fälle dabei auftreten, bereiten Schwierigkeiten, an denen der Scharfsinn der Erfinder bisher gescheitert ist. Für ein Metall hat jedoch die elektrolytische

Methode vollen Erfolg gehabt und die viel umständlicheren und teureren chemischen Verfahren vollständig verdrängt; dieses Metall ist das Aluminium, dessen wertvolle Eigenschaften ja bekannt sind. Im Jahre 1886 kostete das nach der klassischen Methode von Sainte-Claire Deville hergestellte Aluminium 80 frs. (65 Mark) das Kilogramm; heute wird es dank den Arbeiten von Minet und Héroult für ungefähr 2,50 frs (2 Mark) verkauft und hat sich für die Zwecke des täglichen Lebens eingebürgert. Es wird erhalten durch die elektrolytische Zersetzung von Tonerde, die in Kryolith gelöst ist, wobei die Masse durch den Strom selbst geschmolzen wird.

Ein anderes Gebiet, in welches die Elektrolyse siegreich eingedrungen ist, ist die Darstellung des Chlors und seiner Verbindungen im Großen; „die nächste Generation wird all ihr Chlor elektrolytisch gewinnen“ sagte 1895 der berühmte Schweizer Chemiker Lunge, und es scheint, daß die Erfüllung schneller kommt, als diese Voraussage annahm. Gegenwärtig arbeiten mehrere Fabriken nach einem Verfahren, welches durch Zersetzung von Chlornatrium oder Chlorkalium entweder einerseits gasförmiges Chlor, welches an der Anode entweicht, wenn man den elektrolytischen Trog mit Löchern versieht, und andererseits das sich an der Kathode absetzende Alkali liefert; oder aber, wenn man das Diaphragma wegläßt, die als Bleichmittel dienenden Chlorsalze ergibt, welche durch Vereinigung von Chlor und Alkali entstehen. Die älteren chemischen Verfahren bestehen noch weiter, weil sie seit langem fest geregelte Betriebe besitzen und in großen Fabriken ausgeübt werden, die mit mannigfaltigen Industrien in Verbindung stehen wie Glas- und Kristallfabriken oder Seifenfabriken, welche die Pottasche und Soda verbrauchen; ihr Widerstand beginnt jedoch zu schwinden.

Sie haben ihrem jungen Konkurrenten schon die Darstellung fast der ganzen Menge Chlorat und Perchlorat des Handels abgetreten. Die Vorteile der Elektrolyse liegen hier

offen zu Tage. Bei der alten rein chemischen Methode gingen fünf Sechstel des im Chlorkalium enthaltenen Chlors vollständig verloren in Form von Chlorcalcium; die elektrolytische Reaktion dagegen beschränkt sich auf die Anlagerung des Sauerstoffs des Wassers an das Chlorkalium, welches ganz und gar in Chlorat übergeht. Dies nahezu vollständige Ausbleiben von Nebenprodukten ist eine der interessantesten Eigentümlichkeiten der neuen Methoden.

Nach einigen Fehlschlägen hat sich die Elektrolyse auch einen großen Teil des reichen Gebietes der organischen Chemie erobert; wir können nicht alle Substanzen anführen: verschiedene Farbstoffe, Cyanverbindungen, Chloroform, Jodoform usw. werden gegenwärtig auf elektrischem Wege gewonnen. Gerade jetzt vollzieht sich ein schneller Umschwung und man kann deutlich sehen wie die Elektrizität, diese gefügige Dienerin, deren Leistungen so leicht zu messen und zu regulieren sind, sich eine mit jedem Tage an Bedeutung wachsende Stellung in denjenigen Industrien erringt, bei denen die Genauigkeit und Exaktheit der Laboratoriumsversuche erfordert wird.

Parallel den elektrolytischen Methoden haben sich die elektrothermischen entwickelt; in ihrem Wesen sehr verschieden voneinander, sind sich beide in der Anwendung doch sehr ähnlich, und oft kann man sehen, wie ein und dieselbe Fabrik mit fast denselben Apparaten Aluminium und Metallcarbide herstellt.

Der Ursprung dieser neuen an unerwarteten Ergebnissen so fruchtbaren Chemie, die man mit Recht als Chemie der hohen Temperaturen bezeichnet, datiert von der Erfindung des elektrischen Ofens.

Dieser wunderbare Apparat ist noch nicht alt, und doch ist seine ziemlich umfangreiche Geschichte recht schwer zu schreiben; seine Anfänge insbesondere sind in ein gewisses Dunkel gehüllt. Sicher hat man schon seit langer Zeit daran

gedacht, die hohe Temperatur des Lichtbogens zur Erzeugung chemischer Reaktionen nutzbar zu machen, aber zweifellos erschienen erst auf der Internationalen Elektrizitäts-Ausstellung von 1881, von der überhaupt so viele Entdeckungen datieren, die ersten systematisch zu dem Zweck, auf diese Weise Hohlräume zu erhitzen, konstruierten Apparate. Die Gebrüder Siemens einerseits und Clerc andererseits stellten Öfen aus, in denen sie Silicium und Kalk verflüchtigten.

Es wäre ein müßiges Unternehmen, an dieser Stelle die Namen aller Konstrukteure und aller Gelehrten anzuführen, welche in den verschiedenen Ländern Anordnungen von hoher Vollkommenheit ersonnen haben. Man braucht nur daran zu erinnern, daß vom wissenschaftlichen Standpunkt aus der elektrische Ofen in Frankreich Gegenstand der in Zukunft klassischen Arbeiten von Violle und von Moissan gewesen ist.

In Versuchen, die mit der ganzen Kunst des vollendeten Physikers ausgeführt sind, hat Violle die Temperaturen gemessen, die man mit diesem neuen Instrumente erreichen kann. Der berühmte Moissan seinerseits, dessen all zu frühen Tod die Wissenschaft beklagt, hat an zahlreichen Beispielen den großen Nutzen nachgewiesen, welchen die Chemie aus den gewaltigen, ihr von der Elektrizität zur Verfügung gestellten Mitteln ziehen kann.

Unter den Moissanschen Resultaten gibt es eins, das besonders dazu beigetragen hat, den elektrischen Ofen bekannt zu machen; ich meine die Darstellung der Edelsteine, insbesondere des Diamanten.

Reiner Kohlenstoff, aus Zucker gewonnene Kohle z. B., löst sich, wie man schon längst weiß, in geschmolzenem Eisen. Wenn die Lösung gesättigt ist, könnte man hoffen, durch Abkühlung kristallisierte Kohle, d. h. Diamant zu erhalten; aber bei diesem Versuch wie bei allen anderen, die man schon probiert hatte, findet man statt der gewünschten Form, statt des durchsichtigen, glänzenden Körpers eine geringwertige schwarze Masse, nämlich gewöhnlichen Graphit.

Moissan kam nun auf den einfachen Gedanken, die Auflösung bei hoher Temperatur und die Kristallisation unter starkem Druck vorzunehmen. Unter diesen besonderen Bedingungen konnte er sehr kleine kristallisierte Teilchen erhalten, die zwar ohne Handelswert sind, aber ganz deutlich alle Eigenschaften des reinsten Diamanten aufweisen.

Das Verfahren zur Erzeugung des nötigen Druckes ist im höchsten Grade geistreich. Das Gußeisen besitzt im festen Zustand ein größeres Volumen als im flüssigen. Wenn man nun die aus dem Ofen kommende Schmelze plötzlich in Wasser taucht, so erstarrt sie nur an der Oberfläche, und es bildet sich eine Hülle von festem Eisen, in deren Innerem die Schmelze langsam erkaltet, während gleichzeitig sehr hohe Drucke entstehen.

Man könnte vielleicht der Ansicht sein, daß es, rein wissenschaftlich betrachtet, keinen größeren Wert hat einen Diamanten zu erzeugen als irgend eine andere kristallisierte Substanz, und daß in technischer Hinsicht das Verfahren einen ungeheuren Aufwand erfordert, um doch nur wertlose Stückchen hervorzubringen. Mit dieser Schlußweise würde man jedoch einen großen Irrtum begehen. Ganz abgesehen davon, daß der Versuch vom wissenschaftlichen Standpunkt aus hochwichtig ist, weil er ein Problem, das lange Zeit dem Scharfsinn der Chemiker getrotzt hat, endlich löste, kommt der Entdeckung Moissans auch hohe philosophische Bedeutung zu.

Sie lieferte nämlich einen bestimmten Aufschluß über die Art und Weise, wie sich in den geologischen Zeitepochen der wertvolle Kristall hat bilden können; sie bewies, daß nunmehr der Mensch die Kräfte der Natur sich unterworfen hat, die ihn ehemals in seiner Unkenntnis beherrschten; und sie war hervorragend geeignet, die Menge einmal die Schönheit der Wissenschaft ahnen zu lassen und ihr Achtung vor ihrer Macht einzuzulößen.

Ein solcher Versuch, von dem alle Welt sprach, konnte nicht verfehlen die neue Forschungsmethode beliebt zu machen,

und trug sicherlich zum großen Teil dazu bei, daß der elektrische Ofen aus dem Laboratorium in die Technik übergang, wo er jetzt eine große, von Tag zu Tag an Bedeutung wachsende Rolle spielt.

Die modernen Lichtbogenöfen gleichen noch sehr dem ersten technisch benutzten Typ, welchen Bullier zur Darstellung der Karbide konstruiert hatte mit einer Kohleelektrode und einem leitenden Boden, der gleichfalls aus Kohle besteht. Für viele Zwecke benutzt man jedoch besser die Widerstandsöfen, bei denen der Strom nach dem Jouleschen Gesetz wirkt, indem er entweder eine zwischen den zu- und abführenden Polen angebrachte leitende Seele oder die zu verarbeitenden Substanzen selbst erhitzt, wenn dieselben nicht isolieren. Außerdem gibt es gemischte Anordnungen, bei denen Widerstands- und Lichtbogenöfen vereinigt sind und die weniger starke Ströme erfordern, und schließlich ist noch auf ein sehr bemerkenswertes System hinzuweisen, daß von Kjellin und Benediks erfunden ist, nämlich den elektrodenlosen Ofen. Dieser Ofen ist in Wirklichkeit ein richtiger Transformator, dessen Primärkreis hochgespannten Strom empfängt, während in dem Sekundärkreis, der von dem Hohlraum selbst gebildet wird, ein Strom von ungeheurer Intensität fließt.

Bei dem von Moissan gewöhnlich benutzten Ofen betrug der Potentialfall 80 Volt, die Stromstärke bis zu 1000 Ampère. Es wurde also auf sehr engem Raum eine Leistung von 80 Kilowatt, d. h. von mehr als 100 Pferdestärken, konzentriert. Für die meisten technischen Anwendungen waren die Temperaturen, die man so erhalten konnte, sogar noch viel zu hoch; die Zahl der Verbindungen, die unter solchen Bedingungen bestehen können, ist ohne Zweifel sehr beschränkt, und die späteren Fortschritte gingen deshalb mehr dahin, unter Erniedrigung der Temperatur den Raumgehalt der Öfen zu erhöhen, als die in einem gegebenen Raum verfügbare Energie noch mehr zu vergrößern.

Heute ist man bei der Konstruktion von Ofen angelangt, die bei 1 m Tiefe 1,50 m Seitenlänge haben. Zur Aluminiumfabrikation, die außer der durch die elektrische Heizung bewirkten Schmelzung auch elektrolytische Wirkung erfordert, verwendet man natürlich Gleichstrom; bei den anderen Verfahren jedoch, bei denen nur die hohe Temperatur wirken soll, benutzt man viel lieber Wechselstrom, der sich bequem transformieren läßt. In gewissen Fällen hat man die Stromintensität bis zu 10000 Ampère gesteigert, was bei den Widerstandsöfen, die eine Spannung von einigen 30 Volt verlangen, einer Leistung von mehr als 350 Pferdestärken entspricht.

Vor etwa zehn Jahren wurde die Hälfte der in der Elektrochemie verbrauchten Energie zur Herstellung von Calciumcarbid benutzt. Bekanntlich bildet sich dieser Körper, dessen chemische Eigenschaften Moissan sehr genau untersucht hat, von selbst in den aus gebranntem Kalk gebauten elektrischen Öfen; es ist daher nicht verwunderlich, daß ihn verschiedene Forscher ungefähr gleichzeitig auf diese Weise erhielten, und daß man an verschiedenen Orten an die Ausnutzung seiner wertvollen Eigenschaft dachte, unter Bildung von Acetylen auf Wasser einzuwirken. Daher befaßten sich viele Fabriken mit seiner Herstellung, bis eine richtige Krise ausbrach, die teils durch die Überproduktion, teils durch die verschiedenen Patentstreitigkeiten hervorgerufen wurde. Jedes Ding hat seine gute Seite, und auch der Fortschritt der Wissenschaft kann durch zufällige Ursachen beschleunigt werden. Die Notwendigkeit, in welche sich manche Fabriken dabei versetzt fanden, eine andere Verwendung für ihre elektrischen Anlagen zu suchen, trug sicherlich dazu bei, daß eine große Zahl neuer elektrothermischer Reaktionen in die Höhe gebracht wurden, die gegenwärtig in die Praxis übergegangen sind.

Wir können hier nur die Darstellung der harten Substanzen Korund, Siloxikon und Carborundum anführen, ferner

die Darstellung mehrerer Verbindungen der Erdalkalien und die der Barytsalze. Es sei auch noch an die sehr interessante Graphitfabrikation erinnert, sicherlich eine der ersten industriellen Anwendungen, bei welcher der elektrische Ofen benutzt wurde; denn das heute noch in Levallois-Perret angewandte Verfahren ist 1895 von Girard und Street auf Grund interessanter Untersuchungen beschrieben worden.

Bei diesen Eroberungen hat die Elektrizität jedoch nicht Halt gemacht. Sie will sich auch noch das reichste Gebiet der chemischen Großindustrie aneignen und greift furchtlos die Metallurgie selbst an. Auch hier ist es wieder Moissan, der auf wissenschaftlicher Grundlage den zu verfolgenden Weg angab; er zeigte, wie im elektrischen Ofen durch Kohle alle Metalloxyde (ausgenommen Magnesia) unter Bildung von Carbiden oder Schmelzen, die weiter gereinigt werden können, reduziert werden, und seit dem Jahre 1901 nimmt die Elektrometallurgie in bedeutendem Maße an der Erzeugung verschiedener Gußeisen- und spezieller Stahlsorten teil. Es ist unmöglich, hier auf Einzelheiten einzugehen, die man in Spezialwerken finden kann*), daher wollen wir nur mitteilen, daß schon heute die elektrische Methode fast ganz an die Stelle der früheren Darstellungen des Chromeisens und Siliciumeisens getreten ist, und daß dank der geistvollen Arbeit verschiedener Erfinder, unter denen in erster Linie Héroult und weiterhin Stassano, Kjellin, Girod, Gin, Keller u. a. zu nennen sind, der Augenblick nicht mehr fern scheint, wo elektrisch gewonnener Stahl und Gußeisen siegreich mit den nach dem klassischen Verfahren gewonnenen Metallen kämpfen werden. Gewisse Versuche lassen sogar die Hoffnung zu, daß sich auch Kupfer und Nickel im elektrischen Ofen unter hinreichend günstigen Bedingungen gewinnen lassen werden.

*) Insbesondere in dem ausgezeichneten Werk von C. Maignon „L'Électrometallurgie des fontes, fers et aciers.“

Die beiden Hauptmethoden, die elektrolytische und elektrothermische, deren hauptsächlichste Anwendungen wir soeben in aller Kürze durchgesprochen haben, sind nicht die einzigen, welche die Elektrizität uns zur Erzeugung chemischer Reaktionen liefert. Schon vor vielen Jahren hat Berthelot die elektrische Spitzenentladung zur Darstellung gewisser Körper, insbesondere von Ozon, benutzt. Dieser berühmte Versuch, der heute im großen ausgeführt wird, hat aus dem Ozon ein Handelsprodukt gemacht. Mit einer Spannung von ungefähr 12000 Volt, die ein von mächtigen Maschinen gespeister Transformator liefert, erhält man durch Zwischenschaltung eines Kondensators oszillierende Entladungen, die auf die Kondensation des Sauerstoffs der Luft sehr günstig einwirken. Das Ozon wird für verschiedene Zwecke benutzt: zum Bleichen von Geweben, zum Altern von Alkohol, zur Herstellung verschiedener Parfüms und besonders zur Reinigung des Trinkwassers der Städte. Versuche, die in mehreren Ländern angestellt worden sind, haben die große Wirksamkeit dieser Reinigungsmethode nachgewiesen; insbesondere gibt das sehr genau untersuchte Verfahren von Abraham und Marmier ausgezeichnete Resultate.

Die elektrische Entladung in Luft ist aber vielleicht dazu berufen, in Zukunft auf einem noch viel weiteren Gebiet besondere Dienste zu leisten. Seit einigen Jahren nämlich wird sehr eifrig die brennende Frage der Verwertung des Stickstoffs studiert, der uns in so großer Menge umgibt, ohne daß wir bisher unmittelbaren Nutzen aus ihm ziehen konnten. Und doch bietet uns auch hier die Natur ein Vorbild, dessen Nachahmung gewiß nicht unmöglich ist. Übrigens ist die künstliche Salpeterbildung schon vor mehr als hundert Jahren von Cavendish verwirklicht worden, in Zukunft wird man sie jedoch gewinnbringend ausführen können. Mit Benutzung der Ideen von Lord Rayleigh und Sir W Crookes haben zwei bekannte Physiker, von Kowalski und Birkeland, unabhängig voneinander praktisch brauchbare Anordnungen

ersonnen, mittels deren man in regelmäßigem Betriebe aus Luft, die starken elektrischen Entladungen ausgesetzt wird, Sauerstoffverbindungen des Stickstoffs erhält. Der Wirkungsgrad ist gut, wenn die Entladungen durch Wechselstrom geringer Intensität, aber hoher Spannung und Frequenz hervorgebracht werden. Vorteilhaft ist auch die Benutzung von Gasgemischen, in denen der Sauerstoffgehalt größer ist als in gewöhnlicher Luft; bekanntlich kann man heute die Luft durch Verflüssigung leicht und in wirtschaftlich brauchbarer Weise an Sauerstoff anreichern.

Es wäre voreilig, wollte man sich jetzt schon über die wirtschaftliche Zukunft dieser interessanten Verfahren aussprechen, doch läßt sich vorhersehen, daß sie für die Düngerefabrikation Bedeutung erlangen werden.

So empfangen dank der Elektrizität nach und nach alle Zweige der Chemie neuen Lebenssaft; und wie überall, wo sie hinkommt, bringt sie auch hier ihre wertvollen Eigenschaften zur Geltung; sie vereinfacht, gibt bessere Ausnutzung, ermöglicht leichtere Regelung der Vorgänge, mit einem Wort: sie formt die alten Verfahren um, und was früher eine empirische Kunst war, wird durch sie zur richtigen Wissenschaft.

Kapitel VIII.

Die elektrische Beleuchtung.

1. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Beleuchtung.

Durch die Vorzüge, welche es in Rücksicht auf Gesundheit und Sicherheit bietet, durch seine angenehme Wirkung, seine bequeme Handhabung, die Leichtigkeit, mit der es anzuzünden und auszulöschen ist, hat das von der Energie des elektrischen Stromes entlehnte Licht vielleicht am meisten von allen Anwendungen der Elektrizität dazu beigetragen, die Wissenschaft der Elektrizität volkstümlich zu machen; Bogenlampen und Glühlampen sind sozusagen eine leuchtende Reklame gewesen, die sehr wesentliche Dienste geleistet hat, im Publikum Gefallen an den Gegenständen der Elektrizität zu erregen, und die bei vielen das Verlangen weckte, die Vorgänge näher kennen und verstehen zu lernen, die sich in diesen strahlenden Apparaten abspielen.

Die elektrische Beleuchtung nahm gerade in demselben Augenblicke praktisch brauchbare Form an, als infolge der Veränderungen des sozialen Lebens ein lebhaftes Verlangen nach künstlicher Beseitigung der nächtlichen Dunkelheit auftrat. Die Auffindung neuer Mittel zur bequemen Erzeugung und Verteilung großer Lichtmengen ist übrigens nicht ganz unbeteiligt gewesen an der Schaffung der Bedürfnisse, deren Befriedigung sie ermöglichte; so entwickelten sich wieder einmal durch das Spiel von Wirkung und Gegenwirkung die Werkzeuge und ihre Funktionen gemeinschaftlich.

Über die stetig wachsenden Forderungen des menschlichen Auges hat man interessante Statistiken aufgestellt; in einer schon vor vielen Jahren gemachten sehr schönen Zusammenstellung führt einer der Meister der Physik, Mascart, besonders folgende sehr merkwürdige Tatsachen an.

Im Jahre 1785 gab König Ludwig XVI in dem Spiegelsaal des Versailler Schlosses ein großes Fest; nach wieder aufgefundenen Rechnungen wurden 1800 Wachskerzen benutzt, welche Anzahl ungefähr zwei Zehntel Kerzenstärke pro Kubikmeter entspricht. Die damaligen Zeitungen berichteten wie über ein Wunder von dieser verschwenderischen Lichtfülle, und es fanden sich ohne Zweifel viele, welche einen solchen Luxus tadelten. Ungefähr ein Jahrhundert ist vergangen, und der Spiegelsaal öffnet sich für einen vornehmen Gast, der Frankreich besucht, von neuem; im Jahre 1873 bereitet man dem Schah von Persien einen großen Empfang und zündet 4000 Kerzen an, was über vier Zehntel Kerzenstärke pro Kubikmeter entspricht; die Tagesblätter, welche von dem Fest berichten, machen keine besondere Bemerkung über die Beleuchtung, die offenbar als ganz normal erschien. Fünf Jahre später, bei der Weltausstellung des Jahres 1878 hielt man es für nötig, bei einem neuen Feste am gleichen Ort die Lichtmenge noch weiter zu verdoppeln, die mit 8000 Kerzenstärken einen Wert von mehr als acht Zehntel Einheiten pro Kubikmeter erreichte, und trotzdem gab es unter den geladenen Gästen einige, die sich über mangelnde Helligkeit beklagten.

Wieviel lebhafter würden ihre Klagen heute sein, wenn sie des Abends in ein Zimmer kämen, das nicht weit heller erleuchtet wäre! Unsere Straßen erscheinen uns oft noch mit ein bis zwei Kerzenstärken pro Kubikmeter traurig und dunkel, und auf der Bühne unserer kleinsten Theater würde der sparsamste Direktor es nicht wagen, einen Salon vorzuführen, der nicht wenigstens fünf mal mehr Licht enthielte.

Das Problem der künstlichen Beleuchtung hat daher

eine immer wachsende Bedeutung gewonnen, und zu seiner Lösung hat sich die Elektrizität mit den anderen Beleuchtungsverfahren in einen, reichen Nutzen bringenden, Wettkampf eingelassen, der immer noch andauert und in dem die heiß umstrittene Führung nacheinander bei den verschiedenen Bewerbern gewesen ist. Dieser friedliche Kampf hat den Fortschritt sehr gefördert, indem sich die Gegner, die sich natürlich mit den vollkommensten Waffen versehen wollten, an die Wissenschaft wandten, die ihrerseits, um ihre Forderungen erfüllen zu können, manchmal erst ihre eigenen Methoden verbessern mußte.

Die Theorien der Strahlung, welche mit den schwierigsten Fragen der Optik und der Thermodynamik zusammenhängen, haben dabei, indem sie mit den Tatsachen verglichen werden mußten, die Probe ihrer Brauchbarkeit bestanden. Manche Entdeckungen, wie z. B. die, welche Auer von Welsbach im Jahre 1890 nach zehnjährigen angestrengten Bemühungen gelang, waren für die Physiker anfangs eine große Überraschung, und es schien sogar, als würden sie die Grundlagen erschüttern, die man für so überaus sicher hielt; eine genaue Prüfung brachte jedoch ein günstigeres Ergebnis, und das von einem Kirchhoff, Stefan, Boltzmann errichtete Gebäude, das einen Augenblick in Gefahr schien, hat im Gegenteil durch neue Arbeiten von Pringsheim und Lummer, W. Wien, Rubens, Chr. Ed. Guillaume, Le Chatelier, Fery u. a. für die Zukunft erhöhte Festigkeit gewonnen.

Um die Verbesserungen verstehen zu können, welche der Erzeugung des elektrischen Lichtes aus den neuen Forschungen erwachsen sind, muß man sich einige wesentliche Grundzüge gegenwärtig halten, an die wir kurz erinnern wollen.

Ein leuchtender Körper ist ein Körper, welcher dem umgebenden Äther mehr oder weniger zusammengesetzte

Schwingungen mitteilt, von denen einige fähig sein müssen, auf unser Auge zu wirken, und daher Wellenlängen zwischen 0,8 und 0,4 Tausendstel Millimeter haben müssen. Ein solcher Körper gibt durch die Strahlung um sich herum in jeder Zeiteinheit eine gewisse Energiemenge ab, die notwendig irgendwo ihren Ursprung haben muß.

In den meisten Fällen ist dieser in einer Wärmequelle zu suchen, welche der strahlenden Substanz die ausgesandte Energie liefert; es handelt sich dann um die Erscheinung des Glühens, und man hat eine thermische Strahlung im eigentlichen Sinne vor sich.

In anderen Fällen erleidet der Körper chemische Änderungen, wie z. B. Phosphor, der sich oxydiert, oder er erhält einen Zustrom elektrischer Energie wie z. B. das leuchtende Gas der Geisler-Röhren, das durch elektrische Entladungen zum Leuchten gebracht wird; man sagt dann, daß man es mit einer Lumineszenzstrahlung zu tun habe.

Seit dem frühesten Altertum bis in die jüngste Zeit benutzte man zur Beleuchtung ausschließlich Vorgänge der ersten Art, und fast immer war der strahlende Körper Kohle; glühende Kohle war es, welche unseren Vorfahren in den Harzfackeln leuchtete; Kohle ist es, welche uns in den Flammen der Kerzen, Petroleumlampen und Gasbrenner leuchtet, wo sie sich in fein verteiltem Zustand befindet; Kohle ist es auch, welche uns in der elektrischen Birne und im Bogen Licht spendet, bei welchem letzterem die Helligkeit vorzugsweise von der positiven Elektrode ausgeht.

Diese Wahl der strahlenden Substanz war zweifellos von Anbeginn an durch die Leichtigkeit bestimmt, mit welcher die Kohle bei ihrer Verbindung mit dem Sauerstoff der Luft eine hinreichend große Wärmemenge abzugeben vermag, um die in der Flamme schwebenden Kohlenstoffteilchen auf hohe Temperatur zu erhitzen. Sie ist aber gleichzeitig von einem anderen Gesichtspunkt aus auch noch als besonders glücklich zu bezeichnen; lange Zeit glaubte man sogar, daß sie

die beste wäre, weil es vorteilhaft erscheinen mag, einen Körper zu benutzen, der sich dem idealen schwarzen Körper nähert, bei welchem die ausgestrahlte Energie für jede Temperatur und jede Strahlung die größtmögliche ist.

Der schwarze Körper würde nach Kirchhoff zugleich auch derjenige sein, welcher die gesamte auf ihn fallende Strahlung irgendwelcher Art absorbiert und ihre Energie vollständig in Wärme umwandelt. Es ist von Interesse, die Gesetze seiner Strahlung kennen zu lernen, die jedenfalls einfacher sein werden als bei allen anderen Körpern.

Bekanntlich hat Kirchhoff auf Grund des Carnot-Clausius'schen Prinzips bewiesen, daß die Strahlung im Innern eines überall gleichtemperierten Hohlraumes nicht von der Beschaffenheit der Wände, sondern allein von deren Temperatur abhängt und mit der des schwarzen Körpers von gleicher Temperatur identisch sein muß. Wenn man also in einer kleinen, überall gleichmäßig erwärmten Metallhohlkugel ein sehr kleines Loch anbringt, so stellt man damit ein Oberflächenelement des schwarzen Körpers her, sowohl bezüglich der Absorption wie auch der Emission. Nach diesem Verfahren haben in den letzten Jahren mehrere Physiker, besonders in Deutschland Lummer und Pringsheim sowie Lummer und Kurlbaum, verschiedene auf die Strahlung bezügliche Fragen aufs beste experimentell behandeln können.

Man muß dabei beachten, daß das Wort schwarz, das anfangs gebraucht wurde, weil es sehr gut zur Bezeichnung einer Substanz paßte, welche alle auffallende Strahlung absorbiert, in der Folgezeit seine ursprüngliche Bedeutung ganz merkwürdig gewechselt hat. So kommt man z. B., wenn es sich um Emission handelt, dazu, zu sagen, daß von zwei gleichen, auf dieselbe Temperatur gebrachten Flächen die schwärzere gerade die hellere ist. In ganz natürlicher Weise gelangt man auf diesem Wege zu noch merkwürdigeren Erweiterungen dieses Begriffes, z. B. kann man mit Rubens sagen, daß der Glühstrumpf eines Auer-Brenners, wenn er

in eine versilberte Hülle gebracht wird, im blauen Teil schwarz wird; denn wie dieser hervorragende Physiker gezeigt hat, nähert sich unter diesen Umständen die blaue Strahlung desselben derjenigen des schwarzen Körpers. Diese seltsame, allzu farbenreiche Ausdrucksweise hat manche Übelstände an sich, welche Guillaume sehr deutlich hervorgehoben hat. Dieser kenntnisreiche und geistvolle Gelehrte, der sehr eingehende Untersuchungen über alle die Strahlung betreffenden Fragen veröffentlicht hat, schlägt zur Bezeichnung des schwarzen Körpers der Theorie den treffenden Namen „Integralstrahler“ (radiateur intégral) vor, den wir in Zukunft benutzen wollen.

Die gesamte Strahlungsenergie, welche der „Integralstrahler“ aussendet, ist innerhalb sehr weiter Grenzen proportional der vierten Potenz der absoluten Temperatur und wächst infolgedessen sehr rasch, wenn die Temperatur steigt. Das ist das im Jahre 1879 aufgestellte Stefansche Gesetz, welches dieser Physiker aus den schon zu seiner Zeit bekannten Beobachtungsergebnissen abgeleitet hat, das dann später von Boltzmann mit den Prinzipien der Thermodynamik in Verbindung gebracht wurde, und dessen Richtigkeit gerade in den letzten Jahren die Versuche von Lummer, Pringsheim und Kurlbaum bewiesen haben.

Die Gesamtstrahlung setzt sich jedoch aus einer Menge Wellen mit verschiedenen Schwingungszahlen zusammen; die einen sind reine Wärmestrahlungen mit großer Wellenlänge, andere sind Lichtwellen, noch andere, die mit äußerster Schnelligkeit schwingen, liegen im Spektrum jenseits des violetten Teils, und in demselben Maße wie die Temperatur des strahlenden Körpers steigt, nimmt auch die Gesamtheit dieser Strahlungen stetig an Umfang und Intensität zu.

Jede Elementarstrahlung wächst mit der Temperatur, aber das Wachstum variiert je nach der Wellenlänge. Unter Zugrundelegung eines aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung abgeleiteten Verteilungsgesetzes für die Geschwindigkeiten

der schwingenden Moleküle hat W. Wien mittels der Prinzipien der Thermodynamik bewiesen, daß das Produkt aus der absoluten Temperatur der Strahlungsquelle und der Wellenlänge, welche bei dieser Temperatur die maximale Strahlungsenergie besitzt, konstant sein muß.

Aus diesem durch den Versuch hinreichend bestätigten Gesetz ergibt sich, daß das Maximum der Energie ganz regelmäßig nach den kürzeren Wellen hin fortschreitet, wenn die Temperatur des Strahlers steigt. Man kann daher berechnen, wie hoch die Temperatur der Strahlungsquelle sein muß, damit die dem Energiemaximum entsprechende Strahlung dem sichtbaren Spektrum angehört. Soll das Maximum z. B. im Gelben liegen, so muß man den strahlenden Körper auf 4600 Grad erhitzen; das ist eine Temperatur, die wir gegenwärtig bei keinem unserer Verfahren der Lichterzeugung erreichen können. Es ist jedoch sehr wesentlich, die Temperatur der dem Integralstrahler analogen Körper so hoch wie möglich zu treiben, damit das Maximum nahe an die sichtbare Strahlung heranrückt.

Eine Anzahl Physiker, darunter insbesondere Deutsche, haben sich in der letzten Zeit eifrig damit beschäftigt, nicht nur die Lage dieses Maximums zu bestimmen, sondern auch die Verteilung der Energie in dem Spektrum des Integralstrahlers vollständig zu untersuchen. Es scheint nicht, daß die hierbei erhaltenen Resultate vollkommen übereinstimmen; die verschiedenen von Wien, Planck und Thiesen aufgestellten Formeln geben indessen die Tatsachen ziemlich gut wieder und können zur Berechnung derjenigen Temperatur dienen, bei welcher die Strahlungsenergie für das ganze sichtbare Spektrum ein Maximum wird. Man würde auf diese Weise eine für die Praxis immer noch viel zu hohe Temperatur finden; jedoch muß man wenigstens dies ein Ergebnis der Untersuchung beachten, daß das Verhältnis der leuchtenden Strahlung zur Wärmestrahlung wächst, wenn man die Temperatur steigert und daß also unter den gleichen

Umständen die Lichtausbeute zunimmt. Daher hat man bei denjenigen Lichtquellen, welche sich dem Integralstrahler nähern, vom Standpunkt der Beleuchtungstechnik aus alle Ursache, die Temperatur so weit wie möglich zu erhöhen.

Die wirklich existierenden Körper entfernen sich freilich mehr oder weniger von dem Integralstrahler; für sie wird daher die Energie jeder einzelnen Strahlung bei gleicher Temperatur geringer sein als für den idealen schwarzen Körper; ihre besonderen Eigentümlichkeiten können jedoch für die Zwecke der Beleuchtung ausgezeichnete Resultate liefern, weil in gewissen Fällen ihr Emissionsvermögen im sichtbaren Teil des Spektrums sich weit mehr dem des Integralstrahlers nähern kann als im unsichtbaren Teil. So zeigt nach den Versuchen von Lummer und Kurlbaum glühendes Platin ein Spektrum, das bei gleicher Temperatur sein Energie-maximum viel näher am sichtbaren Gebiet hat als der Integralstrahler. Übrigens ist es seit den schönen Untersuchungen, welche Rubens und Hagen im Jahre 1902 ausgeführt haben, bekannt, daß das Reflexionsvermögen dieses Metalls mit der Wellenlänge abnimmt; daher ist es nicht sonderbar, daß sein Emissionsvermögen, das ja dem Reflexionsvermögen parallel geht, im sichtbaren Gebiet besonders hoch ist, und daß infolgedessen ein Platindraht auf die gleiche Menge leuchtender Strahlen weniger unsichtbare in den Raum hinaussendet als der absolut schwarze Körper.¹⁵⁾

Platin ist nicht die einzige Substanz, die in dieser Weise ein selektives Emissionsvermögen besitzt. Die feuerbeständigen Metalle besitzen alle diese Eigenschaft, welche auch den Oxyden der seltenen Erden zukommt, die bei der Herstellung der Auer-Glühstrümpfe benutzt werden.

Für die Praxis ist es sehr wichtig, die Lichtausbeute oder den Wirkungsgrad (die Ökonomie) einer Lichtquelle an-

geben zu können. Man könnte sie definieren als das Verhältnis der im sichtbaren Teil enthaltenen Energie zu der Gesamtenergie der Strahlung. Eine solche Definition würde jedoch praktisch nicht brauchbar sein; die Grenzen des sichtbaren Spektrums sind nämlich sehr unbestimmt, und da die Mehrzahl unserer Lichtquellen gerade in dem Grenzgebiet des äußersten Rot sehr reich an Strahlen sind, so würde diese Unbestimmtheit sehr große Abweichungen bei der Messung des Wirkungsgrades zur Folge haben.

Außerdem gestaltet sich die Frage infolge sehr schwieriger physiologischer Betrachtungen noch besonders kompliziert; der Helligkeitswert hängt nämlich nicht allein von der ausgestrahlten Energiemenge ab, sondern auch von der Verteilung dieser Energie über das sichtbare Spektrum. Unser Auge ist nicht für alle Strahlen gleich empfindlich; sehr wenig geeignet für die Wahrnehmung des Rot, mäßig für die des Violett, wird es sehr stark durch Gelbgrün beeinflusst, eine Farbe, die im Sonnenspektrum gerade dem Energiemaximum entspricht.

Man kann hierin zweifellos ein bemerkenswertes Beispiel für die Anpassung der Organe an ihre Umgebung sehen. Wie dem aber auch sein möge, für diese Farbe grenzt die Empfindlichkeit gerade zu ans Wunderbare. Ch.-Ed. Guillaume hat berechnet, daß man durch Umwandlung einer kleinen Kalorie in Lichtenergie von dieser Farbe genug Licht erhalten würde, um ein normales Auge mehr als hundert Millionen Jahre hindurch zu beeinflussen.

Will man sich also ein getreues Bild von dem Wert der verschiedenen Lichtquellen in bezug auf ihre Ökonomie machen, so muß man noch die Empfindlichkeit des Auges für die verschiedenen Farben in Rechnung setzen können und sehr verwickelte photometrische Probleme lösen, über die zudem Physiker und Physiologen noch nicht ganz einig sind.

Ein Ergebnis erscheint indessen als unbestritten: welche Definition man auch für den optischen Wirkungsgrad an-

nehmen mag, er ist bei unseren jetzigen Beleuchtungsmethoden stets abscheulich schlecht.

Bei einer Kerzenflamme nutzt man auf 100 000 Kalorien, welche die bei der Verbrennung frei werdende Energie messen, kaum 15 Kalorien als sichtbare Strahlung aus! Die von der modernen Physik entdeckten Lichtquellen arbeiten viel günstiger; der Auerbrenner liefert eine Ausbeute von nahezu 1 Prozent, die elektrischen Glühlampen nutzen zur Lichterzeugung mehr als 2 Prozent und die Bogenlampe noch mehr von der zugeführten Energie aus; dennoch bleibt dies Verhältnis immer noch lächerlich klein.

Glücklicherweise hat diese Verschwendung wegen der außerordentlichen Empfindlichkeit des Auges und des geringen Preises der Wärmeenergie keine besonders schädlichen Folgen; sobald es sich jedoch um Lichterzeugung auf Kosten der verhältnismäßig teuren elektrischen Energie handelt, gewinnt die Frage der Lichtausbeute eine viel größere Bedeutung.

Große Fortschritte sind neuerdings in der Konstruktion der Glühlampen erfolgt; aber trotz allem, was in dieser Richtung geschehen konnte, befindet man sich dem Anschein nach mit dieser Art der Lichterzeugung auf dem falschen Wege; sie ergibt nämlich stets nur einen geringen Bruchteil leuchtender Strahlung, gemischt mit sehr reichlicher, überflüssiger Wärmestrahlung. Wir werden später sehen, wie man von einer anderen Seite her diese Frage angegriffen hat und mittels verschiedener elektrischer Vorgänge Lichtquellen herstellen kann, welche sogenanntes kaltes Licht geben.

2. Die Glühlampen.

Der Gedanke, die vom elektrischen Strom entwickelte Wärme zu benutzen, um eine widerstandsfähige Substanz zum Glühen zu bringen und so eine in vielfacher Hinsicht vorteilhafte Beleuchtungsmethode zu erhalten, ist schon sehr alt.

Er hat zu zahlreichen Versuchen angeregt. Das erste Patent auf eine derartige Lampe reicht bis ins Jahr 1841 zurück. Es wurde in England von Fr. de Moleyns genommen, der einen in der Tat sehr sinnreich erdachten Apparat mit einem von Kohleteilchen bedeckten Platindraht beschrieb. Aber trotz der wertvollen Eigenschaften des Platins hinsichtlich seines Emissionsvermögens eignet sich dieser Stoff doch nicht zur Benutzung in einer solchen Lampe; er schmilzt bei einer Temperatur von 1775 Grad und läßt sich nicht ohne rasche Zerstörung auf eine so hohe Temperatur bringen, daß sich ein befriedigender Wirkungsgrad ergibt. Die elektrische Beleuchtung wurde erst in dem Augenblick anwendbar, als man zur Herstellung der Birnen mit Kohlefäden überging.

Wir können hier nicht über die historischen Erörterungen und die finanziellen Streitfragen berichten, zu denen die Prioritätsansprüche zwischen den verschiedenen Erfindern geführt haben. Man kann jedoch wohl mit Recht behaupten, daß es Edison zuerst gelungen ist, die Glühlampen in die technische Praxis einzubürgern.

Es wäre ein müßiges Unternehmen, die Lampe zu beschreiben, die heute jeder kennt; es ist auch bekannt, wie die Vervollkommnung der Fabrikationsmethoden die Lichtausbeute vermehrt und gleichzeitig die Herstellungskosten verringert hat. Gegenwärtig wird der aus verkohlter Cellulose hergestellte Faden immer durch Ablagerung von Kohle verstärkt, welche durch Zersetzung eines Kohlenwasserstoffs gewonnen wird. Man erhält auf diese Weise einen vollkommen gleichmäßigen Querschnitt und hat insbesondere noch den Vorteil, daß der im Glühzustand zu benutzende Körper mit einer Graphithülle von metallischem Aussehen bedeckt wird, welche demselben ein hohes selektives Emissionsvermögen erteilt und dadurch seine lichtpendende Kraft außerordentlich erhöht.

Von der äußersten Wichtigkeit ist es, daß der Faden sich in einem guten Vakuum befindet, das so vollkommen wie möglich sein muß, nicht nur, damit die Kohle nicht verbrennt, sondern auch, damit sie sich nur wenig abkühlt. Die Entfernung der Luft wird zunächst mittels Auspumpen begonnen und dann ganz allgemein durch einen chemischen Prozeß vollendet; man benutzt gewöhnlich Phosphor, der mit den letzten Spuren von Luft einen festen Niederschlag gibt, welcher leicht zu entfernen ist.

Zur Erzielung einer guten Lichtausbeute muß man nach dem, was wir über die Strahlung wissen, die Temperatur so hoch wie möglich steigern und die Lampe maximal belasten. Eine Überlastung würde sie jedoch bald außer Dienst setzen. Der Faden verbrennt zwar nicht, verdampft aber; es scheint, daß der Bruch meist auf der Seite der Kathode erfolgt, und daß man hierbei die Erscheinung der kathodischen Zerstäubung vor sich hat. Diese Zerstäubung erzeugt auch im normalen Betrieb einen Niederschlag von Kohle auf der Birne, welcher den optischen Wirkungsgrad stark herabsetzt.

Berücksichtigt man alle Bedingungen, Kaufpreis der Lampe, ihre Lebensdauer bei der Temperatur, bei der sie gebraucht wird, Wert der elektrischen Energie usw., so kommt man zu dem Schluß, daß es zweckmäßig ist, eine Birne im Mittel nach 500 bis 600 Brennstunden durch eine neue zu ersetzen, selbst dann, wenn sie noch funktionieren würde, und daß es gut ist, sie bei einer Temperatur zu benutzen, die man auf etwa 1800*) Grad schätzen kann.

Man könnte bessere Resultate erhalten und die Temperatur viel höher treiben, wenn man den dünnen Leiter der gewöhnlichen Lampen durch dicke Fäden ersetzte, die

*) Es ist nicht leicht, diese Temperatur zu messen; zu den besten Bestimmungen sind die von Le Chatelier und von P. Janet zu rechnen, welcher letzterer die Temperatur nach einer sehr sinnreichen Methode aus der Abkühlung des Fadens abgeleitet hat.

weniger rasche Änderungen erleiden würden. Aber die so hergestellten Lampen verlangen weit niedrigere Spannungen als die gewöhnlichen; man muß sie also zu mehreren hintereinander schalten, um die Netzspannung auf sie zu verteilen, oder sie mit Wechselstrom speisen und mit der Lampe einen kleinen Spannungstransformator verbinden. Es sind das zwar unwesentliche Komplikationen, die jedoch immerhin geeignet sind, den Erfolg des Systems zu beeinträchtigen.

Man ist dabei allmählich zu einer beträchtlichen Verringerung des elektrischen Energieverbrauchs in den Glühlampen gelangt; er beträgt nur noch drei bis vier Watt pro Kerze*), doch scheint es nicht möglich, noch viel weiter herunter zu kommen, wenn man die Kohle als strahlenden Körper beibehält.

Die in den letzten Jahren zur Erlangung eines weniger veränderlichen Glühfadens gemachten Versuche sind kaum zu zählen. Sehr interessante Resultate hat man durch Benutzung von Metallen mit höherem Schmelzpunkt als Platin erhalten.

Zuerst ist Auer auf diesem Wege die Herstellung von regelmäßig funktionierenden Lampen gelungen; er benutzte Osmium, ein seltenes Metall der Platingruppe, das erst bei 2500 Grad schmilzt. Durch Reduktion der Osmiumsäure mittels Kohle stellte er eine Substanz her, die sich zusammenballen und mit der Presse zu Fäden verarbeiten läßt. Da der Faden bei der hohen Temperatur weich wird, muß

*) Die Intensität einer Lichtquelle variiert beträchtlich nach den verschiedenen Richtungen hin. Man müßte daher eigentlich die mittleren sphärischen Helligkeiten vergleichen, aus denen man den gesamten Lichtstrom berechnen kann; meistens gibt man jedoch den Wert der mittleren horizontalen Helligkeit an (d. h. in einer Ebene, die senkrecht zur Achse steht und durch die Mitte des Fadens hindurchgeht), weil diese Helligkeit den Maximalwert darstellt.

man ihn im Innern der Birne durch geeignete Träger stützen. Der Widerstand des Osmiums steigt im Gegensatz zu dem der Kohle mit der Temperatur; dieser Umstand ist günstig, denn er bewirkt eine Regulierung des Stromes, der die Lampe durchfließt, und macht somit die Helligkeit unabhängiger von den Spannungsschwankungen im Netz. Die Lampe hat eine Lebensdauer von etwa 1000 Stunden und verbraucht ungefähr zwei Watt pro Kerze; aber sie hat den Fehler, daß sie ziemlich teuer ist.

Im Lauf des Jahres 1905 erschien eine andere Lampe, die sich stark zu verbreiten beginnt, nämlich die Tantallampe von Siemens und Halske, die auf Grund der Untersuchungen von Boltons konstruiert ist. Das reine Tantal, das durch Reduktion des Tantalfluorkaliums mittels Kalium oder Natrium erhalten wird, ist ein sehr dehnbares und hervorragend zähes Metall, welches dem Stahl gleicht, jedoch einen sehr hohen Schmelzpunkt besitzt. Da sein elektrischer Widerstand gering ist, so muß man sehr dünne und lange Drähte benutzen; bei dem gegenwärtig in Gebrauch befindlichen Lampenmodell hat der Faden 650 mm Länge und 0,05 mm Dicke. Um einen so langen Leiter in der Birne unterzubringen, muß man ihn umbiegen und in einzelne gradlinige Strecken teilen, die von isolierten Trägern gehalten werden.

Die Tantallampe funktioniert sehr gleichmäßig und verbraucht 1,7 bis 2 Watt für jede in horizontaler Richtung gemessene Kerzenstärke; nach den Messungen, welche Jouaust im Laboratorium der Société internationale des Electriciens unter Leitung von Janet ausgeführt hat, würde die Temperatur des Fadens diejenige einer gewöhnlichen Lampe um mehr als 200 Grad übertreffen.

Ganz neuerdings hat man Lampen mit Wolfram versucht, einem Metall, dessen Schmelzpunkt bei ungefähr 3200 Grad zu liegen scheint, und mit dem man folglich noch bessere Lichtausbeute erwarten darf; es wird behauptet, daß diese Lampen eine Kerzenstärke für je 1,2 Watt geben.

Bei allen diesen Systemen nutzt man gleichzeitig sowohl den Vorteil der hohen Temperatur, wie auch die selektiven Eigenschaften der Körper mit Metallglanz aus. Dank der hohen Leitfähigkeit der Drähte würden diese verschiedenen Lampen sich sehr gut zur Beleuchtung mit geringer Spannung und zur Teilung des Lichtes eignen. Man kann es nur bedauern, daß sie erst zu einer Zeit erfunden wurden, wo schon überall Leitungsnetze mit höherer Spannung vorhanden waren als derjenigen, die normaler Weise am besten für sie paßt.

Statt sich an die seltenen Metalle zu halten, kann man auch versuchen, Glühfäden aus anderen schwer schmelzbaren Substanzen mit großem Emissionsvermögen herzustellen; das leuchtende Beispiel des Auer-Strumpfes beweist, welche Vorteile die Ersetzung der Kohle durch gewisse Oxyde gewähren kann. Es erhebt sich da aber ein Hindernis, das zuerst wenigstens unübersteiglich scheint. Damit diese Oxyde mittels elektrischer Energie zum Glühen gebracht werden können, müssen sie den Strom leiten können, und dabei scheinen gerade diese Substanzen fast vollkommene Isolatoren zu sein.

Glücklicherweise nimmt ihr Widerstand wie der aller Elektrolyte ab, wenn die Temperatur steigt. Diese im Jahre 1868 von dem französischen Physiker Le Roux bemerkte Eigenschaft war sogar von Jablochhoff zur Konstruktion einer elektrischen Lampe benutzt worden; doch war dieser Versuch ganz in Vergessenheit geraten, als Nernst auf den Gedanken kam, die schwer schmelzbaren Oxyde näher zu studieren in der Absicht, praktisch brauchbare Lampen damit herzustellen, und nach mehrjährigen Versuchen zu einem höchst bedeutungsvollen System der Lichterzeugung gelangte.

Der Faden oder vielmehr das Stäbchen — denn hier erhält der Glühkörper eine ziemlich große Dicke — besteht

aus einer plastischen Masse, die mit einer Presse zu Fäden geformt und dann getrocknet wird. Diese Masse enthält außer Bindemitteln Zirkoniumoxyd gemischt mit anderen Oxyden von seltenen Erden*), die aus Gadolinith gewonnen werden. Man kann auch Magnesia benutzen, die ein hervorragendes Leuchtvermögen besitzt; sie ist es ja, die im glühenden Zustand das blendende Licht aussendet, das bei der Verbrennung von Magnesium entsteht.

Damit der Strom, der durch kurze Platindrähte zugeführt wird, das Stäbchen durchfließen kann, muß man die Lampe anzünden, d. h. die schwer schmelzbare Masse auf eine Temperatur erhitzen, bei der sie leitend wird. Da man nur ungern auf die besondere Bequemlichkeit verzichten würde, welche das elektrische Licht sonst bezüglich des Anzündens bietet, so mußte ein selbsttätiges Verfahren erdacht werden, um das Stäbchen bis zur dunklen Rotglut zu erhitzen. Das Nernstsche Verfahren besteht darin, das Stäbchen mit einer Platinspirale zu umgeben, welche anfangs den ganzen Strom erhält und so die nötige Wärme erzeugt. Sobald das Oxyd genügende Leitfähigkeit erlangt hat, schaltet ein kleiner Elektromagnet den Platindraht aus.

Diese sinnreiche Anordnung ist jedoch nicht die einzige Komplikation der Lampe; man braucht auch noch einen Apparat zur Regulierung der Stromstärke. Ohne diese Vorkehrung würde das Stäbchen, das um so besser leitet, je heißer es ist, von einem rasch wachsenden Strom durch-

*) Hier wie bei den Auer-Glühstrümpfen ist es vorteilhaft, ein Gemenge von Oxyden zu benutzen, welche miteinander „feste Lösungen“ bilden. Guillaume hat gezeigt, wie die schönen Arbeiten von Rubens eine schon von Le Chatelier über diesen Punkt geäußerte Vorstellung genauer zu präzisieren erlauben; in dem Auer-Strumpf kühlt sich das Thoriumoxyd, das ein geringes Emissionsvermögen besitzt, nur langsam ab und dient daher zur Erhitzung des Ceriumoxyds, welches die eigentlich leuchtende Substanz ist.

flossen werden und bald auf eine Temperatur gelangen, wo es bricht. Ein sehr einfacher Kunstgriff, in der Miteinschaltung eines sehr dünnen Eisendrahtes bestehend, dessen Widerstand im Gegensatz zu dem Stäbchen wächst, wenn die Temperatur steigt, gestattet eine vollkommene Regulierung.

Man könnte zuerst glauben, es sei ein wirklicher Vorteil, daß man den Glühkörper nicht mehr in ein Vakuum zu bringen braucht; leider wird diese geringe Vereinfachung aber durch ziemlich ernste Übelstände wieder aufgewogen. Der von Luft umgebene Faden kühlt sich sehr viel schneller ab; außerdem wird die Luft, wie einige Forscher gefunden haben, bei der hohen Temperatur, auf die sie erhitzt wird, zweifellos ionisiert und kann daher nicht bloß durch ihre Wärmeleitfähigkeit Wärmeenergie entführen, sondern auch einem Teil des elektrischen Stromes den Durchgang gestatten, der dabei einfach verloren geht. Die Lampe darf jedoch nicht luftleer gemacht werden, weil sie dann aus anderen Gründen nicht mehr funktionieren würde.

Die Fäden, welche aus Oxydverbindungen bestehen, können sich im Vakuum nämlich zersetzen und würden daher rasch zerstört werden, wenn man sie in einem luftleeren Raum erhitzte. Nun gehören die Oxyde zu den Elektrolyten, und um die zersetzende Wirkung der Elektrolyse abzuschwächen, braucht man nur dafür zu sorgen, daß das Metall, welches sich abscheiden will, auf Kosten des Sauerstoffs der Umgebung wieder oxydiert werden kann.

Unter geeigneten Bedingungen funktioniert die Nernst-Lampe sehr gut und gibt ein sehr schönes weißes Licht, weil die glühende Substanz auf etwa 2400 Grad erhitzt wird; dabei verbraucht sie im Mittel zwei Watt pro Kerze.

Nicht genug bewundern kann man die Genialität des Erfinders; Nernst hat dabei ein schönes Beispiel unermüdlicher Ausdauer gegeben; er hat nach und nach alle ihm be-
gegneten Schwierigkeiten überwunden, und diese waren nicht gering. In einem in Göttingen gehaltenen Vortrag

sagte er darüber einmal etwa folgendes: „Wenn man endlich die tiefe Kluft überwunden hat, die eine Erfindung von ihrer Verwirklichung, oder wenn man so will, die Theorie von der Praxis scheidet, so hat man noch den langen beschwerlichen Weg vom Laboratorium bis zur praktischen Anwendung vor sich.“ Der berühmte Physiker hat es verstanden, ihn bis zu Ende zu gehen, diesen oft so entmutigenden Weg. Leider wird die Nernst-Lampe mit allen notwendigen Nebenapparaten etwas umständlich und ist daher ziemlich teuer.

Nach der Erfindung Nernsts hat man noch nach anderen Oxydkombinationen gesucht; insbesondere ist eine von Canello erfundene Lampe anzuführen, die deswegen interessant ist, weil sie einen Faden aus Oxyden der Erdalkalien besitzt, der mit einer dünnen Schicht von metallischem Osmium überzogen ist und daher ein gemischtes System darstellt, das möglicherweise gute Resultate ergibt.

3. Die Bogenlampen.

Während so die Glühlampen Gegenstand hervorragender Arbeiten waren, beschäftigten sich verschiedene Physiker auch mit den Bogenlampen.

Man kennt und benutzt diese mächtigen Lichtquellen schon lange. Schon im Jahre 1808 stellte der berühmte Chemiker Humphry Davy den Fundamentalversuch an, auf welchem dies wertvolle Verfahren der Lichterzeugung beruht; er hatte, wie bekannt, zwei zugespitzte Kohlenstäbchen mit den Polen einer galvanischen Kette von 2000 Elementen verbunden und beobachtete, daß zwischen den Spitzen eine leicht gebogene Flamme entstand, wenn man die Kohlen vorsichtig auseinanderzog, nachdem man sie vorher zur Berührung gebracht hatte.

Diese besondere Form ist eine Folge der Gasströmungen, welche auf die Flamme wirken, wenn die Kohlen horizontal stehen; bei vertikaler Stellung ist kein Bogen, sondern ein

leuchtender die Kohlen umhüllender Mantel vorhanden. Wenn dieser Lichtmantel auch der heißeste Teil ist, so ist er doch nicht der hellste; ungefähr 85 Prozent der gesamten ausgesandten Lichtmenge kommen von der positiven Kohle, 5 Prozent von der negativen und nur 10 Prozent von dem Bogen. Die Bezeichnung „Bogenlampe“ ist also ziemlich schlecht gewählt, doch ist sie in Gebrauch geblieben. Da die Temperatur der positiven Kohle sehr hoch ist — nach Violle erreicht sie 3500 Grad, — so ist es nicht erstaunlich, daß man eine ausgezeichnete Lichtausbeute erhält, nämlich eine Kerze für je 0,6 bis 0,7 Watt; bei dieser hohen Temperatur würde die Maximalemission des Integralstrahlers schon in das sichtbare Spektrum fallen.

Das Licht der Bogenlampe ist viel reicher an blauen und violetten Strahlen als die übrigen gewöhnlich benutzten künstlichen Lichtquellen, jedoch verhältnismäßig armer daran, als das Licht der Sonne. Eine optische Täuschung, die wahrscheinlich der Kontrastwirkung entstammt, läßt es uns häufig stark blau erscheinen; in Wirklichkeit fehlen ihm aber gerade diese Farben noch, und es enthält im Gegenteil eine viel größere Menge roter und gelber Strahlen als das weiße Licht.

Mißt man die Potentialdifferenz zwischen den Kohlen, so findet man, daß sie niemals unter einige 30 Volt sinken kann, ohne daß der Bogen erlischt; die Bogenlampe verhält sich wie ein Energie verbrauchender Motor, der eine elektromotorische Gegenkraft erzeugt. Es findet also ein Verbrauch elektrischer Energie statt, ganz abgesehen von derjenigen, die in Wärme übergeht. Man nimmt heute allgemein an, daß ein wohl definierter physikalischer Vorgang, nämlich ein Verdampfen oder besser Sieden des Kohlenstoffes der positiven Elektrode auf Kosten der verschwundenen elektrischen Energie stattfindet. Indessen sprechen Versuche von Wilson und Fitzgerald über den Einfluß des Druckes der umgebenden Atmosphäre auf die Temperatur der Kohlen

nicht für diese Deutung, und verschiedene Forscher sind mit Le Chatelier der Meinung, daß die positive Kohle sich auf der Schmelztemperatur und nicht auf der Siedetemperatur befindet; denn andernfalls müßte die Dampfspannung des Kohlenstoffs bei der Temperatur, welche man gewöhnlich den Fäden der Glühlampen erteilt, schon sehr beträchtlich sein, und dies erscheint unwahrscheinlich. Le Roux hat dagegen schon vor langer Zeit den Gedanken ausgesprochen, daß die elektromotorische Kraft, welche im Lichtbogen auftritt, thermo-elektrischen Ursprungs sei. Neuere Versuche von Georges, Arons und Ayrton scheinen diese Anschauung zu bestätigen. So hat z. B. Ayrton nachgewiesen, daß, wenn man mittels einer äußern Quelle die negative Kohle erhitzt, die zur Unterhaltung des Bogens nötige Spannung sinkt.

Die Vorgänge in der Lampe sind im übrigen sehr kompliziert; Mrs. Ayrton, die hierüber mit großer Geduld eine Reihe sehr bemerkenswerter Untersuchungen angestellt hat, hat unter anderem auch auf die wichtige Rolle hingewiesen, welche die Verbrennung der Kohlen für die Stabilität des Bogens besitzt. Die Kohle verflüchtigt sich nicht allein, sondern sie verbrennt auch an der Oberfläche des Kraters.

Andererseits ist es sicher, daß die Gase bei dem Durchgang elektrischer Entladungen ionisiert werden; aber die Bedingungen, unter welchen ein Lichtbogen funktioniert, sind recht kompliziert, und man kann auf eine so schwierige Frage noch nicht die Resultate anwenden, welche gerade in den letzten Jahren geistvolle Physiker erhalten haben, die für einfachere Fälle den Mechanismus der Leitfähigkeit der Gase aufgeklärt haben. Es läßt sich jedoch vorhersehen, daß in naher Zukunft die neuen Entdeckungen endlich das Dunkel lichten werden, welches noch viele Punkte des heute gerade hundert Jahre alten Humphry Davyschen Versuches umhüllt.

Um praktisch brauchbar zu sein, bedarf die Bogenlampe eines Regulierapparates, der sie befähigt, sich den Schwankungen der Netzspannung anzupassen und den Abstand der Kohlen,

der sich infolge des Abbrennens vergrößern würde, konstant zu halten. Solche Regulierapparate gibt es in sehr großer Zahl, hauptsächlich werden jetzt Differentialregulatoren mit zwei Spulen benutzt; die eine davon ist dem Bogen parallel geschaltet, die andere in Serie mit ihm.

Ein Räderwerk, das von einem Elektromagneten getrieben wird, wirkt auf die Stellung der Kohlen. Der Bogen funktioniert ebensowohl mit Gleichstrom wie mit Wechselstrom, doch brennen die beiden Kohlen bei Wechselstrom gleich schnell ab; es bildet sich dabei nicht der Krater, der für die positive Kohle wie eine Art Reflektor wirkt, und die Lampe sendet nach oben und nach unten gleichviel Licht aus. Außerdem erzeugt der Wechselstrombogen, der bei jedem Stromwechsel erlischt und sich neu entzündet, ein das Auge mehr angreifendes Licht, das außerdem infolge der dabei entstehenden Luftschwingungen von einem unangenehmen Brummen begleitet ist.

Verfügt man über eine Leitung von 110 Volt, so kann man zwei Lampen, die jede ungefähr 35 Volt verbrauchen, und einen Regulierungswiderstand hintereinander schalten, der ebensoviel Volt wie eine Lampe verzehrt. Das war das Verfahren, welches man bis in die jüngste Zeit benutzte; seitdem aber die Regulatoren weiter vervollkommenet und empfindlicher gemacht worden sind, kann man ohne Störung drei Lampen hintereinander schalten.

Es gibt auch Bogenlampen für hohe Spannung von ungefähr 100 Volt, die man unmittelbar an die Leitung anschließt. Das sind die sogenannten „Dauerbrandlampen“ mit eingeschlossenem Bogen, welche interessante, von denen des gewöhnlichen Bogens abweichende Eigenschaften besitzen.

Seit dem Jahre 1886, wo Street zuerst eine Lampe mit eingeschlossenem Bogen konstruiert hat, sind zahlreiche Versuche gemacht worden, derartige Apparate in die Praxis einzuführen. Auf den ersten Blick scheinen sie große Vorteile zu bieten: Sauberkeit, Unschädlichkeit, Verminderung

des Kohlenverbrauchs und der Ausgaben an Arbeitslohn für das Auswechseln derselben.

Aber stets hatten sich erhebliche Schwierigkeiten eingestellt, die man nicht überwinden konnte. Insbesondere bildeten sich auf den Glasglocken immer Kohlenniederschläge, die nach kurzer Zeit das ausgesandte Licht vollständig absorbierten. Erst vor etwa zehn Jahren gelang Marks die Konstruktion eines einfachen und praktischen Apparates, bei dem der durch den elektrischen Strom von der positiven Kohle mitgerissene Kohlenstoff in Gas verwandelt wird und keinen Niederschlag liefert. Ein sinnreicher Luftzuführungsregulator bewirkt, daß der den Apparat verlassende und der in ihn eindringende Gasstrom sich gegenseitig so im Gleichgewicht halten, daß der Bogen vollkommen ruhig brennt.

Auch andere ähnliche Systeme, z. B. das Jandussche, funktionieren sehr gut; leider scheint nach Blondel die Ökonomie dieser Lampen nicht sehr gut zu sein, und das stark bläuliche Licht zeigt häufig sehr plötzliche Helligkeitsschwankungen.

Natürlich hat man sich auch die Frage vorgelegt, ob man nicht wie bei den Glühlampen die Kohle in der Bogenlampe durch andere Substanzen mit selektivem Emissionsvermögen ersetzen könnte. Bereits Jablochkoff, dessen Name mit den ersten Erfindungen und Verbesserungen auf dem Gebiet der elektrischen Beleuchtung eng verbunden ist, hat interessante Versuche in dieser Richtung gemacht.

Bremer sowie Blondel haben neuerdings eine Lösung des Problems vorgeschlagen, die ausgezeichnete Resultate liefert. Blondel benutzt als positive Elektrode einen Stift aus einer Mischung von Kohle und gewissen Salzen, die viel Fluorcalcium enthalten; das Gemenge ist mit einer dünnen Schicht reiner Kohle bedeckt. Die negative Elektrode, welche hier die obere sein muß, wird von einer gewöhnlichen Kohle gebildet.

Dies System wird oft mit dem sehr treffenden Namen der „Flammenbogenlampe“ bezeichnet, weil das Fluorcalcium verdampft und den Bogen sehr stark leuchtend macht. Es ist hier nicht mehr die positive Kohle, welche die Hauptmenge des Lichtes aussendet; sie wird in dieser Hinsicht von dem Dampf, der die Teilchen des Calciumsalzes suspendiert enthält, übertroffen.

Man kann dabei den Bogen beliebig lang machen und ihn mit verschiedenen Spannungen brennen lassen und erhält dabei eine sehr bemerkenswerte Lichtausbeute: ein Viertel Watt genügt schon, um eine Kerze mittlerer sphärischer Helligkeit zu erzeugen. Der einzige allerdings ernste Übelstand ist der, daß das je nach der Zusammensetzung des Salzgemisches stark rot oder gelb gefärbte Licht allen Gegenständen der Umgebung eine Färbung erteilt, welche dem Auge ungewohnt ist, und die es daher unangenehm empfindet.

4. Der Quecksilberdampf-Lichtbogen und das kalte Licht.

Trotz dieser wahrhaft wunderbaren Fortschritte bleiben alle hier beschriebenen Methoden, die auf das Glühen gegründet sind, noch sehr roh, da das Verhältnis der leuchtenden Strahlung zu der dunklen Wärmestrahlung nach den neuesten Bestimmungen selbst für die vollkommensten dieser Methoden ein Prozent nicht übersteigt. Es ist jedoch theoretisch kein Hinderungsgrund vorhanden, kaltes Licht zu erzeugen; ja die Natur selbst beweist uns die Möglichkeit der Lösung dieses Problems.

Der Pyrophorus noctilucus, oder auf deutsch der Leuchtkäfer, und noch andere Lebewesen senden eine Strahlung aus, die nur dem sichtbaren Spektrum angehört. Es ist sogar sehr bemerkenswert, daß das grünliche Licht, welches der Leuchtkäfer auf geheimnisvolle Weise erzeugt, gerade dem Maximum der Empfindlichkeit unseres Auges entspricht,

so daß also der Wirkungsgrad dieser so wirtschaftlich arbeitenden tierischen Lichtquelle auch dann noch gleich der Einheit ist, wenn man die photometrischen Koeffizienten für die verschiedenen Farben mit berücksichtigt.

Bei den Phosphoreszenzerscheinungen sieht man ebenfalls chemische Energie sich in Strahlungsenergie sichtbarer Lichtschwingungen umwandeln, ohne daß gleichzeitig eine merkliche Menge Strahlen mit größerer Periode erzeugt werden, und von vornherein scheint es durchaus nicht unmöglich zu sein, daß man mittels elektrischer Energie den Äther in Schwingungen versetzen kann, deren Frequenzen den Lichtschwingungen entsprechen und die nicht von einem überflüssigen Gefolge infraroter Strahlen begleitet sind.

Die klassische Geißlersche Röhre hat schon seit langem den Beweis geliefert, daß verdünnte Gase bei dem Durchgang eines elektrischen Stromes kräftig leuchten, und die Spektralanalyse zeigt, daß das von ihnen ausgehende Licht sich aus wohl definierten Strahlungen zusammensetzt, welche durch breite dunkle Zwischenräume voneinander getrennt sind. Die Ökonomie einer solchen Röhre würde jedoch ganz schlecht sein; die Elektroden erhitzen sich sehr stark, und der Widerstand der Röhre ist enorm.

Tesla hat in berühmt gewordenen Versuchen gezeigt, daß Hochfrequenzströme eine elektrodenlose Röhre mit sehr verdünntem Gas durchfließen können, wobei dieselbe ein Licht ähnlich dem des Leuchtkäfers aussendet. Jedoch auch hier trennt eine tiefe Kluft die Theorie von der Praxis, und man sieht keine Möglichkeit, daß die Tesla-Röhre der Technik unmittelbare Dienste leisten könnte.

Erst mit dem Quecksilberdampfbogen hat wirklich die Benutzung der Lumineszenzerscheinungen zur Beleuchtung begonnen.

Der Gedanke, einen Lichtbogen zwischen Quecksilber und einer Metallelektrode zu erzeugen, ist sehr alt. Man kann da an einen schon ziemlich brauchbaren Apparat

erinnern, den sich Rapiëff 1879 patentieren ließ, und ebenso an die interessanten Versuche, in denen Jamin und Manoeuvrier nachwiesen, daß man einen Wechselstrom mittels eines Bogens zwischen einer Quecksilberelektrode und einer Kohlenelektrode in Gleichstrom umwandeln kann.

Im Jahre 1892 konstruierte Arons eine Quecksilber-vakuumlampe, welche der Physik sehr gute Dienste geleistet hat. Ferner haben Perot und Fabry insbesondere bei ihren schönen Untersuchungen über Interferenz ein selbst erfundenes Modell benutzt, um ein sehr konstantes Licht zu haben, das aus vier sehr hellen glänzenden Linien besteht, zwei im Gelb, einer im Blau und einer im Violett.

Peter Cooper Hewitts hervorragende Untersuchungen sind es aber, welche wirklich praktisch brauchbare Resultate ergeben haben.

Dieser geniale Forscher hat mehrere ziemlich verschiedene Anordnungen erfunden. Die am meisten verbreitete besteht aus einem ziemlich weiten Rohr (von ungefähr 20 mm Durchmesser) und 1,5 m Länge; der Strom wird durch eine Eisenanode zugeführt und durch eine Quecksilberkathode abgeleitet. Man stellt zuerst in dieser Glashülle ein sehr hohes Vakuum her, und wenn der Apparat einmal erregt ist, so bildet sich in dem Quecksilberdampf ein richtiger Lichtbogen, der bei einer Netzspannung von 120 Volt ungefähr 3 Ampère besitzt.

Die Hauptschwierigkeit besteht jedoch in der Anregung oder Zündung. Der Widerstand gegen den Stromdurchgang ist anfangs ganz enorm; um ihn zu überwinden, braucht man eine hohe Spannung, die man mit Hilfe einer Induktionsrolle zu Anfang für einen kurzen Augenblick erzeugt; oder aber man stellt einfach einen Kurzschluß her, indem man die Röhre so neigt, daß das Quecksilber bis zur Anode fließt.

Ist das Gas erst einmal ionisiert, so widersetzt es sich dem Stromdurchgang nicht mehr und verhält sich wie ein Leiter, wie Bouty in seinen schönen Untersuchungen über die dielektrische Festigkeit nachgewiesen hat.

Der Widerstand der Gassäule ist jedoch nicht der einzige, der zu überwinden ist. Hewitt hat durch schöne Versuche, deren Resultate übrigens mit den von J. J. Thomson erhaltenen im allgemeinen übereinstimmen, gezeigt, daß zwischen Kathode und Quecksilberdampf ein großer Übergangswiderstand vorhanden ist; auf der Anodenseite findet sich nichts dergleichen.

Dieser Widerstand wird sehr viel kleiner, wenn die Kathodenoberfläche zerstäubt, und die Überlegenheit der Quecksilberelektrode über die anderen metallischen Leiter rührt daher, daß diese Flüssigkeit, die dauernd verdampft und sich auf den Rohrwänden niederschlägt, dabei die Rolle einer kathodischen Oberfläche im Zustand der Zerstäubung spielt.

Auf diesen besonderen Kathodenwiderstand gründet sich auch die schon besprochene Anwendung des Lichtbogens als Ventil für Wechselströme.

Der leuchtende Quecksilberdampf in dem Hewittschen Rohr hat eine Temperatur von etwa 140° ; er ist also nicht im Glühzustand, und die Untersuchung des Spektrums ergibt, daß seine Strahlung fast ausschließlich aus einer orangegelben, einer grünen und einer violetten besteht, die somit alle drei im sichtbaren Gebiet liegen.

Die dem Äther mitgeteilte Schwingungsbewegung enthält dabei also nichts Überflüssiges. Um sie zu erzeugen, muß man freilich immer noch mehr elektrische Energie aufwenden, als theoretisch nötig wäre, hauptsächlich wegen des Widerstandes an der Kathode. Die Röhre würde sich deshalb schließlich zu stark erhitzen, wenn man sie nicht schützte. Die Ökonomie ist jedoch schon besser als die aller anderen bekannten Lichtquellen; man verbraucht nicht mehr als ungefähr 0,45 Watt pro Kerze.

Der einzige Übelstand dieser neuen Beleuchtungsart ist der, daß sie die Farben vollkommen entstellt und alles, Personen wie leblose Gegenstände, in einem sehr wenig angenehmen grünlichen Licht erscheinen läßt. Freilich legt

man in Werkstätten mehr Wert darauf, deutlich zu sehen, als die Farbe der Gegenstände zu unterscheiden. Auch wirkt dieses milde Licht beruhigend und, wie es scheint, besänftigend auf den Charakter. Doch hat dieser moralische Vorzug noch nicht genügt, der Quecksilberlampe den Erfolg zu sichern.

Die Erfinder verzichten sogar lieber hierauf und bemühen sich, das Licht durch etwas rote Strahlung zu bereichern; z. B. indem die Röhre mit dünner Gaze umwickelt wird, die mit fluoreszierenden Substanzen wie Rhodamin u. dergl. getränkt ist. Leider verliert man auf diese Weise einen großen Teil der ausgesandten Strahlung.

Dies Beleuchtungssystem ist also für die Praxis noch nicht ganz auf der Höhe. Übrigens ist es mit der Theorie nicht viel besser; wir wissen nicht, warum der leuchtende Quecksilberdampf lediglich Schwingungen von mittlerer Wellenlänge aussendet. Diese Unkenntnis gilt jedoch nicht nur in betreff der lumineszierenden Substanzen. Wir sind keineswegs tiefer in den Mechanismus eingedrungen, durch welchen ein erhitzter Körper Schwingungen in dem umgebenden Äther hervorruft.*)

Während wir aber für das Studium der durch Wärme erzeugten Strahlungserscheinungen das Fundamentalgesetz von Kirchhoff als Führer haben, wissen wir nichts Bestimmtes über die Bedingungen, welche für die lumineszierenden Körper gelten. Man darf wohl annehmen, daß selbst durch ihre Vermittlung nicht die ganze elektrische Energie vollständig in Leuchtenergie umzuformen ist; es kann jedoch immerhin als sicher gelten, daß sich bei diesen Verfahren der Lichterzeugung eine außerordentlich viel bessere Ökonomie ergeben wird als bei den auf dem Glühprozeß beruhenden.

*) Dieses schwierige Problem klärt sich jedoch allmählich auf seit den Arbeiten von H. A. Lorentz und anderen Physikern deren Forschungen ich in meinem Buche „Die moderne Physik“ besprochen habe.

Kapitel IX.

Die künftige Entwicklung der Elektrizität.

Das reiche Gebiet, das wir soeben durchwandert haben, wurde der Tätigkeit geschickter Erfinder, die so viele bedeutende Anwendungen geschaffen haben, durch die unsterblichen Arbeiten eines Faraday und Ampère erschlossen. Den Ausgangspunkt dieser stürmischen Entwicklung, welche, wie wir sahen, die Arbeitsbedingungen aller Industrien und damit die Verhältnisse des sozialen Lebens selbst umgeformt hat, bildet die Entdeckung der Induktion, die ein einfaches und praktisches Mittel zur Erzeugung elektrischer Energie auf Kosten mechanischer darbietet.

Es scheint heute, daß die in Zukunft noch möglichen Fortschritte auf dem eingeschlagenen Wege nur Verbesserungen von Einzelheiten sein können. Einer der originellsten und geistvollsten französischen Elektriker, Leblanc, sagte darüber bei einer Ansprache an die Mitglieder der „Société internationale des électriciens“ in etwas bilderreicher Ausdrucksweise: „Unsere Generation hat von der Induktion gelebt, und ich glaube, daß dieses Thema verbraucht ist. Wir haben unsere Zeit damit zugebracht, Magnetfelder nach rechts und nach links rotieren zu lassen und ihre Bewegungen mit

denen von Kollektoren und Schleifbürsten zu verbinden. Diese Fragen sind nach allen Seiten hin so bearbeitet worden, daß man sie als erledigt ansehen kann; wenn man etwas Neues finden will, so muß man es in den Vakuumröhren suchen.“

Hier öffnen sich in der Tat den Blicken des erstaunten Elektrikers, der sich bereits am Ende des Weges angekommen glaubte, neue Ausblicke, und weite noch wenig bekannte Gebiete, deren Fruchtbarkeit schon jetzt außer Zweifel steht, tauchen vor seinem staunenden Auge empor. Eine endlose Bahn dehnt sich von neuem vor uns aus, auf welcher der kommenden Generation eine Fülle von Arbeit und nützlicher Beschäftigung winkt.

Noch bis vor wenigen Jahren hatte man fast ausschließlich die elektrischen Erscheinungen in Leitern studiert; dann drangen allmählich die Vorstellungen von Maxwell und Hertz über die Mitwirkung des Dielektrikums in die Praxis ein, und die Entdeckung der Telegraphie ohne Draht lieferte ein anschauliches Bild für die neue Denkweise.

Ganz neuerdings haben die Untersuchungen einer glänzenden Schar von Gelehrten über die elektrischen Erscheinungen in verdünnten Gasen Ergebnisse geliefert, welche für die Naturphilosophie von höchster Bedeutung sind. In Räumen, die nahezu frei sind von aller Materie, vereinfachen sich die Bedingungen und nähern sich denjenigen, unter welchen sich elektrische Erscheinungen im großartigsten Maßstabe in der Unendlichkeit der interplanetarischen Räume abspielen. Offenbar müssen die neuen, so kühnen Hypothesen über die Konstitution der Materie, die geniale Theorie der Elektronen, unsere Vorstellungen über die Natur der Elektrizität erst völlig umgestalten, und doch gibt es schon einige, allerdings noch zaghafte Anwendungen wie z. B. die Lampe, von der wir im vorhergehenden Kapitel sprachen, welche ihr Entstehen unmittelbar den von den Physikern der jungen Schule im Laboratorium gemachten Entdeckungen verdanken.

Und ebenso wie die Telegraphie, die Galvanoplastik und andere wegen der Kleinheit der in Bewegung gesetzten Energie als bescheiden zu bezeichnende Anwendungen, Vorläufer der Kraftübertragung im großen und der Riesenprozesse der elektrochemischen Großbetriebe gewesen sind, so lassen uns auch das von Marconi und Branly gelöste Problem, die Versuche von Cooper Hewitt u. a. voraussehen, daß der Weg frei ist für umfassende Unternehmungen, und daß vielleicht bald die Stunde da sein wird, wo diese Vorgänge technische Anwendung im größten Maßstabe finden werden.

So ist bereits die drahtlose Übertragung der in den Wasserfällen und den Gezeiten der Meere verfügbaren Energie durch den Raum hindurch in den Kreis der Möglichkeiten gerückt. Derselbe Äther, der uns über eine Riesenentfernung die ganze gewaltige Energiemenge von der Sonne herträgt, über die wir auf der Erde gebieten, ist sicherlich auch imstande, uns nach unserem Willen bescheidenere Dienste dieser Art zu leisten.

Derselbe Mechanismus, der in den Hertzschen Wellen eine sehr geringe Energiemenge überträgt, kann im Prinzip auch Hunderte von Kilowatt fortleiten, und der Gedanke ist nicht von der Hand zu weisen, daß der Tag nicht mehr fern ist, wo Motoren in Tätigkeit gesetzt werden und elektrische Lampen in Stromkreisen leuchten, die erhebliche Strecken von den Primärkreisen entfernt sind und keine materielle Verbindung mit denselben haben. Vergegenwärtigen wir uns nur, daß man in diesem Fall imstande wäre, den Raum mit Schwingungen zu erfüllen, die ohne merkliche Wirkung auf andere Stromkreise sind außer auf die von vornherein auf Resonanz abgestimmten Empfänger.

Andererseits sieht man auch allmählich die Möglichkeit näherrücken, auf wirklich praktische Weise elektrische Energie aus Wärme oder chemischer Energie zu erhalten;

auch auf diesem Gebiete scheint eine große wirtschaftliche Frage der glücklichen Lösung nicht mehr sehr fern zu sein.

So bringen die Verkehrsmittel, Telegraph, Telephon und in Bälde vielleicht auch der elektrische Fernseher die Menschen einander näher und tragen ihr Teil dazu bei, das Bedürfnis nach Freundschaft und Eintracht zu befriedigen, welches allen Völkern gemein ist. Andererseits befördern die täglichen Fortschritte auf dem Gebiet der Erzeugung und Übertragung großer Energiemengen nachdrücklich jene industrielle und soziale Bewegung, deren Richtung und Bedeutung, so hoffen wir, auf den vorhergehenden Seiten an bestimmten Beispielen klargelegt ist.

Bald wird ohne Zweifel die Elektrizität, nachdem sie die Industrie vollständig erobert hat, auch die Landwirtschaft unter ihre Herrschaft bringen; Wasserzuführung sowie Ableitung können schon heute vorteilhaft mittels moderner Elektromotoren ausgeführt werden, und sehr viele landwirtschaftliche Maschinen werden durch elektrischen Strom getrieben.

Und überall wird diese immer weitergehende Entwicklung nicht nur gewaltige wirtschaftliche Vorteile, sondern auch andere noch größere Wohltaten bringen. In der Tat, wer wollte nicht in ihrem Gefolge den großen alles umfassenden sozialen Fortschritt herannahen sehen, der ihr eigen ist!

Mit der Entwicklung der Maschinenteknik, wie sie gegenwärtig stattfindet, veredelt sich die Aufgabe des Arbeiters mit jedem Tag; der Tagelöhner auf dem Felde und der Arbeitsmann in der Fabrik kommen zum Bewußtsein des bestimmenden Einflusses, den die Intelligenz auf allen Gebieten auszuüben berufen ist.

Die niederen Arbeiten sind im Verschwinden begriffen; zu lange ist der Mensch in einer zwar schon gemilderten, aber immer noch mühseligen und drückenden Knechtschaft Sklave der Natur gewesen.

„Wenn das Weber-Schiffchen sich einmal von selbst bewegen wird,“ sagte Aristoteles, „kann man vielleicht den Sklaven entbehren.“ Diese Zeit, deren Kommen der Philosoph des Altertums als unmöglich betrachtete, scheint heute nicht mehr allzufern; bald wird das Schiffchen arbeiten, bewegt von der durch die Wissenschaft gebändigten Energie, geleitet durch Hand und Geist des Menschen, den nicht mehr die Dienstbarkeit gegen die Materie drückt, und auf dem geistig-sittlichen, wie auf dem wirtschaftlichen Gebiet wird die Elektrizität die große Befreierin sein.



Anmerkungen.

1. Zu S. 7. In deutschen Lehrbüchern wird die formale Analogie zwischen elektrischen und Wärmegrößen weniger benutzt; gewöhnlich vergleicht man die Elektrizität mit einer inkompressiblen Flüssigkeit und veranschaulicht so die Begriffe Potential (Niveauhöhe), Menge, Kapazität usw.

2. Zu S. 12. Das Carnot-Clausiussche Entropieprinzip.

3. Zu S. 13. Das „Institut de France“, die Vereinigung der fünf Pariser Akademien.

4. Zu S. 28. In Deutschland gewöhnlich als Koepselscher Apparat bezeichnet.

5. Zu S. 73. Dem Kempf-Hartmannschen Apparate im Prinzip ganz ähnlich ist der Frahmische Frequenz- und Geschwindigkeitsmesser.

6. Zu S. 88. Von nichtfranzösischen, insbesondere auch deutschen Elektrikern sind hier zu nennen, für die Theorie: Arnold, Heyland, Behrend, Kapp; für die praktischen Anwendungen: Doliwo-Dobrowolsky, Görges, Behn-Eschenburg u. a.

7. Zu S. 112. Entsprechende Methoden stammen von Arnold.

8. Zu S. 115. Dieser Widerstand liegt natürlich im Nebenschluß zur Wickelung der Feldmagnete.

9. Zu S. 123. In Deutschland besitzt Essen eine ganz modern eingerichtete große Kraftstation mit Dampfturbinen.

10. Zu S. 126. Bei uns führt die Physikalisch-technische Reichsanstalt in Charlottenburg solche Eichungen aus. Gewöhnlich werden die Instrumente jedoch schon in den Laboratorien der Fabriken selbst hinreichend genau geeicht.

11. Zu S. 151. Die Lütticher Weltausstellung vom Jahre 1905.

12. Zu S. 174. Die höchste in Deutschland angewandte Spannung beträgt 34000 Volt. Mit dieser Spannung versorgt das Kraftwerk Heimbach an der Urffalsperre in der Eifel die Umgegend. Eine Spannung von 25000 Volt besitzt das Kraftwerk Gebweiler i. Elsaß. Beide haben Dreiphasenstrom. Anlagen mit Spannungen von 17000, 12000 und 10000 Volt existieren mehrere, z. B. die Isarwerke in München, die Überlandzentrale in Straßburg i. E., Wiesloch bei Heidelberg in Baden u. a.

13. Zu S. 179. Der Name „booster“ bedeutet im allgemeinen jedoch auch Spannungserhöher.

14. Zu S. 203. Die Theorie des Bleiakкумуляtors hat Dolezalek auf der Grundlage der Nernstschen Vorstellungen entwickelt.

15. Zu S. 227. Das Reflexionsvermögen der blanken Metalle nimmt im allgemeinen mit abnehmender Wellenlänge selbst ab; das Emissionsvermögen ist aber um so größer, je kleiner das Reflexionsvermögen ist.

Namenregister.

- | | | |
|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Abraham, H. 75. 76. | Bouty 30. 46. 156. | Deprez, Marcel 33. |
| Abraham 218. | 244. | 105. 119. 153. 173. |
| Abt 38. | Branly 249. | 175. |
| Ader 76. | Braun 76. | Descartes 19. |
| Aepinus 19. | Breguet 161. | Dewar 42. |
| Ampère 17. 21. 46. | Bremer 241. | Du Bois 28. 29. 30. |
| 48. 52. 57. 59. 64. | Brown 147. 194. | 38. 45. 70. 101. |
| Arago 17. 27. 52. 91. | Brugmanns 34. | Duhem 45. 50. 193. |
| 92. | Buff 172. | |
| Armagnat 77. 162. | Bullier 215. | Edison 205. 230. |
| Arno, Ricardo 147. | Buscemi, Vincenzo | Edlund 189. |
| Arons 239. 244. | 194. | Eichberg 150. |
| Arrhenius 197. 200. | | Eules 43. |
| Ascoli 30. | Cailletet 206. | Ewing 21. 28. 29. |
| Auer von Welsbach | Canello 237. | 31. 33. 35. 41. 46. |
| 222. 232. | Cardew 77. | 48. |
| Ayrton 239. | Carnot 12. 194. 224. | |
| | Carpentier 76. | Fabry 244. |
| Becquerel, Edmond | Cauro 76. | Faraday 21. 22. 34. |
| 188. | Cavendish 218. | 52. 57. 63. 161. |
| Benedicks 215. | Clarke 95. | 247. |
| Berson 41. | Clausius 190. 224. | Faure 202. |
| Berthelot 218. | Clerc 213. | Favre 132. 189. |
| Bichat 216. | Colardeau 45. 206. | Ferraris, G. 88. 91. |
| Biot 65. | Couette 199. | Fery 222. |
| Birkeland 218. | Coulomb 6. 20. 41. | Fitzgerald 238. |
| Bjerkness 43. | Crookes 218. | Fleming 42. |
| Blondel 33. 75. 112. | Curie, Frau 30. 38. | Fontaine, H. 133. |
| 118. 120. 147. 176. | Curie, P. 41. 42. | 175. |
| 241. | 49. | Fourier 8. 76. |
| Bolton v. 233. | Czapski 193. | Fournier 45. |
| Boltzmann 222. 225. | | Fresnel 85. |
| Boucherot 85. 86. 88. | Darrieus, G. 205. | Fröhlich 154. |
| 116. 118. 120. 145. | Davy, Humphry 237. | Froment 132. |
| 146. | De La Rive 57. | |

- Gassendi 17.
 Gaulard 162.
 Gauss 6. 22.
 Georges 239.
 Gibbs 190. 193.
 Gilbault 193.
 Gilbert 41.
 Gin 217.
 Girard 217.
 Girod 217.
 Gockel 193.
 Gramme 72. 96 ff.
 132.
 Green 6. 22.
 Guillaume, Ch.-Ed.
 37. 111. 222. 225.
 228. 235.

 Hagen 227.
 Harlé 176.
 Hartmann und Braun
 77.
 Helmholtz 60. 76. 188.
 190. 193. 200.
 Henry 161.
 Hérault 211. 217.
 Hertz 17. 63. 248.
 Hess 76.
 Hewitt, Peter Cooper
 172. 244. 249. 255.
 Hillairet 152.
 Holden 33.
 Hopkinson, J. 27. 32.
 36. 70. 103. 116.
 139.
 Hospitalier 74. 167.
 Houllévigue 43. 44.
 Hurmuzescu 45.
 Hutin 171.

 Jablochhoff 187. 234.
 241.
 Jacobi 28. 129. 132.
 Jahn 193.
 Jamin 30. 244.
 Jandus 241.
 Janet, P. 44. 45. 73.
 74. 231. 233.

 Jouaust 233.
 Joubert 74. 77.
 Joule 133.
 Jumau 203. 205.

 Kabath 202.
 Kempf 73.
 Kapp 165.
 Keller 217.
 Kelvin, Lord 21. 25.
 44. 45. 60. 138.
 158. 188. 199.
 Kirchhoff 70. 222.
 224. 246.
 Kirstaedter 30.
 Kjellin 215. 217.
 Klaessen, Miss 33.
 Klemencic 43.
 Kowalski 218.
 Kurlbaum 224. 225.
 227.

 Lala 45.
 Langevin 49.
 Laugier 34.
 Laplace 22. 57.
 Latour, Marius 149.
 150.
 Leblanc, Maurice 88.
 113. 117. 118. 120.
 145. 146. 147. 170.
 171. 196. 247.
 Le Chatelier 41. 222.
 231. 235. 239.
 Ledebøer 41.
 Lehmann, O. 45.
 Lenz 28. 62.
 Le Roux 234. 239.
 Lippmann 192.
 Loppé 208.
 Lorentz, H. A. 246.
 Lori 43.
 Lummer 222. 224.
 227.
 Lunge 211.

 Marconi 43. 249.
 Marks 241.

 Marmier, 218.
 Mascart 221.
 Masson 161.
 Maurain 32. 43. 44.
 50.
 Manoeuvrier 244.
 Maxwell 17. 21. 22.
 46. 49. 63. 83. 248.
 Mayer, Robert 60.
 Melloni 59.
 Méritens 139.
 Meslin 40.
 Minet 211.
 Moissan 213. 215.
 216. 217.
 Moleyns, Fr. de 230.
 Montaud 202.
 Mordey 104.
 Moser, J. 193.
 Müller 29.

 Nagaoka 44.
 Nernst 195. 197. 200.
 234. 236.
 Neumann, F. 60.
 Newton 19. 59.
 Nouguiet 87.

 Oerstedt 17.
 Ohm 8.
 Osmond 46. 48.
 Ostwald 200.

 Pacinotti 96.
 Page 95. 162.
 Paillet 45.
 Pellat 43. 199.
 Perot 244.
 Picou 103. 112.
 Piola 43.
 Pionchon 41.
 Pixii 95.
 Planck 226.
 Planté 202.
 Poisson 6. 21. 22. 91.
 Pollak 172.
 Potier 80. 88. 112.
 142. 147. 150. 169.

Pouillet 8.
 Poynting 63.
 Pringsheim 222. 224.
 225.

Ramsen 45.
 Raoult 189.
 Rapieff 244.
 Rayleigh, Lord 32.
 218.

Reynier 202.

Riecke 196.

Ritter 202.

Röntgen 162.

Rougé-Fayet 171.

Rubens 222. 224.
 227. 253.

Ruhmkorff 162.

Rutherford 43.

Sainte-Claire Deville
 211.

Savart 65.
 Schmidt 32.
 Scott 167.
 Siemens 96. 213.
 Siemens und Halske
 28. 233.

Stassano 217.

Stefan 222.

Steinmetz 32. 86.

Street 217. 240.

Streng 38.

Swyngedaaw 87.
 156.

Tavernier 126.

Taylor 30.

Tesla 88. 243.

Thénard 34.

Thiesen 226.

Thompson S. P. 28.

Thomson, E. 82. 149.

— J. J. 43. 245.

Thury 98. 175. 183.
 208.

Tissot 43.

van t'Hoff 195.

Vauquelin 34.

Verdet 131.

Violle 213. 238.

Volta 55. 186. 188.
 198.

Warburg 31. 32.

Weber 21. 46. 48. 60.

Weihe 32.

Weiss 29. 33. 37.
 38. 50. 70.

Wenzel 34.

Wiedemann 48.

Wien, W. 222. 226.

Wilde 96.

Wilson 32. 238.

Winter 150.

Worms de Romilly 96.

Sachregister.

Abonententransformatoren
164.
Akkumulatoren 200. 207.
Aluminium 211.
Aluminiumfabrikation 216.
Ampèremeter 77.
Ankerkonstruktion 100.
Ankerrückwirkung 104.
Anlaßwiderstände 135.
Arnoldsche Transformatoren
171.
Asynchronmotoren 138. 142 ff.
Äther 33.
Auer-Brenner 224.
— Glühstrümpfe 227. 235.
Ausgleichströme 117.
Automobilbatterien 205. 208.

Bahnen, elektrische 179.
Batterie, Ladung 203.
Bellsches Telephon 139.
Bleiakkumulator 201.
Blockkontakte 180.
Bogenlampe 237 ff.
— Regulierapparate der 240.
Booster 179.
Branlysche Röhre 43.
Bremswirkung 136.
Bürsten 102.

Calciumcarbid, Herstellung 216.
Canellolampe 237.
Carnot-Clausiusssches Prinzip 12.
190. 194. 224.

Poincaré, Elektrizität.

Charakteristik bei Belastung
112.
Charakteristiken 105.
Chemie der hohen Temperaturen
212.
Chlorgewinnung, elektrolytische
211.
Compoundierung 114 ff.
— arten, elektromechanische
120.
Compoundschaltung 105.
Controller 180.
Convertisseur 170.
Coulombsches Gesetz 19.
Curisches Gesetz 42.
Curtis-Turbinen 123.

Dauerbrandlampen 240.
Diamagnetische Körper 34.
Diamagnetismus 40.
Diamanten, künstl. 213.
Dielektrikum 10. 83.
Dielektrische Verschiebungen 83.
Drehfeld 87 ff. 91.
Dreieckschaltung 89.
Dreiphasenstrom 113. 177.
Dreiphasensystem 182.
Druck, osmotischer 195.
Dynamomaschine, Leistungs-
fähigkeit 124.
— Schaltungsweise, der 114.
— Theorie 103.
— Verluste in der 104.
— Weiterentwicklung der 106.
— Wicklungsarten bei der 99.

- Edelsteine, künstliche 213.
 Edison-Akkumulator 205.
 Einphasen-motoren 141.
 — -strom bei Bahnlinien 182.
 Elektrische Beleuchtung 220.
 Elektrische Erscheinungen 2. 8.
 — Wellen 43.
 Elektrochemie 209ff.
 Elektrolyse 194. 209. 219.
 Elektrolyte, Leitfähigkeit 193.
 Elektromagnetische Theorie 5.
 Elektrometallurgie 217.
 Elektromotoren 150.
 Elektromotorische Kraft, Bestimmung 62.
 — Sitz 197.
 Elektronen, Theorie 248.
 Elemente, pyroelektrische 193. 200.
 Energie, chemische 186ff. 209.
 — elektrische 10. 186ff.
 — potentielle 10.
 Energiebedarf 125.
 Energieprinzip 60.
 Energiequelle, Dampf als 123.
 Energietransport 107. 153. 155. 173.
 Energieverteilungsnetze 141.
 Entmagnetisierendes Feld 30.
 Explosionsmotor 124.

 Fahrschalter 180.
 Farbstoffgewinnung, elektrolytische 212.
 Fauresches System 202.
 Feeders 178.
 Feldintensität 66.
 Feldmagnet, 104.
 Feldstärke 25.
 Ferromagnetische Körper 34.
 Flammenbogenlampe 242.
 Fluidum, magnetisches 21.
 Foucaultströme 92. 99. 101. 113.
 Frequenz der Schwingungen 73.

 Gadolinith 235.
 Galvanische Kette 51. 53. 186ff.
 Galvanoplastik 210.

 Gasmotor 124.
 Geißlersche Röhre 243.
 Generatoren, 95ff.
 — asynchrone 146.
 Geschwindigkeitsregulierung der Motoren 135.
 Gleichgewichtszustände, elektrische u. magnetische 6.
 Gleichstrom, Verteilung 177.
 — -Dynamomaschine 95ff.
 — -Motoren 129.
 — —, Nachteile 137.
 Gleichrichter 170.
 Glühlampen 229ff.
 Grammescher Anker 98.
 — Maschine, Verwandlung in Umformermaschine 168.
 — Ring 69.
 Graphitfabrikation 217.

 Haftintensität 196.
 Hämatit 38.
 Hauptstrommotor 134.
 Heilmannsche Lokomotive 180.
 Helmholtzsche Theorie der galvanischen Elemente 191.
 Hilfswicklung zur Beseitigung schädlicher elektromotorischer Kräfte 149.
 Hintereinanderschaltung 115.
 Hitzdrahtvoltmeter 77.
 Hochfrequenzströme 82.
 Hysteresimeter 33.

 Impedanz 81.
 Induktion 51ff.
 Induktionsfluß, magnetischer 66ff.
 Induktionsströme 58.
 Induktor 104.
 Induzierte Magnetisierung 25ff.
 Integralstrahler 225.
 Intensität der Magnetisierung 25. 26.
 — des Wechselstroms 74.
 Interferrikum 69.
 Ionentheorie, Anwendung auf Akkumulatoren 202.

- Joulesches Gesetz 67. 157.
 — Wärme 104. 112. 190.
 Isochronismus der Wechselstrommaschinen 118.
 Isolierung der Leitung 155.
 Kabel für Starkstromleitungen 174.
 Ketten, hydroelektrische 194.
 Kilowatt 124.
 Kirchhoffsche Gesetze 85.
 Kobaltakkumulator 206.
 Kohärer 43.
 Kohle als Leuchtstoff 223.
 Kohlebürsten 102.
 Kollektorlamellen 102.
 Kommutator-Gleichrichter 171.
 Kompensationsströme 117.
 Kondensator im Stromkreis 82.
 Kosten elektrischer Stationen 121. 122.
 Kraft, elektromotorische eines Elementes 188.
 — Die Entstehungsweise der elektromotorischen 194.
 — magnetomotorische 66.
 Kraftlinien, magnetische 33.
 Kraftlinienbilder, magnetische 24.
 Kraftwerk, elektrisches 121ff.
 Kuppelung 114ff.
 — Stabilität der 118.
 Laplacesches Gesetz 27. 65.
 Leblancs Gleichrichtertransformatoren 170.
 Leerlaufcharakteristik 112.
 Leistungsfaktor 78.
 Lenzsches Gesetz 92. 113. 140. 143.
 Leuchtkäfer, Strahlung 242.
 Lichtbogenöfen 215.
 Lösungsdruck 195.
 Magnesia 235.
 Magnete 16ff.
 — konstante 38.
 Magneteseisenstein 38.
 Magnetische Eigenschaften der Körper 33ff.
 — Empfindlichkeit der Lebewesen 45.
 — Feld 16ff. 22. 23. 64.
 — Kreis 64.
 — Wage 28.
 — Widerstand 66.
 — Zähigkeit 31.
 Magnetisierung des Eisens 18.
 — induzierte 25ff.
 — Intensität 25. 26.
 — Maximum der 29.
 — Permanente 26. 30.
 — Temporäre 26.
 Magnetisierungskurve 32.
 — leistung 86.
 Magnetismus 16ff.
 Magnetit 38.
 Magnetograph 28.
 Magnetostriktion 44.
 Manteltransformatoren 161.
 Maschinen eines Kraftwerkes 122ff.
 — Leistung 114.
 Mechanismus der Stromerzeugung 194.
 Mehrphasenmotoren 141.
 Mehrphasenströme 88.
 — Maschinen für 113.
 Meßapparate der Schalttafel 126.
 Meßmethoden, magnetische 27.
 Metallurgie 217.
 Methoden, elektrothermische — der Chemie 212.
 — zur Erzielung einer konstanten Potentialdifferenz 119ff.
 Militärbahn Berlin — Zossen, Schnellbahnversuche 182.
 Momentanwert der Intensität 77.
 Motoren 129.
 Nebenschlußmotoren 135.
 Nernstsche Lampe 235.
 — Theorie 196.
 Nickelakkumulatoren 205.
 Nodonsche Anordnung 172.

- Oberschwingungsdämpfer 113.
 Ofen, elektrischer 212. 215.
 Ohmsches Gesetz 81. 85. 133.
 Ondograph 74.
 Osmiumlampe 232.
 Osmondsche Theorie des Eisenmagnetismus 46.
 Oszillograph 75.
 Ozon, ein Handelsprodukt 218.
- Parallelschaltung von Dynamomaschinen 115.
 Paramagnetische Körper 34. 39ff.
 Parsons-Turbinen 123.
 Peltier-Wirkungen 204.
 Permeabilität 26.
 — des Vakuums 33.
 Permeameter 28.
 Permutatrice 171.
 Phasenindikatoren 119.
 Phasenverschiebung 80.
 Phosphoreszenzerscheinungen 243.
 Plantésches System 202.
 Potential, elektrisches 8.
 Pufferbatterien 208.
 Pyrophorus noctilucus 242.
 Pyrrhotin 38.
- Quadrantelektrometer 77.
 Quecksilberdampflampen als Ventilzellen 172.
 Quecksilberdampf-Lichtbogen 242 ff.
 — Lampe von Arons 244.
 — — von Hewitt 244.
- Rateau-Turbinen 123.
 Reaktanz 81.
 — spannungen 102.
 Regulierapparate d. Bogenlampe 240.
 Regulierwiderstand 115.
 Reinigung des Kupfers 210.
 Reluktanz 66.
 Repulsionsmotoren 147. 150.
 Rheograph 76.
 Riemenkuppelung 109.
- Rotierende Felder 91.
 Rotor 94. 142.
- Salpeterbildung, künstliche 218.
 Schalttafel 125 ff.
 Schaltungsweise der Dynamomaschinen 114.
 Schleifbügel 180.
 Schlüpfung 143 ff.
 Selbstinduktion, Einfluß der 79. 102. 140. 174.
 Serienmotoren 147 ff.
 Siphon-Rekorder 138.
 Spannungserhöher 178.
 Spannungserniedriger 179.
 Spannungstransformatoren 159.
 Speiseleitungen 178.
 Spitzenentladung, elektrische 218.
 Stator 142.
 Stefansches Gesetz 225.
 Sternschaltung 90.
 Straßenbahnen 116. 208.
 Strom, wattloser 80.
 — Wirkungen des elektrischen 64.
 — -intensität, effektive 77.
 Ströme, mehrphasige 87 ff.
 Suszeptibilität 26.
 Synchrongeneratoren 114.
 Synchronmotoren 137 ff.
- Tantallampe 233.
 Telegraphie ohne Draht 248.
 Tesla-Röhre 243.
 Theorie der Dynamomaschine 103.
 — der Elektronen 248.
 — der Induktion 57 ff.
 — des Magnetismus 46 ff.
 — thermodynamische 200.
 Theorie der Transformatoren 162.
 Thermodynamik 186. 197.
 Thomsonsche Formel für die elektromotorische Kraft 189.
 Thuryssches Verfahren 175.

- Transformatoren 159 ff.
 — polymorphe 166.
 — Prüfung 165.
 — ruhende 159.
 — Theorie der 162.
 —, Wirkungsgrad, der 163.
 Trolley-Rolle 180.
 Turbinen 106. 123.
- Überspannung, Schutz gegen 166.
 Umformer, rotierende 169. 181.
 Umformung des Wechselstromes in Gleichstrom 168.
 Umwandlungstemperatur 41.
 Unterstationen 181.
- Vakuum, das 33.
 Ventilapparat, elektrolytischer 172.
 Verluste in der Dynamomaschine 104.
 Verschiebung, dielektrische 83.
- Voltaschen Problem 198.
 Vorteile hoher Spannungen 157.
- Wasserkraftanlagen 126 ff.
 Wasserturbinen 127.
 Wattmeter 80.
 Wattstrom 80.
 Wechselstrom 71 ff.
 Wechselstromgeneratoren 74. 107 ff.
 — motoren 87. 137 ff.
 — untersuchung 74.
 Wicklungsarten bei der Dynamomaschine 99.
 Widerstandsöfen 215.
 Wirbelströme 92.
 Wirkungsgrad der Leitung 155.
 Wolframlampe 233.
- Zentrale zur Erzeugung elektrischer Energie 114.
 Zirkulationsströme 117.
 Zusatzmaschine 178.
 — -transformator 178.

Verlag von Quelle & Meyer in Leipzig

Die moderne Physik

Ihre Entwicklung. Von **L. Poincaré**

Übertragen von

Privat-Dozent **Dr. Brahn**

8. 260 Seiten. Geheftet 3.80 M.

In Originalleinenband 4.40 M.

„Der bekannte französische Gelehrte führt dem Leser in fesselnder, leicht verständlicher Darstellung ein lebendiges Bild der heutigen physikalischen Anschauung vor. Er bespricht die Genauigkeit der Messungen, die Grundgesetze, die Zustandsänderungen, die osmotische und die Ionentheorie, die Entwicklung der drahtlosen Telegraphie, die Radioaktivität, die Elektronentheorie und die neuen Anschauungen über die Beschaffenheit des Äthers.“ *Arndt. Polytechnisches Journal. Heft 17. 1908.*

„Diese philosophisch-kritisch und darum äußerst anregend behandelte historische Darstellung der Fortschritte der Naturwissenschaft ist von hohem Interesse und wird bei jedem aufmerksamen Leser einen nachhaltigen Eindruck hinterlassen und ihm das Verständnis für die Fragen der neuesten Forschung wesentlich erleichtern.“

H. Becker. Naturwissenschaftliche Rundschau. No. 17, XXIII. Jahrgang.

„In knappster Form und unter Vermeidung aller rein technischen Einzelheiten gibt es einen interessanten Überblick über die Entwicklung der modernen Physik, indem es die Arbeiten aller Kulturnationen zusammenfaßt und die großen Veränderungen zeigt, denen alle Probleme in Inhalt und Auffassung während der letzten Jahre unterworfen waren.“

—v—. Zeitschrift für Schwachstromtechnik. Heft 2. 1908.

Prospekte unentgeltlich und postfrei

Verlag von Quelle & Meyer in Leipzig

Die neueren Forschungen auf dem Gebiet der Elektrizität und ihre Anwendungen

Gemeinverständlich dargestellt von
Professor Dr. Kalähne

gr. 8. 284 Seiten mit zahlreichen Abbildungen
In Originalleinenband 4.80 M., brosch. 4.40 M.

„Die Zahl derjenigen unserer bedeutenden Physiker, die im besten Sinne elementar und allgemeinverständlich zu schreiben verstehen, ist entsprechend den großen Schwierigkeiten, welche die Lehrstoffe der Physik einer populären Behandlung entgegenbringen, außerordentlich gering. Professor Kalähne beherrscht diese seltene Kunst in seltenem Maße: sein oben genanntes Buch erbringt dafür den Beweis. . . Durch diese vom Einfachen zum Komplizierten ansteigende Entwicklung wird der Leser bequem und sicher zu den höchsten Gipfeln der modernen Elektrizitätslehre hinaufgeführt. Möchten recht viele das gediegene Werk zu ihren Studien benutzen.“

Aus der Natur. Heft 1, IV. Jahrgang.

„Der letzte Teil des Buches ist den elektrischen Entladungen in Gasen und den Erscheinungen der Radioaktivität gewidmet, kurz es werden alle jene Fragen eingehend und klar erörtert, mit denen sich die moderne physikalische Wissenschaft beschäftigt.“

Der Kompaß. No. 7. 1908.

Die glückliche Vereinigung von Allgemeinverständlichkeit und Wissenschaftlichkeit macht das Buch nicht nur wertvoll für den allgemein gebildeten Leser, der sich für die modernen physikalischen Forschungen auf dem Gebiete der Elektrizität interessiert, sondern es kann auch für Studierende und Techniker ein vorzügliches Orientierungsmittel auf theoretischem Gebiete sein, daß sich sehr wohl als Vorbereitung und Ergänzung für strenge Lehrbücher benutzen läßt.

A. Becker. Naturwissenschaftliche Rundschau. No. 54, XXIII. Jahrg.

„Für alle diejenigen, die nach dieser Richtung sich weiter fortzubilden wünschen, kann das vorliegende Werk bestens empfohlen werden.“ St.

Zeitschrift für das gesamte kaufmännische Unterrichtswesen.

Prospekte unentgeltlich und postfrei

Die Elektrizität als Licht- und Kraftquelle.

Von Priv.-Doz. Dr. P. Eversheim. 8. 123 Seiten mit zahlreichen Abbildungen. Geh. 1 M., geb. 1.25 M.

„Heute ist das Verwendungsgebiet der Elektrizität ein so außerordentlich ausgedehntes, daß wohl ein jeder mehr oder weniger mit ihr in Berührung kommt. Deshalb kann man es nur dankbar begrüßen, wenn auch dem Laien durch ein so klar geschriebenes Büchlein ein Einblick eröffnet wird und in großen Zügen die Grundbegriffe der Elektrotechnik dargelegt werden. . . . Die sorgfältig gezeichneten Abbildungen beleben die Darstellung.“ *Elektrochemische Zeitschrift*. Heft 7, 1907.

„Die klare und gute Ausdrucksweise und die Art, wie er es verstanden hat überall nur das Wesentlichste herauszugreifen, werden dem Werkchen insbesondere in den Laienkreisen wohl eine weitere Verbreitung sichern.“ *Gg. Hilpert*. *Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen*. No. 32. V. Jahrgang.

Einführung in die Elektrochemie.

Von Prof. Dr. Vermbach. 8. 140 Seiten mit zahlreichen Abbildungen. Geheftet 1 M., geb. 1.25 M.

„Wir freuen uns deshalb, daß ein so wichtiges Forschungsgebiet, dem auch die technische Industrie eine reiche Ernte verdankt, im Rahmen einer populär wissenschaftlichen Sammlung die ihm gebührende Berücksichtigung gefunden hat. Der Verfasser hat es verstanden, gemeinverständlich zu schreiben. Von der Sprache der Mathematik wird fast kein Gebrauch gemacht. Um so größeres Gewicht wird darauf gelegt, dem Leser die fundamentalsten Gesetze verständlich zu machen. . . . die jedem Leser an Hand zahlreicher klarer Figuren einen Überblick und Einblick in die neueren Theorien der Elektrochemie und ihre Anwendungen geben und zu weiteren Studien anregen.“

Zentralblatt f. Pharmazie u. Chemie. No. 25, IV. Jahrgang.

Physikalische Musiklehre.

Eine Einführung in das Wesen und die Bildung der Töne in der Instrumentalmusik und im Gesang. Von Prof. Dr. H. Starke. 240 Seiten mit zahlr. Abbild. Geheftet Mark 3.80. Gebunden Mark 4.20

„So entspricht ein Werk wie das vorliegende, das eine Vereinigung der naturwissenschaftlichen wie ästhetischen Musiklehre einem allgemeineren Kreise zugänglich macht, direkt einem Bedürfnis. Hier werden die Besprechungen auch komplizierterer akustischer Erscheinungen physikalischer Art gemeinverständlich durchgeführt. Eine große Anzahl von Abbildungen beleben die Lektüre und erleichtern das Verständnis dieses auch äußerst gefälligen und empfehlenswerten Buches, das jedem Gebildeten und Musikfreund willkommen sein wird.“

Deutsche Instrumentenbau-Zeitung. No. 19, IX. Jahrgang.

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000299207