

Kgl. Realgymnasium
und
Kgl. Oberrealschule in Ulm.

Beilage zum Bericht
über
das Schuljahr 1912/13.

Elementare Behandlung
einfacher physikalischer Vorgänge vom Standpunkt der
:· ELEKTRONEN-THEORIE :·
von Professor LEBKÜCHNER.



ULM 1913.

Gedruckt bei Baur & Schaeuffelen.

Prog. Nr. 866.

Opul
2 (1913)

866.





Inhalts-Übersicht.

	Seite
Vorwort	III
I. Die Grundlagen der Elektronentheorie.	
§ 1. Das elektrische Elementarquantum	1
§ 2. Das Elektron	2
§ 3. Vorstellungen über das Wesen der Materie und des elektrischen Zustands	4
II. Elektronentheorie der bekannteren elektrischen Erscheinungen.	
§ 4. Die elektrolytischen Ionen; Wesen und Entstehung des elektrischen Stroms	9
§ 5. Das Ohmsche und das Joulesche Gesetz	14
§ 6. Elektrische und magnetische Störungen im Äther	19
§ 7. Das magnetische Feld des bewegten Elektrons Selbstinduktion	22
§ 8. Einwirkung eines äußeren magnetischen Felds auf ein bewegtes Elektron	26
§ 9. Statische Erscheinungen auf Leitern	30
§ 10. Spezielle Vorstellungen über die frei beweglichen Elektronen in Leitern; Wärmeleitung; Thermostrome	33
§ 11. Elektrische Vorgänge in Isolatoren	40
III. Die elektrischen Schwingungen und das Licht.	
§ 12. Elektrische Schwingungen	44
§ 13. Elektromagnetische Wellen	47
§ 14. Das Licht	50
IV. Elektrische Erscheinungen in Gasen.	
§ 15. Der unselbständige Gasstrom	56
§ 16. Der selbständige Gasstrom	59

Berichtigung.

Infolge eines Missverständnisses wurde beim Druck mehrfach der Buchstabe J an Stelle von I verwendet, so durchweg beim Wort Ion (im Text Jon).

Vorwort.

Die folgende Arbeit soll nicht wissenschaftlich neue Resultate bringen, sondern ich habe mir die Aufgabe gestellt, durch dieselbe die Elektronentheorie in den Vorstellungskreis der Schüler einzuführen. Diesem Zweck entsprechend habe ich Rechnungen und mathematische Entwicklungen fast vollständig vermieden und allen Nachdruck auf möglichst anschauliche Ausmalung der betrachteten Vorgänge gelegt. Auf diese Weise war es freilich nicht immer möglich, die Ableitungen und Schlussfolgerungen in voller Strenge durchzuführen und ich möchte gleich von vornherein den Leser bitten — wie ich auch an einzelnen Stellen des Texts noch besonders hervorgehoben habe —, in solchen Fällen das Gefühl des Unbefriedigtseins zurückzudrängen und sich zu sagen, dass die mathematische Formulierung und Durchführung der betreffenden Ueberlegungen die noch bestehenden Zweifel vollends beseitigen würde. Wem diese Art der Behandlung des Stoffs als mangelhaft erscheinen will, der möge berücksichtigen, dass ich eben in erster Linie für den Standpunkt des Schülers schreibe. Wir alle haben das Bedürfnis, der mathematischen Darstellung physikalischer Vorgänge möglichst anschauliche Vorstellungen zu unterlegen, dem jugendlichen Forscher ist letzteres sogar die Hauptsache, ersteres noch ein widerwärtiger Ballast, und diesen etwa in Form von Ergänzungen beizufügen hätten die einer solchen Abhandlung gesteckten Grenzen nicht erlaubt. Die Elektronentheorie ist zwar gut fundamntiert, aber bekanntlich noch keineswegs vollständig ausgebaut; wenn ich im Bestreben, ein einigermaßen geschlossenes Bild zu geben, vielleicht auch hin und wieder Einzelbeschreibungen gewagt habe, wo ich mit der Möglichkeit rechnen muss, dass sie die spätere Forschung modifizieren kann, so glaube ich doch nirgends bloss der Phantasie gefolgt zu sein. Aus der Fülle der Erscheinungen habe ich das ausgewählt, was im allgemeinen im Physikunterricht auf der Oberstufe erwähnt wird oder erwähnt werden sollte; wenn die Besprechung der elektrischen Erscheinungen in Gasen, speziell des selbständigen Gasstroms, trotzdem knapp ausgefallen ist, so habe ich die Gründe dafür zu Beginn von § 16 genannt und möchte hier bloss hervorheben, dass m. E. die rein experimentelle Behandlung dieses Gebiets weiter gehen darf, weiter auch, als es die gebräuchlichen Schullehrbücher tun. Meine Aufgabe war es hier natürlich nicht, Tatsachen zu beschreiben, sondern nur die dazugehörige Theorie zu liefern; notwendig zum Verständnis meiner Ausführungen sind daher die Kenntnisse, wie sie bei der Reifeprüfung der Realgymnasien und Oberrealschulen gefordert werden, insbesondere auch die Bekanntschaft mit dem Begriff des Po-

tentials, seinem Zusammenhang mit der elektrischen Feldstärke und seinem Gebrauch bei der Darstellung der elektrischen Erscheinungen überhaupt. Unter diesen Voraussetzungen konnte ich, ohne durch anderweitige Rücksichten gebunden zu sein, die Anordnung des Stoffs ganz unter dem Gesichtspunkt treffen, die schrittweise Erweiterung und Vertiefung unserer Anschauungen möglichst deutlich hervortreten zu lassen; dies gilt namentlich für das II. Kapitel. Eine spezielle Vorstellung über das Bestehen der Leitungselektronen habe ich erst in § 10 eingeführt, um zu zeigen, wieweit man ohne eine solche kommen kann; strenggenommen hätte in diesem Sinn sogar bis zum Schluss damit gewartet werden können, doch hätte dies den Zusammenhang wohl zu sehr zerrissen. Dass ich mich da und dort auch damit begnügte, einen Gedankengang bloss anzuregen, die weitere Ausspinnung dem Leser überlassend, brauche ich nicht weiter zu rechtfertigen.

Vom Literaturnachweis habe ich im allgemeinen abgesehen, da ich den Lesern, für welche ein solcher von Interesse sein könnte, inhaltlich ja nichts Neues bringe; indessen schien es mir doch zuweilen wünschenswert, meine Quellen ausdrücklich hervorzuheben. Die hiebei in Betracht kommende Literatur ist die folgende:

- Annalen der Physik**, zitiert mit „A.“
Jahrbuch der Radioaktivität u. Elektronik „ „ „J.“
Starke, Experimentelle Elektrizitätslehre „ „ „St.“
2 Aufl., Teubner 1910.
J. J. Thomson, die Korpuskulartheorie der Materie, deutsch von Siebert, Vieweg & Sohn 1908. „ „ „Th.“
Richarz, Anfangsgründe der Maxwell'schen Theorie verknüpft mit der Elektronentheorie, Teubner 1909 „ „ „R.“

Verwendet habe ich ausserdem u. a.

- Lorentz, The Theory of Electrons and its Applications to the Phenomena of Light and Radiant Heat**, Teubner 1909
und
J. J. Thomson, Elektrizitätsdurchgang in Gasen, deutsch von Marx, Teubner 1906.

Dem Schüler, der mir die Reinzeichnungen für den Druck der Figuren ausführte, spreche ich auch an dieser Stelle meinen Dank aus.

ULM, im Juli 1913.

R. Lebküchner.

I. Die Grundlagen der Elektronentheorie.

§ 1. **Das elektrische Elementarquantum.** Nach der von Clausius begründeten, von Arrhenius erweiterten und von der heutigen Chemie auf neuer Grundlage ausgebauten Theorie der elektrolytischen Dissociation sind die Moleküle eines Elektrolyten in wässriger Lösung teilweise in entgegengesetzt elektrische Teilchen gespalten, die positiven Kationen (Metalle, Wasserstoff), welche bei der Elektrolyse an der Kathode, und die negativen Anionen (Hydroxyl, Säurerest), welche an der Anode ausgeschieden werden. Das erste Faradaysche Gesetz führt zum Begriff des elektrochemischen Äquivalents, worunter man diejenige Gewichtsmenge eines Stoffs versteht, welche von einem Strom von der Stärke 1 Ampère (Am) in der Zeiteinheit ausgeschieden wird. Die elektrochemischen Äquivalente verschiedener Stoffe sind nach dem zweiten Faradayschen Gesetz chemisch äquivalent, d. h. es sind solche Gewichtsmengen der verschiedenen Stoffe, welche sich mit einander verbinden oder einander in Verbindungen vertreten können; sie müssen daher alle gleichviel chemische Wertigkeiten darstellen, die Zahl der in ihnen enthaltenen Ionen ist je nach deren Wertigkeit verschieden, aber das Produkt aus Anzahl und Wertigkeit der Ionen gibt immer dieselbe Zahl. Der elektrische Strom besteht jedenfalls im Elektrolyten in einem Transport von Elektrizität längs der Stromrichtung und zwar durch die Ionen. Die Elektrizitätsmenge, welche bei der Stromstärke 1 Am in der Sekunde durch irgend einen Querschnitt des Zersetzungsgefäßes hindurchgeht, ist eine ganz bestimmte Größe, genannt 1 Coulomb (Cb), die praktische Einheit der Elektrizitätsmenge; 1 Cb ist also auch diejenige Elektrizitätsmenge, welche von den ein elektrochemisches Äquivalent für die Sekunde bildenden Ionen an der Elektrode abgegeben wird, welche auf die von ihnen dargestellte Zahl von Wertigkeiten kommt. Dividiert man 1 Cb durch diese Zahl, so erhält man diejenige Elektrizitätsmenge, welche auf eine Wertigkeit kommt; sie muß somit auch für alle Ionen dieselbe sein. Die an die elektrolytischen Ionen gebundene Elektrizität verhält sich also, wie wenn sie aus lauter kleinen unter sich gleich großen Teilchen bestände, derart, daß jedem Ion sovieler positive oder negative Teilchen zukommen, als seine Wertigkeit beträgt; da die Wertigkeiten sich nicht mehr teilen lassen, machen auch diese Teilchen den Eindruck der Unteilbarkeit. Dies führte zu dem Namen **elektrisches Elementarquantum** zur Bezeichnung eines solchen Teilchens.

Es wäre von Wert, die Grösse dieses Elementarquantums zu kennen; zunächst läßt sich diejenige Elektrizitätsmenge feststellen, welche ein Äquivalent*) irgend eines Stoffes in Ionenform trägt. 1 Am scheidet

*) Ein Äquivalent ist diejenige Gewichtsmenge in gr, welche einem in gr abgemessenen Verbindungsgewicht (Atomgewicht) Wasserstoff, also 1,01 gr äquivalent ist. Letztere Gewichtsmenge kann das Äquivalent des Wasserstoffs selbst genannt werden.

an der Kathode in der Sekunde 0,001118 gr Silber aus, 0,001118 gr Silber tragen also die positive Elektrizitätsmenge 1 Cb, ein Äquivalent, d. h. 107,9 gr Ag (das Verbindungsgewicht des einwertigen Silbers ist 107,9) $\frac{107,9}{0,001118}$ Cb = 96512 Cb*). Dieselbe Elektrizitätsmenge kommt nach dem zweiten Faradayschen Gesetz dem Äquivalent jedes anderen Stoffes zu. Zur Berechnung des Elementarquantums fehlt nur noch die Zahl der Wertigkeiten im Äquivalent; sie ist ebenfalls für alle Stoffe gleich, es genügt daher, sie für einen einzigen Stoff zu ermitteln. Angenähert ist dies für Gase mit Hilfe der kinetischen Gastheorie möglich. Nach dieser enthält ein Mol eines Gases, z. B. des Wasserstoffs, $0,71 \cdot 10^{24}$ Moleküle**). Da ein Molekül Wasserstoff als aus 2 Atomen bestehend anzusehen ist, so besteht ein Mol, d. h. 2,02 gr aus $2 \cdot 0,71 \cdot 10^{24}$, ein Äquivalent, 1,01 gr, aus $0,71 \cdot 10^{24}$ Atomen Wasserstoff, von denen bei der elektrolytischen Ausscheidung des Wasserstoffs jedes aus einem Wasserstoffion entsteht. Da Wasserstoff einwertig ist, so ist $0,71 \cdot 10^{24}$ auch die Zahl der in einem Äquivalent Wasserstoff enthaltenen Wertigkeiten. Hienach kommt auf eine Wertigkeit, also auf ein Elementarquantum, die Elektrizitätsmenge $\frac{96512}{0,71} \cdot 10^{-24}$ Cb = $1,4 \cdot 10^{-19}$ Cb.

§ 2. Das Elektron. Die Erscheinung der Kathodenstrahlen darf in ihren wesentlichen Punkten als bekannt vorausgesetzt werden: erniedrigt man in einer Geißlerischen Röhre den Druck auf etwa 0,001 mm (Hittorfsche oder Crookesche Röhre), so gewahrt man in derselben beim Durchgang der Entladung eines Induktoriums nur noch einen schwachen bläulichen Schimmer und auf der Glaswand der Kathode gegenüber einen in gelbgrüner Farbe leuchtenden Fluoreszenzfleck. Durch Untersuchungen mit Hilfe von in die Röhre gebrachten schattengebenden Körpern kann festgestellt werden, daß dieser hervorgehoben wird durch eine von der Kathode in normaler Richtung ausgehende geradlinige Strahlung, die den Augen nicht als solche, sondern nur durch ihre Fluoreszenzwirkung sichtbar wird und den Namen Kathodenstrahlen erhalten hat. Von ihren Eigenschaften ist hier für uns Folgendes wichtig. Nähert man der Röhre einen Magneten, so verschiebt sich der helle Fleck. Die hierin zum Ausdruck kommende magnetische Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen läßt sich noch deutlicher zeigen, wenn man im Innern der Röhre einen Fluoreszenzschirm so anbringt, daß ein durch eine enge Blende aus dem Ganzen ausgeschnittenes Kathodenstrahlenbündel dem Schirm entlang streift. Man sieht dann zunächst auf diesem eine helle gerade Linie, die sich bei Annäherung des Magneten krümmt, aber so, daß sie die Kathodenfläche immer noch in normaler Richtung verläßt. Die Richtung der Ablenkung ist dabei die gleiche, wie sie ein

*) Die gewöhnlich angegebene Zahl 96530 Cb entspricht einem Verbindungsgewicht 107,92 des Silbers.

**) Unter einem Mol versteht man soviel gr, als das Molargewicht (Molekulargewicht) angibt; eine einfache Überlegung läßt erkennen, daß die Zahl der Moleküle in einem Mol für alle Stoffe dieselbe sein muß. Die oben angegebene Zahl wird von Ostwald (Grundriß der allg. Chemie, 4. Aufl., S. 571) als die wahrscheinlichste bezeichnet.

elektrischer Strom zeigen würde, der die Bahn des Kathodenstrahlenbündels gegen die Kathode hin durchläufe (vgl. § 6). Eine Ablenkung erfahren die Kathodenstrahlen ferner durch ein elektrisches Feld. Befestigt man im Innern der Röhre zwei parallele Metallplatten derart, daß die Kathodenstrahlen parallel zu ihnen zwischen ihnen hindurchgehen, und erzeugt, indem man die Platten mittelst eingeschmolzener Drähte auf verschiedenes Potential bringt, zwischen ihnen ein kräftiges Feld, so werden die Strahlen entgegengesetzt der positiven Richtung der Kraftlinien abgelenkt, also in einer Richtung, in der sich ein negativ elektrischer Körper bewegen würde. Die Erscheinung nennt man die Deflexion der Kathodenstrahlen. Bringt man endlich außer der Anode und der Kathode der letzteren gegenüber noch ein Metallplättchen an, so kann man durch geeignete Anordnung des Versuchs zeigen, daß dieses durch die auftreffenden Kathodenstrahlen negativ elektrisch geladen wird.

Die beschriebenen Erscheinungen lassen kaum eine andere Erklärung zu als die, daß die Kathodenstrahlen aus negativ elektrischen sich in der Richtung von der Kathode weg bewegenden Teilchen bestehen; die Entstehung der elektrischen Ladung fordert direkt dazu heraus und die Beobachtungen bei der Deflexion stehen vollständig im Einklang damit. Geht man von der Vorstellung aus, daß es sich beim gewöhnlichen elektrischen Strom um in der Stromrichtung sich bewegende positiv elektrische Teilchen handle, so wird auch die magnetische Ablenkung verständlich; denn es ist wohl glaubhaft, daß eine Bewegung positiver Teilchen in einer und eine solche negativer Teilchen in der entgegengesetzten Richtung gleichbedeutend ist. Sofern nun allerdings die erwähnte Vorstellung vom Wesen des Stromes problematisch ist, kann umgekehrt der Vergleich der magnetischen Ablenkung der Kathodenstrahlen und des Stroms als Hinweis darauf dienen, daß dieser Vorstellung Richtiges zu Grunde liegt (s. § 4). Hält man die Anschauung bewegter Teilchen in den Kathodenstrahlen fest, so erscheint die magnetische und die elektrische Ablenkung als die Ablenkung eines bewegten Körpers aus seiner Bahn. Dieser widersetzt er sich vermöge seines zentrifugalen Trägheitswiderstands; dem letzteren muß also die in der Richtung der Kurvennormale wirkende Komponente der ablenkenden Kraft in jedem Augenblick gleich sein. Formuliert man diese Bedingung mathematisch, so erhält man eine Gleichung, welche neben anderen Größen Masse m und Geschwindigkeit v des bewegten Teilchens, den Krümmungsradius seiner Bahn und seine elektrische Ladung e , der die ablenkende Kraft proportional ist, enthält. Die Beobachtung beider Ablenkungen liefert in dieser Weise zwei Gleichungen in denen m , v und e die Unbekannten sind und die derart ausfallen, daß sie die Berechnung von $\frac{e}{m}$, der sog. spezifischen Ladung (Ladung umgerechnet auf die Masseneinheit) und von v gestatten. Letzteres ergibt sich abhängig von der Potentialdifferenz der Elektroden und beträgt für eine solche von $10000 \frac{\text{Volt}}{\text{cm}}$ $0,61 \cdot 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ (St., S. 585), also etwa $\frac{1}{5}$ der Lichtgeschwindigkeit, somit mehr als die uns bei bewegten Körpern

sonst geläufigen Geschwindigkeiten. Die Bestimmung von $\frac{e}{m}$ wurde von einer großen Anzahl von Forschern unternommen; die genauesten Untersuchungen liefern Werte, die der Mehrzahl nach zwischen $1,7 \cdot 10^8$ und $1,8 \cdot 10^8$ liegen, wenn e in Cb, m in gr gemessen wird. (J. 9, S. 43 ff. 1912). Ueber e und m selbst sagt dieser Wert noch nichts aus; nimmt man zunächst an, daß m von der Grössenordnung eines Wasserstoffatoms ist, setzt also nach S. 2 $m = \frac{1,01}{0,71} \cdot 10^{-24}$ gr, so würde e 1800 bis 1900mal*) so groß wie das Elementarquantum. Würde man umgekehrt e gleich der Ladung des Elementarquantums annehmen, so müßte m auch 1800—1900mal kleiner, also nahezu gleich dem 2000sten Teil der Masse eines Wasserstoffatoms gedacht werden. Die zweite Annahme hat nun bedeutend mehr Wahrscheinlichkeit für sich, zunächst wegen der grossen Geschwindigkeit, die umso eher verständlich wird, je kleiner die bewegte Masse ist. Ferner liegt es sehr nahe, hier, wo es sich offenbar um diskrete elektrische Teilchen handelt, das schon bekannte elektrische Elementarquantum wiederzufinden (weitere Bestätigungen s. S. 6). Dann aber tritt dasselbe in den Kathodenstrahlen in Verbindung mit der kleinsten bis jetzt bekannt gewordenen Masse auf; und solange keine Erscheinungen gefunden werden, bei denen die an ihm haftende Masse noch kleiner ist, ist die Annahme berechtigt, daß in den Kathodenstrahlen die negativen Elementarquanta für sich allein, als selbständige Massenteilchen vorliegen. Mit anderen Worten: wir sehen heute die negative Elektrizität als einen Stoff an, dessen einzelne Atome uns in den Kathodenstrahlen selbständig in ausserordentlich rascher Bewegung entgegentreten. Diese Atome haben den Namen **Elektronen** erhalten; sie sind also 1800—1900mal kleiner als die Wasserstoffatome. Die Beantwortung der sich sofort aufdrängenden Frage, ob von der positiven Elektrizität dasselbe gesagt werden kann, steht noch aus. Es gibt allerdings eine den Kathodenstrahlen ähnliche Erscheinung, die sog. Kanalstrahlen (S. 62), bei denen es sich um bewegte positiv elektrische Teilchen handelt. Die analogen Bestimmungen von v und $\frac{e}{m}$ führen aber auf beträchtlich kleinere Werte der Geschwindigkeiten und, falls man e wieder als das Elementarquantum ansieht, auf Massen von der Größenordnung der gewöhnlichen chemischen Atome und Moleküle. Gleiches gilt für alle anderen hieher gehörenden Fälle. Es ist also sehr fraglich, ob es überhaupt positive Elektronen gibt; jedenfalls sind sie bis jetzt noch nicht in selbständiger Existenz beobachtet worden.

§ 3. Vorstellungen über das Wesen der Materie und des elektrischen Zustands. Die Entdeckung der Elektronen hat im Verein mit dem Studium der Leitungsvorgänge in Gasen und dem der Radio-

*) Diese Zahl und damit die folgende Angabe ist tatsächlich unabhängig von der S. 2 benützte Angabe für die Zahl der Atome; denn bezeichnet man den dortigen Wert für das Elementarquantum für den Augenblick mit e' und hier $\frac{e}{m}$ mit s , so hat man $e' = \frac{96512 \cdot 10^{-24}}{0,71}$ Cb und $e = sm = \frac{s \cdot 1,01 \cdot 10^{-24}}{0,71}$ Cb, also $\frac{e}{e'} = s \cdot \frac{1,01}{96512} = 1779$ bez. 1884, je nachdem man $s = 1,7 \cdot 10^8$ oder $1,8 \cdot 10^8$ nimmt.

aktivität zu Folgerungen geführt, die einen Schritt zur Lösung einer der tiefsten Fragen bedeuten, welche seit alten Zeiten den Menschengeist beschäftigten, der Frage nach dem Wesen der Materie.

Die Leitfähigkeit der Gase ist unter gewöhnlichen Umständen zwar sehr gering, aber sie sind keineswegs vollständige Isolatoren: ein geladenes Elektroskop verliert im Lauf der Zeit seine Ladung, indem von ihm durch die Luft ein schwacher Strom nach der Erde oder geerdeten Leitern fließt. Daß nicht oder jedenfalls nicht ausschließlich schlechte Isolation des Elektroskops die Schuld am Rückgang des Ausschlags trägt, erkennt man daran, daß, ohne daß am Zustand der Isolation etwas geändert wird, die Entladung viel rascher erfolgt, wenn von Röntgenstrahlen beeinflusste Luft das Elektroskop umspühlt. Man sieht daraus gleichzeitig auch, daß die Leitfähigkeit eines Gases durch Einwirkung von Röntgenstrahlen bedeutend erhöht wird. Ueberläßt man das Gas nach Aufhören der Strahlung sich selbst, so verliert es seine Leitfähigkeit wieder; rascher kann dieselbe beseitigt werden, wenn man dasselbe durch ein einen Pfropf aus Watte oder Glaswolle enthaltendes Rohr hindurchsaugt. Daraus geht hervor, daß die Leitfähigkeit von Teilchen herrührt, welche, von den Gasmolekülen in irgend welcher Weise verschieden, gewissermaßen abfiltriert werden können. Läßt man das Gas anstatt durch einen Pfropf zwischen zwei entgegengesetzt elektrischen Platten hindurchstreichen, so wird es ebenfalls nichtleitend, während die Platten ihre Ladung allmählich verlieren; hienach müssen die beigemengten Teilchen elektrisch sein und zwar, da das Gas trotz der Einwirkung der Röntgenstrahlen als Ganzes unelektrisch bleibt, sowohl positiv als negativ in im Ganzen absolut gleicher Stärke. Das Wiederverschwinden der Leitfähigkeit läßt sich ja nur so erklären, daß sich die in der Luft enthaltenen ihre Leitfähigkeit bedingenden Teilchen, die positiven nach der negativen, die negativen nach der positiven Platte bewegen und an den Platten angekommen unelektrisch werden, indem sie diese neutralisieren. Es ist endlich gelungen, die Ladung dieser Teilchen ihrer Größe nach zu bestimmen und zwar auf Grund des folgenden Vorgangs. Wird nicht staubfreie feuchte Luft etwa durch Expansion abgekühlt, so tritt, wenn die Luft ihren Taupunkt*) erreicht hat, also bei einem bestimmten Mass der Expansion, Nebelbildung durch Kondensation des Wasserdampfs ein, wobei die Nebelteilchen als Kondensationskerne wirken und mit dem Nebel zu Boden sinken. Wiederholt man den Vorgang einigemal**), so kann die Luft staubfrei gemacht werden und die Nebelbildung tritt alsdann erst bei einer Temperatur unterhalb des Taupunkts ein: die Luft ist zunächst übersättigt und aus dem Ausbleiben der Uebersättigung bei nicht staubfreier Luft geht eben hervor, daß die Staubteilchen die Anhaltspunkte für die Bildung der Nebeltröpfchen

*) Man versteht darunter die Temperatur, bei welcher der Dampfdruck des Wassers gerade anfängt unter den Partialdruck des in der Luft enthaltenen Wasserdampfs herunterzugehen.

**) Damit die Luft immer wieder feucht wird, stellt man ein Gefäß mit Wasser im Versuchsapparat auf.

sind. Wird nun in der angegebenen Weise staubfrei gemachte übersättigte Luft mit Röntgenstrahlen durchstrahlt, so treten sofort Nebel auf, die in der Luft entstandenen positiven und negativen Teilchen sind somit ebenfalls imstande, als Kondensationskerne zu dienen; und in der Tat erweisen sich die so gebildeten Nebel elektrisch. Die negativen Teilchen bewirken die Kondensation leichter, bei schwächerer Expansion erhält man also nur Nebeltröpfchen mit negativen Kondensationskernen. Nun läßt sich aus der Fallgeschwindigkeit der Tröpfchen, also des Nebels, nach den Gesetzen des Luftwiderstands die Masse dieser Tröpfchen berechnen; bestimmt man die Gesamtmasse des Nebels durch Wägung, so findet man durch Division die Anzahl der Tröpfchen und unter der wohl gerechtfertigten Voraussetzung, daß jedes Tröpfchen bloß einen Kondensationskern enthält, die Anzahl der elektrischen Teilchen. Misst man endlich mit Hilfe eines Elektrometers die elektrische Ladung des — bei schwacher Expansion entstandenen, also nur negative Teilchen enthaltenden — Nebels, so ergibt sich durch Division der Anzahl der Teilchen in die Ladung des Nebels die Ladung des einzelnen negativen Teilchens. Man erhält durch solche Versuche eine Ladung von etwa 10^{-19} Cb. Im Lauf der letzten Jahre ist eine ganze Reihe weiterer Methoden zur Messung dieser Grösse eronnen worden; das Mittel der zuverlässigsten Bestimmungen ist (nach J. 8, S. 439, 1911) $1,56 \cdot 10^{-19}$ Cb, ein Wert, mit dem der auf S. 2 gefundene in Anbetracht der Unsicherheit der dort benützten Zahl der Moleküle im Mol gut übereinstimmt. Man darf in diesem abermaligen Auftreten des Elementarquantums eine Bestätigung der auf S. 4 getroffenen Festsetzung über den Wert von e erblicken. Die Entstehung der im leitenden Gas enthaltenen elektrischen Teilchen kann man sich nun in der Weise vorstellen, daß durch die Einwirkung der Röntgenstrahlen von Molekülen oder Atomen des Gases zunächst je ein Elektron abgespalten wird, das in nicht zu stark verdünnten Gasen sich mit einem neutralen Gasmolekül zu einem negativ elektrischen Teilchen von der Grösse eines Moleküls vereinigt; der nach der Abspaltung des Elektrons verbleibende Rest muß positiv erscheinen in gleicher Stärke wie das Elektron, da er mit diesem zusammen elektrisch neutral war, er ist also ein positives Teilchen von der Größenordnung eines Moleküls, wie bei den Kanalstrahlen. Elektrische Teilchen dieser Größe nennen wir **Jonen***); von negativer Art haben wir also sowohl Elektronen als Ionen kennen gelernt, von positiver Art dagegen sind bis jetzt nur Ionen bekannt geworden. Das Leitendmachen eines Gases nennt man, sofern es auf der Bildung von Ionen in demselben beruht, **Jonisieren**. Es kann willkürlich erscheinen, daß der Vorgang bei der Ionisierung als Abspaltung von Elektronen aufgefaßt wurde, während vielleicht der Gedanke näher läge, daß die nach den Anschauungen der Chemie ja in der Regel aus je zwei Atomen bestehenden Moleküle

*) Die elektrolytischen Ionen fallen auch unter diese Definition, unterscheiden sich aber von den Gasionen dadurch, daß sie Teile von Verbindungen sind, während zwischen den vollständigen Gasmolekülen und den Gasionen von der Chemie kein Unterschied gemacht wird.

eines Gases sich in ein positives und ein negatives Atom spalten. Aber abgesehen davon, daß nicht recht einzusehen wäre, warum sich die beiden Atome in dieser Weise verschieden verhalten sollten und abgesehen davon, daß bei einer gasförmigen Verbindung (z. B. CO_2) die Jonisation mit keinem chemischen Zerfall verbunden ist, gibt es eine Versuchsanordnung, bei der die negativen Ionen nachweislich durch Zusammenlagern von Elektronen und neutralen Molekülen entstehen und die im übrigen genau die gleichen Erscheinungen zeigt, wie die oben beschriebenen. (Th. S. 15 f.).

Es mutet eigentümlich an, zu hören, daß von den „Atomen“ etwas abgespalten wird; indessen werden wir in dieser Richtung durch die Betrachtung der Vorgänge der Radioaktivität noch weiter geführt. Eine ausführliche Besprechung derselben gehört nicht in diese Abhandlung, es soll vielmehr davon nur soviel erwähnt werden, als für den augenblicklichen Zweck notwendig ist. Im Jahre 1896 entdeckte Becquerel, andere Zwecke verfolgend, die Tatsache, daß Uranverbindungen eine Strahlung aussenden, welche mit den Röntgenstrahlen in wesentlichen Punkten übereinstimmt, z. B. darin, daß sie einen Fluoreszenzschirm zum Leuchten bringt. Durch die weitere Verfolgung dieser Entdeckung durch Becquerel selbst und andere Forscher, insbesondere auch Herr und Frau Curie in Paris wurde gefunden, daß die Emission dieser „Becquerelstrahlen“ den schon bekannten Elementen Uran und Thor, aber auch einigen eben dadurch neu entdeckten zukommt, von denen das Radium am bekanntesten geworden ist; solche Stoffe nennt man **radioaktiv**, d. h. strahlungsfähig. Bei Kathoden- und Kanalstrahlen hat sich die Untersuchung mit Hilfe der Einwirkung eines Magneten als fruchtbar erwiesen; wendet man dieses Hilfsmittel auf Becquerelstrahlen an, so zeigt sich, daß dieselben in drei Gruppen zerlegt werden, die man als α -, β - und γ -Strahlen bezeichnet und von denen die zwei ersten abgelenkt werden, während auf die γ -Strahlen der Magnet keinen Einfluß ausübt. Die Ablenkung der α -Strahlen ist von der Art, wie sie ein in der Richtung der Strahlen vom radioaktiven Präparat ausgehender elektrischer Strom, also auch wie von ihm ausgehende Kanalstrahlen erfahren würden, die der β -Strahlen entgegengesetzt, also wie bei von ihm ausgehenden Kathodenstrahlen. Auch hinsichtlich der Absorption durch andere Stoffe unterscheiden sich die Gruppen deutlich von einander; während die α -Strahlen z. B. schon durch dünnes Seidenpapier oder Aluminiumfolie absorbiert werden, gehen die β -Strahlen noch durch mehrere Millimeter, die γ -Strahlen sogar durch 10 cm dicke Bleiplatten. Die α -Strahlen erzeugen positive, die β -Strahlen negative Ladung bei ihrem Auftreffen, und wendet man die Untersuchungsmethoden des § 2 an, so erweisen sich beide Strahlungen auch in ihrem übrigen Verhalten mit den Kanal- bez. Kathodenstrahlen identisch, nur daß die β -Strahlen noch beträchtlich größere Geschwindigkeiten haben, deren höchste Werte nahe an die des Lichts heranreichen. Die γ -Strahlen endlich zeigen das Verhalten der Röntgenstrahlen. Hiernach sendet der radioaktive Stoff fortgesetzt Massenteilchen und Energie aus; die letztere

kommt auch darin zum Ausdruck, daß derselbe stets eine höhere Temperatur besitzt als die Umgebung (unter günstigen Umständen bis zu $1\frac{1}{2}^\circ$). Die Erscheinung kann nur so gedeutet werden, daß die Atome der radioaktiven Stoffe explosionsartig zerfallen und dabei Elektronen und positive Ionen fortgeschleudert werden; dieser Zerfall ist ein exothermischer Vorgang wie viele chemische Prozesse, die radioaktiven Elemente gleichen also den endothermischen Verbindungen und besitzen wie diese nur ein gewisses Maß von Stabilität. Vom Weiteren sei nur noch soviel hervorgehoben, daß im Verein mit dieser Strahlung meist eine längere Reihe von in einander sich umwandelnden mehr oder weniger unbeständigen Stoffen entsteht, unter anderem das Helium*) und als Endprodukt der Radiumreihe wahrscheinlich das Blei.

Hat schon die über die Gasionisierung gewonnene Vorstellung bedeutend an dem hergebrachten Begriff des Atoms in seiner wörtlichen Bedeutung als eines Unteilbaren gerüttelt, so ist derselbe durch das Studium der Radioaktivität vollends umgestoßen worden. Die „Atome“ der chemischen Elemente müssen aus noch kleineren Teilchen zusammengesetzt sein, unter denen jedenfalls die negativen Elektronen enthalten sind; in welcher Anzahl, darüber lassen sich bis jetzt nur Vermutungen aufstellen. Eine weitere Frage ist die nach dem Wesen des positiven Teils der Atome; denkt man daran, daß es auch positive Elektronen gibt, welche ebenfalls das elektrische Elementarquantum enthalten, so müßte jedes Atom, so lange es elektrisch neutral ist, aus gleichviel positiven und negativen Elektronen bestehen und wenn beide gleiche Massen besäßen, was aber von Thomson (Th. S. 138 ff.) entschieden zurückgewiesen wird, bei Wasserstoffatomen z. B. nach § 2 aus insgesamt gegen 2000. Nun ist freilich die Existenz dieser positiven Elektronen noch sehr zweifelhaft und was wir bis jetzt bestimmt sagen können, ist nur soviel, daß der positive Teil eine Ladung besitzen muß gleich der Gesamtladung aller im neutralen Atom enthaltenen negativen Elektronen zusammen. — Es möge hier darauf hingewiesen werden, daß gerade auf dem Boden der Chemie der Gedanke an eine weitere Teilbarkeit der Atome längst Wurzel gefaßt hat; schon 1815 hat Prout die Vermutung ausgesprochen, die „Atome“ der verschiedenen Elemente könnten durch Vereinigung von Wasserstoffatomen entstanden, alle Materie also eine Modifikation des Wasserstoffs sein. Wenn sich dies auch als unhaltbar herausgestellt hat, so ist doch seitdem der Gedanke an einen Urstoff, aus dem alle Materie bestehe, nicht mehr zur Ruhe gekommen; die Teilchen dieses Urstoffs glaubt man jetzt in den Elektronen gefunden zu haben, und die elektrischen Eigenschaften erscheinen so als Grundeigenschaften der kleinsten Bestandteile der Materie wie alle anderen. Auf diese Bestandteile, die Elektronen, könnte bis auf weiteres der Begriff „Atom“ in seiner wörtlichen Bedeutung angewendet werden, wenn es nicht grund-

*) Man faßt die α -Teilchen als positiv elektrische Heliumatome auf; dieses erleidet keine weiteren Veränderungen, sondern ist, wie die Elektronen (β -Teilchen) Nebenprodukt der Umwandlungen.

los wäre, ihn aus der Sprache der Chemie zu beseitigen; denn für diese bleiben die bisherigen Atome, was sie waren, bloß dürfen sie nicht mehr als das absolut Unteilbare bezeichnet werden, sondern nur als das, was durch die gewöhnlichen chemischen Vorgänge nicht mehr zerlegt werden kann.

Bei der Besprechung der Gasionisation sahen wir die positiven Ionen durch Abspaltung, die negativen durch Anlagerung von Elektronen*) aus den neutralen Atomen entstehen. Gelingt es, die abgespaltenen Elektronen aus der Gasmasse herauszubringen, so muß diese als Ganzes genommen nicht mehr unelektrisch, sondern positiv elektrisch erscheinen, bringt man von außen Elektronen herein, so wird sie negativ. Da wir zu der Ansicht gelangt sind, daß die Atome aller Stoffe Elektronen enthalten, so ist allgemein die Auffassung berechtigt, daß jeder unelektrische Körper eine gewisse sozusagen normale Anzahl von Elektronen enthält; ein Defizit an Elektronen demgegenüber macht ihn positiv, ein Überschuss negativ elektrisch. Daß solche Körper ein elektrisches Feld um sich verbreiten, kann darauf zurückgeführt werden, daß ein Körper mit einem Überschuss an Elektronen durch Abstoßung solcher oder Heranziehung positiver Ionen in den normalen Zustand übergeht, einer mit einem Defizit in umgekehrter Weise; indessen ist damit über die tiefere Ursache und das Wesen der elektrischen Anziehung und Abstoßung nichts gesagt, wir lassen diese wohl nie ganz zu beantwortende Frage beiseite und nehmen die Abstoßung zwischen Elektronen bez. positiven Ionen und die wechselseitige Anziehung zwischen beiden Arten als etwas Gegebenes hin. — Auf Grund der als bekannt vorausgesetzten Darstellung des elektrischen Felds mit Hilfe des Potentialbegriffs ergibt sich weiter, daß ein Abwandern von Elektronen das Potential an der betreffenden Stelle erhöht, eine Anhäufung es erniedrigt.

II. Elektronentheorie der bekannteren elektrischen Erscheinungen.

§ 4. Die elektrolytischen Ionen; Wesen und Entstehung des elektrischen Stroms. Nach der in § 1 erwähnten Theorie der elektrolytischen Dissoziation der heutigen Chemie spaltet sich ein Teil der Moleküle eines Elektrolyten bei der Auflösung in Wasser in positive und negative Ionen, welche, wie § 1 zeigte, je soviel Elementarquanten tragen, als ihre Wertigkeit beträgt. Fragt man nach dem Ursprung dieser Ladungen, so wird man nicht fehlgehen, wenn man in den negativen Elementarquanten die Elektronen wiedererkennt; dann aber stellt sich offenbar die Entstehung der elektrolytischen Ionen analog der der Gasionen dar: gleichzeitig mit der Spaltung der Moleküle lösen sich von den Kationen je soviel Elektronen ab, als ihre Wertigkeit

*) Es sollen darunter von jetzt ab nur die negativen Elektronen verstanden werden, deren Existenz feststeht.

beträgt und heften sich an die Anionen*). Letztere werden dadurch zu negativen, erstere zu positiven Ionen ganz entsprechend der auf S. 6 gegebenen Definition des Begriffs Ion. Daß es die metallischen Atome sind, von denen die Elektronen sich abspalten, wird mit dem Unterschied zwischen Leitern und Nichtleitern in Verbindung zu bringen sein; weiteres hierüber s. S. 35 f.

Erzeugt man im Elektrolyten ein elektrisches Feld, indem man zwei Elektroden einführt und sie mit den Polen einer Batterie verbindet**), so wird der Elektrolyt von Kraftlinien durchsetzt, welche von der Anode zur Kathode gehen; demgemäß setzen sich, wie die Theorie der Elektrolyse schon längst lehrt, die positiven Kationen gegen die Kathode, die negativen Anionen gegen die Anode hin in Bewegung. An den Elektroden scheiden sich die betreffenden Stoffe aus, d. h. sie gehen aus dem Ionenzustand in den gewöhnlichen unelektrischen über; es müssen also an die Anode fortgesetzt Elektronen von den ankommenden Anionen abgegeben, von der Kathode von den ankommenden Kationen in gleicher Zeit ebensoviel***) weggenommen werden. Diese Anhäufung von Elektronen an der Anode und der Verbrauch von solchen an der Kathode müßte nach Schluß von § 3 das ursprünglich zwischen den Elektroden bestehende Feld vernichten und damit die Elektrolyse zum Stillstand bringen; da dies nicht eintritt, muß eine Elektronenbewegung von der Anode weg und auf die Kathode zu stattfinden und zwar bleibt kein anderer Weg hiezu als die Leitung zwischen den Polen der Batterie und den Elektroden; da irgend welche chemische Veränderung der Leitung selbst nicht eintritt, können Atome des Leitungsdrahtes an dieser Bewegung nicht teilnehmen, was sich bewegt, müssen selbständige Elektronen sein. Damit ist aber ausgesprochen, daß der Strom in einem metallischen Leiter in einer Elektronenbewegung entgegengesetzt der positiven Richtung des Stroms, also von Stellen tieferen zu solchen höheren Potentials besteht, in welcher Richtung sich ja negative Körper im elektrischen Feld stets zu bewegen suchen. Diese aus den Vorgängen im Elektrolyten zunächst bloß für die Zuleitungsdrähte sich ergebende Vorstellung kann ohne weiteres auf jeden Strom in einer metallischen Leitung übertragen werden, weil der Strom in einem Draht stets das gleiche Verhalten zeigt, einerlei ob er einem Elektrolyten zugeleitet wird oder nicht.

Das elektrische Feld zwischen den Elektroden, welches die beschriebenen Vorgänge herbeiführt, kann durch ein galvanisches Element erzeugt werden und wir wollen uns nun die Aufgabe stellen,

*) Es ist leicht einzusehen, dass auch in Fällen, wo die entstehenden Ionen verschiedenwertig sind, diese Vorstellung mit der Tatsache vollständig im Einklang steht, dass stets gleichviel positive und negative Wertigkeiten und damit gleichviel positive und negative Elementarquanten vorhanden sein müssen; man überlege zu diesem Zweck z. B. die folgenden Dissoziationsgleichungen: $\text{NaCl} = \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$; $\text{Na}_2\text{SO}_4 = 2 \text{Na}^+ + \text{SO}_4^{--}$; $\text{CaSO}_4 = \text{Ca}^{++} + \text{SO}_4^{--}$; $\text{CaCl}_2 = \text{Ca}^{++} + 2 \text{Cl}^-$; $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 = 2 \text{Al}^{+++} + 3 \text{SO}_4^{--}$. Die hier benützte Schreibweise der elektrolytischen Ionen, bei der jeder eine positive, jeder eine negative Wertigkeit bedeutet, ist heutzutage wohl allgemein bekannt.

**) Vergl. hiezu S. 31, Anm. 1.

***) Nach dem zweiten Faradayschen Gesetz sind die in gleichen Zeiten unterschiedenen Mengen chemisch äquivalent, stellen also gleichviel Wertigkeiten dar.

dessen Wirken zu erforschen. Wie sich gezeigt hat, muß daselbe während des Betriebs fortgesetzt am negativen Pol Elektronen abgeben und am positiven welche aufnehmen; da hiedurch die Potentialdifferenz zwischen den Polen nicht geändert wird, muß auch im Element etwas vorgehen, was einer Elektronenbewegung vom positiven zum negativen Pol gleichkommt*). Somit stellt der elektrische Strom sich dar wie ein Kreislauf von Elektronen vom negativen Pol durch den Schließungskreis zum positiven und von diesem durch das Element wieder zum negativen, der erfahrungsgemäß mit chemischen Prozessen im Element verknüpft ist; wir werden diese Prozesse nicht als Begleiterscheinung, sondern als Ursache aufzufassen haben, denn wie schon die Entwicklung Joulescher Wärme im Stromkreis zeigt, bedeutet der Strom eine fortgesetzte Energieabgabe nach außen, und woher sollte sonst diese Energie kommen? Taucht man ein Metall in Wasser, so entsteht zwischen beiden eine Potentialdifferenz derart, daß das Metall das tiefere Potential hat, also dem Wasser gegenüber negativ elektrisch erscheint. Der Grund liegt in dem von der Chemie vertretenen Standpunkt, das nichts absolut unlöslich ist; so lösen sich auch die Metalle in geringer Menge in Wasser, und da wir Metalle nur in Form positiver Ionen in wässriger Lösung kennen, so können wir auch sagen: jedes Metall hat das Bestreben, Ionen in Lösung zu bringen. Dieses Bestreben nennen wir seine **Lösungstension**. Nach dem, was wir über die elektrolytischen Ionen wissen, müssen für jedes in Lösung gehende Ion soviel Elektronen zurückbleiben, als seine Wertigkeit beträgt; hienach wird das Metall negativ elektrisch, da es jetzt mehr Elektronen enthält, als der Zahl seiner Atome entspricht, während bei der Lösung das Entgegengesetzte eintritt. So erklärt sich zunächst die auftretende Potentialdifferenz. Damit entsteht nun aber auch ein vom Wasser gegen das Metall gerichtetes Feld, das zurücktreibend auf die Ionen zu wirken sucht und anwächst, solange die Lösungstension dieses Hindernis noch zu überwinden und weitere Ionen in die Lösung zu treiben vermag; schließlich aber muß es so groß werden, daß zwischen seiner Wirkung und der der Lösungstension Gleichgewicht besteht und der Lösungsvorgang stillsteht. Die beim Eintauchen des Metalls in Wasser zu beobachtende Potentialdifferenz kann somit als Maß für die Lösungstension des Metalls gelten; daß sich im Wasser die Metallionen nicht nachweisen lassen, rührt daher, daß infolge des im Verhältnis zur Masse der Ionen großen Werts ihrer Ladung**) obiges Gleichgewicht eintritt, ehe eine merkliche Menge Metall in Lösung gegangen ist. Stellt man zwei Metalle in Wasser, so muß dasjenige mit der größeren Lösungstension das tiefere Potential

*) Als positiven Pol bezeichnen wir den mit dem höheren Potential; eine Anhäufung der aufgenommenen Elektronen am positiven Pol würde nach S. 9 dessen Potential erniedrigen, eine Abgabe von Elektronen ohne Ersatz am negativen dessen Potential erhöhen, also die Potentialdifferenz ausgleichen.

**) $\frac{e}{m}$ ist für Metallionen nach S. 1 der reziproke Wert des elektrochemischen Äquivalents, also für Silber z. B. $\frac{1}{0,001118} \frac{\text{Cb}}{\text{gr}} = 894,46 \frac{\text{Cb}}{\text{gr}}$, d. h. von der Größenordnung 10^3 .

bekommen, also dem andern gegenüber negativ erscheinen, umso mehr, je größer der Unterschied in der Lösungstension ist; ordnet man also die Metalle nach ihrer Lösungstension, mit dem mit der geringsten beginnend, so wird jedes gegenüber einem in der Reihe voranstehenden negativ, gegenüber einem folgenden positiv und zwar wird der Potentialunterschied zwischen beiden umso größer, je weiter sie in der Reihe auseinander stehen. Diese Reihe ist unter dem Namen *Spannungsreihe* schon lange bekannt; dieselbe Reihe bekommt man, wenn man die Metalle nach ihrer Löslichkeit in Säuren ordnet, mit dem am schwersten löslichen beginnend, denn wie in der Chemie gelehrt wird, geht die Auflösung eines Metalls in einer Säure auch auf die Lösungstension zurück. Stellt man ein Metall in Wasser, welches schon vorher Ionen dieses Metalls enthält, also in die Lösung eines seiner Salze, so liegen die Verhältnisse im wesentlichen ebenso, nur wirkt außer dem entstehenden elektrischen Feld zwischen Lösung und Metall noch der *osmotische Druck* der in Lösung befindlichen Ionen der Lösungstension entgegen und das Gleichgewicht tritt dementsprechend früher ein, die Potentialdifferenz zwischen Metall und Lösung wird kleiner, umso mehr, je konzentrierter die Lösung ist. Beim Fall des Metalls im reinen Wasser ist der osmotische Druck der wenigen in die Lösung kommenden Ionen ganz zu vernachlässigen. Dagegen kann es vorkommen, daß bei nicht zu verdünnten Lösungen der osmotische Druck von vornherein größer ist als die Lösungstension, so daß beim Eintauchen des betreffenden Metalls in die Lösung Ionen ausscheiden, das Metall also das höhere Potential bekommt; dies ist bei Metallen mit kleiner Lösungstension, z. B. Platin und Kupfer zu beobachten, während Zink sogar noch in einer gesättigten Lösung eines seiner Salze negativ wird, also eine so starke Lösungstension besitzt, daß auch in diesem Fall der osmotische Druck noch beträchtlich schwächer wirkt.

Wird Kupfer und Zink in eine Lösung z. B. von $ZnSO_4$ gebracht, so wird also letzteres immer noch ein merklich tieferes Potential bekommen als die Lösung; das Kupfer verhält sich zwar gegen diese wie gegen Wasser, da sie kein Cu enthält, aber bei seiner kleinen Lösungstension sinkt sein Potential nur wenig gegen das der Lösung, ist also höher als das des Zinks, es bildet den positiven Pol des Elements*). Verbindet man diesen mit dem negativen, dem Zinkpol, durch einen Draht, so kann auf letzterem kein elektrisches Gleichgewicht herrschen, vielmehr besteht in ihm ein vom Kupfer zum Zink gerichtetes Feld; diesem folgend gehen (negative) Elektronen vom Zink weg durch den Draht zum Kupfer, wodurch die Potentialdifferenz zwischen Zink und Lösung verkleinert werden würde. Daher tritt dort die Lösungstension aufs neue in Tätigkeit, hält so die Potentialdifferenz zwischen Zink und Lösung aufrecht und sorgt zugleich dafür, daß dem Zink stets neue Elektronen zur Entsendung in den Draht zur Verfügung

*) Die Potentialdifferenz zwischen Zink und der Normallösung eines seiner Salze ist 0,51 Volt, die des Kupfers 0,59 Volt, wo aber das Kupfer positiv wird, während es in reinem Wasser negativ erscheinen muß; die Potentialdifferenz zwischen Zink und Kupfer, wenn beide in $ZnSO_4$ stehen, ist deshalb kleiner als 0,51 Volt.

stehen. Umgekehrt liegen die Verhältnisse beim Kupfer; die ankommenden Elektronen werden sein Potential erniedrigen, also das der Lösungstension entgegenwirkende Feld zwischen Kupfer und Lösung verstärken und damit diesem das Übergewicht über die Lösungstension verleihen. Infolgedessen müssen hier Metallionen die Lösung verlassen und zwar zunächst das wenige in Lösung gegangene Cu^+ , bald aber Zn^+ , das ja in der Lösung in ausreichender Menge vorhanden ist. So wird hier ebenfalls die Potentialdifferenz zwischen Metall und Lösung auf ihrem Wert erhalten und das Metall bleibt für die Aufnahme neuer Elektronen bereit, indem die ankommenden gewissermaßen durch die ausscheidenden positiven Ionen aufgezehrt werden. Die Abgabe von Ionen in die Lösung am Zink und die Aufnahme von solchen aus derselben am Kupfer gleichen sich zwar aus*), aber doch muß dadurch an der Zinkplatte eine Anhäufung, an der Kupferplatte ein Defizit von positiven Ionen entstehen, wodurch sich ein in der Lösung vom Zink, dem negativen Pol nach dem Kupfer, dem positiven gerichtetes Feld ausbildet**), in der Lösung wie bei der Elektrolyse wirkt und so positive Ionen vom Zink weg und gegen das Kupfer hin und negative vom Kupfer weg und gegen das Zink hin führend den Kreislauf schließt.

Nach diesem Schema läßt sich jedes Element verstehen; den positiven Pol bildet stets das Metall mit der geringeren Lösungstension, und an Stelle der Auflösung bzw. Ausscheidung von positiven Ionen können evtl. die entgegengesetzten Vorgänge mit negativen Ionen treten. Beim offenen Element haben wir einen Gleichgewichtszustand, die Verbindung der Pole durch einen Leiter führt eine fortgesetzte Störung desselben infolge der durch die Verschiedenheit der Lösungstension der beiden Metalle bedingten Potentialdifferenz zwischen ihnen und damit den Strom herbei, woraus ohne weiteres ersichtlich ist, warum beide Polplatten nicht aus demselben Metall bestehen dürfen. Der Potentialunterschied stellt sich, wie schon bemerkt, im reinen Wasser zwar auch ein, aber dasselbe ist zu schwach dissoziiert, um für die Ausscheidung am positiven Pol und die Aufzehrung der ankommenden Elektronen die genügende Menge positiver Ionen zur Verfügung stellen zu können, weshalb diese Elektronen das Potential des positiven Pols bis auf das des negativen erniedrigen müssen, worauf zwischen beiden Gleichgewicht eintritt und der Vorgang aufhört. Die im elektrischen Strom zutage tretende Energie stammt aus dem Ueberschuß der bei der Auflösung am negativen Pol frei werdenden über die bei der Ausscheidung am positiven verbrauchte***), es wird also chemische Energie in elektrische umgewandelt. Die Auswahl der Bestandteile eines Elements wird so

*) Vergl. S. 15, Anm. 2, sowie das auch für die Vorgänge im Element geltende zweite Faradaysche Gesetz.

**) Wo die Lösung den negativen Pol berührt, hat sie also ein höheres Potential als am positiven.

***) Es ist indessen nur ausnahmsweise dieser Ueberschuß an chemischer Energie genau gleich dem an gewonnener elektrischer, vielmehr können die Elemente je nach ihrer Beschaffenheit einen Teil der chemischen Energie zurückbehalten und direkt in Wärme umsetzen oder mehr elektrische Energie liefern und dieses Mehr durch Abkühlung decken.

getroffen, daß dieser Ueberschuß möglichst groß wird, daher die beliebte Verwendung der in der Spannungsreihe weit auseinanderstehenden Metalle Zink und Kupfer oder statt des letzteren der Kohle, deren Lösungstension noch geringer ist. Daß daneben auch noch die Rücksicht auf die Polarisation*) eine Rolle spielt, ist bekannt, doch ist hier nicht der Ort, näher darauf einzugehen und die verschiedenen „konstanten Elemente“ durchzusprechen. Die von uns als Beispiel gewählte Kombination von Kupfer und Zink in $ZnSO_4$ entspricht solchen Anforderungen natürlich nicht, da das Kupfer sich bald mit ausgeschiedenem Zink überzieht, wodurch die Oberflächen beider Metalle chemisch gleich werden, so daß ihre Potentialdifferenz verschwindet; sie wurde aber gewählt, weil bei ihr sicher keine anderweitigen chemischen Reaktionen in Betracht kommen.

§ 5. Das Ohmsche und das Joulesche Gesetz. Auch wenn man sich gar keine Vorstellungen über das Wesen des Stroms macht, erhält man das Recht, von einer „Stärke“ desselben zu sprechen, aus der Tatsache, daß die Erscheinungen, durch welche sich die Existenz des Stromes offenbart, seine „Wirkungen“, z. B. die magnetische Ablenkung, sich unter sonst gleichen Umständen durch Abänderung der den Strom erzeugenden Potentialdifferenz entsprechend in ihrer Stärke ändern lassen. So definiert man denn (als Grundlage des elektromagnetischen Masssystems) rein formell als theoretische Einheit der Stromstärke denjenigen Strom, der im Mittelpunkt einer zu einem Kreis vom Radius 1 cm gebogenen Leitung die magnetische Feldstärke 2π Gauß erzeugt; die praktische Einheit Ampère ist der 10. Teil hiervon. Auf dem Standpunkt der Elektronentheorie gewinnt dieser formale Begriff der Stromstärke Leben; besteht in einem metallischen Leiter der Strom selbst in einer Bewegung von Elektronen, so muß die Stromstärke bedingt sein durch die Stärke dieser Bewegung, die wir messen können, indem wir die Zahl der Elektronen angeben, welche in der Sekunde durch den Querschnitt der Leitung gehen, oder auch die Elektrizitätsmenge, welche auf diese Weise in der Sekunde durch den Querschnitt transportiert wird. Umgekehrt kann man, nachdem man die Einheit der Stromstärke schon festgelegt hat, von hier aus die Einheit der Elektrizitätsmenge definieren, indem man darunter versteht diejenige Elektrizitätsmenge, welche bei der Einheit der Stromstärke in der Sekunde durch den Querschnitt geht; so entspricht der theoretischen Einheit der Stromstärke die theoretische, dem Ampère die praktische Einheit der Elektrizitätsmenge, das Coulomb, welche hiemit $\frac{1}{10}$ der theoretischen ist(**). Nach den Angaben über die Grösse des elektrischen Elementarquantums auf S. 6 müssen bei der Stromstärke

*) Wesen und Ursache derselben ist nach den Ausführungen von S. 11—13 leicht zu verstehen.

**) Diese Definitionen sind älter als die Elektronentheorie, stützen sich aber auf ähnliche Vorstellungen über das Wesen des Stroms; sie wurden von uns bereits auf S. 1 benützt und waren dort sicher gerechtfertigt, weil der elektrolytische Strom nicht anders, denn als Bewegung von Elektrizität aufgefaßt werden kann.

1 Am $n = \frac{1}{1,56 \cdot 10^{-19}} = 0,64 \cdot 10^{19}$ Elektronen in der Sekunde durch den Querschnitt der Leitung gehen. Mit einer etwas anderen Deutung gilt diese Zahl auch für einen Elektrolyten. Auch in einem solchen besteht der Strom in einer Bewegung, aber nicht in der von lauter negativen Teilchen in einer Richtung, sondern es bewegen sich in ihm positive und negative Teilchen gleichzeitig in entgegengesetzten Richtungen. Die Zahl der an der Anode in der Sekunde ankommenden negativen Elementarquanten muß bei einer Stromstärke von 1 Am jedenfalls auch gleich n sein, denn dadurch müssen in jedem Augenblick die von der Anode gegen den positiven Pol der Batterie weitergehenden Elektronen ersetzt werden; also müssen nach dem zweiten Faradayschen Gesetz in der Sekunde auch n positive Elementarquanten an die Kathode gelangen. Nun kann aber ein Ion seine Bahn an einer beliebigen Stelle im Innern des Elektrolyten beginnen, aber so, daß von derselben Stelle sich im Durch-

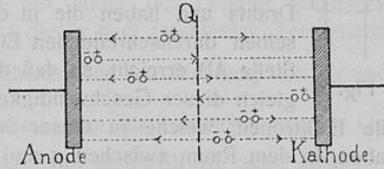


Fig. 1

schnitt stets gleichviel positive und negative Elementarquanten in Bewegung setzen, der Vorgang also durch das Schema in Fig. 1 veranschaulicht werden kann, wo jedes \circ ein Elementarquantum bedeutet. Einem negativen Elementarquantum entspricht im allgemeinen für einen Teil des Wegs zwischen Kathode und Anode ein sich in entgegengesetzter Richtung bewegendes positives Elementarquantum; führen wir also an irgend einer Stelle einen Querschnitt Q, so ist n als die Gesamtzahl der in der Sekunde durch Q gehenden positiven und negativen Elementarquanten anzusehen. Wegen der im allgemeinen verschiedenen Geschwindigkeit beider Arten von Ionen verteilt sich indessen n nicht auf beide Arten von Elementarquanten gleich*). Man kann noch bemerken, daß die aus der Leitung an die Kathode kommenden Elektronen nicht an die Anode gelangen; sie führen die an der ersteren ausscheidenden positiven Ionen in den unelektrischen Zustand über und scheiden mit diesen aus dem Stromkreis aus, während die an der Anode in die Leitung übergehenden Elektronen von den negativen Ionen der Lösung stammen, also neu in den Stromkreis eintreten. — Da nirgends an einer stromdurchflossenen Leitung ein Anwachsen einer positiven oder negativen Ladung zu beobachten ist, so kann auch nirgends eine Anhäufung von Elektronen bez. Elementarquanten stattfinden; für jeden Querschnitt einer unverzweigten Leitung, sei er groß oder klein, muß die Zahl der ihn passierenden Elektronen bez. Elementarquanten, also die Stromstärke dieselbe sein**). Hierauf läßt sich auch das erste Kirchhoffsche Gesetz für Stromverzweigungen gründen, demzufolge die algebraische

*) Eine Folge dieser Verschiedenheit der Geschwindigkeiten sind auch Verschiedenheiten in den Konzentrationsänderungen an Anode und Kathode.

***) Hierin liegt auch die Bestätigung des Satzes auf S. 13, zu dem Anm. 1 gehört.

Summe aller in einem Verzweigungspunkt zusammentreffenden Stromstärken Null sein muß.

Verbindet man die beiden Pole einer Batterie durch eine seidene Schnur oder dergl., so entsteht bekanntlich kein Strom; wir stoßen hiemit auf den alten Unterschied zwischen Leitern und Nichtleitern, der demnach darin liegen muß, daß in ersteren die Elektronen ein hohes Mass von freier Beweglichkeit besitzen, das ihnen in den letzteren abgeht. Man hat deshalb anzunehmen, daß ein Teil der zum normalen Bestand eines Metallstücks gehörenden Elektronen nicht oder nur lose an die Atome gebunden, daß also das Metall in seiner ganzen Ausdehnung von Elektronen durchsetzt ist*), welche jedem durch

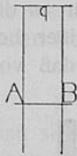


Fig. 2

ein elektrisches Feld entstehenden Bewegungsantrieb zu folgen vermögen. Die Geschwindigkeit einer solchen Bewegung läßt sich abschätzen. Ist q (Fig. 2) der Querschnitt eines Drahts und haben die in einem bestimmten Augenblick denselben durchschreitenden Elektronen nach einer Sekunde die Stelle AB erreicht, so daß die Entfernung zwischen q und AB gleich dieser Geschwindigkeit v ist, so müssen sich offenbar alle Elektronen, welche in dieser Sekunde den Querschnitt q passiert haben, in dem Raum zwischen q und AB, also in einem Raum von der Grösse qv befinden. Kommen auf die Volumeinheit N frei bewegliche Elektronen, so ist also die Zahl der in der Sekunde durch q gegangenen Elektronen gleich Nqv . Ist andererseits J die Stromstärke und e die Ladung des Elektrons, so muß ihre Zahl auch $\frac{J}{e}$ sein und man hat:

$$Nqv = \frac{J}{e}, \quad v = \frac{J}{Nqe} \quad (1)$$

und außerdem:

$$J = vqNe \quad (2)$$

Unter der Voraussetzung, daß N sich bei der Bewegung nicht ändert, ist also v der Stromstärke direkt und dem Querschnitt umgekehrt proportional; Konstanz der Stromstärke in einer unverzweigten Leitung auch bei veränderlichem Querschnitt geht also auf entsprechende Änderung der Geschwindigkeit zurück. Über N liegen Schätzungen vor; J. J. Thomson (Th. S. 53) gibt für Silber $N = 9 \cdot 10^{23}$, Stärke für Platin $N = 5,1 \cdot 10^{21}$ (St. S. 500). Für einen Strom von der Stärke 1 Am ($= 1 \frac{\text{Cb}}{\text{sec}}$) in einem Silberdraht von $1 \text{ mm}^2 = 10^{-2} \text{ cm}^2$ Querschnitt liefert Gleichung (1) demnach, wenn man rund $N = 10^{24} \text{ cm}^{-3}$ (d. h. im Kubikcentimeter) und $e = 1,56 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$ setzt, für v den Wert:

$$v = \frac{1 \frac{\text{Cb}}{\text{sec}}}{10^{24} \text{ cm}^{-3} \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot 1,56 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}} = 0,64 \cdot 10^{-3} \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$$

Für einen Platindraht erhält man unter gleichen Umständen mit $N = 5 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$:

$$v = 0,13 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$$

*) Daß auch der unelektrische und stromlose Leiter bewegliche Elektronen enthalten muß, daß es sich also beim Strom nicht bloß um vom Element in ihn herein kommende handeln kann, zeigen die auf S. 32 f. besprochenen Influenzerscheinungen.

Diese Zahlen geben eine Vorstellung von der Größenordnung der Geschwindigkeit der strömenden Elektronen, und zwar zeigen sie, daß dieselbe recht klein ist*).

Diese Geschwindigkeit kann nur als eine durchschnittliche aufgefaßt werden. Denn das Fortschreiten geht nicht hindernislos vor sich, vielmehr kann es nicht ausbleiben, daß die Elektronen immer wieder mit den Teilchen des Metalls zusammenstoßen, so immer wieder aufgehalten werden und immer wieder neu beschleunigt werden müssen; sonst müßte ja auch die konstant wirkende Kraft des elektrischen Felds die fortschreitende Bewegung zu einer beschleunigten machen, also die Stromstärke fortgesetzt wachsen, während sie und damit die durchschnittliche Elektronengeschwindigkeit tatsächlich konstant ist. In diesen Bewegungshindernissen erkennen wir den Widerstand des Leiters. Herrschen in den Punkten P_1 und P_2 einer Leitung die Potentiale V_1 und V_2 ($V_1 > V_2$) und ist l der längs der Leitung gemessene Abstand der beiden Punkte, so ist die in dem Drahtstück herrschende Feldstärke $= \frac{V_1 - V_2}{l}$, die auf ein Elektron in der Richtung von P_1 nach P_2 wirkende Kraft $= \frac{e(V_1 - V_2)}{l}$. Nimmt man die durchschnittliche Geschwindigkeit der Elektronen dieser Kraft proportional, setzt also

$$v = c \frac{e(V_1 - V_2)}{l},$$

so erhält man unter Berücksichtigung von (1):

$$c \frac{e(V_1 - V_2)}{l} = \frac{J}{N q e}$$

oder

$$V_1 - V_2 = \frac{1}{c N e^2} \cdot \frac{l}{q} \cdot J. \quad (3)$$

Hierin haben wir das bekannte Ohmsche Gesetz**) und die Größe $\frac{1}{c N e^2} \cdot \frac{l}{q}$ ist das, was man den Widerstand, $\frac{1}{c N e^2}$ das, was man den spezifischen Widerstand des Leiters nennt. Derselbe ist der Elektronenzahl umgekehrt proportional; dies kann nicht wundernehmen, denn je größer N , desto langsamer dürfen die Elektronen sich bewegen, wenn eine bestimmte Anzahl derselben in der Sekunde durch den Querschnitt gehen soll, desto kleiner darf auch die die Bewegung erzeugende Potentialdifferenz sein.

Der Leitungswiderstand hat sich als Bewegungshindernis für die strömenden Elektronen erwiesen. Bei jedem Zusammenstoß

*) Die Ursache der raschen Wirkung elektrischer Ströme z. B. beim Telegraphieren liegt darin, daß das zunächst zwischen den beiden Teilen des geöffneten Stromschlüssels bestehende elektrische Feld bei Stromschluß sich mit großer Geschwindigkeit über die ganze Leitung verbreitet (s. § 6 und § 13), so nahezu momentan alle in der Leitung verteilten Elektronen, also auch die auf der Empfangsstation in Bewegung setzt und dadurch die entsprechende Wirkung dort hervorruft.

**) In dieser Übereinstimmung zwischen Rechnung und Erfahrung liegt die Rechtfertigung für die Annahme einer Proportionalität zwischen v und der wirkenden Kraft, eine Annahme, die auch in anderen derartigen Fällen zutrifft; der Faktor c kann von Metall zu Metall verschieden sein.

mit den Metallatomen verlieren sie kinetische Energie,*) die indessen nicht wirklich verloren gehen kann, sondern als Joulesche Wärme wieder zum Vorschein kommt; in der Tat wird durch den Aufprall der Elektronen die Wärmebewegung der Metallteilchen verstärkt, sie nehmen die von den ersteren abgegebene Energie auf und die Temperatur steigt. Man kann den Betrag der Energie, die auf diese Weise in jedem Stück der Leitung von den strömenden Elektronen auf die ruhenden Teilchen übergeht, leicht finden, indem man die Arbeit berechnet, die zur Aufrechterhaltung der Strömung in dem betreffenden Stück erforderlich ist; denn diese Arbeit muß den Energieverlust der Elektronen decken und somit gleich der von ihnen abgegebenen Energie sein. Die auf ein einzelnes Elektron wirkende Kraft ist, wie oben angegeben, $\frac{e(V_1 - V_2)}{l}$, und da es sich in der Sekunde um die Strecke v fortbewegt, wird an ihm die Arbeit $\frac{(V_1 - V_2)e}{l} \cdot v$ in dieser Zeit geleistet. Da aber der Draht Nlq Elektronen enthält**), so ist die im ganzen in der Sekunde geleistete Arbeit, der als Joulesche Wärme zum Vorschein kommende elektrische Effekt in dem Draht $(V_1 - V_2) \cdot eNqv$ oder nach (2) $(V_1 - V_2)J$ und wir haben das Joulesche Gesetz in einer seiner Formen gefunden, die mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes in die bekannten anderen Formen gebracht werden kann***).

Die Ueberlegungen, welche zum Ohmschen und Jouleschen Gesetz geführt haben, gelten in gleicher Weise auch für Elektrolyte, wobei aber nicht außer acht gelassen werden darf, daß bei Angabe der Potentialdifferenz zwischen den Elektroden jede in den Erscheinungen der elektrolytischen Polarisierung sich offenbarende Gegenpotentialdifferenz in Abzug gebracht werden muß. Zwischen den positiven und negativen Ionen besteht nur hinsichtlich der Bewegungsrichtung ein Unterschied, die auf jedes Elementarquantum wirkende Kraft ist dieselbe wie beim Elektron, da beide die gleiche elektrische Ladung besitzen. Die Verschiedenheit liegt einzig darin, daß die (größeren) Ionen in ihrer Bewegung stärker gehemmt werden als die Elektronen; es ist aber auch bekannt, daß der spezifische Widerstand bei Elektrolyten größer ist als bei metallischen Leitern. Auf S. 13 war davon die Rede, daß sich in dem Elektrolyten eines Elements ein elektrisches Feld zwischen den beiden Polplatten ausbildet und so den den Kreislauf schließenden Strom durch das Element hindurch bewirkt. Dieser Strom unterscheidet sich in nichts von dem, was sonst in einem Elektrolyten vorgeht, in dem

*) Es handelt sich sicher nicht um bloße Reflexion der Elektronen an den Metallatomen, sondern auch um ein kürzeres oder längeres Haften, der Durchschnittswert von N im stromdurchflossenen Leiter wird aber trotzdem unveränderlich bleiben. Vergl. Lenard, A. 40, S. 394, 1913.

**) Da lq das Volumen des Drahts ist, so enthält er jedenfalls im stromlosen Zustand Nlq bewegliche Elektronen. Nun tritt beim Strömen allerdings auf der einen Seite eine gewisse Anzahl durch den Endquerschnitt aus dem Drahtstück heraus, gibt an dieses also keine Energie mehr ab; wegen der Konstanz der Stromstärke längs der Leitung muß aber für jedes austretende Elektron durch den andern Querschnitt eines hereinkommen, so daß die Zahl der Energie abgebenden Elektronen in dem Drahtstück ungeändert bleibt.

***) Daß die Gültigkeit des Jouleschen Gesetzes auch bei irgendwelcher anderweitiger Arbeitsleistung des Stroms — chemischer oder mechanischer — mit dem Gesetz von der Erhaltung der Energie nicht im Widerspruch steht, kann unschwer gezeigt werden, wenn auch hier darüber weggegangen werden muß.

Element entwickelt sich nach den gleichen Gesetzen Joulesche Wärme und die erwähnte Potentialdifferenz ist, wie das Ohmsche Gesetz sagt, gleich dem Produkt aus Stromstärke und innerem Widerstand. Beim offenen Element fällt diese Potentialdifferenz weg, daher ist die „Poldifferenz“^(*) des offenen Elements stets größer als die des geschlossenen und der Unterschied ist, wie bekannt, gleich Stromstärke mal innerem Widerstand. In Figur 3, welche diese Verhältnisse graphisch veranschaulichen soll, stellt die horizontale Gerade AB für das offene Element das im Elektrolyten konstante Potential dar, AC den Potentialunterschied zwischen Elektrolyten und positivem, BD den größeren zwischen Elektrolyten und negativem Pol, ED (CE || AB) somit die Poldifferenz des Elements. Beim geschlossenen Element steigt dagegen das Potential in der Lösung vom positiven zum negativen Pol, es wird also durch die ansteigende Gerade A' B' (Fig. 4) dargestellt, während A' C' = A C, B' D' = B D bleibt; daher wird die Poldifferenz E' D' um B' F' kleiner als E D, B' F' ist aber eben gleich Stromstärke mal innerem Widerstand.

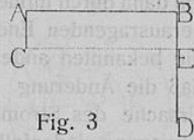


Fig. 3

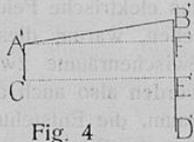


Fig. 4

§ 6. Elektrische und magnetische Störungen im Äther.

Wir müssen den Fortschritt unserer Darstellung für den Augenblick unterbrechen, um für denselben erst weitere Grundlagen zu schaffen. Daß wir die elektrischen und magnetischen Kräfte auffassen als bedingt durch Modifikationen des Äthers und zwar gewöhnlich in Form von Spannungen, dürfte heute allgemein bekannt sein, wenn wir auch über das eigentliche Wesen derselben nichts aussagen können; im folgenden sind indessen auch gar keine bestimmten Vorstellungen nötig, weshalb wir jede Spekulation darüber beiseite lassen. Aus Gründen, die hier unerörtert bleiben müssen, ist für diese Modifikationen in der Literatur der Ausdruck elektrische bez. magnetische Polarisation üblich; wir wollen uns diesen Ausdruck aneignen, und wenn wir sagen, der Äther sei an einer Stelle elektrisch oder magnetisch polarisiert, meinen wir damit nichts anderes, als daß dort eine elektrische bez. magnetische Kraft herrsche, ein elektrisches bez. magnetisches Feld vorhanden sei. Jede Veränderung des Polarisationszustands, also auch das Entstehen einer Polarisation, wollen wir als Störung bezeichnen. Der Zusatz elektromagnetisch endlich bedeutet das gleichzeitige Vorhandensein und Ineinandergreifen elektrischer und magnetischer Erscheinungen**).

*) Unter Poldifferenz (Abkürzung für Potentialdifferenz zwischen den Polen) verstehe ich das, was sonst den umständlichen Namen „elektromotorische Kraft“ führt. Dieser letztere ist trotz seiner allgemeinen Verbreitung ebenso zu verwerfen, wie „Pferdekraft“ oder „lebendige Kraft“, weil das, was er bezeichnen soll, eben keine Kraft ist, sondern als Potentialdifferenz die Dimension des Potentials hat.

**) Es möge bei dieser Gelegenheit noch daran erinnert werden, daß wir mit Feldstärke die Kraftwirkung auf die Einheit der magnetischen Polstärke bez. der elektrischen Ladung bezeichnen; wo es nicht darauf ankommt, ob man sich die Kraft beliebig oder auf die Einheit wirkend vorstellt, können die Ausdrücke Kraft und Feldstärke beliebig vertauscht werden.

Schiebt man in eine aus isoliertem Draht gewickelte Spule einen Magnetstab, so kann man bekanntlich das Auftreten eines Induktionsstroms während des Einschlebens nachweisen; man erzielt den gleichen Effekt, wenn man einen Stab aus weichem Eisen einschleibt und ihn dann durch Influenz magnetisch macht, indem man seinem genügend weit herausragenden Ende einen permanenten Magneten nähert. Diese und die bekannten anderen ähnlichen Versuche lassen nur die Deutung zu, daß die Änderung der magnetischen Feldstärke am Ort der Spule die Ursache des Stroms ist, und da die den Strom bildende Elektronenbewegung jedenfalls in diesem Fall nur durch ein elektrisches Feld erzeugt werden kann, so muß also die Änderung des magnetischen Felds die Entstehung eines elektrischen im Draht zur Folge haben. Ist aber das elektrische Feld eine Polarisation des Äthers, so ist nicht einzusehen, warum dieser bloß dann polarisiert werden soll, wenn er die Zwischenräume zwischen den Molekülen eines Leiters ausfüllt; wir werden also auch da, wo kein Leiter zugegen ist, ja sogar im „leeren“ Raum, die Entstehung einer elektrischen Polarisation durch eine magnetische Störung an der betreffenden Stelle anzunehmen haben. Richarz hat (R, § 14) mit Hilfe des Energieprinzips hieraus die Folgerung abgeleitet, daß dann umgekehrt auch jede elektrische Störung an einer Stelle dort eine magnetische Polarisation hervorrufen muß. Elektrische und magnetische Polarisation des Äthers sind also derartig miteinander verknüpft, daß jede Veränderung der einen die andere erzeugt*). Die Stärke der erzeugten Polarisation ist, wie die Versuche lehren, der Änderungsgeschwindigkeit (= Größe der Veränderung dividiert durch die Zeitdauer derselben) der erzeugenden proportional, und wenn man den Induktionsversuch so anstellt, daß man die Pole eines kräftigen Elektromagneten in zwei Ebenen einander parallel gegenüberstehenden Platten endigen läßt, zwischen welchen das magnetische Feld homogen ist mit einer Krafrichtung senkrecht zur Ebene der Platten, und zwischen sie eine ebene Drahtschleife bringt, so findet man, daß der Induktionsstrom bei Änderung des magnetischen Felds ein Maximum ist, wenn die Ebene der Drahtschleife senkrecht zu den magnetischen Kraftlinien liegt, während er ausbleibt, wenn sie ihnen parallel ist, woraus folgt, daß die Richtung der erzeugten Polarisation auf der erzeugenden senkrecht steht.

Der geschilderte Zusammenhang zwischen beiden Polarisationen läßt übersehen, daß jede an einer Stelle eintretende Störung elektrischer oder magnetischer Art sich von da aus mit endlicher Geschwindigkeit in die Umgebung verbreiten muß. Um bequemer an Bekanntes anknüpfen zu können, wollen wir zuerst die Ausbreitung einer magnetischen Störung verfolgen. Denken wir an das für die Induktion im geschlossenen Stromkreis geltende Gesetz, daß, wenn man in der Rich-

*) Ihren mathematischen Ausdruck finden diese Zusammenhänge in den in elementarer Form nicht wiederzugebenden Maxwell'schen Gleichungen; die Richarz'schen Ableitungen stellen eine Neubegründung derselben dar.

tung der magnetischen Kraftlinien auf die Stromfläche blickt, eine Vermehrung derselben, also eine Verstärkung des magnetischen Felds einen Induktionsstrom entgegen dem Drehsinn des Uhrzeigers zur Folge hat, und bedenken wir, daß, wie oben erwähnt, sich wechselseitig hervorrufende Polarisationen aufeinander senkrecht stehen, so übersehen wir Folgendes. Ist im Punkt P (Fig. 5) eine senkrecht zur Ebene der Zeichnung nach hinten gerichtete magnetische Kraft im Entstehen oder Zunehmen begriffen, so erzeugt sie im Äther eine sie ringförmig umgebende in der Ebene der Zeichnung liegende elektrische Kraft E*) von der durch die Pfeilspitze bezeichneten Richtung.

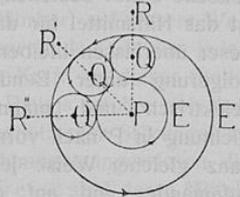


Fig. 5

Diese elektrische Kraft erzeugt durch ihr Entstehen ebenso wieder magnetische Kräfte, welche sie ringförmig umgeben in Ebenen, die auf ihr, also auch auf der Ebene der Zeichnung, senkrecht stehen. Sind PQ, PQ', ... die Schnittlinien solcher Ebenen mit der Ebene der Zeichnung, so steht die neu entstandene Kraft in P und in Q, Q', ... jedenfalls auf der Ebene der Zeichnung senkrecht; ihre Richtung ergibt sich, ohne daß man weitere Untersuchungen anzustellen braucht, aus dem Energieprinzip so, daß sie in P der ursprünglich dort entstehenden oder zunehmenden magnetischen Kraft entgegengesetzt sein muß**) (andernfalls müßte ein einmaliger Anstoß zur Zunahme der Kraft in P diese ins Unendliche wachsen lassen). In Q, Q', ... hat demgemäß die neu entstandene magnetische Kraft dieselbe Richtung wie die ursprüngliche in P; während also durch diese Wirkung die den Anstoß gebende Veränderung in P wieder rückgängig gemacht wird, falls die Ursache, die sie erzeugte, sie nicht aufrecht erhält, tritt diese Veränderung nun auch in der Umgebung von P auf, wo sie ebenfalls Ringe elektrischer Kraft erzeugt. In Fig. 5 sind solche Ringe um Q, Q', ... gezeichnet und man sieht, daß sie sich zwischen diesen Punkten aufheben, innerhalb zu einem Ring vereinigen, der, E entgegengesetzt, diesen wieder zum Verschwinden bringt, außerhalb dagegen einen neuen E' von der gleichen Richtung wie E bilden. E' seinerseits erzeugt wieder neue Ringe magnetischer Kraft mit den Schnittlinien QR, Q'R', ..., wodurch die magnetische Kraft in Q, Q', ... dasselbe Schicksal erfährt, wie vorher in P und nun in R, R', ... neu auftritt. Verfolgt man dieses Wechselspiel weiter, so erkennt man, daß von einer magnetischen Störung sich nach allen in einer zu ihr senkrechten Ebene gelegenen Richtungen eine magnetische und eine elektrische Erregung fortpflanzt

*) E ist als P unendlich eng umgebend zu denken; Analoges gilt im weiteren.

**) Würde die Kraft in P abnehmen, so hätte schon E die entgegengesetzte Richtung wie in Fig. 5 und entsprechend wäre auch jetzt und weiterhin die Richtung umzukehren. — Wir ziehen hieraus gleich die Folgerung: ist an einer Stelle eine elektrische Kraft im Entstehen oder Zunehmen begriffen, so erzeugt sie im Äther eine sie ringförmig umgebende, überall auf ihr senkrecht stehende magnetische Kraft, deren Richtung die des Uhrzeigers ist, wenn man in der Richtung der elektrischen Kraft auf die Ebene des magnetischen Rings blickt. Bei einer Abnahme der elektrischen Kraft ergibt sich für die magnetische die entgegengesetzte Richtung.

derart, daß beide aufeinander und auf der Fortpflanzungsrichtung senkrecht stehen*) und erstere die Richtung der ursprünglichen Störung hat. Die elektrische Erregung verschwindet an jeder Stelle wieder, die magnetische bleibt bestehen, wenn sie dies im Ausgangspunkt tut; erstere ist das Hilfsmittel für das Fortschreiten der letzteren**). Es soll dem Leser überlassen bleiben, auf Grund der in Anm. 2 auf S. 21 gezogenen Folgerung unter Benützung der Fig. 5, in deren Deutung nur „elektrisch“ und „magnetisch“ zu vertauschen und die ursprüngliche Richtung in P nach vorn zu denken ist, sich zu überzeugen, daß in ganz gleicher Weise jede elektrische Polarisation sich als aufeinander und auf der Fortpflanzungsrichtung senkrecht stehende elektrische und magnetische Erregung fortpflanzt, von denen nun an jeder Stelle die magnetische wieder verschwindet, während die elektrische bestehen bleiben kann. So bekommt man auch eine Anschauung davon, wie irgendwo entstehende elektrische oder magnetische Felder sich von da aus über den Raum verbreiten; in der Elektrostatik und der Lehre vom Magnetismus übergeht man in der Regel diesen Vorgang und achtet nur auf den neu entstandenen Zustand, wie er vorliegt, nachdem Gleichgewicht eingetreten ist. — Von der experimentellen Bestätigung dieser Schlüsse und von der Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit, die, wie jetzt schon bemerkt werden möge, den Wert der Lichtgeschwindigkeit ergibt, wird in § 13 die Rede sein.

§ 7. Das magnetische Feld des bewegten Elektrons; Selbstinduktion. Die im vorhergehenden Paragraphen geschilderten Eigenschaften des Äthers bringen es mit sich, daß ein in Bewegung befindliches Elektron zu seinem elektrischen Feld und durch dasselbe noch ein magnetisches hervorrufen muß. Indem es sich im Raum vorwärts bewegt, nimmt es jedenfalls die in seiner unmittelbaren Umgebung herrschende elektrische Polarisation des Äthers mit sich fort; die so entstehenden Störungen längs der Elektronenbahn breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit im Raum aus, und so dürfen wir sagen, daß das Elektron sein ganzes elektrisches Feld mit sich fortführt***). Infolgedessen wird in irgend einem Punkt P (den wir uns nicht auf der Bahn des Elektrons denken wollen) beim Herannahen des Elektrons die elek-

*) Dieses Fortschreiten ist also transversal. Daß die Fortpflanzung wirklich nur in einer zu der magnetischen Krafrichtung in P senkrechten Ebene erfolgt, ergibt die Durchrechnung der auf S. 20, Anm. erwähnten Maxwell'schen Gleichungen. Auch bezüglich sonst etwa noch dunkel bleibender Punkte sei auf diese Rechnung verwiesen und daran erinnert, daß der Hauptzweck der obigen Darstellung Veranschaulichung dessen ist, was die mathematische Behandlung ergibt.

**) Als Analogon vergleiche man z. B. die Ausbreitung einer Schallbewegung in einem Gas, wo es die erzeugten Dichtigkeits- oder Druckänderungen sind, welche das Fortschreiten vermitteln.

***) Die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit der Störungen im Äther bringt es indessen mit sich, daß das Feld eines bewegten Elektrons einen anderen Kraftlinienverlauf zeigt, als das des ruhenden; diese Aenderung ist bei geringen Geschwindigkeiten des Elektrons unmerklich, muß sich aber geltend machen, wenn dieselbe an die des Lichts herankommt, und zwar besteht sie darin, daß die Kraftlinien sich bei steigender Geschwindigkeit immer mehr gegen diejenige Ebene durch den Mittelpunkt des Elektrons hindrängen, die auf der Bewegungsrichtung senkrecht steht.

trische Kraft zunehmen, beim Vorbeiziehen desselben ein Maximum sein und wieder abnehmen, wenn das Elektron sich wieder entfernt; diese Änderung der elektrischen Kraft in P muß dort nach den Ausführungen von § 6 das Auftreten und Wiederverschwinden einer magnetischen Kraft zur Folge haben, doch ist es kaum durchführbar, auf diesem Weg den Kraftlinienverlauf des magnetischen Felds zu finden, da für jeden Punkt nicht bloß die Änderung der elektrischen Kraft an dieser Stelle, sondern auch die von den andern Punkten des Raums infolge der dort stattfindenden Änderung heraneilenden elektromagnetischen Störungen zu berücksichtigen sind. Wir sind vielmehr auf Berechnungen angewiesen, die ergeben, daß die magnetischen Kraftlinien Kreise sind, deren Mittelpunkte auf der (geradlinig gedachten) Elektronenbahn liegen und deren Ebenen auf ihr senkrecht stehen. Auch vom magnetischen Feld können wir sagen, daß es vom Elektron mit sich fortgeführt wird, über den Punkt P gleitet es wie eine einzelne Störungswelle hinweg. Tritt aber an Stelle eines einzelnen Elektrons eine ganze Folge von solchen, wie z. B. bei den Kathodenstrahlen, den Kanalstrahlen (das elektrische und damit auch das magnetische Feld eines bewegten positiven Jons unterscheidet sich von dem des Elektrons nur durch die positive Richtung der Kraftlinien) und einem elektrischen Strom, so wird die magnetische Polarisation in P zu einer dauernden, indem sämtliche Elektronen der Reihe nach ihr Feld an P vorbeitrage. Beim Strom in einem Draht könnte man einwenden, daß das elektrische Feld eines jeden Elektrons aufgehoben werde durch das entgegengesetzte eines ihm entsprechenden positiven Jons, mit dem zusammen es ein neutrales Metallatom bildet. Das ist aber bloß nach außen der Fall, dagegen besteht das Feld zwischen dem Elektron und dem Jon, und wenn erstere sich an den ruhenden Jonen vorbeibewegen, treten im Äther zwischen Elektron und Jon jedenfalls die erwähnten Änderungen der elektrischen Kraft ein und die an dieser Stelle dadurch erzeugte magnetische Polarisation verbreitet sich von hier aus im ganzen Raum. Die Stärke des magnetischen Felds einer Folge von Elektronen ist größer als der Maximalwert, den die magnetische Kraft bei einem einzelnen Elektron erreichen kann, denn es addieren sich stets die magnetischen Felder aller Elektronen. Daß ein elektrischer Strom ein magnetisches Feld um sich verbreitet, ist eine aus der Experimentalphysik bekannte Tatsache und auf diese möge auch verwiesen werden bezüglich des von der geometrischen Form der Strombahn abhängigen Kraftlinienverlaufs. Daß die Kraftlinien eines geradlinigen Stroms Kreise sind, deren Mittelpunkte auf dem Draht liegen und deren Ebenen auf ihm senkrecht stehen, ist eine Bestätigung des oben erwähnten Rechnungsergebnisses für ein einzelnes geradlinig sich bewegendes Elektron. Aus der bekannten Richtung der Kraftlinien bei einem geradlinigen Strom (Ampèresche oder Rechtehandregel) ergibt sich gleichzeitig, daß wenn ein Elektron sich von uns wegbewegt, wir seine magnetischen Kraftlinien dem Uhrzeiger entgegen laufen sehen. — Die Stärke des Felds ist für jeden Punkt außer von der Entfernung vom

stromführenden Draht auch abhängig von der Stromstärke. Wir schließen daraus, daß für ein einzelnes Elektron die Stärke seines magnetischen Felds mit seiner Geschwindigkeit wächst (man denke an Gleichung 2 auf S. 16); in der Tat hängt hievon die Änderungsgeschwindigkeit der elektrischen Feldstärke an irgend einem Punkt des Raumes ab und mit dieser wächst nach § 6 die Stärke des erzeugten magnetischen Felds. Wenn der Strom von einem Metall in ein anderes übergeht, wobei im allgemeinen die Zahl N der Gleichung (1) auf S. 16 und deshalb, da J konstant bleibt, v sich ändert, ändert sich auch das Feld des einzelnen Elektrons, aber so, daß das Gesamtfeld des Stroms unverändert bleibt; ähnlich bei einer Änderung des Querschnitts. In allen andern Fällen muß sich eine Änderung in der Geschwindigkeit und damit der Stärke des Felds eines einzelnen Elektrons auch als Änderung der magnetischen Feldstärke des ganzen Stroms offenbaren.

Den Magnetismus des Eisens hat Ampère in seiner Theorie der Molekularströme aus der Annahme hergeleitet, daß in den Molekülen des Eisens in ebenen geschlossenen Bahnen Ströme kreisen; in der Tat sendet ein sehr kleiner geschlossener Stromkreis Kraftlinien in derselben Weise aus, wie man dies gemeinhin von den Molekülen des Eisens annimmt. Man kann diese Theorie in die Elektronentheorie verpflanzen durch die Vorstellung, daß in den Atomen des Eisens Elektronen, die zu ihrem normalen Bestand gehören, dauernd sich in kreisförmigen Bahnen bewegen. Das Problem, von hier aus alle magnetischen Erscheinungen einwandfrei zu erklären, ist aber noch nicht gelöst.

Indem ein bewegtes Elektron ein magnetisches Feld um sich verbreitet, besitzt es außer kinetischer noch elektromagnetische Energie, welche, wie sich berechnen läßt, ebenfalls dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional ist und ihren Sitz im umgebenden Äther hat. Wird die Geschwindigkeit eines bewegten unelektrischen Körpers geändert, so ist ein Arbeitsaufwand erforderlich, der gleich ist der Änderung an kinetischer Energie, welche die Geschwindigkeitsänderung mit sich bringt, oder, wie man sich gewöhnlich ausdrückt, die Trägheit des Körpers muß überwunden werden. Beim bewegten Elektron tritt hiezu noch ein weiterer Arbeitsaufwand, entsprechend der gleichzeitigen Änderung seiner magnetischen Energie; ein bewegtes Elektron besitzt also außer der mechanischen noch **elektromagnetische Trägheit**. Die mechanische Trägheit bringen wir in der „Masse“ des Körpers zum Ausdruck ($\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung}$; kinetische Energie = $\frac{1}{2}$ Masse \times Geschwindigkeitsquadrat); die elektromagnetische Trägheit hat also denselben Effekt, wie wenn die mechanische Masse um eine gewisse „**elektromagnetische Masse**“ vergrößert würde. Diese Überlegung ist zunächst auf jeden bewegten elektrischen Körper anwendbar. J. J. Thomson zeigt (Th. S. 27 ff), daß die elektromagnetische Masse mit abnehmender Größe des Körpers wächst und für Körper gewöhnlicher Größe unmerklich ist, während bei Elektronen die mechanische Masse neben ihr verschwindet, so daß die ganze Trägheit

des Elektrons als elektromagnetische aufgefaßt werden kann. Sofern wir (vgl. § 3) die materiellen Atome uns aus Elektronen zusammengesetzt denken, ergibt sich hieraus die Tendenz, die mechanische Masse überhaupt ganz aus unserer Vorstellung zu beseitigen und die Ursache aller Trägheit ausschließlich auf das Vorhandensein elektromagnetischer Energie zurückzuführen; das drängt schließlich zu der Auffassung, daß alle Materie nur „modifizierter Äther“ sei, doch soll darauf nicht weiter eingegangen werden, und ebenso wenig darauf, daß bei großer Geschwindigkeit (z. B. β -Strahlen) infolge des S. 22, Anm. 3 erwähnten Umstands diese Masse sich als von der Geschwindigkeit abhängig erweist. — Die Trägheit des Elektrons bedingt, daß es, wenn eine bewegende Kraft einwirkt bez. an Stärke zunimmt, seine (in dem auf S. 17 behandelten Fall dieser Kraft proportionale) Geschwindigkeit erst allmählich erreicht und umgekehrt, wenn die Kraft verschwindet oder abnimmt, erst nach und nach durch den Widerstand, den es findet, zur Ruhe gebracht oder verlangsamt wird, ganz entsprechend den Beschleunigungen und Verzögerungen, die wir bei mechanischen Bewegungen kennen. Nach § 5 bedeutet dies, daß jeder elektrische Strom die Tendenz hat, sich in seiner augenblicklichen Stärke aufrecht zu erhalten und daß Änderungen eine wenn auch kurze, so doch endliche Zeit beanspruchen. Diese Erscheinungen sind unter dem Namen **Selbstinduktion** längst bekannt. An der gewöhnlichen Ausdrucksweise, daß durch die Änderung der Stromstärke eine Änderung des magnetischen Felds des Stroms und damit der sog. Extrastrom hervorgebracht werde, welcher der Änderung der Stromstärke entgegenwirke, ist also jedenfalls richtig, daß die Selbstinduktion auf die Änderung des magnetischen Felds zurückzuführen ist; dagegen ist der Begriff des Extrastroms eine Hilfsvorstellung, die vom Standpunkt der Elektronentheorie aus entbehrlich, ja mit demselben überhaupt nicht vereinbar ist. Veranschaulichen kann man sich die elektromagnetische Trägheit des Elektrons durch Überlegungen analog denen auf S. 21. Fassen wir in Fig. 5 P auf als ein sich senkrecht zur Zeichnungsebene nach hinten bewegendes Elektron, so ist nach S. 23 E die das Elektron unmittelbar umgebende durch seine Bewegung erzeugte und von ihm mitgeführte magnetische Kraftlinie. Wird das Elektron beschleunigt, also die Änderungsgeschwindigkeit der elektrischen Kraft in seiner unmittelbaren Umgebung erhöht, so muß die dadurch hervorgebrachte magnetische Kraft wachsen und damit ihrerseits wieder elektrische Kraftringe mit den Schnittlinien P Q, P Q', . . . erzeugen, welche nach S. 21 am Ort des Elektrons senkrecht zur Ebene der Zeichnung nach hinten gerichtet sind, also, da das Elektron negativ elektrisch ist, der Beschleunigung entgegenzuwirken suchen. Analog ist der Gedankengang bei einer Verzögerung des Elektrons. Es sei noch bemerkt, daß nach S. 23 die elektromagnetische Trägheit oder Masse einer Folge bewegter Elektronen d. h. eines Stroms größer ist als die Summe der elektromagnetischen Massen der einzelnen Elektronen. Die auf das Elektron zurückwirkende Kraft tritt nicht auf, wenn dasselbe sich gleichförmig be-

wegt, weil dann auch die von ihm erzeugte magnetische Kraft konstant bleibt, so daß es — im Einklang mit der Bedeutung des Begriffs Trägheit — seine Geschwindigkeit wirklich nur unter dem Einfluß einer anderweitigen Kraft ändern kann. — Wir hatten bis jetzt stillschweigend nur Geschwindigkeitsänderungen geradlinig bewegter Elektronen im Auge; es müssen sich aber auf Richtungsänderungen, die als Beschleunigungen in einer zur Bahn normalen Richtung aufgefaßt werden können, dieselben Überlegungen anwenden lassen. Das Elektron besitzt also auch einen zentrifugalen Trägheitswiderstand elektromagnetischer Natur, was allein schon daraus geschlossen werden könnte, daß bei einer Richtungsänderung die Ebenen der seine Bahn unmittelbar umgebenden Kraftlinien eine Drehung erfahren, d. h. daß an jeder Stelle im Raum zu der dort vorhandenen magnetischen Kraft eine neue senkrecht dazu gerichtete entsteht, wozu ein Energieaufwand nötig ist; auch bei der zentrifugalen Trägheit kann der mechanische Anteil gegenüber dem elektromagnetischen vernachlässigt werden.

Wir wollen endlich noch das Folgende beachten. Ein gleichförmig und geradlinig bewegtes Elektron führt sein Feld mit sich fort, dieses bleibt aber in sich unverändert und würde einem mit dem Elektron fortschreitenden Beobachter stets das gleiche Bild bieten. Ändert es aber seine Geschwindigkeit oder seine Richtung oder beides, so pflanzt sich die Störung, deren Entstehung in der unmittelbaren Umgebung des Elektrons wir im ersteren Fall auf S. 25 verfolgt haben, als elektromagnetische Störungswelle durch das ganze sich mitbewegende Feld fort und wir können sagen: sowie ein Elektron seine Geschwindigkeit oder seine Richtung oder beides ändert, strahlt es eine elektromagnetische Welle, also elektromagnetische Energie aus entsprechend dem zur Änderung erforderlichen Arbeitsaufwand. Im besonderen sei hingewiesen auf die Strahlung, welche von einem sich in kreisförmiger Bahn gleichförmig bewegenden Elektron ausgehen muß. Die auf S. 22 und 23 beschriebene Fortbewegung des Felds eines gleichförmig und geradlinig bewegten Elektrons bedeutet keine Energiestrahlung, da ja das Feld in sich ungeändert bleibt und damit auch der Energieinhalt des (unendlichen) Raums im ganzen (es ist ja auch zur Aufrechterhaltung der Bewegung kein Arbeitsaufwand erforderlich, falls nicht anderweitige Hindernisse zu überwinden sind). Daß Gleiche gilt, wenn nicht ein einzelnes Elektron, sondern eine Folge von solchen, also ein Strom einen kreisförmigen, spiraligen oder sonst irgendwie gekrümmten Leiter mit unveränderter Geschwindigkeit durchläuft; die Verhältnisse liegen dann analog wie auf S. 23, der Anteil, den das einzelne Elektron zum magnetischen Feld liefert, ändert sich zwar fortgesetzt, nicht aber das resultierende Feld im Ganzen. Dagegen muß jede Änderung der Stromstärke von einer Energiestrahlung begleitet werden; hievon soll in § 13 noch weiter die Rede sein.

§ 8. Einwirkung eines äusseren magnetischen Felds auf ein bewegtes Elektron. Da ein bewegtes Elektron ein magnetisches

Feld um sich verbreitet, muß es auch magnetisch beeinflussbar sein.

In Fig. 6 stellte E ein sich senkrecht zur Ebene der Zeichnung nach hinten bewegendes Elektron dar, dessen Kraftlinien also Kreise von der durch die Pfeile bezeichneten Richtung sind. Wirkt auf dieses ein magnetisches Feld, dessen Kraftlinien von links nach rechts verlaufen*), so sind im oberen Teil der Figur die Kraftlinien einander entgegengesetzt gerichtet, die Felder schwächen einander, im unteren Teil sind sie gleichgerichtet, die Felder verstärken sich gegenseitig; das resultierende magnetische Feld wird etwa das Aussehen von Fig. 7 haben. Das bewegte Elektron bringt demnach in dem äußeren Feld eine Veränderung hervor, die darin besteht, daß die Kraftlinien nach unten zusammengedrängt werden, während sie oben Luft bekommen und sich infolge

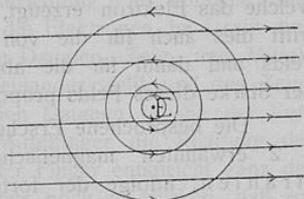


Fig. 6

der gegenseitigen Abstoßung benachbarter Kraftlinien nach unten etwas ausbuchen. Durch diese ungleichmäßige Druckverteilung zwischen benachbarten Kraftlinien entsteht eine das bewegte Elektron gleichzeitig nach oben treibende auf der Bewegungsrichtung und der Richtung der Kraftlinien senkrecht stehende Kraft, deren positive Richtung man auf folgende Weise darstellen kann: stellt man Daumen-, Zeig- und Mittelfinger der rechten Hand senkrecht zu einander, mit dem letzteren in die Bewegungsrichtung des Elektrons, mit dem Zeigfinger in die Richtung der magnetischen Kraftlinien zeigend, so zeigt der Daumen die Richtung der ablenkenden Kraft. Fällt dagegen die Bewegungsrichtung des Elektrons mit der Richtung der Kraftlinien zusammen, also in Fig. 6 in die Ebene der Zeichnung (von links nach rechts oder umgekehrt), so verlaufen seine Kraftlinien in Ebenen senkrecht zur Zeichnungsebene und alles ist zur Bewegungsrichtung symmetrisch; ohne also auf die Veränderung des Felds durch das Elektron überhaupt einzugehen, kann man sagen, daß das letztere in diesem Fall keine Ablenkung erfahren kann. Machen daher endlich Bewegungsrichtung des Elektrons und Kraftlinien einen beliebigen Winkel miteinander, so braucht nur die auf der Bewegungsrichtung senkrechte Komponente der magnetischen Feldstärke berücksichtigt zu werden und man findet so leicht, daß die ablenkende Kraft dem Sinus des Winkels zwischen Bewegungsrichtung und Richtung der magnetischen Kraftlinien proportional ist und wieder auf der Ebene durch beide senkrecht steht**); obige Regel mit der rechten

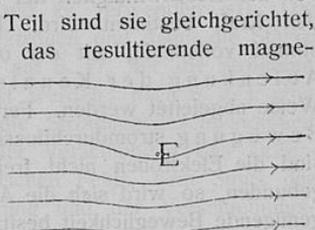


Fig. 7

*) Das Feld ist in der Figur homogen angenommen, denn auch ein beliebiges Feld kann in einem kleinen Bereich, also in der unmittelbaren Umgebung des Elektrons so angesehen werden.
 **) Da die Kraft immer auf der Bewegungsrichtung senkrecht steht, kann sie nie die Geschwindigkeit, sondern nur die Richtung des bewegten Elektrons ändern, ist also in der Tat stets nur eine „ablenkende“.

*) Das Feld ist in der Figur homogen angenommen, denn auch ein beliebiges Feld kann in einem kleinen Bereich, also in der unmittelbaren Umgebung des Elektrons so angesehen werden.

**) Da die Kraft immer auf der Bewegungsrichtung senkrecht steht, kann sie nie die Geschwindigkeit, sondern nur die Richtung des bewegten Elektrons ändern, ist also in der Tat stets nur eine „ablenkende“.

Hand findet auch hier entsprechende Anwendung. Da die Feldstärke, welche das Elektron erzeugt, seiner Geschwindigkeit proportional ist, trifft dies auch für die von ihm erzeugte Veränderung des äußeren Felds und damit für die ablenkende Kraft zu, welche natürlich auch der Stärke dieses Felds proportional ist.

Die besprochene Erscheinung tritt uns direkt entgegen in der in § 2 erwähnten magnetischen Ablenkung der Kathodenstrahlen; infolge der fortgesetzt wirkenden ablenkenden Kraft muß die Bahn der Elektronen gekrümmt werden zu einer Kurve, deren Form von der Geschwindigkeit der Elektronen und der Stärke der ablenkenden Kraft bestimmt wird. Die beobachtete Ablenkungsrichtung stimmt vollständig mit der oben gegebenen Regel überein. Auch die Ablenkung der Kanalstrahlen kann in leicht verständlicher Weise abgeleitet werden. Ferner offenbart sich die Erscheinung in der Bewegung stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld: sind die Elektronen nicht frei, sondern an einen Träger ihrer Bahn gebunden, so wird sich die Ablenkung auf diesen übertragen, falls er genügende Beweglichkeit besitzt. Ein geradliniges, stromdurchflossenes Leiterstück enthält in jedem Augenblick in jedem Querschnitt bewegte Elektronen, erfährt also an jeder Stelle einen Antrieb, infolge dessen es sich zur Seite bewegen muß; da die Bewegungsrichtung der Elektronen und die übliche „positive Richtung“ des Stroms einander entgegengesetzt sind, kann man die Bewegungsrichtung des Leiterstückes von der Stromrichtung aus ebenfalls mit obiger Regel bestimmen, falls man an Stelle der rechten die linke Hand verwendet und den Mittelfinger in die Stromrichtung zeigen läßt (Flemingsche Regel). Im allgemeinen findet man indessen die Verschiebungen und Drehungen, die stromdurchflossene Leiterstücke und Stromkreise in magnetischen Feldern erfahren, rascher und bequemer dadurch, daß man das magnetische Feld des betreffenden Stroms sich vergegenwärtigt und davon ausgeht, daß ein bewegliches Magnetfeld sich in einem feststehenden so einzustellen sucht, daß die Kraftlinien beider Felder sich möglichst wenig stören, d. h. sich möglichst glatt vereinigen können.

Endlich führt in gewissen Fällen die magnetische Ablenkung des Elektrons zur Entstehung von Induktionströmen. Man denke sich in Fig. 8 in dem gezeichneten homogenen Magnetfeld das geradlinige zu den Kraftlinien senkrecht stehende Drahtstück AB senkrecht zur Ebene der Zeichnung nach hinten bewegt; die einzelnen Elektronen erfahren dann eine Verschiebung wie das Elektron E in Fig. 6, müssen also aus denselben Gründen wie dieses ein Magnetfeld um sich erzeugen, deshalb das äußere magnetische Feld ebenso verändern (Fig. 7) und einen Bewegungsantrieb nach oben erfahren, dem sie, soweit sie frei beweglich

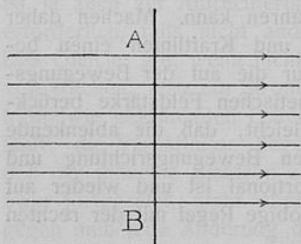


Fig. 8

sind, folgen werden. Dadurch aber entsteht in AB ein von A nach B gerichteter elektrischer Strom (die „Stromrichtung“ im üblichen Sinn verstanden). Die Richtung, in der sich die Elektronen im Draht bewegen, kann man darstellen, indem man Daumen, Zeig- und Mittelfinger der linken Hand senkrecht zu einander stellt und den Zeigfinger in die Richtung der Kraftlinien, den Daumen in die der Verschiebung zeigen läßt, dann zeigt der Mittelfinger die Richtung der Elektronenbewegung. (Die Verwendung der Finger entspricht ganz der Regel auf S. 27 bez. 28; man hat sich nur noch zu merken, daß zur Richtungsbestimmung der induzierten Elektronenbewegung bez. des induzierten Stroms stets die andere Hand zu verwenden ist). Die Strömungsgeschwindigkeit der Elektronen und damit die Stärke des Induktionsstroms kann auch hier, wie auf S. 17, der die Strömung veranlassenden Kraft proportional gesetzt werden; nach S. 27 f. aber muß diese letztere und deshalb auch die Strömungsgeschwindigkeit bez. Stromstärke der Geschwindigkeit der Verschiebung des Leiterstücks, der Stärke des äußeren magnetischen Felds, dem Sinus des Winkels zwischen dessen Kraftlinienrichtung und der Verschiebungsrichtung und endlich dem Cosinus des Winkels zwischen der Normalen auf der Ebene dieser beiden Richtungen und dem Leiterstück proportional sein. Denn die die Strömung veranlassende Kraft hat nach S. 27 die Richtung dieser Normalen, und wenn dies nicht zugleich die mögliche Strömungsrichtung ist, kommt nur die in die letztere fallende Komponente zur Wirkung. — Die Gesetzmäßigkeiten für die durch Bewegung eines Leiterstücks erzeugten Induktionsströme und für diejenigen, welche auf Grund der in § 6 erörterten Zusammenhänge entstehen, wenn am Ort des ruhenden Leiters das magnetische Feld geändert wird (vgl. die Beispiele auf S. 20), gleichen sich in weitem Mass, so daß man in den Fällen, wo die Ursache des Stroms eine Bewegung ist, in der Hauptsache sagen kann, daß es nur auf die relative Bewegung zwischen Leiter und Magnetfeld ankommt. Unsere Ausführungen zeigen aber, daß dies nur äußerlich zutrifft; insofern besteht allerdings zwischen allen Entstehungsmöglichkeiten der Induktionsströme auch ein innerer Zusammenhang, als das magnetische Feld eines bewegten Elektrons ja auch auf die in § 6 behandelten Zusammenhänge zurückzuführen ist.

Im allgemeinen möge noch Folgendes erwähnt werden. Entsteht ein Induktionsstrom in einem begrenzten Leiterstück AB durch Bewegung der Elektronen in der Richtung von B gegen A, so erhöht sich dadurch nach S. 9 das Potential gegen B, während es sich gegen A hin erniedrigt, es entsteht ein von B nach A gerichtetes, die Elektronenbewegung hemmendes Feld, und wenn die Ursache der Induktion gleichmäßig andauert, kommt es zu einem Gleichgewichtszustand, der sich mit Änderung der Ursache ändert, insbesondere mit dem Aufhören derselben wieder in den ursprünglichen Zustand der gleichmäßigen Elektronenverteilung übergeht (im allgemeinen in Form von Schwingungen, s. § 12). Bildet der Leiter dagegen eine geschlossene Bahn, so setzt sich

die Strömung durch den ganzen Stromkreis fort und wenn, wie das in der Regel der Fall ist, an vielen Stellen gleichzeitig Kräfte auftreten, welche die Elektronen in Bewegung setzen, so addieren sich diese Bewegungen zu einem Gesamtstrom. Man kommt jedoch in derartigen Fällen rascher und bequemer zum Ziel durch Benützung der bekannten in den Lehrbüchern zur Bestimmung von Stärke und Richtung der Induktionsströme in geschlossenen Leitern angegebenen Regeln.

§ 9. Statische Erscheinungen auf Leitern. Die Elektronentheorie rechtfertigt ohne weiteres die bekannte Tatsache, daß im Innern eines Leiters im Gleichgewichtszustand kein elektrisches Feld bestehen kann; solange noch ein solches vorhanden ist, müssen frei bewegliche Elektronen den vorhandenen Kräften folgen, es besteht also noch nicht Gleichgewicht. Ebenso muß an der Oberfläche des Leiters die elektrische Kraft normal gerichtet sein; denn solange sie noch eine tangential Komponente besitzt, müssen sich auch längs der Oberfläche Elektronen verschieben. In der Sprache der Potentialtheorie heißt das bekanntlich, daß im Innern und auf der Oberfläche eines Leiters überall dasselbe Potential herrschen muß. Dadurch wird eine ganz bestimmte Anordnung der Elektronen bedingt, die man am besten unter Benützung des Kraftlinienbegriffs übersieht.

Wir denken zuerst an den Fall, daß der Körper elektrisch im Überschuß enthält, also negativ elektrisch ist; an ihnen müssen Kraftlinien endigen, deren Ursprung jedenfalls nicht im Innern des Körpers liegen kann. Denn Elektronen selbst können als negativ elektrisch nicht gleichzeitig auch als Anfangspunkte der Kraftlinien dienen, positive Ionen stehen den überschüssigen Elektronen nicht gegenüber und „blind“ können die Kraftlinien nicht beginnen, da sie stets von positiv elektrischen Körpern ausgehen müssen. Es bleibt also nichts anderes übrig, als daß sie von außen in den Körper hereinkommen. Dann aber herrscht längs der Strecke AE (Fig. 9, wo E ein überschüssiges Elektron darstellt) eine gegen E gerichtete elektrische Kraft, so daß sich das (negativ elektrische) Elektron gegen A hin bewegen muß, also noch nicht Gleichgewicht bestehen kann; erst wenn diese überschüssigen Elektronen sich an der Oberfläche befinden, die von außen kommenden Kraftlinien dort endigen, ist im Innern keine elektrische Kraft mehr vorhanden. Genau dieselben Überlegungen gelten für einen Hohlkörper, ganz einerlei, wie dick die massive Wand ist; es ergibt sich dann, daß überschüssige Elektronen nur an der äußeren Oberfläche lagern können und daß auch im Hohlraum kein elektrisches Feld vorhanden sein kann, beides natürlich nur unter der Voraussetzung, daß in demselben nicht etwa isoliert sich ein elektrischer Körper befindet. — Ist der Körper positiv elektrisch, enthält er also zu wenig Elektronen, so kann man dieselben Schlüsse wiederholen, indem man nur Anfang und Ende der Kraftlinien vertauscht. Unter E in Fig. 9 ist dann ein positives Ion zu verstehen und die elektrische Kraft ist

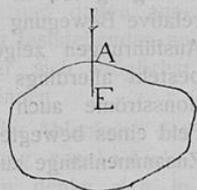


Fig. 9

von E nach A gerichtet; dieser Kraft folgend müssen sich solange Elektronen nach Innen verschieben, bis dort alle positiven Ionen neutralisiert sind und sich nur noch an der Oberfläche welche befinden, das Defizit an Elektronen sich also auf der Oberfläche verteilt, wie vorher der Überschuß. Auch das Vorhandensein eines Hohlraumes führt zu einem ganz analogen Resultat. — Man erkennt in diesen Folgerungen die bekannten Sätze der gewöhnlichen Elektrizitätslehre wieder, daß sich die Elektrizität nur auf der Oberfläche eines Leiters im Gleichgewicht befinden kann.*)

Indessen bleibt immer noch die Frage zu untersuchen, wie sich nun die Elektronen auf der Oberfläche verteilen. Eine vollständige Antwort hierauf läßt sich nur durch Rechnung geben, immerhin aber kann wenigstens einiger Aufschluß auch durch bloße Anschauung gewonnen werden. Jedenfalls muß die Verteilung derart sein, daß das in der Umgebung erzeugte elektrische Feld in sich selbst im Gleichgewicht ist oder, wie man im Bild der Kraftlinien sagt, daß die gegenseitigen Abstossungen zwischen benachbarten Kraftlinien sich an jeder Stelle ausgleichen. Ist der Körper eine Kugel (Fig. 10), so entspricht aus Symmetriegründen dieser Bedingung selbstverständlich eine gleichmäßige Verteilung der überschüssigen oder fehlenden Elektronen (also der positiven Ionen) auf der Oberfläche, sodaß die auf die Flächeneinheit kommende Anzahl von Elementarquanten und damit die sog. elektrische Flächendichte überall dieselbe ist; die Kraftlinien verlaufen radial in gleichen Abständen.**)

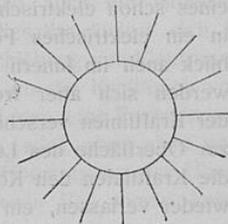


Fig. 10

Denkt man sich nun die Kugel unter Erhaltung der Oberfläche deformiert (etwa wie die Fig. 11 den die Kugel in einer Schnittfigur darstellenden Kreis zu einer Ellipse ausgezogen), während die Verteilung der Elementarquanten zunächst unverändert bleibt, so daß also die Kraftlinien die Oberfläche an denselben Stellen treffen wie vorher und zwar nach wie vor in normaler Richtung, so erkennt man leicht, daß die an den weniger gekrümmten Stellen ausgehenden oder endigenden Kraftlinien in ihrem weiteren Verlauf enger zusammenrücken, die den stärker gekrümmten Stellen zugehörenden dagegen sich weiter von einander entfernen. Somit kann das Feld in der Umgebung des Körpers nicht

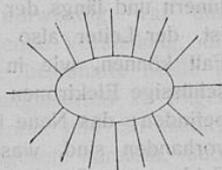


Fig. 11

*) Aus den bisherigen Ausführungen dieses Paragraphen in Verbindung mit der auf S. 12 u. 13 beschriebenen Entstehung der Poldifferenz eines offenen Elements ergibt sich leicht, wie die letztere auch zwischen zwei von einander isolierten Leitern auftreten muß, die man je mit den Polen des Elements leitend verbunden hat. Wird der Zwischenraum zwischen den Platten leitend ausgefüllt, so daß ein Strom entsteht, z. B. durch einen Elektrolyten, so geht die Potentialdifferenz zwischen den Platten nach Maßgabe des Ohmschen Gesetzes herunter, in dem Beispiel aber nur wenig, da der Widerstand der Zuleitung gegenüber dem des Elektrolyten sehr klein ist.

***) Es ist hiebei an die bekannte Festsetzung über die Zahl der Kraftlinien gedacht, die in diesen Fällen übrigens besser durch Einheitskraftlinien ersetzt werden, d. h. durch solche Kraftlinien, für welche das Produkt aus Feldstärke, Querschnitt und Dielektrizitätskonstante an jeder Stelle den Wert ϵ_{ins} hat.

mehr in sich im Gleichgewicht sein, die Kraftlinien und damit im Fall der negativen Ladung die überschüssigen Elektronen müssen sich gegen die stärker gekrümmten Stellen verschieben, während bei positiver Ladung die Elektronen sich entgegengesetzt bewegen, damit die positiven Ionen (scheinbar) gegen jene Stellen hinrücken können. Bei einem Körper mit veränderlicher Oberflächenkrümmung hängt also die Verteilung der Elementarquanten oder die elektrische Flächendichte von der Krümmung ab, derart, daß sie an einer Stelle umso größer ist, je stärker dort die Krümmung. Diese Tatsachen sind wohl allgemein bekannt; die vielgenannte „Spitzenwirkung“ hängt damit zusammen.

Ein Leiter kann auch elektrisch sein, obgleich er die normale Anzahl von Elektronen enthält. Es handelt sich dann um die Elektrisierung durch „Influenz“ und zwar so, daß ein isolierter vorher unelektrischer Körper dieser Einwirkung unterliegt. Es ist leicht, sich diese jedem geläufigen Tatsachen vom Standpunkt der Elektronentheorie zurechtzulegen. Die Elektrisierung geschieht durch Annäherung eines schon elektrischen Körpers, also dadurch, daß der unelektrische in ein elektrisches Feld gebracht wird. Dieses ist im ersten Augenblick auch im Innern des zu elektrisierenden Leiters vorhanden, sofort werden sich aber frei bewegliche Elektronen entgegen der Richtung der Kraftlinien verschieben und zwar soweit, als sie können, d. h. bis zur Oberfläche des Leiters; sie häufen sich also an der Seite an, wo die Kraftlinien den Körper treffen, während an der Stelle, wo sie ihn wieder verlassen, ein Defizit von Elektronen auftreten muß. Hiedurch entsteht im Innern des Leiters nach S. 9 ein dem influenzierenden entgegengesetzt gerichtetes Feld und die Elektronenverschiebung dauert solange, bis sich beide aufheben; dann herrscht elektrisches Gleichgewicht, welches auch in diesem Fall dadurch bedingt ist, daß im Innern und längs der Oberfläche keine elektrische Kraft mehr vorhanden ist, der Leiter also überall dasselbe Potential hat. Auch in diesem Fall können, wie in derselben Weise wie oben zu sehen ist, überschüssige Elektronen und positive Ionen nur auf der Oberfläche sich befinden; das Neue ist nur, daß beide gleichzeitig auf einem Leiter vorhanden sind, was eben nur durch Einwirkung eines elektrischen Felds von außen her ermöglicht wird, weshalb der Leiter sofort wieder in den unelektrischen Zustand übergeht, wenn diese Einwirkung beseitigt wird. Die Verteilung der Elektronen auf der Oberfläche muß zunächst derart sein, daß eine neutrale Zone um den ganzen Körper herumläuft, d. h. eine Linie, längs deren an jeder Stelle trotz der Verschiebung der Elektronen die normale Anzahl vorhanden ist, während der Elektronenüberschuß auf der einen Seite dieser Linie dem Defizit auf der anderen entspricht; im übrigen muß wieder der Forderung genügt sein, daß das Feld in der Umgebung in sich im Gleichgewicht sein soll. Dieses Feld setzt sich jetzt zusammen aus dem die Influenz bewirkenden und dem durch die Elektronenverschiebung im Leiter erzeugten, hat also durch die Influenz selbst eine Veränderung

erfahren. Die dadurch bedingte Anordnung ist anders als in den zuerst besprochenen Fällen und man übersieht sie am leichtesten mit Hilfe der wenigstens in den Hauptzügen leicht zu zeichnenden Gestaltung der Kraftlinien und Niveauflächen, wie sie in einigen einfachen Fällen wohl in jedem Unterricht besprochen wird. Es ergibt sich so, daß die elektrische Flächendichte auf jedem der beiden Teile der Oberfläche gegen die neutrale Zone hin abnimmt. — Ist der Leiter zur Erde abgeleitet, so ist er mit dieser als ein Ganzes im elektrischen Sinn aufzufassen; wo auch die neutrale Zone in diesem Fall liegen mag, jedenfalls findet eine Wanderung von Elektronen vom Körper zur Erde oder umgekehrt statt, so daß ersterer schon, solange die Verbindung mit der Erde noch besteht, den Eindruck eines nur positiven oder negativen Körpers macht und dies bleibt, wenn man die Verbindung aufhebt, ehe das influenzierende Feld entfernt wird. Ist letzteres nachträglich geschehen, so verteilen sich die Elektronen wie auf S. 31 f. besprochen, und wir haben die bekannte dauernde Elektrisierung durch Influenz.

Der Einwirkung eines äußeren Felds kann auch ein isolierter schon vorher elektrischer Körper unterliegen; dieselbe äußert sich in ganz analoger Weise, indem sie wieder eine Verschiebung von Elektronen nach den Stellen der Oberfläche zur Folge hat, wo die Kraftlinien von außen an dieselbe herantreten. Das Resultat ist also eine Veränderung der Elektronenverteilung auf der Oberfläche, es wird aber nicht notwendig sein, dies weiter auszuführen, denn die Übertragung der Überlegungen des vorhergehenden Absatzes auf diesen Fall macht keine Schwierigkeit.

§ 10. **Spezielle Vorstellung über die frei beweglichen Elektronen in Leitern; Wärmeleitung; Thermostrome.** In den §§ 5 und 7—9 ist es gelungen, die elektrischen Vorgänge in Leitern von der Elektronentheorie aus zu deuten; notwendig war dazu bloß die in § 4 fast von selbst sich aufdrängende Vorstellung, daß es im Leiter Elektronen gibt, welche, an keine bestimmte Stelle im Körper gebunden, imstande sind, jedem Bewegungsantrieb zu folgen; um den Zusammenhang zwischen Potentialdifferenz und Stromstärke zu bekommen, wie ihn das Ohmsche Erfahrungsgesetz darstellt, mußte man ferner noch annehmen, daß bewegende Kraft und Geschwindigkeit dieser **Leitungselektronen*** einander proportional sind, eine Annahme, die, wie dort (S. 17. Anm. 2) schon bemerkt, keineswegs ad hoc gemacht wird, sondern sich aus der Analogie mit anderen Vorgängen ergibt. Die Frage, wie man sich die Möglichkeit der Existenz frei beweglicher Elektronen vorstellen soll, konnte dabei beiseite bleiben; sie soll uns aber jetzt beschäftigen, im Interesse der Anschaulichkeit sowohl als mit Bezug auf weitere Erscheinungen in Leitern, die eine bestimmte Aussage darüber verlangen.

*) So sollen von jetzt ab die frei beweglichen Elektronen genannt werden zum Unterschied von den auch in Metallen vorhandenen Elektronen, welche an die Atomkomplexe gebunden sind.

Die z. Z. verbreitetste Vorstellung ist die, daß sich die Leitungselektronen in den Zwischenräumen zwischen den Molekülen des Leiters frei und regellos hin und her bewegen, wie die Moleküle eines Gases. Man kann diese Vorstellung die kinetische nennen, entsprechend der Bezeichnung kinetische Gastheorie, deren Anschauungen man auch in vielen ihrer Einzelheiten in die neue Vorstellung hereinnimmt; so bildet die kinetische Energie der Leitungselektronen einen Teil der Wärmeenergie des Körpers. Einen elektrischen Strom stellt diese Bewegung noch nicht dar, wie eine Gasmasse trotz der Bewegung ihrer Moleküle als Ganzes genommen ruht, ein Mückenschwarm, so lebhaft in ihm auch die Mücken durcheinander schwirren, seine Stelle im Raum beibehalten kann; wird aber ein elektrisches Feld erregt, so wirken auf alle Elektronen gleichgerichtete Kräfte, der Elektronenschwarm, in dem die Elektronen nach wie vor ihre Zickzackbewegungen infolge ihrer Zusammenstöße unter sich und mit den Teilchen des Leiters ausführen, dazu aber infolge der Wirkung des Felds Geschwindigkeitskomponenten in bestimmter Richtung erhalten, schreitet als Ganzes in dieser Richtung vorwärts, wie der Mückenschwarm, wenn er von einem Luftzug erfaßt wird. Die Zahl der an jeder Stelle vorhandenen Leitungselektronen bleibt hiebei unverändert, sonst müßten sich elektrostatische Erscheinungen bemerkbar machen (vgl. dazu auch S. 15, Konstanz der Stromstärke); jedes von einer Stelle weggehende Elektron wird durch ein herankommendes ersetzt, und wenn man sich die ganze Bewegung in irgend einem Augenblick erstarrt denkt, bekommt man stets im Durchschnitt das gleiche Bild, nämlich dasjenige, welches der Leiter auch im stromlosen Zustand bieten würde. Im weiteren gelten nun die Ausführungen von § 5 und dann auch die von §§ 7 und 8. In den in § 9 behandelten Fällen von Influenz muß das Fortschreiten der Elektronen bald zum Stillstand kommen, da dieselben jedenfalls nicht in merklicher Zahl die Leiteroberfläche verlassen können; diejenigen Teile des Schwarms, welche die Oberfläche zuerst treffen, werden sich dort zusammendrängen, bis durch die dadurch bedingte Anhäufung in der in § 9 ausgeführten Weise das Feld im Leiterinnern vernichtet ist. Es sind auch in diesem Fall aus dem Innern die Leitungselektronen keineswegs verschwunden, sonst müßten ja dort positive Ionen erscheinen; nicht einmal an den Teilen der Oberfläche, wo die letzteren tatsächlich auftreten, braucht dies angenommen zu werden. Die kleine Verschiebung des Schwarms nach der einen Seite hat an solchen Stellen die Zahl der Leitungselektronen nur vermindert, an einer Stelle im Innern dagegen wie beim Strom unverändert gelassen, wenn sich auch an jeder Stelle nicht mehr dieselben Elektronen befinden wie vorher. Die in § 9 erörterte Verteilung freier Elementarquanten auf der Oberfläche kann auch nicht so verstanden werden, daß die Elektronen an den betreffenden Stellen bewegungslos festgehalten würden, sie gibt bloß die Dichtigkeit des Elektronenschwarms an; in der Atmosphäre z. B. liegt auch eine bestimmte Dichtigkeitsverteilung der Luft vor unbeschadet der Beweglichkeit der Luftmoleküle. — Im Blick auf § 7 ist es vielleicht

nicht überflüssig, noch zu betonen, daß die kinetische Theorie der Leitungselektronen nicht etwa das Auftreten eines magnetischen Felds um einen stromlosen Leiter verlangt; denn schon ein einzelnes Elektron muß infolge seiner Zickzackbewegung in jedem Augenblick die magnetische Wirkung wieder vernichten, die es im vorhergehenden hervorbrachte, und noch weniger kann ein magnetisches Feld entstehen, wenn eine Unzahl von Elektronen regellos durcheinander schwirrt.

Die weitere Frage ist nun die, woher es rührt, daß Leitungselektronen zu existieren vermögen, eine Frage, die erhöhte Bedeutung gewinnt durch die Tatsache, daß es Stoffe gibt, die Isolatoren, in denen es jedenfalls nur in ganz geringem Maß zur Abscheidung von solchen gekommen ist. Zur Beantwortung dieser Frage wollen wir uns zunächst daran erinnern, daß gerade die Metalle es sind, welche bei der elektrolytischen Dissoziation Elektronen abgeben (S. 10). Die Zahl dieser Elektronen ist eine ganz bestimmte, nämlich gleich der Wertigkeit des betreffenden Metalls, wenn diese auch z. T. einigermaßen veränderlich ist (man denke an die veränderliche Wertigkeit verschiedener Schwermetalle). Es darf aber daraus nicht geschlossen werden, daß das betreffende Atom nur soviel Elektronen enthält, als es im maximalen Fall abzuspalten vermag*); vielmehr ist anzunehmen, daß die Zahl der überhaupt vorhandenen Elektronen größer ist, daß aber eine Anzahl dieser Elektronen, nämlich eben soviel, als die Wertigkeit angibt, mehr oder weniger lose an das Atom gebunden ist. Diese letzteren werden die **Valenzelektronen** genannt, weil durch sie offenbar auch die chemische Verkettung der Atome zu den Molekülen einer Verbindung in irgendwelcher Weise vermittelt werden muß. Stark (J. 5, S. 124 ff, 1908) hat eine diesbezügliche Theorie ausgearbeitet, welche gerade das letztere Problem eingehend behandelt und nicht bloß eine Anschauung über die besondere Stellung der Valenzelektronen entwickelt, sondern auch von der Ursache ihrer Abtrennung bei der elektrolytischen Dissoziation spricht; es ist aber nicht möglich, diese Theorie hier eingehender zu schildern, doch sei bemerkt, daß der Einwirkung des Lösungsmittels eine weitgehende Bedeutung bei dieser Abtrennung zugeschrieben wird, offenbar mit Recht, wenn man bedenkt, daß diese Dissoziation fast bloß in wässriger Lösung eintritt. Es ist ein naheliegender Gedanke, daß die Valenzelektronen es sind, welche, nachdem sie frei geworden, die Rolle der Leitungselektronen übernehmen. Bekanntlich stellen viele chemische Verbindungen nicht das feste Gebilde dar, das man so gerne annimmt, sondern ein Gleichgewicht zwischen Bestandteilen und Verbindung. Dieses Gleichgewicht hängt unter anderem von der Temperatur ab derart, daß bei der Mehrzahl der Verbindungen das gleichzeitige Vorhandensein der unverbundenen Bestandteile erst bei höherer Temperatur merkbar wird (z. B. Wasser neben zahlreichen anderen Beispielen), woneben aber auch solche existieren, bei denen dies schon

*) Man vgl. dazu auch die Angaben über die Elektronenzahlen im Atom auf S. 8, wenn auch darauf nicht das Hauptgewicht gelegt werden soll, sondern auf die Ausführungen auf S. 51.

bei gewöhnlicher (z. B. $N_2O_4 \rightleftharpoons NO_2 + NO_2$) oder wenig erhöhter Temperatur (z. B. H J) der Fall ist. Ein ganz entsprechender Gleichgewichtszustand ist anzunehmen zwischen den intakten Metallatomen und den durch Zerfall entstandenen positiven Ionen und freien Leitungselektronen. Der Grad der Dissoziation, also die Zahl der im Kubikzentimeter frei gewordenen Valenzelektronen, welche jetzt Leitungselektronen heißen, hängt neben der Temperatur noch von der Natur des Metalls ab; sie kann nicht größer sein als die Maximalzahl der Valenzelektronen, aber es ist durchaus nicht nötig, daß alle Valenzelektronen frei geworden sind. Denn abgesehen von dem Einfluß des Lösungsmittels liegt bei der elektrolytischen Dissoziation der Fall auch insofern anders, als es sich hier nicht um lauter gleichartige Atome, sondern um die zwei verschiedenen Bestandteile handelt, die als Kationen und Anionen unterschieden werden. — Über die Anzahl der Leitungselektronen liegen Schätzungen vor z. B. von Drude, der einmal findet, daß auf rund 5000 Atome nur ein Leitungselektron komme, bei einer von andern Erscheinungen ausgehenden Rechnung dagegen auf je ein Atom 0,47—3,73 Leitungselektronen erhält (A. 39, S. 1605, 1912), während nach Thomson (Th. S. 53) die Anzahl der Leitungselektronen des Silbers „mit der Anzahl der Atome vergleichbar“ und nach neueren Untersuchungen die Zahl der Elektronen pro Atom wahrscheinlich < 1 ist (A. 35, S. 46, 1911). Jedenfalls liegt in keiner dieser Zahlenangaben ein Widerspruch mit der Annahme, daß die Leitungselektronen frei gewordene Valenzelektronen sind. Es verdient noch Erwähnung, daß, wenn in dieser Weise im Metall ein Leitungselektron sich von einem im Komplex eines Moleküls befindlichen Atom ablöst, dies nicht den Zerfall des Moleküls zur Folge zu haben braucht; denn selbst bei einwertigen Elementen erfolgt die Bindung aneinander nach Starks Anschauung durch zwei Valenzelektronen.

Bei dieser Gelegenheit sei gleich noch die Tatsache erwähnt, daß Metalle im glühenden Zustand dauernd Elektronen aussenden; es ist dies sowohl am Entstehen eines positiv elektrischen Zustands des Metalls als auch an Erscheinungen in der Umgebung (s. S. 57) wahrzunehmen. Die kinetische Theorie der freien Elektronen gibt hierfür eine sehr anschauliche Erklärung; wenn die Elektronen in den Zwischenräumen zwischen den Metallteilchen hin und her fliegen, so ist es ohne weiteres zu verstehen, daß ein Teil derselben auch die Oberfläche durchschreitend das Metall verläßt. Man sollte allerdings erwarten, daß dies nun auch bei jeder Temperatur geschieht; sofern dem nicht so ist, muß man annehmen, daß das Elektron beim Durchqueren der Oberfläche einen Widerstand zu überwinden hat ähnlich der bekannten Oberflächenspannung bei Flüssigkeiten. Nur wenn es die dazu nötige kinetische Energie besitzt, kann es das Metall verlassen; liegt also seine Geschwindigkeit unterhalb des dieser Energie entsprechenden Werts, so wird dies nicht möglich sein. Die Geschwindigkeiten der Elektronen haben wie die der Moleküle eines Gases bei jeder Temperatur die allerverschiedensten Werte, aber ihr Durchschnittswert ist bei jeder Temperatur ein ganz bestimmter und nimmt mit steigender Tem-

peratur zu. Demgemäß wird es zwar bei jeder Temperatur tatsächlich Elektronen geben, welche das Metall verlassen können, aber umso weniger, je tiefer die Temperatur ist, und erst von einer bestimmten Temperatur an wird diese Zahl merklich. Diese Temperatur liegt im allgemeinen nicht unterhalb der Glühtemperatur; eine Ausnahme bildet nach neueren Untersuchungen z. B. Kalium, sofern es schon bei gewöhnlicher Temperatur merklich Elektronen aussendet. Diese Elektronenabgabe der Metalle hat die größte Ähnlichkeit mit dem Verdampfen einer Flüssigkeit, unter anderem kommt dies darin zum Ausdruck, daß man, wie genauere Messungen gezeigt haben, von einem Dampfdruck der Elektronen über dem Metall sprechen kann, der in derselben Weise von der Temperatur abhängt, wie der einer Flüssigkeit. Wenn nun oben von einem Gleichgewicht die Rede war zwischen den intakten Metallatomen und den durch Zerfall entstandenen positiven Ionen und freien Leitungselektronen, so müssen wir jetzt daran denken, daß dieses Gleichgewicht durch das Verdampfen der Elektronen wieder gestört wird, oder vielmehr wir müssen sagen, es besteht ein von der Temperatur und der Natur des Metalls abhängiges Gleichgewicht zwischen den intakten Metallatomen, den durch Dissoziation freigewordenen Leitungselektronen (und den entsprechenden positiven Ionen) und den durch den Verdampfungsprozeß aus dem Metall ausgeschiedenen Elektronen.

Haben wir bis jetzt im wesentlichen gesehen, wie sich vom Standpunkt der kinetischen Elektronentheorie aus die Erscheinungen ausnehmen, welche diese Theorie zu ihrer Erklärung nicht bedürfen, so soll jetzt noch auf solche eingegangen werden, bei deren Ableitung man mit der bloßen Annahme der Existenz der Leitungselektronen nicht auskommt. Das seit langem bekannte Gesetz von Wiedemann und Franz spricht die experimentell gefundene Tatsache aus, daß das Verhältnis zwischen der Leitfähigkeit für Wärme und für Elektrizität für alle Metalle (nahezu) denselben Wert hat. Dieselbe weist auf einen engen Zusammenhang zwischen beiden Vorgängen hin derart, daß die Leitungselektronen auch wenigstens einen Teil der Wärmeleitung besorgen. Nach der kinetischen Elektronentheorie kann man sich dies folgendermaßen vorstellen. Wird die Temperatur eines Metalls an einer Stelle erhöht, so besteht dies darin, daß dort die Schwingungen der Atome um ihre Gleichgewichtslage stärker werden, doch wird die Amplitude nicht so groß, daß sie direkt auf benachbarte Atome stoßen und so ihre erhöhte kinetische Energie auf dieselben unmittelbar übertragen können. Hierzu dienen vielmehr die in den Zwischenräumen befindlichen Leitungselektronen, welche, an der Wärmebewegung ja auch beteiligt, von den lebhafter schwingenden Atomen angestoßen heftiger auf andere Atome aufprallen, sie ebenfalls in lebhaftere Schwingungen versetzen (also auf höhere Temperatur bringen) und so die Energieübertragung von Atom zu Atom vermitteln und damit den Vorgang bewirken, den wir Fortleitung der Wärme nennen. Je größer die Anzahl der Leitungselektronen und ihre Beweg-

lichkeit, desto besser muß das Metall den elektrischen Strom*) und die Wärme leiten. Die Abweichungen von dem Wiedemann-Franz'schen Gesetz hat man z. T. darauf zurückgeführt, daß die Wärmeleitung nicht ausschließlich durch die freien Leitungselektronen erfolgt, sondern in größerem oder geringerem Maß auch wie bei Isolatoren, die keine merkliche Zahl von Leitungselektronen besitzen (vgl. S. 44).

Zu den Erscheinungen, für deren Deutung wir spezielle Vorstellungen nötig haben über die Art, wie die Leitungselektronen in Metallen existieren, gehört auch der *Thermostrom*. Grenzt ein Metallstück an ein zweites von derselben Temperatur, das aber in der Volumeinheit weniger Leitungselektronen enthält, also eine geringere Elektronenkonzentration hat, so suchen sich durch die Berührungsschicht hindurch die Konzentrationen auszugleichen, indem vom ersten zum zweiten Metall mehr Elektronen hinüberdiffundieren als vom zweiten zum ersten, wie bei zwei durch eine poröse Scheidewand getrennten Gasräumen, die beide das gleiche Gas enthalten, jedoch in verschiedener Dichte. Während es aber in diesem Fall zu einem vollständigen Ausgleich kommt, ist dies bei den beiden Metallen nicht möglich; denn indem das erste Metall mit der grösseren Konzentration im ganzen Elektronen verliert, das zweite welche gewinnt, muß das Potential für das erste steigen, für das zweite fallen, also ein elektrisches Feld entstehen, dessen positive Richtung vom ersten zum zweiten Metall geht, das daher Elektronen vom zweiten zum ersten zu treiben sucht. Der Elektronenausgleich muß dann aufhören, wenn die Potentialdifferenz zwischen den beiden Metallen soweit gestiegen ist, daß sie dem Ausgleichsbestreben das Gleichgewicht hält; die Elektronenkonzentration bleibt also im ersten Metall größer als im zweiten, das Resultat ist nur eine Annäherung beider und gleichzeitig das Entstehen einer Potentialdifferenz zwischen den Metallen**), welche, wie eine Durchrechnung des Vorgangs ergibt, der absoluten Temperatur der Metalle proportional ist. Bildet man aus den beiden Metallen, indem man sie in Form rechtwinklig umgebogener Stäbe verwendet, ein Rechteck (oder sonst eine geschlossene Figur), so daß sie sich an zwei Stellen berühren, so ist damit indessen noch keine Veranlassung zur Entstehung eines elektrischen Stroms gegeben, falls die Temperatur überall dieselbe ist. Denn da in diesem Fall das Potential an beiden Berührungsstellen um denselben Betrag fällt, wenn man vom ersten zum zweiten Metall geht, kann auf jedem Metall für sich das Potential konstant und das elektrische Gleichgewicht bestehen bleiben und die Potentialdifferenzen an den Berührungsstellen entsprechen zwei gegenein-

*) Auf S. 17 ergab sich für den spezifischen Widerstand der Ausdruck $\frac{1}{c N e^2}$, die Leitfähigkeit ist der reziproke Wert, also $= c N e^2$; in c steckt die „Beweglichkeit“ der Elektronen. Auf die Ableitung eines mathematischen Ausdrucks für die Wärmeleitfähigkeit und damit für das Verhältnis beider, also für das Wiedemann-Franz'sche Gesetz soll verzichtet werden.

**) Auf jedem Metall für sich herrscht nach Eintritt des Gleichgewichts natürlich konstantes Potential; denn durch die Vorgänge an der Berührungsstelle entsteht auf jedem Metall ein elektrisches Feld, welches (im Verein mit der Diffusion) sofort wieder eine gleichmäßige Verteilung der Elektronen auf demselben herbeiführt.

ander geschalteten Elementen gleicher Poldifferenz. Wird dagegen die eine Berührungsstelle A auf eine höhere Temperatur gebracht als die andere B, so wird der Potentialsprung bei A größer als bei B, es muß daher auf dem ersten Metall das Potential von A gegen B, auf dem zweiten von B gegen A hin abnehmen, in dieser Richtung also auch infolge einer entgegengesetzt gerichteten Elektronenverschiebung ein Strom zirkulieren, der an der wärmeren Berührungsstelle von dem Metall mit der geringeren zu dem mit der größeren Dichte geht, an der kälteren entgegengesetzt; denn die Elektronenverschiebung würde, wie leicht zu sehen, an ersterer die Potentialdifferenz herabsetzen, an letzterer erhöhen, so daß dort das Ausgleichsbestreben, hier die Potentialdifferenz das Übergewicht erhält und Elektronen in entsprechender Richtung vom einen zum andern Metall treibt. Wie in den Elementen zwischen Metall und Flüssigkeit (vgl. S. 12 f.), so bleiben also auch hier trotz des Stroms die Potentialdifferenzen an den Berührungsstellen bestehen; diese wirken jetzt wie zwei gegeneinander geschaltete Elemente von verschiedener Poldifferenz, also wie eine Batterie, deren Poldifferenz gleich ist der Differenz der Potentialsprünge an den beiden Berührungsstellen und damit (wenigstens angenähert) proportional der Temperaturdifferenz derselben*). Die beste Wirkung erhält man bekanntlich durch Kombination von Antimon und Wismut, wo an der wärmeren Berührungsstelle der Strom vom letzteren zum ersteren geht. Also muß im Antimon die Elektronenkonzentration größer sein als im Wismut; die Messung ergibt bei 0° an der Berührungsstelle eine Potentialdifferenz von etwa $\frac{1}{30}$ Volt, was im Antimon eine ungefähr viermal so große Elektronendichte erfordert als im Wismut. — Aus den für die Potentialsprünge sich ergebenden Ausdrücken folgt ohne weiteres, daß es gleichgültig ist, ob sich in B die beiden Metalle direkt berühren oder ob beliebig viele dazwischen geschaltet sind, falls nur in A allein die Temperatur erhöht ist, während alle andern Berührungsstellen unter sich dieselbe Temperatur besitzen. Ebenso folgt, daß auch in einem aus beliebig vielen Metallen zusammengestellten Kreis kein Strom entstehen kann, wenn alle Berührungsstellen die gleiche Temperatur haben. Es sei noch bemerkt, daß die übliche Redeweise, auf einem System verbundener Leiter herrsche überall dasselbe Potential, nur insoweit zulässig ist, als gegenüber den sonstigen Potentialdifferenzen die Potentialsprünge an den Berührungsstellen vernachlässigt werden dürfen, wenn nicht alle Leiter aus demselben Material bestehen; andernfalls sind die Formulierungen für die elektrostatischen Gleichgewichtsbedingungen entsprechend abzuändern.

Gibt so die kinetische Elektronentheorie für das Wiedemann-Franzsche Gesetz und für die Entstehung des Thermostroms eine befriedigende Erklärung, so wurde doch schon im ersteren Fall angedeutet, daß sie für die Ableitung aller Tatsachen nicht vollständig

*) Von einer Modifikation der obigen Entwicklung durch das Temperaturgefälle von der wärmeren zur kälteren Berührungsstelle längs jeden Metalls für sich ist abgesehen worden, da sie das Wesentliche des Resultats nicht beeinflußt.

ausreicht*) und außerdem soll nicht verschwiegen werden, daß es verschiedene Erscheinungen gibt, denen gegenüber sie in der vorgetragenen einfachen Form ziemlich versagt. Thomson hat deshalb eine andere Theorie für die Möglichkeit der Existenz von Leitungselektronen aufgestellt, die bezüglich mancher der angedeuteten Schwierigkeiten günstigere Verhältnisse ergibt. Diese Theorie hat aber aus verschiedenen Gründen wenig Anklang gefunden, vielmehr besteht ziemlich allgemein die Neigung, die überaus anschauliche kinetische Theorie im Grunde beizubehalten und die vorhandenen Schwierigkeiten durch Modifizierungen und Ergänzungen zu beseitigen. Trotz der gemachten Anfänge sind diese aber noch nicht genügend geklärt und sichergestellt, um in eine Abhandlung wie die vorliegende aufgenommen zu werden; die Grundlage zu entwickeln schien aber gerechtfertigt, darf doch angenommen werden, daß sie auch in Zukunft in Geltung bleiben wird.

§ 11. **Elektrische Vorgänge in Isolatoren.** Der Unterschied zwischen Leitern und Nichtleitern wurde bereits S. 16 berührt. In ersteren haben wir Stoffe erkannt, durch welche hindurch sich elektrische Ladungen oder, besser gesagt, Potentialunterschiede auszugleichen vermögen: entsteht auf einem solchen Leiter eine Potentialdifferenz oder werden zwei Körper verschiedenen Potentials durch einen solchen miteinander verbunden, so verschiebt sich infolge des durch den Potentialunterschied bedingten Felds der Elektronenschwarm in dem Leiter von der Stelle tieferen Potentials nach der höheren, es nach S. 9 hier erniedrigend und dort erhöhend, bis der Unterschied ausgeglichen ist, falls er nicht wie beim Element immer wieder aufs neue erzeugt wird. Nichtleiter oder Isolatoren im strengen Sinn vermöchten diesen Vorgang nicht zu bewirken, in ihnen könnte es also derart bewegliche Leitungselektronen nicht geben. Eine scharfe Grenze zwischen Leitern und Nichtleitern existiert nun bekanntlich nicht und auch die sogenannten Nichtleiter sind in Wirklichkeit nur sehr schlechte Leiter; ordnen wir eine Anzahl von Stoffen in eine Reihe, längs deren die Leitfähigkeit immer mehr abnimmt, so muß in derselben Richtung die Konzentration der Leitungselektronen in ihnen abnehmen, bei dem auf S. 36 erwähnten Dissoziationsprozeß muß eine immer geringere Konzentration derselben das Gleichgewicht herstellen. Hieraus erklärt sich zunächst die Tatsache, daß viele Stoffe, z. B. Holz, gegenüber den großen in der Elektrostatik auftretenden Potentialdifferenzen noch als Leiter (wenn auch als schlechte) erscheinen, während sie gegen elektrische Ströme genügend isolieren: je kleiner N ist, desto größer muß nach den Entwicklungen auf S. 16 f. die Geschwindigkeit der Leitungselektronen, desto stärker muß das elektrische Feld sein, damit eine merkliche Strömung zustande kommt. Ferner wird durch diese geringe Neigung der Valenzelektronen, sich von den Atomen abzulösen, ver-

*) Es ist z. B. auch die Potentialdifferenz zwischen zwei sich berührenden Metallen gleicher Temperatur größer, als sich mit obiger Theorie verträgt; zur Erklärung dieses Umstands müssen also noch andere Ursachen herangezogen werden, wenn auch die vorgetragene Theorie von den Veränderungen, welche durch die verschiedene Temperatur der Berührungsstellen hervorgerufen werden, im allgemeinen genügend Rechnung gibt.

ständig, warum bei der elektrolytischen Dissoziation in wässriger Lösung es nur bei den metallischen Elementen zur Abtrennung von Elektronen kommt, während die nichtmetallischen vielmehr diese abgetrennten Elektronen aufnehmen.

Die in § 14 zu besprechenden optischen Erscheinungen führen auf die Vorstellung, daß in allen Stoffen neben den als Leitungselektronen abtrennbaren Valenzelektronen noch sog. **Verschiebungselektronen** existieren, d. h. Elektronen, welche sich vom Atom nicht loslösen können, aber innerhalb desselben doch nicht starr an ihre Stelle gebunden sind, so daß sie sich mehr oder weniger von derselben verschieben lassen*). Die einem Verschiebungselektron normaler Weise im Atom zukommende Stelle ist bestimmt durch die Bedingung, daß innerhalb des Atoms die elektrischen Kräfte zwischen den positiven und negativen Teilen desselben im Gleichgewicht sein müssen, sie ist seine Gleichgewichtslage; eine Verschiebung des Elektrons muß daher das Gleichgewicht stören, es müssen also Kräfte auftreten, welche dieses Gleichgewicht wiederherzustellen suchen, umso stärker, je größer die Verschiebung ist, wie wenn das Atom ein elastisches Gebilde wäre. Gleichzeitig muß auch nach außen hin die Störung sich in der Weise geltend machen, daß das Atom an der Stelle, gegen die hin das Elektron verschoben ist, negativ, an der entgegengesetzten positiv, also analog erscheint wie ein kleiner Magnet mit Nord- und Südpol. Auch in den Metallatomen sind Verschiebungselektronen anzunehmen, doch überwiegt bei den gewöhnlichen elektrischen Erscheinungen bei ihnen der Einfluß der Leitungselektronen, während es bei guten Isolatoren umgekehrt ist; den Übergang vom einen zum andern bilden die sog. Halbleiter.

Die Wirkung eines elektrischen Felds auf einen Halbleiter, in welchem sowohl die Verschiebungs- als die Leitungselektronen zu berücksichtigen sind, ist einmal für die letzteren die auf S. 34 geschilderte. Dazu kommt aber noch, daß sich auch innerhalb der Atome die ersteren entgegen der positiven Richtung des Felds verschieben; man nennt die so entstehende Veränderung im Körper seine **Dielektrisierung** (genommen von dem von Faraday herrührenden Ausdruck Dielektrikum für einen Isolator). Sie besteht also darin, daß sämtliche Atome an der Seite, von der die Kraftlinien des Felds herkommen, negativ, an der entgegengesetzten positiv erscheinen. Wir haben demgemäß in einem Halbleiter dreierlei zu unterscheiden: 1) die Polarisierung des den Körper durchdringenden Äthers selbst und dadurch bewirkt 2) die Verschiebung der Leitungselektronen in dem Körper als Ganzes und 3) die der Verschiebungselektronen innerhalb seiner einzelnen Atome. Im reinen Äther, im „leeren Raum“, ist nur das erste vorhanden; und wie wir bei der Besprechung der Leiter daneben nur die zweite Wirkung berücksichtigt, die dritte vernachlässigt haben, so

*) Valenz- und Verschiebungselektronen gehören zu den auf S. 8 genannten Bausteinen des Atoms; solange erstere sich nicht losgelöst haben, spielen sie im wesentlichen dieselbe Rolle wie die letzteren.

wollen wir von jetzt ab uns die Isolatoren in idealer Weise vorstellen und in ihnen die zweite Wirkung vernachlässigen. Es kann ja keine Schwierigkeit machen, im Notfall den tatsächlichen Verhältnissen dadurch Rechnung zu tragen, daß man beides in Betracht zieht.

Die Größe der Verschiebung im Atom, die Stärke der Dielektrisierung des Isolators kann als der die Wirkung hervorbringenden Feldstärke proportional angesehen werden; der Proportionalitätsfaktor hängt von der Natur des Isolators ab. Fassen wir die Atomreihen längs der Kraftlinien (deren positive Richtung von links nach rechts gehe) ins Auge, so müssen alle Atome auf der linken Seite negativ, auf der rechten positiv elektrisch erscheinen, es müssen sich aber in jeder Reihe, wenn der Isolator homogen ist, die beiden aneinander grenzenden Seiten zweier benachbarter Atome in ihrer Wirkung nach außen gegenseitig aufheben, nur an den beiden Endflächen des Isolators, an denen die Kraftlinien ein- bez. austreten, kann nicht neutralisierte freie „Verschiebungselektrizität“ auftreten, auf der linken Seite negative, auf der rechten positive. Denken wir uns zwei entgegengesetzt elektrische Körper zunächst im leeren Raum, so erregen sie im Äther die Polarisation (§ 6), durch die wir uns ihre anziehende Wirkung vermittelt denken; diese läßt sich formell durch das Coulombsche Gesetz ausdrücken: $\frac{e_1 \cdot e_2}{r^2}$ (e_1 und e_2 die Ladungen, r die Entfernung der Körper). Wird der Zwischenraum durch einen materiellen Isolator ausgefüllt, so tritt hiezu noch dessen Dielektrisierung, an der Grenzfläche gegen den positiven Körper wird negative, an der gegen den negativen positive Verschiebungselektrizität frei; beide zusammen erzeugen ein entgegengesetzt gerichtetes elektrisches Feld und vermindern dadurch die im leeren Raum vorhandene Wirkung. (Wenn man will, kann man dies auch so ausdrücken: die an der Oberfläche jedes Körpers frei werdende, seiner Ladung entgegengesetzte Verschiebungselektrizität macht einen Teil dieser Ladung unwirksam). Die Durchrechnung ergibt, daß man die Wirkung der beiden Körper aufeinander dann formell dadurch ausdrücken kann, daß man das Coulombsche Gesetz in der Form schreibt: $\frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{e_1 \cdot e_2}{r^2}$, wo ϵ die Dielektrizitätskonstante des Isolators heißt und > 1 ist, für den leeren Raum aber gleich 1 gesetzt werden muß. In der Einführung dieser Größe ϵ kann man also für die Rechnung die Ätherpolarisation und die Dielektrisierung des materiellen Isolators zusammenfassen, und zwar ist das am Betrag von ϵ , was über den Wert 1 hinausgeht, auf die letztere Ursache zurückzuführen. Grenzen zwei verschiedene Isolatoren aneinander, so neutralisieren sich an der Grenzfläche die Verschiebungselektrizitäten nicht; es herrscht zwar an irgend einer Stelle der Grenzfläche für die dort zusammenstoßenden Teile der beiden Isolatoren dieselbe elektrische Kraft, aber der die Verschiebung bestimmende Proportionalitätsfaktor ist für beide verschieden, damit also auch die an beiden Teilen erscheinenden ungleichnamigen Verschiebungselektrizitäten. Eine solche Grenzfläche erscheint daher unter dem Einfluß des elektrischen

Felds g e l a d e n, und analog, aber natürlich viel komplizierter, verhält es sich mit einem i n h o m o g e n e n Isolator, der in seiner ganzen Erstreckung geladen erscheint. Wird das Feld beseitigt, so verschwinden alle diese durch die Verschiebung erzeugten Ladungen, aber meist nicht augenblicklich, wodurch z. B. der sog. elektrische Rückstand bei der Entladung von Leydener Flaschen erzeugt wird. Die Folgerungen, welche die Dielektrisierung der Isolatoren, also formell die Einführung der Dielektrizitätskonstanten in das Coulombsche Gesetz mit sich bringt, sind aus der gewöhnlichen Elektrizitätslehre bekannt, können jedenfalls hier nicht ausgeführt werden. Nur daran sei noch erinnert, daß sie beim Kondensator am deutlichsten hervortreten, indem sich seine Kapazität je nach der Natur des die Belegungen trennenden Isolators ändert; deshalb geschieht die Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten mit Hilfe von Kapazitätsmessungen an Kondensatoren.

Die Bewegung der Verschiebungselektronen, in welcher das Eintreten oder die Veränderung einer Dielektrisierung besteht, stellt einen wenn auch nur kurz dauernden elektrischen Strom dar, wie jede andere Bewegung von Elektronen; man hat diese Ströme die V e r s c h i e b u n g s s t r ö m e genannt, und sie müssen von denselben Nebenerscheinungen begleitet sein, wie andere Elektronenbewegungen. Röntgen ist es gelungen, experimentell zu zeigen, daß sie ein magnetisches Feld um sich verbreiten, wie es auf S. 23 beschrieben wurde. Zwischen vier Metallplatten A, B, C, D

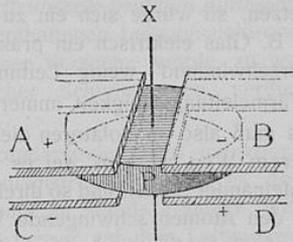


Fig. 12

(Fig. 12), welche in der angegebenen Weise elektrisch sind, rotiert rasch um die Achse X eine Scheibe eines Dielektrikums; in dem zwischen A und C befindlichen Teil haben sich die Verschiebungselektronen nach oben, in dem zwischen B und D befindlichen nach unten verschoben, an der Stelle P muß also ein Verschiebungsstrom von unten nach oben (die Elektronen bewegen sich von oben nach unten) vorhanden sein, dessen magnetisches Feld Röntgen mit Hilfe einer sehr empfindlichen Magnetnadel nachweisen konnte. Auch elektromagnetische Trägheit (S. 24) muß den Verschiebungselektronen eigen sein. Bei Dielektrisierungen gewöhnlicher Art werden sich diese Erscheinungen indessen nicht weiter geltend machen, wohl aber bei raschen Veränderungen, wie sie bei der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen vorliegen; davon soll in § 13 noch die Rede sein.

Die Elektrisierung durch Reibung ist bekanntlich keineswegs auf Isolatoren beschränkt, läßt sich aber bei ihnen am leichtesten ausführen und soll deshalb an dieser Stelle Erwähnung finden. So einfach der Vorgang äußerlich ist, so wenig geklärt ist bis jetzt seine Theorie. Da die aneinander geriebenen Stoffe in absolut gleicher Stärke entgegengesetzt elektrisch werden, findet jedenfalls ein Übergang von Elektronen vom einen zum andern statt. Dies wird z. T. auf dieselbe Ur-

sache zurückgeführt, wie die Potentialdifferenz zweier sich berührender Metalle (vgl. insbesondere S. 40, Anm.), wobei das Reiben dann nur zur Herbeiführung einer innigeren Berührung dienen soll; berühren sich nämlich zwei Leiter nur in einem einzigen Punkt, so würde infolge der Beweglichkeit der Elektronen sich der Einfluß der Berührung trotzdem auf die ganzen Körper erstrecken, während er bei Nichtleitern auf die Berührungsstelle beschränkt bliebe, weshalb zur Erreichung eines sichtbaren Resultats eine möglichst vielfache Berührung erforderlich wäre. Von anderer Seite wird der beim Reiben geleisteten Arbeit eine wesentliche Bedeutung zugeschrieben; von einer Abtrennung von Elektronen durch Energieaufwand wird in § 15 und § 16 noch mehr die Rede sein, es wäre aber hier immer noch die Frage, warum die abgetrennten Elektronen sich nun gerade auf dem einen der beiden Körper anhäufen sollen. Das Problem muß also vorläufig noch als ungelöst bezeichnet werden. — Bezüglich der Elektrisierung durch „Mitteilung“ sei auf S. 63 verwiesen.

Es möge endlich noch kurz auch der Wärmeleitung in Isolatoren gedacht werden. Daß diese durchweg schlechtere Wärmeleiter sind als die Metalle, stimmt mit der ausschlaggebenden Rolle überein, die wir den Leitungselektronen in Metallen auch bezüglich der Wärmeleitung zuschreiben. Wollte man die letztere auch in Isolatoren nur auf Rechnung der wenigen in ihnen enthaltenen Leitungselektronen setzen, so würde sich ein zu geringer Betrag dafür ergeben; während z. B. Glas elektrisch ein praktisch vollständiger Nichtleiter ist, also nur verschwindend wenig Leitungselektronen enthalten kann, ist seine Wärmeleitungsfähigkeit immer noch $\frac{1}{500}$ bis $\frac{1}{600}$ von der des Silbers. Es muß also in Isolatoren die Wärmeleitung in der Hauptsache auf anderem Weg erfolgen, sei es daß in ihnen die schwingenden Moleküle aufeinander stoßen und so direkt Energie aufeinander übertragen, oder daß in den Atomen schwingende Verschiebungselektronen Energie ausstrahlen (vgl. S. 48), die Leitung also in Wirklichkeit eine „innere Strahlung“ ist, oder endlich, daß diese Vorgänge zusammenwirken. Auf S. 38 ist erwähnt, daß auch bei Metallen derartige Möglichkeiten in Rechnung gezogen werden müssen, nur treten sie bei ihnen gegenüber der Wärmeübertragung durch Leitungselektronen zurück, während bei den Isolatoren das Umgekehrte der Fall ist.

III. Die elektrischen Schwingungen und das Licht.

§ 12. Elektrische Schwingungen. Auf S. 25 erschien uns die Selbstinduktion als eine Trägheit der Elektronen und zwar im wesentlichen elektromagnetischer Art. Im Lichte dieser Auffassung gewinnt man eine sehr anschauliche Vorstellung von der Entstehung der elektrischen Schwingungen, wie sie bekanntlich beim Ausgleich zwischen zwei verschieden elektrischen Körpern z. B. den Belegungen einer

Leydener Flasche zu stande kommen. Wird zwischen den beiden Körpern eine leitende Verbindung hergestellt, so setzen sich Elektronen vom negativen zum positiven in Bewegung, um die dem Gleichgewichtszustand entsprechende gleichmäßige Verteilung herbeizuführen, schießen aber infolge ihrer Trägheit über das Ziel hinaus und erzeugen dadurch ein entgegengesetzt gerichtetes elektrisches Feld, das sie wieder zurücktreibt, aber ebenfalls über das Ziel hinaus; in dieser Weise wiederholt sich der Vorgang, bis infolge der durch den Leitungswiderstand und die in § 13 zu erwähnende Ausstrahlung bewirkten Dämpfung das Gleichgewicht schliesslich eintritt*). Der Vorgang ist ganz analog den durch Reibung und Luftwiderstand gedämpften Schwingungen eines Pendels oder denen einer Wassermasse in einer beiderseits offenen U-förmigen Röhre. Wie ferner ein Pendel so stark gebremst werden kann, daß es, ohne hin und her zu schwingen, gleich beim ersten Mal in seiner Gleichgewichtslage zur Ruhe kommt, so findet der Ausgleich zwischen den beiden Körpern in einfacher Form ohne die Ausbildung von Schwingungen statt, wenn man die Verbindung durch einen großen Widerstand, z. B. eine feuchte Schnur herstellt. Während diese Art von Schwingungen zuerst Feddersen in den sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts eingehend studierte, hat etwa 20 Jahre später H. Hertz in Bonn gezeigt, daß man ganz allgemein in Drahtstücken, seien sie offen oder geschlossen (ev. durch eine kleine Funkenstrecke unterbrochen), elektrische Schwingungen, also nach unserer heutigen Auffassung oszillatorische Bewegungen der in ihnen enthaltenen Leitungselektronen herbeiführen kann. Eine Besprechung dieser Versuche würde zu weit führen, aber eine Eigentümlichkeit solcher Schwingungen verdient Erwähnung.

Verbindet man die Enden der Sekundärspule eines Induktionsapparats mit den beiden Polen einer Funkenstrecke, so ist es doch eigentlich merkwürdig, daß Funken überhaupt zu stande kommen, während doch der elektrische Ausgleich viel besser auf dem Leitungsweg durch die sekundäre Spule hindurch stattfinden könnte. Ebenso kann man die Entladungsfunken einer Leydener Flasche nicht dadurch verhindern, daß man parallel zur Funkenstrecke eine Drahtspule schaltet, während ein elektrischer Strom in solchem Fall selbstverständlich die Spule und nicht die Funkenstrecke durchlaufen würde. Zur Erklärung dieser Tatsache bedenken wir, daß die elektromagnetische Trägheit der Elektronen in dem von ihnen erzeugten magnetischen Feld ihre Ursache hat, also umso größer ist je stärker das letztere. Nun ist bekannt, daß man besonders starke Felder erhält, wenn man die Leitung zu einer Spule aufwickelt. Faßt man ein Gewicht mit der Hand und schwingt es hin und her, so ist dazu ein umso größerer Kraftaufwand nötig und man erzielt mit einer bestimmten Kraft eine umso kleinere Schwingungsweite, je größer die Zahl der Schwingungen

*) Eine Funkenstrecke, wie sie in die Verbindung meist eingeschaltet wird, ändert das Wesentliche dieser Betrachtung nicht (Genaueres s. S. 64); sie soll in diesem Fall es ermöglichen, die Körper auch zu laden, wenn die Verbindung schon hergestellt ist.

in derselben Zeit. Die Handbewegung erteilt dem Gewicht in raschem Wechsel entgegengesetzt gerichtete Beschleunigungen, die aber nur solange wirksam sind, als der Anstoß dauert, und demgemäß, um dasselbe um eine bestimmte Strecke aus seiner Lage zu bringen, umso stärker sein müssen bez. bei gegebener Stärke es umsoweniger aus derselben entfernen, je rascher sie wechseln. Die Schwingungszahl kann soweit gesteigert werden, daß die Bewegung des Gewichts unmerklich wird. erinnert man sich dabei noch der bekannten Beziehung: Kraft = Masse \times Beschleunigung, so erkennt man, daß dieser Fall umso früher eintreten muß, je größer die Masse (Trägheit) des Gewichts und je kleiner die bewegende Kraft, während eine längere Zeit in derselben Richtung wirkende Kraft, auch wenn sie noch so klein ist, das Gewicht stets in merkliche Bewegung versetzen muß. Diese Überlegungen lassen sich ohne weiteres auf die Elektronen übertragen und man sieht, daß die in den Windungen einer Spule befindlichen Leitungselektronen einer konstant in einer Richtung wirkenden elektrischen Kraft stets folgen werden, daß sie aber Schwingungen umsoweniger ausführen können, je kürzer die Schwingungsdauer ist. Wann diese Schwingungen unmerklich werden, hängt wie bei dem Gewicht von der Größe der (periodisch wechselnden) Kraft und der elektromagnetischen Masse oder Trägheit ab; da diese letztere durch die Form der Leitung bedingt ist, werden durch eine Spule auch verhältnismäßig kräftige und langsame Schwingungen nicht mehr hindurch kommen und statt dessen eine ev. vorhandene nicht zu lange Funkenstrecke vorziehen. In der Technik heißen solche Spulen *Drossel*spulen; sie sind ein bequemes Mittel, um einem Wechselstrom den Weg zu sperren, während er einem Gleichstrom offen bleiben soll. Bei genügend raschen und nicht zu kräftigen Schwingungen kann sogar eine geradlinige Leitung die Drosselwirkung ausüben; bei den Blitzplatten und Hörnerblitzableitern der elektrischen Fernleitungen wird hievon Gebrauch gemacht.

Auch wenn Schwingungen eine Leitung durchlaufen, liegen die Verhältnisse nicht so, wie bei einem Gleichstrom. Wir haben bis jetzt nur von dem magnetischen Feld eines einzelnen Elektrons oder bei einem Strom von dem gesprochen, das er nach außen um sich verbreitet; dieses Feld entsteht durch Summierung der Felder der einzelnen bewegten Elektronen und deren Feld beschränkt sich nicht auf den Außenraum, sondern ist auch in dem den Draht durchdringenden Äther vorhanden und jedes in ihm sich bewegende Elektron wird durch das Feld der andern Elektronen beeinflusst. Wir können diesen Einfluß aus den Überlegungen der §§ 7 und 8 herleiten, können uns aber auch auf die experimentell bekannte Tatsache stützen, daß ein anwachsender Strom in einer benachbarten parallelen Leitung einen entgegengesetzt gerichteten, ein abnehmender einen gleichgerichteten Induktionsstrom erzeugt. Für die Elektronen bedeutet dies, daß ein beschleunigtes Elektron durch sein Magnetfeld andere Elektronen in entgegengesetzter, ein verzögertes sie in gleicher Richtung in Bewegung zu setzen sucht. Treten also in der Stärke eines Stroms Schwankungen ein, so werden

sich alle Elektronen gegenseitig in der genannten Weise beeinflussen, jedes also bei den andern die Schwankungen zu verlangsamen streben, wie wenn ihre elektromagnetische Trägheit vergrößert würde. Naturgemäß macht sich dieser Einfluß am meisten geltend bei den in der Achse des Drahtes strömenden Elektronen, die allseitig und in Entfernungen höchstens gleich dem Radius des Querschnitts von andern Elektronen umgeben sind, während er umso mehr zurücktritt, je mehr man an die Oberfläche kommt, und an dieser selbst, wo Entfernungen bis zur Größe des Durchmessers vorkommen, am kleinsten ist. Eine Stromschwankung wird sich also nie auf den ganzen Querschnitt gleichmäßig verteilen, sondern nach der Achse des Drahts hin werden die Elektronen immer mehr nachhinken und bei raschen Wechsein kann es vorkommen, daß die innersten Elektronen das auf S. 46 geschilderte Verhalten zeigen und so an der Bewegung überhaupt nicht mehr teilnehmen. Der so stromlos bleibende Kern des Drahts wird umso dicker, je rascher die Wechsel, schließlich reduziert sich der Wechselstrom auf eine dünne „Stromhaut“ an der Oberfläche, falls er überhaupt noch durch die Leitung hindurchkommt. Die beiden besprochenen Erscheinungen zusammen haben zur Folge, daß man bei Wechselströmen nicht mehr mit dem gewöhnlichen Ohmschen Widerstand rechnen darf, er erscheint in einem mit zunehmender Schwingungszahl steigenden Maß vergrößert und bei der Drosselwirkung kann er als unendlich angesehen werden. Man gebraucht für den so vermehrten Widerstand den Ausdruck **Impedanz**. In dem Fall der „Stromhaut“ macht es den Eindruck, als ob die Schwingungen nur längs der Drähte gleiten würden, und man versteht damit die anfangs sehr auffallende Tatsache, daß das Material und der Querschnitt derselben in solchen Fällen keine Rolle mehr spielen.

§ 13. **Elektromagnetische Wellen.** Am Schluß von § 7 sind wir zu dem Resultat gekommen, daß ihre Geschwindigkeit und Richtung ändernde Elektronen elektromagnetische Störungen ausstrahlen. Elektrische Schwingungen, wie sie im vorigen Paragraphen geschildert wurden, bestehen in einem periodischen Hin- und Herschwanke von Elektronen, deren Geschwindigkeit ebenfalls periodisch wechselt. Wählen wir nämlich als Abszisse die Zeit, gerechnet von einem Augenblick, wo ein Elektron sich gerade in seiner Ruhelage*) befindet, als Ordinate seine Entfernung aus derselben, durch das Vorzeichen in üblicher Weise die Bewegungsrichtung zum Ausdruck bringend, so wird der einfachste Fall einer Schwingung durch die in Fig. 13 a (S. 48) gezeichnete Sinuskurve dargestellt und man erkennt Folgendes: in den durch die Punkte B, D, F, . . . bezeichneten Augenblicken kehrt das Elektron seine Bewegungsrichtung um und hat einen Moment die Geschwindigkeit Null, in den Augenblicken A, C, E, . . . dagegen verändert es seine Lage am raschesten, hat also

*) Da nach S. 35 ein ruhender Elektronenschwarm kein magnetisches Feld erzeugt, können wir, sowie es sich um ein solches handelt, von der Bewegung der Elektronen innerhalb des Schwarms absehen und brauchen nur seine Bewegung mit demselben zu berücksichtigen, dürfen also jedem Elektron eine Ruhelage zuschreiben.

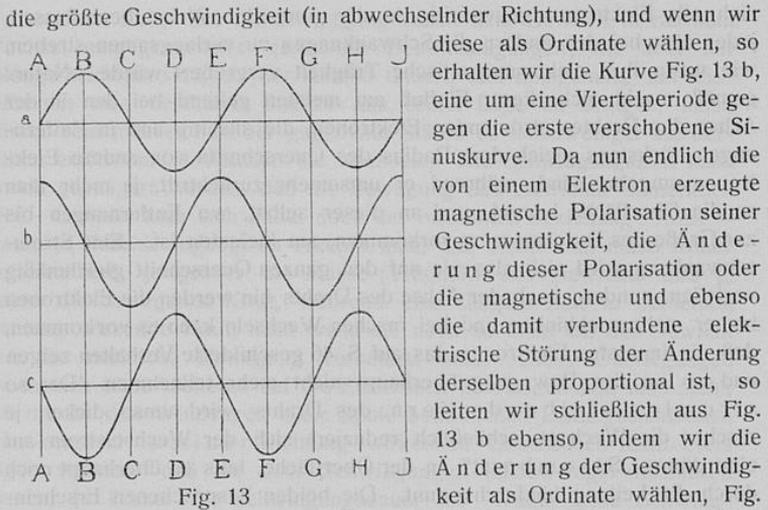


Fig. 13

die größte Geschwindigkeit (in abwechselnder Richtung), und wenn wir diese als Ordinate wählen, so erhalten wir die Kurve Fig. 13 b, eine um eine Viertelperiode gegen die erste verschobene Sinuskurve. Da nun endlich die von einem Elektron erzeugte magnetische Polarisation seiner Geschwindigkeit, die Änderung dieser Polarisation oder die magnetische und ebenso die damit verbundene elektrische Störung der Änderung derselben proportional ist, so leiten wir schließlich aus Fig. 13 b ebenso, indem wir die Änderung der Geschwindigkeit als Ordinate wählen, Fig. 13 c ab, wie wir aus 13 a 13 b ableiteten, und bekommen damit sofort auch die Darstellung der die Umgebung des Elektrons verlassenden Störungen, welche sich nach § 6 im Raum fortpflanzen. Da alle im Draht schwingenden Elektronen das gleiche Verhalten zeigen und magnetisch zusammenwirken (S. 23), so entstehen von allen Punkten des die Schwingung tragenden Drahts ausgehend im Raum (nach § 6 transversale) elektromagnetische Wellen, wie von den Punkten einer tönenden Stimmgabel Schallwellen sich verbreiten*); an jedem Punkt im Raum ändert so die elektrische und magnetische Kraft periodisch ihre Größe und Richtung im Rhythmus der Elektronenschwingung. Auch diese periodischen Änderungen werden häufig als elektrische und magnetische Schwingungen bezeichnet. Den experimentellen Nachweis ihres Vorhandenseins hat ebenfalls Hertz geführt, indem er zeigte, wie in einem an irgend eine Stelle des Raums gebrachten durch eine Funkenstrecke unterbrochenen geeigneten Leiter sofort auch Funken auftreten, wenn die die Wellen aussendende Schwingung in Gang gebracht wird: die periodischen Wechsel der elektrischen Kraft setzen in diesem Leiter die Leitungselektronen in Schwingungen, wie z. B. das periodisch wechselnde Feld zwischen den Belegungen der Leydener Flasche die Elektronen im Verbindungsdraht. Die Schwingungen finden auch ohne das Vorhandensein einer Funkenstrecke statt, sie werden nur durch das Auftreten der Funken wahrnehmbar gemacht; im Cohärer besitzen wir bekanntlich z. Z. ein bequemerer Mittel zu diesem Zweck. Indem Hertz durch Reflexion der Wellen an einer Metallwand stehende Wellen erzeugte, ihre Knoten, d. h. die Stellen, an denen die elektrische Kraft dauernd Null bleibt,

*) Bezüglich der Beschreibung der Art und Weise, wie irgend eine Schwingung im Raum fortschreitet und so die Wellen bildet, kann auf jedes Schullehrbuch der Physik verwiesen werden; dort findet man auch die gleich nachher zu erwähnenden stehenden Wellen beschrieben und gezeigt, wie diese zur Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schwingung verwendet werden können.

mit Hilfe seiner beweglichen Funkenstrecke aufsuchte und die Schwingungsdauer der die Wellen erzeugenden Schwingung theoretisch berechnete, war er imstande, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit zu messen und fand sie so gleich der Lichtgeschwindigkeit. Mit diesen Beobachtungen hat Hertz die am Schluß von § 6 versprochene experimentelle Bestätigung der dort gezogenen Schlüsse geliefert; für eine einzelne Störung wäre dies nicht möglich, eine solche geht zu rasch vorüber, als daß sie einen gut und sicher erkennbaren Effekt hervorbringen könnte, und die unmittelbare Messung ihrer Geschwindigkeit wäre bei dem großen Wert dieser letzteren so wenig möglich wie beim Licht. Wenn man erstmals von den Hertzschen Versuchen hört, neigt man leicht zu der Meinung, als ob es sich bei ihnen gegenüber den elektrostatischen und Induktionserscheinungen um etwas ganz Neues handele. Die Auseinandersetzungen hier und in § 6 haben wohl gezeigt, daß dies irrig wäre; während wir in der Elektrostatik das elektrische Feld als gegeben hinnehmen, ohne nach seiner Entstehung zu fragen, haben wir bei den Induktionserscheinungen das erste allerdings zunächst noch unverstandene Beispiel für den Vorgang seiner Ausbreitung und seinen Zusammenhang mit den magnetischen Erscheinungen, und die elektromagnetischen Wellen bringen uns das volle Verständnis dieses Vorgangs und setzen uns instand, denselben messend zu verfolgen. Das Neue an den Hertzschen Versuchen, das, was ihre Berühmtheit und ihre Bedeutung für alle Zeiten bedingt, ist der Nachweis der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektrischen und magnetischen Störungen, womit der alten Fernwirkungsvorstellung endgültig der Boden entzogen ist.

Der von Hertz gefundene Wert für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen gilt nur für den leeren Raum; für Isolatoren wird er dagegen durch die Verschiebungsströme merklich herabgesetzt*). Denken wir uns zunächst wieder eine einzige Störung sich ausbreitend, so wird an jeder Stelle die Veränderung der elektrischen Kraft eine Bewegung der Verschiebungselektronen herbeiführen; denn nach S. 42 ist die Größe der Verschiebung der elektrischen Kraft proportional, muß also zu- oder abnehmen, je nachdem dies bei der Kraft der Fall ist. Auf S. 21 haben wir den Mechanismus des Fortschreitens einer elektromagnetischen Welle verfolgt; stellte in Fig. 5 P eine senkrecht zur Ebene der Zeichnung nach vorn gerichtete elektrische Kraft im Wachsen begriffen dar, so war E die von ihr erzeugte magnetische Kraft, die dann ihrerseits wieder die elektrischen Krafttringe PQ, PQ', . . . erzeugte, wodurch das Anwachsen der Kraft in P verzögert, ev. sogar rückgängig gemacht wurde, während sie andererseits an den Stellen Q, Q', . . . zum Vorschein kam. Diese Verzögerung ist der Grund, warum die Ausbreitung der Störung nicht unendlich schnell geschieht, sondern eine gewisse, wenn auch nur kurze Zeit bedarf. Befindet sich nun am Ort von P noch ein Verschiebungselektron, so

*) Bei Gasen ist wegen ihrer geringen Dichte, also weil sie im ganzen relativ wenig Verschiebungselektronen enthalten, die Verminderung der Geschwindigkeit nicht nennenswert.

wird dies gleichzeitig mit dem Wachsen der Kraft in P senkrecht zur Ebene der Zeichnung verschoben und zwar, weil negativ elektrisch, nach hinten und verstärkt durch seine magnetische Wirkung (vgl. S. 43) E und damit die dadurch hervorgerufenen elektrischen Kraft-*r*inge P Q, P Q', . . . , erhöht also die Verzögerung für das Anwachsen der Kraft in P; hiemit ist aber eben die Verzögerung der Ausbreitungsgeschwindigkeit durch die im Isolator entstehenden Verschiebungsströme gegeben. Mit Rücksicht auf die Ausführungen auf S. 25 kann man auch sagen, daß die Ursache der Verlangsamung die elektromagnetische Trägheit der Verschiebungselektronen sei. Im übrigen gilt auch hier die Bemerkung der Anm. 1 auf S. 22, und aus den Maxwellschen Gleichungen ergibt sich, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in einem Isolator gleich ist dem Quotienten aus der Lichtgeschwindigkeit und der Quadratwurzel aus der Dielektrizitätskonstanten desselben. Je leichter sich die Elektronen verschieben lassen, in desto höherem Maß muß sich der beschriebene Einfluß geltend machen. In Metallen, bei denen statt der Verschiebungselektronen die frei beweglichen Leitungselektronen in den Vordergrund treten, muß also die Geschwindigkeit am geringsten sein; doch wird dies dadurch verdeckt, daß in diesen eine solche Störungswelle einer sehr starken Absorption anheimfallen muß (vgl. S. 55). — Was wir bezüglich der Fortpflanzung einer einzelnen elektromagnetischen Störung gefunden haben, gilt auch für die Ausbreitung elektromagnetischer Schwingungen, insbesondere darf erwartet werden, daß jede Art elektromagnetischer Wellen von Leitern kräftig absorbiert wird. Indessen kann sich noch ein weiterer Umstand geltend machen, von dem im nächsten Paragraphen die Rede sein wird.

§ 14. **Das Licht.** Die optischen Polarisationserscheinungen lassen keinen Zweifel darüber, daß die Lichtschwingungen transversal sind; andererseits sind transversale Schwingungsbewegungen nur in festen Medien denkbar. Da der Äther jedenfalls nicht als fester Stoff anzusehen ist, kann eben das Licht auch' nicht in Schwingungsbewegungen sich fortpflanzen. Die Antwort auf die Frage: Was dann? gibt die elektromagnetische Lichttheorie, d. h. die Annahme, daß auch die Lichtwellen im Raum elektromagnetische Wellen der in § 13 beschriebenen Art sind; daß wir nur eine ganz bestimmte Sorte von elektromagnetischen Wellen als Licht wahrnehmen, liegt an der Organisation unseres Augs, das nur für bestimmte Schwingungsdauern oder Wellenlängen empfindlich ist. Die Hertzschen und andere durch elektrische Vorgänge im gewöhnlichen Sinn herstellbare Schwingungen*) sind für das Auge viel zu langsam, sofern die Schwingungsdauer der ersteren ca 10^{-8} Sekunden beträgt, die der optischen dagegen zwischen 10^{-14} und 10^{-15} Sekunden liegt. Die erste Andeutung eines Zusammen-

*) Sie sollen als elektromagnetische Schwingungen „i. e. S.“ bezeichnet werden, wenn es nötig wird, sie den Schwingungen der dunklen Wärmestrahlung, des Lichts, der ultravioletten Strahlen gegenüber zu stellen; alles zusammen nennen wir elektromagnetische Schwingungen „i. w. S.“

hangs zwischen Licht und Elektrizität fand Maxwell in der Tatsache, daß das Verhältnis zwischen der elektromagnetischen und der elektrostatischen Einheit der Elektrizitätsmenge gleich der Lichtgeschwindigkeit ist. Die Hertz'schen Untersuchungen haben die Vermutungen Maxwells bestätigt, sofern sie vor allem hinsichtlich der Fortpflanzungsgeschwindigkeit Gleichheit zwischen Licht und elektromagnetischen Wellen ergaben, und seitdem ist noch eine Reihe direkter Zusammenhänge zwischen beiden Gebieten gefunden worden, die auch die letzten Zweifel beseitigt haben. Die weitere Konsequenz dieser Anschauung ist nun aber die, daß auch die Vorgänge in einer Lichtquelle, soweit sie die Lichtausstrahlung bedingen, elektrischer Natur sein müssen. Eine unmittelbare Bestätigung dafür liefert die Entdeckung Zeemans, der sog. Zeemaneffekt, der darin besteht, daß durch Einwirkung eines magnetischen Felds auf eine Lichtquelle das von ihr ausgestrahlte Licht modifiziert wird, und dessen theoretische Untersuchung zu dem weiteren Schluß führt, daß der Ursprung des Lichts in Elektronenschwingungen zu suchen ist. Gewisse Beobachtungen an den Kanalstrahlen weisen darauf hin, daß dabei nicht an die von den Atomen abtrennbaren Valenzelektronen, sondern an die in den Atomresten, unsern positiven Ionen, enthaltenen Verschiebungselektronen zu denken ist. Unter Umständen sollen allerdings auch die Valenzelektronen in Betracht kommen, dann nämlich, wenn die sog. Bandenspektren auftreten*). Die bekannte Tatsache, daß wir das Leuchten im allgemeinen durch Temperaturerhöhung hervorbringen, zeigt, daß in die die Wärme ausmachenden Bewegungen auch die Schwingungen dieser Elektronen mit einbegriffen sind (vgl. S. 34); zunächst strahlen sie nur „dunkle Wärme“ aus, geht aber bei einer Temperaturerhöhung ihre Schwingungsdauer in die obengenannten Grenzen herunter, so findet die Einwirkung aufs Auge statt. Mit den bisherigen Bemerkungen ist im wesentlichen das erschöpft, was sich mit einiger Sicherheit sagen läßt; über den Charakter der Schwingungen und die bei ihnen beteiligten Kräfte im einzelnen bestehen noch manche Zweifel. Gerade das Studium des Zeemaneffekts bringt eine Reihe von Fragen, damit aber auch die Möglichkeit, tiefer in das Problem einzudringen. Trotz der noch bestehenden Unsicherheiten können wir uns jedenfalls folgendes Bild machen. Ein Verschiebungselektron besitzt, wie auf S. 41 bemerkt, eine gewisse Gleichgewichtslage am Atom; wie ein aus seiner Lage gebrachtes und losgelassenes Pendel diese in Form von Schwingungen wieder zu erreichen sucht, so ein Elektron, das unter dem Einfluß der Wärmeenergie in Bewegung geraten ist und immer wieder aufs neue in Bewegung gerät**). Daß nun solche elektrische Schwingungen im Raum elektro-

*) Stark, J. 4, S. 231 ff, 1907. Bandenspektren, wie z. B. der in einer Geißler'schen Röhre zum Leuchten gebrachte Stickstoff eines liefert, enthalten regelmäßige, in besonderer Art angeordnete Liniengruppen.

**) Man kann mit Rücksicht auf S. 26, ev. auch auf die Erklärung des Magnetismus des Eisens auf S. 24 auch an kreisförmige Schwingungen der Elektronen denken, die ja ebenfalls periodischer Natur sind und, wie unschwer zu zeigen, nach außen wie eine geradlinige harmonische Schwingung wirken müssen.

magnetische Wellen vom Rhythmus der Schwingungen hervorrufen, haben wir in § 13 gesehen*), und daß diese Wellen tatsächlich transversal sind, hat sich bereits S. 22 gezeigt.

Am Schluß von § 13 wurde angedeutet, daß die dortigen Ausführungen unter Umständen noch Ergänzungen erfordern, und dies trifft eben für die Lichtschwingungen zu; denn einem Punkt wurde dort nicht Rechnung getragen, es ergab sich für alle Schwingungsdauern dieselbe Fortpflanzungsgeschwindigkeit, was mit der Dispersion des Lichts nicht im Einklang steht. Der leere Raum zeigt eine solche allerdings nicht, für alle Farben ist in ihm die Geschwindigkeit dieselbe; auch in materiellen Medien tritt die Dispersion nur beim Licht und der Wärmestrahlung auf, nicht aber bei den langsameren elektromagnetischen Wellen i. e. S., bei denen sich keine Abhängigkeit der Geschwindigkeit von Schwingungsdauer oder Wellenlänge zeigt. Es sind also bis jetzt offenbar Vorgänge unberücksichtigt geblieben, welche bloß in materiellen Medien möglich und auch in diesen erst bei sehr raschen Schwingungen von Einfluß sind. Eine Kirchenglocke kann nur so geläutet werden, daß der Rhythmus, mit dem am Seil gezogen wird, der Schwingungsdauer der Glocke entspricht; andernfalls stören die Züge am Seil die Schwingungen der Glocke. Eine Stimmgabel kann nur dann durch eine ankommende Schallwelle zu kräftigem Tönen gebracht werden, wenn diese zum Eigenton der Stimmgabel paßt; je weiter beide differieren, desto schwächer erklingt erstere. Die Verschiebungselektronen besitzen eine durch den Bau des Atoms bestimmte Eigenschwingung; hat die den Körper durchlaufende elektromagnetische Welle dieselbe Schwingungsdauer, befindet sie sich in **Resonanz**)** mit den Elektronen, so werden diese zu lebhaftem Mitschwingen angeregt, je mehr dagegen die Schwingungsdauern voneinander abweichen, mit desto geringerer Amplitude beteiligen sie sich an den Schwingungen. Obgleich also die Beweglichkeit der Verschiebungselektronen an sich durch die Struktur des Atoms gegeben ist, nimmt doch das Mass, in dem sie nun wirklich in Bewegung kommen, zu, je mehr man sich dem Fall der Resonanz nähert; nach S. 50 bedeutet dies aber, daß der verzögernde Einfluss auf die Ausbreitung der Wellen in gleicher Weise zunimmt, dass also die Geschwindigkeit derselben von ihrer Schwingungsdauer oder Wellenlänge abhängt, und so ist die Möglichkeit der Dispersion gegeben. In Glas, Wasser und andern farblosen Medien nimmt die Lichtgeschwindigkeit von Rot nach Violett stetig ab, wie die Messung der Brechungsexponenten zeigt; Violett liegt also der Resonanz mit den Verschiebungselektronen dieser Medien näher als Rot, daher muß die Schwingungsdauer dieser Verschiebungselektronen gleich der einer

*) Um einem möglichen Missverständnis zu begegnen, sei ausdrücklich hervorgehoben, daß die zu Anfang dieses Paragraphen erwähnten Gründe gegen die Vorstellung, daß sich das Licht in Schwingungsbewegungen ausbreite, für die Schwingungen der das Licht hervorbringenden Elektronen keine Bedeutung haben.

***) Der Gebrauch dieses an sich akustischen Ausdrucks wird für das Verständnis keine Schwierigkeit machen.

Lichtart im ultravioletten Gebiet*) sein. Schreitet man umgekehrt in der Richtung Violett-Rot, d. h. in der zunehmender Schwingungsdauern und Wellenlängen fort, so wird die Resonanz immer schwächer; man findet ihren Einfluß ja wohl noch weit im Ultrarot, aber bei den langen elektromagnetischen Schwingungen i. e. S. ist er unmerklich geworden, es handelt sich nur noch um die einfache Beweglichkeit der Elektronen, wie sie bei einer nichtperiodischen Störung vorliegt, und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist auf den Wert gestiegen, den wir in § 13 im Auge hatten. Nicht ganz so einfach ist die Sache, wenn es sich gerade um die Spektralgebiete handelt, innerhalb deren die Schwingungsdauern der Verschiebungselektronen liegen. Zunächst sollte man erwarten, daß für diejenige Welle, deren Schwingungsdauer der der Verschiebungselektronen gleich ist, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ein Minimum wäre; indessen ist zu bedenken, daß in der Regel Verschiebungselektronen verschiedener Schwingungsdauern**) in Betracht kommen, wodurch die Abhängigkeit der Geschwindigkeit einer Welle von ihrer Schwingungsdauer komplizierter wird. Genaueres läßt sich nur auf Grund von Berechnungen sagen; aber soviel ist sicher, daß die Veränderlichkeit der Geschwindigkeit, der „Gang“ der Dispersion in solchen Gebieten von dem einfachen Verlauf abweicht, wie man ihn für

das sichtbare Licht in farblosen Stoffen beobachtet und als das Normale anzusehen sich gewöhnt hat. Man nennt daher solche Gebiete Gebiete der anomalen Dispersion. Der Verlauf des Brechungsexponenten in einem solchen Fall wird durch die ausgezogene Kurve in Fig. 14 ungefähr dargestellt, während die gestrichelte Kurve den normalen Gang andeutet. — Auch die Metalle zeigen die Dispersion;

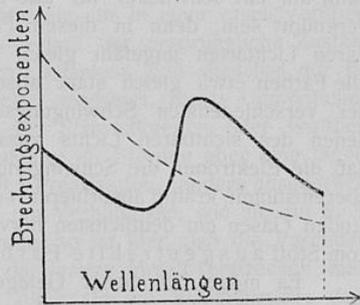


Fig. 14

dies ist der Grund, weshalb, wie schon mehrfach hervorgehoben, auch bei ihnen neben den Leitungselektronen Verschiebungselektronen vorhanden sein müssen. Bei nichtperiodischen elektromagnetischen Störungen und bei den verhältnismäßig langsamen elektromagnetischen Schwingungen i. e. S. tritt aber ihr Einfluß gegenüber dem der ersteren vollständig zurück, erst wenn Resonanz in Frage kommt, wie bei Lichtschwingungen, macht er sich geltend.

*) Im Grunde ist es nicht richtig, von ultraviolettem und ultrarotem „Licht“ zu sprechen, da ja in diesen Gebieten die Einwirkung aufs Auge fehlt, man müßte in solchem Fall vielmehr nur von elektromagnetischen Wellen sprechen; aber der Ausdruck Licht ist bequemer.

**) Es wäre eine unbegründete Annahme, daß alle Verschiebungselektronen eines Atoms in derselben Weise an ihre Gleichgewichtslage innerhalb desselben gebunden wären, also alle dieselbe Schwingungsdauer zeigen müßten (dagegen sind natürlich alle Atome eines homogenen Stoffes als gleichartig anzusehen). Es war also nicht ganz exakt, wenn bei den farblosen Stoffen nur an eine einzige Schwingungsdauer gedacht wurde; wenn diese aber, wie es bei ihnen tatsächlich zutrifft, Lichtarten weit im Ultraviolett entsprechen, so zeigt die Rechnung, daß man den Einfluß dieser Elektronen in Eins zusammenfassen kann.

Die Gebiete anomaler Dispersion zeichnen sich aber auch noch durch eine starke Absorption der betreffenden Wellen aus. Die Schwingungen der Verschiebungselektronen sind gedämpft, ihre Amplitude muß abnehmen sowohl infolge der vom Elektron selbst wieder ausgestrahlten elektromagnetischen Energie als auch infolge von Widerständen, die es bei seiner Bewegung im Atom findet*). Die zur Überwindung dieser Widerstände dienende, die Schwingung immer wieder aufs neue belebende Energie wird der das Medium durchlaufenden Welle entnommen, und wenn sie auch in Wärme oder anderen Energieformen wieder erscheint, geht sie doch jedenfalls der Welle verloren. Je ausgeprägter die Resonanz, je kräftiger das Mitschwingen der Elektronen, desto größer der Energieverlust. Lassen wir also Wellen verschiedener Schwingungsdauern nach einander oder gleichzeitig (wie z. B. bei weißem Licht) durch das Medium hindurch gehen, so müssen alle diejenigen Schwingungen (Farben), welche mit solchen von Verschiebungselektronen übereinstimmen, stark absorbiert werden, während bei den andern die Absorption demgegenüber unmerklich sein kann**). Stoffe mit anomaler Dispersion müssen also stets entsprechende Färbung zeigen; normale Dispersion wie bei Glas und Wasser dagegen kann nur mit schwacher für alle Farben ungefähr gleicher Absorption verknüpft sein, denn in diesem Fall ist die Resonanz für alle sichtbaren Lichtarten ungefähr gleich schlecht. Stoffe, welche, wie Holz, alle Farben etwa gleich stark absorbieren, müssen dagegen Elektronen der verschiedensten Schwingungsdauern besitzen, deren Werte mit denen des sichtbaren Lichts zusammenfallen. Bedenkt man endlich, daß die Elektronen die Schwingungsart, die mit ihrer Eigenschwingung übereinstimmt, kräftig absorbieren, so versteht man die bekannte, bei leuchtenden Gasen am deutlichsten hervortretende Tatsache, daß gerade die vom Stoff ausgestrahlte Farbe auch von ihm absorbiert wird.

Es möge bei dieser Gelegenheit ein Blick auf die Absorptionsverhältnisse elektromagnetischer Wellen im allgemeinen geworfen werden. Absorption muß aus den bereits genannten Gründen stets eintreten, wenn die den Körper durchlaufende Störung Elektronen in Bewegung setzt, fehlt also nur im leeren Raum. Die bewegungsfähigen Elektronen sind die Leitungs- und die Verschiebungselektronen, die sich einmal voneinander unterscheiden durch das Mass ihrer Beweglichkeit und dann durch den Umstand, daß letztere, weil an bestimmte Lagen gebunden, Eigenschwingungen auszuführen vermögen, erstere dagegen nicht. Der zweite Unterschied kommt nur in Frage, wenn es sich um die Möglichkeit der Resonanz, also um Lichtschwingungen handelt; auf diese Weise können die Verschiebungselektronen eine massgebende Bedeutung wie für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Störung so auch für die Absorption gewinnen, während sie sonst einen wesentlich geringeren Einfluß aus-

*) Hiernach müssen auch einzelne elektromagnetische Störungen und elektromagnetische Wellen i. e. S. auch in Isolatoren eine schwache Absorption erfahren.

***) Für den Grad der Absorption und ihr Übergreifen auf Schwingungen schwächerer Resonanz ist die Stärke der Dämpfung maßgebend.

üben als die beweglicheren Leitungselektronen. Bezüglich der Isolatoren braucht also zu dem Gesagten bloß noch hinzugefügt zu werden, dass langsame (periodische oder nichtperiodische) Störungen in ihnen eine nur geringe Absorption erfahren können; ihr Verhalten gegen Hertz'sche Wellen stimmt damit überein. In Metallen dagegen können bereits langsame Störungen nicht mehr tief eindringen, es macht sich aber bei ihnen auch schon ein Einfluß der Änderungsgeschwindigkeit (also bei periodischen Störungen ein Einfluss der Schwingungsdauer) geltend: je rascher die Veränderung erfolgt, desto stärker ist die Absorption. Die Mitbewegung von Leitungselektronen bedeutet nämlich das Entstehen von Strömen, deren Stärke analog dem auf S. 16 in Gleichung (2) zum Ausdruck gebrachten Zusammenhang umso größer sein muß, je rascher die Veränderung, also die Geschwindigkeit der sich bewegenden Elektronen ist; die Stromstärke aber bedingt nach dem Jouleschen Gesetz das Maß der Wärmeentwicklung, also der Absorption. Das Verhalten der Metalle gegen optische Schwingungen ist eine Kombination dieser Verhältnisse mit den bei der anomalen Dispersion bereits geschilderten, wodurch bestimmte Schwingungsdauern sowohl hinsichtlich der Geschwindigkeit als der Absorption eine besondere Betonung erfahren. Es wird nicht überflüssig sein, noch auf folgendes hinzuweisen. Ist die Störung periodisch oder besteht sie nur in einer rasch vorübergehenden Veränderung, nach deren Verlauf der ursprüngliche Zustand sich wieder einstellt, so liegt in dem Gedanken, daß dieselbe nur bis zu einer gewissen Tiefe, in das Metall eindringt, nichts Unmögliches, die tieferen Schichten bleiben von den Schwankungen oder vorübergehenden Änderungen unberührt; bedeutet die Störung aber eine länger dauernde Veränderung der elektrischen Polarisation, anders ausgedrückt des Potentials, handelt es sich also um Verhältnisse, wie sie auf S. 32 oder S. 17, Anm. 1 besprochen wurden, so ist klar, daß die Veränderung trotz der Absorption sich auf das ganze Metall erstrecken muß. Das erscheint bloß auf den ersten Blick als ein Widerspruch; denn wenn auch die Störung bei ihrem ersten Vordringen in einer gewissen Tiefe sozusagen stecken bleibt, so drängt sie immer wieder aufs neue nach, schiebt sich also trotzdem unaufhaltsam vorwärts, bis schließlich der uns bereits bekannte Endzustand im ganzen Metall erreicht ist. Die Zeit, die darüber vergeht, ist größer, als wenn sich die Störung ohne Absorption über das Metall verbreiten würde, sie ist aber trotzdem noch außerordentlich klein und kommt bloß bei großen Längen, z. B. beim Telegraphieren auf überseeischen Leitungen, in Betracht. In diesen Überlegungen ist auch die Erklärung für den Wert von leitenden Verbindungen gegenüber einem „drahtlosen“ Verkehr enthalten.

Endlich noch ein Wort über die Theorie der Röntgenstrahlung, die allerdings noch keineswegs als durchaus sichergestellt angesehen werden darf, da sie verschiedene Erscheinungen jedenfalls in ihrer jetzigen Form noch nicht zu erklären vermag. Röntgenstrahlen entstehen erfahrungsgemäß durch das Auftreffen der Kathodenstrahlen auf feste Körper. Nach S. 26 muß jedes in diesen Strahlen bewegte Elektron

bei seinem Aufprallen eine elektromagnetische Störungswelle aussenden, eine ganze Folge von aufprallenden Elektronen also eine Folge von solchen Störungen, welche zwar den bisher betrachteten elektromagnetischen Wellen gleicht, aber doch keine im strengen Sinn regelmäßige Schwingung darstellt. Was einer Schwingungsdauer entspricht, ist die Zeit, über welche sich der Verzögerungsvorgang des einzelnen Elektrons erstreckt; sie wird zwar für alle ungefähr, aber doch nicht genau dieselbe sein. Nach dieser Auffassung kann man die Röntgenstrahlen bezeichnen als eine rasche Folge kurzer elektromagnetischer Stöße, die im großen ganzen den Charakter einer gewöhnlichen elektromagnetischen Welle hat; statt Schwingungsdauer wollen wir aber hier Stoßzeit sagen. Diese ist umso kleiner, je rascher die Kathodenstrahlen sind, denn umso kürzer dauert der Verzögerungsvorgang; schon bei den gewöhnlichen Crookeschen Röhren liegt sie beträchtlich unterhalb der Schwingungsdauer des ultravioletten Lichts, ja sogar unter der der Verschiebungselektronen überhaupt. Infolgedessen kann die Resonanz nur noch äußerst schwach sein, die Verschiebungselektronen kommen überhaupt kaum mehr in Bewegung, wie auch ein Pendel sehr raschen Zuckungen gegenüber fast unbeweglich ist; das Medium verhält sich also fast so, als enthielte es überhaupt keine beweglichen Elektronen. Dann kann es aber auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit nicht merklich beeinflussen und keine starke Absorption zeigen. In der Tat werden die Röntgenstrahlen nicht merklich gebrochen, haben also in allen Isolatoren nahe dieselbe Geschwindigkeit wie im leeren Raum. Ihre große Durchdringungsfähigkeit ist bekannt und ebenso, daß sie umso größer ist, je geringer der Gasdruck in der Röhre, je rascher also die Kathodenstrahlen, je kürzer daher die Stoßzeit der Röntgenstrahlen (weiche und harte Röhren). Selbst in Metallen ist die Absorption beträchtlich geringer als für gewöhnliches Licht, besonders bei den γ -Strahlen des Radiums, die nach obiger Theorie durch die außerordentlich raschen β -Strahlen hervorgebracht werden und noch Bleiplatten bis zu 10 cm Dicke durchdringen. Infolge ihrer Trägheit vermögen aus den auf S. 46 f. geschilderten Gründen auch die Leitungselektronen diesen raschen Wechseln nur noch mangelhaft zu folgen. (Die Schwingungen, die wir dort im Auge hatten, sind noch langsamer sogar als die Lichtschwingungen, bei denen sich doch die Trägheit der Leitungselektronen noch kaum geltend macht; es ist aber daran zu erinnern, daß die elektromagnetische Trägheit von der Form der Leitung abhängt, also bei einer Spule sehr wohl schon für relativ langsame Schwingungen zu groß, in andern Fällen dagegen noch nicht einmal für Lichtschwingungen wesentlich sein kann).

IV. Elektrische Erscheinungen in Gasen.

§ 15. **Der unselbständige Gasstrom.** In § 3 haben wir die Ionisierung eines Gases durch Röntgenstrahlen kennen gelernt; auch ultraviolettes Licht, Becquerelstrahlen, glühende Metalle und

glühende Kohle wirken in dieser Weise, und endlich erweisen sich Flammengase in hohem Mass leitend. Die Ionisierung durch elektromagnetische Strahlung (ultraviolettes Licht, Röntgenstrahlen, γ -Strahlen der radioaktiven Stoffe) ist wohl so zu deuten, daß durch dieselbe Schwingungen der Valenzelektronen resonanzartig verstärkt werden, bis das Elektron sich vom Atom losreißt; ähnlich wirkt die Steigerung der Wärmebewegung, wie sie in erhitzten Gasen (Flammgasen) vorliegt. Die auf S. 35 f. erwähnte Theorie von Stark macht es verständlich, warum die Abtrennung eines Valenzelektrons von einem Gasmolekül nicht den Zerfall desselben zur Folge zu haben braucht (vgl. S. 6, Anm.). Bei der Ionisation durch glühende Drähte und Kohle dagegen handelt es sich um den bereits auf S. 36 erwähnten Vorgang, wodurch Elektronen in das Gas kommen, die durch Zusammenlagern mit neutralen Gasmolekülen sofort Ionen bilden. Statt durch Temperaturerhöhung kann man die Elektronenabgabe auch durch Bestrahlen mit Licht von kleiner Schwingungsdauer (ultraviolettes Licht, Röntgenstrahlen) erreichen; hiedurch werden die bestrahlten Körper selbst positiv elektrisch bez. verlieren negative Ladungen. Die Erscheinung ist unter dem Namen photoelektrischer oder Hallwachseffekt bekannt; die Leitungselektronen werden von der Strahlung zum Mitschwingen angeregt und erhalten auf diese Weise statt durch Temperaturerhöhung die zum Verlassen des Metalls erforderliche kinetische Energie. Gleichzeitig findet natürlich auch die direkte Ionisation des Gases durch die Strahlung statt. — Auf die im Gas gebildeten Elektronen, welche bei nicht zu starker Verdünnung nur kurze Zeit frei bleiben, und auf die (positiven und aus den Elektronen entstandenen negativen) Ionen wenden wir natürlich die Vorstellungen der kinetischen Gastheorie an und verstehen so, ganz abgesehen von der gegenseitigen Anziehung zwischen positiven und negativen Teilchen, daß diese auch wieder zusammentreffen und sich zu neutralen Molekülen vereinigen können. Dieser als Rekombination bezeichnete Vorgang hat das schon in § 3 erwähnte allmähliche Wiederverschwinden der Leitfähigkeit eines sich selbst überlassenen ionisierten Gases zur Folge und führt bei einer Fortdauer der Ionisation zu einem Gleichgewichtszustand, in dem in gleichen Zeiten ebensoviele Ionen wieder verschwinden, als erzeugt werden.

Man beachte, daß der Zustand eines ionisierten Gases ganz dem eines in Wasser gelösten Elektrolyten gleicht; nur ist bei letzteren die Beweglichkeit der Ionen infolge der großen Widerstände auf ein Minimum herabgesetzt, sodaß die Rekombination keine Rolle spielt, ihre Zahl im Kubikzentimeter dagegen ist ungleich viel größer als bei Gasen. Führt man in das ionisierte Gas zwei mit den Polen einer Batterie verbundene Elektroden ein (oder ionisiert man das Gas nachträglich), so muß eine Strömung stattfinden, die in wesentlichen Punkten der im Elektrolyten gleicht und deren Stärke wie bei diesen durch Einschaltung eines Galvanometers in die Zuleitung gemessen

werden kann. Das Galvanometer muß sehr empfindlich sein, denn trotz der großen Beweglichkeit der Gasionen ist wegen ihrer geringen Zahl die Stromstärke sehr klein und häufig bedarf man zu ihrer Messung anderer Hilfsmittel; „man muß sich den Strom in einem flüssigen Elektrolyten wie einen sich langsam dahinwäzenden Strom ungeheuer vieler Teilchen, den Strom in Gasen wie eine kleine Anzahl schnell dahinfliegender Teilchen vorstellen“ (St. S. 528). Von weiteren Unterschieden sollen noch zwei hervorgehoben werden. Während der elektrolytische Strom mit einer chemischen Zersetzung verknüpft ist, braucht dies, da die Gasionisation nicht notwendig eine chemische Zerlegung des Gases zur Folge hat (s. S. 57), beim Gasstrom nicht der Fall zu sein. Ferner ist zwar die Geschwindigkeit der bewegten Ionen aus analogen Gründen wie S. 17 der Feldstärke proportional, man sollte also auch für den Gasstrom die Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes erwarten. Bedenkt man aber, daß die Ionen durch den Strom rasch aus dem Gasraum an die Elektroden geführt und dort neutralisiert werden, daß Rekombination und Diffusion derselben ebenfalls ihre Zahl herabsetzen und daß alle Ionisatoren verhältnismäßig langsam wirken, so erkennt man, daß die auf S. 16 ausdrücklich betonte Konstanz von N in Gleichung (1) hier nicht vorausgesetzt werden kann, und damit fällt das Ohmsche Gesetz. Die genauere Untersuchung aller genannten Einflüsse durch Rechnung zeigt, daß es für schwache Ströme noch gilt, daß aber die Stromstärke bald langsamer als die Feldstärke wächst und einem Maximum zustrebt, dem sog. Sättigungsstrom. Die elektrolytische Dissoziation ist zwar, da sie umkehrbar ist, sich also stets Gleichgewicht zwischen dissoziiertem und nicht dissoziiertem Teil herstellt, auch keine vollständige, schreitet vielmehr erst nach Maßgabe des durch den Strom bedingten Ionenverbrauchs fort; aber bei der schon oben erwähnten Langsamkeit der Bewegung geht dieser Verbrauch ebenfalls langsam vor sich, die Dissoziation vermag mit ihm stets Schritt zu halten und erst, wenn die Konzentration des Elektrolyten durch die Elektrolyse merklich herabgesetzt ist, kann von einer merkbaren Veränderung der Ionenzahl die Rede sein. Sofern es in der Regel gar nicht soweit kommt, gilt bei Elektrolyten das Ohmsche Gesetz wie bei Metallen (vgl. dazu S. 18).

In der Überschrift des Paragraphen wurde die besprochene Strömung als unselbständig bezeichnet. Sie ist dies insofern, als sie eine anderweitige Ionisation des Gases zur Voraussetzung hat, während im folgenden Paragraphen von Gasströmen die Rede sein wird, bei denen die Ionen durch den Strom selbst immer wieder neu erzeugt werden, die daher selbständig heißen. Ströme in Metallen und Elektrolyten sind in diesem Sinn unselbständig und haben mit dem unselbständigen Gasstrom gemeinsam, daß das schwächste Feld zu ihrer Entstehung genügt. Der zu Anfang von § 3 erwähnte Ladungsverlust eines geladenen Elektroskops ist Folge eines unselbständigen Stroms, der durch die stets vorhandene geringe Ionisation der Luft infolge des Gehalts der Erde an radioaktiven Stoffen ermöglicht wird.

Man spricht in solchen Fällen allmählicher Entladung auch von einer „Zerstreuung der Elektrizität“. Ebenso sind natürlich die in § 3 weiter genannten rascheren Entladungen infolge stärkerer Jonisation zu deuten.

§ 16. **Der selbständige Gasstrom.** Springt irgendwo ein elektrischer Funke über, bildet sich zwischen den Kohlen der Bogenlampe der Lichtbogen, geht die Entladung durch eine Geißlerische Röhre, so handelt es sich zweifellos um einen Gasstrom und, da derselbe ohne anderweitige Hilfe nur durch das zwischen den Elektroden (Elektrode, Anode, Kathode in derselben Bedeutung wie bei den Elektrolyten gebraucht) bestehende elektrische Feld hervorgebracht wird, um seine selbständige Form. Die Theorie derselben darf zwar in ihren Fundamenten als sichergestellt gelten, eine auf die Einzelheiten eingehende, alle Fälle umfassende Darstellung hat aber noch vielfach unter Unklarheiten zu leiden, und so muß sich eine Abhandlung wie die vorliegende auf eine Entwicklung der Grundzüge beschränken; die Vorgänge in einer Geißlerischen Röhre eignen sich wegen ihrer relativen Übersichtlichkeit am besten hiezu. Die Leuchterscheinung in derselben zerfällt bekanntlich in mehrere Teile: an die Anode schließt sich die je nach den Verhältnissen geschichtete oder ungeschichtete positive Säule an, auf sie folgt ein deutlich hervortretender dunkler Raum, der sog. Faradaysche Dunkelraum, und auf ihn das negative Licht, welches durch den schmalen, nicht immer leicht zu erkennenden Crookesschen Dunkelraum in das verhältnismäßig breite negative Glimmlicht und eine dünne der Kathode dicht anliegende Lichthaut, die erste Kathodenschicht zerlegt wird. Das Potential fällt innerhalb der Röhre nicht gleichmäßig von der Anode zur Kathode, das Feld ist nicht homogen. Besonders tritt hervor der hohe Wert der elektrischen Kraft dicht an der Kathode, der aber von dieser weg sofort rasch abnimmt, um noch innerhalb des negativen Glimmlichts oder unmittelbar nach demselben einen sehr kleinen Minimalwert zu erreichen; innerhalb der positiven Säule ist die elektrische Kraft wieder größer und entweder annähernd konstant oder allmählich gegen die Anode hin ansteigend, im Fall der Schichtung dabei den Schichten entsprechend kleine Schwankungen zeigend. Vor der Anode selbst findet noch einmal eine deutliche stärkere Abnahme und dicht an derselben ein größerer rascher Anstieg der Kraft statt. Dieser Wechsel ist auf eine ungleichmäßige Verteilung der positiven Ionen und negativen Elektronen innerhalb der Röhre zurückzuführen.

Die Grundlage für die Theorie aller selbständigen Gasströme bildet die Tatsache, daß auch Kathoden- und Kanalstrahlen ein Gas ionisieren können. Benützt man z. B. die S. 3 beschriebene Anordnung zur Demonstration der Deflexion der Kathodenstrahlen, so bildet sich zwischen den beiden Metallplatten immer, aber auch nur dann ein (nach S. 58 nachweisbarer) Strom, wenn die Kathodenstrahlen in der Röhre erregt werden*). Die Erscheinungen lassen nur die Deutung zu, daß

*) Dieser Effekt stört den Deflexionsversuch; man kann sich aber durch geeignete Maßnahmen von der Störung freimachen.

rasch bewegte Elektronen und positive Ionen imstande sind, von neutralen Molekülen, auf die sie aufprallen, Elektronen abzuspalten; so tritt zu den auf S. 56 f. genannten Ionisationsmöglichkeiten noch hinzu die **Ionisation durch Stoss**. Dazu ist natürlich notwendig, daß das bewegte Teilchen ein gewisses Minimalmaß an kinetischer Energie erlangt hat. Die Bewegung der Elektronen und Ionen in Gasen erfolgt in ganz analoger Weise, wie die auf S. 17 geschilderte Bewegung der Elektronen in Metallen, und auf dem Weg zwischen zwei Zusammenstößen, der im Durchschnitt umso länger ist, je verdünnter das Gas, wird das Teilchen beschleunigt und sammelt kinetische Energie an, deren Betrag von der Länge des freien Wegs und der Stärke der bewegenden elektrischen Kraft abhängt. Ohne daß man den Mechanismus des Vorgangs kennt, sieht man schon daraus, daß zum Entstehen des selbständigen Stroms ein vom Gasdruck abhängendes Mindestmaß der elektrischen Feldstärke erforderlich ist (vgl. dagegen S. 58); bei kleineren Drucken ist es wegen der größeren freien Weglänge geringer, die Entladung geht bei derselben Potentialdifferenz zwischen den Elektroden auf größere Strecken über. Für Elektronen ist die zur Ionisation ausreichende Energie kleiner als für positive Ionen; infolge ihrer Kleinheit vermögen sie wie Spitzen in das Atomgefüge einzudringen, während die positiven Ionen das Atom wie durch einen stumpfen Schlag sprengen müssen. Jedes durch Stoß erzeugte Teilchen setzt sich im elektrischen Feld seinerseits wieder in Bewegung und kann dadurch ebenfalls Ionisierungsenergie erlangen; so ist die Stoßionisation eine sehr ausgiebig wirkende Ionisierungsart, und damit erklärt sich die oft nicht unbeträchtliche Stärke eines selbständigen Gasstroms. Die Stoßionisation ist von einem **Leuchten** begleitet; die aufprallenden bewegten Teilchen werden aufgehalten und die Verhältnisse liegen ganz ebenso wie bei der auf S. 56 vorgetragenen Theorie der Röntgenstrahlen, nur fällt die Stoßzeit hier in den Rahmen der Schwingungsdauern des sichtbaren Lichts, so daß die Stoßwellen auf das Auge einzuwirken vermögen. Mit der Natur des die Röhre erfüllenden Gases hat dieses Leuchten jedenfalls direkt nichts zu tun; man vergleiche damit die Bemerkungen über das Leuchten der Kanalstrahlen auf S. 63.

Wir können uns nun folgendes Bild von den Vorgängen in einer Geißlerischen Röhre machen. Bei der weiten Verbreitung der Becquerelstrahlen aussendenden radioaktiven Stoffe enthält auch das Gas in der Röhre einige Ionen und Elektronen und es entsteht, wenn das Feld zwischen den Elektroden erregt wird, zwischen ihnen zunächst ein unselbständiger Strom, der aber rasch zu Ende geht, wenn das elektrische Feld zur Stossionisation nicht ausreicht; ist aber letzteres der Fall, so bilden sich die verbrauchten Elektronen und Ionen immer wieder aufs neue und der Strom dauert an, solange das Feld besteht. Wir wollen die einleitenden Vorgänge übergehen und nur den bereits stationär gewordenen Zustand ins Auge fassen, insbesondere die auf S. 59 genannte Verteilung der elektrischen Kraft als gegeben hinnehmen. Verfolgen wir zuerst die positiven Ionen, welche auf die Kathode zu-

eilen. Sie werden zunächst auf allen Teilen ihres Wegs zu Zusammenstößen Gelegenheit haben, aber da sie ein verhältnismäßig hohes Maß an Ionisierungsenergie brauchen, reicht die elektrische Kraft im allgemeinen nicht aus, sie ihnen zu geben. An der Anode ist sie zwar erheblich, aber nur auf eine so kleine Strecke, daß diese auch für dicht von der Anodenoberfläche ausgehende Ionen zur erforderlichen Energieansammlung zu kurz ist. In der ersten Kathodenschicht dagegen sind alle Bedingungen erfüllt: die elektrische Kraft ist sehr stark und die auf die Kathode zukommenden Ionen beginnen ihre Bewegung nicht erst in diesem Gebiet, bringen also in dasselbe bereits kinetische Energie mit, die in ihm nur noch auf das nötige Maß gesteigert zu werden braucht. Ob sie das Gas dicht vor der Kathode ionisieren oder aus dieser selbst, etwa indem sie sie durch den Aufprall erhitzen, Elektronen austreiben oder ob beides stattfindet, ist noch nicht sicher entschieden; für das weitere ist es auch belanglos, etwa entstehende positive Ionen können, da sie durch die elektrische Kraft gegen die Kathode getrieben werden, doch nicht mehr merklich in Bewegung kommen, und wichtig ist nur die Neubildung von Elektronen an dieser Stelle. Diese werden durch das starke Feld sofort außerordentlich beschleunigt und erreichen nach kurzem Lauf von der Kathode weg ihre Ionisationsenergie; damit beginnt das negative Glimmlicht, welches erst wieder aufhört, wenn alle Elektronen zur Ionisation gekommen und durch die Zusammenstöße soweit aufgehalten worden sind, daß augenblicklich keines mehr zu ionisieren vermag. Die hier entstandenen positiven Ionen fliegen aufs neue zur Kathode, und so bilden die zwei Teile des negativen Lichts zwei sich gegenseitig bedingende Gebiete; in der ersten Kathodenschicht bilden sich die positiven Ionen unaufhörlich die zu ihrer Ergänzung erforderlichen Elektronen und diese sorgen für ihren Nachschub, indem sie im Glimmlicht fortgesetzt positive Ionen erzeugen; der Crookesche Dunkelraum stellt für beide die Strecke dar, die sie durchlaufen müssen, um die Ionisationsenergie zu erlangen. Damit ist das negative Licht die eigentliche und unentbehrliche, aber auch vollständig ausreichende Quelle des Stroms, selbst wenn nirgends sonst mehr Ionisation stattfände, könnte derselbe beliebig lange andauern; innerhalb des negativen Lichts bestände er in einer entgegengesetzt gerichteten Bewegung von Elektronen und positiven Ionen, zwischen Glimmlicht und Anode nur in einer gegen letztere gerichteten Bewegung der (an der Kathode und im Glimmlicht entstandenen) Elektronen*). — Die im Glimmlicht aufgehaltenen oder neu entstandenen Elektronen setzen sich wieder in Bewegung und erreichen nach einiger Zeit aufs neue die Ionisationsenergie, aber bei der in diesen Gebieten herrschenden geringen Feldstärke erst nach Durchlaufung einer größeren Strecke. So folgt auf das Glimmlicht ein weiteres ionisations- und damit lichtloses Gebiet, der uns bereits bekannte Faradaysche Dunkelraum, der mit dem Wiederbeginn der Ionisation durch die positive

*) An der Anode kann sich eine solche Stromquelle im allgemeinen nicht bilden, weil dort, wie oben gezeigt, die positiven Ionen in der Regel nicht ionisieren können.

Säule abgelöst wird; diese ist demnach im Grund eine Wiederholung des Glimmlichts. Kommt auf eine verhältnismäßig kurze Strecke gleich wieder die Hauptmasse der Elektronen zur Ionisation und wird aufgehhalten, so muß abermals ein dunkler Raum folgen, diesem ebenso wieder ein helles Ionisationsgebiet u.s.w., die Säule ist geschichtet und jede helle Schicht mit der folgenden dunkeln zusammen entspricht dem Glimmlicht mit dem Faradayschen Raum; finden die Elektronen dagegen erst nach und nach wieder Gelegenheit zur Ionisation, sodaß, bis die letzten soweit gekommen sind, die ersten bereits aufs neue ihre Ionisationsenergie erlangt haben, so gehen helle und dunkle Schichten ineinander über, die Säule erscheint ungeschichtet. Die hier gegebene Beschreibung der Entstehung des Glimmstroms (so pflegt man den Strom in einer Geißlerischen Röhre zu nennen) hatte Drucke von 1—2 mm und auch noch etliches darüber im Auge; bei beträchtlicher weiterer Erniedrigung des Drucks dehnt sich das negative Glimmlicht mehr und mehr aus, Faradayscher Dunkelraum und positive Säule weichen vor ihm nach der Anode zurück, bis die Säule ganz verschwunden ist oder gar das negative Glimmlicht nur noch schwach leuchtend den ganzen Raum erfüllt. Dies tritt bei ungefähr 0,01 mm Druck ein. Wir können uns diese Veränderung folgendermaßen zurechtlegen. Je verdünnter das Gas, desto seltener wird die Gelegenheit für die von der Kathode kommenden Elektronen, mit Gasmolekülen zusammenzustoßen und zu ionisieren, desto weiter von der Kathode muß die Stelle liegen, an der auch das letzte Elektron zur Ionisation gekommen ist und somit das Glimmlicht endigt; daß damit aber auch Faradayscher Raum und positive Säule nach der Anode zurückweichen müssen, ergibt sich aus obigem von selbst, ebenso, daß die Verdünnung schließlich soweit gehen kann, daß nicht einmal auf die ganze Länge der Röhre alle Elektronen auf Gasmoleküle auftreffen konnten. Diese Elektronen durchfliegen dann die ganze Röhre, ohne aufgehhalten zu werden, und prallen mit großer Geschwindigkeit auf die Wand oder sonst ein Hindernis auf: sie bilden die Kathodenstrahlen und ihr Aufprall erregt unter anderem die Fluoreszenz. Bekanntlich fliegen sie im wesentlichen geradlinig dahin, unbekümmert um die Lage der Anode; bei der großen Geschwindigkeit, die sie an der Kathode erhalten und auf ihrem ganzen Weg beibehalten, lassen sie sich von der einmal eingeschlagenen Richtung nicht mehr ablenken, auch wenn das elektrische Feld sie nach einer seitlich gelegenen Anode zu treiben sucht. Damit scheiden sie aus dem Stromverband aus, dieser wird aber durch die aufgehhaltenen und die neu entstandenen Elektronen, welche sich erst in Bewegung setzend dem Feld folgen, und die neu entstehenden positiven Ionen aufrecht erhalten. Die schon S. 4 erwähnten Kanalsstrahlen treten aus einer von Bohrungen („Kanälen“) siebartig durchlöcherter Kathode auf der von der Anode abgewendeten Seite hervor; sie werden gebildet von den auf die erstere zueilenden, die Bohrungen durchlaufenden positiven Ionen, doch müssen, auf Grund des von ihnen ausgestrahlten Lichts zu schließen, auch bewegte Atome

des Elektrodenmetalls in ihnen enthalten sein. Im Unterschied vom Ionisationslicht (S. 60) geben nämlich Kanalstrahlen und die erste Kathodenschicht im Spektralapparat das Linienspektrum des die Röhre erfüllenden Gases und des Elektrodenmetalls; ihr Leuchten ist daher jedenfalls kein Ionisationsleuchten. Die weiteren Untersuchungen, an die wir schon auf S. 51 dachten, führen zunächst zu der Anschauung, daß bewegte positive Ionen von einer gewissen Geschwindigkeit an Licht aussenden, indem ihre infolge davon sich vermindernde kinetische Energie die in ihnen enthaltenen Verschiebungselektronen zu Lichtschwingungen anregt. Auch die anderen Teile des Glimmstroms zeigen neben dem auf S. 60 erwähnten Leuchten das Spektrum des Gases in der Röhre; es müssen also auch in diesen Teilen noch Vorgänge ähnlicher Art sich abspielen wie bei den Kanalstrahlen. Im übrigen stehen wir hier natürlich vor denselben Fragen, wie auf S. 51, deren Klärung wir der Zukunft überlassen müssen.

Bezüglich der weiteren Formen des selbständigen Gasstroms müssen wir uns mit einigen kurzen Bemerkungen begnügen; man faßt sie alle auf als Modifikationen des Glimmstroms der Geißlerischen Röhre. Beim gewöhnlichen elektrischen Funken ist es die größere Dichte des Gases, welche zur Folge hat, daß sich die Erscheinung der Länge und dem Querschnitt nach zusammendrängt (man vgl. die Bemerkung auf S. 60, Mitte und die Tatsache, daß in Geißlerischen Röhren mit höheren Drucken die Entladung nur in Form eines schmalen Lichtbands zwischen den Elektroden übergeht). Die lebhafte Bewegung der Elektronen und Gasteilchen längs der Funkenstrecke kommt nach den Anschauungen der kinetischen Gastheorie in einer Temperaturerhöhung und einer Drucksteigerung, dem „Funkendruck“ zum Vorschein, welcher seinerseits den Knall und die mechanischen Wirkungen hervorbringt. Die Funkenverzögerung rührt von der Zeit, die erforderlich ist, bis sich durch Stoß die wenigen in der Luft vorhandenen Ionen hinreichend vermehrt haben; ihre Herabsetzung bez. Aufhebung durch ionisierende Einflüsse ist damit ohne weiteres erklärt. Je nach den Verhältnissen ist der elektrische Funke auch als ein zusammengedrängter Lichtbogen (s. u.) aufzufassen. Der Ausgleich zwischen zwei verschiedenen elektrischen Körpern und die Elektrisierung „durch Mitteilung“ erfolgt bekanntlich in der Regel in Form eines Funkens. Werden die beiden Körper einander nahe gebracht, so setzt die Funkenentladung ein, sobald die Entfernung klein genug geworden ist für die zwischen ihnen bestehende Potentialdifferenz; der entstandene selbständige Gasstrom schafft Elektronen auf den Körper mit dem höheren, positive Ionen an den mit dem tieferen Potential, dort direkt das Elektronen-defizit vermindern (bez. einen schon vorhandenen Überschuß erhöhend), hier durch Neutralisation der ankommenden Gasionen den Elektronen-überschuß herabsetzend (bez. ein schon vorhandenes Defizit vergrößernd). Obgleich hiedurch der Eindruck entsteht, als ob die „Elektrizitäten“ direkt vom einen zum andern Körper übergegangen seien, sieht man doch, daß dies nicht der Fall ist, sondern daß das dazwischen

liegende Gas die Elektronen liefert und aufnimmt. Das Entstehen elektrischer Schwingungen auch in einer durch eine Funkenstrecke unterbrochenen Verbindung zweier verschieden elektrischer Körper K_1 und K_2 (Fig. 15) kann man sich in Ergänzung zu S. 45 folgendermaßen vorstellen. R_1 und R_2 seien die mit K_1 bez. K_2 verbundenen Endpunkte der Funkenstrecke, K_1 habe das höhere Potential. Ist (durch

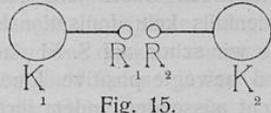


Fig. 15.

Annäherungen von R_1 und R_2 oder durch Steigerung der Potentialdifferenz zwischen K_1 und K_2) der Funken und damit der eben beschriebene Vorgang zwischen R_1 und R_2 eingeleitet, so hat dies einen Elektronenstrom von K_2 nach R_2 und von R_1 nach K_1 zur Folge, der wegen der Elektronenträgheit länger dauert als nötig, wodurch zunächst auf R_2 eine Stauung, auf R_1 eine Ebbe von Elektronen verursacht, also, trotzdem der Ausgleich zu Ende wäre, das Feld und damit der Funkenstrom noch eine Zeitlang in der alten Richtung zwischen R_1 und R_2 erhalten wird. Damit muß also K_1 zu viel, K_2 zu wenig Elektronen bekommen, K_2 hat jetzt ein höheres Potential als K_1 und der Vorgang setzt in gleicher Weise in der umgekehrten Richtung ein u. s. f., bis schließlich infolge der Dämpfung das Gleichgewicht sich hergestellt hat oder das Feld zwischen R_1 und R_2 zu klein geworden ist, um den Funken noch weiter aufrecht zu erhalten; es ist also möglich und kann auch tatsächlich beobachtet werden, daß auch nach Aufhören des Funkens noch eine Potentialdifferenz zwischen beiden Teilen besteht, wobei K_1 oder K_2 das höhere Potential haben kann, und erst mit vollständiger Berührung wird auch diese Potentialdifferenz vollends beseitigt. — Für die Ausbildung des elektrischen Lichtbogens scheint unerläßliche Vorbedingung eine heiße Kathode zu sein, wodurch eine besonders reichliche Elektronenproduktion an derselben ermöglicht wird; ob es sich dabei wieder um die auf S. 36 f. erwähnte Erscheinung handelt, oder ob durch die hohe Temperatur der Kathode der Jonisation des Gases vor derselben Vorschub geleistet wird (vgl. Jonisation in Flammgasen), jedenfalls ist dieser Elektronenreichtum und die dadurch bedingte erhebliche Stromstärke das Charakteristische des Lichtbogenstroms. Die Erhitzung der Elektroden, speziell der Kathode, wird ursprünglich bewirkt durch die Joulesche Wärme an den im wesentlichen aus einzelnen diskreten Punkten bestehenden Berührungsstellen der Elektroden, im weiteren Verlauf durch den Aufprall der positiven Ionen bez. Elektronen, wobei bekanntlich die Temperatur der Anode wesentlich höher steigt als die der Kathode.



liegende Gas die elektrische Schmelzstrecke unterbrochenen per K_1 und K_2 (Fig. 15 Ergänzung zu S. 45) stellen. R_1 und R_2 sind verbundenen Endpunkt K_1 habe das höhere Annäherungen von R_1 zwischen K_1 und K_2) Vorgang zwischen R_1 Strom von K_2 nach R_2 Elektronenträgheit läng Stauung, auf R_1 eine der Ausgleich zu Ende eine Zeitlang in der a Damit muß also K_1 zu jetzt ein höheres Pot Weise in der umgekehr der Dämpfung das Gleich zwischen R_1 und R_2 zu aufrecht zu erhalten; beobachtet werden, daß Potentialdifferenz zwischen höhere Potential haben auch diese Potentialdifferenz des elektrischer Verbindung eine heiße Kathode Elektronenproduktion wieder um die auf S. die hohe Temperatur selben Vorschub geht jedenfalls ist dieser erhebliche Stromstärke Erhitzung der Elektro wirkt durch die Joules diskreten Punkten bei weiteren Verlauf durch nen, wobei bekanntlich steigt als die der Kathode

stehen
Anken-
Kör-
K₂
Differenz
ebene
onen-
der
K₂ eine
tzt dem
noch
wird.
K₂ hat
eicher
nfolge
Field
weiter
ch be-
e Po-
K₂ das
g wird
ildung
Vorbe-
chliche
dabei
durch
r der-
gasen),
gte er-
s. Die
ch be-
zeln
en, im
lektro-
höher

