This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

**Usage guidelines**

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

**About Google Book Search**

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

NYPL RESEARCH LIBRARIES
3 3433 01870936 4

# DIE WISSENSCHAFT

SAMMLUNG
NATURWISSENSCHAFTLICHER UND MATHEMATISCH
MONOGRAPHIEN

DRITTES HEFT

# ELEKTRIZITÄT UND MATERIE

VON

DR. J. J. THOMSON

AUTORISIERTE ÜBERSETZUNG
VON
G. SIEBERT

MIT 19 EINGEDRUCKTEN ABBILDUNGEN

BRAUNSCHWEIG
DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOH
1904

Lib. No 1.3..1..1.
Ref. No. O-W-1.r.
Ser No. 1256...

# ELEKTRIZITÄT UND MATERIE

13942

Von

DR. J. J. THOMSON

MITGLIED DER ROYAL SOCIETY
PROFESSOR DER EXPERIMENTALPHYSIK AN DER UNIVERSITÄT
IN CAMBRIDGE

AUTORISIERTE ÜBERSETZUNG

VON

G. SIEBERT

MIT 19 EINGEDRUCKTEN ABBILDUNGEN

BRAUNSCHWEIG
DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN
1904

1310

er, Structure of

THE NEW YORK PUBLIC LIBRARY
ASTOR [illegible] TILDEN
FOUNDATIONS

# DIE SILLIMAN-STIFTUNG.

Im Jahre 1883 wurde dem Präsidenten und den Mitgliedern der Yale-Universität in der Stadt New Haven ein Legat von achtzigtausend Dollar vermacht, welches als ein Geschenk der Kinder zum Gedächtnis ihrer geliebten und verehrten Mutter, Mrs. Hepsa Ely Silliman, verwaltet werden sollte.

Durch diese Stiftung wurde das Yale College angewiesen, jedes Jahr eine Reihe von Vorlesungen zu veranstalten, die dazu bestimmt sein sollten, die Gegenwart und Vorsehung, die Weisheit und Güte Gottes zu bezeugen, wie sie sich in der Natur und auf geistigem Gebiete offenbart. Diese Vorlesungen sollten als die „Mrs. Hepsa Ely Silliman Memorial Lectures" bezeichnet werden. Der Erblasser war der Meinung, daß eine geeignete Darstellung der Tatsachen der Natur oder der Geschichte den Zwecken dieser Stiftung in wirksamerer Weise dienlich sein werde als die Erörterung dogmatischer und konfessioneller Fragen. Er ordnete daher an, daß Vorlesungen über dogmatische und polemische Theologie aus dem Bereiche dieser Stiftung ausgeschlossen sein sollten, daß die Gegenstände lieber aus den Gebieten der Naturwissenschaft oder der Geschichte, namentlich der Astronomie, Chemie, Geologie und Anatomie gewählt werden sollten.

Es wurde ferner bestimmt, daß jeder Jahreskursus de
Inhalt eines Bandes bilden und dieser Band einer dem Ge
dächtnis der Mrs. Silliman gewidmeten Serie angehöre
sollte. Der Gedächtnisfonds kam im Jahre 1902 in de
Besitz der Korporation der Yale-Universität, und der vor
liegende Band bildet das erste Glied der Serie von Ge
dächtnisvorlesungen.

# VORWORT.

In diesen Vorlesungen, die ich im Mai 1903 an der Yale-Universität gehalten habe, habe ich versucht, die Bedeutung der neuen Fortschritte in der Elektrizitätslehre für unsere Ansichten über die Konstitution der Materie und die Natur der Elektrizität zu diskutieren, zwei Fragen, die so eng miteinander verknüpft sind, daß die Lösung der einen auch zur Lösung der anderen führen wird. Ein charakteristischer Zug der neuen elektrischen Untersuchungen, wie das Studium und die Entdeckung der Kathodenstrahlen, der Röntgenstrahlen und der radioaktiven Substanzen, liegt darin, daß sie in besonders hohem Grade die Beziehungen zwischen Materie und Elektrizität betreffen.

Bei der Wahl des Gegenstandes für die Silliman-Vorlesungen habe ich geglaubt, daß eine Betrachtung der Bedeutung neuerer Arbeiten über diese Beziehung geeignet sein würde, namentlich deshalb, weil eine derartige Diskussion eine Menge Fragen anregt, die für einige meiner Zuhörer vortreffliche Themata für weitere Untersuchungen bilden dürften.

Cambridge, im Oktober 1903.

**J. J. Thomson.**

## Erstes Kapitel.

# Darstellung des elektrischen Feldes durch Kraftlinien.

Was ich Ihnen in diesen Vorlesungen in einer möglichst einfachen und leicht verständlichen Weise vorzuführen gedenke, sind einige Ansichten über die Natur der Elektrizität, über die Vorgänge, welche im elektrischen Felde stattfinden und über den Zusammenhang zwischen elektrischer und gewöhnlicher Materie, zu denen die Ergebnisse neuerer Forschungen geführt haben.

Die Entwickelung der Elektrizitätslehre ist durch Spekulationen über die Natur der Elektrizität in hohem Grade gefördert worden. Ja, die Dienste, welche zwei Theorien, die fast so alt wie die Wissenschaft selbst sind, geleistet haben, können kaum hoch genug angeschlagen werden. Diese Theorien sind die sogenannte unitarische und die sogenannte dualistische Theorie der Elektrizität.

Die dualistische Theorie erklärt die Erscheinungen der Elektrizität durch die Annahme, daß im Weltraume zwei Fluida existieren, die nicht erschaffen und nicht vernichtet werden können und deren Anwesenheit die elektrischen Wirkungen hervorbringt. Das eine dieser Fluida wird positive Elektrizität, das andere negative Elektrizität genannt, und die elektrischen Erscheinungen werden dadurch erklärt, daß man diesen Fluiden die folgenden Eigenschaften zuschreibt. Die Teilchen des positiven Fluidums stoßen sich einander mit Kräften ab, die dem Quadrate des gegenseitigen Abstandes umgekehrt proportional sind. In derselben Weise stoßen sich die Teilchen des negativen Fluidums einander ab. Dagegen ziehen die Teilchen des positiven Fluidums die Teilchen des negativen Fluidums an. In der einen Form der Theorie wird

# DIE WISSENSCHAFT

SAMMLUNG
NATURWISSENSCHAFTLICHER UND MATHEMATISCH
MONOGRAPHIEN

DRITTES HEFT

# ELEKTRIZITÄT UND MATERIE

VON

DR. J. J. THOMSON

AUTORISIERTE ÜBERSETZUNG
VON
G. SIEBERT

MIT 19 EINGEDRUCKTEN ABBILDUNGEN

BRAUNSCHWEIG
DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN
1904

DR. F. SCHNIEWIND,
Lib. No. 15-5-1
Ref. No. O-W-1 v.3
Ser No. 1256

# EKTRIZITÄT UND MATERIE

13942

VON

DR. J. J. THOMSON

MITGLIED DER ROYAL SOCIETY
PROFESSOR DER EXPERIMENTALPHYSIK AN DER UNIVERSITÄT
IN CAMBRIDGE

AUTORISIERTE ÜBERSETZUNG

VON

G. SIEBERT

MIT 19 EINGEDRUCKTEN ABBILDUNGEN

BRAUNSCHWEIG
UCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN
1904

131

Abstandes wirkenden Kräfte, zu der die Entdeckung der Gravitation den Anstoß gegeben hatte, auch auf die elektrischen Erscheinungen anzuwenden. Solange wir uns auf Fragen beschränken, bei denen es sich nur um das für elektrische Körper geltende Kraftgesetz und um das gleichzeitige Auftreten gleicher Mengen positiver und negativer Elektrizität handelt, müssen beide Theorien zu denselben Resultaten führen, und es gibt kein Mittel, zu entscheiden, welche von beiden den Vorzug verdient. Die Physiker und Mathematiker, welche am meisten zur Entwickelung der Theorien der Fluida beitrugen, beschränkten sich auf derartige Fragen, und sie verfeinerten und idealisierten den Begriff dieser Fluida dermaßen, daß es schließlich eine heikle Sache war, auf die physikalischen Eigenschaften dieser Fluida irgendwie Bezug zu nehmen. Erst wenn wir Erscheinungen untersuchen, bei denen es sich um die physikalischen Eigenschaften der Fluida handelt, ist es vielleicht möglich, sich für die eine oder die andere der beiden rivalisierenden Theorien zu entscheiden. Dies mag an einem bestimmten Falle erläutert werden. Es ist gelungen, die Massen zu messen, welche in Gasen bei niedrigem Druck mit gegebenen elektrischen Ladungen verbunden sind, und man hat gefunden, daß die mit einer positiven Ladung verbundene Masse ungeheuer viel größer ist als die mit einer negativen Ladung verbundene. Dieser Unterschied ist aber nach der Franklinschen unitarischen Theorie zu erwarten, wenn diese Theorie dahin abgeändert wird, daß das elektrische Fluidum nicht der positiven, sondern der negativen Elektrizität entspricht, während die dualistische Theorie einen so großen Unterschied nicht voraussehen läßt. Wir werden von der Ähnlichkeit überrascht sein, die einige Ansichten, zu denen die Ergebnisse der neuesten Untersuchungen geführt haben, mit den Ansichten haben, die von Faraday ausgesprochen wurden, als sich der Gegenstand noch in den allerersten Entwickelungsstadien befand.

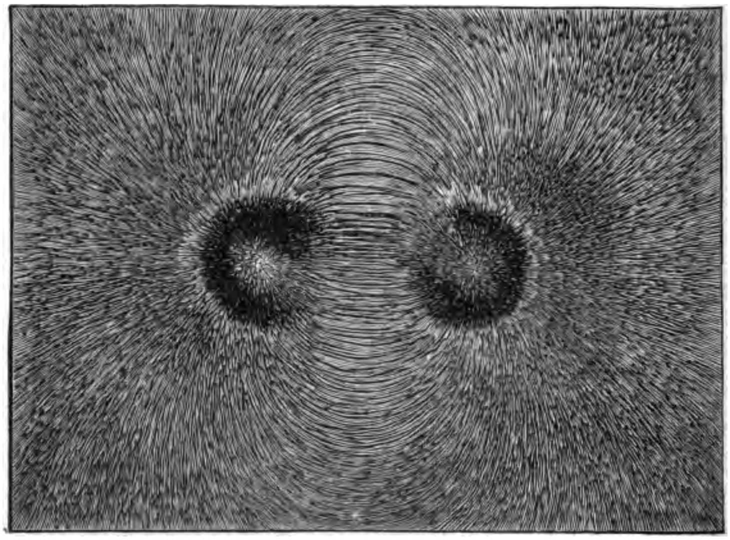
## Faradays Theorie der Kraftlinien.

Die Theorien der elektrischen Fluida setzen ihrer Natur nach die Vorstellung einer Fernewirkung voraus. Diese Vorstellung eignet sich allerdings vortrefflich für mathematische Behandlung und sie ist daher von vielen Mathematikern bevorzugt worden.

Dagegen haben sich viele von den größten Physikern entschieden ablehnend gegen diese Theorien verhalten und sie durch etwas anderes zu ersetzen gesucht, was mechanische Kontinuität voraussetzt. Der hervorragendste dieser Physiker ist Faraday. Für Faraday war es geradezu ein Axiom, oder, wenn Sie es vorziehen, ein Dogma, daß die Materie nicht da wirken kann, wo sie nicht ist. Faraday besaß nach meiner Ansicht einen mathematischen Scharfsinn ohnegleichen, allein er hatte keine Schulung in der Analysis. Daher konnten die großen Vorteile, welche die Vorstellung der Fernewirkung für die mathematische Behandlung bietet, seinen Widerwillen nicht mildern, den er gegen die Vorstellung von Kräften empfand, die weit entfernt von ihrer Basis und ohne physikalischen Zusammenhang mit ihrem Ursprung wirksam sind. Er suchte sich daher die Wirkungen im elektrischen Felde durch ein Bild zu veranschaulichen, in welchem die Vorstellung der Fernewirkung durch etwas anderes ersetzt war, wodurch zwischen den aufeinander einwirkenden Körpern ein kontinuierlicher Zusammenhang hergestellt wurde. Dies gelang ihm durch den Begriff der Kraftlinien. Da ich fortwährend von dieser Methode Gebrauch machen werde, und da die Leistungsfähigkeit dieser Methode, wie ich glaube, niemals in angemessener Weise dargelegt worden ist, will ich einige Zeit darauf verwenden, den Begriff des elektrischen Feldes zu diskutieren und zu entwickeln.

Angeregt wurde Faraday zu dieser Methode durch die Betrachtung der Kraftlinien in der Umgebung eines Stabmagneten. Wenn auf eine glatte Fläche in der Nähe eines Magneten Eisenfeilspäne ausgestreut werden, so ordnen sie sich in der aus Fig. 1 (a. f. S.) ersichtlichen Weise an. Man erkennt deutliche Linien, die von dem einen Pol des Magneten nach dem anderen laufen. Die Richtung dieser Linien in jedem beliebigen Punkte fällt mit der Richtung der magnetischen Kraft zusammen, und die Intensität der Kraft wird durch die Konzentration der Linien angezeigt. Wenn wir von irgend einem Punkte im Felde ausgehen und immer in der Richtung der magnetischen Kraft fortschreiten, so beschreiben wir eine Linie, die nicht eher aufhört, als bis wir den negativen Pol des Magneten erreichen. Wenn an allen Punkten im Felde solche Linien gezogen werden, so wird der Raum, durch den sich das Feld erstreckt, von einem System von Linien angefüllt, die dem Raume eine faserige Struktur erteilen, die mit der Struktur eines Haufens Heu oder Stroh verglichen werden kann, und zwar so, daß die Fasern der Struktur den Kraftlinien entlang laufen. Bis jetzt habe ich nur von

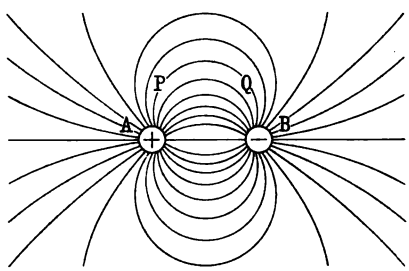
Fig. 1.



magnetischen Kraftlinien gesprochen. Dieselbe Betrachtung gilt für das elektrische Feld, und wir können uns das elektrische Feld mit Kraftlinien angefüllt denken, die an positiv elektrischen Körpern anfangen und an negativ elektrischen enden. Bis zu diesem Punkte ist das Verfahren ein rein geometrisches gewesen und hätte von denen angewandt werden können, die die Frage vom Gesichtspunkte der Fernewirkung aus betrachteten. Für Faraday waren jedoch die Kraftlinien weit mehr als mathematische Abstraktionen, sie waren physikalische Realitäten. Faraday materialisierte die Kraftlinien und stattete sie mit physikalischen Eigenschaften aus, um die Erscheinungen des elektrischen Feldes zu erklären. So nahm er an, daß sie sich in einem Spannungszustande befinden und daß sie sich einander abstoßen. Für Faraday gab es keine unfaßbare Fernewirkung zwischen zwei elektrischen Körpern, für ihn war der ganze Raum zwischen den Körpern mit gestreckten und sich gegenseitig abstoßenden Federn angefüllt. Die elektrischen Ladungen, die allein nach der Theorie der Fluida eine Interpretation gefunden hatten, waren nach dieser Auffassung nichts anderes als die Enden dieser Federn, und eine elektrische Ladung war nicht eine Quantität Fluidum in dem elektrischen Körper selbst, sondern ein ausgedehntes Arsenal von Federn, die sich in allen Richtungen nach allen Teilen des Feldes hin ausbreiten.

Um unsere Vorstellungen über diesen Punkt zu klären, wollen wir einige Fälle vom Gesichtspunkte Faradays aus betrachten. Zunächst wollen wir den Fall betrachten, daß zwei Körper gleiche und entgegengesetzte Ladungen besitzen. Die Kraftlinien dieses Falles sind aus Fig. 2 zu ersehen. Sie sehen, daß die Kraftlinien am dichtesten längs der Verbindungslinie $AB$ der beiden Körper sind, und daß auf derjenigen Seite von $A$, die $B$ am nächsten ist, mehr Linien sind als auf der entgegengesetzten Seite. Betrachten Sie die Wirkung der Kraftlinien auf $A$. Da auf derjenigen Seite von $A$, die $B$ am nächsten ist, mehr Zug wirkt als auf der entgegengesetzten Seite, so überwiegt der auf $A$ nach $B$ hin wirkende Zug denjenigen Zug, der $A$ von $B$ hinwegzieht. Infolgedessen strebt $A$ sich nach $B$ hin zu bewegen. So stellte sich Faraday die Anziehung zwischen entgegengesetzt elektrischen Körpern vor. Wir wollen jetzt den Zustand einer der gekrümmten Kraftlinien, z. B. $PQ$, betrachten. Sie befindet sich in einem Spannungszustande und hat daher das Bestreben, sich zu strecken. Wer hindert sie, dies zu tun, und wie wird sie in gekrümmter Lage im Gleichgewicht erhalten? Um den Grund hiervon einzusehen, müssen wir uns erinnern, daß sich die Kraftlinien gegenseitig abstoßen und daß die Linien in der Region zwischen $PQ$ und $AB$ stärker konzentriert sind als auf der anderen Seite von $PQ$. Daher ist die Abstoßung der Linien innerhalb $PQ$ größer

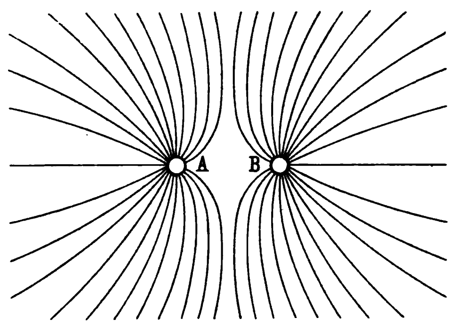
Fig. 2.



als die Abstoßung der Linien außerhalb, und die Linie $PQ$ wird nach außen gebogen.

Wir wollen jetzt zu dem Fall übergehen, daß zwei Körper nicht entgegengesetzt, sondern gleichartig geladen sind. Die Kraftlinien dieses Falles sind aus Fig. 3 zu ersehen. Wir wollen annehmen, $A$ und $B$ seien positiv geladen. Da die Kraftlinien an positiv geladenen Körpern anfangen und an negativ geladenen enden, so werden sich die von $A$ und von $B$ ausgehenden Linien entfernen, um einen oder mehrere Körper zu treffen, welche die den positiven Ladungen von $A$ und $B$ entsprechenden negativen Ladungen besitzen. Wir wollen annehmen, daß sich diese

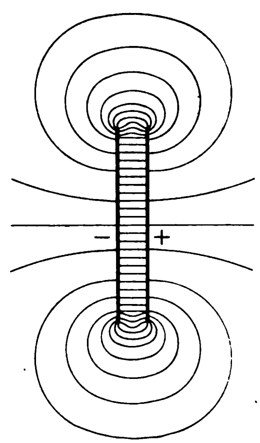
Fig. 3.




Ladungen in beträchtlicher Entfernung befinden, so daß sich die Kraftlinien von $A$, wenn $B$ nicht da wäre, in dem betreffenden Teile des Feldes gleichförmig nach allen Richtungen hin ausbreiten würden. Bedenken Sie jetzt, was stattfinden muß, wenn wir die beiden Systeme von Kraftlinien, die von $A$ und von $B$ ausgehen, einander nähern. Da sich diese Linien gegenseitig abstoßen, so werden die Kraftlinien auf derjenigen Seite von $A$, die $B$ am nächsten ist, nach der entgegengesetzten Seite gedrückt, so daß die Kraftlinien auf der entfernten Seite von $A$ am dichtesten sind. Daher ist der Zug, den die Kraftlinien auf die Rückseite von $A$ ausüben, größer als der Zug, der auf die Vorderseite ausgeübt wird, und die Folge davon ist, daß $A$ von $B$ abgestoßen wird. Wir sehen, daß der Mechanismus, der diese Abstoßung bewirkt, genau von demselben Typus ist wie derjenige, welcher im ersten Falle die Anziehung bewirkte, und wir können, wenn wir wollen, die Abstoßung zwischen $A$ und $B$ der Anziehung zuschreiben, die die komplementären negativen Ladungen, die in anderen Teilen des Feldes existieren müssen, auf $A$ und $B$ ausüben.

Die Wirkungen der Abstoßung der Kraftlinien zeigen sich deutlich bei zwei entgegengesetzt geladenen Platten. Dieser Fall wird durch Fig. 4 veranschaulicht. Sie werden bemerken, daß die Kraftlinien zwischen den Platten mit Ausnahme derjenigen am Rande der Platten gerade Linien sind. Gerade dies ist es aber, was wir erwarten müssen, da der Druck, welcher in diesem Teile des Feldes von den Kraftlinien über einer Linie nach unten ausgeübt wird, ebenso groß ist wie der Druck, welcher von den Kraftlinien unter der Linie nach oben ausgeübt wird. Dagegen ist für eine Kraftlinie in der Nähe des Randes der Platte der Druck der Kraftlinien unter der Linie größer als der Druck der Kraftlinien über der Linie, und die Linie wird sich nach auswärts biegen, bis ihre Krümmung und Spannung dem Drucke von innen das Gleichgewicht hält. Diese Biegung der Linien ist in Fig. 4 deutlich zu sehen.

Fig. 4.




Soweit ist der Gebrauch, den wir von den Kraftlinien gemacht haben, mehr ein beschreibender als ein messender gewesen. Es ist aber leicht, die Methode so auszubilden, daß sie eine messende wird. Dies läßt sich durch Einführung des Begriffes der Kraftröhren erreichen. Wenn man durch den Umfang einer kleinen geschlossenen Kurve im elektrischen Felde die Kraftlinien zieht, so bilden diese Linien eine röhrenförmige Fläche, und wenn man die Linien rückwärts bis zur positiv elektrischen Fläche verfolgt, von der sie ausgehen, und rückwärts bis zu der negativ elektrischen Fläche, an welcher sie enden, so läßt sich beweisen, daß die von der Röhre an ihrem Ursprunge eingeschlossene positive Ladung ebenso groß ist wie die an ihrem Ende eingeschlossene negative Ladung. Durch geeignete Wahl des Flächeninhaltes der Kurve, durch die wir die Kraftlinien ziehen, können wir es erreichen, daß die von den Röhren eingeschlossene Ladung die Ladungseinheit ist. Eine solche Röhre wollen wir eine Faradaysche Röhre nennen. Dann kann jede Einheit positiver Elektrizität im Felde als der Ursprung und jede Einheit negativer Elektrizität als das Ende einer Faradayschen Röhre betrachtet werden. Wir fassen diese Faradayschen Röhren so auf, daß sie Richtung besitzen, und zwar dieselbe Richtung, welche die elektrische Kraft besitzt, so daß also die positive Richtung von dem positiven nach dem negativen Ende der Röhre geht. Wenn wir eine beliebige geschlossene Fläche annehmen, so ist der Unterschied zwischen der Anzahl der Faradayschen Röhren, welche aus der Fläche austreten und derjenigen, welche eintreten, gleich der algebraischen Summe der Ladungen innerhalb der Fläche. Diese Summe ist das, was Maxwell die elektrische Verschiebung durch die Fläche nannte. Was Maxwell die elektrische Verschiebung in einer beliebigen Richtung in einem Punkte nannte, ist die Anzahl der Faradayschen Röhren, die durch eine Flächeneinheit gehen, welche in dem betreffenden Punkte auf dieser Richtung senkrecht steht. Dabei wird die Anzahl algebraisch gerechnet, d. h. die Linien, welche in der einen Richtung durch die Fläche gehen, werden positiv, diejenigen, welche in der entgegengesetzten Richtung durch die Fläche gehen. werden negativ gerechnet, und die Anzahl der durch die Fläche gehenden Röhren ist der Unterschied der positiv und der negativ durch die Fläche gehenden Röhren.

Ich für meine Person habe gefunden, daß der Begriff der Faradayschen Röhren sich viel besser eignet, um sich ein Bild von den Vorgängen im elektrischen Felde zu machen, als der Begriff der elektrischen Verschiebung, und ich benutze daher die letztere Methode schon seit vielen Jahren nicht mehr.

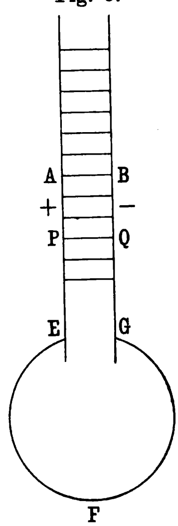
Maxwell nahm die Frage der Spannungen und Drucke in den Kraftlinien im elektrischen Felde auf und brachte das Problem um einen Schritt weiter als Faraday. Indem er die Größe dieser Spannungen berechnete, zeigte er, daß sich die mechanischen Wirkungen im elektrostatischen Felde durch die Annahme erklären lassen, daß jede Faradaysche Röhre eine Spannung $R$ ausübt, wenn $R$ die Intensität der elektrischen Kraft ist, und daß außer dieser Spannung in dem Medium, durch welches die

Röhren hindurchgehen, ein hydrostatischer Druck gleich $^1/_2\, NR$ herrscht, wenn $N$ die Dichtigkeit der Faradayschen Röhren ist, d. h. die Anzahl derselben, die durch die Flächeneinheit geht, wenn diese auf der Richtung der elektrischen Kraft senkrecht steht. Wenn wir den Einfluß dieser Spannungen und dieses Druckes auf die Volumeinheit des Mediums in dem elektrischen Felde betrachten, so sehen wir, daß sie äquivalent sind einer Spannung $^1/_2\, NR$ in der Richtung der elektrischen Kraft und einem ebenso großen Druck in allen Richtungen senkrecht zu dieser Kraft.

### Faradaysche Röhren in Bewegung.

Bisher haben wir angenommen, daß sich die Faradayschen Röhren in Ruhe befinden. Jetzt wollen wir dazu übergehen, die Wirkungen zu studieren, welche die Bewegung dieser Röhren zur Folge haben müssen. Wir wollen mit der Betrachtung eines sehr einfachen Falles beginnen, nämlich daß von zwei Platten $A$ und $B$ die eine positiv und die andere negativ geladen ist und daß beide Platten, nachdem sie geladen sind, durch einen Leitungsdraht $EFG$ verbunden werden. Dieser Draht wird durch einige außerhalb der Platten liegende Röhren gehen. Diese Röhren ziehen sich aber in einem Leiter auf molekulare Dimensionen zusammen, und infolgedessen verschwindet die Abstoßung, welche sie vorher auf benachbarte Röhren ausübten. Beachten Sie, welchen Einfluß dies auf eine Röhre $PQ$ zwischen den Platten haben wird. $PQ$ war ursprünglich im Gleichgewicht unter dem Einfluß der eigenen Spannung und der von den benachbarten Röhren ausgeübten Abstoßung. Die Abstoßung der von $EFG$ geschnittenen Röhren ist aber jetzt verschwunden, so daß $PQ$ nicht mehr im Gleichgewicht ist, sondern nach $EFG$ hingedrückt wird.

Fig. 5.




Es werden daher mehr und mehr Röhren in $EFG$ hineingedrückt, und die sämtlichen Linien zwischen den Platten werden sich nach $EFG$ hinbewegen. Während sich also die Platten entladen, bewegen sich die Röhren zwischen den Platten rechtwinklig zu sich selbst.

Von welcher physikalischen Wirkung wird diese Bewegung der Röhren begleitet sein? Dadurch, daß die Platten durch $EFG$ verbunden werden, wird ein elektrischer Strom erzeugt, der von der positiv geladenen Platte durch $EFG$ nach der negativ geladenen Platte fließt. Dies ist, wie wir wissen, von einer magnetischen Kraft zwischen den Platten begleitet. Diese magnetische Kraft steht senkrecht auf der Ebene der Zeichnung und ist gleich dem $4\pi$-fachen der Intensität des Stromes in den Platten, oder, wenn $\sigma$ die Dichtigkeit der elektrischen Ladung auf den Platten und $v$ die Geschwindigkeit ist, mit der sich die Ladung bewegt, so ist die magnetische Kraft gleich $4\pi\sigma v$.

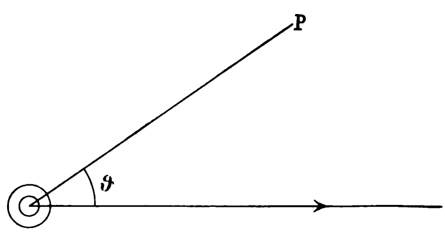
Hier haben wir zwei Erscheinungen, die im stationären elektrostatischen Felde nicht auftreten, nämlich die Bewegung der Faradayschen Röhren und das Vorhandensein einer magnetischen Kraft. Dies läßt vermuten, daß zwischen diesen beiden Erscheinungen ein Zusammenhang besteht und daß die Bewegung der Faradayschen Röhren die Erzeugung einer magnetischen Kraft zur Folge hat. Ich habe die Konsequenzen dieser Annahme verfolgt und gezeigt, daß die Ampèreschen Gesetze über den Zusammenhang zwischen Strom und magnetischer Kraft sowie das Faradaysche Gesetz der Induktion von Strömen ihre Erklärung finden, wenn zwischen der magnetischen Kraft und der Bewegung der Röhren der im folgenden näher angegebene Zusammenhang besteht. Maxwells wichtiger Beitrag zur Theorie der Elektrizität, daß die Änderung in der elektrischen Verschiebung in einem Dielektrikum magnetische Kraft erzeugt, ergibt sich ohne weiteres als eine Folgerung dieser Annahme. Da nämlich die elektrische Verschiebung durch die Dichtigkeit der Faradayschen Röhren gemessen wird, wenn sich die elektrische Verschiebung an irgend einer Stelle ändert, so müssen sich die Faradayschen Röhren nach dieser Stelle hin oder von dieser Stelle hinweg bewegen, und die Bewegung der Faradayschen Röhren hat, wie wir hypothetisch annehmen, magnetische Kraft zur Folge.

Das Gesetz, welches den Zusammenhang zwischen der magnetischen Kraft und der Bewegung der Faradayschen Röhren zum Ausdruck bringt, ist das folgende. Eine Faradaysche Röhre, die sich im Punkte $P$ mit der Geschwindigkeit $v$ bewegt, erzeugt in $P$ eine magnetische Kraft, deren Größe $4\pi v \sin\vartheta$ ist und deren Richtung senkrecht auf der Faradayschen Röhre und auch senkrecht auf der Bewegungsrichtung steht; $\vartheta$ ist der Winkel, den die Faradaysche Röhre mit der Richtung bildet, in der sie sich bewegt. Wir sehen, daß es nur die Bewegung einer Röhre senkrecht zu sich selbst ist, die magnetische Kraft erzeugt. Durch Gleiten einer Röhre in der Richtung ihrer Länge wird eine solche Kraft nicht erzeugt.

## Bewegung einer geladenen Kugel.

Wir wollen diese Resultate auf einen sehr einfachen Fall anwenden, nämlich auf die gleichförmige Bewegung einer geladenen Kugel. Wenn die Geschwindigkeit der Kugel im Vergleich mit der Geschwindigkeit des Lichtes klein ist, so sind die Faradayschen Röhren ebenso, wie wenn die Kugel in Ruhe ist, gleichförmig verteilt und von radialer Richtung. Sie werden von der Kugel mitgeführt. Wenn $e$ die Ladung und $O$ der Mittelpunkt der Kugel ist, so ist die Dichtigkeit der Faradayschen Röhren bei $P$ gleich $\frac{e}{4\pi OP^2}$. Wenn daher $v$ die Geschwindigkeit der Kugel und $\vartheta$ der Winkel zwischen $OP$ und der Bewegungsrichtung der Kugel ist, so ist nach der obigen Regel die magnetische Kraft bei $P$ gleich $\frac{e v \sin\vartheta}{r^2}$. Die Richtung der Kraft steht auf $OP$ und auf der Bewegungsrichtung der Kugel senkrecht. Die magnetischen Kraftlinien sind daher Kreise, deren Mittelpunkte auf der vom Mittelpunkte der Kugel beschriebenen Bahn liegen und deren Ebenen senkrecht auf dieser Bahn stehen. Daher wird eine bewegte elektrische Ladung von einem magnetischen Felde begleitet sein. Wo aber ein magnetisches Feld ist, da ist Energie. Wir wissen, daß in der Volumeinheit des Feldes an einer Stelle, wo die magnetische Kraft $H$ ist, $\frac{\mu H^2}{8\pi}$ Energie-

Fig. 6.



einheiten sind, wenn $\mu$ die magnetische Permeabilität des **Mediums** ist. Bei der bewegten Kugel ist die der Volumeinheit entsprechende Energie bei $P$ gleich $\frac{\mu e^2 v^2 \sin^2 \vartheta}{8 \pi O P^4}$. Wenn wir die Summe dieser Energie für alle Teile des Feldes außerhalb der Kugel nehmen, so finden wir den Wert $\frac{\mu e^2 v^2}{3 a}$, wenn $a$ der **Radius** der Kugel ist. Wenn $m$ die Masse der Kugel ist, so ist die kinetische Energie der Kugel $\frac{1}{2} m v^2$. Hierzu kommt noch die Energie außerhalb der Kugel, die, wie wir gesehen haben, $\frac{\mu e^2 v^2}{3 a}$ ist. Die gesamte kinetische Energie des Systems ist also $\frac{1}{2}\left(m + \frac{2 \mu}{3} \frac{e^2}{a}\right) v^2$, oder die Energie ist dieselbe, als ob die Masse der Kugel nicht $m$, sondern $m + \frac{2 \mu}{3} \frac{e^2}{a}$ wäre. Infolge der Ladung ist also die Masse der Kugel $\frac{2 \mu e^2}{3 a}$. Dies ist ein sehr wichtiges Resultat, da es beweist, daß ein Teil der Masse einer geladenen Kugel von ihrer Ladung herrührt. Ich werde Sie später mit Betrachtungen bekannt machen, aus denen hervorgeht, daß es nicht unmöglich ist, daß die gesamte Masse eines Körpers diesen Ursprung hat.

Bevor ich jedoch zu diesem Punkte übergehe, möchte ich die Zunahme, die in der Masse der Kugel stattfindet, durch einige Analogien erläutern, die aus anderen Zweigen der Physik entlehnt sind. Die erste dieser Analogien bietet die Bewegung einer Kugel in einer reibungslosen Flüssigkeit. Wenn sich die Kugel bewegt, so setzt sie die umgebende Flüssigkeit in Bewegung, und zwar mit einer Geschwindigkeit, die ihrer eigenen Geschwindigkeit proportional ist. Um die Kugel zu bewegen, haben wir daher nicht nur die Substanz der Kugel selbst, sondern auch die umgebende Flüssigkeit zu bewegen. Die Folge hiervon ist, daß sich die Kugel so verhält, als ob ihre Masse durch die Masse eines bestimmten Volumens der Flüssigkeit vergrößert worden sei. Dies Volumen ist, wie Green 1833 bewiesen hat, das halbe Volumen der Kugel. Die Masse eines Zylinders, der sich senkrecht zu seiner Länge bewegt, wird um die Masse eines gleichen

Volumens der Flüssigkeit vergrößert. Bei gestreckten Körpern, wie bei einem Zylinder, hängt die Vergrößerung der Masse von der Richtung ab, in welcher sich der Körper bewegt. Sie ist viel geringer, wenn sich der Körper in seiner Längsrichtung, als wenn er sich seitwärts bewegt. Die Masse eines solchen Körpers hängt von der Richtung ab, in der er sich bewegt.

Lassen Sie uns jetzt aber zu der bewegten elektrisierten Kugel zurückkehren. Wir haben gesehen, daß ihre Masse infolge der Ladung um $\frac{2\mu e^2}{3a}$ vergrößert wird. Wenn sie sich also mit der Geschwindigkeit $v$ bewegt, so ist die Bewegungsgröße nicht $mv$, sondern $\left(m + \frac{2\mu e^2}{3a}\right)v$. Die hinzukommende Bewegungsgröße $\frac{2\mu e^2}{3a}v$ ist nicht in der Kugel, sondern in dem die Kugel umgebenden Raume. In diesem Raume ist gewöhnliche mechanische Bewegungsgröße, deren Resultierende $\frac{2\mu e^2}{3a}v$ ist, und deren Richtung der Bewegungsrichtung der Kugel parallel ist. Es ist wesentlich, sich daran zu erinnern, daß diese Bewegungsgröße von gewöhnlicher Bewegungsgröße in keiner Weise verschieden ist und zu der Bewegungsgröße bewegter Körper hinzugefügt und von derselben hinweggenommen werden kann. Das Vorhandensein dieser Bewegungsgröße kann ich nicht nachdrücklich genug hervorheben, da durch sie das Verhalten des elektrischen Feldes dem eines mechanischen Systems vollkommen analog gemacht wird. So sind, um ein Beispiel anzuführen, nach dem dritten Newtonschen Bewegungsgesetz Wirkung und Gegenwirkung gleich und entgegengesetzt, so daß in einem in sich selbst abgeschlossenen System die Bewegungsgröße in jeder Richtung unveränderlich ist. Nun gibt es bei vielen elektrischen Systemen anscheinende Abweichungen von diesem Prinzip. Wenn z. B. ein ruhender geladener Körper von einem elektrischen Stoß getroffen wird, so bekommt der geladene Körper, wenn die elektrische Kraft des Stoßes auf ihn einwirkt, Geschwindigkeit und Bewegungsgröße, so daß, wenn der Stoß vorüber ist, seine Bewegungsgröße nicht mehr dieselbe ist wie ursprünglich. Wenn wir daher unsere Aufmerksamkeit auf die Bewegungsgröße des geladenen Körpers beschränken, d. h. wenn wir annehmen, daß sich die Bewegungsgröße notwendigerweise auf das beschränkt, was wir als gewöhnliche Materie betrachten, so steht der Vorgang mit dem dritten Bewegungsgesetze in Widerspruch, da die einzige Bewegungsgröße, die von diesem beschränkten Gesichtspunkte aus erkannt wird, eine Änderung erlitten hat. Die Erscheinung wird aber mit diesem Gesetz in Einklang gebracht, wenn wir das Vorhandensein der Bewegungsgröße im elektrischen Felde erkennen. Nach dieser Auffassung war in dem Stoße Bewegungsgröße enthalten, bevor er den geladenen Körper erreichte, dagegen war in dem Körper keine Bewegungsgröße enthalten. Nachdem der Stoß den Körper getroffen hatte, war etwas Bewegungsgröße in dem Körper und ein geringerer Betrag in dem Stoße, und zwar so, daß der Verlust von Bewegungsgröße in dem Stoße gleich dem Gewinn von Bewegungsgröße in dem Körper war.

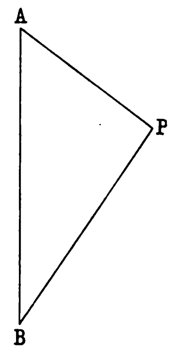
Wir gehen jetzt dazu über, diese Bewegungsgröße etwas eingehender zu betrachten. Ich habe in meinen „Recent Researches on Electricity and Magnetism“ den Betrag der Bewegungsgröße für einen beliebigen Punkt des elektrischen Feldes berechnet und den folgenden Satz bewiesen. Ist $N$ die Anzahl der Faradayschen Röhren, die durch die auf ihrer Richtung senkrecht stehende Flächeneinheit gehen, $B$ die magnetische Induktion, $\vartheta$ der Winkel zwischen der Induktion und den Faradayschen Röhren, dann ist die der Volumeinheit entsprechende Bewegungsgröße $NB \sin\vartheta$. Die Richtung der Bewegungsgröße steht senkrecht auf der magnetischen Induktion und auf den Faradayschen Röhren. Viele von Ihnen werden bemerken, daß die Bewegungsgröße dem sogenannten Poyntingschen Vektor parallel ist, d. h. dem Vektor, der die Richtung angibt, in welcher Energie durch das Feld fließt.

### Moment der Bewegungsgröße, die durch einen elektrischen Punkt und einen Magnetpol erzeugt wird.

Um uns mit der Verteilung der Bewegungsgröße bekannt zu machen, wollen wir einige einfache Fälle etwas eingehender betrachten. Wir beginnen mit dem einfachsten Falle, dem eines elektrischen Punktes und eines Magnetpoles. $A$, Fig. 7, sei der

Punkt und $B$ der Pol. Da die Bewegungsgröße in einem beliebigen Punkte $P$ auf $AP$, der Richtung der Faradayschen Röhren, und auch auf $BP$, der magnetischen Induktion, senkrecht steht, so sehen wir, daß die Bewegungsgröße senkrecht auf der Ebene $ABP$ steht. Wenn wir daher eine Reihe von Linien so ziehen, daß ihre Richtung in jedem Punkte mit der Richtung der Bewegungsgröße in diesem Punkte zusammenfällt, so bilden diese Linien eine Reihe von Kreisen, deren Ebenen senkrecht auf der Linie $AB$ stehen und deren Mittelpunkte in dieser Linie liegen. Diese Verteilung der Bewegungsgröße ist hinsichtlich der Richtung dieselbe wie bei einem Kreisel, der sich um $AB$ dreht. Wir wollen nun ermitteln, wem diese Verteilung der Bewegungsgröße durch das ganze Feld hindurch äquivalent ist.

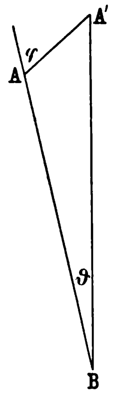
Fig. 7.




Es ist einleuchtend, daß die resultierende Bewegungsgröße in jeder beliebigen Richtung gleich Null ist, allein da das System um $AB$ rotiert und die Richtung der Rotation überall dieselbe ist, so muß ein bestimmtes Moment der Bewegungsgröße in bezug auf $AB$ existieren. Wenn wir den Wert desselben mit Hilfe des oben gegebenen Ausdruckes für die Bewegungsgröße berechnen, so erhalten wir als Wert des Momentes der Bewegungsgröße in bezug auf $AB$ den sehr einfachen Ausdruck $em$, in welchem $e$ die Ladung des Punktes und $m$ die Polstärke bedeutet. Mit Hilfe dieses Ausdruckes können wir das Moment der Bewegungsgröße für jede beliebige Verteilung von elektrischen Punkten und Magnetpolen finden.

Dieser Begriff der Bewegungsgröße ermöglicht es uns, in unserem System aus Punkt und Pol die Kraft zu berechnen, die auf eine bewegte Ladung oder auf einen bewegten Magnetpol wirkt. Wenn wir annehmen, der elektrische Punkt bewege sich in der Zeit $\delta t$ von $A$ nach $A'$, so ist das Moment der Bewegungsgröße immer noch $em$, aber seine Achse ist jetzt nicht mehr $AB$, sondern $A'B$. Das Moment der Bewegungsgröße des Feldes hat sich also geändert, aber das gesamte Moment der Bewegungsgröße des aus Punkt, Pol und Feld bestehenden Systems muß konstant sein, so daß die Änderung im Moment der Bewegungsgröße des Feldes von einer gleichen und entgegengesetzten Änderung im Moment der Bewegungsgröße des Pols und des Punktes begleitet sein muß. Die vom Punkt gewonnene Bewegungsgröße muß gleich und entgegengesetzt der vom Pol gewonnenen sein, da die gesamte Bewegungsgröße gleich Null ist. Wenn $\vartheta$ der Winkel $ABA'$ ist, so ist die Änderung des Momentes der Bewegungsgröße $em \sin \vartheta$, mit einer Achse senkrecht zu $AB$ in der Ebene der Zeichnung. Wenn $\delta J$ und $-\delta J$ die Änderungen in den Bewegungsgrößen von $A$ und $B$ sind, so müssen $\delta J$ und $-\delta J$ einem Kräftepaar äquivalent sein, dessen Achse in der Ebene der Figur senkrecht auf $AB$ steht und dessen Moment gleich $em \sin \vartheta$ ist. Also steht $\delta J$ senkrecht auf der Ebene der Figur und

Fig. 8.




$$\delta J \,.\, AB = em \sin \vartheta = \frac{em\, AA' \sin \varphi}{AB},$$

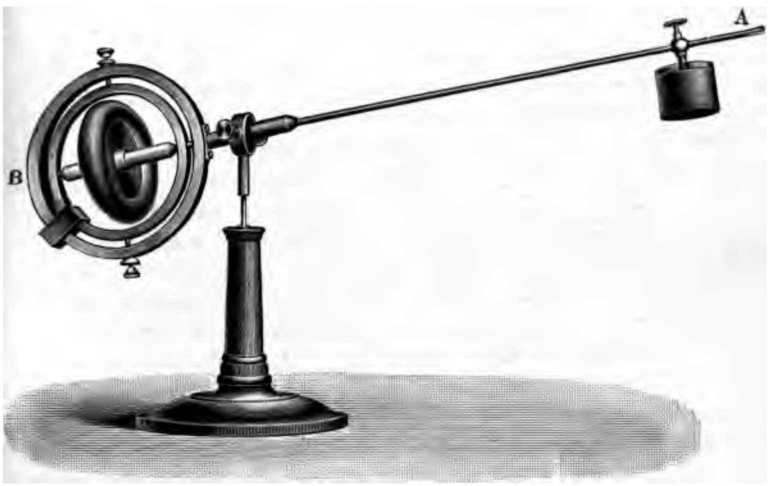
wenn $\varphi$ der Winkel $BAA'$ ist. Wenn $v$ die Geschwindigkeit von $A$ ist, so ist $AA' = v\,\delta t$, und wir erhalten

$$\delta J = \frac{em\, v \sin \varphi\, \delta t}{AB^2}.$$

Diese Änderung in der Bewegungsgröße kann als die Wirkung einer Kraft $F$ angesehen werden, die auf der Ebene der Figur senkrecht steht und die das Maß für die Zunahme der Bewegungsgröße oder $\frac{\delta J}{\delta t}$ ist. So erhalten wir $F = \frac{em\, v \sin \varphi}{AB^2}$. Auf den Punkt wirkt also eine Kraft gleich $e$ multipliziert mit der auf der Bewegungsrichtung senkrecht stehenden Komponente der magnetischen Kraft. Die Richtung der auf den Punkt wirkenden Kraft steht senkrecht auf seiner Geschwindigkeit und auf der magnetischen Kraft. Eine ebensogroße Kraft von entgegengesetzter Richtung wirkt auf den Magnetpol.

Der Wert von $F$, den wir gefunden haben, ist der gewöhnliche Ausdruck für die mechanische Kraft, die auf ein bewegtes geladenes Teilchen in einem magnetischen Felde wirkt. Wenn man die Stärke des magnetischen Feldes mit $H$ bezeichnet, so geht der Ausdruck über in $e v H \sin \varphi$. Die auf die Einheit der Ladung wirkende Kraft ist also $v H \sin \varphi$. Diese mechanische Kraft kann demnach als die Wirkung einer elektrischen Kraft $v H \sin \varphi$ betrachtet werden, und wir können das Resultat so aussprechen, daß, wenn sich ein geladener Körper in einem magnetischen Felde bewegt, eine elektrische Kraft $v H \sin \varphi$ erzeugt wird. Diese Kraft ist die bekannte elektromotorische Kraft der durch Bewegung im magnetischen Felde erzeugten Induktion.

Fig. 9.




Die zur Wirkung kommenden Kräfte werden durch die relative Bewegung von Pol und Punkt hervorgerufen. Wenn sich diese mit derselben Geschwindigkeit bewegen, so ändert sich die Richtung ihrer Verbindungslinie nicht, das Moment der Bewegungsgröße des Systems bleibt unverändert, und es treten keine Kräfte auf, die auf den Punkt oder auf den Pol wirken.

Die Verteilung der Bewegungsgröße in dem System von Pol und Punkt ist in mancher Hinsicht ähnlich wie in einem Kreisel, der sich um die Linie $AB$ dreht. Wir können die auf einen bewegten elektrischen Körper wirkenden Kräfte durch das Verhalten eines solchen Kreisels veranschaulichen. In Fig. 9, die ein im Gleichgewicht befindliches Gyroskop vorstellt, welches um die Achse $AB$ rotiert, stelle das Gewicht bei $A$ den elektrischen

Punkt und die Scheibe bei $B$ den Magnetpol vor. Man nehme an, der Apparat rotiere, während sich $AB$ in horizontaler Lage befindet. Wenn ich dann mit einem vertikalen Stabe horizontal gegen $AB$ drücke, so bewegt sich der Punkt $A$ nicht nur in der Richtung, in welcher er gedrückt wird, horizontal vorwärts, sondern er bewegt sich auch vertikal aufwärts oder abwärts, gerade so wie sich ein elektrischer Punkt bewegen würde, wenn er in derselben Weise vorwärts gedrückt würde und wenn auf ihn ein bei $B$ befindlicher Magnetpol wirkte.

## Maxwells Vektorpotential.

Ein sehr enger Zusammenhang besteht zwischen der Bewegungsgröße, die durch einen elektrischen Punkt und ein magnetisches System erzeugt wird, und dem Vektorpotential, einer Größe, die in Maxwells Theorie der Elektrizität eine sehr wichtige Rolle spielt. Mit Hilfe des Ausdruckes für das von einem geladenen Punkt und einem Magnetpol erzeugte Moment der Bewegungsgröße können wir sofort das Moment der Bewegungsgrösse finden, welches durch eine elektrische Ladung $e$ im Punkt $P$ und einen kleinen Magneten $AB$ erzeugt wird. Der negative Pol dieses Magneten befinde sich bei $A$, der positive bei $B$, und $m$ sei die Stärke jedes der beiden Pole. Durch eine einfache Rechnung findet man, daß in diesem Falle die Achse des resultierenden Momentes der Bewegungsgröße in der Ebene $PAB$ liegt und senkrecht auf $PO$ steht, wenn $O$ der Mittelpunkt von $AB$ ist, und daß die Größe des Momentes der Bewegungsgröße gleich $e.m.AB\,\frac{\sin\varphi}{OP^2}$ ist, wenn $\varphi$ der Winkel ist, den $AB$ mit $OP$ bildet. Dieses Moment der Bewegungsgröße ist nach Richtung und Größe äquivalent demjenigen einer Bewegungsgröße $e.m.AB\,\frac{\sin\varphi}{OP^2}$, welches im Punkte $P$ senkrecht auf der Ebene $PAB$ steht, und dem einer anderen Bewegungsgröße von gleicher Größe und entgegengesetzter Richtung in $O$. Der Vektor $m\,AB\,\frac{\sin\varphi}{OP^2}$ in $P$ senkrecht zur Ebene $PAB$ ist der Vektor, den Maxwell das vom Magneten im Punkte $P$ erzeugte Vektorpotential nennt.

Wenn wir dieses Vektorpotential mit $J$ bezeichnen, so sehen wir, daß die durch die Ladung und den Magneten erzeugte Bewegungsgröße äquivalent ist einer Bewegungsgröße $eJ$ bei $P$ und einer Bewegungsgröße $-eJ$ beim Magneten.

Dies können wir offenbar auf jedes beliebige komplexe System von Magneten ausdehnen. Wenn dann $J$ das Vektorpotential dieses Systems in Punkt $P$ ist, so ist die Bewegungsgröße im Felde äquivalent einer Bewegungsgröße $eJ$ im Punkte $P$ zusammen mit Bewegungsgrößen an jedem der Magneten gleich $-e$ (Vektorpotential des Magneten im Punkte $P$). Wenn das magnetische Feld nicht durch permanente Magnete, sondern nur durch elektrische Ströme erzeugt wird, so unterscheidet sich die Bewegungsgröße eines Systems, welches aus einem elektrischen Punkt und den Strömen besteht, in einigen seiner Eigenschaften von der Bewegungsgröße eines durch permanente Magnete erzeugten magnetischen Feldes. In dem letzteren Falle existiert, wie wir gesehen haben, ein Moment der Bewegungsgröße, aber keine resultierende Bewegungsgröße. Wenn dagegen das magnetische Feld nur durch elektrische Ströme erzeugt wird, so ist leicht zu beweisen, daß eine resultierende Bewegungsgröße existiert, daß dagegen das Moment der Bewegungsgrösse in bezug auf eine Linie, die durch das elektrische Teilchen geht, verschwindet. Durch eine einfache Rechnung läßt sich zeigen, daß die gesamte Bewegungsgröße im Felde äquivalent ist einer Bewegungsgröße $eJ$ im elektrischen Punkt, wenn $J$ das im Punkte $P$ durch die Ströme erzeugte Vektorpotential ist.

Einerlei also ob das magnetische Feld durch permanente Magnete oder durch elektrische Ströme, oder teils durch Magnete und teils durch elektrische Ströme erzeugt wird, so ist die Bewegungsgröße, wenn bei $P$ ein elektrischer Punkt in das Feld gebracht wird, äquivalent einer Bewegungsgröße $eJ$ bei $P$, wenn $J$ das Vektorpotential bei $P$ ist. Wenn das magnetische Feld nur durch Ströme erzeugt wird, so ist hiermit die Bewegungsgröße des Feldes vollständig zum Ausdruck gebracht. Wenn das magnetische Feld zum Teil durch Magnete erzeugt wird, so haben wir außer dieser Bewegungsgröße bei $P$ noch andere Bewegungsgrößen bei den Magneten. Die Bewegungsgröße bei jedem einzelnen Magneten ist das $-e$fache des durch den Magneten bei $P$ erzeugten Vektorpotentials.

Die bekannten Ausdrücke für die durch elektromagnetische Induktion erzeugten elektromotorischen Kräfte ergeben sich ohne weiteres aus diesem Resultat. Denn nach dem dritten Bewegungsgesetz muß die Bewegungsgröße eines in sich selbst abgeschlossenen Systems konstant sein. Nun besteht die Bewegungsgröße aus 1. der Bewegungsgröße im Felde, 2. der Bewegungsgröße des elektrischen Punktes und 3. den Bewegungsgrößen der Magnete oder der von Strömen durchflossenen Stromkreise. Da (1) einer Bewegungsgröße $eJ$ an dem elektrischen Teilchen äquivalent ist, so sehen wir, daß Änderungen in der Bewegungsgröße des Feldes von Änderungen in der Bewegungsgröße des Teilchens begleitet sein müssen. Ist $M$ die Masse des elektrischen Teilchens und sind $u$, $v$, $w$ die Komponenten seiner Geschwindigkeit parallel zu den Achsen der $x$, $y$ und $z$, $F$, $G$, $H$ die Komponenten des Vektorpotentials bei $P$ parallel zu diesen Achsen, so ist die Bewegungsgröße des Feldes äquivalent den Bewegungsgrößen $eF$, $eG$, $eH$ bei $P$ parallel zu den Achsen der $x$, $y$ und $z$; und die Bewegungsgröße des geladenen Punktes bei $P$ hat als Komponenten $Mu$, $Mv$ und $Mw$. Da die Bewegungsgröße konstant bleibt, so ist $Mu + eF$ konstant, folglich, wenn $\delta u$ und $\delta F$ gleichzeitige Änderungen in $u$ und $F$ sind,

$$M\delta u + e\delta F = 0,$$

oder

$$M\frac{du}{dt} = -e\frac{dF}{dt}.$$

Aus dieser Gleichung ersehen wir, daß sich der geladene Punkt so verhält, als ob auf ihn parallel zur $x$-Achse eine mechanische Kraft gleich $-e\frac{dF}{dt}$, d. h. eine elektrische Kraft gleich $-\frac{dF}{dt}$ wirkte. In ähnlicher Weise sehen wir, daß parallel der $y$-Achse eine Kraft $-\frac{dG}{dt}$ und parallel der $z$-Achse eine Kraft $-\frac{dH}{dt}$ wirkt. Dies sind die bekannten Ausdrücke für die Kräfte, welche durch elektromagnetische Induktion erzeugt werden, und wir sehen, daß sie eine unmittelbare Konsequenz des Satzes bilden, daß Wirkung und Gegenwirkung gleich und entgegengesetzt sind.

Wer Faradays Experimental Researches gelesen hat, wird sich erinnern, daß er fortwährend auf das, was er den „elektrotonischen Zustand" nennt, Bezug nimmt. Er nahm z. B. an, daß ein Draht, der von einem Strom durchflossen wird, im elektrotonischen Zustande ist, wenn er sich in einem magnetischen Felde befindet. Die Wirkungen dieses Zustandes können nicht entdeckt werden, solange das Feld konstant bleibt; nur wenn es sich ändert, tritt er in Wirksamkeit. Dieser elektrotonische Zustand Faradays ist die im Felde existierende Bewegungsgröße.

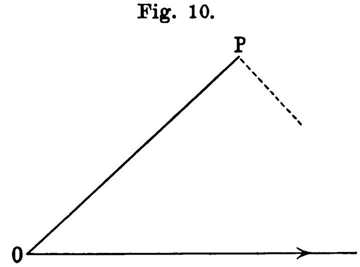
---

## Zweites Kapitel.

# Elektrische und gebundene Masse.

In diesem Kapitel will ich den Zusammenhang zwischen der Bewegungsgröße im elektrischen Felde und den Faradayschen Röhren betrachten, durch die wir, wie ich in der letzten Vorlesung gezeigt habe, uns den Zustand des elektrischen Feldes veranschaulichen können. Wir wollen zunächst die Bewegung einer geladenen Kugel betrachten. Die elektrischen Kraftlinien sind radial, die magnetischen Kraftlinien sind Kreise, deren gemeinsame Achse die Linie ist, auf der sich der Mittelpunkt der Kugel bewegt. Die Bewegungsgröße bei einem Punkt $P$ steht senkrecht auf jeder dieser beiden Richtungen, folglich auf $OP$ in der Ebene, in welcher $P$ liegt und die Linie, auf der sich der Mittelpunkt der Kugel bewegt.

Fig. 10.




Wenn die Anzahl der Faradayschen Röhren, die bei $P$ durch die Flächeneinheit gehen, die hier auf $OP$ senkrecht steht, $H$ ist, so ist die magnetische Induktion bei $P$, wenn $\mu$ die magnetische Permeabilität des die Kugel umgebenden Mediums ist, $4\pi\mu N v \sin\vartheta$. In diesem Ausdruck bedeutet $v$ die Geschwindigkeit der Kugel und $\vartheta$ den Winkel, den $OP$ mit der Bewegungsrichtung der Kugel bildet. Nach der auf S. 24 gegebenen Regel ist bei $P$ die Bewegungsgröße in der Volumeinheit des Mediums $N \times 4\pi\mu N v \sin\vartheta$ oder $4\pi\mu N^2 v \sin\vartheta$, und liegt in der Richtung derjenigen Komponente der Geschwindigkeit der Faradayschen Röhren, die auf ihrer Länge senkrecht steht. Dies ist aber genau die Bewegungsgröße, welche erzeugt werden würde, wenn sich die Röhren senkrecht zu ihrer Länge bewegten und eine Masse des umgebenden Mediums gleich $4\pi\mu N^2$ per Volumeinheit mitführten, während die Röhren selbst keine Masse besitzen und nichts von dem Medium mitführen, wenn sie parallel zu ihrer eigenen Länge in demselben gleiten. Wir nehmen in der Tat an, daß sich die Röhren genau so wie lange dünne Zylinder verhalten, wenn sie sich in Wasser bewegen. Wenn sie sich endwärts, d. h. parallel ihrer Länge bewegen, so nehmen sie nur sehr wenig Wasser mit. Bewegen sie sich dagegen seitwärts, d. h. senkrecht zu ihrer Achse, so nimmt jede Längeneinheit der Röhre eine bestimmte Menge Wasser mit. Wenn die Länge des Zylinders im Vergleich mit der Breite sehr groß ist, so kann die Menge Wasser, die mitgenommen wird, wenn er sich endwärts bewegt, im Vergleich zu der Menge, die mitgenommen wird, wenn er sich seitwärts bewegt, vernachlässigt werden. Wenn die Röhre weiter keine Masse besäße als diejenige, welche von der Wasserverdrängung herrührt, so würde sie Masse besitzen, wenn sie sich seitwärts bewegt, aber sie würde keine Masse besitzen, wenn sie sich endwärts bewegt.

Die Masse $4\pi\mu N^2$, welche von den Röhren in der Volumeinheit mitgeführt wird, wollen wir die Masse des gebundenen Äthers nennen. Es ist sehr bemerkenswert, daß die elektrostatische Energie $E$ in der Volumeinheit der Masse $M$ des gebundenen Äthers in diesem Volumen proportional ist. Dies läßt sich leicht folgendermaßen beweisen. Wenn $K$ die spezifische Induktionskapazität des Mediums ist, so ist $E = \frac{2\pi N^2}{K}$. Da nun $M = 4\pi\mu N^2$, so ist

$$E = \frac{1}{2}\frac{M}{\mu K}.$$

Wenn aber $V$ die Geschwindigkeit ist, mit der sich das Licht in dem Medium fortpflanzt, so ist $\frac{1}{\mu K} = V^2$, folglich

$$E = \tfrac{1}{2} M V^2.$$

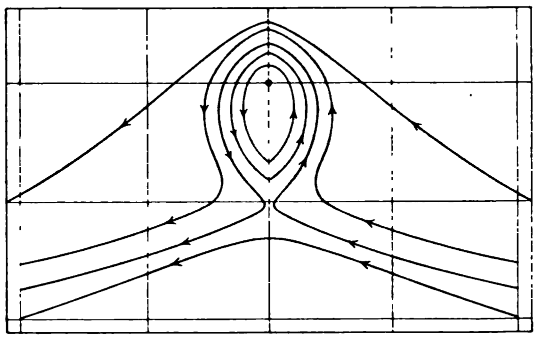
$E$ ist also gleich der kinetischen Energie, welche die gebundene Masse besitzt, wenn sie sich mit der Geschwindigkeit des Lichtes bewegt.

Die Masse des gebundenen Äthers in der Volumeinheit ist $4 \pi \mu N^2$, wenn $N$ die Anzahl der Faradayschen Röhren ist. Folglich ist der Betrag der gebundenen Masse für die Längeneinheit jeder Faradayschen Röhre $4 \pi \mu N$. Diese ist aber, wie wir gesehen haben, der Spannung in jeder Röhre proportional, so daß wir die Faradayschen Röhren als straff gespannte Saiten von veränderlicher Masse und Spannung betrachten können. Die Spannung ist aber immer der Masse der Längeneinheit der Saite proportional.

Da die Masse des von einer Faradayschen Röhre eingeschlossenen Äthers der Anzahl $N$ der Faradayschen Röhren in der Volumeinheit proportional ist, so sehen wir, daß die Masse und die Bewegungsgröße einer Faradayschen Röhre nicht ausschließlich von der Konfiguration und der Geschwindigkeit dieser Röhre selbst, sondern auch von der Anzahl und der Geschwindigkeit der benachbarten Röhren abhängt. Hierfür gibt es in dynamischen Systemen zahlreiche Analogien. Wenn sich z. B. eine Anzahl von Zylindern mit parallelen Achsen in einer nicht zusammendrückbaren Flüssigkeit bewegt, so hängt die Bewegungsgröße jedes einzelnen Zylinders von der Lage und der Geschwindigkeit der benachbarten Zylinder ab. Das folgende hydrodynamische System kann dazu dienen, die Tatsache zu veranschaulichen, daß die gebundene Masse dem Quadrate der Anzahl der in der Volumeinheit enthaltenen Faradayschen Röhren proportional ist.

Wir nehmen an, ein zylindrischer Wirbel von der Stärke $m$ befinde sich in einer Flüssigkeitsmasse, deren Geschwindigkeit, wenn sie nicht durch den Wirbel gestört würde, nach Größe und Richtung konstant sein und auf der Achse des Wirbels senkrecht stehen würde. Die Stromlinien für einen solchen Fall werden durch Fig. 11 veranschaulicht. Sie stellt einen Durchschnitt durch den Wirbel senkrecht zur Achse desselben vor. Wir sehen, daß einige dieser Linien in der Nähe des Wirbels geschlossene Kurven sind. Da die Flüssigkeit die Stromlinien nicht kreuzt, so bleibt die Flüssigkeit innerhalb einer geschlossenen Kurve stets in der Nähe des Wirbels und bewegt sich mit derselben fort. Der Wirbel schließt also eine Flüssigkeitsmasse ein, die gleich derjenigen Masse ist, die von der größten der geschlossenen Strom-

Fig. 11.



linien eingeschlossen wird. Wenn $m$ die Stärke des Wirbels und $a$ die Geschwindigkeit der ungestörten Strömung der Flüssigkeit ist, so können wir leicht zeigen, dass die von dem Wirbel eingeschlossene Flüssigkeitsmasse proportional $\frac{m^2}{a^2}$ ist. Wenn wir also annehmen, daß $m$ der Anzahl der Faradayschen Röhren in der Flächeneinheit proportional ist, so veranschaulicht das System den Zusammenhang zwischen der gebundenen Masse und der Stärke des elektrischen Feldes.

## Einfluß der Geschwindigkeit auf die gebundene Masse.

Ich will jetzt eine andere Konsequenz der Vorstellung betrachten, daß die Masse eines geladenen Teilchens durch die Masse des Äthers erzeugt wird, der durch die mit der Ladung verbundene Faradaysche Röhre gebunden ist. Wenn sich diese Röhren senkrecht zu ihrer Länge bewegen, so führen sie eine beträchtliche Menge des Äthers, durch den sie sich bewegen, mit.

Wenn sie sich dagegen parallel zu ihrer Länge bewegen, so gleiten sie durch die Flüssigkeit, ohne sie in Bewegung zu setzen. Wir wollen betrachten, wie sich ein langer dünner Zylinder von der Form einer Faradayschen Röhre verhalten wird, wenn er sich in einer Flüssigkeit bewegt.

Wenn ein solcher Körper vollkommen torsionsfrei ist, so bewegt er sich nicht, wie Sie vielleicht auf den ersten Blick erwarten, mit der Spitze voran, sondern er stellt sich im Gegenteil der Länge nach der Bewegungsrichtung entgegen, nämlich so, daß er eine möglichst große Menge der Flüssigkeit, durch die er sich bewegt, mit sich führt. Dies Verhalten läßt sich durch zahlreiche Erscheinungen veranschaulichen. Die bekannteste ist die, daß fallende Blätter der Bewegungsrichtung nicht den Rand zuwenden, sondern daß sie mit mehr oder weniger horizontaler Fläche herabflattern.

Wenn wir dies auf die geladene Kugel anwenden, so sehen wir, daß die mit der Kugel verbundenen Faradayschen Röhren streben werden, sich senkrecht gegen die Bewegungsrichtung der Kugel zu stellen, so daß, wenn weiter nichts in Betracht käme, sämtliche Faradaysche Röhren in die Äquatorialebene hineingedrückt werden würden, d. h. in diejenige Ebene, die auf der Bewegungsrichtung der Kugel senkrecht steht, da sie sich in dieser Lage sämtlich senkrecht zu ihrer Länge bewegen würden. Wir müssen uns jedoch daran erinnern, daß sich die Faradayschen Röhren gegenseitig abstoßen, so daß, wenn sie in der Äquatorialregion zusammengedrängt wären, hier der Druck größer sein würde als in der Nähe des Pols. Dies würde zur Folge haben, daß die Faradayschen Röhren in diejenige Lage zurückgedrängt werden, in welcher sie gleichmäßig über die ganze Kugel verteilt sind. Die wirkliche Verteilung der Faradayschen Röhren ist ein Mittelding zwischen diesen beiden Extremen. Sie sind nicht sämtlich in die Äquatorialebene zusammengedrängt, sind aber auch nicht gleichmäßig verteilt. Sie befinden sich in der Äquatorialregion in größerer Menge als in anderen Regionen. Der Überschuß der Dichtigkeit der Röhren in der Äquatorialregion wächst mit der Geschwindigkeit, mit der sich die Ladung bewegt. Wenn sich eine Faradaysche Röhre in der Äquatorialgegend befindet, so umschließt sie mehr Äther, als wenn sie sich in der Nähe der Pole befindet, so daß die Verschiebung der

Faradayschen Röhren vom Pol nach dem Äequator die Menge des von den Röhren umschlossenen Äthers und infolgedessen die Masse des Körpers vermehrt.

Die Wirkung der Bewegung der Kugel besteht, wie nachgewiesen ist (vgl. Heaviside, *Phil. Mag.*, April 1889; „Recent Researches“, p. 19) darin, daß jede Faradaysche Röhre nach der Äquatorialebene; d. h. nach derjenigen Ebene durch den Mittelpunkt der Kugel verschoben wird, die auf ihrer Bewegungsrichtung senkrecht steht, und zwar in der Weise, daß die Projektion der Röhre auf diese Ebene dieselbe bleibt wie bei der gleichförmigen Verteilung der Röhren, aber so, daß der Abstand aller Punkte der Röhre von der Äquatorialebene im Verhältnis $\sqrt{V^2 - v^2}$ zu $V$ verkleinert wird, wenn $V$ die Geschwindigkeit des Lichtes in dem Medium und $v$ die Geschwindigkeit des geladenen Körpers ist.

Aus diesem Resultate ersehen wir, daß nur dann, wenn die Geschwindigkeit des geladenen Körpers mit der Geschwindigkeit des Lichtes vergleichbar ist, die Änderung in der Verteilung der Faradayschen Röhren infolge der Bewegung des Körpers merklich wird.

In meinem „Recent Researches on Electricity and Magnetism“, p. 21, habe ich die Bewegungsgröße $J$ für die Umgebung einer Kugel vom Radius $a$, die ihren Mittelpunkt in dem bewegten elektrischen Körper hat, berechnet und nachgewiesen, daß der Wert von $J$ durch den folgenden Ausdruck gegeben ist:

$$J = \frac{e^2}{2a} \frac{V^2}{(V^2 - v^2)^{1/2}} \left\{ \vartheta \left(1 - \frac{1}{4} \frac{V^2}{v^2}\right) + \frac{1}{2} \sin 2\vartheta \left(1 + \frac{1}{4} \frac{V^2}{v^2} \cos 2\vartheta\right)\right\} \quad \ldots \ldots \quad (1)$$

$V$ und $v$ bedeuten wie vorher die Geschwindigkeit des Lichtes und die Geschwindigkeit des Teilchens, und $\vartheta$ ist gegeben durch die Gleichung

$$\sin \vartheta = \frac{v}{V}.$$

Die Masse der Kugel ist daher infolge der Ladung um $\frac{J}{v}$ vergrößert, und wir ersehen daher aus der Gleichung (1), daß für

Geschwindigkeiten des geladenen Körpers, die mit der Geschwindigkeit des Lichtes vergleichbar sind, die Masse des Körpers mit der Geschwindigkeit größer wird. Aus Gleichung (1) geht hervor, daß wir, wenn der Einfluß der Geschwindigkeit auf die Masse entdeckt werden soll, mit außerordentlich kleinen Teilchen operieren müssen, die sich mit sehr großen Geschwindigkeiten bewegen. Nun werden aber Teilchen, deren Masse viel kleiner ist als die Masse irgend eines bekannten Atoms oder Moleküls, vom Radium mit Geschwindigkeiten fortgeschleudert, die in einigen Fällen der Geschwindigkeit des Lichtes nahe kommen, und das Verhältnis der elektrischen Ladung zur Masse für Teilchen dieser Art ist vor kurzem der Gegenstand einer sehr interessanten Untersuchung von Kaufmann gewesen. Die Resultate dieser Untersuchung sind aus der folgenden Tabelle zu ersehen. Die erste Kolumne enthält die Werte der Geschwindigkeiten des Teilchens, in Centimetern per Sekunde ausgedrückt, die zweite Kolumne den Wert des Bruches $\frac{e}{m}$, in welchem $e$ die Ladung und $m$ die Masse des Teilchens bedeutet.

| $v \times 10^{-10}$ | $\frac{e}{m} \times 10^{-7}$ |
|---|---|
| 2,83 | 0,62 |
| 2,72 | 0,77 |
| 2,59 | 0,975 |
| 2,48 | 1,17 |
| 2,36 | 1,31 |

Aus dieser Tabelle geht hervor, daß der Wert von $\frac{e}{m}$ mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt. Dies zeigt an, daß bei konstanter Ladung die Masse mit der Geschwindigkeit zunimmt. Die Resultate Kaufmanns setzen uns in den Stand, denjenigen Teil der Masse, der von der elektrischen Ladung herrührt, mit demjenigen Teil zu vergleichen, welcher von der Elektrisierung unabhängig ist. Der zweite Teil der Masse ist von der Geschwindigkeit unabhängig. Wenn wir also finden, daß sich die Masse mit der Geschwindigkeit merklich ändert, so schließen wir, daß derjenige Teil der Masse, welcher von der Ladung herrührt, merklich sein muß im Vergleich mit demjenigen, welcher von der Ladung unabhängig ist. Um den Einfluß der Geschwindigkeit auf die Masse eines elektrischen Systems zu berechnen, müssen wir eine Annahme über die Natur des Systems machen, da der Einfluß z. B. auf eine geladene Kugel nicht genau derselbe ist wie auf ein geladenes Ellipsoid. Wenn wir aber diese Annahme gemacht und den theoretischen Einfluß der Geschwindigkeit auf die Masse berechnet haben, ist es leicht, das Verhältnis des von der Ladung unabhängigen Teiles der Masse zu demjenigen Teile abzuleiten, welcher bei jeder beliebigen Geschwindigkeit von der Ladung abhängt. Wir wollen annehmen, daß der von der Elektrisierung herrührende Teil der Masse bei der Geschwindigkeit $v$ gleich $m_v f(v)$ ist, wenn $f(v)$ eine bekannte Funktion von $v$ ist. Wenn dann $M_v$ und $M_{v^1}$ die bei den Geschwindigkeiten $v$ und $v^1$ beobachteten Massen sind, und wenn $M$ der von der Ladung unabhängige Teil der Masse ist, so sind

$$M_v = M + m_v f(v)$$

und

$$M_{v^1} = M + m_v f(v^1),$$

zwei Gleichungen, aus denen sich $M$ und $m_v$ berechnen lassen Unter der Annahme, daß sich der geladene Körper wie eine Metallkugel verhält, für welche die Verteilung der Kraftlinien, wenn sie in Bewegung ist, von G. F. C. Searle ermittelt worden ist, kam Kaufmann zu dem Schluß, das die „elektrische Masse" des Teilchens, wenn es sich langsam bewegt, ungefähr gleich dem vierten Teile der gesamten Masse ist. Er hob aber ausdrücklich hervor, daß dieser Bruch von der Annahme abhängt, die wir über die Beschaffenheit des Körpers machen, z. B. ob er die Gestalt einer Kugel oder eines Ellipsoides hat, ob er ein Isolator oder ein Leiter ist, und daß seine Versuche unter anderen Annahmen vielleicht beweisen würden, daß die gesamte Masse elektrisch ist, was er für das wahrscheinlichste hielt.

Bei dem gegenwärtigen Stande unserer Kenntnis der Konstitution der Materie glaube ich nicht, daß etwas damit gewonnen ist, wenn man den kleinen negativ geladenen Körpern, die vom Radium und anderen Körpern fortgeschleudert werden, die Eigenschaft metallischer Leitfähigkeit beilegt, und ich ziehe die einfachere Annahme vor, daß die Verteilung der Kraftlinien um diese Teilchen dieselbe ist wie die der Kraftlinien eines geladenen Punktes, vorausgesetzt, daß wir unsere Aufmerksamkeit auf das Feld außerhalb einer kleinen Kugel vom Radius $a$ beschränken, deren Mittelpunkt der geladene Punkt ist. Unter dieser Annahme ist der von der Ladung herrührende Teil der Masse der Wert von $\frac{J}{v}$ in der Gleichung (1) auf S. 28. Vermittelst dieses Ausdruckes habe ich das Verhältnis der Masse der vom Radium mit großer Geschwindigkeit ausgesandten Teilchen zur Masse derselben Teilchen, wenn sie in Ruhe sind oder sich langsam bewegen, unter der Annahme berechnet, daß die gesamte Masse von der Ladung herrührt. Die Resultate dieser Rechnung habe ich mit den Werten desselben Verhältnisses verglichen, wie sie sich aus den Versuchen Kaufmanns ergeben. Diese Resultate sind aus der folgenden Tabelle zu ersehen. Die erste Kolumne enthält die Werte von $v$, der Geschwindigkeit der Teilchen, die zweite $\varrho$, die nach Gleichung (1) berechnete Zahl, welche angibt, das Wievielfache die Masse des Teilchens bei dieser Geschwindigkeit von der Masse desselben Teilchens im ruhenden Zustande ist. Die dritte Kolumne enthält $\varrho^1$, den von Kaufmann ermittelten Wert derselben Größe.

| $v \times 10^{-10} \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ | $\varrho$ | $\varrho^1$ |
|---|---|---|
| 2,85 | 3,1 | 3,09 |
| 2,72 | 2,42 | 2,43 |
| 2,59 | 2,0 | 2,04 |
| 2,48 | 1,66 | 1,83 |
| 2,36 | 1,5 | 1,65 |

Diese Resultate stützen die Annahme, daß die gesamte Masse dieser elektrischen Teilchen von ihrer Ladung herrührt.

Wenn wir die mit diesen Teilchen verbundenen Faradayschen Röhren als die von der Ladung eines bewegten Punktes herrührenden betrachten, und wenn wir unsere Aufmerksamkeit auf denjenigen Teil des Feldes beschränken, der außerhalb einer mit der Ladung konzentrierten Kugel vom Radius $a$ liegt, so ist, wie wir gesehen haben, die von der Ladung $e$ des Teilchens herrührende Masse $m$, wenn sich das Teilchen langsam bewegt, durch die Gleichung $m = \frac{2}{3}\frac{\mu e^2}{a}$ gegeben.

In einer der späteren Vorlesungen werde ich erklären, in welcher Weise man die Werte von $m\,e$ und $e$ bestimmt hat. Das Resultat dieser Bestimmungen ist das, daß in elektrostatischen C. G. S.-Einheiten $\frac{m}{e} = 10^7$ und $e = 1{,}2 \times 10^{-20}$ ist. Setzt man diese Werte in den Ausdruck für $m$ ein, so ergibt sich, daß $a$ ungefähr $5 \times 10^{-14}$ cm ist, eine Länge, die sehr klein ist im Vergleich mit dem Werte $10^{-8}$ cm, der gewöhnlich als eine gute Annäherung für die Dimensionen eines Moleküls betrachtet wird.

Wir haben angenommen, daß in diesem Falle die Masse von der Masse des Äthers herrührt, die von den mit der Ladung verbundenen Faradayschen Röhren mitgeführt wird. Da sich diese Röhren in unendliche Entfernung erstrecken, so ist die Masse des Teilchens sozusagen durch den Raum zerstreut und hat keine bestimmte Grenze. Allein infolge der sehr geringen Größe des Teilchens und des Umstandes, daß die von den Röhren mitgeführte Äthermasse (da sie dem Quadrat der Dichtigkeit der Faradayschen Röhren proportional ist) der vierten Potenz der Entfernung von dem Teilchen proportional ist, finden wir durch eine einfache Rechnung, daß die Masse bis auf einen ganz unbedeutenden Bruchteil auf eine Entfernung von dem Teilchen beschränkt ist, die im Vergleich mit den Dimensionen, die gewöhnlich den Atomen zugeschrieben werden, allerdings sehr klein ist.

In jedem System, welches elektrisierte Körper enthält, besteht ein Teil der Masse des Systems aus der Masse des Äthers, der von den mit der Elektrisierung verbundenen Faradayschen Röhren mitgeführt wird. Eine Ansicht über die Konstitution der Materie — die ich in einer späteren Vorlesung zu diskutieren hoffe — besteht nun darin, daß die Atome der verschiedenen Elemente Ansammlungen positiver und negativer Ladungen sind, die hauptsächlich durch ihre elektrischen Anziehungen zusammengehalten werden, und ferner, daß die negativ geladenen Teilchen in dem Atom (ich habe sie Korpuskeln genannt) mit denjenigen kleinen negativ elektrischen Teilchen identisch sind, deren Eigenschaften wir diskutiert haben. Nach dieser Ansicht über die Konstitution der

Materie besteht ein Teil der Masse eines Körpers aus der Masse des Äthers, der von den Faradayschen Röhren mitgeführt wird, die die positiven und negativen Bestandteile des Atoms untereinander verbinden. Die Ansicht, mit der ich Sie bekannt machen will, ist die, daß nicht nur ein Teil der Masse eines Körpers diesen Ursprung hat, sondern daß die gesamte Masse eines Körpers nichts anderes ist als die Masse des den Körper umgebenden Äthers, der von den Faradayschen Röhren mitgeführt wird, die mit den Atomen des Körpers verbunden sind, daß also alle Masse Masse des Äthers, alle Bewegungsgröße Bewegungsgröße des Äthers und alle kinetische Energie kinetische Energie des Äthers ist. Allerdings erfordert diese Ansicht, daß die Dichte des Äthers ungeheuer viel größer ist als die Dichte irgend einer bekannten Substanz.

Da nun die Masse von den Faradayschen Röhren mitgeführt werden muß, und da die Anordnung dieser Röhren von der relativen Lage der elektrischen Körper abhängt, so kann allerdings der Einwand erhoben werden, daß die Masse einer Ansammlung positiv und negativ geladener Körper sich fortwährend mit der Lage dieser Körper ändern müsse, daß also die Masse nicht, wie die Erfahrung und der Versuch lehren, bis zu einem sehr hohen Grade der Annäherung konstant sein, sondern sich mit der Änderung des physikalischen und chemischen Zustandes des Körpers ändern müsse.

Ein solcher Einwand ist jedoch nicht auf den in der vorhergehenden Theorie betrachteten Fall anwendbar, in dem die Dimensionen einer Gruppe von elektrischen Körpern — den negativen — sehr klein sind im Vergleich mit den Entfernungen, durch welche die verschiedenen Glieder des Systems elektrischer Körper voneinander getrennt sind. Wenn dies der Fall ist, so ist die Konzentration der Kraftlinien an den kleinen negativen Körpern — den Korpuskeln — so groß, daß der gesamte gebundene Äther vollständig um diese Körper herum lokalisiert ist und die Menge desselben nur von ihrer Größe und Ladung abhängt. Wenn wir also die Anzahl und den Charakter der Korpuskeln unverändert lassen, so werden die Änderungen der Masse infolge einer Änderung ihrer relativen Lagen im Vergleich mit der Masse des Körpers ganz unbedeutend sein.

## Drittes Kapitel.

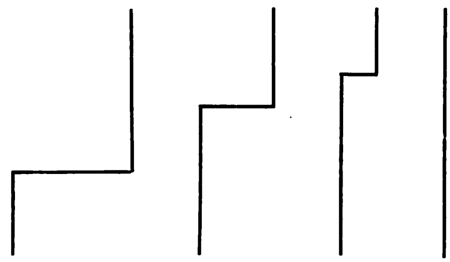
# Wirkungen der Beschleunigung der Faradayschen Röhren.

### Röntgenstrahlen und Licht.

Wir haben das Verhalten der Kraftlinien betrachtet, wenn sie in Ruhe sind und wenn sie sich gleichförmig bewegen. In diesem Kapitel wollen wir die Erscheinungen betrachten, welche man beobachtet, wenn sich der Bewegungszustand der Linien ändert.

Wir wollen zunächst den Fall betrachten, daß sich ein geladener Punkt so langsam bewegt, daß die Kraftlinien gleichförmig um ihn herum verteilt sind, und untersuchen, was der Fall sein muß, wenn der Punkt plötzlich angehalten wird. Die mit der Kugel verbundenen Faradayschen Röhren besitzen Trägheit. Sie befinden sich auch in einem Spannungszustande, und zwar ist die Spannung in jedem Punkt der Masse der Längeneinheit proportional. Jede Störung, die dem einen Ende der Röhre mitgeteilt wird, wird sich dann mit einer konstanten und bestimmten Geschwindigkeit durch die Röhre fortpflanzen; ja die Röhre zeigt eine auffallende Analogie mit einer gespannten Saite. Wir wollen annehmen, eine straff gespannte vertikale Saite bewege sich von rechts nach links und das obere Ende $A$ der Saite werde plötzlich angehalten. Was wird in der Saite vor sich gehen? Das Ende $A$ wird plötzlich zur Ruhe kommen, allein die wirksamen Kräfte pflanzen sich mit bestimmter Geschwindigkeit fort, und jeder Teil der Saite wird vermöge seiner Trägheit fortfahren, sich so zu bewegen, als ob am anderen Ende $A$ nichts stattgefunden hätte, bis ihn die von $A$ ausgehende Störung erreicht. Wenn daher $V$ die Geschwindigkeit ist, mit der eine Störung die Saite entlang fortschreitet, und wenn $t$ die Zeit ist, welche seit dem Augenblicke, in dem $A$ angehalten wurde, verflossen ist, dann werden diejenigen Teile der Saite, deren Entfernung von $A$ größer als $Vt$ ist, von dem Anhalten des Endes unbeeinflußt sein und sie werden dieselbe Lage und dieselbe Geschwindigkeit haben, die sie haben würden, wenn sich die Saite gleichförmig weiterbewegt hätte. Die Saite wird nach und nach die durch Fig. 12 veranschaulichten Formen annehmen, indem der horizontale Teil der Saite um so kleiner wird, je weiter er sich von dem festen Ende entfernt.

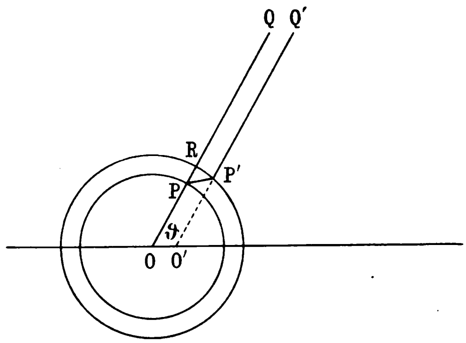
Fig. 12.




Wir wollen jetzt zu dem Falle des bewegten geladenen Teilchens zurückkehren und annehmen, dieses sei plötzlich angehalten worden und das Anhalten habe die Zeit $\tau$ in Anspruch genommen. Um die Konfiguration der Faradayschen Röhren nach der Zeit $t$ zu finden, die mit dem Augenblick verflossen ist, in welchem der Vorgang des Anhaltens des geladenen Teilchens seinen Anfang nahm, beschreiben wir um das geladene Teilchen als Mittelpunkt zwei Kreise, von denen der eine den Radius $Vt$ und der andere den Radius $V(t - \tau)$ hat. Da jetzt die Störung die Faradayschen Röhren, welche außerhalb der äußeren Kugel liegen, noch nicht erreicht haben kann, so befinden sich diese Röhren in der Lage, die sie eingenommen haben würden, wenn sie sich mit der Geschwindigkeit fortbewegt hätten, die sie in dem Augenblicke hatten, als das Teilchen angehalten wurde. Dagegen befinden sich innerhalb der inneren Kugel die Röhren in ihren Endlagen, da die Störung diesen Teil der Röhren durchlaufen hat. Betrachten Sie z. B. eine Röhre, die, als das Teilchen angehalten wurde, in die Richtung der Linie $OPQ$ (Fig. 13) fiel. Dies ist die Endlage der Röhre. Also wird zur Zeit $t$ derjenige Teil der Röhre, der innerhalb der inneren Kugel liegt, sich in der Lage $OP$

befinden. Dagegen wird sich der Teil $P'Q'$, der außerhalb der äußeren Kugel liegt, in derjenigen Lage befinden, die er eingenommen haben würde, wenn das Teilchen nicht angehalten worden wäre, d. h. wenn $O'$ die Lage des Teilchens ist, die es eingenommen hätte, wenn es nicht angehalten worden wäre, so ist $P'\,Q'$ eine gerade Linie, die durch $O'$ geht. Damit die Kontinuität erhalten bleibt, muß also die Röhre in der Kugelschale zwischen den beiden Kugeln gebogen sein, so daß sie die Form

Fig. 13.




$O\,P\,P'\,Q'$ annimmt. Die Röhre, welche vor dem Anhalten des Teilchens radial war, hat also jetzt in der Kugelschale zwischen den beiden Kugeln eine tangentiale Komponente, und diese tangentiale Komponente stellt eine tangentiale elektrische Kraft vor. Das Anhalten des Teilchens bringt also in dem von dem Teilchen erzeugten Felde eine sehr wesentliche Veränderung hervor und erzeugt, wie sich aus der folgenden Rechnung ergibt, elektrische und magnetische Kräfte, die viel größer sind als diejenigen, die im Felde existieren, wenn sich das Teilchen gleichförmig bewegt.

Wenn wir annehmen, daß die Dichte $\delta$ der Kugelschale so gering ist, daß der innerhalb derselben liegende Teil der Faradayschen Röhre als gerade angesehen werden kann, und wenn $T$ die tangentiale und $R$ die radiale elektrische Kraft in der Stoßwelle ist, so haben wir

$$\frac{T}{R} = \frac{P'R}{PR} = \frac{O\,O'\sin\vartheta}{\delta} = \frac{v\,t\sin\vartheta}{\delta} \quad \ldots \ldots \quad (1)$$

Hier ist $v$ die Geschwindigkeit, mit der sich das Teilchen bewegte, bevor es angehalten wurde, $\vartheta$ der Winkel, den $OP$ mit der Bewegungsrichtung des Teilchens bildet, und $t$ die Zeit, die seit dem Augenblicke, in welchem das Teilchen angehalten wurde, verflossen ist; da nun $R = \frac{e}{OP^2}$ und $P = Vt$, wenn $V$ die Geschwindigkeit des Lichtes ist, so haben wir, wenn $r = OP$,

$$T = \frac{ev}{V} \frac{\sin\vartheta}{r\delta} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Die tangentialen Faradayschen Röhren, die sich mit der Geschwindigkeit $V$ vorwärts bewegen, erzeugen bei $P$ eine magnetische Kraft $H$ gleich $VT$. Diese Kraft steht senkrecht auf der Ebene der Figur und hat die entgegengesetzte Richtung wie die magnetische Kraft, welche bei $P$ existierte, bevor das Teilchen angehalten wurde. Da ihre Größe durch die Gleichung

$$H = \frac{ev\sin\vartheta}{r\delta}$$

gegeben ist, so ist sie im Verhältnis $r:\delta$ größer als die vorher existierende magnetische Kraft $\frac{ev\sin\vartheta}{r^2}$. Die durch das Anhalten des Teilchens erzeugte Stoßwelle ist also der Sitz intensiver elektrischer und magnetischer Kräfte, die im umgekehrten Verhältnis des Abstandes vom geladenen Teilchen abnehmen, während die Kräfte, welche vor dem Anhalten des Teilchens wirksam waren, im umgekehrten Verhältnis des Quadrates des Abstandes abnehmen. Diese Stoßwelle, welche mit der Geschwindigkeit des Lichtes fortschreitet, bildet nach meiner Ansicht die Röntgenstrahlen, welche entstehen, wenn die negativ elektrischen Teilchen, aus denen die Kathodenstrahlen bestehen, plötzlich angehalten werden, indem sie auf ein festes Hindernis stoßen.

Die Energie in der Stoßwelle ist, wie sich leicht beweisen läßt, gleich

$$\frac{2}{3}\frac{e^2v^2}{\delta}.$$

Diese Energie wird nach auswärts in den Raum ausgestrahlt. Die Menge der so ausgestrahlten Energie hängt von $\delta$, der Dicke der Stoßwelle, d. h. von der Plötzlichkeit ab, mit der das Teilchen angehalten wird. Wenn es momentan angehalten wird, so wird die gesamte Energie des Feldes in der Stoßwelle absorbiert und fortgestrahlt. Wenn es nach und nach zur Ruhe gebracht wird, so wird nur ein Teil der Energie in den Raum ausgestrahlt. Der Rest erscheint an der Stelle, wo die Kathodenstrahlen angehalten wurden, in Form von Wärme.

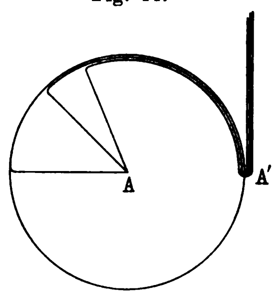
Es ist leicht zu beweisen, daß die Bewegungsgröße in der Stoßwelle in jedem Augenblick gleich und entgegengesetzt der Bewegungsgröße im Felde außerhalb der Stoßwelle ist. Da in dem Raume, den die Stoßwelle zu durchlaufen hat, keine Bewegungsgröße ist, so ist die gesamte Bewegungsgröße, nachdem das Teilchen angehalten worden ist, gleich Null.

Die vorhergehende Untersuchung gilt nur für den Fall, daß sich das Teilchen so langsam bewegt, daß die Faradayschen Röhren vor dem Anhalten der Stoßwelle gleichförmig verteilt waren. Wir können aber in derselben Weise die Wirkung des Anhaltens eines geladenen Teilchens auch für andere Fälle bestimmen, sobald die Verteilung der Faradayschen Röhren im Zustande gleichförmiger Bewegung ermittelt worden ist.

Wir wollen z. B. den Fall betrachten, daß sich das Teilchen anfangs mit der Geschwindigkeit des Lichtes bewegte. Aus der auf S. 28 gegebenen Regel folgt, daß vor dem Anhalten die Faradayschen Röhren sämtlich in der Äquatorialebene des bewegten Teilchens zusammengedrängt waren. Um die Konfiguration der Faradayschen Röhren nach der Zeit $t$ zu finden, verfahren wir ebenso wie vorhin, d. h. wir ermitteln die Konfiguration der Röhren für diese Zeit unter der Voraussetzung, daß das Teilchen nicht angehalten worden wäre. Die Röhren würden in diesem Falle in einer Ebene gelegen haben, die in der Entfernung $Vt$ dem Teilchen gegenübersteht. Man beschreibe zwei Kugeln, deren Mittelpunkte in dem Teilchen liegen und deren Radien beziehungsweise $Vt$ und $V(t-\tau)$ sind, wenn $\tau$ die Zeit ist, welche das Anhalten des Teilchens in Anspruch genommen hat. Außerhalb der äußeren Kugel wird die Konfiguration der Röhren dieselbe sein, als wenn das Teilchen nicht angehalten worden wäre, d. h. die Röhren werden in einer Ebene liegen, die im Abstand $Vt$ dem Teilchen gegenüberstehen, und diese Ebene wird die äußere Kugel berühren. Innerhalb der inneren Kugel werden die Faradayschen Röhren gleichförmig verteilt sein. Wenn also die

Kontinuität erhalten werden soll, so müssen diese Röhren in der Schale herumlaufen, um die Kugel zu treffen (Fig. 14). Wir haben also in diesem Falle zwei Stoßwellen, eine ebene, die sich in der Richtung fortpflanzt, in welcher sich das Teilchen bewegte, bevor es angehalten wurde, und eine sphärische, die in allen Richtungen nach auswärts fortschreitet.

Fig. 14.




Die beschriebene Methode kann auf den Fall angewandt werden, daß das geladene Teilchen nicht angehalten wird, sondern daß seine Geschwindigkeit in irgend einer Weise geändert wird. Wenn z. B. die Geschwindigkeit des Teilchens nicht auf Null reduziert, sondern nur um $\Delta v$ vermindert wird, so können wir, wie auf S. 37, beweisen, daß hierdurch eine Stoßwelle erzeugt wird, für welche die magnetische Kraft $H$ durch die Gleichung

$$H = \frac{e \,.\, \Delta v \sin \vartheta}{r \delta}$$

und die tangentiale elektrische Kraft durch die Gleichung

$$T = \frac{e \,.\, \Delta v \sin \vartheta}{V r \delta}$$

gegeben ist.

Die Dicke $\delta$ der Stoßwelle ist aber der Raum, der von einer Lichtwelle in der Zeit durchlaufen wird, während der sich die Geschwindigkeit des Teilchens ändert. Wenn daher $\delta t$ die Zeit ist, die erforderlich ist, um die Änderung $\Delta v$ in der Geschwindigkeit zu erzeugen, so ist $\delta = V \delta t$, und wir haben

$$H = \frac{e}{V} \frac{\Delta v}{\delta t} \frac{\sin \vartheta}{r} \qquad T = \frac{e}{V^2} \frac{\Delta v}{\delta t} \frac{\sin \vartheta}{r};$$

$\frac{\Delta v}{\delta t}$ ist aber gleich $-f$, wenn $f$ die Beschleunigung des Teilchens ist. Also haben wir

$$H = -\frac{e}{V} f \frac{\sin \vartheta}{r} \qquad T = -\frac{e}{V^2} f \frac{\sin \vartheta}{r}.$$

Aus diesen Gleichungen geht hervor, daß ein geladenes Teilchen, dessen Bewegung beschleunigt wird, eine Stoßwelle elektrischer und magnetischer Kraft erzeugt, in welcher die Kräfte dem Abstand von dem Teilchen umgekehrt proportional sind.

Wenn also ein geladener Körper in einer solchen Weise in Schwingung versetzt würde, daß seine Beschleunigung periodische Änderung durchliefe, so würden von dem geladenen Körper periodische Wellen elektrischer und magnetischer Kraft ausgehen. Diese Wellen würden nach der elektromagnetischen Lichttheorie Lichtwellen sein, vorausgesetzt, daß die periodischen Änderungen in der Beschleunigung des geladenen Körpers mit hinreichender Schnelligkeit stattfinden. Die Art und Weise, wie wir den Einfluß betrachten, den die Änderungen in der Bewegung eines geladenen Körpers auf die Konfigurationen der Faradayschen Röhren ausüben, bietet uns ein einfaches Mittel, uns ein Bild von den Vorgängen zu machen, die während der Fortpflanzung einer Lichtwelle durch den Äther stattfinden. Wir haben angenommen, daß diese Vorgänge durch eine transversale zitternde Bewegung hervorgerufen werden, die sich die straff gespannten Faradayschen Röhren entlang fortpflanzt, und wir kommen so zu derselben Vorstellung von der Fortpflanzung des Lichtes, die sich Faraday selbst gemacht hatte, wie aus der folgenden Stelle seiner Abhandlung „Thoughts on Ray Vibrations“ hervorgeht. Faraday sagt: „Die Ansicht, welche ich aufzustellen wage, betrachtet daher die Strahlungen als eine hohe Art von Schwingung in den Kraftlinien, die bekanntlich Teilchen und auch Massen untereinander verbinden.“

Wenn man annimmt, daß das Licht durch die zitternde Bewegung in den straff gespannten Faradayschen Röhren erzeugt wird, so bietet sich eine Frage, die bis jetzt unbeachtet geblieben ist. Es kann nicht angenommen werden, daß die Faradayschen Röhren, die sich durch den Äther erstrecken, diesen vollständig füllen. Sie müssen vielmehr als diskrete Fäden betrachtet werden, die in einen kontinuierlichen Äther eingebettet sind und diesem eine faserige Struktur erteilen. Wenn dies aber der Fall ist, so muß nach der Ansicht über die Lichtwelle, welche wir uns gebildet haben, die Welle selbst eine Struktur besitzen. Die Wellenfront muß gewissermaßen nicht gleichförmig beleuchtet sein, sondern sie muß von einer Reihe heller Flecken auf dunklem

Grunde gebildet sein, wobei die Flecken diejenigen Stellen bezeichnen, an denen die Faradayschen Röhren die Wellenfront schneiden.

Eine derartige Auffassung der Konstitution einer Lichtwelle würde eine Erscheinung erklären, die nach meiner Ansicht höchst bemerkenswert und schwer mit der Ansicht in Einklang zu bringen ist, daß eine Lichtwelle, oder in diesem Falle besser ein Röntgenstrahl, keine Struktur besitzt. Wir haben gesehen, daß die Art der Fortpflanzung und die Konstitution eines Röntgenstrahls dieselbe ist wie die einer gewöhnlichen Lichtwelle, so daß jede allgemeine Betrachtung über die Struktur in Röntgenstrahlen auch für Lichtwellen gilt. Die fragliche Erscheinung ist die folgende: Die Röntgenstrahlen können sehr große Strecken in Gasen zurücklegen und bei diesem Durchgange durch ein Gas ionisieren sie dieses, indem sie die Moleküle in positive und negative Ionen spalten. Die Anzahl der Moleküle, welche in dieser Weise gespalten werden, ist jedoch ein äußerst geringer Bruchteil, selbst für starke Strahlen weniger als ein Billiontel, von der Gesamtzahl der Gasmoleküle. Wenn aber die Wellenfront von gleichförmiger Beschaffenheit ist, so sind sämtliche Moleküle des Gases denselben Bedingungen ausgesetzt. Woher kommt es nun, daß nur ein so geringer Bruchteil gespalten wird? Man könnte annehmen, daß diejenigen, welche gespalten werden, sich in einem besonderen Zustande befinden, daß sie z. B. einen Betrag von kinetischer Energie besitzen, der die mittlere kinetische Energie der Gasmoleküle in solchem Grade übersteigt, daß nach dem Maxwellschen Gesetz der Verteilung der kinetischen Energie ihre Anzahl im Vergleich mit der Gesamtzahl der Gasmoleküle sehr klein ist. Wenn dies aber der Fall wäre, so müßte nach demselben Verteilungsgesetz die Anzahl der in diesem abnormen Zustande befindlichen Moleküle mit der Temperatur sehr schnell zunehmen. Also müßte die von den Röntgenstrahlen bewirkte Ionisierung sehr schnell mit steigender Temperatur zunehmen. Aus neueren von Herrn Mc Clung im Cavendish-Laboratorium ausgeführten Versuchen geht aber hervor, daß die Ionisierung keine merkliche Zunahme erleidet, wenn die Temperatur eines Gases von 15° C bis 200° C gesteigert wird, während die Anzahl der Moleküle, die einen abnormen Betrag von kinetischer Energie besitzen, durch diese Temperatursteigerung bedeutend erhöht werden würde. Die Schwierigkeit, welche die Erklärung der geringen Ionisierung bietet, verschwindet, wenn man annimmt, daß die Front des Röntgenstrahls nicht gleichförmig ist, sondern daß sie aus Flecken von großer Intensität besteht, die durch beträchtliche Zwischenräume getrennt sind, in denen die Intensität sehr gering ist. Denn in diesem Falle befinden sich nicht alle Moleküle im Felde und wahrscheinlich nicht einmal verschiedene Teile desselben Moleküls unter denselben Bedingungen, und der Zustand wird ein ähnlicher, als wenn ein Schwarm Kathodenstrahlen durch ein Gas geht, in welchem Falle die Anzahl der Moleküle, die mit den Strahlen in Kollision kommen, ein sehr geringer Bruchteil der Gesamtzahl der Moleküle sein kann.

Um jedoch zu dem Falle des geladenen Teilchens zurückzukehren, dessen Bewegung beschleunigt wird, so haben wir gesehen, daß von dem Teilchen elektrische und magnetische Kräfte ausgehen und mit der Geschwindigkeit des Lichtes radial fortschreiten, und zwar stehen sowohl die elektrischen als auch die magnetischen Kräfte senkrecht auf der Richtung, in welcher sie sich fortpflanzen. Da aber jede Volumeinheit (siehe S. 16) des magnetischen Feldes einen Betrag von Bewegungsgröße gleich dem Produkt aus der Dichtigkeit der Faradayschen Röhren und der magnetischen Kraft besitzt, wobei die Richtung der Bewegungsgröße auf diesen beiden Größen senkrecht steht, so muß in der durch die Beschleunigung des geladenen Teilchens erzeugten Welle und überhaupt in jeder elektrischen Welle oder Lichtwelle Bewegungsgröße in der Fortpflanzungsrichtung der Welle vorhanden sein. Wenn daher eine derartige Welle, z. B. eine Lichtwelle, von der Substanz, durch die sie hindurchgeht, absorbiert wird, so wird die Bewegungsgröße der Welle der absorbierenden Substanz mitgeteilt werden. Auf diese wird daher eine Kraft wirken, die sie in der Richtung fortzuschieben strebt, in welcher sich das Licht fortpflanzt. Wenn also Licht senkrecht auf eine geschwärzte absorbierende Substanz fällt, so wird es diese Substanz abstoßen. Maxwell hatte gezeigt, daß diese aus der Strahlung entspringende Abstoßung eine Konsequenz der elektromagnetischen Lichttheorie ist, und sie ist kürzlich von Lebedew durch einige sehr schöne Versuche entdeckt und gemessen worden. Diese Versuche sind von Nichols und Hull bestätigt und erweitert worden.

Der Druck, den die absorbierende Substanz erleidet, ist ihrer Oberfläche proportional, während das Gewicht der Substanz ihrem Volumen proportional ist. Wenn wir daher die linearen Dimensionen halbieren, so vermindern wir das Gewicht auf ein Achtel, den Strahlungsdruck dagegen nur auf ein Viertel. Wenn daher das Volumen des absorbierenden Körpers hinreichend verkleinert wird, so müssen wir ein Stadium erreichen, in welchem die von der Strahlung herrührenden Kräfte größer sind als diejenigen, welche, wie das Gewicht, dem Volumen der Substanz proportional sind. Vermittelst dieses Satzes hat Arrhenius, indem er die Sonnenstrahlung als bekannt annahm, berechnet, daß für eine undurchsichtige Kugel von der Einheit der Dichte und einem Durchmesser von $10^{-5}$ cm die von der Sonnenstrahlung bewirkte Abstoßung der Anziehung der Sonne gerade das Gleichgewicht hält, während alle Körper, die kleiner sind als dieser, von der Sonne abgestoßen werden, und er hat den Satz angewandt, um die mit den Kometenschweifen in Zusammenhang stehenden Erscheinungen zu erklären. Poynting hat kürzlich bewiesen, daß, wenn zwei Kugeln von der Einheit der Dichte und einem Durchmesser von ungefähr 39 cm eine Temperatur von 29° C haben und vor aller äußeren Strahlung beschützt sind, die von der Strahlung der beiden Kugeln herrührende Abstoßung die Anziehung infolge der Gravitation überwiegt, daß sich die beiden Kugeln also gegenseitig abstoßen.

Wenn das Licht an der Oberfläche eines durchsichtigen Körpers gebrochen und reflektiert wird, so wird der Lauf des Lichtes und also auch die Richtung der Bewegungsgröße geändert, so daß der brechenden Substanz Bewegungsgröße mitgeteilt werden muß. Es ist leicht zu beweisen, daß, selbst wenn das Licht schief einfällt, die der Substanz mitgeteilte Bewegungsgröße auf der brechenden Oberfläche senkrecht steht. Mit den Kräften, die auf brechende Prismen wirken, wenn Licht durch sie hindurchgeht, stehen zahlreiche interessante Probleme in Verbindung, wie Sie selbst bemerken werden, wenn Sie bedenken, daß beim Durchgang des Lichtes durch das Prisma Änderungen der Bewegungsgröße stattfinden. Tangentialkräfte, die vom Lichte herrühren, sind meines Wissens nicht experimentell nachgewiesen worden. Diese müssen aber in gewissen Fällen existieren, z. B. wenn schief einfallendes Licht an einer Metallfläche reflektiert wird.

Die Wellen elektrischer und magnetischer Kraft, welche von einem beschleunigten geladenen Teilchen ausstrahlen, führen Energie mit sich. Diese Energie wird in den Raum ausgestrahlt, so daß das Teilchen fortwährend Energie verliert. Das Verhältnis, in welchem Energie von dem Teilchen ausstrahlt, ist, wie sich leicht beweisen läßt, $\frac{1}{3}\frac{e^2 f^2}{V}$, wenn $e$ die Ladung des Teilchens, $f$ seine Beschleunigung und $V$ die Geschwindigkeit des Lichtes ist. Wenn wir den Energieverlust in Betracht ziehen, den das Teilchen erleidet, wenn seine Bewegung beschleunigt wird, so finden wir einige interessante Resultate. Wenn z. B. ein ruhendes Teilchen von der Masse $m$ und der Ladung $e$ durch eine konstante elektrische Kraft $X$ in Bewegung gesetzt wird, so erlangt das Teilchen nicht sofort die Beschleunigung $\frac{Xe}{m}$, die es erlangen würde, wenn keine Energie durch Strahlung verloren ginge, sondern die Beschleunigung des Teilchens ist anfangs Null, und das Teilchen erlangt erst nach Ablauf einer Zeit, die mit $\frac{e^2}{Vm}$ vergleichbar ist, einen merklichen Bruchteil seiner Endbeschleunigung. Also ist das Verhältnis, in welchem das Teilchen Energie verliert, während der Zeit $\frac{e^2}{Vm}$ sehr klein im Vergleich mit dem schließlich erreichten Verhältnis. Wenn daher auf das Teilchen eine Welle elektrischer Kraft wirkte, die nur eine mit $\frac{e^2}{Vm}$ vergleichbare Zeit braucht, um über das Teilchen hinzugehen, so würde die Menge der von dem Teilchen ausgestrahlten Energie ein bedeutend kleinerer Bruchteil der Energie der Welle sein, als wenn die Zeit, welche die Welle braucht, um über das Teilchen hinzugehen, ein beträchtliches Vielfaches von $\frac{e^2}{Vm}$ wäre. Dies findet eine wichtige Anwendung bei der Erklärung der Tatsache, daß die „harten“ Röntgenstrahlen ein größeres Durchdringungsvermögen besitzen als die „weichen“, so daß in den „harten“ Strahlen eine größere Energiemenge durch die geladenen Teilchen, über die sie hingehen, fortgestrahlt wird, als in den „weichen“ Strahlen.

Durch Anwendung des Gesetzes, daß das Verhältnis, in welchem Energie ausgestrahlt wird, gleich $\frac{1}{3}\frac{e^2 f^2}{3V}$ ist, auf ein geladenes Teilchen, welches unter dem Einfluß einer dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportionalen Kraft eine kreisförmige Bahn beschreibt, finden wir, daß in diesem Falle das Verhältnis der Strahlung der achten Potenz der Geschwindigkeit oder der vierten Potenz der Energie proportional ist. Der Energieverlust der Strahlung nimmt also viel schneller zu als die Energie des bewegten Körpers.

---

## Viertes Kapitel.

# Die atomistische Struktur der Elektrizität.

Bisher haben wir uns hauptsächlich mit den Eigenschaften der Kraftlinien beschäftigt, mit ihrer Spannung, der Masse des von ihnen mitgeführten Äthers, sowie mit den elektrischen Störungen, die sich diesen Röhren entlang fortpflanzen. In diesem Kapitel wollen wir die Natur der elektrischen Ladungen diskutieren, die den Anfang und das Ende dieser Linien bilden. Wir werden zeigen, daß gewichtige Gründe für die Annahme sprechen, daß diese Ladungen sozusagen eine atomistische Struktur besitzen, indem jede Ladung aus einer Anzahl begrenzter individueller Ladungen aufgebaut ist, die alle einander gleich sind, ebenso wie nach der Atomtheorie der Materie eine Quantität Wasserstoff aus einer Anzahl von kleinen Teilchen, sogenannten Atomen, aufgebaut ist, die alle einander gleich sind. Wenn diese Auffassung der Struktur der Elektriziät richtig ist, so wird jedes Ende einer Faradayschen Röhre die Stelle sein, von der eine konstante und bestimmte Anzahl von Röhren ausgehen oder an der sie ankommen.

Zum Beweise lassen sich zunächst die Gesetze der Elektrolyse von Flüssigkeiten anführen. Faraday zeigte, daß, wenn Elektrizität durch einen flüssigen Elektrolyten geht, die Menge der negativen Elektrizität, die an der positiven Elektrode abgegeben wird, und die Menge der positiven Elektrizität, die an der negativen Elektrode abgegeben wird, der Anzahl der Atome proportional ist, die an der Elektrode ankommen. Wir wollen zunächst einwertige Atome, wie Wasserstoff, Chlor, Natrium usw. betrachten. Er zeigte, daß, wenn dieselbe Anzahl von Atomen dieser Substanzen ihre Ladungen an die Elektrode abgeben, die Menge der mitgeteilten Elektrizität dieselbe ist, einerlei ob die Träger Wasserstoffatome, Chloratome oder Natriumatome sind, woraus hervorgeht, daß jedes Atom dieser Elemente dieselbe Ladung von Elektrizität besitzt. Lassen Sie uns jetzt zu zweiwertigen Elementen übergehen. Auch hier finden wir wieder, daß die Ionen aller zweiwertigen Elemente dieselbe Ladung besitzen, daß aber eine Anzahl von Ionen des zweiwertigen Elementes die doppelte Ladung besitzen wie dieselbe Anzahl von Ionen eines einwertigen Elementes, woraus hervorgeht, daß jedes Ion eines zweiwertigen Elementes eine doppelt so große Ladung besitzt wie das einwertige Ion. Ein dreiwertiges Ion besitzt eine dreimal so große Ladung wie das einwertige Ion usw. Bei der Elektrolyse von Lösungen sind also die Ladungen der Ionen entweder die Ladung des Wasserstoffions oder das Doppelte dieser Ladung, das Dreifache dieser Ladung usw. Die Ladungen sind immer ein ganzes Vielfaches von der Ladung des Wasserstoffatoms. Bruchteile dieser Ladung kommen niemals vor. Diese höchst bemerkenswerte Tatsache beweist, wie Helmholtz in seiner Faraday-Vorlesung sagte, daß „wenn wir die Hypothese annehmen, daß die elementaren Substanzen aus Atomen bestehen, so können wir nicht umhin, den Schluß zu ziehen, daß die Elektrizität, sowohl die positive als auch die negative, in bestimmte elementare Portionen geteilt ist, die sich wie Elektrizitätsatome verhalten“.

Wenn wir die Leitung der Elektrizität durch Gase betrachten, so tritt der atomistische Charakter der Elektrizität noch deutlicher zutage, als bei der Leitung durch Flüssigkeiten, hauptsächlich deshalb, weil wir über den Durchgang der Elektrizität durch Gase mehr wissen, als über den Durchgang durch Flüssigkeiten.

Lassen Sie uns für einen Augenblick einige Eigenschaften der Leitung durch Gase näher betrachten. Wenn ein Gas in den leitenden Zustand versetzt worden ist — etwa dadurch, daß es der Einwirkung von Röntgenstrahlen ausgesetzt wird — so bleibt es, nachdem die Strahlen aufgehört haben, eine hinreichend lange Zeit in diesem Zustande, so daß wir imstande sind, seine Eigenschaften zu studieren. Wir finden, daß wir das Leitungsvermögen abfiltrieren können, indem wir das Gas durch einen Baumwollenpfropf oder durch Wasser hindurchtreiben. Das Leitungsvermögen rührt also von etwas her, was dem Gase beigemischt ist und was von ihm abfiltriert werden kann. Auch verliert das Gas sein Leitungsvermögen, wenn es durch ein starkes elektrisches Feld gesandt wird. Dies beweist, daß der Bestandteil, von welchem das Leitungsvermögen des Gases herrührt, aus geladenen Teilchen besteht und daß das Leitungsvermögen aus der Bewegung dieser Teilchen im elektrischen Felde entspringt. Wir haben im Cavendish-Laboratorium die elektrische Ladung dieser Teilchen gemessen.

Das Prinzip der zuerst angewandten Methode ist das folgende: Wenn in dem Gase $n$ positiv geladene Teilchen und $n$ negativ geladene Teilchen vorhanden sind, und wenn jedes dieser Teilchen die elektrische Ladung $e$ besitzt, so können wir durch elektrische Methoden leicht $ne$, die Menge Elektrizität von einem Zeichen bestimmen, die in dem Gase anwesend ist. Die eine Methode, nach welcher dies geschehen kann, besteht darin, daß man das Gas zwischen zwei Metallplatten einschließt, von denen die eine isoliert ist. Wenn nun die andere Platte plötzlich auf ein sehr hohes Potential geladen wird, so wird diese Platte die positiven Teilchen in dem Gase abstoßen und diese werden gegen die isolierte Platte getrieben, bevor sie Zeit haben, sich mit den negativen Teilchen zu verbinden. Die gesamte positive Ladung des Gases wird also nach der isolierten Platte getrieben, wo sie vermittelst eines Elektrometers gemessen werden kann. Da diese Ladung gleich $ne$ ist, so können wir in dieser Weise $ne$ leicht bestimmen. Wenn wir dann ein Mittel finden, um $n$ zu messen, so sind wir imstande, $e$ zu finden. Die Methode, vermittelst deren ich $n$ bestimmt habe, beruht auf der Entdeckung C. T. R. Wilsons, daß die geladenen Teilchen als Nuclei wirken, um die sich kleine Wassertropfen verdichten, wenn die Teilchen von feuchter Luft umgeben sind, die unter den Sättigungspunkt abgekühlt ist. Es ist, wie Aitken gezeigt hat, sehr schwierig, in staubfreier feuchter Luft durch Abkühlung einen Nebel zu erzeugen, weil hier keine

Nuclei vorhanden sind, um die sich die Tropfen verdichten können. Wenn dagegen in der staubfreien Luft geladene Teilchen vorhanden sind, so scheidet sich um diese ein Nebel ab bei einer Übersättigung, die viel geringer ist als die, welche erforderlich ist, um eine merkliche Wirkung hervorzubringen, wenn keine geladenen Teilchen anwesend sind.

In hinreichend übersättigter feuchter Luft wird also auf diesen geladenen Teilchen eine Wolke abgeschieden und so werden die Teilchen sichtbar gemacht. Dies ist der erste Schritt, die Zählung dieser Teilchen zu ermöglichen. Die Tropfen sind aber viel zu klein und viel zu zahlreich, um direkt gezählt werden zu können. Wir können aber ihre Anzahl in folgender Weise indirekt ermitteln. Denken Sie sich, wir hätten eine Anzahl dieser Teilchen in staubfreier Luft in einem Gefäße eingeschlossen, die Luft sei mit Wasserdampf übersättigt und die Luft in dem Gefäße werde plötzlich ausgedehnt. Dies wird zur Folge haben, daß sich die Luft abkühlt, daß sie mit Wasserdampf übersättigt wird und daß sich um die geladenen Teilchen Tropfen abscheiden. Wenn wir nun den Betrag der Ausdehnung kennen, so können wir die Abkühlung des Gases und folglich auch die Menge des abgeschiedenen Wassers berechnen. Wir kennen also das Volumen des Wassers in Form von Tropfen. Wenn also das Volumen eines einzelnen Tropfens bekannt wäre, so könnten wir die Anzahl der Tropfen berechnen. Um die Größe eines Tropfens zu finden, machen wir Anwendung von einer Untersuchung von Sir George Stokes über die Geschwindigkeit, mit welcher kleine Kugeln in der Luft fallen. Infolge der Reibung der Luft fallen kleine Körper äußerst langsam, und je kleiner sie sind, desto langsamer fallen sie. Stokes hat bewiesen, daß, wenn $a$ der Radius eines Wassertropfens ist, die Geschwindigkeit, mit der er in der Luft fällt, durch die Gleichung

$$v = \frac{2}{9} \frac{g a^2}{\mu}$$

gegeben ist, wenn $g$ die Beschleunigung der Schwere $= 981$ und $\mu$ der Reibungskoeffizient der Luft $= 0{,}000\,18$ ist. Also ist

$$v = 1{,}21 \times 10^6 a^2.$$

Wenn wir also $v$ bestimmen können, so können wir auch den Radius und folglich das Volumen des Tropfens bestimmen.

Die Geschwindigkeit $v$, mit der der Tropfen fällt, ist aber die Geschwindigkeit, mit der die Wolke um die geladenen Teilchen sinkt, und kann durch Beobachtung des Gipfels der Wolke gemessen werden. In dieser Weise habe ich das Volumen der Tropfen und aus diesem die Anzahl $n$ der Teilchen ermittelt. Da $n e$ durch elektrische Messungen bestimmt worden war, so konnte der Wert von $e$ abgeleitet werden, wenn $n$ bekannt war. Der so ermittelte Wert von $e$ ist gleich

$$3{,}4 \times 10^{-10} \text{ elektrostatischen C.G.S.-Einheiten.}$$

Es wurden Versuche mit Luft, Wasserstoff und Kohlensäure ausgeführt, und es ergab sich, daß die Ionen in allen diesen Gasen dieselbe Ladung hatten, was sehr für die Annahme spricht, daß die Elektrizität eine atomistische Beschaffenheit hat.

Die Ladung des Gasions können wir mit der Ladung des bei der Elektrolyse von Lösungen abgeschiedenen Wasserstoffions in folgender Weise vergleichen. Wir wissen, daß der Durchgang einer elektromagnetischen Einheit elektrischer Ladung oder $3 \times 10^{10}$ elektrostatischer Einheiten durch angesäuertes Wasser 1,23 ccm Wasserstoff von $15^0$ C und einem Atmosphärendruck frei macht. Wenn in 1 ccm des Gases bei dieser Temperatur und diesem Druck $N$ Moleküle enthalten sind, so ist die Anzahl der Wasserstoffionen in 1,23 ccm gleich 2,46 $N$. Wenn also $E$ die Ladung des Wasserstoffions bei der Elektrolyse von Lösungen ist, so ist

$$2{,}46\, NE = 3 \times 10^{10}$$

oder

$$E = \frac{1{,}22 \times 10^{10}}{N}.$$

Nun ist $e$, die Ladung des Gasions, gleich $3{,}4 \times 10^{-10}$. Wenn also $N = 3{,}6 \times 10^{19}$ wäre, so würde die Ladung des Gasions gleich der Ladung des elektrolytischen Ions sein. In der kinetischen Gastheorie hat man aber Methoden ausfindig gemacht, durch die sich diese Größe $N$, die sogenannte Avogadrosche Konstante, bestimmen läßt. Die Werte, welche man durch diese Theorie erhalten hat, schwanken etwas je nach den Annahmen, die man über die Natur der Moleküle und die Natur der Kräfte macht, die ein Molekül auf ein unmittelbar benachbartes Molekül ausübt. Der Wert $3{,}6 \times 10^{19}$ stimmt aber mit einigen der besten dieser Bestimmungen gut überein, und wir schließen daher, daß die Ladung des Gasions gleich der Ladung des elektrolytischen Ions ist.

Dr. H. A. Wilson vom Cavendish-Laboratorium hat nach einer ganz anderen Methode für $e$ ziemlich genau denselben Wert wie den oben angegebenen gefunden. Seine Methode gründete sich auf die Entdeckung C. T. R. Wilsons, daß für die Abscheidung von Wolken aus feuchter Luft für negative Ionen eine geringere Übersättigung erforderlich ist als für positive. Wir können daher durch zweckmäßige Wahl der Übersättigung bewirken, daß sich die Wolke nur auf den negativen Ionen abscheidet, so daß jeder Tropfen in der Wolke negativ geladen ist. Durch Beobachtung der Geschwindigkeit, mit der die Wolke sinkt, können wir in der angegebenen Weise das Gewicht des einzelnen Tropfens bestimmen. Wenn wir nun eine positiv geladene Platte über die Wolke halten, so zieht diese Platte die Wolke an, und wir können die Ladung der Platte so regulieren, daß die elektrische Anziehung dem Gewichte eines Tropfens gerade das Gleichgewicht hält und der Tropfen wie Mohammeds Sarg ruhig in der Luft schwebt. Wenn $X$ die elektrische Kraft und $e$ die Ladung des Tropfens ist, so ist die auf den Tropfen wirkende elektrische Anziehung $Xe$. Da $Xe$ gleich dem Gewichte des Tropfens ist, welches bekannt ist, und da wir $X$ messen können, so können wir auch $e$ bestimmen.

Daß die Ladung des Gasions gleich der Ladung des Wasserstoffions bei der gewöhnlichen Elektrolyse ist, hat Townsend dadurch nachgewiesen, daß er den Diffusionskoeffizienten des Gasions bestimmte und mit der Geschwindigkeit verglich, die das Ion unter dem Einfluß einer gegebenen elektrischen Kraft erlangt. Wir wollen annehmen, zwischen zwei horizontalen Ebenen befinde sich ein gewisses Volumen eines ionisierten Gases und die Anzahl der Ionen sei in einer und derselben horizontalen Ebene konstant, ändere sich aber von einer zur anderen Schicht. Es sei $x$ der Abstand einer Schicht von der unteren Ebene und $n$ die Anzahl der Ionen der einen Art in der Volumeinheit dieser Schicht. Wenn dann $D$ der Diffusionskoeffizient der Ionen ist, so ist die Anzahl der Ionen, die in einer Sekunde die Flächeneinheit in dieser Schicht in der Richtung nach unten passieren:

$$D\frac{dn}{dx}.$$

Also ist die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen, die sich abwärts bewegen:

$$\frac{D}{n}\frac{dn}{dx}.$$

Die Kraft, welche die Ionen in Bewegung setzt, ist die Änderung in dem von den Ionen herrührenden partiellen Druck. Wenn dieser Druck gleich $p$ ist, so ist die Kraft, welche in der Volumeinheit auf die Ionen wirkt, $\frac{dp}{dx}$, und die durchschnittliche Kraft für das einzelne Ion ist $\frac{1}{n}\frac{dp}{dx}$. Die Geschwindigkeit, welche ein Ion unter dem Einfluß einer bekannten Kraft erlangt, läßt sich durch Messung der Geschwindigkeiten ermitteln, die das Ion in einem elektrischen Felde erlangt. Eine solche Messung ist von Rutherford und Zeleny ausgeführt worden. Sie zeigten, daß diese Geschwindigkeit der auf das Ion wirkenden Kraft proportional ist. Wenn daher $A$ die Geschwindigkeit ist, wenn die elektrische Kraft $X$ ist, und wenn die auf das Ion wirkende Kraft also $Xe$ ist, so ist die der Einheit der Kraft entsprechende Geschwindigkeit $\frac{A}{Xe}$, und folglich die der Kraft $\frac{1}{n}\frac{dp}{dx}$ entsprechende Geschwindigkeit

$$\frac{1}{n}\frac{dp}{dx}\frac{A}{Xe}.$$

Diese Geschwindigkeit ist aber, wie wir gesehen haben, gleich

$$\frac{D}{n}\frac{dn}{dx}.$$

Also haben wir

$$\frac{dp}{dx}\frac{A}{Xe} = D\frac{dn}{dx}. \quad \ldots \ldots \quad (1)$$

Wenn sich nun die Ionen wie ein vollkommenes Gas verhalten, so steht der Druck $p$ in einem konstanten Verhältnis zu $n$, der Anzahl der Ionen in der Volumeinheit. Dies Verhältnis ist bei derselben Temperatur für alle Gase dasselbe. Wenn also $N$

die **Avogadrosche Konstante** ist, d. h. die Anzahl der Moleküle in einem Cubikcentimeter beim Atmosphärendruck $P$, so ist

$$\frac{p}{P} = \frac{n}{N},$$

und Gleichung (1) gibt uns

$$\frac{PA}{XD} = Ne.$$

Wenn also $D$ und $e$ bekannt ist, so können wir den Wert von $Ne$ finden. In dieser Weise fand Townsend, daß $Ne$ für Luft, Wasserstoff und Kohlensäure denselben Wert hat, und das Mittel der von ihm gefundenen Werte war $Ne = 1{,}24 \times 10^{10}$. Wenn $E$ die Ladung des Wasserstoffions ist, so ist, wie wir gesehen haben:

$$NE = 1{,}22 \times 10^{10}.$$

Diese Versuche beweisen also, daß $e = E$, daß also die Ladung des Gasions gleich der Ladung des Wasserstoffions bei der Elektrolyse von Lösungen ist.

Die Gleichheit dieser Ladungen ist auch in einer sehr einfachen Weise von H. A. Wilson nachgewiesen worden. Er führte in ein Volumen sehr stark erhitzter Luft per Sekunde eine abgemessene Menge des Dampfes von Metallsalzen ein. Dieser Dampf wurde ionisiert und das Gemisch von Luft und Dampf erlangte ein beträchtliches Leitungsvermögen. Der Strom durch den Dampf nahm anfangs mit der elektromotorischen Kraft zu, die dazu diente, ihn durch das Gas zu treiben, allein nachdem der Strom einen gewissen Wert erreicht hatte, bewirkte eine weitere Zunahme der elektromotorischen Kraft keine Änderung des Stromes mehr. Der Strom erreichte, wie in allen Fällen von Leitung durch Gase, einen Maximalwert, den sogenannten „Sättigungsstrom". Dieser wurde nicht eher überschritten, als bis das auf das Gas einwirkende elektrische Feld die Intensität erreichte, bei welcher Funken durch das Gas überzuspringen anfingen. Wilson fand, daß der Sättigungsstrom durch den Salzdampf genau so stark war wie der Strom, der in einer wässerigen Lösung des Salzes in einer Sekunde dieselbe Menge des Salzes elektrolysiert haben würde, die per Sekunde in die heiße Luft eingeführt wurde.

Es verdient hervorgehoben zu werden, daß uns dieses Resultat ein Mittel gibt, die Avogadrosche Konstante zu bestimmen, die unabhängig ist von jeder Hypothese über die Gestalt und Größe der Moleküle sowie über die Art und Weise, in welcher sie aufeinander einwirken. Wenn $N$ diese Konstante und $e$ die Ladung des Ions ist, dann ist $Ne = 1,22 \times 10^{10}$. Da nun, wie wir gesehen haben, $e = 3,4 \times 10^{10}$ ist, so ist

$$N = 3,9 \times 10^{19}.$$

Einerlei also, ob wir die Leitung der Elektrizität durch Flüssigkeiten oder durch Gase studieren, in jedem Falle kommen wir zu der Vorstellung einer natürlichen Einheit oder eines Atoms der Elektrizität, von welchem alle Ladungen ganze Vielfache sind, ebenso wie eine Quantität Wasserstoff ein ganzes Vielfaches eines Wasserstoffatoms ist.

## Masse der Elektrizitätsträger.

Wir müssen jetzt dazu übergehen, die Natur der Systeme zu betrachten, welche die Ladungen tragen, und um die Bedingungen recht einfach zu gestalten, wollen wir mit dem Falle eines Gases bei sehr niedrigem Druck beginnen, bei dem die Bewegung der Teilchen nicht durch Zusammenstöße mit den Gasmolekülen gehindert ist. Wir wollen uns ein Teilchen von der Masse $m$ und der Ladung $e$ denken, welches sich in der Ebene des Papiers bewegt, während ein gleichförmiges magnetisches Feld auf es einwirkt, welches auf dieser Ebene senkrecht steht. Wir haben gesehen, daß unter diesen Umständen auf das Teilchen eine mechanische Kraft gleich $Hev$ wirkt, wenn $H$ die magnetische Kraft und $v$ die Geschwindigkeit des Teilchens ist. Die Richtung dieser Kraft liegt in der Ebene des Papiers senkrecht zur Bahn des Teilchens. Da die Kraft immer senkrecht auf der Bewegungsrichtung des Teilchens steht, so ändert sich die Geschwindigkeit und folglich die Größe der Kraft, die auf es einwirkt, nicht, so daß die Bahn des Teilchens dieselbe ist, welche von einem Körper beschrieben wird, auf den eine konstante normale Kraft wirkt. Es ist leicht zu beweisen, daß diese Bahn ein Kreis ist, dessen Radius $a$ durch die Gleichung

$$a = \frac{mv}{eH} \quad \cdots\cdots\cdots \quad (1)$$

gegeben ist.

Die Geschwindigkeit $v$ des Teilchens läßt sich in folgender Weise bestimmen. Wir wollen annehmen, das Teilchen bewege sich horizontal in der Ebene des Papiers in einem gleichförmigen magnetischen Felde $H$, welches auf dieser Ebene senkrecht steht. Dann wirkt auf das Teilchen eine vertikale Kraft gleich $Hev$. Wenn wir nun außer der magnetischen Kraft eine vertikale elektrische Kraft $X$ wirken lassen, so wird diese auf das bewegte Teilchen eine mechanische Kraft $Xe$ ausüben. Wir wollen die Richtung von $X$ so wählen, daß diese Kraft die entgegengesetzte Richtung hat wie die vom Magneten herrührende Kraft, und den Wert von $X$ so regulieren, daß die beiden Kräfte gleich sind. Daß diese Anordnung erreicht ist, erkennen wir daran, daß in diesem Falle die Bewegung des Teilchens unter dem Einfluß der elektrischen und der magnetischen Kraft dieselbe ist, als wenn diese beiden Kräfte nicht vorhanden wären. Wenn die beiden Kräfte gleich sind, so haben wir

$$Xe = Hev$$

oder

$$v = \frac{X}{H} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Wenn wir also ein Mittel besitzen, die Bewegung des Teilchens zu verfolgen, so können wir den Radius $a$ des Kreises, in den sie durch eine konstante magnetische Kraft gebogen wird, berechnen und den Wert der elektrischen Kraft bestimmen, die erforderlich ist, um die Wirkung der magnetischen Kraft aufzuheben. Die Gleichungen (1) und (2) geben uns dann das Mittel, $v$ und $\frac{e}{m}$ zu finden.

### Werte von $\frac{e}{m}$ für negativ elektrische Teilchen in Gasen bei niedrigem Druck.

Der Wert von $\frac{e}{m}$ ist in dieser Weise für negativ elektrische Teilchen bestimmt worden, aus denen die Kathodenstrahlen bestehen, die einen so wesentlichen Teil der elektrischen Entladung durch ein Gas bei niedrigem Druck bilden. Er ist ferner bestimmt worden für die negativ elektrischen Teilchen, die von

Metallen ausgesandt werden, wenn sie dem ultravioletten Licht ausgesetzt werden oder wenn sie auf Weißglut erhitzt werden. Diese Versuche haben zu dem höchst bemerkenswerten Ergebnis geführt, daß der Wert von $\frac{e}{m}$ immer derselbe ist, einerlei, welches die Natur des Gases ist, in welchem sich das Teilchen befindet, und welches die Natur des Metalles ist, von dem es ausgegangen ist. In allen Fällen, in denen man den Wert von $\frac{e}{m}$ für negativ elektrische Teilchen bestimmt hat, die sich mit einer Geschwindigkeit bewegen, die beträchtlich kleiner ist als die Geschwindigkeit des Lichtes, hat man immer ungefähr $10^7$ gefunden, wenn die Einheiten Centimeter, Gramm und Sekunden sind und wenn die Ladung in elektromagnetischen Einheiten gemessen wird. Da der Wert von $\frac{e}{m}$ für das Wasserstoffion bei der Elektrolyse von Flüssigkeiten nur $10^4$ ist, und da wir gesehen haben, daß die Ladung des Gasions gleich der des Wasserstoffions bei der gewöhnlichen Elektrolyse ist, so sehen wir, daß die Masse eines Trägers der negativen Ladung ungefähr nur der tausendste Teil des Wasserstoffatoms sein muß, also einer Masse, die lange Zeit als die kleinste galt, die einer selbständigen Existenz fähig ist.

Für diese Einheiten negativer Elektrizität habe ich den Namen Korpuskeln vorgeschlagen. Diese Korpuskeln sind immer dieselben, einerlei wie die Elektrisierung entstanden ist und wo sie sich vorfinden. Die negative Elektrizität in einem Gase bei niedrigem Druck hat also eine ähnliche Struktur wie ein Gas, indem die Korpuskeln die Rolle der Moleküle spielen. Das „negativ elektrische Fluidum", um die alte Bezeichnung zu gebrauchen, gleicht einem gasförmigen Fluidum mit korpuskularer anstatt molekularer Struktur.

## Die Träger der positiven Elektrisierung.

Dieselben Methoden können wir anwenden, um die Werte von $\frac{e}{m}$ für die Träger der positiven Elektrisierung zu bestimmen. Dies hat Wien für die positive Elektrisierung getan, die sich in gewissen Teilen der Entladung in einer Vakuumröhre findet, und ich selbst habe $\frac{e}{m}$ für die positive Elektrisierung gemessen, die von einem heißen Draht abgegeben wird. Die Resultate dieser Messungen bilden einen auffallenden Kontrast gegen die Resultate der Messungen für die negative Elektrisierung, indem $\frac{e}{m}$ nicht wie bei der negativen Elektrisierung, den konstanten hohen Wert $10^7$ hat, sondern niemals einen höheren Wert als $10^4$, den Wert, den $\frac{e}{m}$ haben würde, wenn der Träger das Wasserstoffatom wäre. In vielen Fällen ist der Wert von $\frac{e}{m}$ viel kleiner als $10^4$, ein Zeichen, daß in diesen Fällen die positive Ladung von Atomen getragen wird, deren Masse größer ist als die Masse des Wasserstoffatoms. Der Wert von $\frac{e}{m}$ variiert mit der Natur der Elektroden und mit dem Gase in der Entladungsröhre, genau so wie es sein würde, wenn die Träger der positiven Ladung die Atome der Elemente wären, die zufälligerweise anwesend sind, wenn die positive Elektrisierung stattfindet.

Diese Resultate führen uns zu einer Ansicht über die Elektrisierung, die eine auffallende Ähnlichkeit mit der „unitarischen Theorie" Franklins hat. Im Gegensatz zu Franklin nehmen wir an, daß das elektrische Fluidum die negative und nicht die positive Elektrizität ist. Das „elektrische Fluidum" Franklins entspricht einer Ansammlung von Korpuskeln, und zwar ist die negative Elektrisierung eine Ansammlung dieser Korpuskeln. Die Übertragung der Elektrisierung von einer Stelle nach einer anderen wird dadurch bewirkt, daß sich Korpuskeln von derjenigen Stelle, an welcher eine Zunahme positiver Elektrisierung stattfindet, nach derjenigen Stelle hinbewegen, an welcher eine Zunahme von negativer Elektrisierung stattfindet. Ein positiv elektrischer Körper ist ein solcher, der einen Teil seiner Korpuskeln verloren hat. Wir haben gesehen, daß die Masse und die Ladung der Korpuskeln direkt experimentell bestimmt worden sind. Wir wissen über das „elektrische Fluidum" tatsächlich mehr als über Flüssigkeiten wie Luft oder Wasser.

## Fünftes Kapitel.

# Konstitution des Atoms.

Einerlei ob wir die Korpuskeln durch Kathodenstrahlen, durch ultraviolettes Licht oder durch glühende Metalle erzeugen, und einerlei, welches die betreffenden Metalle und Gase sind, wir bekommen, wie wir gesehen haben, immer dieselbe Art von Korpuskeln. Da man von sehr verschiedenen Agentien und Materialien Korpuskeln erhält, die in jeder Hinsicht übereinstimmen, und da die Masse der Korpuskeln kleiner ist als die Masse irgend eines bekannten Atoms, so sehen wir, daß die Korpuskel ein Bestandteil des Atoms sehr verschiedener Substanzen sein muß, daß also die Atome dieser Substanzen etwas gemeinsam haben müssen.

So finden wir uns der Vorstellung gegenübergestellt, daß die Atome der chemischen Elemente aus einfacheren Systemen aufgebaut sind, einer Vorstellung, die von mehr als einem Chemiker ausgesprochen worden ist. So stellte Prout 1815 die Hypothese auf, daß die Atome aller chemischen Elemente aus Wasserstoffatomen aufgebaut sind. Unter der Voraussetzung, daß kein Gewichtsverlust stattfindet, wenn sich die Wasserstoffatome vereinigen, um das Atom eines anderen Elementes zu bilden, müßten also die Verbindungsgewichte aller anderen Elemente ganze Zahlen sein, was aber mit der Erfahrung nicht im Einklang steht. Dumas nahm deshalb an, das Uratom sei nicht das Wasserstoffatom, sondern ein kleineres Atom, dessen Masse nur die Hälfte oder der vierte Teil der Masse des Wasserstoffatoms ist. Eine weitere Stütze bekam die Vorstellung von der komplexen Natur des Atoms durch die Entdeckung von Newlands und Mendelejeff, die unter dem Namen des periodischen Gesetzes bekannt ist, welches besagt, daß sich in den Eigenschaften der Elemente eine Periodizität bemerkbar macht, wenn die Elemente in der Reihenfolge ihrer Atomgewichte zusammengestellt werden. Die einfachen Beziehungen zwischen den Verbindungsgewichten mancher Elemente, die ähnliche Eigenschaften besitzen, z. B. die Tatsache, daß das Verbindungsgewicht des Natriums das arithmetische Mittel zwischen den Verbindungsgewichten von Lithium und Kalium ist, deuten alle darauf hin, daß die Atome der verschiedenen Elemente etwas gemeinsam haben. Neuere Untersuchungen über die Existenz von Serien von Spektrallinien, deren Schwingungszahlen untereinander in bestimmten numerischen Beziehungen stehen, haben viel zur Erkenntnis dieser Ähnlichkeit beigetragen. Schon vor langer Zeit hatte Sir Norman Lockyer nur mit Rücksicht auf spektroskopische Tatsachen die Ansicht ausgesprochen, daß die Elemente in Wirklichkeit Verbindungen sind, die unter geeigneten Umständen dissoziiert werden können. Zu Gunsten dieser Annahme sprechen ferner die Erscheinungen der Radioaktivität, von denen ich noch später zu reden haben werde. Man hat nämlich gute Gründe für die Annahme, daß die Radioaktivität auf Veränderungen beruht, die in den Atomen der radioaktiven Substanzen vor sich gehen. Wenn dies der Fall ist, so müssen wir das Problem der Konstitution des Atoms ins Auge fassen und sehen, ob wir uns ein Modell vorstellen können, welches die merkwürdigen Eigenschaften der radioaktiven Substanzen zu erklären vermag. Es ist daher vielleicht nicht überflüssig, die Bedeutung der Existenz der Korpuskeln auf das Problem der Konstitution des Atoms zu erwägen; und wenn auch das Modell des Atoms, zu dem wir durch diese Erwägungen kommen, sehr roh und unvollkommen ist, so kann es doch vielleicht dadurch von Nutzen sein, daß es uns für weitere Forschungen über die Konstitution des Atoms die Wege zeigt.

### Die Natur der Einheit, aus denen die Atome aufgebaut sind.

Ausgehend von der Hypothese, daß das Atom eine Anhäufung einer Anzahl einfacherer Systeme ist, wollen wir erwägen, welches die Natur eines dieser Systeme ist. Wir haben gesehen, daß die Korpuskel, deren Masse so viel kleiner als die Masse des Atoms ist, einen Bestandteil des Atoms bildet, und es ist natürlich, die Korpuskeln als die Bestandteile der Ursysteme zu betrachten. Die Korpuskel besitzt aber eine bestimmte Ladung negativer Elektrizität, und da wir mit jeder Ladung von Elektrizität stets eine ebensogroße Ladung von Elektrizität der entgegengesetzten Art in Zusammenhang bringen, so müssen wir erwarten, daß die negative Ladung der Korpuskel mit einer ebensogroßen Ladung positiver Elektrizität verbunden ist. Wir wollen uns daher unser Ursystem als ein elektrisches Paar vorstellen, mit einer negativen Korpuskel an dem einen Ende und einer gleichen positiven Ladung am anderen. Die beiden Enden denken wir uns durch elektrische Kraftlinien verbunden, denen wir materielle Existenz zuschreiben. Aus später anzuführenden Gründen müssen wir annehmen, daß das Volumen, über welches sich die positive Elektrizität erstreckt, viel größer ist als das Volumen der Korpuskel. Daher sind die Kraftlinien in der Korpuskel viel mehr zusammengedrängt als an anderen Stellen des Systems. Infolgedessen ist die Menge des von den Kraftlinien gebundenen Äthers, dessen Masse wir als die Masse des Systems betrachten, in der Nähe der Korpuskel viel größer als anderswo. Wenn, wie wir angenommen haben, das Volumen der Korpuskel im Vergleich mit dem von der positiven Elektrisierung eingenommenen Volumen sehr klein ist, so wird die Masse des Systems fast ausschließlich aus der Masse des gebundenen Äthers in der Nähe der Korpuskel entspringen. Die Masse des Systems wird also von der Lage ihres positiven Endes so gut wie unabhängig und sehr annähernd gleich der Masse der Korpuskel sein, wenn diese allein im Felde wäre. Diese Masse (s. S. 14) ist für jede Korpuskel $\frac{2\,e^2}{3\,a}$, wenn $e$ die Ladung und $a$ der Radius der Korpuskel ist, der, wie wir gesehen haben, ungefähr gleich $10^{-13}$ cm ist.

Nun stellen Sie sich vor, wir hätten ein Universum, welches aus einer unermeßlichen Anzahl dieser elektrischen Paare besteht, die wir als unser Ursystem betrachten. Wenn diese in Ruhe wären, so würden sie sich infolge ihrer Anziehung gegenseitig annähern, ebenso wie eine Anzahl von Magneten, die sich frei bewegen können, sich gegenseitig annähern und Aggregate von mehr als einem System bilden würden.

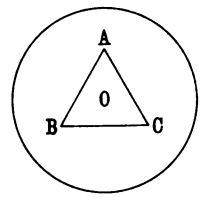
Wenn sich dagegen die einzelnen Systeme ursprünglich mit großer Geschwindigkeit bewegen, so kann die relative Geschwindigkeit zweier Systeme, wenn sie sich einander hinreichend annähern, um eine merkliche Anziehung aufeinander auszuüben, genügen, um die Systeme trotz ihrer gegenseitigen Anziehung voneinander zu entfernen. In diesem Falle würde die Bildung von Aggregaten erst dann stattfinden, wenn die kinetische Energie der Einheiten bis zu dem Grade abgenommen hat, daß, wenn sie in Kollision kommen, das aus ihrer relativen Bewegung entspringende Bestreben, sich zu trennen, nicht hinreichend ist, zu verhindern, daß sie unter der Wirkung ihrer gegenseitigen Anziehung zusammenbleiben.

Wir wollen einen Augenblick betrachten, in welcher Weise die kinetische Energie eines solchen Aggregates von Einheiten abnehmen würde. Wenn sich die Geschwindigkeit eines geladenen Körpers ändert, so verliert, wie wir gesehen haben (S. 44), der Körper Energie, da er elektrische Wellen erzeugt, die in den Raum ausstrahlen und Energie mit sich führen. Wenn daher die Einheiten in Kollision kommen, d. h. wenn sie so nahe zusammenkommen, daß sie gegenseitig ihre Bewegung merklich beschleunigen oder verzögern, so wird Energie fortgestrahlt, die von den benachbarten Einheiten nicht vollständig absorbiert wird. Es wird also fortwährend Energie verloren gehen, und nach einer gewissen, allerdings vielleicht sehr langen Zeit, wird die kinetische Energie bis zu dem Werte abgenommen haben, bei welchem die Aggregation der Einheiten zu Gruppen von je zweien beginnt. Später werden sich Aggregate bilden, die eine größere Anzahl von Einheiten enthalten.

Wenn wir die Frage der weiteren Aggregation dieser komplexen Gruppen betrachten, müssen wir bedenken, daß die Möglichkeit der Aggregation nicht ausschließlich von der Geschwindigkeit des Aggregates als Ganzes, d. h. von der Geschwindigkeit des Schwerpunktes abhängt, sondern auch von den relativen Geschwindigkeiten der Korpuskeln innerhalb des Aggregates.

Wir wollen uns das Aggregat wie das Aepinussche Atom Lord Kelvins vorstellen, d. h. als eine Kugel gleichförmig positiver Elektrisierung, die also in radialer Richtung eine elektrische Kraft ausübt, die an einem inneren Punkt der Entfernung vom Mittelpunkt proportional ist. Weiter denken wir uns, daß die viel kleineren negativ elektrischen Korpuskeln sich innerhalb der Kugel umherbewegen. Die Anzahl der Korpuskeln ist die Anzahl der Einheiten, welche das Aggregat gebildet hatten, und die gesamte negative Elektrisierung der Korpuskeln ist gleich der positiven Elektrisierung der Kugel. Um einen bestimmten Fall anzunehmen, wollen wir uns denken, drei Korpuskeln $A, B, C$ befänden sich an den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks, dessen Mittelpunkt mit dem Mittelpunkt der Kugel zusammenfällt. Nehmen Sie zunächst an, die Korpuskeln befänden sich in Ruhe. Sie werden im Gleichgewicht sein, wenn sie sich in einer solchen Entfernung vom Mittelpunkt der Kugel befinden, daß die Abstoßung zwischen den Korpuskeln, die offenbar radial sein wird, mit der radialen Anziehung im Gleichgewicht ist, die von der positiven Elektrisierung der Kugel auf die Korpuskeln ausgeübt wird. Durch eine einfache Rechnung läßt sich zeigen, daß dies der Fall ist, wenn der Abstand der Korpuskeln vom Mittelpunkt gleich dem 0,57fachen vom Radius der Kugel ist. Sodann nehmen Sie an, daß die Korpuskeln nicht in Ruhe sind, sondern daß sie kreisförmige Bahnen um den Mittelpunkt der Kugel beschreiben. Die Zentrifugalkraft wird sie vom Mittelpunkt weiter entfernen, und die Größe der Entfernung hängt von der Geschwindigkeit ab, mit der sie sich in ihren Bahnen bewegen. Wenn diese Geschwindigkeit zunimmt, so nimmt auch die Entfernung der Korpuskeln vom Mittelpunkte der Kugel zu, bis die Korpuskeln bei einer bestimmten Geschwindigkeit die Oberfläche der Kugel erreichen. Eine weitere Steigerung der Geschwindigkeit wird bewirken, daß sie sich zuerst außerhalb der Kugel bewegen und sich schließlich von der Kugel vollständig entfernen, was den Zerfall des Atoms zur Folge hat.

Fig. 15.




So sehen wir, daß die Konstitution des Aggregates nicht permanent ist, wenn die von der Geschwindigkeit der Korpuskeln innerhalb der Kugel herrührende kinetische Energie in bezug auf den Mittelpunkt der Kugel einen gewissen Wert übersteigt. Diese kinetische Energie der Korpuskeln innerhalb des Atoms wollen wir der Kürze halber die korpuskulare Temperatur des Atoms nennen. Wir können dann das vorhergehende Resultat so aussprechen, daß das Atom nur so lange stabil ist, als die korpuskulare Temperatur einen gewissen Wert nicht übersteigt.

Wir müssen sorgfältig unterscheiden zwischen der korpuskularen Temperatur, die die mittlere kinetische Energie der Korpuskeln innerhalb des Atoms ist, und der molekularen Temperatur, die die mittlere kinetische Energie ist, die von der Bewegung des Schwerpunktes des Atoms herrührt. Diese Temperaturen stehen wahrscheinlich in keiner sehr engen Beziehung zueinander. Sie würden einander proportional sein, wenn das Gesetz der Verteilung der Energie unter die verschiedenen Grade der Freiheit des Atoms anwendbar wäre. Dieses Gesetz ist jedoch mit den physikalischen Eigenschaften der Gase unvereinbar, und der in der kinetischen Gastheorie gegebene Beweis des Satzes gibt keine Schätzung der Zeit, welche erforderlich ist, um den in dem Gesetze betrachteten Zustand herzustellen. Vielleicht ist diese Zeit so lang, daß Gase niemals in diesen Zustand kommen können.

Lassen Sie uns jetzt den Fall zweier Aggregate, $A$ und $B$, betrachten, deren korpuskulare Temperaturen hoch sind, aber nicht so hoch, daß $A$ und $B$, jedes für sich allein, unbeständig sein würden. Nehmen Sie ferner an, um die Möglichkeit einer Vereinigung möglichst günstig zu gestalten, die Schwerpunkte von $A$ und $B$ seien in Ruhe, wenn sie ganz nahe beieinander sind. Werden sich $A$ und $B$ zu einem komplexeren Aggregat vereinigen, was sie tun würden, wenn die Korpuskeln in ihnen in Ruhe wären? Ich glaube, wir können uns leicht davon überzeugen, daß sie dies nicht notwendigerweise tun werden. Denn wenn sich $A$ und $B$ unter der Einwirkung ihrer gegenseitigen Anziehung einander nähern, so wird die potentielle Energie, die $A$ und $B$ besitzen, weil sie voneinander getrennt sind, kleiner, und ihre kinetische Energie wird größer. Diese Zunahme der kinetischen Energie der Korpuskeln in $A$ und $B$ wird das Bestreben der Korpuskeln, ihre Atome zu verlassen, erhöhen, und wenn die Zunahme der kinetischen Energie beträchtlich ist, so können $A$ und $B$ eine oder mehrere Korpuskeln verlieren. Der Austritt einer Korpuskel wird zur Folge haben, daß $A$ und $B$ positiv geladen sind, und diese werden sich daher infolge der Abstoßung ihrer Ladungen voneinander zu entfernen streben. Wenn sie voneinander getrennt sind, werden sie beide eine positive Ladung besitzen. Da sich aber jetzt in der Region, in welcher sich $A$ und $B$ bewegen, freie Korpuskeln mit negativen Ladungen befinden, so werden diese positiven Ladungen schließlich durch die Korpuskeln, die mit $A$ und $B$ zusammenstoßen und mit ihnen verbunden bleiben, neutralisiert werden.

Wir kommen also zu dem Schluß, daß die Vereinigung nur dann permanent sein kann, wenn die korpuskulare Temperatur nach der Vereinigung einen gewissen Grenzwert nicht übersteigt, indem andernfalls der gebildete Komplex unbeständig und einer permanenten Existenz unfähig ist. Die korpuskulare Temperatur des aus $A$ und $B$ bestehenden Aggregates hängt aber von den korpuskularen Temperaturen von $A$ und $B$ vor der Vereinigung und auch von der Verminderung der potentiellen Energie des Systems ab, die durch die Vereinigung von $A$ und $B$ bewirkt wurde. Wenn die korpuskularen Temperaturen von $A$ und $B$ vor der Vereinigung sehr hoch waren, so wird die korpuskulare Temperatur nach der Vereinigung ebenfalls hoch sein. Wenn sie einen gewissen Grenzwert übersteigen, so wird die korpuskulare Temperatur nach der Vereinigung so hoch sein, daß das Aggregat $AB$ nicht stabil sein würde und infolgedessen überhaupt nicht entsteht. Eine Bedingung für die Bildung komplexer Aggregate ist also die, daß die korpuskulare Temperatur ihrer Bestandteile vor der Vereinigung hinreichend niedrig ist.

Wenn die molekulare Temperatur des Gases, in welchem $A$ und $B$ Moleküle sind, sehr hoch ist, so kann die Vereinigung von $A$ und $B$ durch die relativ hohe Geschwindigkeit von $A$ und $B$ verhindert werden, die sie trotz ihrer gegenseitigen Anziehung voneinander entfernt. Es muß aber ausdrücklich hervorgehoben werden, daß wir nicht imstande sind, die Vereinigung durch bloßes Erniedrigen der molekularen Temperatur, d. h. durch Abkühlen des Gases zu bewirken. Die Vereinigung ist nur dann möglich, wenn die korpuskulare Temperatur, d. h. die kinetische Energie der Bewegung der Korpuskeln, innerhalb des Atoms unter einen bestimmten Wert herabgemindert wird. Wir können die Vereinigung durch Erhöhung der molekularen Temperatur eines Gases verhindern, aber wir können nicht die Vereinigung durch Erniedrigung dieser Temperatur bewirken.

So ist, um ein besonderes Beispiel anzuführen, der Grund, weshalb sich die auf der Erde vorhandenen Wasserstoffatome selbst bei der äußerst niedrigen Temperatur, bei welcher der Wasserstoff flüssig wird, nicht zur Bildung eines anderen Elementes vereinigen, der, daß selbst bei dieser Temperatur die kinetische Energie innerhalb des Atoms, d. h. die korpuskulare Temperatur, zu hoch ist. Es wird nützlich sein, nochmals darauf hinzuweisen, daß zwischen der korpuskularen Temperatur und der molekularen Temperatur kein sehr enger Zusammenhang existiert, und daß wir die letztere bis fast auf den absoluten Nullpunkt erniedrigen, erstere dagegen nicht wesentlich beeinflussen können.

Wir wollen jetzt dazu übergehen, die Bedeutung zu diskutieren, welche diese Resultate für die Theorie haben, daß die verschiedenen chemischen Elemente sich nach und nach durch die Aggregation von Ureinheiten entwickelt haben.

Wir wollen annehmen, die erste Stufe sei erreicht und es existierten eine Anzahl von Systemen, die durch die Vereinigung von zwei Einheiten entstanden sind. Wenn sich diese binären Systeme, wie wir sie nennen wollen, gebildet haben, so müssen die Korpuskeln in dem Systeme eine bedeutende kinetische Energie besitzen. Wenn nämlich die beiden Einheiten zusammengekommen sind, so muß ein Betrag von kinetischer Energie erzeugt worden sein, der gleich der Verminderung ist, den die potentielle Energie infolge der Vereinigung der beiden Einheiten erfahren hat. Da diese binären Systeme ursprünglich hohe korpuskulare Temperaturen besitzen, so werden sie sich nicht leicht untereinander oder mit einer anderen Einheit verbinden. Bevor eine solche Vereinigung stattfinden kann, muß die kinetische Energie der Korpuskeln vermindert werden.

Wir wollen sogleich zur Diskussion der Frage übergehen, in welcher Weise diese Verminderung zustande kommt. Das Resultat dieser Diskussion, um es sogleich vorauszuschicken, besteht darin, daß die Abfallgeschwindigkeit der korpuskularen Temperatur wahrscheinlich bei den einzelnen binären Systemen sehr verschieden ist.

Einige der Systeme haben daher wahrscheinlich einen Zustand, in welchem sie sich untereinander oder mit einer Einheit verbinden können, weit früher erreicht als andere. Die Systeme der ersteren Art werden sich verbinden, und wir werden Systeme haben, von denen einige drei, andere vier Einheiten enthalten, während gleichzeitig noch viele von den binären Systemen übrig sind. Mit dem Auftreten der komplexeren Systeme brauchen daher keineswegs zugleich die einfacheren zu verschwinden.

In derselben Weise entstehen die weiteren Aggregate aus den Systemen, welche drei oder vier Einheiten enthalten. Einige von diesen Systemen werden früher als die anderen fähig sein, sich zu vereinigen, und es entstehen Systeme, die acht Einheiten enthalten, bevor die beständigeren von denen, die vier, drei, zwei oder nur eine Einheit enthalten, verschwunden sind. Bei dem weiteren Fortschreiten der Aggregation wird die Anzahl der verschiedenen Systeme, die zu gleicher Zeit vorhanden sind, immer größer.

Wenn wir also annehmen, daß die Systeme, in denen die Anzahl der Einheiten verschieden ist, den verschiedenen chemischen Elementen entsprechen, so ist zu erwarten, da das Weltall älter wird, daß Elemente von immer höherem Atomgewicht zum Vorschein kommen. Mit ihrem Auftreten ist aber nicht das Verschwinden der Elemente von niedrigerem Atomgewicht verbunden. Die Anzahl der Atome der letzteren wird allerdings kleiner, da nach unserer Hypothese die leichteren Elemente das Material für den Aufbau der schwereren liefern. Die Atome der letzteren werden aber nicht sämtlich auf einmal verbraucht, und es ist daher eine große Anzahl von gleichzeitig existierenden Elementen möglich.

Wenn aber die korpuskulare Temperatur der Atome durch Strahlung fortwährend sinkt, so werden die leichteren Elemente im Laufe der Zeit verschwinden, und wenn die schwereren Atome nicht zerfallen, so muß das Atomgewicht des leichtesten noch vorhandenen Elementes fortwährend größer werden. Da der Wasserstoff das leichteste bekannte Element ist und da das Wasserstoffatom ungefähr tausend Korpuskeln enthält, so sind nach dieser Theorie alle Aggregate von weniger als tausend Einheiten in Verbindung getreten und existieren nicht mehr im freien Zustande.

## Wie die Korpuskeln im Atom kinetische Energie verlieren oder gewinnen.

Wenn die kinetische Energie, welche aus der Bewegung der Korpuskeln in bezug auf den Schwerpunkt des Atoms entspringt, durch Kollisionen in kinetische Energie der Bewegung des Atoms als Ganzes, d. h. in molekulare Temperatur umgewandelt werden könnte, so würde, da die Anzahl der Korpuskeln im Atom sehr groß ist, der kinetischen Gastheorie zufolge die spezifische Wärme eines Gases bei konstantem Druck sehr annähernd gleich der spezifischen Wärme bei konstantem Volum sein. Dies ist aber bei keinem einzigen Gase der Fall. Hieraus schließen wir, daß die Verminderung der kinetischen Energie der Korpuskeln nicht durch Kollisionen verursacht wird.

Wir haben jedoch gesehen (S. 44), daß ein elektrisches Teilchen Energie ausstrahlt, wenn sich seine Geschwindigkeit in Größe oder Richtung ändert. Die Korpuskeln im Atom werden also elektrische Wellen aussenden, Energie ausstrahlen und so kinetische Energie verlieren.

Die Menge der Energie, welche die Korpuskeln in dieser Weise verlieren, variiert in hohem Grade mit der Anzahl der Korpuskeln und der Art und Weise, wie sie sich bewegen. Wenn z. B. eine einzelne Korpuskel eine kreisförmige Bahn vom Radius $a$ mit gleichförmiger Geschwindigkeit $v$ beschreibt, so ist der Energieverlust durch Strahlung per Sekunde gleich $\frac{2}{3}\,\frac{e^2 v^4}{V a^2}$, wenn $e$ die Ladung der Korpuskel und $V$ die Geschwindigkeit des Lichtes ist. Wenn sich an den beiden Enden eines Durchmessers zwei Korpuskeln in derselben Bahn mit derselben Geschwindigkeit bewegen wie die eine Korpuskel, so ist der Energieverlust der beiden Korpuskeln per Sekunde viel geringer als der Verlust der einzelnen Korpuskel, und je kleiner die Geschwindigkeit der Korpuskel ist, desto bedeutender ist die Abnahme des Energieverlustes, der durch die Zunahme der Anzahl der Korpuskeln bewirkt wird. Der Einfluß der Vermehrung der Anzahl der Korpuskeln ist aus der folgenden Tabelle zu ersehen, die die Größe der Strahlung der einzelnen Korpuskel für verschiedene Anzahlen von Korpuskeln angibt, die in gleichen Winkelabständen auf einer kreisförmigen Bahn angebracht sind.

Die Tabelle bezieht sich auf zwei verschiedene Fälle. In dem einen ist die Geschwindigkeit der Korpuskel gleich dem zehnten Teil, in dem anderen gleich dem hundertsten Teil der Geschwindigkeit des Lichtes angenommen. In beiden Fällen ist die Strahlung der einzelnen Korpuskel als Einheit genommen.

Bei einer Gruppe von sechs Korpuskeln, die sich mit einem Zehntel der Geschwindigkeit des Lichtes bewegt, ist also die Strahlung der einzelnen Korpuskel weniger als der fünfmillionte Teil der Strahlung einer Korpuskel, die dieselbe Bahn mit der-

| Anzahl der Korpuskeln | $v = \frac{V}{10}$ | $v = \frac{V}{100}$ |
|---|---|---|
| 1 . . . . . . . . . | 1 | 1 |
| 2 . . . . . . . . . | $9,6 \times 10^{-2}$ | $9,6 \times 10^{-4}$ |
| 3 . . . . . . . . . | $4,6 \times 10^{-3}$ | $4,6 \times 10^{-7}$ |
| 4 . . . . . . . . . | $1,7 \times 10^{-4}$ | $1,7 \times 10^{-10}$ |
| 5 . . . . . . . . . | $5,6 \times 10^{-5}$ | $5,6 \times 10^{-13}$ |
| 6 . . . . . . . . . | $1,6 \times 10^{-7}$ | $1,6 \times 10^{-17}$ |

selben Geschwindigkeit beschreibt. Wenn die Geschwindigkeit der Korpuskel nur ein Hundertstel der Geschwindigkeit des Lichtes ist, so ist die Reduktion der Strahlung noch viel größer.

Wenn die symmetrische Anordnung der Korpuskeln auf einem Kreise, dessen Mittelpunkt in Ruhe ist, gestört wird, so wird die Strahlung bedeutend erhöht. Bei einem Atom, welches eine große Anzahl von Korpuskeln enthält, ändert sich der Betrag der ausgestrahlten Energie sehr schnell mit der Art und Weise, wie sich die Korpuskeln im Atom bewegen. Wenn sich z. B. eine große Anzahl von Korpuskeln dicht hintereinander auf einer kreisförmigen Bahn bewegten, so würde die Strahlung außerordentlich gering sein. Sie würde vollständig verschwinden, wenn die Korpuskeln so dicht aufeinander folgten, daß sie einen kontinuierlichen Ring negativer Elektrisierung bildeten. Wenn sich dieselbe Anzahl von Teilchen in dem Atom unregelmäßig umherbewegten, würde die Strahlung, d. h. die korpuskulare Abkühlung, ungeheuer viel größer sein, auch wenn in dem letzteren Falle die kinetische Energie der Korpuskeln nicht größer ist als im ersteren. Die Energiestrahlung der Korpuskeln, deren Geschwindigkeit nicht gleichförmig ist, bildet daher einen Prozeß, der die korpuskulare Temperatur des Atoms nach und nach erniedrigt und der also, wenn unsere Auffassung richtig ist, das Atom befähigt, weitere Aggregate zu bilden, was die Bildung neuer chemischer Elemente zur Folge haben muß.

Dieser Abkühlungsprozeß muß jedenfalls ein äußerst langsamer sein. Denn wenn auch die korpuskulare Temperatur bei der

Bildung des Atoms eines neuen Elementes sehr hoch ist und diese Temperatur sehr bedeutend abnehmen muß, bevor das Atom in ein neues Aggregat eintreten kann, so haben wir doch Grund für die Annahme, daß einige von den Elementen viele Tausende, ja Millionen von Jahren unverändert existiert haben müssen. Direkt beweisen können wir es allerdings nicht, daß im Atom Veränderungen stattfinden. Allein einige Erscheinungen der Radioaktivität, auf die ich später noch zu sprechen kommen werde, beweisen zwar streng genommen nicht, machen es aber sehr wahrscheinlich, daß derartige säkulare Änderungen im Atom stattfinden.

Wir dürfen auch nicht vergessen, daß die Korpuskeln eines jeden Atoms von anderen Atomen Strahlung erhalten und absorbieren. Dies wird die korpuskulare Temperatur des Atoms zu erhöhen streben und wird also dazu beitragen, die Zeit zu verlängern, welche erforderlich ist, damit die Temperatur bis zu dem Punkte sinkt, bei welchem neue Aggregationen des Atoms entstehen können.

Der Umstand, daß die Strahlung in so hohem Grade von der Art und Weise abhängt, wie sich die Korpuskeln im Atom bewegen, zeigt an, daß die verschiedenen Atome eines bestimmten Elementes nicht dieselbe Lebensdauer haben. Einige derselben werden viel früher als die anderen fähig sein, an neuen Umwandlungen teilzunehmen. Es ist wichtig, sich eine Vorstellung von der Größe der Energiemengen zu machen, um die es sich bei der Bildung eines komplexen Atoms oder bei einer Umformung der Konfiguration innerhalb des Atoms handelt. Wenn ein Atom $n$ Korpuskeln enthält, deren jede eine Ladung $e$, in elektrostatischen Einheiten gemessen, hat, so ist die Gesamtmenge negativer Elektrizität in dem Atom $n\,e$, und eine ebenso große Menge positiver Elektrizität ist durch die Kugel positiver Elektrisierung verteilt. Daher ist die Arbeit, welche erforderlich ist, um das Atom in die Einheiten, aus denen es besteht, zu zerlegen, mit $\frac{(n\,e)^2}{a}$ vergleichbar, wenn $a$ der Radius der Kugel ist, welche die Korpuskeln enthält. Da nun das Atom durch die Aggregation dieser Einheiten entstanden ist, so wird $\frac{(n\,e)^2}{a}$ von derselben Größenordnung sein wie die kinetische Energie, die diesen Bestandteilen während ihrer ganzen Lebensdauer mitgeteilt worden ist, von der Zeit an, als sie anfingen, als getrennte Einheiten zu existieren, bis zu der Zeit, als sie Glieder des betreffenden Atoms wurden. Sie werden während dieses Zeitraumes eine große Menge dieser Energie ausgestrahlt haben, aber aus der folgenden Rechnung wird sich ergeben, welche ungeheuere Menge von kinetischer Energie die Korpuskeln in dem Atom besitzen müssen, wenn sie auch nur einen sehr geringen Bruchteil der mitgeteilten Energie zurückgehalten haben. Wir wollen den Wert von $\frac{(n\,e)^2}{a}$ für sämtliche in einem Gramm der Substanz enthaltene Atome berechnen. Wenn $N$ die Anzahl dieser Atome in einem Gramm ist, dann ist $N\frac{(n\,e)^2}{a}$ der Wert der Energie, den diese Atome bekommen haben. Wenn $M$ die Masse eines Atoms ist, so ist $NM = 1$, also

$$N\frac{(n\,e)^2}{a} = \frac{1}{M}\,\frac{(n\,e)^2}{a}.$$

Wenn aber $m$ die Masse einer Korpuskel ist, so ist

$$n\,m = M,$$

folglich

$$N\frac{(n\,e)^2}{a} = \frac{e}{m}\,\frac{n\,e}{a}.$$

Nun ist, wenn $e$ in elektrostatischen Einheiten gemessen wird,

$$\frac{e}{m} = 3 \times 10^{17} \text{ und } e = 3{,}4 \times 10^{-10},$$

folglich

$$N\frac{(n\,e)^2}{a} = 10{,}2 \times 10^7 \times \frac{n}{a} \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

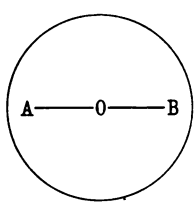
Wenn das betreffende Atom das Wasserstoffatom ist, so ist $n = 1000$, und wenn wir für den Radius dieses Atoms den in der kinetischen Gastheorie gewöhnlich angenommenen Wert $10^{-8}$ cm wählen, so ergibt sich

$$N\frac{(n\,e)^2}{a} = 1{,}02 \times 10^{19} \text{ Erg.}$$

Diese Energiemenge würde hinreichend sein, um eine Million Tonnen auf eine Höhe von 90 m zu heben. Aus der Gleichung (1) ersehen wir ferner, daß diese Energie der Anzahl der Korpuskeln proportional ist. Je größer also das Molekulargewicht eines Elementes ist, desto größer ist die Energiemenge, die in den Atomen eines Grammes aufgespeichert ist.

Auf die Natur der innerhalb des Atoms stattfindenden Verwandlungen werden wir zurückkommen, wenn wir einige der Erscheinungen der Radioaktivität diskutieren. Bevor wir dies tun, ist es wünschenswert, die Art und Weise, wie sich die Korpuskeln im Atom anordnen, etwas näher zu betrachten. Wir wollen mit dem Fall beginnen, daß die Korpuskeln in Ruhe sind. Wir nehmen an, daß sich die Korpuskeln in einer Kugel von gleichförmiger positiver Elektrisierung befinden, die eine radiale Anziehungskraft erzeugt, die auf jede Korpuskel proportional ihrem Abstand vom Mittelpunkt wirkt, und das Problem besteht darin, die Korpuskeln innerhalb der Kugel so anzuordnen, daß sie unter dem Einfluß dieser Anziehung und ihrer gegenseitigen Abstoßung im Gleichgewicht sind. Zwei Korpuskeln, $A$ und $B$, sind, wie leicht einzusehen ist, im Gleichgewicht, wenn sie mit dem Mittelpunkte $O$ der Kugel in gerader Linie liegen und wenn $OA = OB$ gleich der Hälfte des Radius der Kugel ist (Fig. 16).

Fig. 16.

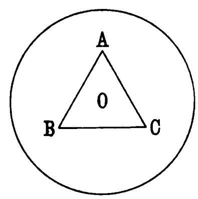



Drei Korpuskeln $A$, $B$, $C$ sind im Gleichgewicht, wenn $ABC$ ein gleichseitiges Dreieck ist, dessen Mittelpunkt $O$ ist und in welchem $OA = OB = OC$ gleich dem $\left(\frac{1}{5}\right)^{\frac{1}{3}}$-, d. h. gleich dem 0,57fachen des Radius der Kugel ist (Fig. 17).

Vier Korpuskeln befinden sich im Gleichgewicht, wenn sie sich an den Ecken eines regulären Tetraeders befinden, dessen Mittelpunkt mit dem Mittelpunkt der Kugel zusammenfällt. In diesen Fällen befinden sich die Korpuskeln sämtlich auf der Oberfläche einer Kugel, die mit der Kugel der positiven Elektrisierung konzentrisch ist, und man sollte denken, daß für jede beliebige Anzahl von Korpuskeln die Gleichgewichtslage aus einer symmetrischen Verteilung über die Oberfläche der Kugel bestehen müsse. Eine solche Verteilung würde allerdings technisch eine Gleichgewichtsverteilung sein, allein aus einer mathematischen

Berechnung ergibt sich, daß diese Anordnung unbeständig ist und nicht existieren kann, ausgenommen, wenn die Anzahl der Korpuskeln sehr klein, etwa sieben oder höchstens acht ist. Wenn die Anzahl der Korpuskeln diese Grenzzahl übersteigt, so zerfallen die Korpuskeln in zwei Gruppen. Eine Gruppe, welche die kleinere Anzahl von Korpuskeln enthält, befindet sich auf der Oberfläche eines kleinen Körpers, der mit der Kugel konzentrisch ist, der Rest auf der Oberfläche eines größeren konzentrischen Körpers. Wenn die Anzahl der Korpuskeln noch weiter erhöht wird, so tritt ein Stadium ein, in welchem das Gleichgewicht selbst mit zwei Gruppen nicht stabil sein kann, und die Korpuskeln zerfallen in drei Gruppen, die auf der Oberfläche konzentrischer Kugeln angeordnet sind, und je mehr wir die Anzahl der Korpuskeln erhöhen, desto größer wird die Anzahl der Gruppen, die für das Gleichgewicht erforderlich ist. Für eine beträchtliche Anzahl von Korpuskeln wird das Problem, die Gleichgewichtsverteilung zu finden, für die Rechnung zu kompliziert. Wir müssen daher zum Versuch übergehen und sehen, ob wir uns ein Modell machen können, in welchem die Kräfte, welche das Gleichgewicht erzeugen, ähnlich wie diejenigen sind, die nach unserer Annahme in der Korpuskel wirksam sind. Ein solches Modell bietet aber ein einfacher und schöner Versuch, der, soviel ich weiß, zuerst von Prof. Mayer ausgeführt worden ist. Der Versuch besteht darin, daß man eine Anzahl kleiner Magnete in einem Gefäße auf Wasser schwimmen läßt. Die Magnete bestehen aus Stahlnadeln, die auf gleiche Stärke magnetisiert sind und die durch kleine Korkscheiben, durch die sie hindurchgesteckt sind, schwimmend gehalten werden. Die Magnete werden so in das Wasser gestellt, daß sich die positiven Pole entweder sämtlich über oder sämtlich unter der Wasseroberfläche befinden. Die positiven Pole stoßen sich wie die Korpuskeln mit Kräften ab, die dem Quadrate des gegenseitigen Abstandes derselben umgekehrt proportional wirken. Die anziehende Kraft wird von einem negativen Pol geliefert (wenn die kleinen Magnete die positiven Pole über dem Wasser haben), der in einiger Entfernung über der Oberfläche des Wassers schwebt. Dieser Pol übt auf die positiven

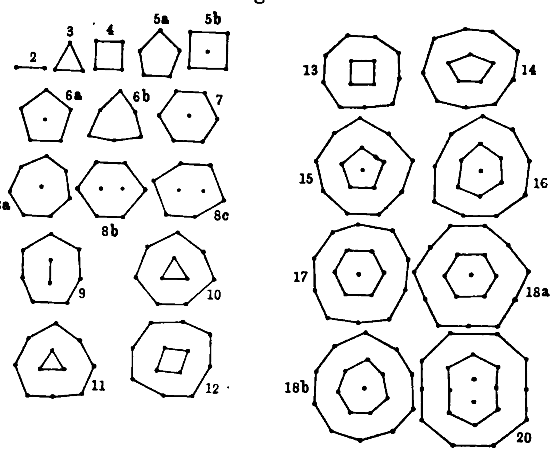
Fig. 17.



Pole der kleinen schwimmenden Magnete eine anziehende Kraft aus, deren Komponente parallel zur Oberfläche des Wassers radial nach $O$, der Projektion des negativen Pols auf die Oberfläche des Wassers, hin gerichtet ist, und wenn sich der negative Pol in einiger Entfernung über der Oberfläche befindet, so ist diese Komponente sehr annähernd der Entfernung von $O$ proportional. Die Kräfte, welche auf die Pole der schwimmenden Magnete wirken, haben also große Ähnlichkeit mit denjenigen, die in unserem hypothetischen Atom auf die Korpuskeln wirken. Der Hauptunterschied besteht darin, daß sich die Korpuskeln nach allen Richtungen im Raume frei bewegen können, während die Pole der kleinen Magnete gezwungen sind, sich in einer zur Oberfläche des Wassers parallelen Ebene zu bewegen.

Welche Konfigurationen die schwimmenden Magnete annehmen, wenn ihre Anzahl von zwei bis neunzehn zunimmt, ist aus der von Mayer gegebenen Fig. 18 zu ersehen.

Fig. 18.




Die Konfigurationen, welche die Magnete einnehmen, wenn ihre Anzahl noch größer ist, ergibt sich aus der folgenden, ebenfalls von Mayer gegebenen Tabelle.

Wenn die Anzahl der Magnete nicht größer als fünf ist, so ordnen sie sich, wie aus der Figur zu ersehen ist, so an, daß sie sich an den Ecken eines regelmäßigen Vielecks befinden, fünf an -den Ecken eines Fünfecks, vier an den Ecken eines Quadrats usw. Wenn die Anzahl größer als fünf ist, so wird die Anordnung eine andere. Sechs Magnete z. B. ordnen sich nicht so an, daß sie die Ecken eines Sechsecks bilden, sondern sie teilen sich in zwei Systeme. Fünf bilden die Ecken eines regelmäßigen Fünfecks, und der sechste befindet sich innerhalb dieses Fünfecks. Die Anordnung in zwei Gruppen findet statt, solange die Anzahl der Magnete nicht größer als vierzehn ist. Von fünfzehn Magneten an entstehen drei Gruppen, von siebenundzwanzig Magneten an vier Gruppen usw.

Anordnung der Magnete (Mayer).

| 1. | 2. | 3. | 4. | 5. |
|---|---|---|---|---|
| 1 . 5 | 2 . 6 | 3 . 7 | 4 . 8 | 5 . 9 |
| 1 . 6 | 2 . 7 | 3 . 8 | 4 . 9 | — |
| 1 . 7 | — | — | — | — |
| | | | | |
| 1 . 5 . 9 | 2 . 7 . 10 | 3 . 7 . 10 | 4 . 8 . 12 | 5 . 9 . 12 |
| 1 . 6 . 9 | 2 . 8 . 10 | 3 . 7 . 11 | 4 . 8 . 13 | 5 . 9 . 13 |
| 1 . 6 . 10 | 2 . 7 . 11 | 3 . 8 . 10 | 4 . 9 . 12 | — |
| 1 . 6 . 11 | — | 3 . 8 . 11 | 4 . 9 . 13 | — |
| — | — | 3 . 8 . 12 | — | — |
| — | — | 3 . 8 . 13 | — | — |
| | | | | |
| 1 . 5 . 9 . 12 | 2 . 7 . 10 . 15 | 3 . 7 . 12 . 13 | 4 . 9 . 13 . 14 | — |
| 1 . 5 . 9 . 13 | 2 . 7 . 12 . 14 | 3 . 7 . 12 . 14 | 4 . 9 . 13 . 15 | — |
| 1 . 6 . 9 . 12 | — | 3 . 7 . 13 . 14 | 4 . 9 . 14 . 15 | — |
| 1 . 6 . 10 . 12 | — | 3 . 7 . 13 . 15 | — | — |
| 1 . 6 . 10 . 13 | — | — | — | — |
| 1 . 6 . 11 . 12 | — | — | — | — |
| 1 . 6 . 11 . 13 | — | — | — | — |
| 1 . 6 . 11 . 14 | — | — | — | — |
| 1 . 6 . 11 . 15 | — | — | — | — |

Die Formel 3 . 7 . 12 . 13 z. B. bedeutet, daß sich fünfunddreißig Magnete zu vier Ringen anordnen, von denen der innerste drei, der folgende sieben, der nächstfolgende zwölf und der äußerste dreizehn Magnete umfaßt.

Diese Tabelle gibt nach meiner Ansicht manche Winke für die Erklärung einiger Eigenschaften der Atome. Lassen Sie uns z. B. das sogenannte periodische Gesetz betrachten. Wir ordnen die Elemente in aufsteigender Reihenfolge nach ihrem Atomgewicht an. Betrachten wir dann ein Element von niedrigem Atomgewicht, z. B. Lithium, so finden wir, daß es bestimmte Eigenschaften hat. Diese Eigenschaften besitzen aber nicht die unmittelbar folgenden Elemente, wenn sie nach der Größe des Atomgewichts aufeinander folgen, sondern sie erscheinen erst wieder, wenn wir an das Natrium kommen. Dann verschwinden sie wieder für einige Zeit und erscheinen wieder, wenn wir das Kalium erreichen, usw. Wir wollen nun die Anordnung der schwimmenden Magnete betrachten und annehmen, die Anzahl der Magnete sei dem Verbindungsgewicht eines Elementes proportional. Wenn dann irgend eine Eigenschaft mit der triangularen Anordnung der Magnete in Verbindung stände, so würde dasjenige Element, dessen Verbindungsgewicht nach dieser Skala gleich drei ist, diese Eigenschaft besitzen. Dann würde sie aber verschwinden und erst wieder erscheinen, wenn wir das Verbindungsgewicht zehn erreichen, da sich hier wieder die triangulare Anordnung, umgeben von einem Ring aus sieben Magneten, vorfindet. Wenn die Anzahl der Magnete vergrößert wird, so verschwindet die triangulare Anordnung für einige Zeit, erscheint aber wieder bei zwanzig Magneten und dann wieder bei fünfunddreißig. Die triangulare Anordnung erscheint und verschwindet also in ähnlicher Weise wie das Verhalten der Eigenschaften der Elemente im periodischen Gesetz. Eine Eigenschaft, die sehr wohl mit der speziellen Gruppierung der Korpuskeln im Zusammenhang stehen kann, ist z. B. die Schwingungszahl des Systems, wie sie sich durch die Lage der Spektrallinien des Elementes zu erkennen gibt. Wir wollen zunächst annehmen, daß sich drei Korpuskeln für sich allein in der positiv elektrischen Kugel befinden. Die drei Korpuskeln haben neun Grade der Freiheit, so daß neun Schwingungszeiten möglich sind. Einige derselben sind unendlich groß und mehrere der möglichen Schwingungszeiten sind einander gleich, so daß es nicht neun verschiedene Schwingungszeiten gibt.

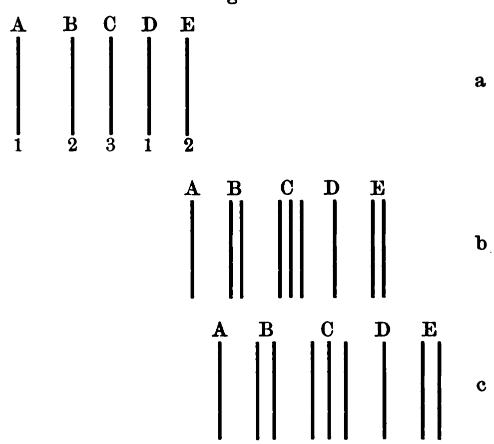
Wir wollen annehmen, Fig. 19a stelle das Spektrum der drei Korpuskeln vor. Die Ziffern unter den Linien sollen die

Anzahl der Schwingungszeiten bezeichnen, die in diesen Linien verschmelzen. Wenn also die Schwingungszeiten durch eine Gleichung mit neun Wurzeln gegeben wären, so würde nur eine Wurzel die der Linie $A$ entsprechende Schwingungszahl angeben, während der Linie $B$ zwei, der Linie $C$ drei gleiche Wurzeln, der Linie $D$ eine Wurzel und der Linie $E$ zwei gleiche Wurzeln entsprechen. Zwischen diesen Schwingungszahlen würden gewisse numerische Beziehungen existieren, die unabhängig sind von der Ladung der Korpuskeln, von der Größe der Kugel, in welcher sie sich befinden, und von ihrem Abstand vom Mittelpunkte der Kugel. Jede dieser Größen beeinflußt zwar das Verhältnis der Schwingungszeiten nicht, hat aber einen großen Einfluß auf den absoluten Wert derselben. Nehmen Sie nun an, daß diese drei Korpuskeln nicht für sich allein in der Kugel sind, sondern daß sie nur eine von mehreren Gruppen sind, ebenso wie das Magnetdreieck einen Bestandteil der aus 3, 10, 20 und 35 Magneten bestehenden Gruppierungen bildet. Lassen Sie uns erwägen, welchen Einfluß die Anwesenheit der anderen Gruppen auf die Schwingungszeiten der drei Korpuskeln ausüben wird. Die absoluten Werte der Schwingungszeiten würden im allgemeinen ganz andere sein, die Beziehung zwischen den verschiedenen Schwingungszeiten würde dagegen viel beständiger sein, vielleicht etwas verändert, aber nicht zerstört. Wenn wir uns der Ausdrucksweise der Theorie der Planetenbewegung bedienen, so können wir sagen, daß die Bewegung der drei Korpuskeln durch die anderen Gruppen „gestört“ wird.

Wenn die Gruppe der drei Korpuskeln für sich allein war, so gab es verschiedene Verschiebungen von derselben Schwingungszeit. Für die Linie $C$ gab es z. B. drei Verschiebungen von derselben Schwingungszeit. Wenn aber andere Gruppen anwesend sind, so sind diese verschiedenen Verschiebungen nicht mehr symmetrisch in bezug auf diese Gruppen, so daß die drei Schwingungszeiten nicht mehr genau gleich groß sind. Wenn aber der Einfluß der anderen Gruppen nicht sehr groß ist, so sind sie noch sehr annähernd gleich. Aus der einfachen Linie $C$ würde also ein Triplet und aus $B$ und $E$ würden Duplets werden. $A$ und $D$ würden einfache Linien bleiben.

Das Spektrum würde also jetzt das Ansehen von Fig. 19b haben. Je größer die Anzahl der Gruppen ist, die die Gruppe der drei Korpuskeln umgeben, desto mehr wird die Bewegung der letzteren gestört und desto weiter entfernen sich die Bestandteile der Duplets und Triplets voneinander, wie durch Fig. 19b und Fig. 19c veranschaulicht wird. Wenn wir daher annehmen, daß die Elemente, welche diese besondere Gruppierung von Korpuskeln enthalten, derselben Gruppe von Elementen im periodischen Gesetz angehören, so würden Spektra dieser Elemente homologe Serien von Linien enthalten, in denen die Abstände zwischen den Komponenten der Duplets und Triplets mit dem Atomgewicht der Elemente zunehmen. Durch die Untersuchungen von **Rydberg**, **Runge** und **Paschen** und **Kayser** ist aber nachgewiesen worden, daß in den Spektren der Elemente derselben Gruppe Serien von Linien existieren, deren Eigenschaften in vieler Hinsicht dem von uns angenommenen Fall analog sind.

Fig. 19.




Ein anderer interessanter Punkt in den **Mayer**schen Versuchen ist der, daß es für dieselbe Anzahl von Magneten mehr als eine stabile Konfiguration gibt. Diese Konfigurationen entsprechen verschiedenen Mengen potentieller Energie, so daß der Übergang von der Konfiguration von größerer potentieller Energie zu der von geringerer der Korpuskel kinetische Energie mitteilen würde. Aus den Werten der im Atom aufgehäuften potentiellen Energie, von der wir auf S. 69 eine Schätzung gaben, schließen wir, daß selbst eine geringe Änderung der potentiellen Energie eine Menge kinetische Energie entwickeln würde, die, wenn sie in Wärme verwandelt würde, eine viel größere Wärmemenge liefern würde, als bei irgend einer bekannten chemischen Vereinigung der Atome erzeugt wird.

Wenn man die Zeichnung (Fig. 19) betrachtet, so findet man, daß sich an gewissen Stellen die Natur der Konfiguration mit der Anzahl der Magnete sehr schnell ändert. Fünf Magnete z. B. bilden eine Gruppe, während sechs Magnete zwei Gruppen bilden. Vierzehn Magnete bilden zwei Gruppen, fünfzehn dagegen drei, siebenundzwanzig Magnete bilden drei Gruppen, achtundzwanzig dagegen vier, usw. Wenn wir die chemischen Elemente nach der Reihenfolge ihres Atomgewichtes anordnen, so finden wir, daß an gewissen Stellen die Verschiedenheit der Eigenschaften aufeinander folgender Elemente außergewöhnlich groß ist. Auffallende Verschiedenheiten zeigen z. B. die Eigenschaften von Fluor und Natrium. Dann herrscht mehr oder weniger Kontinuität in den Eigenschaften, bis wir zum Chlor kommen, auf welches das Kalium folgt. Die nächste Unterbrechung der Kontinuität liegt zwischen Brom und Rubidium, usw. Dieser Vorgang scheint einer Neugruppierung der Magnete analog zu sein.

Bis dahin haben wir angenommen, daß sich die Korpuskeln in Ruhe befinden. Wenn sie sich jedoch in einem Zustande gleichförmiger Bewegung befinden, wenn sie kreisförmige Bahnen um den Mittelpunkt der Kugel beschreiben, so wird die aus dieser Bewegung entspringende Centrifugalkraft die Korpuskeln vom Mittelpunkte der Kugel weiter hinwegtreiben, ohne in vielen Fällen die Konfiguration zu zerstören. Wenn sich z. B. in der Kugel drei Korpuskeln befinden, so werden sie im Zustande gleichförmiger Bewegung, ebenso als wenn sie in Ruhe wären, an den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks liegen. Dies Dreieck wird aber um den Mittelpunkt der Kugel rotieren, und der Abstand der Korpuskeln vom Mittelpunkte wird größer sein, als wenn sie in Ruhe sind, und wird mit der Geschwindigkeit der Korpuskeln zunehmen.

Es gibt aber viele Fälle, in denen die Rotation für die Stabilität der Konfiguration wesentlich ist. Nehmen Sie z. B. an, es seien vier Korpuskeln. Wenn diese schnell rotieren, so befinden sie sich in stabiler gleichförmiger Bewegung, wenn sie sich an den Ecken eines Quadrats befinden, dessen Ebene auf der Rotationsachse senkrecht steht. Wenn aber die Rotationsgeschwindigkeit unter einen gewissen Wert sinkt, so wird die Anordnung von vier Korpuskeln in einer Ebene unbeständig und die Korpuskeln streben die Ecken eines regelmäßigen Tetraeders einzunehmen, was die stabile Anordnung ist, wenn die Korpuskeln in Ruhe sind. Das System von vier Korpuskeln an den Ecken eines Quadrats kann mit einem rotierenden Kreisel verglichen werden, der ebenfalls nur dann stabil ist, wenn seine Geschwindigkeit einen gewissen kritischen Wert übersteigt. Wir wollen annehmen, daß die Geschwindigkeit der Korpuskeln anfangs diesen Wert übersteigt, daß aber die Korpuskeln in der einen oder anderen Weise ihre kinetische Energie verlieren. Die quadratische Anordnung wird dann so lange bestehen, bis die Geschwindigkeit der Korpuskeln auf den kritischen Punkt sinkt. Dann wird die Anordnung unbeständig und es findet in dem Systeme ein Ruck statt, der von starker Entwickelung kinetischer Energie begleitet ist.

Ähnliche Betrachtungen lassen sich auf viele Gruppierungen von Korpuskeln anwenden. In solchen Fällen ist die Konfiguration der Korpuskeln, wenn sie sehr schnell rotieren, wie in dem Falle der vier Korpuskeln, wesentlich verschieden von der Konfiguration derselben Anzahl von Korpuskeln, wenn sie in Ruhe sind. Es muß also eine gewisse kritische Geschwindigkeit der Korpuskeln existieren, so daß eine Konfiguration für Geschwindigkeiten, die größer als die kritische ist, beständig ist, aber unbeständig wird, wenn die Geschwindigkeit unter den kritischen Wert sinkt. Mit dem Eintreten der Unbeständigkeit findet in der Konfiguration der Korpuskeln eine Art Ruck oder Explosion statt, die von einer starken Verminderung der potentiellen Energie und einer entsprechenden Zunahme der kinetischen Energie der Korpuskeln begleitet ist. Diese Zunahme der kinetischen Energie der Korpuskeln kann groß genug sein, um eine beträchtliche Anzahl derselben von dem ursprünglichen System abzutrennen.

Diese Betrachtungen stehen in unmittelbarer Beziehung zu der Theorie der Konstitution der Atome, die wir in diesem Kapitel aufgestellt haben. Sie zeigen nämlich, daß die korpuskulare Abkühlung infolge der von uns angenommenen langsamen Strahlung der bewegten Korpuskeln, wenn sie einen gewissen

Grad erreicht, bei Atomen einer besonderen Art, d. h. von bestimmtem Atomgewicht, Unbeständigkeit innerhalb des Atoms bewirken und eine solche Zunahme der kinetischen Energie der Korpuskeln bewirken kann, daß die Strahlung bedeutend gesteigert wird, was zur Folge haben kann, daß sich ein Teil des Atoms abtrennt. Das Atom würde Energie aussenden, und diese Energie würde von der potentiellen Energie herstammen, die aus der Anordnung der Korpuskeln im Atom entspringt. Wenn wir die Erscheinungen der Radioaktivität betrachten, werden wir sehen, daß es eine Gruppe von Körpern gibt, die Erscheinungen zeigen, die den soeben beschriebenen analog sind.

Wenn wir annehmen, daß zuerst die leichteren Elemente durch Aggregation der Einheitspaare entstanden sind, deren negatives Element die Korpuskel bildet, und daß die Atome der schwereren Elemente durch Vereinigung der Atome der leichteren Elemente entstanden sind, so ist zu erwarten, daß die Korpuskeln in den schweren Atomen gewissermaßen zu Bündeln vereinigt sind, und daß die Anordnung der Korpuskeln in jedem einzelnen Bündel ähnlich ist wie die Anordnung in dem Atom eines leichteren Elementes. In dem schwereren Atom würden die Bündel als subsidiäre Einheiten wirken, so daß jedes Bündel einem der Magnete des Modells entspricht, während im Bündel selbst die Korpuskel dem Magneten entsprechen würde.

Wir müssen nun untersuchen, ob ein Atom, welches so aufgebaut ist, wie wir angenommen haben, irgend eine von den Eigenschaften des wirklichen Atoms besitzen kann. Finden z. B. durch das Modell eines Atoms die elektrischen Eigenschaften des wirklichen Atoms ihre Erklärung, Eigenschaften wie die, daß die chemischen Elemente in zwei Klassen, die elektropositiven und die elektronegativen, zerfallen? Warum strebt z. B., wenn dies die Konstitution des Atoms ist, ein Natriumatom oder ein Kaliumatom, eine positive Ladung, ein Chloratom dagegen eine negative Ladung anzunehmen? Oder ist in dem Modell des Atoms etwas, was auf eine Eigenschaft wie die sogenannte Valenz schließen läßt, d. h. auf die Eigenschaft, die uns in den Stand setzt, die Elemente in Gruppen von einwertigen, zweiwertigen, dreiwertigen usw. Atomen einzuteilen, so daß das Molekül einer Verbindung von zwei Elementen der ersten Gruppe dieselbe Anzahl von Atomen von jedem der beiden Elemente enthält, während das Molekül einer Verbindung eines Elementes $A$ der ersten Gruppe mit einem Element $B$ der zweiten Gruppe doppelt so viel Atome von $A$ als von $B$ enthält?

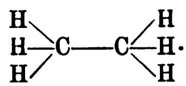
Lassen Sie uns jetzt zu den Eigenschaften des Atommodells zurückkehren. Es enthält eine sehr große Anzahl von Korpuskeln, die in sehr schneller Bewegung begriffen sind. Aus den Erscheinungen, die mit der Leitung der Elektrizität durch Gase im Zusammenhang stehen, wissen wir, daß eine oder mehrere dieser Korpuskeln von dem Atom abgetrennt werden können. Sie können infolge ihrer großen Geschwindigkeit entweichen, die sie befähigt, aus dem Bereiche der Anziehung des Atoms auszutreten. Der Austritt kann auch infolge von Kollisionen des Atoms mit anderen schnell bewegten Atomen oder freien Korpuskeln erfolgen. Wenn aber aus dem Atom eine Korpuskel ausgetreten ist, so besitzt das letztere eine positive Ladung. Hierdurch wird der Austritt einer weiteren negativ elektrischen Korpuskel erschwert, da das Atom infolge seiner positiven Ladung die zweite Korpuskel stärker anzieht, als es vorher die erste anzog. Man kann sich leicht denken, daß die Leichtigkeit, mit der Teilchen aus einem Atom austreten oder von diesem fortgeschleudert werden, bei den Atomen der verschiedenen Elemente sehr verschieden ist. In einigen Atomen können die Geschwindigkeiten der Korpuskeln so groß sein, daß eine Korpuskel aus dem Atom austritt. Es kann sogar der Fall eintreten, daß die positive Elektrisierung, die das Atom nach dem Austritt der ersten Korpuskel besitzt, nicht hinreicht, um den Austritt einer zweiten und selbst einer dritten Korpuskel zu verhindern. Solche Atome würden positive Ladungen von einer, zwei oder drei Einheiten bekommen, je nachdem sie eine, zwei oder drei Korpuskeln verlieren. Anderseits kann es auch Atome geben, in denen die Geschwindigkeit der Korpuskeln so gering ist, daß nur wenige oder gar keine Korpuskeln von selbst entweichen. Ja die Atome können sogar fähig sein, eine oder mehrere Korpuskeln aufzunehmen, bevor die von der negativen Elektrisierung der fremden Korpuskeln ausgeübte Abstoßung eine der ursprünglichen Korpuskeln austreibt. Wenn Atome dieser Art in eine Region kommen, wo Korpuskeln anwesend sind, so bekommen sie durch Vereinigung mit diesen Korpuskeln eine negative Ladung. Die Größe der negativen Ladung hängt von der Kraft ab, mit der das Atom seine Korpuskeln festhält. Wenn die negative Ladung einer Korpuskel nicht hinreichend wäre, eine Korpuskel auszutreiben, während die negative Ladung zweier Korpuskeln hinreichte, so würde das Maximum der negativen Ladung des Atoms eine Einheit sein. Wenn zwei Korpuskeln nicht, aber drei hinreichend wären, eine Korpuskel auszutreiben, so würde das Maximum der negativen Ladung zwei Einheiten sein, usw. Die Atome dieser Klasse streben also, eine negative Ladung anzunehmen, und entsprechen den elektronegativen chemischen Elementen, während die Atome der zuerst betrachteten Klasse, die leicht Korpuskeln verlieren, eine positive Ladung annehmen und den elektropositiven Elementen entsprechen. Wir können uns Atome vorstellen, in denen sich die Korpuskeln so genau im Gleichgewicht befinden, daß sie zwar von selbst keine Korpuskel verlieren und infolgedessen keine positive Ladung annehmen, daß aber die Kraft, welche von einer in die Nähe des Atoms kommenden Korpuskel ausgeübt wird, hinreicht, eine Korpuskel auszutreiben. Ein solches Atom würde weder eine positive noch eine negative Ladung annehmen können.

Nehmen Sie an, eine Anzahl derjenigen Atome, die ihre Korpuskeln leicht abgeben, sei mit einer Anzahl von denjenigen vermischt, welche eine fremde Korpuskel aufnehmen können. Ein Atom der ersten Klasse wollen wir mit $A$ und eins der zweiten Klasse mit $B$ bezeichnen und annehmen, die Atome $A$ seien von der Art, daß sie eine Korpuskel abgeben können, und die Atome $B$ von der Art, daß sie nur eine Korpuskel aufnehmen können. Dann werden die aus den Atomen $A$ austretenden Korpuskeln schließlich von den Atomen $B$ aufgenommen werden, und wenn von den beiden Arten von Atomen dieselbe Anzahl vorhanden ist, so werden schließlich alle Atome $A$ die Einheit der positiven Ladung und alle Atome $B$ die Einheit der negativen Ladung enthalten. Diese entgegengesetzt elektrischen Atome werden sich anziehen und es wird die Verbindung $AB$ entstehen. Wenn die Atome $A$ von der Art gewesen wären, die zwei Korpuskeln verlieren, die Atome $B$ dagegen von derselben Art wie vorher, so würden die Atome $A$ die Ladung von zwei positiven Einheiten, die Atome $B$ eine Ladung von einer negativen Einheit bekommen. Um ein neutrales System zu bilden, müßten sich zwei von den Atomen $B$ mit einem Atom $A$ verbinden, und es würde also die Verbindung $AB_2$ entstehen.

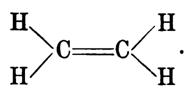
Von diesem Gesichtspunkte aus betrachtet ist also ein einwertiges elektropositives Atom ein solches, welches unter den Umständen, unter denen es sich mit einem anderen Atom verbindet, eine, aber nicht mehr als eine Korpuskel verlieren muß, bevor Stabilität erreicht ist. Ein einwertiges elektronegatives Atom ist ein solches, welches eine, aber nicht mehr als eine Korpuskel aufnehmen kann, ohne daß andere Korpuskeln aus dem Atom ausgetrieben werden. Ein zweiwertiges elektropositives Atom ist ein solches, welches zwei Korpuskeln, aber nicht mehr verliert, usw. Die Valenz des Atoms hängt also von der Leichtigkeit ab, mit welcher Korpuskeln aus dem Atom austreten oder in das Atom eintreten können. Diese kann von den Umständen, unter denen die Vereinigung der Atome zu Verbindungen stattfindet, beeinflußt werden. So würde es für eine Korpuskel, die das Atom verlassen hat, leichter sein, der Anziehung des Atoms, die es infolge seiner positiven Elektrisierung ausübt, zu widerstehen, wenn sie von guten Leitern umgeben ist, als wenn sie im Raum isoliert ist. Wir verstehen daher, weshalb die Valenz eines Atoms in einem gewissen Grade von den physikalischen Bedingungen beeinflußt werden kann, wenn es sich mit anderen Atomen verbindet.

Wenn angenommen wird, daß die Anziehung zwischen zwei Atomen in einer chemischen Verbindung elektrischen Ursprunges ist, so hängt die Fähigkeit eines Elementes, in chemische Verbindungen einzutreten, davon ab, ob sein Atom das Vermögen besitzt, eine elektrische Ladung aufzunehmen. Dies setzt nach den vorausgehenden Auseinandersetzungen voraus, entweder daß das ungeladene Atom unbeständig ist und sich mit einem oder mehreren Korpuskeln verbinden muß, bevor es in den stabilen Zustand kommen kann, oder daß es so stabil ist, daß es eine oder mehrere weitere Korpuskeln aufnehmen kann, ohne daß eine der ursprünglichen Korpuskeln ausgetrieben wird. Wenn der Grad der Stabilität ein solcher ist, daß das Atom zwar im ungeladenen Zustande beständig ist, aber unbeständig wird, wenn es eine weitere Korpuskel aufnimmt, so wird das Atom nicht fähig sein, eine Ladung positiver oder negativer Elektrizität aufzunehmen, und es wird daher nicht fähig sein, in eine chemische Verbindung einzutreten. Ein solches Atom würde die Eigenschaften der Atome von Elementen wie Argon oder Helium haben.

Die Ansicht, daß die Kräfte, die die Atome in den Molekülen der chemischen Verbindungen zusammenhalten, elektrischen Ursprungs sind, wurde zuerst von Berzelius aufgestellt. Auch Davy und Faraday waren dieser Ansicht. Auch Helmholtz erklärte, daß die stärkste von den chemischen Kräften elektrischen Ursprungs sei. Die Chemiker haben aber im allgemeinen, wie es scheint, von dieser Vorstellung wenig Gebrauch gemacht, da sie anscheinend den Begriff der Affinitäten oder Valenzen nützlicher fanden. Die Theorie der Affinitäten ist aber in einer Hinsicht fast identisch mit der elektrischen Theorie. Wenn man die Theorie der Affinitäten graphisch darstellt, so wird angenommen, daß von jedem einwertigen Atom eine gerade Linie (das Symbol einer Affinität) ausgeht; ein zweiwertiges Atom befindet sich am Ende zweier solcher Linien, ein dreiwertiges Atom am Ende von dreien, usw. Wenn dann die chemische Verbindung durch eine graphische Formel dargestellt wird, so muß sich jedes Atom am Ende der seiner Valenz entsprechenden Anzahl von Linien befinden. Nun hat nach der elektrischen Theorie der chemischen Verbindung ein einwertiges Atom eine Ladungseinheit, wenn wir als Ladungseinheit die Ladung der Korpuskel annehmen. Das Atom ist also der Anfang oder das Ende einer Faradayschen Röhre, der Anfang, wenn die Ladung des Atoms positiv, das Ende, wenn die Ladung negativ ist. Ein zweiwertiges Atom hat zwei Ladungseinheiten und bildet daher den Anfang oder das Ende zweier Faradayschen Einheitsröhren. Wenn wir daher die „Affinität" der Chemiker als das Zeichen für eine Faradaysche Einheitsröhre definieren, welche geladene Atome des Moleküls verbindet, so können die Strukturformeln der Chemiker ohne weiteres in die elektrische Theorie übersetzt werden. Die beiden Theorien unterscheiden sich jedoch in einem Punkte, der etwas näher betrachtet zu werden verdient. Das Symbol, welches in der chemischen Theorie eine Affinität bezeichnet, wird nicht so aufgefaßt, daß es Richtung besitzt. Nach dieser Theorie wird kein Unterschied zwischen dem einen und dem anderen Ende einer Affinität gemacht. Nach der elektrischen Theorie dagegen existiert ein Unterschied zwischen diesen Enden, indem das eine Ende einer positiven, das andere einer negativen Ladung entspricht. Ein oder zwei Beispiele werden dies am besten erläutern. Wir wollen das Äthan wählen, dessen Struktur durch die folgende Formel ausgedrückt wird:



Nach der chemischen Theorie ist kein Unterschied zwischen den beiden Kohlenstoffatomen in dieser Verbindung, nach der elektrischen Theorie würde dagegen ein Unterschied existieren. Wenn wir nämlich annehmen, daß alle Wasserstoffatome negativ elektrisch sind, so erteilen die von den Wasserstoffatomen nach den Kohlenstoffatomen gehenden Faradayschen Röhren jedem der beiden Kohlenstoffatome eine positive Ladung von drei Einheiten. Aber außer den Faradayschen Röhren, die von den Wasserstoffatomen kommen, ist eine Röhre vorhanden, die von dem einen zum anderen Kohlenstoffatom geht. Dies bedeutet eine weitere positive Ladung des einen und eine negative Ladung des anderen Kohlenstoffatoms. Eins der beiden Kohlenstoffatome hat also eine Ladung von vier positiven Einheiten, das andere dagegen eine Ladung von drei positiven und einer negativen, d. h. von zwei positiven Einheiten. Die beiden Kohlenstoffatome befinden sich also nach dieser Theorie nicht in demselben Zustande. Eine noch größere Verschiedenheit zwischen den beiden Atomen muß existieren, wenn es sich um die sogenannte doppelte Bindung handelt, d. h. wenn angenommen wird, daß die Kohlenstoffatome durch zwei Affinitäten verbunden sind, wie in der Verbindung:



Wenn in diesem Falle das eine Kohlenstoffatom eine Ladung von vier positiven Einheiten hätte, so würde das andere eine Ladung von zwei positiven und zwei negativen Einheiten haben.

Derartige Unterschiede sind vielleicht durch die Erforschung der sogenannten additiven Eigenschaften zu entdecken, d. h. derjenigen Eigenschaften, welche berechnet werden können, wenn die chemische Konstitution des Moleküls bekannt ist. Es seien z. B. $A$, $B$, $C$ die Atome von drei chemischen Elementen, und es sei $p$ der Wert irgend einer physikalischen Konstanten für das Molekül $A_2$, $q$ der entsprechende Wert für $B_2$ und $r$ der Wert für $C_2$. Wenn dann die Konstante das additive Gesetz befolgt, so ist ihr Wert für ein Molekül der Substanz, deren chemische Zusammensetzung durch die Formel $A_x B_y C_z$ ausgedrückt wird:

$$\frac{1}{2} p x + \frac{1}{2} q y + \frac{1}{2} r z.$$

Die Gültigkeit solcher Beziehungen ist aber nur dann zu erwarten, wenn die Atome, die in den verschiedenen Verbindungen, welche den verschiedenen Werten von $x$, $y$, $z$ entsprechen, vorkommen, dieselben sind. Wenn das Atom $A$ in verschiedenen Verbindungen in verschiedenen Zuständen vorkommt, so müssen für diese Verbindungen verschiedene Werte von $p$ benutzt werden.

Eine bekannte additive Eigenschaft ist das Lichtbrechungsvermögen verschiedener Substanzen. In diesem Falle ist es notwendig, für die durch ein Kohlenstoffatom bewirkte Brechung verschiedene Werte zu benutzen, je nachdem das Atom einfach oder doppelt gebunden ist. Dagegen wird bei Brechung des Kohlenstoffatoms, wenn es mit einem anderen einfach verkettet ist, derselbe Wert benutzt wie in dem Falle, daß es, wie in der Verbindung $CH_4$, überhaupt nicht mit einem anderen Kohlenstoffatom verbunden ist.

Wir können uns zwar leicht vorstellen, daß in einer Verbindung ein Atom positiv und das andere negativ elektrisch ist, wenn es Atome verschiedener Art sind. Dies geht jedoch nicht gut, wenn es, wie in den Molekülen der elementaren Gase $H_2$, $O_2$, $N_2$, Atome derselben Art sind. In dieser Hinsicht ist zu bemerken, daß der elektrische Zustand eines Atoms, der von der Fähigkeit des Atoms, Korpuskeln auszusenden oder aufzunehmen, abhängt, in hohem Grade von äußeren Umständen beeinflußt wird. Ein Gasatom z. B., welches von schnell bewegten Atomen oder Korpuskeln umgeben ist, die fortwährend mit ihm zusammenstoßen, wird infolge dieser Kollisionen leicht Korpuskeln verlieren und infolgedessen positiv elektrisch werden. Anderseits ist zu erwarten, daß unter sonst gleichen Umständen das Atom, wenn es sich in einem Gas befindet, weniger leicht eine Korpuskel verlieren wird, als wenn es sich in einem festen Körper oder in einer Flüssigkeit befindet. Denn wenn eine Korpuskel in einem Gas aus dem Atom ausgetreten ist, so hat sie unmittelbar nach dem Austritt kein anderes Mittel, sich der Anziehung des positiv elektrischen Atoms zu entziehen, als ihre eigene Geschwindigkeit, da die anderen Atome zu weit entfernt sind, um irgend eine Wirkung auf sie ausüben zu können. Befindet sich dagegen das Atom in einer Flüssigkeit oder in einem festen Körper, so wird eine Korpuskel, die aus einem Atom ausgetreten ist, durch die Anziehung der anderen Atome, die jenes Atom umschwärmen, unterstützt werden, dem Zurückfallen in das Atom zu entgehen. Als Beispiel dieser Wirkung mag das Quecksilber im flüssigen und im gasförmigen Zustande dienen. Im flüssigen Zustande ist das Quecksilber ein guter Leiter der Elektrizität. Eine Art, wie man dieses Leitungsvermögen auffassen kann, besteht darin, daß man annimmt, daß die Korpuskeln die Quecksilberatome verlassen und sich in den Zwischenräumen zwischen den Atomen umherbewegen. Wenn auf diese geladenen Korpuskeln eine elektrische Kraft einwirkt, so werden sie in Bewegung gesetzt und bilden einen elektrischen Strom, und das Leitungsvermögen des flüssigen Quecksilbers zeigt die Anwesenheit einer großen Anzahl von Korpuskeln an. Wenn sich dagegen das Quecksilber im gasförmigen Zustande befindet, so ist, wie Strutt nachgewiesen hat, sein Leitungsvermögen nur ein äußerst geringer Bruchteil des Leitungsvermögens, das dieselbe Anzahl von Molekülen im flüssigen Zustande besitzen würde. Dies deutet darauf hin, daß selbst die Atome einer elektropositiven Substanz wie Quecksilber im gasförmigen Zustande nur verhältnismäßig wenig Korpuskeln verlieren. Nehmen Sie nun an, wir hätten eine große Anzahl von Atomen derselben Art, die sich im gasförmigen Zustande befinden, sich also umherbewegen und miteinander in Kollision kommen. Diejenigen, welche sich schneller bewegen und infolgedessen am heftigsten zusammenstoßen, werden leichter Korpuskeln verlieren als diejenigen, welche sich langsamer bewegen. Die ersteren werden daher infolge des Verlustes ihrer Korpuskeln positiv elektrisch, und wenn die Atome nicht zu stark elektropositiv sind, um eine negative Ladung aufnehmen zu können, selbst wenn sie sich im gasförmigen Zustande befinden, so werden die ausgetretenen Korpuskeln in die langsamer bewegten Atome einzutreten streben. Einige von den Atomen werden also positiv, andere negativ elektrisiert werden, und die Atome mit entgegengesetzten Ladungen werden sich zu zweiatomigen Molekülen vereinigen. Dies würde jedoch bei sehr stark elektropositiven Gasen nicht der Fall sein.

Diese werden keine Moleküle bilden; da aber in dem Gase viel freie Korpuskeln vorhanden sind, so ist zu erwarten, daß es ein beträchtliches elektrisches Leitungsvermögen besitzt.

---

## Sechstes Kapitel.

# Radioaktivität und radioaktive Substanzen.

Im Jahre 1896 entdeckte Becquerel, daß das Uran und seine Salze das Vermögen besitzen, Strahlen auszusenden, die wie die Röntgenstrahlen und die Kathodenstrahlen auf die photographische Platte einwirken und Gase, durch die sie hindurchgehen, zu Leitern der Elektrizität machen. Im Jahre 1898 machte Schmidt die Entdeckung, daß das Thor ähnliche Eigenschaften besitzt. Dieses Vermögen, Strahlen auszusenden, wird als Radioaktivität bezeichnet, und die Substanzen, welche dieses Vermögen besitzen, sind die sogenannten radioaktiven Substanzen.

Diese Eigenschaft des Urans gab die Veranlassung, eine große Anzahl von Mineralien, welche diese Eigenschaft besitzen, sorgfältig zu untersuchen, und Herr und Frau Curie fanden, daß einige von diesen, namentlich die Pechblende, stärker radioaktiv waren als ein gleiches Volum von reinem Uran, obgleich das Uran nur einen geringen Bruchteil dieser Mineralien bildete. Dies zeigte an, daß diese Mineralien eine Substanz oder Substanzen enthalten, die in höherem Grade radioaktiv sind als Uran selbst, und es wurde ein systematischer Versuch unternommen, diese Substanzen zu isolieren. Durch eine langwierige Untersuchung, die von Herrn und Frau Curie unter Mitwirkung von Bemont und Debierne mit großem Geschick und großer Ausdauer ausgeführt wurde, gelang es, in der Pechblende drei neue radioaktive Elemente nachzuweisen, das Radium, welches in dem Mineral an das Baryum gebunden ist, mit dem es in seinen chemischen Eigenschaften große Ähnlichkeit hat, das Polonium, welches an das Wismut, und das Aktinium, welches an das Thor gebunden ist. Es gelang, das erste dieser drei Elemente zu isolieren und sein Verbindungsgewicht zu bestimmen, für welches sich der Wert 225 ergab. Sein Spektrum wurde von Demarçay entdeckt und untersucht. Polonium und Aktinium sind bis jetzt noch nicht isoliert worden. Auch ihre Spektra sind noch nicht beobachtet worden. Man hat gefunden, daß die Aktivität des Poloniums nur eine vorübergehende ist. Sie erlischt im Laufe einiger Monate nach der Darstellung des Poloniums.

Diese radioaktiven Substanzen kommen nicht ausschließlich in seltenen Mineralien vor. Ich habe kürzlich gefunden, daß das Wasser vieler tiefer Brunnen ein radioaktives Gas enthält, und Elster und Geitel haben gefunden, daß ein ähnliches Gas im Erdboden vorkommt.

Diese radioaktiven Substanzen werden voraussichtlich ausgezeichnete Dienste leisten bei dem Studium von Problemen, die die Natur des Atoms und die Veränderungen betreffen, die von Zeit zu Zeit im Atom vor sich gehen. Die Eigenschaften dieser Substanzen sind nämlich so ausgeprägt, daß verschwindend kleine Mengen derselben verhältnismäßig leicht entdeckt werden können. Die Menge dieser Substanzen, welche entdeckt werden können, verhält sich zu der entsprechenden Menge der übrigen Elemente, die nach dem gewöhnlichen Verfahren der chemischen Analyse nachgewiesen werden müssen, wie eine Sekunde zu Tausenden von Jahren. Veränderungen, die bei nicht radioaktiven Elementen fast geologische Epochen lang vor sich gehen müssen, bis sie groß genug sind, um entdeckt werden zu können, können daher bei radioaktiven Substanzen im Laufe einiger Stunden merkliche Wirkungen hervorbringen.

## Charakter der Strahlung.

Rutherford fand, daß sich die Uranstrahlung aus drei verschiedenen Typen zusammensetzt, die er als $\alpha$-Strahlung, $\beta$-Strahlung und $\gamma$-Strahlung bezeichnet, und später hat man gefunden, daß dasselbe auch beim Thor und Uran der Fall ist.

Die $\alpha$-Strahlung wird sehr leicht absorbiert. Sie ist unfähig, mehr als einige Millimeter Luft von gewöhnlichem Atmosphärendruck zu durchdringen. Die $\beta$-Strahlung ist stärker durchdringend, und die $\gamma$-Strahlung hat von allen dreien das stärkste

Durchdringungsvermögen. Untersuchungen über die Einwirkung magnetischer und elektrischer Kräfte auf diese drei Strahlungstypen haben zu dem Ergebnis geführt, daß sie von ganz verschiedenem Charakter sind. Becquerel zeigte, daß die $\beta$-Strahlen durch elektrische und magnetische Kräfte abgelenkt werden. Aus der Richtung der Ablenkung geht hervor, daß die Strahlen eine negative Ladung besitzen. Rutherford bestimmte nach der in Kapitel IV beschriebenen Methode den Wert von $\frac{e}{m}$, des Verhältnisses von Ladung und Masse der Träger der negativen Elektrizität. Er fand, daß er ungefähr $10^7$ ist und daß die Geschwindigkeit für einige der Strahlen größer als zwei Drittel der Geschwindigkeit des Lichtes ist. Er zeigte also, daß die $\beta$-Strahlen aus Korpuskeln bestehen, die sich mit ungeheurer Geschwindigkeit bewegen.

Die $\alpha$-Strahlen werden nicht annähernd so leicht abgelenkt als die $\beta$-Strahlen, doch hat Rutherford neuerdings nachgewiesen, daß sie abgelenkt werden können, und aus der Richtung der Ablenkung geht hervor, daß sie eine positive Ladung besitzen. Aus Rutherfords Messungen, die von Des Coudres bestätigt worden sind, geht hervor, daß das Verhältnis $\frac{e}{m}$ gleich $6 \times 10^3$ und die Geschwindigkeit der Teilchen $2 \times 10^9$ Centimeter per Sekunde ist. Der Wert von $\frac{e}{m}$ zeigt, daß die Träger der positiven Elektrisierung Massen besitzen, die mit den Massen gewöhnlicher Atome vergleichbar sind. Für Wasserstoff z. B. ist $\frac{e}{m}$ gleich $10^4$ und für Helium gleich $2{,}5 \times 10^3$. Die ungeheure Geschwindigkeit, mit welcher diese Teilchen fortgeschleudert werden, ist mit einem enormen Energieverbrauch verbunden, worauf wir später noch zurückkommen werden. Einer der interessantesten Schlüsse, die sich aus diesem Resultat ergeben, ist der, daß durch den Wert von $\frac{e}{m}$ bewiesen wird, daß die fortgeschleuderten Atome nicht die Radiumatome sind. Das Radium muß also eine Verbindung sein, die leichtere Elemente enthält, oder das Atom des Radiums muß in solche Elemente zerfallen.

Der von Rutherford und Des Coudres erhaltene Wert von $\frac{e}{m}$ für die $\alpha$-Strahlen deutet auf die Existenz eines Gases hin, welches schwerer als Wasserstoff, aber leichter als Helium ist. Die $\gamma$-Strahlen werden, soviel wir wissen, weder durch magnetische, noch durch elektrische Kräfte abgelenkt.

Sehr große Ähnlichkeit haben die radioaktiven Substanzen mit einer Substanz, die unter dem Einflusse von Röntgenstrahlen sekundäre Strahlen aussendet. Von der sekundären Strahlung weiß man, daß sie Strahlungen vom $\beta$-Typus und vom $\gamma$-Typus enthält, und da ein Teil der Strahlung außerordentlich leicht absorbiert wird, indem er in Luft unter dem Atmosphärendruck nicht weiter als ungefähr ein Millimeter eindringt, so ist es möglich, daß sich bei näherer Untersuchung herausstellt, daß auch $\alpha$-Strahlen, d. h. positiv elektrische Teilchen, anwesend sind. Diese Analogie regt die Frage an, ob nicht Energie frei wird, wenn ein Körper von Röntgenstrahlen getroffen wird, was, wie wir sehen werden, bei den radioaktiven Substanzen der Fall ist, da die Energie, welche von den strahlenden Substanzen ausgesandt wird, größer ist als die Energie in den Röntgenstrahlen, von denen sie getroffen werden. Dieser Überschuß von Energie rührt von Umwandlungen her, die in den Atomen des den Röntgenstrahlen ausgesetzten Körpers stattfinden. Dies verdient untersucht zu werden, da sich aus einer solchen Untersuchung vielleicht die Möglichkeit ergibt, durch äußere Kraftwirkung dasselbe zu tun, was die radioaktiven Körper spontan tun können, d. h. die in dem Atom eingeschlossene Energie frei zu machen.

## Emanation radioaktiver Substanzen.

Rutherford entdeckte, daß das Thor etwas aussendet, was radioaktiv ist und was von Luftströmungen mitgeführt wird, als ob es ein Gas wäre. Um der Frage nicht vorzugreifen, in welchem Aggregatzustande sich die vom Radium abgegebene Substanz befindet, legte ihr Rutherford den Namen „Emanation" bei. Die Emanation kann durch Wasser und durch die stärkste Säure hindurch getrieben und bis auf Weißglut erhitzt werden, ohne daß sie etwas von ihrer Radioaktivität verliert. Durch diese Trägheit erinnert sie an die Gase Argon und Helium, von denen das letztere fast immer mit Thor zusammen vorkommt. Die Radioaktivität der Thoremanation ist sehr vergänglich, indem sie in ungefähr einer Minute auf die Hälfte sinkt.

Herr und Frau Curie fanden, daß auch das Radium eine radioaktive Emanation gibt, die viel dauerhafter ist als die Thoremanation, da sie ungefähr vier Tage braucht, um auf die Hälfte zu sinken.

Wir haben allen Grund zu der Annahme, daß diese Emanationen radioaktive Materie im gasförmigen Zustande sind. Sie können durch Luftströme von einer Stelle nach einer anderen fortgeführt werden, sie diffundieren wie ein Gas durch einen porösen Stopfen, und die Diffusionsgeschwindigkeit zeigt an, daß sie eine sehr hohe Dichte besitzen. Sie diffundieren nach und nach durch Luft und andere Gase. Rutherford und Miß Brooks haben den Diffusionskoeffizienten der Radiumemanation für Luft gemessen und gefunden, daß die Dichte der Emanation ungefähr 80 ist. Die Radiumemanation ist von Rutherford und Soddy verflüssigt worden, und ich bin dank der Güte von Prof. Dewar in der Lage gewesen, das radioaktive Gas zu verflüssigen, welches im Wasser tiefer Brunnen vorkommt und welches sehr große Ähnlichkeit mit der Emanation hat, ja vielleicht mit derselben identisch ist. Kurz, die Emanationen bestehen jede Prüfung auf den gasförmigen Zustand, der sie unterworfen werden können. Sie können allerdings weder durch die gewöhnlichen Methoden der chemischen Analyse, noch auch durch die Spektralanalyse entdeckt werden, aber nur deshalb, weil sie nur in äußerst geringen Mengen vorhanden sind, Mengen, die viel zu klein sind, um durch die Spektralanalyse entdeckt werden zu können, so daß diese Methode als eine sehr rohe bezeichnet werden muß im Vergleich mit den elektrischen Methoden, die wir bei radioaktiven Substanzen anwenden können. Es ist nach meiner Ansicht keine Übertreibung, wenn man sagt, daß man durch die elektrische Methode von einer radioaktiven Substanz mit Sicherheit eine Menge entdecken kann, die gleich dem hunderttausendsten Teil derjenigen kleinsten Menge ist, die durch die Spektralanalyse entdeckt werden kann.

Jeder Teil eines Radiumsalzes oder eines Thorsalzes gibt die Emanation ab, einerlei ob sich dieser Teil im Inneren oder an der Oberfläche des Salzes befindet, aber die Emanation, welche sich im

Innern des Salzes entwickelt, entweicht nicht in die Luft, sondern bleibt in dem Salze eingeschlossen und sammelt sich in demselben an. Wenn ein solches radioaktives Salz in Wasser gelöst wird, so findet anfangs eine starke Entwickelung der Emanation statt, die in dem festen Salze aufgespeichert worden ist. Die Emanation kann aus dem Wasser dadurch ausgetrieben werden, daß man das Wasser zum Sieden erhitzt, oder dadurch, daß man Luft durch das Wasser durchleitet. Die in dem festen Salze aufgehäufte Emanation kann auch dadurch ausgetrieben werden, daß man das Salz sehr stark erhitzt.

### Induzierte Radioaktivität.

Rutherford entdeckte, daß Substanzen, die der Thoremanation ausgesetzt werden, radioaktiv werden, und fast gleichzeitig entdeckten Herr und Frau Curie, daß die Radiumemanation ebenfalls diese Eigenschaft besitzt. Diese Erscheinung wird als induzierte Radioaktivität bezeichnet. Die Menge der induzierten Radioaktivität hängt nicht von der Natur der Substanz ab, in der sie induziert wird. Papier wird z. B. in Berührung mit der Thoremanation oder der Radiumemanation ebenso stark radioaktiv wie ein Metall.

Die induzierte Radioaktivität entwickelt sich namentlich auf Substanzen, welche negativ elektrisch sind. Wenn die Emanation in einem geschlossenen Gefäß enthalten ist, in dem sich ein negativ elektrischer Draht befindet, so konzentriert sich die Emanation auf diesem Draht, und diese induzierte Aktivität kann auf negativ elektrischen Körpern entdeckt werden, wenn sie zu schwach ist, um auf unelektrischen Oberflächen entdeckt zu werden. Die Tatsache, daß die Natur der induzierten Radioaktivität nicht von der Substanz abhängt, in der sie induziert wird, deutet darauf hin, daß sie von einer radioaktiven Substanz herrührt, die sich aus der Emanation auf den Substanzen abscheidet, mit denen sie in Berührung kommt.

Einen weiteren Beweis hierfür bildet ein Versuch von Miß Gates, der darin bestand, daß die induzierte Radioaktivität auf einem feinen Draht durch Erhitzen des Drahtes fortgetrieben und auf der Oberfläche benachbarter Gegenstände abgeschieden wurde. Die von der Thoremanation herrührende induzierte Radioaktivität unterscheidet sich sehr wesentlich von der induzierten Radioaktivität der Radiumemanation. Die Aktivität der Thoremanation sinkt in einer Minute auf den halben Wert, dagegen braucht die von ihr herrührende induzierte Radioaktivität ungefähr elf Stunden, um in demselben Verhältnis abzunehmen. Die Radiumemanation, welche viel anhaltender ist als die Thoremanation, indem sie ungefähr vier Tage braucht, um auf den halben Wert zu sinken, erzeugt eine viel weniger dauerhafte induzierte Radioaktivität. Sie braucht nämlich, um auf den halben Wert zu fallen, nicht, wie die Thoremanation, elf Stunden, sondern nur 40 Minuten. Die Aktiniumemanation soll nur einige Sekunden anhalten, dagegen ist die von ihr herrührende induzierte Radioaktivität fast so dauerhaft wie die vom Radium herrührende.

### Abscheidung des aktiven Bestandteiles vom Thor.

Rutherford und Soddy haben durch eine sehr interessante und wichtige Untersuchung nachgewiesen, daß die Radioaktivität des Thors dadurch erzeugt wird, daß das Thor in eine Form übergeht, die sie Th X nennen und die sich von dem Rest des Thors durch chemische Mittel abscheiden läßt. Wenn diese Abscheidung stattgefunden hat, so hat das Thor den größten Teil seiner Radioaktivität verloren, die sich jetzt im Th X befindet. Die Radioaktivität von Th X fällt langsam ab, die des Thors dagegen nimmt zu und erreicht schließlich wieder den ursprünglichen Wert. Wenn dieser erreicht ist, ist gleichzeitig die Radioaktivität von Th X verschwunden. Die Zeit, in welcher die Radioaktivität von Th X auf die Hälfte des ursprünglichen Wertes sinkt, ist, wie Rutherford und Soddy nachgewiesen haben, gleich der Zeit, welche das Thor, von dem das Th X abschieden wurde, braucht, um die Hälfte seiner ursprünglichen Radioaktivität wiederzubekommen. Dies alles spricht für die Annahme, daß der radioaktive Teil des Thors, das Thor X, fortwährend vom Thor selbst erzeugt wird. Wenn daher die Aktivität von Thor X permanent wäre, so müßte die Radioaktivität des Thors kontinuierlich zunehmen. Die Radioaktivität von Thor X verschwindet aber nach und nach. Infolgedessen kann die Radioaktivität des Gemisches nicht unbegrenzt zunehmen. Diese erreicht vielmehr einen konstanten Wert, wenn die Zunahme der

Radioaktivität infolge der Entstehung von neuem Th X durch die Abnahme der Aktivität der bereits vorhandenen Menge ausgeglichen wird. Es fragt sich nun, was aus dem Th X und der Emanation wird, wenn sie ihre Radioaktivität verloren haben. Dieses abgestorbene Th X, wie wir es nennen können, sammelt sich fortwährend im Thor an. Da es aber seine Radioaktivität verloren hat, stehen uns nur die gewöhnlichen Methoden der chemischen Analyse zur Verfügung; da diese aber fast unendlich viel weniger empfindlich sind als die Methoden, welche wir bei radioaktiven Substanzen benutzen können, so sind fast geologische Zeiträume erforderlich, damit sich das abgestorbene Th X in solchen Mengen ansammeln kann, die durch chemische Analyse entdeckt werden können. Eine sorgfältige Untersuchung der Mineralien, in denen Thor und Radium vorkommen, kann vielleicht viel zur Aufklärung dieser Verhältnisse beitragen. Es ist bemerkenswert, daß diese Mineralien fast ausnahmslos Helium enthalten.

Sie werden bemerkt haben, daß, wie auch Rutherford und Soddy hervorgehoben haben, die Radioaktivität in engem Zusammenhange mit Umwandlungen steht, die in den radioaktiven Substanzen vor sich gehen. So haben wir beim Thor, dessen Verhalten am besten bekannt ist, zuerst die Umwandlung von Thor in Thor X, dann die Umwandlung von Thor X in die Emanation und die Substanz, welche die $\alpha$-Strahlen bildet. Die Radioaktivität der Emanation ist von einer weiteren Umwandlung begleitet, zu deren Produkten die Substanz gehört, die die induzierte Radioaktivität erzeugt.

Nach dieser Ansicht geht die Substanz, während sie radioaktiv ist, fortwährend aus einem Zustande in einen anderen über. Die bei diesen Umwandlungen frei werdende Energie kann hinreichen, den Betrag zu liefern, den die radioaktive Substanz in Form von Strahlen aussendet. Wie bedeutend die von den radioaktiven Substanzen ausgesandte Energiemenge ist, wird durch einige Versuche, die Herr und Frau Curie mit Radiumsalzen ausführten, in auffallender Weise veranschaulicht. Sie fanden, daß die von diesen Salzen entwickelte Energie, wenn sie in dem Salze selbst absorbiert wird, hinreicht, das Salz dauernd auf einer Temperatur zu halten, die die Temperatur der Umgebung merklich übersteigt. Bei einem Versuch war der Unterschied 1,5° C.

Aus ihren Messungen geht hervor, daß die von einem Gramm Radium in einer Stunde abgegebene Energie hinreicht, dieselbe Gewichtsmenge Wasser vom Gefrierpunkte bis zum Siedepunkte zu erwärmen. Diese Wärmeentwickelung geht ununterbrochen und anscheinend ohne Verminderung vor sich. Wenn aber die soeben ausgesprochenen Ansichten richtig sind, so entspringt diese Energie aus der Umwandlung von Radium in andere Formen von Materie, und ihre Entwickelung muß aufhören, wenn der Vorrat von Radium erschöpft ist, es sei denn, daß dieser Vorrat durch die Umwandlung eines anderen Elementes in Radium fortwährend ergänzt wird.

Einen Näherungswert für die Lebensdauer einer gewissen Menge Radium können wir aus den beiden Ergebnissen ableiten, daß ein Gramm Radium in einer Stunde 100 Kalorien abgibt, und daß der $\alpha$-Strahl aus Teilchen besteht, deren Masse mit der Masse eines Wasserstoffatoms vergleichbar ist, und die mit einer Geschwindigkeit von ungefähr $2 \times 10^9$ Centimeter per Sekunde fortgeschleudert werden. Wir wollen annehmen, die von Herrn und Frau Curie gemessene Wärme rühre von dem Bombardement des Radiumsalzes durch diese Teilchen her, und um eine obere Grenze für die Lebensdauer des Radiums zu bekommen, wollen wir annehmen, daß die gesamte Masse des Radiums in die $\alpha$-Teilchen verwandelt wird (tatsächlich wissen wir, daß außer den $\alpha$-Teilchen auch die Emanation entsteht). Es sei $x$ die Lebensdauer von einem Gramm Radium in Stunden ausgedrückt. Da das Gramm in der Stunde 100 Kalorien oder $4{,}2 \times 10^9$ Erg aussendet, so ist die Energiemenge, welche das Radium während seiner Lebensdauer aussendet, gleich $x \times 4{,}2 \times 10^9$ Erg. Ist $N$ die Anzahl der $\alpha$-Teilchen, die in dieser Zeit ausgesendet werden, $m$ die Masse des einzelnen Teilchens, in Gramm ausgedrückt, und $v$ die Geschwindigkeit, dann ist die Energie der $\alpha$-Teilchen gleich $x \times 4{,}2 \times 10^9$ Erg, folglich

$$\frac{1}{2} N m v^2 = x \times 4{,}2 \times 10^9.$$

Wenn aber das Gramm Radium in $\alpha$-Teilchen verwandelt wird, so ist $Nm = 1$, und nach Rutherfords Versuch ist $v = 2 \times 10^9$. Also ist

$$x = \frac{1}{2} \frac{4 \times 10^{18}}{4,2 \times 10^9} = \frac{10^9}{2,1} \text{ Stunden}$$

oder ungefähr 50 000. Jahre.

Nach dieser Schätzung ist also zu erwarten, daß die Lebensdauer einer gewissen Menge Radium von der Größenordnung von 50 000 Jahren ist. Wir dürfen also nicht erwarten, in einem Zeitraume von einigen Monaten irgend welche meßbaren Veränderungen zu entdecken. Das Gramm Radium gibt während seiner gesamten Lebensdauer ungefähr $5 \times 10^{10}$ Kalorien ab. Wenn diese Energie von Umwandlungen herrührt, die in dem Zustande des Radiums vor sich gehen, so muß bei diesen Umwandlungen eine bedeutend größere Energieentwickelung stattfinden als bei irgend einer bekannten chemischen Reaktion. Nach der Theorie, welche wir angenommen haben, ist der Unterschied zwischen den Vorgängen im Radium und den gewöhnlichen chemischen Reaktionen der, daß die letzteren molekularer, die ersteren dagegen atomistischer Natur sind und in einem Zerfallen der Elemente bestehen. Das auf S. 69 gegebene Beispiel zeigt, welche Energiemenge in dem Atom aufgespeichert sein kann, wenn wir annehmen, daß es aus einer Anzahl von Korpuskeln aufgebaut ist.

Zum Verständnis der Vorgänge im Radium kann es dienlich sein, wenn wir das auf S. 78 beschriebene Atommodell betrachten, welches den Fall veranschaulichen sollte, daß die Korpuskeln, wenn sie sich mit großer Geschwindigkeit bewegen, in einer bestimmten Anordnung stabil sind, daß diese Anordnung aber unbeständig wird und durch eine andere ersetzt wird, wenn die Energie unter einen bestimmten Wert sinkt. Ein Kreisel, der um eine vertikale Achse rotiert, ist ein anderes Modell von demselben Typus. Er ist in vertikaler Stellung stabil, wenn die von seiner Rotation herrührende Energie einen gewissen Wert übersteigt. Wenn diese Energie nach und nach abnimmt und den kritischen Wert erreicht, so wird der Kreisel unbeständig und fällt um, wobei er eine beträchtliche Menge kinetischer Energie erzeugt.

Lassen Sie uns also das Verhalten eines Atomes von diesem Typus verfolgen, d. h. eines Atomes, das in einer Konfiguration gleichförmiger Bewegung stabil ist, wenn die kinetische Energie der Korpuskeln einen gewissen Wert übersteigt, das aber unbeständig wird und in eine andere Konfiguration übergeht, wenn die kinetische Energie unter diesen Wert sinkt. Nehmen Sie an, das Atom besitze anfangs einen Betrag von kinetischer Energie, der weit über dem kritischen Werte liegt. Die kinetische Energie wird infolge der Strahlung von den schnell bewegten Korpuskeln abnehmen, allein solange die Bewegung gleichförmig bleibt, wird die Abnahme der Energie sehr langsam erfolgen, und es kann Tausende von Jahren dauern, bis die Energie den kritischen Wert erreicht. Wenn dieser Wert herannaht, so wird die Bewegung sehr leicht gestört, und es werden wahrscheinlich erhebliche Abweichungen von der Konfiguration für gleichförmige Bewegung stattfinden, die von einer großen Zunahme der Geschwindigkeit begleitet ist, mit der kinetische Energie durch Strahlung verloren geht. Das Atom sendet jetzt eine viel größere Anzahl von Strahlen aus, und die kinetische Energie erreicht schnell den kritischen Wert. Wenn dieser Wert erreicht ist, so tritt die Katastrophe ein, die ursprüngliche Konfiguration zerfällt, die potentielle Energie des Systems nimmt schnell ab, während die kinetische Energie der Korpuskeln um ebensoviel zunimmt. Die Zunahme der Geschwindigkeit der Korpuskeln kann zur Folge haben, daß das Atom in zwei oder mehr Systeme zerfällt, was sich durch die Aussendung der $\alpha$-Strahlen und der Emanation bemerklich macht.

Wenn die Emanation ein Atom von demselben Typus wie das ursprüngliche Atom, d. h. ein solches ist, dessen Konfiguration für gleichförmige Bewegung von seiner kinetischen Energie abhängt, so wiederholt sich der Vorgang für die Emanation, aber in viel kürzerer Zeit, und er wiederholt sich nochmals für die verschiedenen radioaktiven Substanzen, z. B. die Substanz der induzierten Radioaktivität, die aus der Emanation entsteht.

Wir haben angenommen, daß die vom Radium und von anderen radioaktiven Substanzen ausgesandte Energie aus einer inneren Quelle stammt, d. h. aus Umwandlungen in der Konstitution des Atoms. Da Umwandlungen dieser Art bis jetzt nicht bekannt waren, ist es wünschenswert, die Frage zu diskutieren, welchen anderen Quellen diese Energie möglicherweise entstammen kann. Eine der Quellen, die hier in Betracht kommen, liegt außerhalb des Radiums. Man kann annehmen, daß das Radium seine Energie durch Absorption einer Strahlung erhält, die alle Körper auf der Erdoberfläche durchdringt, die aber nur von den radioaktiven Körpern absorbiert wird. Diese Strahlung muß von sehr durchdringendem Charakter sein, da das Radium seine Aktivität behält, wenn es von einer dicken Bleischicht umgeben ist oder sich in einem tiefen Keller befindet. Wir kennen Röntgenstrahlen und Strahlen, die vom Radium selbst ausgesandt werden, die merkliche Wirkungen hervorbringen können, nachdem sie durch eine Bleischicht von mehreren Zoll Dicke hindurchgegangen sind, so daß die Idee der Existenz einer sehr durchdringenden Strahlung nicht so unwahrscheinlich ist, wie sie es vor wenigen Jahren gewesen sein würde. Es ist interessant, sich zu erinnern, daß vor mehr als hundert Jahren Le Sage eine sehr durchdringende Strahlung annahm, um die Gravitation zu erklären. Le Sage nahm an, das Weltall sei mit sehr kleinen Teilchen angefüllt, die sich mit außerordentlich großen Geschwindigkeiten bewegen. Er nannte sie ultramundane Körperchen und schrieb ihnen ein solches Durchdringungsvermögen zu, daß sie Massen wie die Sonne und die Planeten durchdringen konnten, ohne eine erhebliche Absorption zu erleiden. In geringem Grade wurden sie jedoch absorbiert, und sie gaben an die Körper, durch die sie hindurchgingen, einen kleinen Bruchteil ihrer Bewegungsgröße ab. Wenn die Richtung der durch einen Körper hindurchgehenden ultramundanen Körperchen gleichförmig verteilt war, so strebte die dem Körper mitgeteilte Bewegungsgröße nicht, diesen in einer Richtung mehr zu bewegen als in einer anderen. Wenn also nur ein Körper $A$ im Weltraum vorhanden wäre, so würde dieser unter dem Einflusse des Bombardements von Le Sages Körperchen in Ruhe bleiben. Befände sich dagegen in der Nähe von $A$ ein zweiter Körper $B$, so wird dieser einige von den Teilchen, die sich in der Richtung $BA$ bewegen, zurückhalten, so daß der Körper $A$ aus dieser Richtung nicht so viel Bewegungsgröße erhält, als er erhalten würde, wenn er allein im Felde wäre. In diesem Falle würde er aus dieser Richtung nur so viel Bewegungsgröße erhalten, als erforderlich ist, um ihn im Gleichgewicht zu halten. Wenn also $B$ anwesend ist, so bekommt die Bewegungsgröße in der entgegengesetzten Richtung das Übergewicht, so daß sich $B$ in der Richtung $BA$ bewegt, d. h. von $B$ angezogen wird. Maxwell wies darauf hin, daß die Übertragung von Bewegungsgröße von Le Sages Körperchen auf den Körper, durch den sie hindurchgehen, eine Verminderung der kinetischen Energie der Körperchen zur Folge haben müsse, und daß, wenn der Verlust von Bewegungsgröße hinreichend sei, um die Gravitation zu erklären, die von den ultramundanen Körperchen verlorene kinetische Energie hinreichen würde, den gravitierenden Körper auf Weißglut zu erwärmen. Die Tatsache, daß alle Körper nicht weißglühend sind, wurde von Maxwell als Argument gegen die Theorie Le Sages geltend gemacht. Es ist jedoch nicht notwendig, anzunehmen, daß die Energie der Körperchen in Wärme verwandelt wird. Man kann annehmen, daß sie in eine sehr durchdringende Strahlung verwandelt wird, die von dem gravitierenden Körper ausgeht. Es läßt sich durch eine einfache Rechnung beweisen, daß die Menge der in einem Gramm des gravitierenden Körpers per Sekunde umgewandelten kinetischen Energie ungeheuer viel größer sein muß als die Menge, die in derselben Zeit von einem Gramm Radium abgegeben wird.

Im ersten Kapitel haben wir gesehen, daß die Wellen elektrischer und magnetischer Kraft Bewegungsgröße in ihrer Fortpflanzungsrichtung besitzen. Wir können daher Le Sages Körperchen durch sehr durchdringende Röntgenstrahlen ersetzen. Diese würden, wenn sie absorbiert werden, an die Körper, durch die sie hindurchgehen, Bewegungsgröße abgeben, und ähnliche Betrachtungen wie die von Le Sage gegebenen würden zeigen, daß sich zwei Körper dem Quadrat ihres Abstandes umgekehrt proportional anziehen. Wenn die Absorptionen dieser Wellen per Volumeinheit nur von der Dichtigkeit abhängen und dieser proportional sind, so muß die Anziehung zwischen den Körpern dem Produkt ihrer Massen direkt proportional sein. Es verdient erwähnt zu werden, daß nach dieser Theorie die Störungen in der Gravitation sich mit der Geschwindigkeit des Lichtes fortpflanzen würden, während die Astronomen festgestellt zu haben glauben, daß sie sich mit einer viel größeren Geschwindigkeit fortpflanzen.

Wie bei den Körperchen Le Sages muß auch bei den Röntgenstrahlen der Verlust von Bewegungsgröße mit einem Verlust von Energie verbunden sein. Für jede Einheit von Bewegungsgröße würden $v$ Einheiten von Energie verloren gehen, wenn $v$ die Geschwindigkeit des Lichtes ist. Wenn diese Energie in Energie von Strahlen derselben Art wie die einfallenden Strahlen verwandelt würde, so ist leicht einzusehen, daß die Absorption keine Gravitationsanziehung erzeugen würde. Wenn eine solche Anziehung entstehen sollte, müßten die umgeformten Strahlen von einem stärker durchdringenden Typus sein als die ursprünglichen Strahlen. Sodann müßte bei diesen Strahlen, wenn sie die Ursache der Gravitation wären, ebenso wie bei den Körperchen Le Sages, die Energie so ungeheuer groß sein, daß die vom Radium ausgesandte Energie nur ein sehr kleiner Bruchteil der in dem Radium umgewandelten Energie sein würde. Aus diesen Betrachtungen geht nach meiner Ansicht hervor, daß die Größe der vom Radium ausgestrahlten Energie kein triftiges Argument gegen die Annahme ist, daß die Energie von Strahlung herrührt. Der Grund, welcher mich veranlaßt, anzunehmen, daß die Energiequelle im Radiumatom selbst ihren Sitz hat und nicht äußeren Ursprungs ist, ist die Tatsache, daß die Radioaktivität von Substanzen in allen Fällen, in denen wir sie haben lokalisieren können, eine vorübergehende Eigenschaft ist. Keine Substanz ist sehr lange Zeit radioaktiv. Man wird allerdings fragen, wie diese Behauptung damit in Einklang zu bringen ist, daß die Aktivität von Thor und Radium im Laufe der Zeit nicht merklich abnimmt. Die Antwort ist die, daß, wie Rutherford und Soddy für das Thor nachgewiesen haben, immer nur ein äußerst geringer Bruchteil der Masse radioaktiv ist und daß dieser radioaktive Teil seine Aktivität in wenigen Stunden verliert und durch eine neue Menge ersetzt wird, die sich aus dem nichtradioaktiven Thor entwickelt. Alle radioaktiven Substanzen, die wir beschrieben haben, das Th X, die Emanationen von Thor und Radium, die Substanz, welche die induzierte Radioaktivität erzeugt, sind höchstens einige Tage lang aktiv und verlieren dann diese Eigenschaft. Dies ist aber zu erwarten, wenn angenommen wird, daß die Quelle der Radioaktivität eine Umwandlung im Atom ist, aber nicht, wenn die Quelle äußere Strahlung wäre.