

Anschauungen über Magnetismus, ihre Beziehungen zur Molekularphysik und das Magneton.

Von

P. WEISS.

Welches auch die Ziele der Naturphilosophie seien, ob sie hoffnungsvoll versucht ein System der Welten zusammenzubauen und alles Geschehen in einer einheitlichen Erklärung wiederzuspiegeln, oder, bescheidener, nur die Kenntnis der Gesetze der Erscheinungen in ihrer unendlichen Mannigfaltigkeit zu erforschen bestrebt ist, es gibt fundamentale Fragen, denen sie sich nicht entziehen kann.

Ebensowenig wie der von seinem Ideal beseelte Baumeister der gothischen Kirchen, wie der Techniker, welcher die Kräfte der Natur bezwingt, bleibt die Naturphilosophie verschont von der Notwendigkeit, den Stoff zu kennen, mit welchem sie arbeitet.

Die Anschauungen über die Materie sind so alt wie die Wissenschaft selbst und schon bei den Griechen finden wir den Gegensatz zwischen zwei Gesichtspunkten, welche je nach Bedürfnis zur Erklärung herbeigezogen wurden: Die Kontinuität und Diskontinuität der Materie. Von den Griechen rührt das Wort: Atom her, das ist das Unteilbare. Aber eigentlich stellten sie sich wieder die Atome nur als eine praktische Grenze der Teilbarkeit vor, und bildeten wieder die Atome selbst von einer Materie im geläufigen Sinne des Wortes. So schleicht sich der Begriff der Kontinuität wieder ein.

Es liesse sich leicht ausführen, dass die neuere Wissenschaft abwechselnd mit dem Kontinuitätsbegriff und mit der atomistischen Vorstellung arbeitet. Im Kampf mit der unnennbaren Schwierigkeit des Problems der Naturbeherrschung sind alle Waffen gut. Auch die Erfolge der einen Anschauung genügen nicht, um das Verzichten auf die Hilfsmittel der andern zu gebieten. So besitzen wir umfassende Theorien, welche die elektrischen Tatsachen erklären durch Bewegungen und namentlich Wirbelbildungen in kontinuierlichen Flüssigkeiten. Der Lichtäther, diese hypothetische und subtilste

Materie, ist ein Continuum. Unstreitig hat aber in den letzten Jahrzehnten die Atomistik die grösseren Erfolge zu verzeichnen. Es ist aber unsere Atomistik von derjenigen der Griechen begrifflich verschieden. Wir unterscheiden heutzutage zwei Stufen in den Erscheinungen der begrenzten Teilbarkeit der Materie. Die erste umfasst die Atome der chemischen Elemente, von denen bald 100 verschiedene bekannt sind und die aus ihnen durch die chemische Bindung entstandenen Moleküle. Die zweite ist der Anfang einer wesentlich tiefergehenden Erkenntnis, sie enthält vorderhand noch sehr fragmentarische Kenntnisse über einige Bausteine, aus welchen sämtliche chemische Atome ihrerseits zusammengesetzt sind. Diese neue Physik befasst sich also mit Objekten kleiner wie die Atome, von denen das bekannteste das Elektron ist. Aber diese denkt man sich nicht wieder ausgefüllt mit einer Materie wie diejenige, die uns durch die tägliche Erfahrung vertraut geworden ist. Sonst wäre ja nichts erreicht und alles noch einmal in kleinerem Masstab anzufangen. Es ist nicht zu gewagt zu sagen, dass allmählich durch die vielseitigen Anstrengungen der heutigen Wissenschaft ein Bild sich entschleiert, ja einige wenige Züge sind schon erkennbar, wir kennen schon das Elektron ziemlich gut — aber lange wird es wohl noch dauern, bis wir die Gesamtheit des „Kleiner wie das Atom“ überblicken.

Die Erscheinungen der Chemie, namentlich der Umstand, dass sich die Zusammensetzung der Verbindungen ausdrücken lässt durch die ganzzahligen Vielfachen von einer ganz bestimmten Menge jeden Elementes, haben wohl am meisten zur Annahme der Diskontinuität der Materie beigetragen. Man sieht nämlich sofort, dass wenn Chlor oder Eisen aus Atomen bestehen, die alle einander gleich sind, und wenn die Verbindung die Vereinigung solcher Atome in verschiedener Anzahl ist, daraus folgt, dass die Mengen Chlor, die mit einem anderen Atom eine Verbindung eingehen, unter einander in ganzzahligen Verhältnissen stehen müssen. Dagegen ist es ohne die Annahme der Atome ausserordentlich schwer sich vorzustellen, warum z. B. in den zwei Verbindungen von Chlor mit Eisen das Chlor, das mit derselben Menge Eisen verbunden ist, genau in dem Verhältnis 2 : 3 ist, und nicht das Eisen sich mit Chlor in allen Verhältnissen mischt wie Zucker in Wasser. Das Fehlen einer andern annehmbaren Vorstellung, welche dem Gesetze der rationalen Verhältnisse in der chemischen Verbindung gerecht wird, ist die älteste unter den Hauptstützen des Atomismus.

Die Chemie fordert also die begrenzte Teilbarkeit, sie zeigt uns aber keineswegs, wo die Grenze liegt. Es wären die Atome

nicht weniger brauchbar in den chemischen Formeln, wenn man sie alle ersetzen würde durch dasselbe Vielfache des ursprünglichen Wertes. Mit anderen Worten: bis jetzt spielen nur die Verhältnisse der Atomgewichte eine Rolle. Dies ist so sehr der Fall, dass man in der Tat ein Atomgewicht, dasjenige des Wasserstoffs, willkürlich gleich 1 gesetzt und daraus die anderen abgeleitet hat. Denkt man sich dazu, dass die so gewonnenen Zahlen in Gramm ausgedrückte Massen bedeuten, so erhält man die Reihe der Grammatome. Es tritt dann aber an uns die Aufgabe, die Anzahl wahrer Atome in einem Grammatom, die sogenannte Avogadro'sche Zahl zu bestimmen. Ihre Kenntnis ist viel jüngeren Datums, wie die bewusste Aneignung des Begriffs der chemischen Atome und bedeutet wieder einen wichtigen Fortschritt. Sie ist vor kurzem der Gegenstand eines Vortrages von Prof. Dr. Zangger an dieser Stelle selbst gewesen, ich kann mich daher hier kurz fassen.

Die Avogadro'sche Zahl ist ausserordentlich gross: $68,5 \times 10^{23}$, sie ist wohl mit einer Genauigkeit von 1 Prozent bekannt. Es seien nur die zumteil von einander sehr weit abliegenden Erscheinungen erwähnt, welche gestatten, diese Zahl zu bestimmen. Sie lässt sich ableiten aus den Beobachtungsdaten über die Kompressibilität der Gase, aus ihrer Dielektrizitätskonstante. Prof. Zangger hat Gelegenheit gehabt, Sie auf die Brown'sche Bewegung aufmerksam zu machen, mit Hülfe welcher er selbst eine Bestimmung dieser Zahl gemacht hat, und zu zeigen, dass diese Erscheinung einen greifbareren Beweis liefert für die Atomistik, wie alle früheren Überlegungen. Sie zeigt nämlich die Bewegungen der Moleküle ebenso direkt etwa, wie das Schaukeln eines Kahns ein Beweis ist für die Existenz der Wellen.

Eine andere Bestimmung dieser Zahl ist von J. J. Thomson vorgenommen worden, durch Beobachtung der Fallgeschwindigkeit eines elektrisch geladenen, aus gleichen Wasserkügelchen bestehenden Nebels. Eine weitere geht hervor aus der Messung der von einem glühenden Körper ausgestrahlten Energie und ihrer spektralen Verteilung.

Es ist gewiss sehr auffallend, dass so viele verschiedene Messmethoden, welche sich auf so verschiedene Gebiete der Wissenschaft verteilen, zu übereinstimmenden Werten führen. Es ist nichts besser geeignet das Zutrauen in die Realität der Atome zu kräftigen. Es zeigt sich, dass die Atomistik nicht zu diesen vorläufigen „Arbeits-hypothesen“ gehört, die die Tatsachen bis zu einem gewissen Grade umfassen, und dann weiter zu Widersprüchen führen, sondern dass sie die ganze Natur beherrscht.

Ich habe es absichtlich bis jetzt unterlassen, von einer letzten Gruppe von übereinstimmenden Bestimmungen der Avogadro'schen

Zahl zu sprechen, nämlich derjenigen, die auf die Erscheinungen der Radioaktivität beruhen. Sie bedeuten nämlich einen weitem Schritt vorwärts in der Gewissheit und verdienen eine besondere Erwähnung. Es handelt sich um den Vorgang der α -Strahlen, welche in mit grosser Geschwindigkeit abgeschleuderten elektrisch geladenen Heliumatomen bestehen. Setzt man einen fluoreszierenden Schirm aus Zinkblende dieser Strahlung aus, so sieht man das Auftreffen jedes einzelnen Heliumatoms durch ein momentanes Aufleuchten. Es sieht unter der Lupe der Schirm aus wie ein Sternhimmel aus lauter momentan aufflackernden und sofort verlöschten Sternen. Es ist dies die erste Erscheinung, in welcher die Wirkung eines einzelnen Atoms unsern Sinnen zugänglich wurde. Die oben erwähnten Bestimmungen der Avogadro'schen Zahl bestehen in dem direkten oder indirekten Zählen dieser abgeschleuderten Heliumatome.

Die Atomistik der zweiten Stufe, die sich abgibt mit den Bestandteilen der Atome, nimmt ihren Anfang mit der zuerst von Helmholtz ausgesprochenen atomistischen Struktur der Elektrizität. Da jedes Atom, welches auch seine Natur sei, beim Wandern durch einen elektrolytischen Trog dieselbe Elektrizitätsmenge mit sich führt, so lag die Annahme einer körnigen Struktur der Elektrizität nahe; denn so erklärt sich der sehr eigentümliche Sachverhalt von selbst: Jedes Atom, sei es Kupfer, Silber, Natrium oder Wasserstoff, ladet sich, bevor es die leitende Flüssigkeit von einer Elektrode zur andern durchkreuzt, mit einem Atom Elektrizität und gibt dasselbe bei seiner Ankunft wieder ab. Die Sauntiere sind sehr verschiedener Art, es gibt deren so viele wie chemische Elemente, aber jedes trägt die gleiche Last. Diese Elementarladung, dieses Atom der Elektrizität ist sehr klein, es beträgt $1,4 \times 10^{-19}$ Coulomb. Sie hat den Namen Elektron erhalten.

Diese Anschauung hat sich sehr fruchtbar erwiesen. J. J. Thomson und seine Schule, welche sich in den letzten Jahrzehnten des verflossenen Jahrhunderts zur Aufgabe gestellt hatten, die noch wenig bekannten Erscheinungen der elektrisch leitenden Gase zu erforschen, haben gefunden, dass diese Leitfähigkeit durch Gasmoleküle bedingt ist, von denen jedes entweder eine positive oder negative Menge der Elektrizität trägt, die genau gleich ist dem Helmholtz'schen Atom der Elektrizität. Es sind dies die in der letzten Zeit vielgenannten Gasionen.

Ein weiterer Fortschritt kam von der Untersuchung der elektrischen Entladungen in den sehr verdünnten Gasen. In den 70er Jahren hatte Crookes über die von Hiltorf entdeckten im hohen Vakuum entstehenden Strahlen eine Reihe von glänzenden und sehr suggestiven Versuchen angestellt, auf welche er seine Hypothese

der strahlenden Materie aufbaute. Es sollte nach ihm in diesen extrem verdünnten Gasen ein Zustand der Materie zur Geltung kommen, der sich als vierter an die altbekannten festen, flüssigen und gasförmigen Zustände anreihen sollte. Obwohl sich die Crookes'sche Hypothese in dieser einfachen Form unhaltbar zeigte, enthielt sie doch ein Körnchen Wahrheit.

Es gelang nämlich später zu zeigen, dass die Erscheinungen der Crookes'schen strahlenden Materie, die unter dem von Goldstein herrührenden Namen der Kathodenstrahlen bekannter sind, aus negativ elektrisch geladenen Teilchen bestehen, deren Ladung gerade gleich ist dem Helmholtz'schen Atom der Elektrizität, deren Masse aber gleich ist $1/2000$ derjenigen des leichtesten Atoms, des Wasserstoffatoms. Sie bestehen also aus dem mit der Eigenschaft der Trägheit ausgestatteten Elektron, welches in dieser Weise der wohlbekannten alten Materie näher gerückt erscheint, sich aber durch die ausserordentliche Kleinheit seiner Masse von allen bekannten Atomen unterscheidet.

Theoretiker der Physik, unter denen namentlich H. A. Lorentz und der leider zu früh verstorbene Drude zu nennen sind, haben gezeigt, dass wenn man annimmt, dass im Innern der Atome derartige Körperchen mit der angegebenen Ladung und der genannten Masse zirkulieren, man mit ihrer Hilfe eine befriedigende Theorie der wichtigsten optischen, elektrischen und kalorischen Erscheinungen aufbauen kann. Es wäre dies schon genug, um in den Atomen die Existenz einesteils von nach Art von Planeten herumkreisenden gebundenen Elektronen, und andernteils von einem Schwarm von freien Elektronen, die zwischen den Atomen eines Metalles herumirren, anzunehmen. Aber diese Annahmen werden ausserordentlich gestützt dadurch, dass es neben den erwähnten Kathodenstrahlen noch eine Reihe von Erscheinungen gibt, wo diese Elektronen aus den Metallen austreten, wobei ihre Ladung und ihre Masse messbar werden. Lässt man Licht auf die blanke Fläche eines elektropositiven Metalls, wie Zink, Natrium, Rubidium usw. fallen, so lösen die Lichtschwingungen Elektronen aus dem Metallverband, die mit charakteristischer Geschwindigkeit abgeschleudert werden. Sogar die Temperaturerhöhung genügt: bei heller Weissglut gibt eine Platinfläche zahlreiche Elektronen ab, eine Erscheinung, die von Richardson ausführlich untersucht worden ist. Endlich hat vor kurzem Haber gezeigt, dass eine chemische Reaktion, z. B. zwischen einem der Alkalimetalle und Phosgengas auch das Hinausschleudern von Elektronen verursacht.

Weitere Aufklärung über die Beziehungen des Elektrons zur

Materie lieferte die Entdeckung der radioaktiven Substanzen. Das Uran, oder das Radium, besteht aus Atomen, die eine begrenzte Lebensdauer haben. Es erreicht während jeder Sekunde einen gewissen Prozentsatz dieser Atome das Geschick: sie gehen in einer Explosion zugrunde. Dieser Prozentsatz ist schwach beim Uran, stärker beim Radium, aber die Art der Erscheinung ist dieselbe. Das Resultat ist die Bildung eines Atomes von kleinerem Atomgewicht wie das ursprüngliche, der Fehlbetrag wird in der Gestalt der Geschosse, aus denen die α und β Strahlen bestehen, mit grosser Geschwindigkeit abgeschleudert.

Meistens ist das so entstandene leichtere Atom seinerseits nicht stabil, es explodiert mehr oder weniger bald zu einem noch leichteren Atom mit Abgabe von α oder β Teilchen, oder beiden Arten zugleich, und so fort, bis schliesslich ein stabiler Zustand erreicht wird. Die explodierten Radiumatome werden zu denjenigen der Emanation, die nichts anderes ist, wie ein radioaktives Gas. Die Emanationsatome leben im Durchschnitt nur vier Tage, aus ihnen entstehen die Atome des Radium *A*, die noch weniger beständig sind. Und so werden alle Stufen von einer Reihe von labilen Substanzen Radium *B*, Radium *C* bis Radium *G* zurückgelegt. Dieses letztere ist identisch mit dem ursprünglich in unabhängiger Weise entdeckten Polonium, welches seinerseits vergänglich ist. Es ist nicht unwahrscheinlich, dass die explodierten Poloniumatome Blei liefern.

Nun sind alle α Strahlen, die aus den verschiedensten radioaktiven Atomen herrühren, elektrisch geladene Heliumatome, und in der Tat haben Ramsey und Soddy bei den radioaktiven Vorgängen das Vorhandensein von Helium als Nebenprodukt nachgewiesen. Es wird dadurch die Vermutung des Heliumatoms als universeller Baustein in dem Atomverband nahegelegt.

Die β Strahlen sind Elektronen. Da, abgesehen von den radioaktiven Erscheinungen, die obenerwähnten Gründe für die Existenz der Elektronen in allen Atomen sprechen, wird sicherlich der Charakter des Elektrons als universeller Bestandteil aller Materie noch besser fundiert erscheinen, wie derjenige des α Teilchens oder Heliumatoms.

Nach diesem kurzen Überblick über die Geschichte und den heutigen Zustand der Vorstellungen über die Materie soll jetzt noch ihr Zusammenhang mit den Beobachtungstatsachen eines engeren, aber gerade für die Atomistik fruchtbaren Gebietes, mit den magnetischen Erscheinungen besprochen werden.

Jeder Magnet besitzt einen Nordpol und einen Südpol. Die Stärke eines Magnetes ist nicht nur bedingt durch die Stärke der Pole, sondern auch durch ihren Abstand. Auch sehr starke Pole, die aber in nächster Nähe zu einander gelegen wären, würden keine wesentliche Fernwirkung ausüben, denn sie würden sich gegenseitig aufheben. Es hat sich vorteilhaft gezeigt als Mass für die Stärke eines Magnetes einzuführen sein magnetisches Moment, d. i. das Produkt aus Polstärke mal Poldistanz. Das ist schon aus diesem Grunde zweckmässig, als beim Zerbrechen eines Magnetes die Summe der magnetischen Momente der Stücke gleich ist dem Momente des ursprünglichen ganzen Magnetes. Es hat also auch einen Sinn zu sprechen von dem magnetischen Moment pro Volumeinheit, es ist dies die Intensität der Magnetisierung. Gelangt man beim Verkleinern eines Magnetes bis auf das Molekül, so erhält man das Molekularmoment.

Nun gibt es aber nicht nur permanente Magnete, sondern auch Stoffe, wie das weiche Eisen, die unter dem Einflusse der magnetischen Kraft, oder des Magnetfeldes, wie man sich auch ausdrückt, magnetisch werden, ähnlich wie die Körper in dem elektrischen Felde elektrische Eigenschaften annehmen. Hier war das zunächstliegende die Übertragung der für die Elektrizität bewährten Vorstellungen auf den Magnetismus. Poisson hat angenommen, dass die magnetische Influenz in der Trennung der magnetischen Fluida besteht. Aber diese Vorstellung, die sich bis zu einem gewissen Grade mit Erfolg durchführen lässt, erklärt nicht alle Tatsachen. Während die elektrische Influenz, wie stark auch die elektrische Kraft sei, mit ihr proportional anwächst, erreicht das influenzierte magnetische Moment eine Grenze, die bei noch so starkem Magnetfeld nicht überschritten werden kann. Man sagt die Substanz sei gesättigt. Die Poisson'sche Vorstellung gibt keine Erklärung für die Sättigung. Es war daher ein bedeutender Fortschritt, als Wilhelm Weber eine neue Hypothese aufstellte, welche die Sättigung in ungezwungener Weise darstellt. W. Weber nimmt an, dass jedes Molekül ein kleiner unveränderlicher Magnet ist. So lange das Eisen im neutralen Zustande ist, liegen diese Moleküle wirt durcheinander und die Fernwirkungen der benachbarten entgegengesetzten Pole heben sich auf. Wirkt aber ein allmählich anwachsendes Feld, so nähern sich die Molekularmagnete progressive dem Parallelismus und wenn die Magnete genau gleich gerichtet sind, kann ein weiteres Anwachsen des Feldes nichts mehr ausrichten; die Sättigung ist erreicht.

Die Einführung der Molekularmagnete hat sich vielseitig bewährt; ich werde hier nur einen Spezialfall erwähnen, der durch ein

Experiment demonstriert werden kann. Stellt man sich diese Molekularmagnete als um Axen drehbar vor, etwa wie kleine Bussolen, und nimmt man an, diese Axen seien alle parallel, so wird man wohl den Magneten alle Richtungen geben können in der Ebene senkrecht zu den Axen, nicht aber sie aus dieser Ebene heraus-

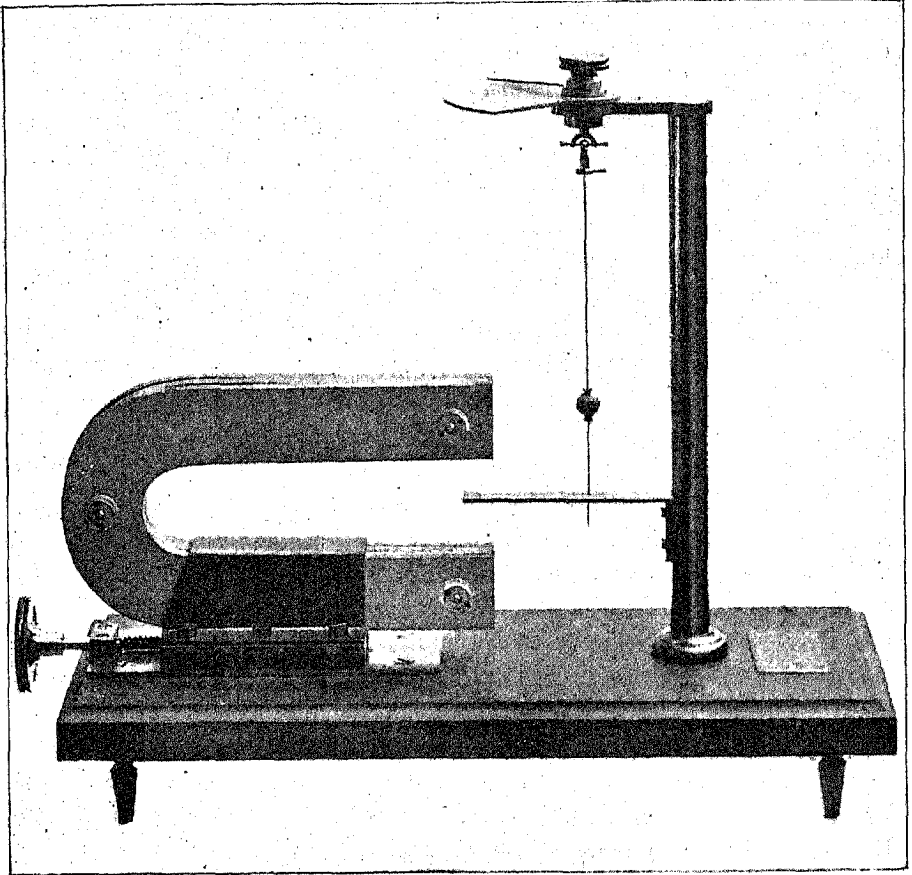


Fig. 1.

drehen können. Es ist in der Tat der Magnetkies oder Pyrrhotin so gebaut. Es können die Molekularmagnete nur die Richtungen annehmen, welche parallel sind der Basisfläche des hexagonalen Prismas, in welchem diese Substanz kristallisiert. Diese magnetische Ebene ist der Sitz aller magnetischen Eigenschaften. Nähert man einen Magneten dem Kristall in einer solchen Lage, dass er eine Orientierung der Molekularmagnete in dieser Ebene hervorruft, so wird die Substanz angezogen, nähert man ihn so, dass sein Feld senkrecht zu dieser Ebene wirkt, so verhält sich die Substanz ebenso

indifferent wie Kupfer: In dem in Fig. 1 abgebildeten Apparat ist eine kleine Kugel aus Pyrrhotin an einem Universalgelenk aufgehängt. Es gestattet dies, sie mit ihrer magnetischen Ebene entweder senkrecht oder parallel zu dem Felde eines Stahlmagneten zu präsentieren. In dem ersten Falle ist sie indifferent, in dem zweiten springt sie an den Pol von einer Distanz von mehreren Centimetern.

Es ist ohne weiteres klar, dass es eine der Hauptaufgaben der physikalischen Forschung sein wird, die Grösse der Molekularmomente, resp. Atommomente, der magnetischen Substanzen zu bestimmen. Es ist dies aber der experimentellen Technik nur in der allerletzten Zeit gelungen und zwar namentlich weil früher nicht die genügende theoretische Einsicht in die Verhältnisse vorlag.

Wir wollen zuerst einen Fall besprechen, wo die Atommomente mit einem Aufwand von Voraussetzungen bestimmt werden können, der kaum über die grundlegende W. Weber'sche Hypothese in Verbindung mit den üblichen mechanischen Begriffen hinausgeht. Wir erfahren durch den Umstand, dass der Magnetisierung in einem Körper jedwelche Richtung gegeben werden kann, dass der Drehung der Atommagnete die elastischen Kräfte im Inneren der Substanz keine unüberwindlichen Schwierigkeiten entgegensetzen. Mit anderen Worten, die potentielle Energie widersetzt sich im allgemeinen nur wenig dagegen, dass wir alle Atommagnete durch ein äusseres Feld parallel richten. Es ist dies der schon besprochene Zustand der magnetischen Sättigung. Messen wir jetzt das Moment des Grammatoms nach wohlbekannter Methode, so ist der Wert, den wir erhalten, beeinflusst durch den Umstand, dass die Elementarmagnete wegen der Wärmebewegung schwingen und daher nur ausnahmsweise mit ihrer magnetischen Axe parallel dem Felde liegen. Es wird dadurch das magnetische Moment zu klein gefunden. Dieser Fehler wird nur vermieden in der Nähe des absoluten Nullpunktes, wo jede Wärmebewegung aufhört. Es ist dies das Interesse der Messungen der magnetischen Momente von Eisen und Nickel, die Kamerlingh Onnes und ich bei der Temperatur des flüssigen Wasserstoffs, nur 20° über dem absoluten Nullpunkt, also bei -253° unserer gewöhnlichen Skala ausgeführt haben. Wir haben gefunden für das Moment des Grammatoms

Eisen 12 360

Nickel : 3 370

Es verhalten sich diese Werte genau wie 11 : 3. In der That:

$$12\,360 : 11 = 1\,123,6$$

$$3\,370 : 3 = 1\,123,3$$

Den weiteren Ausführungen vorgreifend erwähnen wir gleich, dass die hier zum ersten Male angetroffene Eigenschaft eine allge-

meine sein wird. Alle Momente der magnetischen Atome haben dasselbe gemeinsame Mass: 1123,5. Später wurde das Atommoment des Kobaltens, das nur nach Überwindung besonderer Schwierigkeiten erreicht werden konnte, von Herrn O. Bloch bestimmt. Er fand: 8,94 mal den obigen Wert; also mit dem Genauigkeitsgrad der Versuche die ganze Zahl 9.

Dieses gemeinsame Mass lässt sich deuten als einen und denselben Elementarmagnet, der im Eisenatom 11, im Nickelatom 3, im Kobaltatom 9 mal vorkommt. Ich nenne diesen Elementarmagnet „das Magneton“. Da sich obige Zahl auf das Grammatom bezieht, so ist sie auch als Grammmagneton zu bezeichnen. Dividiert man sie durch die Avogadro'sche Zahl, so erhält man das magnetische Moment

$$16,4 \cdot 10^{-22}$$

des Magneton selbst.

Um zu weiteren Bestimmungen von Atommomenten zu gelangen ist es notwendig, sich auf eine kinetische Theorie der paramagnetischen Erscheinungen zu berufen. Es gibt nämlich neben den stark magnetischen Metallen eine viel grössere Anzahl von Stoffen, deren Atome magnetische Momente besitzen, denen aber aus hier nicht im Detail zu besprechenden Gründen wegen der starken durch nichts bekämpften Wärmebewegung mit den verfügbaren Feldern auch nicht angenähert parallele Richtungen gegeben werden können. Es können daher diese Momente nur indirekt aus den schwachen paramagnetischen Erscheinungen berechnet werden. Langevin hat zuerst die nötige Theorie ausgearbeitet für die paramagnetischen Gase, deren einziger Vertreter der Sauerstoff ist. Ich habe gezeigt, dass sie angewendet werden kann auf die Lösungen der paramagnetischen Salze und habe dann sofort eine grössere Anzahl von Atommomenten erhalten.

Ich gebe hier eine Figur (Fig. 2), welche die Resultate zusammenfasst. Sie enthält eine Skala aus vertikalen Linien in gleichen Abständen, welche von 0 bis 32 numeriert sind und die ganzen Zahlen der Magnetonen darstellen. Die voll ausgezogenen Linien entsprechen den geraden, die strichpunktirten den ungeraden Zahlen. Diese Skala ist mit Hilfe des obigen, aus dem Vergleich der absoluten Sättigungsintensität von Eisen und Nickel abgeleiteten Wertes des Magnetons gezeichnet worden. Die durch vertikale Pfeile bezeichneten Werte auf der ersten horizontalen Linie liegen daher nach Definition auf den Strichen. Die zwei von O. Bloch bei tiefen Temperaturen auf den Metallen selbst beobachteten Werte sind auf derselben Horizontalen durch liegende Kreuze eingetragen worden. Auf der zweiten Horizontalen sind eine Reihe von absoluten Sättigungsintensitäten der ferromagnetischen Substanzen bei höheren Temperaturen, die

weiter unten besprochen werden sollen, dargestellt. Auf der dritten und vierten Horizontalen befinden sich die durch Kreise bezeichneten Atommomente aus den von Pascal ausgeführten Messungen über paramagnetische Lösungen. Auf diese Lösungen bezieht sich auch die Legende unterhalb der Figur.

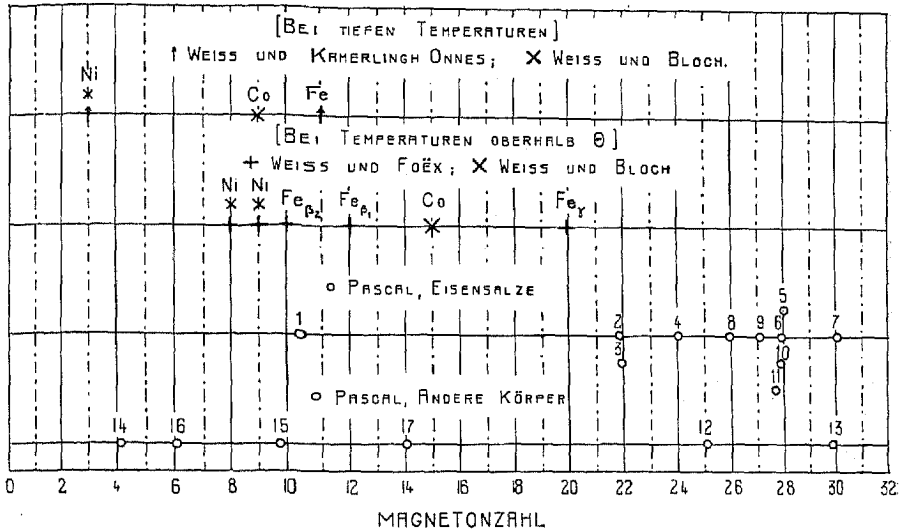


Fig. 2.

- | | |
|----------------------------|--------------------------|
| 1. K u. Amm. Ferricyanid | 10. Na Ferropyrophosphat |
| 2. Fe u. Amm. Pyrophosphat | 11. Ferrosulfat |
| 3. Fe u. Amm. Citrat | 12. Kobaltchlorid |
| 4. Na Ferripyrophosphat | 13. Mangansulfat |
| 5. Na Ferrimetaphosphat | 14. K Permanganat |
| 6. Ferrichlorid | 15. Cu Sulfat |
| 7. Ferrisulfat | 16. Cu u. Amm. Sulfat |
| 8. K Ferrometaphosphat | 17. Uransulfat |
| 9. Na Ferrooxalat | |

Aus der näheren Betrachtung dieser Figur geht, ebenso wie aus der Diskussion dieser Resultate, für welche ich auf die ausführliche Abhandlung verweise, eine sehr eigentümliche Eigenschaft dieser Atommomente hervor. Ein und dasselbe Atom hat nicht immer dasselbe Moment. So zum Beispiel stellen die Punkte 2, 4, 8, 6, 7 die Werte der Momente des Eisenatoms in einer Reihe von verschiedenen Zuständen chemischer Bindung dar. Nebenbei gesagt, die grösseren Momente werden geliefert durch die Verbindungen, in welchen das Eisen auch am intensivsten chemisch reagiert. Man sieht aber sofort, dass die genannten fünf Punkte sich in gleichen Abständen befinden, und dass dieser Abstand gleich zwei mal dem oben bestimmten Magneton-

werte sind. Also genügen wieder diese Atommomente der gefundenen Regel: sie sind ganze Vielfache des Magnetons.

Sie führen uns also zu einer Verallgemeinerung der Weber'schen Voraussetzung: Ein Atom hat nicht ein bestimmtes Moment, sondern je nach den Umständen verschiedene, die aber stets ganze Vielfache des Magnetons bleiben.

Die Ausdehnung der kinetischen Theorie des Paramagnetismus auf die festen paramagnetischen Substanzen scheint auf den ersten Blick unzulässig. Es ist schwierig sich vorzustellen, dass in den festen Körpern die Beweglichkeit der Moleküle eine genügende sein könne, um den Gesetzen der statistischen Mechanik, auf welcher die kinetische Theorie beruht, ihre Gültigkeit zu lassen. Führt man aber doch die Rechnung durch, wie wenn die Theorie zulässig wäre, so findet man wieder mit einer bemerkenswerten Annäherung ganzzahlige Vielfache des Magnetons. Es scheint hiermit gleichzeitig der Beweis geliefert zu sein, dass die Schwierigkeiten, die sich der Anwendung der Theorie in den Weg legen, überschätzt worden sind und dass auch die magnetischen Atommomente der festen Verbindungen ebenfalls Vielfache desselben Elementarmomentes sind.

Ein weitgehender Aufwand von Theorie ist notwendig, um die Momente der starkmagnetischen, der ferromagnetischen Substanzen, wie man sie nennt, bei anderen Temperaturen wie in der Nähe des absoluten Nullpunktes zu ermitteln. Dies leistet die Theorie des molekularen Feldes. Auf ihre Darstellung kann hier nicht eingegangen werden, ich begnüge mich mit der Angabe einiger Resultate: Die eine Gruppe derselben ist in der Fig. 3 dargestellt, in welcher in einer in den ausführlichen Abhandlungen im Detail nachzusehenden Weise die Beobachtungen über den Magneteisenstein in Abhängigkeit der Temperatur eingetragen worden sind. Die markierten Punkte (unterer Linienzug) befinden sich in auffallender Weise auf vier Geraden, die entweder unmittelbar oder auch in dem einen Falle mit einer Übergangskurve *c d* aneinanderstossen. Die Art des Zusammenstossens ist nebensächlich, wesentlich dagegen, dass die Theorie lehrt, dass eine Substanz in einem bestimmten Zustande eine einzige Gerade ergeben muss. Man war daher mit dem Magneteisenstein auf einen Stoff getroffen, der in dem in der Figur dargestellten Bereich sich in vier verschiedenen Zuständen darbietet. Es kommt dazu ein fünfter Zustand, der in das Bereich der ausserhalb des Rahmens der Figur befindlichen Temperaturen zwischen 900° und 1200° fällt. Berechnet man für diese Zustände die magnetischen Momente, so findet man, dass sie in den Verhältnissen sind von $4 : 5 : 6 : 8 : 10$. Es nimmt also das Moment des Magnetitmoleküles zu vier verschiedenen Malen

zu bei steigender Temperatur, und zwar um einmal oder zweimal den vierten Teil des ersten Wertes, den es in dieser Versuchsreihe besitzt. Man sieht in der Tat, dass von dem gezeichneten Linienzug, welcher den oben angegebenen exakten Verhältnissen entspricht, die markierten Beobachtungen keinerlei systematische Abweichung zeigen.

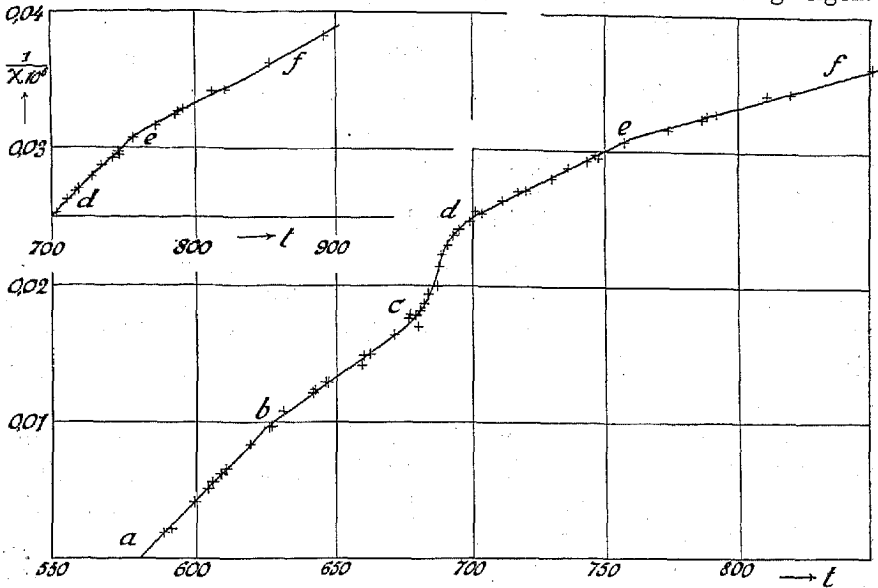


Fig. 3.

Es war dies das erste Mal, dass die Erscheinung angetroffen wurde, dass ein und dasselbe Molekül eine Reihe von magnetischen Momenten annehmen kann, die zueinander in durch einfache ganze Zahlen ausdrückbaren Verhältnissen stehen. Ähnliches zeigen die Metalle bei hohen Temperaturen. Ich werde nur kurz darauf hinweisen. Ihre Atommomente sind dargestellt in der zweiten horizontalen Reihe der Fig. 2, wo man sich sofort überzeugt, dass auch sie ganze Vielfache des Magnetons sind. In einer ersten Reihe von Messungen, die Herr Foëx unter meiner Leitung ausgeführt hat, hat sich ergeben:

Nickel _a	8,03	Magnetonen
Nickel _b	9,03	"
β_1 Eisen	12,08	"
β_2 Eisen	10,04	"
γ Eisen	19,95	"

also mit aller wünschbaren Genauigkeit ganze Zahlen. Eine zweite Reihe von Versuchen von Herrn Bloch hat zunächst obige Werte für das Nickel bestätigt und hat die weiteren Werte:

Kobalt, erste Bestimmung	15,008	Magnetonen
" " " " " " " " " " " "	14,925	"

hinzugefügt; also wieder mit dem Genauigkeitsgrad der Versuche einer ganzen Zahl.

Fassen wir jetzt die z. B. für das Nickel nach den verschiedenen Methoden und in den verschiedenen Zuständen gewonnenen Resultate zusammen, so können wir nicht umhin, die grosse Verschiedenheit der Momente eines und desselben Atoms nochmals zu betonen:

Nickel in der Nähe des absol. Nullpunktes	3	Magnetonen
„ oberhalb 400°	8	„
„ „ 900°	9	„
„ in den Lösungen der Nickelsalze	16	„

Überblick und Schluss.

Ich habe durch Anwendung der kinetischen Theorie des Magnetismus auf die gelösten paramagnetischen Substanzen, auf die para- und ferromagnetischen festen Körper eine grössere Anzahl von auf den ersten Blick scheinbar nicht leicht erreichbaren Molekularmomenten bestimmt.

Es ist so die sehr merkwürdige Eigenschaft zutage getreten, dass ein und dasselbe Atom je nach der Temperatur, der chemischen Bindung verschiedene magnetische Momente annehmen kann. Alle diese Momente stehen untereinander in ganzzahligen Verhältnissen. Man kann daher unter den verschiedenen Momenten desselben Atoms zunächst ein gemeinsames Mass finden. Dann kann man sich vergewissern, dass dieselbe Untersuchung für ein anderes Atom dasselbe gemeinsame Mass liefert. Dieses gemeinsame Mass aller Atommomente hat den Namen Magneton erhalten.

Wenn man annimmt, was sehr wahrscheinlich scheint, dass dieses Elementarmoment in einem materiellen Substratum, welches wohl eine schwere Masse besitzen wird, seinen Sitz hat, so wird man sagen können: das Magneton ist ein gemeinsamer Baustein einer grossen Zahl von magnetischen Atomen und wahrscheinlich aller. Bis jetzt ist der Beweis geführt für: Fe, Ni, Co, Cr, Mn, V, Cu, U.

Beschränkt sich diese Eigenschaft auf die magnetischen Elemente? Der Fall des Kupfers und des Sauerstoffs, die je nachdem sie in Verbindung oder frei sind, magnetisch oder diamagnetisch sein können, derjenige des Jodquecksilberkaliums, in welchem durch die Verbindung von drei diamagnetischen Elementen mindestens eins magnetisch wird, zeigen, dass keine unüberschreitbare Grenze gezogen werden kann.

Aber die Verwandtschaft mit einem scheinbar sehr entlegenen Gebiete der Wissenschaft, mit den Gesetzen der Serienspektren, spricht sehr zugunsten des Magnetons als universellen Bestandteil der Materie. Man weiss, dass W. Ritz einen elektromagnetischen

Mechanismus ersonnen hat, welcher Rechenschaft gibt von der Verteilung der Linien in den Serien, welche das Balmer'sche Gesetz und verwandte Gesetze befolgen. Der Ritzsche Mechanismus ist an und für sich sehr bestechend und wird durch den hoffnungslosen Misserfolg der anderweitigen Versuche, namentlich derjenigen mit elastischen Schwingungen, wahrscheinlicher gemacht. Er besteht, was den Teil betrifft, der hier in Betracht kommt, aus magnetischen Stäbchen von gegebenem Moment, die gleich gerichtet und zu mehreren zu einem festen geradlinigen Magneten miteinander verbunden sind.

Dieses Organ reproduziert gerade den Magneten mit konstantem aliquoten Teil, zu welchem wir gelangt sind. Die Serienspektren aber sind in vielen Atomen beobachtet worden, von welchen die Mehrzahl diamagnetisch ist. Allerdings ist die Identität des Ritzschen Elementes und des Magnetons nicht bewiesen, aber sie scheint wahrscheinlich, und mit ihr die Existenz des Magnetons in allen Atomen.

Welches werden jetzt die Folgen der Aneignung dieses neuen Begriffes sein? Zunächst liefert er ein neues Hilfsmittel zur Untersuchung und geordneten Beschreibung der magnetischen Eigenschaften der Materialien. Fragen, deren Komplexität entmutigend schien, können jetzt in Angriff genommen werden, und einige neue Resultate haben schon gezeigt, wie berechtigt diese Hoffnungen sind.

Der bei Gelegenheit der paramagnetischen Lösungen erwähnte Parallelismus zwischen den chemischen Eigenschaften und den Magnetonzahlen wirft neue Fragen auf. Welche Rolle spielen die magnetischen Erscheinungen in der chemischen Verbindung? Sind die chemischen Kräfte Anziehungen von Elementarmagneten? Können die Valenzen in dem einen oder anderen Fall den Magnetonen gleichgesetzt werden?

Die Art der Umwandlung, die ein Körper erleidet, dessen Magnetonzahl sich ändert, ist noch sehr dunkel und verlangt für sich untersucht zu werden. Sie ist nicht eine allotrope Umwandlung im gewöhnlichen Sinne des Wortes, denn der Fall des Magneteisensteins zeigt, dass das Molekül durch diese Umwandlungen hindurch seine Masse und seinen Bau beibehält. Kostet diese Umwandlung Energie? Gibt es andere äussere Kennzeichen, die sie begleiten? Es ist bis jetzt auf diese letztere Frage nur in einem Punkte möglich, zu antworten: Das molekulare Feld, welches die orientierenden Wechselwirkungen in den ferromagnetischen Körpern ausdrückt, erleidet gleichzeitig mit der Magnetonzahl eine Änderung.

Denkt man sich für einen Moment die Existenz dieser kleinen Elementarmagnete, die alle einander gleich sind und in den Atomen

in grosser und je nach den Versuchsbedingungen verschiedener Zahl vorkommen, als von vornherein gegeben, so wird ihre experimentelle Demonstration als von den grössten Schwierigkeiten umgeben erscheinen. Die magnetischen Momente sollten Resultanten bilden, welche zu ihrer Grösse keine einfache Beziehung mehr haben. Es scheint, dass man, um sie zu fassen, irgendeine Ausnahmeerscheinung abwarten müsse, ähnlich derjenigen, die das Elektron aus dem Atom schleudert. Die Leichtigkeit, mit welcher sie sich kundgeben, der Ausnahmecharakter der Fälle, wo sie der Beobachtung entgehen, sind der Ausdruck einer wichtigen Eigenschaft. Es ist in der Tat wunderbar, dass diese Elementarmagnete, wenn sie überhaupt eine materiell getrennte Existenz haben, immer so gelagert sind, dass ihre Momente sich algebraisch addieren, das heisst parallel, wenn nicht sogar in derselben Geraden. Es ist vielleicht ebenso eigentümlich, dass unter den vorhandenen Messungen so wenige die Idee von Gemischen von Molekülen mit verschiedenen Magnetonzahlen erwecken. Es ist wahrscheinlich, dass derartige Gemenge in den konzentrierten Lösungen der magnetischen Salze existieren, von denen Königsberger und Meslin gezeigt haben, dass sie mit der Konzentration veränderliche Magnetisierungskoeffizienten besitzen. Man kann aber fragen, ob die Ausgleichung der Magnetonzahlen nicht eine der Gleichgewichtsbedingungen der gleichartigen Moleküle untereinander wäre.

Nach dem Elektron, welches die neueren Ideen über die diskontinuierliche Struktur der Elektrizität zum Ausdruck bringt, bedeutet das Magneton eine ähnliche Evolution in der Darstellung der magnetischen Erscheinungen.

Mit dem Magneton gelangen wir zu einem dritten universellen Baustein der Materie, der wie das Elektron und das α Teilchen in vielen Atomen, und wahrscheinlich in allen vorkommt. Das Altertum glaubte an die Einheit der Materie. Die Alchemisten wollten bei ihren Versuchen, Gold zu machen, diesen Glauben in greifbare Realität verwandeln. Erst die Begründer der modernen Chemie am Ende des 18., in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts haben, indem sie die Unveränderlichkeit der Elemente zum Dogma erhoben, die immer im Stillen gehegte Vorliebe einer einheitlichen Substanz, fern von den wohlfundierten Gesetzen, in den Hintergrund gerückt. Und nun kommen wir allmählich, durch die neugewonnenen Kenntnisse über allen Atomen gemeinschaftliche Bestandteile, der Universalität der Materie wieder näher.