

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

Die Atomtheorie in ihrer neuesten Entwicklung

Graetz, Leo

Stuttgart, 1918

Erster Vortrag

urn:nbn:de:bsz:31-91571

Erster Vortrag.

Die Moleküle und Atome in der Chemie und der kinetischen Gastheorie.

Die Atomtheorie in der Chemie und Physik. Atome und Moleküle. Ein- und mehratomige Moleküle der Elemente. Die Atomgewichte. Die Prout'sche Hypothese. Das periodische System der Elemente. Die kinetische Gastheorie. Die wirkliche Größe und die wirkliche Masse der Moleküle und Atome. Die Loschmidt'sche und die Avogadro'sche Zahl. Theorie der Wirbelatome. Der Unteilbarkeit widersprechen die Spektra der Elemente.

Schon hervorragende Köpfe des Altertums haben erkannt, daß es ein Irrtum ist, wenn wir annehmen, wie es der Schein verlangt, daß ein Stück Eisen, ein Stück Glas den Raum, den es einnimmt, vollständig und ohne Lücken erfülle. Die Tatsache, daß alle Körper bei tieferer Temperatur sich zusammenziehen, also einen kleineren Raum ausfüllen, ebenso wie die Tatsache, daß sie durch einen Druck auf ein kleineres Volumen zusammengepreßt werden können, beweisen schon, daß sie vorher den Raum nicht voll erfüllt haben können. Allerdings müssen die Lücken, die in den scheinbar stetigen Körpern existieren, sehr klein sein. Denn selbst bei der schärfsten mikroskopischen Vergrößerung, die wir heute anwenden können, kann man von ihnen nichts erkennen. Die Körper müssen danach aus außerordentlich kleinen, mikroskopisch nicht erkennbaren Bausteinen zusammengesetzt sein, die aber nicht lückenlos aneinandergereiht sind, sondern zwischen denen Abstände vorhanden sind, die sich z. B. durch Temperaturänderungen oder durch Druck vergrößern oder verkleinern lassen.

Diese allgemeine Überlegung wird nun bekanntlich in der umfassendsten Weise bestätigt durch die gesamten Tatsachen der chemischen Forschung. Die überaus große Anzahl von chemischen Verbindungen, die teils die Natur direkt darbietet, die anderenteils in der Retorte des Chemikers erzeugt werden, zeigen immer bestimmte einfache Gewichtsverhältnisse der in ihnen enthaltenen Stoffe. Die einfache und durchaus genügende Erklärung dieser Tatsache, welche die Grundlage der ganzen Chemie geworden ist, ist die, daß jeder einfache, elementare chemische Stoff aus kleinsten Teilchen, den A t o m e n, besteht, von denen jedes eine bestimmte Masse besitzt, so zwar, daß sämtliche Atome eines und desselben Stoffes gleichartig sind und dieselbe Masse besitzen, daß aber die Atome verschiedener Stoffe sich zunächst durch ihre Masse und dann auch durch ihre Eigenschaften voneinander unterscheiden. Da es

ungefähr 90 verschiedene chemische Elemente gibt, so gibt es auch 90 verschiedene Atome. Aus der Zusammensetzung solcher verschiedener Atome bilden sich die kleinsten Bausteine aller chemischen Verbindungen, die Moleküle derselben. Die wirkliche Masse irgend eines der 90 Atome in Gramm anzugeben sind wir zwar heute imstande und werden diese Zahlen auch später besprechen. Unter dem Atomgewicht versteht man aber nicht die wirkliche Masse eines Atoms in Grammen, sondern das Verhältnis der Masse dieses Atoms zu der Masse eines Atoms des leichtesten Stoffes, des Wasserstoffs. Die Atomgewichte sind also relative Zahlen, ohne Benennung. Ihre Bestimmung geschieht meistens auf chemischem Wege und zwar mittels der Wage. In einigen zweifelhaften Fällen hat das Gesetz der Atomwärme von Dulong und Petit, von dem wir noch zu sprechen haben werden, die Entscheidung für das richtige Atomgewicht gegeben, wo es aus rein chemischen Überlegungen nicht gefunden werden konnte.

Die chemischen Zeichen für die einzelnen Elemente, H für Wasserstoff, He für Helium, O für Sauerstoff, N für Stickstoff, Li für Lithium usw., bedeuten nicht bloß den Namen derselben, sondern zugleich ihr Atomgewicht. So bedeutet N den Namen für Stickstoff und zugleich die Zahl 14 als Atomgewicht desselben. Unter einem Grammatom einer Substanz versteht man so viel Gramm der Substanz, als das Atomgewicht angibt. Ein Grammatom Stickstoff sind also 14 g Stickstoff.

Die nicht elementaren, also alle zusammengesetzten Körper entstehen, wie gesagt, dadurch, daß ein oder mehrere Atome verschiedener Elemente in einen engen Zusammenhang treten und eine kleine Menge der Substanz bilden, die man ein Molekül nennt. Die Moleküle sind die Bausteine für die zusammengesetzten Körper. Die Moleküle können durch chemische Einwirkungen in ihre Atome zerlegt werden. Das Molekulargewicht ist stets gleich der Summe der Atomgewichte aller in einem Molekül enthaltenen Atome.

Danach scheint ein Unterschied zwischen den elementaren und den zusammengesetzten Stoffen, z. B. zwischen Chlor, das ein Element, und Chlorwasserstoff, das ein zusammengesetzter Stoff ist, darin zu bestehen, daß bei den ersteren die Atome selbst die Bausteine sind, bei den letzteren aber die Moleküle. Indes kann man beweisen, daß auch bei den letzteren Elementen es nicht die einzelnen Atome sind, welche die getrennten Bausteine der Körper bilden, sondern daß auch bei ihnen zwei (oder auch mehr) Atome in einen engeren Zusammenhang treten, also ebenfalls ein Molekül bilden, das hierbei aber nicht aus Atomen verschiedener Art, sondern aus gleichen Atomen zusammengesetzt ist. Diese Behauptung ergibt sich, wenigstens für den gasförmigen Zustand der Stoffe, aus dem Avogadro'schen Prinzip, welches einen nicht streng direkt beweisbaren, aber in seinen Folgerungen stets bestätigten Satz darstellt. Da nämlich alle Gase und Dämpfe, sowohl gasförmige Elemente wie Wasserstoff, Chlor, Schwefeldampf usw., wie auch gasförmige zusammengesetzte Stoffe, wie Chlorwasserstoff, Äthan, Kohlensäure, möge ihr Molekül noch so kompliziert zusammengesetzt sein, genau dieselben Gesetze befolgen, genau dieselbe Abhängigkeit ihres Volumens vom Druck und von der Temperatur zeigen, so müssen sie trotz der Ver-

schiedenheit ihrer Atomgewichte bzw. Molekulargewichte etwas gemeinsam haben, und dieses Gemeinsame erkannte Avogadro darin, daß er den Satz aufstellte: Alle gasförmigen Körper haben in demselben Volumen bei gleicher Temperatur und gleichem Druck die gleiche Anzahl von Molekülen. Da nun aus einem Liter Wasserstoff und einem Liter Chlorgas erfahrungsgemäß 2 Liter Chlorwasserstoffgas entstehen, in letzteren zusammen also doppelt so viel Moleküle Chlorwasserstoff, also auch doppelt so viel Atome Chlor und Wasserstoff enthalten sind, als in den beiden ersteren vorhanden wären, wenn deren Moleküle je 1 Atom enthalten würden, so folgt, daß ein Molekül Wasserstoff aus 2 Atomen Wasserstoff und ebenso ein Molekül Chlor aus 2 Atomen Chlor bestehen muß. Die zwei an sich gleichartigen Atome müssen also in einen engeren Zusammenhang getreten sein, um ein Molekül zu bilden. Warum und wodurch das geschieht, ist aber zunächst eine offene Frage.

Von den meisten elementaren Stoffen hat man beweisen können, daß ihre Moleküle nicht aus einem, sondern aus 2 Atomen bestehen. Nur von dem Quecksilberdampf war aus chemischen Gründen lange vermutet worden, daß sein Molekül bloß 1 Atom Quecksilber enthält, daß es also ein einatomiges Molekül ist. Die kinetische Theorie der Gase macht nun für ein einatomiges Gas eine bestimmte Vorhersagung. Bei den Gasen muß man nämlich zwei verschiedene spezifische Wärmen unterscheiden, die spezifische Wärme bei konstantem Druck (c_p) und diejenige bei konstantem Volumen (c_v). Für ein einatomiges Gas zeigt nun die kinetische Gastheorie, daß die erstere $\frac{5}{3}$ mal so groß sein muß wie die zweite, so daß also das Verhältnis der beiden spezifischen Wärmen $\frac{5}{3}$ sein muß. Diese Voraussage ist nun für den Quecksilberdampf durch die berühmte Messung des Verhältnisses der beiden spezifischen Wärmen von Kundt und Warburg glänzend bestätigt worden. Die Einatomigkeit des Quecksilberdampfes ist dadurch physikalisch bewiesen worden. Lange Zeit war Quecksilber der einzige bekannte Stoff, der ein bloß einatomiges Molekül enthielt. Aber als Ramsay die neuen Gase in der Atmosphäre entdeckte, die sogenannten Edelgase, das Argon, Neon, Krypton, Xenon und das Helium, erwies es sich, daß diese alle ebenfalls den Wert $\frac{5}{3}$ für das Verhältnis der spezifischen Wärmen ergaben, daß sie also auch einatomig sind, daß also bei ihnen eine engere Verbindung zweier Atome aus irgendwelchen Gründen nicht möglich erscheint. Zugleich sind sie auch von solcher Art, daß sie sich auch nicht mit Atomen anderer Elemente verbinden, sie sind inerte, träge Elemente, ihre Atome verharren durchaus in prächtiger Einsamkeit, ebenso wie sich England früher rühmte in splendid isolation zu sein, ein Verhältnis, das es hoffentlich zu seinem Unglück aufgegeben hat, um uns zu schädigen.

Die Atome der Elemente sind, wie gesagt die letzten Bausteine aller Moleküle und danach aller Körper. Da es, wie erwähnt, rund 90 verschiedene Elemente gibt, so gibt es danach rund 90 verschiedene Bausteine, aus denen das ganze Gebäude der materiellen Körper zusammengesetzt ist.

Man hatte natürlich schon lange Zeit die Vermutung gehegt und die Frage aufgeworfen, ob nicht diese verschiedenen Atome nur Zusammensetzungen in verschiedenen Anordnungen eines einzigen, eines Grundatoms seien, und dieses konnte zunächst nur das leichteste, das Atom des Wasserstoffs, sein. Schon 1815 stellte Prout die Hypothese auf, daß alle Atome sich aus dem Wasserstoffatom ableiten. Dann aber müßten die Atomgewichte ganze Vielfache des Atomgewichts des Wasserstoffs sein, also da dieses 1 ist, ganze Zahlen sein. Um diese Frage zu entscheiden, mußten sehr genaue Bestimmungen des Atomgewichts gemacht werden. Wenn z. B. das Atomgewicht des Quecksilbers durch eine erste, schon ziemlich genaue Bestimmung sich zu 200 ergibt, so ist dieser Wert der Proutschen Hypothese günstig. Wenn aber eine genauere Messung den Wert 200,6 ergibt, so spricht dieser gegen die Proutsche Hypothese. In der Tat wird die Ganzzahligkeit nur von wenigen Atomgewichten genau erfüllt, aber bei sehr vielen beträgt die Abweichung von einer ganzen Zahl nur höchstens $\pm 0,1$.

Bestimmt ist also die Proutsche Hypothese im allgemeinen nicht richtig, immerhin beträgt bei 63 Elementen, bei denen das Atomgewicht genauer bestimmt ist, die Zahl der Fälle, in welchen die Atomgewichte um nicht mehr als 0,1 von einer ganzen Zahl nach oben oder unten abweichen, 27, während sie nach der bloßen Wahrscheinlichkeit nur 18—19 betragen sollte, so daß also irgend ein Korn Wahrheit sicher in der Proutschen Hypothese, wenigstens für eine ganze Anzahl von Atomen, steckt.

Andererseits aber wurde schon lange darauf aufmerksam gemacht, daß die Atome von Stoffen, die chemisch ähnliche Natur haben, eine Anzahl von annähernden Gesetzmäßigkeiten in ihren Atomgewichten zeigen, indem nämlich vielfach die aufeinander folgenden Stoffe angenähert konstante Differenzen ihres Atomgewichts aufweisen. Diese angenäherten Gesetzmäßigkeiten haben ihren allgemeinsten Ausdruck in dem periodischen System der Elemente gefunden, welches von Mendelejeff und Lothar Meyer (1869) aufgestellt wurde und welches aussagt, daß die chemischen Eigenschaften der Atome periodische Funktionen ihrer Atomgewichte sind. Für eine ganze Anzahl von chemischen Elementen ergibt sich dieses Gesetz zwanglos, da, wenn man die Elemente nach der Größe der Atomgewichte ordnet, das 9. Element wieder dieselben chemischen Eigenschaften besitzt wie das erste. Indes zeigt sich eine durchgängige Gesetzmäßigkeit auch hierbei nicht. Bei den Atomen bis zum Mangan (Atomgewicht 54,9) ist die Gesetzmäßigkeit glatt vorhanden. Dann aber kommen die drei Elemente der Eisengruppe, Eisen, Nickel, Kobalt, welche in diese Reihe durchaus nicht passen und welche sehr wenig verschiedene Atomgewichte besitzen. Dann passen die Elemente wieder einigermaßen, bis die Palladiumgruppe (Ruthenium, Rhodium, Palladium) eine neue Unstimmigkeit hervorbringt. Und dasselbe geschieht zum dritten Male durch die Platingruppe (Osmium, Iridium, Platin). Die Schwierigkeit wurde noch größer, seit eine sehr große Anzahl neuer Elemente in den seltenen Erden entdeckt wurden. Ferner aber zeigt es sich, daß die Elemente, welche zu einer Kolumne gehören, also chemisch einander ähnlich sein sollen, sich noch wieder in je zwei Gruppen teilen, die voneinander doch durch starke Unterschiede getrennt sind.

| | I | | II | | III | | IV | | V | | VI | | VII | | VIII | |
|--------------------|---------------------|---|-------------------------|---|-----------------------|---|-----------------------|---|----------------------|---|----------------------|---|-------------------|---|---|--|
| 0 | a | b | a | b | a | b | a | b | a | b | a | b | a | b | | |
| Helium He 4,0 | Lithium Li 6,94 | | Beryllium Be 9,1 | | Bor B 11,0 | | Kohlenstoff C 12,0 | | Stickstoff N 14,0 | | Sauerstoff O 16,0 | | Fluor F 19,0 | | | |
| Neon Ne 20,2 | Natrium Na 23,0 | | Magnesium Mg 24,3 | | Aluminium Al 27,1 | | Silicium Si 28,3 | | Phosphor P 31,0 | | Schwefel S 32,0 | | Chlor Cl 35,5 | | | |
| Argon A 39,9 | Kalium K 39,1 | | Calcium Ca 40,1 | | Scandium Sc 44,1 | | Titan Ti 48,1 | | Vanadin V 51,0 | | Chrom Cr 52,0 | | Mangan Mn 54,9 | | Eisen, Kobalt, Nickel Fe 55,8, Co 58,9, Ni 58,7 | |
| | Kupfer Cu 63,5 | | Zink Zn 65,4 | | Gadolinium Ga 69,9 | | Germanium Ge 72,5 | | Arsen As 74,9 | | Selen Se 79,2 | | Brom Br 79,9 | | | |
| Krypton Kr 82,9 | Rubidium Rb 85,4 | | Strontium Sr 87,6 | | Yttrium Y 88,7 | | Zirkon Zr 90,6 | | Niobium Nb 93,5 | | Molybdän Mo 96,0 | | | | Ruthenium, Rhodium, Ru 101,7, Rh 102,9, Palladium Pd 106,7 | |
| | Silber Ag 107,9 | | Cadmium Cd 112,4 | | Indium In 114,8 | | Zinn Sn 118,7 | | Antimon Sb 120,2 | | Tellur Te 127,5 | | Jod J 126,9 | | | |
| Xenon X 130,2 | Cäsium Cs 132,8 | | Barium Ba 137,3 | | Lanthan La 139,0 | | Cer Ce 140,3 | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | Tantal Ta 181,5 | | Wolfram Wo 184,0 | | | | | |
| | Gold Au 197,2 | | Quecksilber Hg 200,6 | | Thallium Tl 204,0 | | Blei Pb 207,2 | | Wismut Bi 208,0 | | | | | | | |
| | | | Radium Ra 226,0 | | | | Thorium Th 232,1 | | | | | | | | | |

Man muß deswegen in jeder Kolumne noch zwei Reihen als a und b unterscheiden. Infolgedessen ist es nicht ohne eine gewisse Willkür möglich, die Reihen für das periodische System aufzustellen, und in der That ist es namentlich bei den mittleren Elementen häufig fraglich, in welche Kolumnen sie eingeordnet werden sollen. Aber wir wissen heute genau, aus den später zu besprechenden Untersuchungen über die Röntgenspektren, erstens, welches die richtige Reihenfolge der Elemente ist — die nicht immer genau mit der Reihenfolge der Atomgewichte übereinstimmt — und zweitens, wo in dem System noch Lücken, noch unbekannt Elemente vorhanden sind. Man hat verschiedenfache Anordnungen für das System aufgestellt. Auf S. 5 ist eine solche gegeben, welche die neuen seltenen Erden noch nicht umfaßt und in welcher vor den schon von Mendelejeff und Lothar Meyer aufgestellten Kolumnen I bis VII noch eine Kolumne 0 eingerichtet ist, die die erst später entdeckten Edelgase enthält, und ferner eine Kolumne VIII, in welche die oben erwähnten, nicht in die Reihen passenden Elemente eingereiht sind. Diese Anordnung, welche bis vor wenigen Jahren ausreichend erschien, ist heute nicht mehr vollständig. Die Elemente der seltenen Erden fehlen in dieser Tabelle zum Teil. Sie gehören zwischen Cer und Tantal. Wasserstoff, der eine Stelle für sich einnimmt, ist nicht eingereiht. Im fünften Vortrag wird eine ausführlichere, vollständige Tabelle gegeben werden.

Daß man die einzelnen Kolumnen noch in zwei Abteilungen a und b teilen muß, um die Ähnlichkeit hervortreten zu lassen, wobei die in a oder in b enthaltenen Elemente sehr ähnlich, die Elemente beider Reihen aber weniger ähnlich sind, erkennt man aus der Betrachtung der untereinander stehenden Elemente. So sind in der Kolumne I Lithium, Natrium, Kalium, Rubidium zusammengehörige Stoffe, auch Kupfer, Silber, Gold gehören zusammen, aber die ersteren und die letzteren haben keine direkte chemische Gleichartigkeit. Und Entsprechendes findet in den anderen Kolumnen statt.

Man kann mit Bestimmtheit sagen, daß das periodische System wohl eine Andeutung, eine erste Annäherung an den wahren Zusammenhang der verschiedenen Atome gibt, daß aber eine ganze Reihe von Fragen hierbei noch im Dunkeln bleibt.

Für eine genauere Vorstellung über die Atome ist es nun vor allen Dingen wichtig, über ihre Größe und Masse, wenn möglich, bestimmte Zahlen zu erhalten. Die Atomgewichte geben ja nur die relativen Massen der einzelnen Atome, bezogen auf die des Wasserstoffs. Eine Frage von besonders hohem Interesse ist aber die, wie groß ist die wirkliche Masse eines Atoms in Grammen und, wenn wir uns die Atome kugelförmig vorstellen, wie groß ist der Radius eines Atoms? Eine direkte Messung ist natürlich unmöglich. Denn die Atome sind so klein, daß unsere leistungsfähigsten Mikroskope niemals etwas von ihnen zeigen können, und ihre Masse ist so gering, daß unsere Wagen, selbst wenn sie millionenfach empfindlicher gemacht werden könnten, als sie es sind, doch niemals diese feststellen lassen könnten.

Aber es gibt indirekte Methoden, durch welche wir genaueren Aufschluß über diese Größenverhältnisse gewinnen können. Zunächst zwar

geben uns diese Methoden nur Aufschluß über die Moleküle. Da wir ja aber wissen, daß die einzelnen Moleküle aus einer bekannten Zahl von Atomen zusammengesetzt sind, so erfahren wir daraus auch das Gewünschte über die Atome. Eine dieser indirekten Methoden beruht auf der kinetischen Theorie der Gase. Ein jeder Körper kann entweder in festem Zustand auftreten oder in flüssigem oder in gasförmigem. Man kann ohne weiteres sagen, daß die Moleküle der festen und flüssigen Körper viel dichter aneinander liegen müssen, daß sie den Raum viel enger erfüllen müssen als im gasförmigen Zustand. Denn die beobachtbare Dichtigkeit — das spezifische Gewicht — eines Körpers ist im festen und flüssigen Zustand viel größer als im gasförmigen. Da also die Moleküle im gasförmigen Zustand durchschnittlich verhältnismäßig große Abstände voneinander haben, so kann man weiter annehmen, und das tut die kinetische Gastheorie, daß die Kräfte, welche im allgemeinen zwischen den Molekülen vorhanden sind und die mit wachsender Entfernung der Moleküle an Größe abnehmen, daß diese Kräfte für die Substanzen im gasförmigen Zustand verschwindend klein sind.

Die Eigenschaften der Gase beruhen nun nach dieser Theorie darauf, daß die einzelnen Moleküle eines Gases nicht in Ruhe, sondern in lebhafter Bewegung sind. Da aber die Kräfte zwischen den Molekülen wegen des verhältnismäßig großen Abstandes verschwinden, also auf ein Molekül keine Kraft wirkt, so kann die Bewegung desselben nur eine geradlinige sein mit konstanter Geschwindigkeit. Jedes Molekül fliegt also in gerader Linie fort. Bei der großen Zahl der Moleküle, die in jedem noch so kleinen Raum vorhanden sind, muß dann das Molekül bald an ein anderes anstoßen. Bei dieser Annäherung an ein zweites Molekül werden die Molekularkräfte in Wirksamkeit treten. Ihr Einfluß kann aber so aufgefaßt werden, daß ein Molekül, wenn es ein zweites trifft, an dieses anstößt und von diesem ganz ebenso zurückgeworfen wird, wie ein Billardball, der an einen anderen anstößt. Ebenso, wenn es an die Wände des Gefäßes anstößt. So müssen wir uns also ein Gas vorstellen als bestehend aus einer ungeheuer großen Zahl von Molekülen, welche fortwährend durcheinander fliegen, dabei immer wieder an andere Moleküle anstoßen und infolgedessen die Richtung und die Größe ihrer Geschwindigkeit ändern, jedoch so, daß zwischen zwei Stößen sich jedes Molekül geradlinig mit bestimmter Geschwindigkeit bewegt. Jedes einzelne Molekül beschreibt dabei also eine Zickzackbahn, die aus lauter geraden Stücken von größerer oder geringerer Länge besteht.

Durch diese Annahme lassen sich alle Eigenschaften der Gase erklären. Zunächst entsteht der Druck, den die Gase auf die Wände des Gefäßes ausüben, durch die Stöße der Moleküle auf die Wand. Je mehr Moleküle in einem Raum sind, je größer also die Dichtigkeit des Gases ist, desto größer ist auch der Druck. Da die Dichtigkeit einer bestimmten Masse eines Gases in einem Raume dem Volumen desselben umgekehrt proportional ist, so ist dies auch mit dem Druck der Fall. Die Geschwindigkeit jedes einzelnen Moleküls wechselt fortwährend und ebenso haben alle Moleküle, die in dem gleichen Moment in einem Raume, z. B. in 1 cem enthalten sind, sehr verschiedene Geschwindigkeit. Der Mittelwert aus allen diesen gleichzeitigen Geschwindigkeiten aller Moleküle charakterisiert

nun das Verhalten des Gases, und da die Stoßkräfte, also auch der Druck des Gases, außer von der Masse der Moleküle von dieser mittleren Geschwindigkeit abhängen, so kann man aus dem beobachteten Druck diese mittlere Geschwindigkeit berechnen. Diese ergab sich für die verschiedenen Gase natürlich verschieden, die leichteren Gase haben die größere, die schwereren kleinere Geschwindigkeit. Die mittlere Geschwindigkeit ist aber unabhängig von dem Druck des Gases, dagegen wächst sie mit wachsender Temperatur, und zwar wie die Quadratwurzel aus der absoluten Temperatur. (Die absolute Temperatur ist $= 273^{\circ} +$ der gewöhnlichen Celsius-Temperatur. Ein Gas von 17°C hat die absolute Temperatur 290° .) Die mittlere Geschwindigkeit der Moleküle ist eine sehr große, sie beträgt mehrere hundert Meter pro Sekunde. Sie ist z. B. bei 0°C für Luft 447 m/sec. , für Wasserstoff 1692 m/sec. , für Kohlensäure 362 m/sec.

Trotz dieser großen Geschwindigkeit bleiben aber die Moleküle immer doch nahezu an derselben Stelle, weil sie eben sehr häufig an andere Moleküle anstoßen, zurückgeworfen werden, wieder anstoßen usw. Der Weg eines Moleküls zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stößen ist bald größer, bald kleiner, ebenso ist er für alle Moleküle gleichzeitig ein sehr verschiedener. Aber auch hierbei kann man den Mittelwert aller dieser Wege bilden, man nennt ihn die mittlere Weglänge, und diese Größe ist maßgebend für eine Reihe weiterer Erscheinungen, die die Gase der Beobachtung bieten, nämlich für die Reibung der Gase und für die Wärmeleitung derselben. Daraus folgt umgekehrt, daß man aus der Beobachtung der Reibung oder der Wärmeleitung die mittlere Weglänge berechnen kann. Es ergeben sich, wie zu erwarten war, sehr kleine Werte für dieselbe. Sie hängen von der Dichtigkeit, also vom Druck des Gases ab; je verdünnter das Gas ist, um so größer ist natürlich die mittlere Weglänge, weil eben im Durchschnitt die Moleküle da weiter auseinanderstehen. So ergab sich z. B. bei Atmosphärendruck die mittlere Weglänge für Luft $= 0,96 \cdot 10^{-5} \text{ cm.}$, für Wasserstoff $= 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ cm.}$, für Sauerstoff $1,03 \cdot 10^{-5} \text{ cm.}$, für Kohlensäure $0,63 \cdot 10^{-5} \text{ cm.}$

Diese beiden Größen, die mittlere Geschwindigkeit und die mittlere Weglänge, anzuführen war notwendig, um die Frage zu beantworten, welche zunächst das größte Interesse besitzt, nämlich die Frage, wie groß ist denn eigentlich die Zahl der Moleküle in einem Kubikzentimeter eines Gases bei Atmosphärendruck? Man nennt diese gesuchte Zahl die Loschmidtsche Zahl, weil Loschmidt zuerst einen Weg zu ihrer Bestimmung angegeben hat. Mit dieser Frage steht in engstem Zusammenhang die andere, uns besonders interessierende, wie groß ist der Radius eines Moleküls, wenn wir uns dasselbe als kugelförmig vorstellen? Kennt man nämlich diesen Radius, so kennt man auch das Volumen je eines Moleküls, und wenn man noch die Loschmidtsche Zahl kennt, so kennt man das gesamte Volumen, welches die in 1 cm^3 enthaltenen Moleküle wirklich einnehmen. Dieses Volumen aber wird angenähert dasjenige sein, welches diese Moleküle einnehmen, wenn das Gas durch Druck oder Abkühlung zu einer Flüssigkeit oder gar zu einem festen Körper geworden ist. Denn dabei kann man annehmen, daß

die Moleküle möglichst eng gepackt aneinander liegen werden. In Wirklichkeit wird die Flüssigkeit noch ein größeres Volumen haben, als dem Volumen der Summe der Moleküle entspricht. Die Dichtigkeit einer Substanz im flüssigen oder festen Zustand ist aus diesem Grunde eine außerordentlich viel größere als im gasförmigen Zustand. Z. B. hat gasförmiger Sauerstoff bei Atmosphärendruck die Dichtigkeit 0,00143, während als die größte Dichtigkeit des flüssigen Sauerstoffs = 1,249 beobachtet wurde, also ist das Verhältnis des Volumens der dicht aneinander liegenden Moleküle zu dem Volumen derselben Moleküle im Gaszustand bei Atmosphärendruck $\frac{0,00143}{1,249} = 0,0011$. Diese Zahl nennt

man den **Kondensationskoeffizienten**. Bedenkt man nun, daß im eng zusammengepackten Zustand der Mittelpunkt eines Moleküls um den Radius verschoben werden müßte, bis er ein zweites Molekül trifft, während im Gaszustand ein Molekül um die mittlere Weglänge verschoben werden muß, bis es ein anderes Molekül trifft, so erkennt man auch ohne genaue Rechnung, daß der Kondensationskoeffizient angenähert gleich dem Verhältnis des Radius eines Moleküls zu der mittleren Weglänge sein wird. Folglich kann man den Radius eines Moleküls aus der mittleren Weglänge und dem Kondensationskoeffizienten berechnen. So ergibt sich z. B. für Sauerstoff, für welchen der Kondensationskoeffizient = 0,0011 und die mittlere Weglänge = $1,03 \cdot 10^{-5}$ ist, der Radius des Moleküls nach dieser Betrachtungsweise angenähert = $0,0011 \cdot 1,03 \cdot 10^{-5} = 1,13 \cdot 10^{-8}$ cm.

Auf diese und ähnliche Weise hat man durch genauere Rechnung für die Radien der Moleküle einzelner Stoffe folgende Werte gefunden:

| | Radius eines Moleküls |
|-----------------------|-------------------------|
| Wasserstoff | $1,00 \cdot 10^{-8}$ cm |
| Helium | $0,85 \cdot 10^{-8}$ „ |
| Stickstoff | $1,35 \cdot 10^{-8}$ „ |
| Sauerstoff | $1,30 \cdot 10^{-8}$ „ |
| Argon | $1,35 \cdot 10^{-8}$ „ |
| Chlor | $2,00 \cdot 10^{-8}$ „ |
| Quecksilber | $1,40 \cdot 10^{-8}$ „ |
| Äther | $3,00 \cdot 10^{-8}$ „ |

Natürlich geben diese Zahlen nur angenäherte Werte; denn es ist z. B. nicht anzunehmen, daß ein so kompliziertes Molekül, wie das des Äthers, $C_4H_{10}O$, überhaupt kugelförmig sei. Nur für die einatomigen Moleküle (Helium, Argon, Quecksilber in unserer Tabelle) läßt sich vielleicht die Kugelform annehmen und für diese geben dann die erhaltenen Zahlen zugleich die Radien der Atome. Bei den zweiatomigen Molekülen, wie denen des Wasserstoffs, Sauerstoffs, Stickstoffs, Chlors, kann man nur sagen, daß deren Atome, wenn sie kugelförmig sind, kleinere Radien haben müssen als 1,0, 1,3, 1,35, $2,0 \cdot 10^{-8}$ cm.

Das Resultat dieser Betrachtungen der kinetischen Gastheorie gibt uns also einen Anhaltspunkt für die wirkliche Größe der Atome oder, genauer gesagt, für deren Größenordnung. Man kann annehmen, daß der Radius eines (kugelförmig gedachten) Atoms von der Größenordnung 10^{-8} cm ist. Die verschiedenen Atome

haben Radien, deren Größe einige Male größer oder kleiner ist als 10^{-8} cm. Die Größe 10^{-8} cm ist der zehnmillionste Teil eines Millimeters.

Durch die Ermittlung der Größe der Moleküle ist es nun leicht, auch einen bestimmten Wert zu erhalten für die Zahl der Moleküle in einem Kubikzentimeter, also für die Loschmidtsche Zahl. Denn wenn man bedenkt, daß im Durchschnitt jedes Molekül um die mittlere Weglänge fortfliegt, bis es wieder ein Molekül trifft, so erkennt man, daß der zylindrische Raum, den ein Molekül bei diesem Flug durchstreicht, von der Größe ist, daß in ihm im Mittel nur 1 Molekül vorhanden ist. So groß also das Verhältnis von 1 cm zu diesem Raum ist, so groß ist auch die Zahl der Moleküle in 1 cm, so groß ist also die Loschmidtsche Zahl.

Die Rechnung ergibt, daß in einem Kubikzentimeter Gas bei Atmosphärendruck und 0° C

27,6 Trillionen

Moleküle enthalten sind. Eine Trillion ist 10^{12} . Diese Loschmidtsche Zahl hat denselben Wert für alle Gase, da ja nach dem Avogadro'schen Prinzip alle Gase im Kubikzentimeter bei gleichem Druck und gleicher Temperatur dieselbe Zahl von Molekülen enthalten.

Denkt man sich diese Moleküle in dem Kubikzentimeter gleichmäßig verteilt, so kommt auf jedes Molekül ein kleiner Würfel von dem Inhalt $\frac{1}{27,6 \cdot 10^{18}}$ cm. Die Seitenlänge dieses Würfels ist daher rund $= \frac{1}{3 \cdot 10^6}$ cm

$= 3,3 \cdot 10^{-7}$ cm = 3—4 Milliontel Millimeter. Dies ist also die Größe des mittleren Abstandes je zweier Moleküle. Der Abstand zweier Moleküle ist also im Mittel etwa 30—40mal so groß wie der Radius eines Moleküls.

Aus der Loschmidtschen Zahl kann man noch eine weitere, wichtige Zahl berechnen, die man die Avogadro'sche Zahl nennt. Nehmen wir nämlich je 1 cm von verschiedenen Gasen, etwa Wasserstoff, Sauerstoff und Chlor, so sind die Massen dieser gleichen Volumina nicht gleich, sondern sie verhalten sich wie die Molekulargewichte, nämlich hier wie 2 : 32 : 71. Allgemein: die Volumina verschiedener Gase, deren Massen sich wie die Molekulargewichte verhalten, sind gleich. Daraus folgt, daß auch die Volumina, die ein Grammolekül eines jeden Gases (bei gleichem Druck und gleicher Temperatur) einnimmt, einander gleich sind und daher nach Avogadro auch die gleiche Anzahl von Molekülen enthalten. Diese Zahl, die Anzahl der Moleküle, welche in einem Grammolekül eines jeden Gases (beim Druck von 1 Atmosphäre und bei 0° C) enthalten ist, nennt man die Avogadro'sche Zahl. Man kann sie leicht finden, wenn man berechnet, wieviel Kubikzentimeter ein Grammolekül Wasserstoff (2 g Wasserstoff) einnimmt. Ein Gramm Luft nimmt im Normalzustand den Raum 773 cm ein. Wasserstoff ist 14,4mal leichter als Luft, also nehmen 2 Gramm Wasserstoff den Raum $2 \times 14,4 \times 773 = 22\,260$ cm ein. Mithin enthält 1 Grammolekül Wasserstoff und ebenso ein Grammolekül jeder anderen Substanz im gasförmigen Normalzustand

$$27,6 \cdot 10^{18} \times 22\,250 = 61,4 \cdot 10^{22} \text{ Moleküle.}$$

Dies ist also die Avogadro'sche Zahl.

Aus dieser kann man nun leicht die wirkliche Masse eines Wasserstoffmoleküls und ebenso die eines jeden anderen Moleküls berechnen. Denn da $61,4 \cdot 10^{22}$ Moleküle Wasserstoff zusammen die Masse 2 Gramm besitzen, so hat jedes Wasserstoffmolekül die Masse

$$\frac{2}{61,4 \cdot 10^{22}} = 3,25 \cdot 10^{-24} \text{ Gramm.}$$

10^{-24} ist 1 dividiert durch eine Quadrillion. Ein Molekül Sauerstoff hat natürlich eine 16mal, ein Molekül Chlor eine 35,5mal so große Masse. Ein Atom Wasserstoff hat danach die Hälfte der obigen Masse, also $1,62 \cdot 10^{-24}$ Gramm. Diese Zahl wird uns später zu einer weiteren Berechnung dienen.

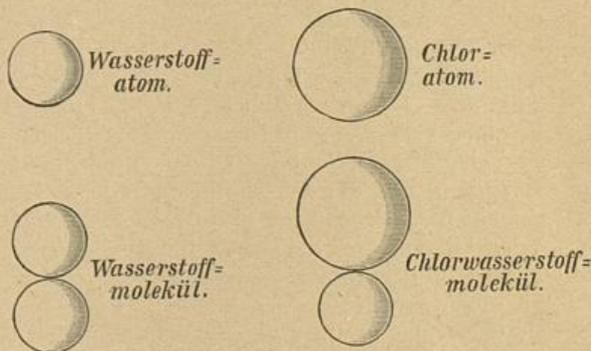
Alle diese Zahlen für die Größe und Masse der Moleküle und Atome sagen uns direkt nichts, was wir irgendwie uns vorstellen könnten. Das Verhältnis des Maßstabs, mit dem wir zu rechnen gewohnt sind, zu diesen so kleinen oder so großen Werten, ist ein zu verschiedenes. Bei Längen haben wir als Maßstab in unserer Gewohnheit 1 mm und wir können uns den zehnmillionsten Teil, den Radius eines Atoms, davon absolut nicht vorstellen. Wir können uns einen ungefähren Begriff davon machen, wenn wir unseren Maßstab (1 mm) 10millionenfach vergrößern, also auf 10 Kilometer bringen. Dann entspricht der Radius eines Atoms der Größe von 1 mm.

Noch schwieriger ist die Masse eines Atoms mit den uns gewohnten Massen zu vergleichen. Hier muß man schon die ganze Erde zu Hilfe nehmen. Die ganze Erdkugel hat eine Masse von etwa $2 \cdot 10^{24}$ Kilogramm. Die Masse eines Wasserstoffatoms verhält sich also zu der Masse eines Gramms rund wie die Masse eines Kilogramms zu der Masse der ganzen Erdkugel.

Und von diesen Atomen, diesen winzigsten Stäubchen der Materie, zeigen die neuesten Forschungen, von denen wir in diesen Vorlesungen sprechen werden, daß sie selbst wieder ganze Welten sind, daß jedes von ihnen ein ganzes Sonnensystem darstellt.

Die einfachste Vorstellung, die man sich nach den bisher besprochenen Tatsachen von den Atomen machen kann, ist die einer sehr kleinen kugelförmigen oder anders gestalteten Masse aus dem betreffenden chemischen Stoffe. Ein Molekül würde einer Aneinanderlagerung zweier oder mehrerer Atome gleichen Stoffes oder verschiedener Stoffe entsprechen. In Fig. 1 ist nach dieser primitivsten Vorstellung in der oberen Reihe ein Wasserstoffatom und ein Chloratom dargestellt, während die untere Reihe die Darstellung eines Wasserstoffmoleküls und eines Chlorwasserstoffmoleküls

Fig. 1.



gibt. Warum hierbei zwei Wasserstoffatome immer in eine engere Verbindung zu einem Wasserstoffmolekül zusammentreten, bleibt nach dieser Vorstellung durchaus unverständlich.

Die Atome der einzelnen Stoffe werden, wie schon ihr Name sagt (a-tomos, unteilbar), als absolut unveränderliche, unteilbare Körperchen angesehen. Dabei aber kann man noch zwei verschiedene Möglichkeiten zulassen. Die eine würde sagen, daß die Atome uns zwar als unteilbare Körper erscheinen, aber nur deswegen, weil wir noch nicht imstande sind, weil wir nicht oder noch nicht die Kraft besitzen, sie zu zerteilen. Ein Goldatom als solches wäre unteilbar. Da es aber einen Raum einnimmt, können wir es uns aus noch kleineren Teilen zusammengesetzt denken, nur wären diese Teile nicht mehr Gold, sondern etwas anderes, aus dem sich eben das Gold zusammensetzt. Diese Annahme würde also die Unteilbarkeit der Atome nur als etwas Vorläufiges, Relatives ansehen, und sie berührt sich offenbar mit der oben erwähnten Prout'schen Hypothese, daß die Atome selbst aus anderen Bestandteilen zusammengesetzt sind, nur brauchen diese Bestandteile nicht gerade das Wasserstoffatom zu sein. Diese Ansicht hat sich durch die Forschungen der letzten Jahrzehnte als berechtigt erwiesen.

Es sei aber trotzdem noch die andere Annahme erwähnt, welche aussagt, daß aus irgend einem Grunde die Atome absolut unteilbare Größen sind. Dann müßte also die Unteilbarkeit in ihrer Natur begründet sein, nicht bloß in der Mangelhaftigkeit unserer Hilfsmittel. Und offenbar ist die Frage, wie das möglich ist, auch dann berechtigt und von Interesse, wenn wir selbst die Atome in kleinere Körperchen, in *Urato*me, zerlegen könnten. Denn dann würde immer noch die Frage bestehen bleiben, warum sind diese *Urato*me wirklich unteilbar? Es handelt sich also um die Frage, wie könnte die Unteilbarkeit einer gewissen Menge Materie erklärt werden? Darauf gibt eine sehr geistreiche Theorie, die von dem englischen großen Physiker Lord Kelvin schon vor 50 Jahren aufgestellt wurde, die Theorie der *Wirbelatome*, eine befriedigende Antwort. Es war nämlich von Helmholtz bewiesen worden, daß in einer reibungslosen Flüssigkeit Wirbelringe existieren können. Das sind ringförmige Gebilde, bei denen die Flüssigkeitsteilchen in rotierender Bewegung um die Mittellinie des Ringes begriffen sind. Aus den allgemeinen Eigenschaften einer solchen Flüssigkeit folgt aber, daß solche Wirbel nicht durch die gewöhnlichen einfachen, sogenannten konservativen Kräfte in der Natur hervorgebracht werden können, noch auch durch dieselben zerstört werden können. Vielmehr müssen solche Wirbel, wenn sie überhaupt in einer Flüssigkeit vorhanden sind, in dieser von Uranfang an existiert haben, und sie können durch konservative Kräfte nicht auseinandergerissen und zerstört werden. Wenn man mit einem noch so scharfen Messer gegen einen solchen Wirbelring stößt und ihn zu zerschneiden sucht, so gelingt das nicht. Der Wirbelring ändert seine Form, er biegt sich um das schneidende Messer herum, aber die wirbelnden Teile lassen sich nicht trennen, die wirbelnde Menge Flüssigkeit bleibt immer in ungestörtem Zusammenhang. Angenähert lassen sich die Wirbelringe und ihre Eigenschaften erkennen an den Rauchringen, welche geschickte Raucher in die Luft blasen. Angenähert nur; denn die Luft ist keine

reibunglose Flüssigkeit, wie sie bei den Helmholtz'schen Aussagen vorausgesetzt wird. In der Tat sieht man diese Rauchringe auch, nachdem sie eine Zeit bestanden haben, sich auflösen. Das kommt aber nur daher, daß eben hier Reibungskräfte, nicht konservative Kräfte in der Flüssigkeit vorhanden sind. In einer reibungslosen Flüssigkeit dagegen bleiben die wirbelnden Teile dauernd zusammen, sie bilden immer einen geschlossenen Ring, wenn auch dessen Form sich ändert. Ein solcher Wirbelring ist also in Wirklichkeit etwas Unteilbares, ein *a-tomos*. Kelvin nimmt nun an, daß der Äther, den wir uns als überall vorhanden, alle Körper durchdringend, vorstellen müssen — da er der Träger der Lichtbewegung ist und das Licht in alle Körper dringt —, daß der Äther die Eigenschaften einer reibungslosen Flüssigkeit besitzt. In ihm seien nun viele solche Wirbel von Anfang an enthalten. Diese Wirbel, die unzerstörbar sind, bilden die Atome der Körper, die Atome sind *Wirbelatome*. Da wir sie mit unseren Kräften nicht bilden können, so kann die Anzahl der in der Welt vorhandenen Atome nicht vergrößert werden. Sie kann aber auch nicht verkleinert werden, da wir solche Wirbel nicht zerstören können. Kurz, diese Wirbel haben die wesentliche Eigenschaft der Atome, die Unzerstörbarkeit und Unteilbarkeit. Wenn nun auch, wie gesagt, die Unteilbarkeit der Atome heute nicht mehr als tatsächlich angenommen werden kann, so bleibt die Kelvin'sche Theorie doch von großem philosophischem Wert, da ja dieselbe Frage über die Möglichkeit der Unteilbarkeit nur von den Atomen auf die Uratome zurückgeschoben wird. Man könnte diese Theorie heute, da wir als die Bestandteile der Atome die positiven und negativen Elektronen erkennen werden, passend als die Wirbeltheorie der Elektronen bezeichnen.

Der Annahme nämlich, daß die Atome einfache unteilbare Körperchen seien, haben sich schon lange eine Reihe von Schwierigkeiten entgegen gestellt, welche ihrer wirklichen Einfachheit und Unteilbarkeit widersprechen. In erster Linie kommen da optische Erscheinungen in Betracht. Bekanntlich zeigen alle leuchtenden Gase und Dämpfe, wenn man ihr Licht durch einen Spalt und ein Prisma oder ein Beugungsgitter gehen läßt, sehr charakteristische Erscheinungen. Während das Sonnenlicht oder das Licht einer weißglühenden Bogenlampe, in dieser Weise untersucht, ein vollständiges Spektrum gibt, ein Farbenband, das sich von Rot bis zu Violett hinzieht und in sich alle Übergänge von Rot durch Orange, Gelb, Grün, Hellblau, Dunkelblau bis Violett zeigt, ist das bei den farbigen Gasen und Flammen anders. Bringt man ein Natriumsalz, etwa Kochsalz oder Glaubersalz, in die Flamme eines Bunsenbrenners, so wird diese Flamme schön gelb gefärbt, und wenn man dieses Licht durch einen Spalt und ein Prisma gehen läßt, so erhält man statt eines Spektrums nur eine scharfe gelbe Linie, die man bekanntlich als D-Linie bezeichnet, und die bei genügender Dispersion durch das Prisma sich als eine Doppelinie D_1 und D_2 zu erkennen gibt.

Da alle Natriumsalze dieselbe Linie zeigen, Chlornatrium, Natriumsulfat, Natriumnitrat usw., so rührt diese Linie nur von dem Atom des Natriums her. Ebenso zeigt eine durch Lithium rot gefärbte Flamme zwei Linien im Spektrum, eine rote und eine orangefarbene. Eine Kaliumflamme zeigt eine rote und eine violette, eine Cäsiumflamme eine Linie

in Rot, eine in Orange, eine grüne und zwei blaue Linien. Da das Licht aus Schwingungen besteht und einer jeden Farbe eine bestimmte Schwingungszahl entspricht, so folgt daraus, daß ein Atom eines Körpers unter Umständen Schwingungen von verschiedener Schwingungszahl ausführen kann. Auch die einfachen Gase kann man, wenn sie in verdünntem Zustande sind, durch Hindurchsenden eines elektrischen Stromes zum Leuchten bringen, wie das in den Geißlerschen Spektralröhren geschieht. Da zeigen sich z. B. beim Wasserstoff zunächst 5 Linien, eine rote, eine grüne, eine blaue und zwei violette. Beim Helium sind sogar 7 Linien zu sehen und das Argon, Krypton, Xenon geben sehr linienreiche Spektren. In dem Spektrum des Eisendampfs hat man über 2000 Linien gefunden. Diese optischen Schwingungen, soweit sie bisher überhaupt unter Regeln gebracht werden konnten, befolgen ganz andersartige Gesetzmäßigkeiten als die Schwingungen ausgedehnter Körper. Daraus folgt aber, daß innerhalb der Atome Schwingungen, periodische Bewegungen, sehr verschiedener Art vor sich gehen müssen, welche eben die Ursache dieser Lichtaussendung sind. Und daher ist schon aus dem Linienreichtum der Spektren der Elemente der Schluß zu ziehen, daß die Atome nicht einfache Körper sein können, sondern irgendwelche Teile enthalten müssen, daß sie also nicht wirkliche „Atome“ sein können. Schon aus diesen altbekannten Erfahrungen erkennt man also, daß in den Atomen, bei denen die Physik und Chemie sich lange als den letzten Bausteinen der Materie beruhigt hatte, noch große Probleme liegen, daß es sich eben gerade darum handelt, die Konstitution dieser scheinbar einheitlichen Körper aufzuklären.