

Zeitschrift: Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali

Herausgeber: Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

Band: 107 (1926)

Artikel: Molekulare Kräfte und ihre Deutung

Autor: Debye, P.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-90354>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Molekulare Kräfte und ihre Deutung

von

P. DEBYE (Zürich)

I.

Die Zeiten, in denen es gestattet war, in den Theorien mit Molekülen wie mit harten Billardkugeln zu spielen, sind vorbei. Selbst die Verfeinerung dieser Vorstellung durch Einführung von Kraftgesetzen, die nach Analogie der NEWTONschen Gravitation etwa durch eine Potenz der Entfernung ausdrückbar sind, ist überlebt. Wir glauben heute zu viel über den Aufbau der Atome zu wissen, um befriedigt sein zu können, ohne dass wir den Versuch unternommen hätten, jene Kenntnisse in organischen Zusammenhang zu bringen mit unseren Erfahrungen über die Molekularkräfte.

Das erste, was wir über die Atome wissen, ist, dass sie elektrische Systeme sind, aufgebaut aus Ladungen, die nicht beliebig teilbar, sondern ganzzahlige Vielfache einer Elementarladung, derjenigen des Elektrons sind. Für die Kraft zwischen zwei makroskopischen elektrischen Ladungen hat COULOMB vor einem Jahrhundert experimentell das Gesetz gefunden, wonach sie sich gegenseitig anziehen oder abstossen, umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung und proportional dem Produkte ihrer Ladungsmengen. Auf diesem Gesetze ist das übliche elektrostatische Maßsystem aufgebaut; es hat sich anderseits bis jetzt bewährt bis auf Abstände, welche etwa 10,000 mal kleiner sind als der Durchmesser eines Atoms.

Bedeutend weniger gut sind wir unterrichtet über die Bewegungsgesetze der Ladungen und über die Verknüpfung jener Bewegungen mit den elektromagnetischen Feldern, die wir als Strahlung empfinden. Zwar legen die grossartigen Erfolge, z. B. in der Deutung der Spektren Zeugnis davon ab, dass die Einführung des Wirkungsquantums durch PLANCK und seine Verknüpfung mit dem RUTHERFORDSchen Atombilde durch BOHR notwendige Schritte sind, die

uns zu einer neuen Mechanik führen werden. Aber die wirklichen Gesetze dieser Atommechanik haben wir noch nicht vollkommen erfasst.

So mag es trotz allem verfrüht erscheinen, Betrachtungen über Molekularkräfte anzustellen, die nichts anderes sein können als Betrachtungen über die Felder, die von einem Molekül ausstrahlend ein zweites erreichen. Aber wenn auch bei solchen Überlegungen nicht die letzte Wahrheit erreicht wird, etwa dadurch, dass mit der klassischen Mechanik operiert wird, wo wir doch wissen, dass wir eine neue Atommechanik verwenden sollten, so sind doch die Resultate deshalb nicht bedeutungslos. Genau so wie wir wissen, dass die klassischen mechanischen Gesetze verbesserungsbedürftig sind, ebenso gut wissen wir, dass sie nicht ganz falsch sind. Sie stellen vielmehr einen Grenzfall der richtigen Gesetze dar und von dem was wir mit ihrer Hilfe erschliessen, werden wir erwarten dürfen, dass es eine gewisse Ähnlichkeit behalten haben wird mit den Naturgesetzen, oder anders ausgedrückt, dass eine Korrespondenz zwischen den errechneten und den wirklichen Gesetzen vorhanden sein wird. Überlegungen dieser Art wurden von BOHR zum „Korrespondenzprinzip“ erhoben und mit Erfolg verwendet. Deshalb scheint es durchaus berechtigt, zunächst mit Hilfe der klassischen Gesetze vorzugehen. Manches, was auf diesem Wege eingeführt werden muss, wird auch später seine Berechtigung behalten. Anderes wird durch Neues zu ersetzen sein. Aber gerade dort, wo sich die deutlichsten Widersprüche mit dem wirklichen Naturverhalten zeigen, wird der Punkt sein, wo man mit der besten Hoffnung an die Vervollständigung der Gesetze der Atommechanik herantreten darf.

II.

Man wird von vornherein erwarten, dass man die elektrische Natur der Molekularkräfte in jenen Fällen am leichtesten erkennen wird, wo die Atome in Form von Ionen existieren und deshalb ihr Feld, entsprechend dem COULOMBSchen Gesetze, mit wachsender Entfernung nur wenig geschwächt, ausbreiten können. Die kleinste Ladung, die vorkommen kann, die eines einwertigen Ions oder des Elektrons, ist nach Millikan im elektrostatischen Masssystem $4,77 \cdot 10^{-10}$ elektrostatische Einheiten. Es ist von Bedeutung, sich klar zu machen, dass diese Ladung ausserordentlich

gross ist. Nimmt man z. B. 1 Mol., d. h. 58 Gramm Steinsalz (NaCl), so ist darin jedes Na-Teilchen als einwertiges, positives Ion und jedes Cl-Teilchen als einwertiges negatives Ion vorhanden. Man denke sich nun die Na-Ionen, im ganzen 23 Gramm, an den Nordpol der Erde, und die Cl-Ionen, im ganzen 35 Gramm, an den Südpol befördert. Es werden sich dann die beiden Teile gemäss dem COULOMBSchen Gesetze anziehen, und trotz ihrer grossen Entfernung berechnet sich für die gegenseitige Anziehungskraft der Betrag von 52,000 Kilogramm.

Man hat früher gelegentlich für die Erklärung der Molekularkräfte die allgemeine Gravitation heranziehen wollen. Indessen sieht man sofort, dass diese ungeheuer klein ist, verglichen mit den elektrischen Kräften. Beide Kräfte nehmen im einfachsten Falle umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung ab, in jeder Entfernung stehen sie also im selben Verhältnis. Für die Wirkungen zwischen einem Na- und einem Cl-Ion findet man zahlenmässig, dass die elektrische Kraft 10^{33} mal so gross ist als die Gravitationskraft. Um die Bedeutung dieser Zehnerpotenz besser zu erfassen, nehme man eine Länge von der Grössenordnung eines Atomdurchmessers (10^{-8} cm), die also etwa 5000 mal kleiner ist, als die mittlere Wellenlänge des sichtbaren Lichtes und reihe nun 10^{33} solche Atomdurchmesser aneinander. Man bekommt dann eine Strecke, zu deren Durchlaufung das Licht 10 Millionen Jahre brauchen würde, obwohl es in der Sekunde 300,000 Kilometer zurücklegt.

Wir können uns nun fragen, ob die soeben berechneten elektrischen Kräfte von der richtigen Grössenordnung sind, um die tatsächliche Stärke des molekularen Zusammenhalts etwa eines Steinsalzkristalles zu erklären. Ehe man aber diese Berechnung macht, muss man sicher sein, dass wirklich auch im festen Steinsalz die Bausteine von den Ionen Na und Cl gebildet werden. Diese Sicherheit hat man nun heute in der Tat. Über die Anordnung der Einzelteilchen (jedes Na-Ion umgeben von 6 Cl-Ionen und jedes Cl-Ion umgeben von 6 Na-Ionen) haben uns die Beobachtungen von BRAGG über die Reflexion von Röntgenstrahlen im Sinne der LAUESchen Interferenzidee unterrichtet. Nicht ein hypothetisches Molekul NaCl, sondern die einzelnen Atome sind demnach die Bausteine. Dass ferner die Atome als Ionen vorkommen, erhellt am einfachsten aus der Tatsache, dass Steinsalz imstande ist, die

RUBENSSchen Reststrahlen zu erzeugen, d. h. dass dieses Salz im Ultraroten ein Gebiet sehr starker selektiver Reflexion aufweist. In der Tat versteht man, dass das elektromagnetische Feld der Strahlung an dem Kristall angreifen kann, wenn die Einzelteilchen geladen sind, und begreift die Existenz einer ausgezeichneten Frequenz als die Eigenfrequenz des positiven Na-Gitters gegen das eingeschobene negative Cl-Gitter, ganz so, wie das MADELUNG noch zeitlich vor den BRAGGSchen Beobachtungen geschildert hat.

Aus den Röntgenstrahlenbeobachtungen kennt man den Abstand von Na zu Cl im Kristall, die Ladung jedes dieser Ionen ist die eines Elektrons, man kann also die potentielle elektrische Energie etwa eines Mols (58 Gramm) Steinsalz berechnen. Damit ist allerdings noch nicht alles getan, denn wäre nur diese Energie vorhanden, dann würde kein Gleichgewicht in einem definierten endlichen Abstände möglich sein. BORN, der diese Rechnung zuerst ausführte, sieht sich deshalb gezwungen, noch abstossende Zusatzkräfte zwischen den Ionen einzuführen, deren Ursprung dunkel bleibt, deren Existenz indessen nicht zu bezweifeln ist. Er setzt sie proportional einer Potenz der Entfernung und bemisst ihre Stärke, so dass der tatsächlich beobachtete Abstand resultiert, während der Exponent der Potenz durch die Forderung festgelegt ist, dass das Modell ausserdem den Betrag der wirklichen Kompressibilität wiedergeben kann. Zum Glück erweist sich dieser Exponent relativ gross, entsprechend einem sehr steilen, an die „harten Kugeln“ erinnernden Anstieg der Abstossungskräfte bei der gegenseitigen Annäherung. Infolgedessen spielt die zu diesen Kräften gehörige Energie nur eine untergeordnete Rolle und ihre Fehler können das Hauptresultat nur wenig beeinflussen.

Die Energie eines Mols NaCl in Kristallform lässt sich durch Kombination von Beobachtungen über Bildungs- und Sublimationswärmen, sowie der Ionisationsenergie experimentell bestimmen. Sie ergibt sich zu 180 kg Cal. Demnach müsste man ein Stück Steinsalz ungefähr aus einer Höhe von 2000 km (den zwanzigsten Teil des Erdumfanges) auf die Erde fallen lassen, um ihm an der Erdoberfläche, wo es mit einer Geschwindigkeit von 5 km per Sekunde ankommt, eine Energie zu erteilen, gross genug, um das Kristallstück in seine einzelnen Ionen aufzulösen. BORN zeigt, dass diese Energie übereinstimmt mit der errechneten.

Der experimentelle Wert für die Energie eines solchen Kri-

stallgebildes ist immerhin nur auf Umwegen, durch Kombination mehrerer Beobachtungen zu erzielen. Es scheint viel näher zu liegen, wenn man fragt, ob es denn nicht möglich sein sollte, ein Mass für die Kristallkräfte zu bekommen durch Ausführung eines einfachen ZerreiBversuches. Man kann in der Tat, wie es ZWICKY gemacht hat, berechnen, wie sich die Ionenebenen unter seitlicher Kontraktion von einander entfernen, wenn man Zugkräfte in Richtung eines kristallographischen Ase an ein Steinsalzstück angreifen lässt. Man findet dann eine Kraft, welche mit zunehmender Dehnung immer langsamer anwächst, um bei einem bestimmten Werte der Verlängerung ein Maximum zu erreichen. Man wird offenbar diesen Maximalwert mit der ZerreiBfestigkeit identifizieren wollen. Tut man das, so ergibt sich theoretisch, dass man an einem Stäbchen vom Querschnitt 1 mm^2 mit einer Kraft von 300 kg ziehen müsste, um es zu zerreiBen. Das Experiment ist weit entfernt davon, diese Zahl zu bestätigen, das Stäbchen reisst schon, wenigstens bei der üblichen Anordnung, wenn man 0,5 kg anhängt. Soll man diesen Widerspruch als ein Beweis gegen die Richtigkeit der Grundvorstellungen ansehen? Vieles weist darauf hin, dass man besser daran tut, die Erklärung darin zu suchen, dass ein grösseres Kristallstück in den allermeisten Fällen wesentlich abweicht von dem Bilde des über seine ganze Erstreckung mathematisch regelmässigen Gitters und vielmehr einen Bau aufweist, den DARWIN mit dem sofort einleuchtenden Namen „Mosaikstruktur“ benannt hat. Ist dem so, so ist keine Gewähr mehr vorhanden, dass das Resultat der Rechnung mit der Wirklichkeit übereinstimmen wird. Das besonders technisch interessante Problem der Materialfestigkeit ist damit theoretisch als eine sehr schwierige Frage gekennzeichnet. Und obwohl ein endgültiges Urteil heute noch nicht erreicht ist, darf doch darauf hingewiesen werden, dass JOFFE unter besondern Umständen 80 % der theoretischen ZerreiBfestigkeit praktisch erhalten hat bei Steinsalz, so dass ein triftiger Grund zur Beunruhigung nicht vorliegen dürfte.

III.

Ein grosses Gebiet, auf dem die Auffassung der Molekularkräfte als elektrische zu einem tieferen Verständnis zu führen scheint, ist das der Elektrolytlösungen. Das klassische Gebäude der Lösungstheorie wurde aufgebaut auf zwei Grundgesetzen. Die

richtige Interpretation des VAN'T HOFFSchen Gesetzes des osmotischen Druckes, wonach dieser und zugleich die verwandten Erscheinungen der Gefrierpunktserniedrigung und der Siedepunkterhöhung der Zahl der gelösten Teilchen proportional sind, ohne dass ihre individuellen Eigenschaften eine Rolle spielen, führt ARRHENIUS zu der Auffassung der Existenz freier Ionen in der Lösung. Die Zahl dieser Ionen, der Dissoziationsgrad, wird festgelegt durch das zweite Grundgesetz, das Massenwirkungsgesetz von GULDBERG-WAAGE, welches das Gleichgewicht zwischen undissoziierten und dissoziierten Molekülen quantitativ regelt und hier speziell die Form des OSTWALDSchen Verdünnungsgesetzes annimmt. So gross war der Erfolg dieser Gesetze, dass man erst ganz allmählich dazu kam, die Fälle genauer zu betrachten, in denen sie offenbar versagen, obwohl die Schwierigkeiten an sich schon frühzeitig erkannt wurden. Diejenigen Salze, welche im Sinne von ARRHENIUS weitgehend in Ionen gespalten sind, fügen sich nicht den quantitativen Forderungen der Grundgesetze, ihr Verhalten wurde als die Anomalie der starken Elektrolyte registriert. Zu dieser Klasse gehören die meisten der gewöhnlichen anorganischen Salze.

Angesichts dieser Tatsache wird man versuchen, die notwendigen Grundlagen festzustellen, aus denen die Gültigkeit der klassischen Grundgesetze erschlossen werden kann. Man bemerkt dann sofort ihre Analogie mit den Gesetzen der idealen Gase und gleichzeitig wird klar, dass sie theoretisch nur so lange gelten können, als man berechtigt ist, die Molekularkräfte als nebensächlich überhaupt zu vernachlässigen. Bei der Diskussion über den Energieinhalt von Kristallen, die wie Steinsalz aus Ionen aufgebaut sind, sahen wir, wie stark die elektrischen Kräfte sind, welche zwischen Ionen entsprechend dem COULOMBSchen Gesetze auftreten. Bedenkt man dann, dass die auffälligen Abweichungen der klassischen Gesetze gerade in den Fällen auftreten, wo man auf eine sehr weitgehende Dissoziation in Ionen zu schliessen hat, so liegt es nahe, an einen Zusammenhang zu denken zwischen der Anomalie der starken Elektrolyte einerseits und die Korrekturen der Grundgesetze, welche die Berücksichtigung der Ionenkräfte andererseits herbeiführen muss. In dieser Richtung bewegen sich schon einige vor vielen Jahren veröffentlichte Gedankengänge von VAN LAAR.

Aber auch ohne das Problem von diesem speziellen Gesichtspunkte anzugreifen, kann man sich zunächst, in Kontakt mit den allgemeinen Regeln der Thermodynamik, überlegen, in welcher Weise man wohl das Verhalten insbesondere der starken Elektrolyte praktisch fassen könnte. Darin, dass es sich um eine praktische Fassung handelt, kommt gleich zum Ausdruck, dass das Resultat nicht eindeutig sein kann und es viele Möglichkeiten geben wird, unter denen man dann mehr aus Gefühlsgründen eine als praktisch bevorzugen wird. LEWIS hat das getan durch Einführung des thermodynamisch begründeten Begriffes der Aktivität.

Betrachtet man z. B. das Gleichgewicht zwischen NaCl-Molekülen und den Ionen Na und Cl, so ist der einfachste Ansatz der von GULDBERG-WAAGE, wonach in der Zeiteinheit die Anzahl zerfallende Moleküle proportional ihrer Zahl sein wird, während gleichzeitig die Anzahl Moleküle, welche sich bildet, proportional gesetzt wird dem Produkte der Zahlen vorhandener Na-, bzw. Cl-Ionen. Die Thermodynamik zeigt indessen, dass im allgemeinen Falle bei Anwesenheit von Molekularkräften die Zahlen oder Konzentrationen selbst zu ersetzen sind durch kompliziertere Funktionen derselben, welche man dann Aktivitäten nennen kann und die so eingeführt sind, dass das Massenwirkungsgesetz thermodynamisch richtig ist, wenn nur die Konzentrationen durch die Aktivitäten ersetzt werden. Das Verhältnis Aktivität zu Konzentration kann man noch mit dem Namen Aktivitätskoeffizient belegen und nun versuchen, aus den experimentellen Ergebnissen auf die Abhängigkeit der Aktivitätskoeffizienten der einzelnen Ionen von den innern und äussern Bedingungen der Lösung zu schliessen.

Diesen Weg haben insbesondere BRÖNSTEDT und LEWIS konsequent verfolgt und letzterer hat in 1921 zusammen mit RANDALL die Erfahrung zusammengefasst in einer Regel, welche er die Hypothese der „independent activity Coefficients of the ions“ nennt. Nach dieser Regel soll für den Aktivitätskoeffizient eines Ions nicht die Ionenkonzentration der Lösung selber, sondern vielmehr eine fiktive Konzentration die sogenannte Ionenstärke massgebend sein, welche in ihrer Bildung auf Konzentration und Wertigkeit gleichzeitig Rücksicht nimmt. Das geschieht, indem man zunächst jede Ionenkonzentration multipliziert mit dem Quadrate der Wertigkeit des betreffenden Ions und dann erst die Produkte zur Bildung der Ionenstärke der Lösung addiert. Offenbar wird somit der Einfluss

der verschiedenen Ionen mit einem um so grösseren Gewicht versehen, je höher ihre Wertigkeit, d. h. ihre elektrische Ladung ist.

So sieht man in dieser Regel in klarerer Form erneut einen Hinweis auf die Wirksamkeit der Ionenkräfte hervortreten, denn diese sind entsprechend dem COULOMBSchen Gesetze den Ladungen und damit den Wertigkeiten proportional. In der Tat führt eine eingehendere Betrachtung der Wirksamkeit der Ionenkräfte auf eine Begründung der LEWISSchen Regel, und zwar liegt bemerkenswerterweise der Fall historisch so, dass das theoretische Resultat ohne vorherige Kenntnis jener Regel erreicht wurde. Nimmt man z. B. eine NaCl-Lösung und betrachtet etwa ein Na-Ion und seine Umgebung. Es wird dann eben infolge der COULOMBSchen Kräfte wahrscheinlicher sein, dass man in einem irgendwie herausgegriffenen Abstände ein umgekehrt geladenes Cl-Ion als ein gleichgeladenes Na-Ion findet. Und trotzdem die Regelmässigkeit in der Anordnung, welche sich herstellen möchte und die man mit der Anordnung in einem Steinsalzkristall vergleichen möge, infolge der Temperaturbewegung nicht zustande kommen kann, so wird doch etwas von dieser Ordnung übrig bleiben. MILNER war der erste, welcher diese Verhältnisse quantitativ zu fassen suchte. Man wird behaupten können, dass jedes Ion im Mittel von einem Schwarm umgeben sein wird, in dem die entgegengesetzt geladenen um so stärker überwiegen, je näher man an das Ion herangeht. Unter vereinfachenden Voraussetzungen gelingt es nun zu zeigen, dass die mittlere Dichte der Überschussladung im Schwarm mit der Entfernung von Ion so abnimmt, dass für diese Abnahme eine Strecke massgebend ist, die nur von der oben eingeführten Ionenstärke abhängt, sofern die Kräfte zwischen den Ionen dem COULOMBSchen Gesetze genügen. Dieses führt dann ohne weiteres zu einer elektrostatischen Begründung der LEWISSchen Regel.

Zugleich mit der Erklärung der obigen Gesetzmässigkeiten, erhält man die Erklärung für das ebenfalls merkwürdige Verhalten, welches die Leitfähigkeit der starken Elektrolyte kennzeichnet und das schon von KOHLRAUSCH auf eine Form gebracht wurde, von der er feststellen musste, dass sie mit dem klassischen Massenwirkungsgesetze keinen Zusammenhang haben konnte.

Die Behandlung der starken Elektrolyte im obigen Sinne ist verhältnismässig neueren Datums. Kein Wunder, dass sich noch Meinungsverschiedenheiten geltend machen. Während BJERRUM

z. B. selbst noch vor der Ausarbeitung einer Theorie zur Ansicht kam, dass die starken Elektrolyte auch in grössern Konzentrationen nahezu vollständig in Ionen dissoziiert seien und der gewöhnlich angegebene Dissoziationsgrad von weniger als 100% nur durch die Wirkung der Ionenkräfte vorgetäuscht sei, findet NERNST in neuester Zeit bei Beobachtungen über Verdünnungswärmen ein individuelles Verhalten der Ionen, welches nicht der LEWISSCHEN Regel entspricht, so dass er an der Bedeutsamkeit der COULOMBSCHEN Kräfte zweifelt. Weitere Versuche, besonders in grössern Verdünnungen, werden uns hoffentlich bald darüber belehren, ob die Anomalie der starken Elektrolyte in der Tat neuerdings wieder zu der Gruppe der unerklärten Erscheinungen zurückversetzt werden muss.

Es spricht indessen vieles dafür, dass man in der Elektrolytheorie nicht ohne Berücksichtigung der Ionenkräfte auskommen wird, ebenso wenig, als es in der Gastheorie etwa möglich wäre, die Erscheinungen zu verstehen mit einem Dissoziationsansatz, allein ohne Beachtung der VAN DER WAALSCHEN Kräfte. Hier wie dort werden die beiden Gesichtspunkte gleichzeitig berücksichtigt werden müssen.

IV.

Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich alle auf Atome oder Moleküle, welche durch Verlust oder Aufnahme eines oder mehrerer Elektronen zu Ionen geworden sind. Man könnte den Einwand erheben, dass hier die Existenz COULOMBSCHER Kräfte selbstverständlich ist und das, was gewöhnlich als Molekularkraft bezeichnet wird, einfach durch die weit überwiegende Wirkung elektrostatischer Ladungskräfte überdeckt ist. Es ist deshalb unerlässlich, die Grundidee auch dort zu verfolgen, wo es sich um die gegenseitigen Wirkungen ungeladener Gebilde handelt.

Frägt man sich dementsprechend, wie man mit Hilfe elektrischer Ladungen ein neutrales Gebilde herstellen kann, so drängt sich als einfachste Möglichkeit das Bild eines Dipols auf: Eine positive und eine gleich grosse negative Ladung in gewissem Abstände von einander fixiert. Das Feld, welches von einer solchen Kombination ausstrahlt, gleicht dem Felde eines Magneten. Seine Intensität nimmt proportional der dritten Potenz der Entfernung ab, eine Tatsache, welcher der verbesserten innern Absättigung entspricht, die durch die Kombination zweier Ladungen erreicht

wird. Stellt man die Überlegung in dieser primitiven Weise dar, so muss der Eindruck der Willkür sich aufdrängen. Dem ist aber trotzdem nicht so.

Hat man irgend ein statisches System von Ladungen, so wird das Potential desselben um so verwickelter werden, je näher man an das System herankommt. Der Mathematiker, der die Absicht hat, jenes Potential durch eine Formel darzustellen, wird deshalb eine Reihenentwicklung wählen, welche fortschreitet nach negativen Potenzen der Entfernung von irgend einem festgewählten Punkte, am besten im Innern des Systems. Tut man das, so bekommt man in der Potentialdarstellung ein erstes dem reziproken Abstände proportionales Glied, welches als Vektor die algebraische Summe aller Ladungen aufweist. Das zweite Glied ist dem reziproken Quadrat jenes Abstandes proportional und erfordert zu seiner quantitativen Festlegung die Definition eines Vektors, des Momentenvektors, der bildlich durch zwei entgegengesetzt gleiche Ladungen im endlichen Abstände dargestellt werden kann und dessen Grösse durch das Produkt Ladung mal Abstand gemessen werden muss. Geht man zum dritten Gliede über, so ist dieses der dritten Potenz des reziproken Abstandes proportional und ist quantitativ gekennzeichnet durch Grössen von der Dimension Ladung mal Quadrat eines Abstandes, die man als Quadrupolmomente oder als elektrische Trägheitsmomente des Ladungssystems bezeichnet. In dieser Weise kann man die Reihe fortsetzen, jedes weitere Glied erfordert die Einführung von Momenten höherer Ordnung.

Vom Standpunkte dieser Reihenentwicklung aus gesehen, ist demnach die Einführung von Molekülen, die ähnlich wie Magnete wirken und ihre Kennzeichnung durch elektrische Dipolmomente durchaus natürlich. Selbstverständlich wird nicht jedes neutrale Gebilde eine Dissymmetrie der Ladungsverteilung aufweisen, wie sie dem Dipolcharakter entspricht. Es kann auch die innere Symmetrie grösser sein. Dann wird das Dipolmoment Null sein und das System wird sein Feld so konzentrieren, dass es proportional der vierten Potenz der Entfernung an Intensität abnimmt, während zu seiner Kennzeichnung nun mehr die elektrischen Trägheitsmomente dienen werden. Entsprechend der Reihenentwicklung kann das Einteilungsverfahren fortgesetzt werden. So verschwindet z. B. das Feld wieder, wenn die drei elektrischen Hauptträgheitsmomente

einander gleich sind, dann wird das Reihenglied wichtig, welches der vierten Potenz der reziproken Entfernung proportional ist, usw.

Für den Physiker handelt es sich nun zunächst darum, die Existenz von Dipolmolekülen experimentell nachzuweisen. Bringt man ein Ion in ein homogenes elektrisches Feld, so wird darauf eine Kraft ausgeübt und es entsteht unter geeigneten Umständen der elektrische Strom. Ein Dipolmolekül dagegen erfährt in einem solchen Felde im ganzen keine einseitig gerichtete Kraft; nur ein Drehmoment wird ausgeübt, welches bestrebt ist, das Molekül so zu drehen, dass seine Momentenachse parallel dem Felde zu liegen kommt, ähnlich wie das mit einem Magnetstäbchen im Erdfelde geschieht. Unter Einwirkung eines homogenen Feldes, etwa zwischen den Platten eines Kondensators, werden also die Moleküle einer Flüssigkeit oder eines Gases sich, sofern sie Dipolcharakter haben, orientieren und infolgedessen der Volumeneinheit ein elektrisches Moment erteilen. Durch die Schaffung dieses Momentes aber tritt eine Rückwirkung auf die Platten ein und es wird nun nötig sein, mehr Ladung auf die Platten zu bringen, zur Erreichung einer gegebenen Potentialdifferenz als für den Fall, dass die Kondensatorplatten einander im Vakuum gegenüberstehen. Das Mass der Vermehrung der Ladung wird praktisch seit FARADAY durch Angabe der Dielektrizitätskonstante gekennzeichnet.

Wir wissen, dass die Dielektrizitätskonstante für alle Körper ohne Ausnahme grösser als 1 ist. Alle Körper nehmen also unter Einwirkung eines elektrischen Feldes ein Moment an, das positiv ist. Sollen wir nun daraus schliessen, dass dieses Moment in allen Fällen durch Orientierung der Moleküle zustande kommt und demnach alle Moleküle Dipolcharakter haben? In der Tat ist [dieser Schluss unberechtigt. Ebenso wie eine leitende Kugel in einem Felde ein Moment annimmt, dadurch dass die frei beweglichen Ladungen sich verschieben, kann ein Molekül ein Moment erhalten, dadurch dass es quasi elastisch deformiert wird und seine Ladungen kleine Verschiebungen erfahren. Diese Art der Influenz ist sogar die einzige, welche lange Zeit allein in Betracht gezogen wurde. Es genügt also nicht, die Dielektrizitätskonstante allein zu messen; es muss vielmehr nach einer Eigenschaft dieser Konstante gesucht werden, die wesentlich mit dem Dipolcharakter verknüpft ist.

Wir wissen, dass die Moleküle eine höchst ungeordnete Bewegung, die Temperaturbewegung aufweisen. Versucht man also,

Dipolmoleküle mit Hilfe eines elektrischen Feldes zu orientieren, so wird diese Orientierung nicht voll zustande kommen können, da sie fortwährend infolge der Temperaturbewegung durch die gegenseitigen Stösse der Moleküle gestört werden wird. Man wird offenbar um so weniger Orientierung bekommen, je intensiver die Bewegung, d. h. je höher die Temperatur ist. Schliesst man daher etwa ein Gas von Dipolmolekülen in einem unveränderlichen Volumen ein, so wird man zu erwarten haben, dass die bei konstanter Dichte bestimmte Dielektrizitätskonstante mit zunehmender Temperatur abnehmen muss. Das Gesetz, nach welchem dieses geschieht, kann mit Hilfe eines nach BOLTZMANN und MAXWELL benannten Prinzips berechnet werden. Die Begründung ist vollkommen analog derjenigen, die LANGEVIN auf dem Gebiete des Magnetismus ausführte zur Ableitung des CURIESchen Gesetzes des Paramagnetismus. Diese innere und äussere Ähnlichkeit beider Fälle brachte SOMMERFELD neulich dazu, für die elektrische Erregung durch Orientierung den Namen Paraelektrizität vorzuschlagen. Während nun die Erregung auf Grund der Orientierung sich als temperaturempfindlich erweist, ist das mit der Erregung durch Deformation nicht der Fall. Durch Untersuchungen über die Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante bekommt man also die Möglichkeit festzustellen, ob die betreffenden Moleküle Dipolcharakter haben und kann dann durch Anwendung des Temperaturgesetzes die Grösse des Dipols bestimmen.

Solche Untersuchungen wurden schon vor langer Zeit, als ihre Deutung noch nicht bekannt war, im NERNSTschen Laboratorium ausgeführt von BAEDEKER. Später hat dann JONA und in neuester Zeit haben besonders ZAHN in Princeton und SÄNGER in Zürich solche Messungen mit modernen Hilfsmitteln gemacht. Das theoretische Temperaturgesetz hat sich bisher stets bestätigt. Die Werte, welche für die Dipolmomente gefunden wurden, sind von der Grössenordnung 10^{-18} . Gerade diese Grössenordnung ist es, welche das Zutrauen in die Richtigkeit der Voraussetzungen wesentlich bestärkt. Die Ladung eines Elektrons ist von der Grössenordnung 10^{-10} C. S. Einheiten, die Abstände im Molekül sind von der Grössenordnung 10^{-8} cm; wir haben also in der Tat von vornherein zu erwarten, dass das Moment (durch ein Produkt Ladung mal Abstand zu messen) die Grössenordnung 10^{-18} aufweisen muss.

Unter den verschiedenen Anwendungen, welche man von der

Ausnahme der Existenz von Dipolmolekülen machen kann, ist eine zugleich einfach und hübsch. Die Formel, mit welcher der Chemiker ein Molekül bezeichnet, soll gestatten, das chemische Verhalten aus ihr abzulesen. Sie kann das, wenn sie wirklich die gegenseitige Lagerung der Atome darstellt. Genügt sie aber dieser Forderung, dann muss man erwarten, dass auch die elektrischen Eigenschaften des Moleküls durch die Formel wiedergegeben werden. So wird man die Symmetrieeigenschaften der Formel in Verbindung bringen wollen mit der elektrischen Symmetrie des wirklichen Moleküls und erwarten, dass ein unsymmetrisches Molekül Dipolcharakter haben wird, während ein symmetrisch gebautes kein Dipolmoment aufweisen dürfte. **ERRERA** hat von diesem Gesichtspunkte aus einige Isomeren in flüssiger Form untersucht. **ZAHN** demonstrierte an einem Falle den Einfluss der relativen Lage einer Doppelbindung im Molekül; besonders einfach aber liegen die Verhältnisse bei einer Reihe von Gasen und Dämpfen, die **SÄNGER** in letzter Zeit behandelt hat. Als Versuchsobjekte wählte er die Reihe CH_4 , CH_3Cl , CH_2Cl_2 , CHCl_3 , CCl_4 , die Substanzen wurden, um jede Komplikation zu vermeiden, in Dampfform und bei konstant gehaltener Dichte untersucht. Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante zeigte sich bei den drei mittleren Molekülen, während sie bei den beiden äussersten fehlte. Das ist genau, was man auf Grund des bekannten Tetraedermodells für die Valenzen des Kohlenstoffatoms erwarten würde. Sind die vier Atome, welche am C-Atom gebunden sind, alle vier gleich, dann ist kein Dipolmoment vorhanden. Ist aber 1, oder 2, oder 3 der H-Atome durch ein Cl-Atom ersetzt, dann tritt sofort eine Dissymmetrie auf, welche dem Molekül ein Dipolmoment verleiht, das im Temperaturverhalten der Dielektrizitätskonstante zum Ausdruck kommt.

V.

Die dielektrischen Versuche, von denen oben die Rede war, haben uns in der Überzeugung bestärkt, dass das elektrische Bild des Moleküls der Wirklichkeit entspricht. Versuchen wir jetzt, ob die Molekularkräfte, wie sie z. B. bei der Verflüssigung eines Gases sichtbar werden, in Zusammenhang mit jenem Bilde gebracht werden können.

Als **VAN DER WAALS** zeigte, dass eine Kontinuität zwischen dem gasförmigen und dem flüssigen Zustande existiert und er das

charakteristische Verhalten in grossen Zügen durch seine berühmte Zustandgleichung wiedergab, war er ausgegangen von zwei Grundannahmen. Die Moleküle sollen sich erstens in grösserer Entfernung stets gegenseitig anziehen; zweitens sollen sie in kleinerem Abstände abstossende Kräfte aufeinander ausüben, die sehr rasch mit abnehmender Entfernung zunehmen und durch die Einführung wirklicher Moleküldurchmesser approximiert werden können. Diesen zwei Grundannahmen entspricht die Einführung zweier individueller Konstanten, der Anziehungskonstante a und der Volumkonstante b . Die kritischen Konstanten (der kritische Druck, das kritische Volumen und die kritische Temperatur) sind nach VAN DER WAALS durch die beiden Molekularkonstanten a und b ausdrückbar. Es hat sich gezeigt, dass die VAN DER WAALSSche Formel nur eine erste grobe Näherung darstellt, wenn es sich um die quantitative Darstellung des wirklichen Verhaltens eines Gases handelt, während dagegen das qualitative Verhalten aller Gase in ausgezeichneter Weise wiedergegeben wird. Es ist demnach als sicher anzunehmen, dass die von VAN DER WAALS postulierte universelle Anziehung existiert, und wir haben uns nicht nur zu fragen, ob eine solche Anziehung aus unserem elektrischen Bilde folgt, sondern ausserdem zu untersuchen, ob die elektrischen Kräfte gross genug sind, um die tatsächliche molekulare Anziehung zu erklären.

Welche Grössen hier eine Rolle spielen, sei an Hand eines Beispiels erläutert. Argon hat eine kritische Temperatur von 151° absolut und einen kritischen Druck von 48 Atmosphären. Nach der VAN DER WAALSSchen Formel leitet man daraus ab für a den Wert $1,4 \cdot 10^{12}$ und für b den Wert 32, beides im C. G. S.-System. Da im Sinne von VAN DER WAALS b das Vierfache des wirklichen Volumens der Moleküle misst, bedeutet der letztere Wert, dass in einem Mol Argon, das unter Normaldruck und bei 0° Celsius 22 Liter ausfüllt, das wirkliche Volumen der Argonatome nur 8 cm^3 beträgt. Anderseits folgt aus dem angegebenen Werte von a , dass unter den gleichen Normalumständen zum äusseren Druck von einer Atmosphäre noch ein innerer Druck von etwa $0,003$ Atmosphären hinzukommt, welchen das Gas auf sich selbst ausübt infolge der gegenseitigen Anziehung der Moleküle. Mit zunehmender Dichte wird dieser Binnendruck rasch grösser und erreicht in der flüssigen Phase Werte von der Grössenordnung 1000 Atmosphären.

Man denke sich nun zwei Moleküle von Dipolcharakter in

einer gewissen Entfernung voneinander. Sie werden dann noch alle möglichen Orientierungen ihrer Dipolachsen haben können. Die Frage ist, ob unter diesen Umständen im Mittel eine resultierende Kraft von einem auf das andere Molekül ausgeübt wird, als Folge der elektrischen Felder, die von einem Ladungssystem ausstrahlend am anderen angreifen. Nach den Grundgesetzen der Elektrostatik folgt leicht, dass überhaupt keine resultierende Kraft vorhanden ist, falls alle Orientierungen der elektrischen Momente im Raum gleichberechtigt sind. Ebenso aber, wie ein Moment in einem äusseren elektrischen Felde eingestellt wird und dadurch die parallelektrische Erregung zustande kommt, ebenso wird jedes Molekül bestrebt sein, sich im Felde des anderen zu orientieren. Auch diese Orientierung ist indessen durch die Temperaturbewegung gestört. Sie wird also um so weniger ausgesprochen sein, je höher die Temperatur ist. Aber solange sie vorhanden ist, werden nach dem **BOLTZMANN-MAXWELLS**chen Prinzip die Orientierungen geringerer potentieller Energie bevorzugt, ähnlich wie die Luftmoleküle die Nähe der Erdoberfläche bevorzugen und infolgedessen unsere Atmosphäre nach oben an Dichte abnimmt. Im ganzen folgt also unter Berücksichtigung dieses Umstandes eine gegenseitige Energie, die als Anziehung in die Erscheinung tritt.

Bei der Besprechung der dielektrischen Eigenschaften sahen wir, dass die Substanzen in zwei grosse Gruppen zerfallen. Bei der einen Gruppe ist die dielektrische Erregung temperaturempfindlich, bei der andern nicht. Nur die Moleküle der erstgenannten Sorte sind Dipolträger, nur auf diese Moleküle ist also die obere Überlegung anwendbar. Für Argonatome z. B., die kein elektrisches Moment besitzen und die sich doch auch nach **VAN DER WAALS** gegenseitig anziehen, würde man scheinbar die Überlegung nicht benutzen können.

Indessen, das Wesentliche der Betrachtung liegt nicht darin, dass wir von Dipolmolekülen ausgegangen sind; auch wenn die elektrischen Systeme der Moleküle symmetrischer sind und erst mit Hilfe von Momenten höherer Ordnung charakterisiert werden können, besitzen sie gegenseitige potentielle Energie. Die Orientierungen kleinster Energie werden nach wie vor bevorzugt und eine gegenseitige Anziehung stellt sich ein.

Insbesondere **KESOM** hat Rechnungen durchgeführt über diese „Anziehung durch Orientierung“. Wie nicht anders zu erwarten,

wird die so errechnete Molekularanziehung temperaturempfindlich; aber auch die Experimente fordern diese Abweichung vom ursprünglichen VAN DER WAALSSchen Ansatz. Die elektrischen Trägheitsmomente, welche z. B. bei denjenigen Molekülen, die keine Dipolträger sind, nötig wären, um die Formeln quantitativ den experimentellen Ergebnissen anzupassen, ergaben sich von der Grössenordnung 10^{-26} . Diese Grössenordnung ist wieder in Übereinstimmung mit dem, was wir erwarten müssen. Ein solches Moment hat nämlich die Dimension Ladung mal Quadrat eines Abstandes, und da die Elektronenladung die Grössenordnung 10^{-10} und die Moleküldimensionen die Grössenordnung 10^{-8} haben, folgt der zu erwartende Wert ebenfalls zu 10^{-26} .

Bei näherem Zusehen ergeben sich indessen verschiedene Einwände, die von wesentlicher Bedeutung scheinen. Die Ansätze, welche im Sinne des BOLTZMANN-MAXWELLSchen Prinzips den KEESOM'Schen Rechnungen zugrunde liegen, erfordern implicite die Existenz einer relativ beträchtlichen kinetischen Rotationsenergie der Einzelteilchen. Diese Energie müsste sich in der spezifischen Wärme bemerkbar machen und wir wissen, dass dieses, wenigstens bei den einatomigen Edelgasen, die doch auch die VAN DER WAALSSche Anziehung zeigen, nicht der Fall ist. Nur eine Abänderung des Rechnungsprinzips, die vielleicht allerdings nicht von vornherein als unberechtigt abgetan werden kann, würde den Widerspruch beheben können. Überdies aber haben die bisherigen Versuche des Leidener Laboratoriums zwar gezeigt, dass die „Konstante“ a keine Konstante ist; es hat sich indessen in allen Fällen ergeben, dass die Molekularanziehung bei zunehmender Temperatur einem festen Grenzwert zustrebt und nicht verschwindet. Dieser Forderung kann die „Anziehung durch Orientierung“ nie genügen. Wenn die kinetische Energie der Rotation gross wird im Vergleich mit der potentiellen Energie der Orientierung, werden alle Achsenlagen gleichberechtigt und damit verschwindet, wie oben bemerkt, die Anziehung nach den Grundgesetzen der Elektrostatik.

Eine Revision der Voraussetzungen zeigt bald, dass diese nicht in jeder Hinsicht einwandfrei sind. Schon bei der Besprechung der dielektrischen Eigenschaften fanden wir es nötig, auf die alte Idee von MOSOTTI zurückzugreifen, dass das Molekül nicht ein starres Gebilde ist, sondern durch ein elektrisches Feld deformiert werden kann. Die Tatsache, dass die Lichtgeschwindigkeit in einem Gase

eine andere ist als im Vakuum, liefert den experimentellen Beweis für diese Deformierbarkeit, und der Brechungsexponent ist ein Mass für die Beweglichkeit der Ladungen im Molekül. Wenn dem aber so ist, dann muss schon ohne Orientierung eine gegenseitige Anziehung der Moleküle, die „Anziehung durch Polarisierung“ existieren. Jedes Molekül wird mit Hilfe eines Feldes ein benachbartes beeinflussen, ähnlich wie eine kleine leitende Kugel influenziert werden würde. Infolge dieser Influenz entsteht eine gegenseitige potentielle Energie, welcher nach den Grundgesetzen der Elektrostatik Kräfte entsprechen, die das influenzierte Teilchen nach solchen Stellen treiben, wo die Feldintensität am grössten ist. Was hier geschieht, ist dasselbe wie das, was wir beim Grundversuch in der Elektrostatik beobachten, wo wir feststellen, dass ein beliebig geladener Körper alle anderen neutralen Körper ohne Ausnahme anzieht, das heisst ohne zwischen Leiter und Nichtleiter zu unterscheiden. Eingehendere Rechnungen haben gezeigt, dass die Grössenordnung der Polarisationskräfte in der Tat ausreicht, um z. B. das quantitative Verhalten der Molekularanziehung bei den Edelgasen wiederzugeben. Es ist also schliesslich kein Grund mehr vorhanden, an der Möglichkeit einer elektrischen Deutung der VAN DER WAALS schen Attraktionskräfte zu zweifeln. Diese Überzeugung ist inzwischen sogar so stark geworden, dass in neuester Zeit BORN und einige Mitarbeiter die Polarisationskräfte als wesentlich herangezogen haben, um sogar den inneren Aufbau von heteropolaren Molekülen wie HCl und H₂O zu erklären.

VI.

Überblicken wir die Gesamtheit des bisher vorgebrachten Materials, so werden wir durch die Tatsache getroffen, dass die Erfolge immer dort erreicht wurden, wo es sich um Erscheinungen handelt, die wesentlich durch den Feldverlauf im grösseren Abstände vom Molekül bestimmt werden. In der BORNschen Theorie der heteropolaren Kristalle müssen die bei grösserer Annäherung wesentlichen Abstossungskräfte durch einen phänomenologischen Ansatz mittels eines Potenzgesetzes gefasst werden. In der Gastheorie spricht man nach wie vor von einem Moleküldurchmesser, der die gegenseitige Annäherung beschränkt. Von einer einleuchtenden Erklärung dieser in kleinen Abständen allein massgebenden Kräfte ist keine Rede. Man darf daraus wohl schliessen, dass das Problem

diese Wirkungen ebenfalls auf bekannte einfache Erscheinungen zurückzuführen, wenigstens zurzeit besonders schwierig sein wird. Infolgedessen wird man darauf geführt, die Fragestellung zunächst in der einfachst möglichen Form anzugreifen. Das geschieht, indem man nicht den Zusammenstoss zweier Moleküle oder Atome, sondern den Zusammenstoss eines Atoms mit einem Elektron untersucht. Da man in einem elektrischen Felde den Elektronen beliebige Geschwindigkeiten erteilen und sie überdies bequem nachweisen kann, hat man nebenbei noch den Vorteil, dass man die Zusammenstösse unter stark variierten Bedingungen experimentell verfolgen kann. Solche Versuche sind als erster von LENARD ausgeführt worden. Zunächst hat er festgestellt, dass die Atome Elektronen grosser Geschwindigkeit ohne starke Rückwirkung durchlassen, womit die Grundlage geschaffen wurde für unser heutiges Atombild. Eine Störung der Elektronenbewegung von derjenigen Grössenordnung, wie man sie nach dem Bilde der harten Kugeln erwarten würde, stellt sich erst ein bei relativ kleinen Geschwindigkeiten. Das interessante Gebiet der mittleren Geschwindigkeiten, welches besonders von FRANCK und einer grossen Reihe von anderen Gelehrten untersucht wurde, und das sein eigenes Gepräge erhält durch die Quantensprünge, welche die Elektronen erzeugen können, liegt ausserhalb des hier zulässigen Rahmens. Für uns ist an dieser Stelle wesentlich, dass auch im Bereiche kleiner Geschwindigkeiten, die keine dauernden Änderungen im Atom verursachen, sehr merkwürdige und unerwartete Erscheinungen existieren, die vor einigen Jahren von RAMSAUER experimentell nachgewiesen und seitdem mehrfach bestätigt wurden.

Als Beispiel sei das Verhalten von Argon etwas näher betrachtet. Elektronen, welche eine Potentialdifferenz von etwa 40 Volt durchlaufen haben, werden ähnlich zerstreut, wie das auf Grund des gewöhnlichen gaskinetischen Atomdurchmessers zu erwarten ist. Geht man nun zu kleineren Geschwindigkeiten über, so wird zunächst die Zerstreung grösser. Sie steigt indessen nicht dauernd, sondern erreicht bei 13 Volt einen Maximalwert, welcher roh einem 2,5-fach vergrösserten Atomquerschnitt entspricht. Von da an wird nun merkwürdigerweise mit abnehmender Geschwindigkeit die Zerstreung wieder geringer und entspricht z. B. bei einer Geschwindigkeit von 1 Volt nur mehr einem Querschnitt, welche ungefähr gleich dem dritten Teile des gaskinetischen Querschnittes ist.

Gewisse Versuche legen die Vermutung nahe, dass bei ganz kleinen Geschwindigkeiten wieder erneut ein Anwachsen der Zerstreuung einsetzen dürfte.

Glauht man, dass ein Atom, welches nach BOHR ein dynamisches System ist, nicht von einem elektrostatischen, sondern von einem elektrodynamischen Wechselfelde umgeben ist, so kann man verstehen, dass die ankommenden Elektronen deshalb eine Abstossung erfahren werden, weil sie bei der Annäherung kinetische Energie von der Art einer Schwingungsenergie aufspeichern werden. Auch die Tatsache, dass bei Verkleinerung der Geschwindigkeit eine Vergrößerung der Zerstreuung zustande kommt, folgt, wenn berücksichtigt wird, dass das Atom vom Elektron polarisiert werden muss und deshalb das Elektron anzieht. Aber es scheint kaum wahrscheinlich, dass man mit Hilfe der klassischen Vorstellungen verstehen kann, dass bei noch kleinerer Geschwindigkeit die Ablenkungen wieder abnehmen. Es ist deshalb von HUND versucht worden, die Regeln der Quantentheorie so zu formulieren, dass die Beobachtungen mit ihnen, wenigstens qualitativ, im Einklange sind. Obwohl man offenbar von einer wirklich quantitativen und einleuchtenden Theorie noch sehr entfernt ist, scheint es doch sicher, dass nur eine Abänderung der Grundgesetze im Sinne der Quantentheorie zum Erfolg führen wird. Heute ist man wohl trotz einiger bemerkenswerter Ansätze noch nicht im Besitze einer genügend umfassenden Formulierung der Quantengesetze, um das Problem der Zusammenstöße mit Aussicht auf einen durchschlagenden Erfolg in Angriff nehmen zu können. Indessen schon die Erkenntnis allein, dass die Quantengesetze wesentlich sein werden für den weiteren Fortschritt auf diesem Gebiete, ist nicht gering einzuschätzen. Die stetig fortschreitende Entwicklung auf dem Gebiete der Quantentheorie, welche neuerdings durch die Namen HEISENBERG, BORN, DIRAC, DE BROGLIE, SCHRÖDINGER gekennzeichnet ist, lässt hoffen, dass auch das hier zuletzt behandelte Problem in nicht zu ferner Zeit gelöst werden wird.