

nisierte, die anderen unorganisierte Körper. Die Systematisierung führt also zu einer Zweiteilung der Stoffe, damit zu einer Chemie der unorganisierten Körper neben einer Chemie der organisierten Körper. Sprachlich vollzieht sich zu derselben Zeit (gegen Ende des XVIII. Jahrh.) eine Umbildung der Wortform „organisiert“ in „organisch“. Zu Beginn des XIX. Jahrhunderts tritt eine weitere begriffliche Zusammenziehung hinzu, statt „Chemie der organisierten (= organischen) Körper“ sagt man kurz „organische Chemie“. Statt der ursprünglichen „Körper“ (d. h. Teile und Einzelindividuen von Pflanzen und Tieren) ist inzwischen der Begriff „chemische Verbindung“ („chemischer Körper“) getreten, aber immer noch vom Pflanzen- und Tierreich abstammend. Um die Mitte des XIX. Jahrhunderts ist der Umbildungsprozeß praktisch beendet, die Ursprungsforderung ist abgeschafft, und die „organische Chemie“ ist eine „Chemie der Kohlenstoffverbindungen“ geworden! Diese Erkenntnis der stofflichen Zusammensetzung ging ebenfalls einen mühevollen, weiten Weg, der folgerichtig — vom Verhalten im Feuer (oder bei freiwilliger Zersetzung) und von der Beständigkeit — in qualitativer Weise über das brennbare Prinzip, den Sulphur oder die Terra pinguis, über das Phlogiston (von Paracelsus zu Becher und Stahl) zu den stofflichen Elementen Kohlenstoff und Wasserstoff (Lavoisier) führte und in die quantitative Analyse ausmündete. Die Atomtheorie und die Lehre von den multiplen Proportionen (Dalton, Berzelius) schufen die Grundmauern für das Gebäude der chemischen Formeln und die Erforschung der Struktur, die ihrerseits in der organischen Synthese Bestätigung und Krönung fanden.

Wenn wir sehen, wie im Laufe von etwa anderthalb Jahrhunderten die Daten über Herkunft, bzw. wie Name und Charakter der „organischen“ Chemie sich verwischt haben, sollte es dann nicht naturgemäß sein, daß auch die Daten über Herkunft und Wesen der „Chemie“ selbst im Wandel der Jahrtausende von Grund aus sich geändert haben? „Die Chemie oder, wie man richtiger sagen müßte, die Chymie ist also zunächst die Kunst des Metallgusses“ (H. Diels), — und was haben die Jahrtausende daraus gemacht, und wie eigenartig nimmt sich heute die Wort- und Begriffsbildung „organische Chemie“ aus! Gleicht sie nicht einer erstarrten Schlackenhülle, aus der ein wunderbares neues Leben entsprossen ist?

Die großen Errungenschaften der organischen Synthese im allgemeinen, der technischen organischen Synthese aus den einfachen Stoffen im besonderen und zu unserer Zeit, haben den früheren Sinn des Wortes „organisch“ und den Arbeitsinhalt der organischen Chemie selbst gänzlich umgewandelt.

Die physiologische und Biochemie hat das einstige Aufgabengebiet der „organischen Chemie“ übernommen, und die organische Chemie von heute ist im besonderen eine Chemie der Kohlenstoffverbindungen geworden. Das was man ehemals der „organischen Chemie“ glaubte vorenthalten zu müssen, die chemische Synthese, ist heute ihre Glanzleistung. Und doch steckt in der Konservierung des alten Namens „organische Chemie“ für die heutige Chemie ein Etwas, das nachdenklich stimmt. Wohl besitzen wir hunderttausende „organische Verbindungen“, aber eine „organische Chemie“ — im strengen Sinne des Wortes — haben wir nicht. Die bisherige „organische Synthese“ machte die organische Chemie zu einem bedeutsamen Staatsglied im Staatskörper, sie führte hinauf zu Macht und Ansehen, aber auch abseits von der lebenden Natur, von den Quellen,

aus denen einst die organische Chemie ihren Ursprung genommen hat, abseits von den großen Aufgaben, die ein Berzelius und ein Liebig ihr einstmals gestellt hatten. Soll mit einer gewissen Resignation der alte Weg auch fernerhin benutzt werden? Oder soll nach neuen Wegen gesucht werden? Wenn wir eine neue Epoche anbahnen wollen, müssen wir uns mit neuen Idealen und Ideen ausrüsten. [A. 275.]

Atombau und Quantentheorie. I

von H. MARK, Berlin-Dahlem.

(Eingeg. 20. Sept. 1926.)

So alt die Frage nach den kleinsten Teilchen ist, aus denen die Körper zusammengesetzt sind, so neu ist sie als akutes physikalisches Problem. Denn die klassische Physik beschäftigte sich vorzugsweise mit den Gesetzen des Geschehen, ohne zunächst auf die Struktur der hieran beteiligten Körper näher einzugehen. Erst die Entdeckung der Kathodenstrahlen, der Radioaktivität und der Röntgenstrahlen halfen den atomistischen Anschauungen zum endgültigen Durchbruch, als deren letztes Ziel die Möglichkeit vorschweben mußte, das makroskopische Verhalten der Körper durch Atome von geeigneter Konstruktion zu erklären.

Diese Aufgabe zerfiel in zwei Teile: Es mußte ein geeignetes Atommodell gefunden werden, d. h. man mußte sich gewisse Vorstellungen über die Zusammensetzung des Atoms bilden und man mußte die Gesetze kennen, die das Atominnere beherrschen. Dabei war es zunächst das Gegebene, die Gültigkeit der makroskopisch bewährten Gesetze der klassischen Mechanik und Elektrodynamik auch für das Atominnere zu postulieren, nachdem man auf Grund experimenteller Erfahrung zu einem bestimmten „Atommodell“ gekommen war.

Es stellte sich aber heraus, daß im Mikrokosmos des Atoms nicht dieselben Beziehungen gelten wie bei makroskopischen Erscheinungen. Diese inneratomaren Gesetze zu finden wurde nun zur Hauptaufgabe; und je schwieriger die Lösung wird, um so interessanter und wichtiger sind die Ergebnisse. So lassen sich bisher drei Stadien der Entwicklung des Problems erkennen. Zunächst wurde versucht, die neuen experimentellen Ergebnisse atomistisch nach den bekannten klassischen Gesetzen zu deuten; der Höhepunkt war das Rutherford'sche Atommodell. Sodann zeigte Bohr, daß unter der Gültigkeit der klassischen Gesetze die Spektren nicht zu deuten sind. Durch neue Prinzipien gelang ihm zunächst die quantitative Deutung des Wasserstoffspektrums, nach weiterem Ausbau durch Sommerfeld konnte die Theorie auch über andere Spektren, über die Feinstrukturen und über den Aufbau des periodischen Systems Rechenschaft geben. Indessen blieb sie in den theoretischen Grundlagen unbefriedigend und erschien als eine der klassischen Theorie aufgepfropfte Summe von Vorschriften, für deren Verständnis keine Grundlage da war und deren Beziehung zu den klassischen Gesetzen dunkel blieb. Das führte zu den Versuchen Heisenbergs und Schrödingers, durch eine ganz neue Mechanik der kleinsten Teile (in der die alte Mechanik als Grenzfall auftritt) die Atomtheorie auf eine einheitliche Grundlage zu stellen.

I.

Wir setzen die elementaren, chemischen und physikalischen Tatsachen und Überlegungen voraus, die zur Atomistik führen, d. h. zu der Annahme, daß die Materie aus Atomen, aus kleinen, im wesentlichen unangreifbaren Teilen aufgebaut ist, daß die chemischen Ele-

mente als Atomsorten zu deuten sind und daß es nur eine begrenzte Zahl solcher Atomsorten gibt, und fragen gleich, wie man zu den ersten quantitativen Angaben kommen kann.

Die nächstliegende Annahme läßt das Atom als einfaches mechanisches Gebilde erscheinen, z. B. als elastische Kugel. So primitiv diese Vorstellung ist, so gibt sie gerade wegen ihrer Einfachheit die ersten Anhaltspunkte zur quantitativen Bestimmung, und zwar durch die kinetische Theorie der Gase. Es ist hier nur nötig, zu erinnern, auf welchem Weg man von ihr zu den Angaben über Größe, Masse und Anzahl kommt.

Wir betrachten eine in ein Kubikzentimeter eingeschlossene Gasmenge. An ihr können wir z. B. das Gewicht Q , den Druck p , die Wärmeleitfähigkeit W usw. messen, dann können wir sie komprimieren oder abkühlen, bis sie flüssig oder fest wird und nachsehen, wie sich das Volumen verringert hat; atomistisch ist nun das Gewicht gleich dem Produkt der Anzahl n der einzelnen Teilchen in ihrer Masse M

$$Q = n \cdot M.$$

Daraus und aus p läßt sich nach Joule die mittlere Geschwindigkeit v der Moleküle berechnen:

$$p = \frac{1}{3} n \cdot M \cdot v^2.$$

Aus v und W berechnet sich nunmehr der mittlere Atomabstand, die mittlere freie Weglänge. Diese hängt aber andererseits ab von der Größe der Moleküle und ihrer Anzahl. Nimmt man an, daß im festen und flüssigen Zustand, in dem nur noch geringe Kompressionen möglich sind, die Atome bzw. die Moleküle „dicht“ liegen (dazu ist man berechtigt: Ist es doch gerade die Kompressibilität gewesen, die zur Einführung der Atomistik den ersten Anlaß gab), so ist das Volumen im komprimierten Zustande gleich $n \cdot V$, wenn V das Atom- oder Molekülvolumen ist. Damit haben wir eine zweite Gleichung zwischen Volumen und Anzahl und können nun beides berechnen und nach dem ersten nunmehr auch die Masse. Diese Anzahl wurde von Loschmidt zuerst berechnet, auf das Mol umgerechnet nennt man sie auch Avogadro'sche Zahl.

Es ergibt sich demnach:

- die Anzahl der Moleküle pro Mol. zu $6,062 \cdot 10^{23}$
- die Masse des H-Atoms zu $1,64 \cdot 10^{-24}$ g
- der Radius des H_2 -Moleküls zu $1 \cdot 10^{-8}$ cm
- der Radius des Hg-Atoms zu $1,4 \cdot 10^{-8}$ cm.

Eines wird aus dieser Kleinheit der Atome sofort verständlich: daß es nicht möglich ist, die Atome direkt zu sehen; das Licht mit seiner Wellenlänge von 4000–8000 $\cdot 10^{-8}$ cm ist viel zu grob dazu.

Indessen wird aus den elektrochemischen und spektroskopischen Tatsachen klar, daß diese einfache Vorstellung keineswegs zutreffen kann, sondern daß elektrische Ladungen mit den Atomen wenigstens verknüpft sein müssen, vielleicht aber auch den Grundbestandteil ausmachen. Es ist hier nicht nötig, das jedem Chemiker Bekannte zu wiederholen. Das Ergebnis ist kurz das: Die Moleküle teilen sich bei der Lösung in elektrisch geladene Bestandteile, die Ionen; auch die Elektrizität ist atomistisch geteilt; jedes Ion trägt eine Ladung, die ein kleines ganzes Vielfache des elektrischen Elementarquantums ist; in Verbindung mit der Loschmidt'schen Zahl ergibt sich das elektrische Elementarquantum zu $4,74 \cdot 10^{-10}$ elektrost. Einheiten.

Ferner zeigt die Tatsache, daß es charakteristische Atomspektren gibt, das Vorhandensein elektrischer schwingungsfähiger Gebilde an.

Diesen noch ziemlich undefinierten Angaben gegenüber bedeutete es einen großen Schritt vorwärts, als es der Kathodenstrahlforschung von Hittorf bis J. J. Thomson und Lenard gelang, elektrische Teilchen aufzufinden, deren Ladung der des elektrischen Elementarquantums gleich, deren Masse aber nur den 2000. Teil der Masse des Wasserstoffatoms betrug, oder deren unmittelbar gemessenes Verhältnis von Ladung zu Masse 2000 mal größer war als beim Wasserstoffatom. Bekanntlich treten in einem Entladungsrohr nach Anlegen einer Spannung beim Evakuieren zuerst farbige Leuchterscheinungen auf, die bei fortschreitender Evakuierung verschwinden; an deren Stelle beginnt die der Kathode gegenüberliegende Wand zu fluorescieren und die Ursache dieser Fluoreszenz ist der Anprall der Kathodenstrahlen. Bei weiterem Auspumpen verschwindet diese Fluoreszenz wieder, kann aber selbst bei höchstem Vakuum wieder hervorgerufen werden, wenn die Antikathode entweder glühend gemacht oder mit Licht, besonders ultraviolett, bestrahlt wird. Bei näherer Untersuchung zeigen die Kathodenstrahlen die folgenden Eigenschaften: 1. sie üben mechanische Stoßwirkungen aus; 2. sie können andere Substanzen zum Leuchten anregen; 3. sie laden den von ihnen getroffenen Körper elektrisch negativ auf; 4. sie werden durch magnetische und elektrische Felder abgelenkt; 5. sie können Materie durchdringen, werden aber bei der Durchdringung zerstreut, verlieren ihre Geschwindigkeit und werden absorbiert.

Es geht aus diesem Verhalten zweifellos hervor, daß man es mit einer korpuskularen Strahlung zu tun hat und daß die Korpuskeln negative Ladung tragen. Aus der elektrischen und magnetischen Ablenkbarkeit läßt sich das Verhältnis von Ladung zu Masse e/m bestimmen.

Was lag unter diesen Verhältnissen näher als die — später im wieder bestätigte — Annahme, daß man es hier mit den Atomen der Elektrizität zu tun hätte, die weiterhin auch den einen Baustein der materiellen Atome darstellen müßten? Und H. A. Lorentz folgerte aus der Annahme, daß die Spektrallinien von schwingenden Elektronen emittiert würden, eine Veränderung des Spektrums im magnetischen Feld, die qualitativ und quantitativ mit der von Zeemann beobachteten übereinstimmte. Aber die Elektronen können auch nur der eine Baustein sein, denn da das Atom im Normalzustand elektrisch neutral ist, muß es ja aus der gleichen Anzahl negativer und positiver Teilchen bestehen.

Weiterhin aber waren besonders interessant die Ergebnisse über die Absorption der Kathodenstrahlen durch Materie. Stellen wir uns nämlich die Atome als Kugeln vor, so würden schon zwei Atomschichten für eine auffallende Korpuskel undurchdringlich sein. Da aber die Kathodenstrahlen viele Tausende von Atomschichten durchdringen konnten, zog Lenard daraus den Schluß, daß nur ein winzig kleiner Bruchteil, etwa der hunderttausendste Teil des gaskinetischen Querschnittes wirklich undurchdringlich sein kann, das Atom also als ein System von kleinen Kraftzentren in einem verhältnismäßig großen Raum aufzufassen ist, ähnlich wie das Sonnensystem aus kleinen Massen besteht, die durch große Zwischenräume getrennt sind. Die Streuung andererseits wies zum erstenmal direkt auf die atomistische Struktur hin, nämlich auf die Inhomogenität selbst der makroskopisch homogensten Substanzen. Absorption und Streuung erwiesen sich als unabhängig von der chemischen Bindung und als nur von der Masse der Atome

abhängig. Schließlich mußte L e n a r d, um das Absorptionsgesetz für schnelle Kathodenstrahlen zu erhalten, die Anzahl der Kraftzentren dem Atomgewicht proportional setzen. Ein solches Kraftzentrum nannte er Dynamide, die Dynamide war ein schwingendes System von Masse, positiver und negativer Ladung.

Man hat natürlich versucht in Analogie zu den negativen Elektrizitätsatomen positive aufzufinden. Es stellte sich aber heraus, daß die positive Elektrizität immer mit Masse von der Größe der Atommasse verbunden ist, so daß man sich Masse und positive Ladung als unlösbar verbunden zu denken hat; diese Einheit wird dann durch das im Verhältnis zu ihr fast masselose Elektron neutralisiert.

Zu einem vorläufigen Abschluß wurden diese Untersuchungen durch die Arbeiten R u t h e r f o r d s über α -Strahlen gebracht. Die radioaktiven Elemente senden drei Arten von Strahlen aus, die nicht ablenkbaren, sehr durchdringenden γ -Strahlen, die β -Strahlen, das sind Kathodenstrahlen sehr hoher Geschwindigkeit und die α -Strahlen, die aus schnellbewegten positiv geladenen Heliumatomen bestehen¹⁾. Die α -Strahlen erwiesen sich als ausgezeichnete Hilfsmittel der Atomforschung. Rutherford ließ nämlich diese α -Strahlen auf Materie, unter anderem auch auf Gase auffallen und beobachtete, daß die α -Teilchen meist unabgelenkt durchkamen, bis sie durch Geschwindigkeitsverlust ihren Strahlcharakter einbüßten, bisweilen aber außerordentlich starke Ablenkungen zeigten und daß diese starken Ablenkungen ihrer Größe und Anzahl nach nur abhängig waren von der Ordnungszahl der getroffenen Atomsorte im periodischen System. Das ließ sich am besten dadurch erklären, daß die ganze positiv geladene Masse auf einen Raum von der Größenordnung der L e n a r d s c h e n Dynamiden vereinigt ist und daß die Anzahl der positiven Elementarladungen dieses „Kernes“ gerade gleich ist seiner Ordnungszahl im periodischen System. Unter diesen Umständen nämlich kann es nur sehr selten vorkommen, daß ein α -Teilchen in so große Nähe einer Ladung kommt, daß es merklich beeinflusst wird, während andererseits für diesen Fall erhebliche Ladungen und Massen zur Verfügung stehen.

Die Elektronen, die das Atom neutral machen und die Träger der chemischen und optischen Eigenschaften sind, müssen nun wie Planeten den Kern umkreisen, in Abständen, die das Atom bis zum gaskinetischen Querschnitt erweitern. Das Atom ist eine Art P l a n e t e n s y s t e m.

Nunmehr teilte sich der Weg der Forschung in die Untersuchung des Kernes und die der Elektronenhülle. Der Kern ist verantwortlich für die radioaktiven Prozesse, für das Atomgewicht und bestimmt durch seine Ladung die Anzahl der umkreisenden Elektronen. Diese bestimmen die chemischen und optischen Eigenschaften. Wir werden uns zunächst mit den letzteren beschäftigen.

II.

Wie läßt sich nun die eigentümliche Stabilität dieses elektrodynamischen Systems erklären, die darin besteht, daß nicht nur ein Atom sich offenkundig nicht verändern kann, sondern auch darin, daß es nur ganz bestimmte Frequenzen emittiert; denn das R u t h e r f o r d s c h e Atom entspricht vollkommen dem Planetensystem der Sonne. Daß die Gravitation durch elektrische Anziehung ersetzt ist, ändert nichts an den Gleich-

gewichtsbedingungen. Nun ist es aber bekannt, daß der Zustand des Planetensystems durchaus von seiner Vorgeschichte abhängt und daß es in keiner Weise anders als durch die Vorgeschichte bestimmt ist, welche Umlaufzeiten den einzelnen Planeten zukommen. Deshalb ist es unmöglich, einem derartigen mechanischen oder elektrischen System nach der klassischen Physik bestimmte Schwingungszahlen zuzuordnen.

Unter diesen Umständen war es also notwendig von der anderen Seite auszugehen, nämlich von dem, was über Gesetzmäßigkeiten der Strahlung und der Spektren bekannt war. In der Thermodynamik waren diskontinuierliche Erscheinungen nicht mehr unbekannt. Planck hatte zeigen können, daß die Energieverteilung der Strahlung eines glühenden Körpers nur zu verstehen sei, wenn der emittierende Oscillator seine Energie nicht kontinuierlich verändern, sondern sie nur in ganz bestimmten Energiequanten abgeben und aufnehmen kann. Das war außerordentlich merkwürdig und widersprach nicht nur den bestimmten Vorstellungen über elektromagnetische Schwingungen, sondern auch dem alten Prinzip, daß die Natur keine Sprünge mache. Die Größe dieser Quanten ergab sich als nur abhängig von der Frequenz oder Schwingungszahl des Oscillators und damit der ausgesandten Schwingung, nämlich gleich dieser Schwingungszahl, multipliziert mit einer universellen Konstanten; diese Konstante bezeichnete P l a n c k mit h und bestimmte sie zu $6,45 \cdot 10^{-27}$ erg pro Sekunde.

Diese neue Lehre fand bald nicht nur Bestätigungen auf anderen Gebieten der Thermodynamik, sondern auch durch eine sehr merkwürdige Erscheinung auf dem Gebiete der Strahlungen. Wenn nämlich auf eine Metallplatte Licht auffällt, so wird das Licht nicht nur gespiegelt und gestreut, sondern die Metallplatte sendet auch Elektronen aus, d. h. ein Teil der auffallenden Lichtenergie wird in Bewegungsenergie von Elektronen umgewandelt. Nach den klassischen Vorstellungen sollte man nun annehmen, daß die Energie und damit die Geschwindigkeit dieser ausgelösten „Photoelektronen“ von der I n t e n s i t ä t des auffallenden Lichtes abhängt. Das war aber nicht der Fall, sondern es stellte sich heraus, daß die Geschwindigkeit nur von der Frequenz des auffallenden Lichtes abhängt. E i n s t e i n konnte nun auf Grund der Quantentheorie eine sehr einfache Erklärung dafür geben: das auffallende Licht von der Schwingungszahl ν ist in Energiequanten von der Energie $h \nu$ geteilt; dann steht für jeden dieser Einzelprozesse, die die Auslösung eines Photoelektrons zur Folge haben, die gleiche und nur von der Frequenz des Lichtes abhängige Energie zur Verfügung, während die Intensität nur mit der Anzahl dieser Einzelprozesse zu tun hat.

Für die Energie jedes ausgelösten Elektrons gilt dann die Gleichung $E = h \nu$, und genaue Nachmessungen konnten dieses Gesetz ausgezeichnet bestätigen. Auch dieses Gesetz widerspricht natürlich vollkommen den klassischen Vorstellungen, denn nach ihnen breitet sich das Licht kugelförmig in den Raum hinein aus, und die Energie, die auf einen kleinen Raumteil auffällt, hängt — außer von der Intensität der Lichtquelle — von der Entfernung der auffangenden Platte ab.

Aber auch auf dem Gebiete der Spektren waren merkwürdige Ergebnisse zutage getreten. Während zuerst die Linien der Spektren jedem Versuch der Ordnung zu trotzen schienen, war es zuerst Ende des vorigen Jahrhunderts B a l m e r gelungen, Gesetzmäßigkeiten im Spektrum des Wasserstoffes aufzuzeigen; Gesetzmäßigkeiten, in denen sonderbarerweise die ganzen Zahlen die Hauptrolle spielen. B a l m e r konnte die

¹⁾ Bei Behandlung der Kernphysik soll darüber noch ausführlicher gesprochen werden.

Linien dieses Spektrums in Serien und die einzelnen Linien einer solchen Serie mit großer Genauigkeit durch eine Formel wiedergeben, die — etwas umgeschrieben — lautet: $\nu = R \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$, worin ν die Schwingungszahl, R eine Konstante, die sogenannte Rydberg-Konstante, bedeutet und n die Werte der ganzen Zahlen von 3 aufwärts annimmt.

Entsprechende oder wenigstens sehr ähnliche Formeln ließen sich auch für andere Linien des Wasserstoffspektrums auch höherer Elemente aufstellen, wenn es auch keineswegs gelungen ist, alle oder auch nur die meisten Linien in Serien zu ordnen.

Durch diese Ausdrücke wird also die Schwingungszahl als Differenz zweier Terme ausgedrückt. Die große Bedeutung, die den Termen zukommt, ging aus dem Ritzschen Kombinationsprinzip hervor. Dieses besagt nämlich, daß in einem Spektrum alle Linien auftreten, die sich aus der Kombination der Terme dieses Spektrums ergeben. Wenn also zwei Serien bekannt sind, so ergeben sich weitere Serien aus der Kombination der variablen Terme.

Nachdem von verschiedenen Seiten auf alle mögliche Weise versucht war, ein Atommodell zu finden, das diesen verschiedenen Erfahrungen entsprach, gelang es Bohr durch zwei ebenso geniale und fruchtbare, wie für die klassische Physik absurde Prinzipien, diese Tatsachen zu verbinden. Das erste besagt, daß die Elektronenbahnen im Atom zwar den klassischen Gesetzen gehorchen, aber daß diese die Atombahnen nicht hinreichend bestimmen. Es kommt eine weitere Bedingung hinzu, die aus diesen klassisch möglichen Bahnen einzelne als allein stabile auswählt.

Zweitens findet in diesen stationären Bahnen im Widerspruch zur klassischen Elektrodynamik keine Ausstrahlung statt (in der Elektrodynamik ist jede ungleichförmige Bewegung einer Elektrizitätsmenge mit Ausstrahlung verbunden), sondern das Atom strahlt, wenn ein Elektron von einer stationären Bahn zu einer andern übergeht. Diese Übergänge sind mit einem Energieverlust verbunden, der gleich der Differenz der Energiewerte des Atoms in den beiden stationären Zuständen ist. Dieser Energieverlust übersetzt sich in eine Ausstrahlung von der Frequenz ν , für die entsprechend der Einsteinschen Gleichung für den photoelektrischen Effekt die Gleichung gilt:

$$AE = h\nu$$

oder ausgeschrieben

$$E_1 - E_2 = h\nu.$$

Dadurch wird zunächst erklärt, wieso überhaupt Linienspektren zustande kommen. Sodann, warum sich die Schwingungszahlen in den Spektren immer als Differenz zweier Terme darstellen; ferner die Gültigkeit des Ritzschen Kombinationsprinzips. Schließlich konnte Bohr dadurch ein Modell angeben, das in bezug auf die ausgesandten Spektrallinien in quantitativer Übereinstimmung mit den spektroskopischen Daten ist.

Spezialisiert man nämlich die Bohrschen Postulate auf das Rutherford'sche Atommodell, so haben wir einen Atomkern, um den nach den Keplerschen Gesetzen das Elektron sich in einer Ellipsen oder Kreisbahn bewegt. Die Bohrsche Zusatzbedingung ist, daß von allen diesen Bahnen nur einzelne mit ganz bestimmten Energiewerten zugelassen sind. Was bedeutet nun die Festlegung der Energie für die Keplerbahnen? Zunächst ist es klar, daß der Planet oder das Elektron eine bestimmte Bahn nur mit einer bestimmten Geschwindigkeit durchlaufen kann; denn jede Bahn ist ein Gleich-

gewichtszustand zwischen Anziehungskraft und Zentrifugalkraft; wird die Geschwindigkeit größer, so wächst die Zentrifugalkraft über die Anziehungskraft hinaus, und wird die Geschwindigkeit kleiner, so sinkt die Zentrifugalkraft und die Anziehungskraft überwiegt. Und da die Energie sich zusammensetzt aus potentieller Energie und Bewegungsenergie, d. h. der Entfernung vom Anziehungszentrum und der Geschwindigkeit, so ist mit der Energie der Radius oder die große Achse der Bahn völlig festgelegt. Ferner: Denken wir uns das Elektron aus dem Atomverband ins Unendliche, d. h. bis die Anziehungskraft des Kernes unmerklich wird, entfernt und nehmen wir zur genaueren Bestimmung an (wie das immer gemacht wird), daß das Elektron im Unendlichen ruhen, also keine kinetische Energie mehr haben soll, so ist dazu eine ganz bestimmte Arbeit notwendig, ganz entsprechend der Arbeit, die wir aufwenden müssen, um einen Stein zu heben. Die Größe der aufzuwendenden Energie hängt nur davon ab, wie weit das Elektron in seiner Anfangslage schon von dem Kern entfernt ist, also auf welcher Bahn es sich befindet. Wir können also die Bahnenergien den „Ablösungsarbeiten“ gleichsetzen. Die Bahnenergien sind dann also immer negativ, und zwar um so größer negativ, je näher die Bahn dem Kern liegt, und positive Energie wird zur Ausstrahlung frei, wenn das Elektron von einer äußeren Bahn zu einer inneren übergeht. Also: Wenn wir Keplerbahnen bestimmte Energiewerte zuschreiben wollen, so ist durch die klassischen mechanischen Gesetze bereits festgelegt:

1. Die Geschwindigkeit des Elektrons und die große Achse der Bahn.
2. Das Maß für die Energie als die Arbeit, die nötig ist, um das Elektron aus dieser Bahn ins Unendliche zu entfernen.

Nicht festgelegt dagegen durch klassische Gesetze sind die Ablösungsarbeiten für die einzelnen stationären Zustände selbst; diese müssen durch Vergleich mit den spektroskopischen Daten festgestellt werden und aus ihnen mußte Bohr versuchen, ein Gesetz für die Bahnen zu finden.

Die allgemeine Balmer-Ritzsche Formel für das Wasserstoffspektrum kann geschrieben werden:

$$\nu = \frac{R}{n'^2} - \frac{R}{n^2}$$

worin n' und n'' ganze Zahlen sind, n' größer als n'' . Aus den Bohrschen Prinzipien folgt:

$$h\nu = A'' - A' \text{ oder } \nu = \frac{A''}{h} - \frac{A'}{h} \quad (A = \text{Ablösungsarbeit})$$

und durch Vergleich beider Formeln:

$$\frac{A''}{h} = \frac{R}{n'^2}, \text{ also } A = \frac{h \cdot R}{n^2}$$

als die Ablösungsarbeit des Elektrons, die zu dem betreffenden Spektralterm gehört. Die Ablösungsarbeiten der Bohrschen stationären Zustände sind also den Quadraten der Termnummern umgekehrt proportional.

Durch diese Gleichsetzung geht die Bohrsche Formel in die Balmer-Ritzsche über und es ist daraus ohne weiteres verständlich, daß so das Bohrsche Modell in eine — wenn auch zunächst nur formale — Übereinstimmung mit den spektroskopischen Ergebnissen kommt.

Aber aus den nunmehr bekannten Ablösungsarbeiten kann man klassisch die Radien der Bahnen ausrechnen. Es ergibt sich dann, daß sich die Radien der Bahnen verhalten, wie die Quadrate der zu ihnen gehörigen Nummern. Also wie n'^2 zu n''^2 , wenn die Indices

n' und n' sind. Die engste Bahn ist auch die energieärmste, für sie ist die Ablösungsarbeit am größten, sie ist die Grundbahn, die das Atom im unangeregten Normalzustand hat, für die $n = 1$ ist. Der so berechnete Bahnenradius ist nun gleich dem gaskinetischen Atomdurchmesser. Dies ist immerhin eine bemerkenswerte Übereinstimmung.

Ferner: wenn man das Elektron entfernt, so hat man das Atom ionisiert, denn es ist nur noch der positive Kern übriggeblieben. Die Abtrennungsarbeit aus den Bahnen, also auch aus der Grundbahn ist nun bekannt und so muß sich aus rein spektroskopischen Daten die Ionisierungsarbeit ergeben. Auch hier konnte Bohr auf die Übereinstimmung mit der Erfahrung hinweisen.

Weiterhin gelang es Bohr auf Grund seiner Theorie der Rydberg-Konstante aus rein elektrischen Daten zu berechnen unter Zuhilfenahme einer sehr nahe liegenden und, wie sich später ergab, sehr fruchtbaren Zusatzannahme. Das dritte Keplersche Gesetz besagt, daß sich die Quadrate der Umlaufzeiten umgekehrt proportional zu den Kuben der großen Achsen verhalten $\omega^2 = \frac{k}{r^3}$. Dieses Gesetz kann auch auf die stationären Bahnen im Atom angewendet werden, also, da die Radien proportional sind den Quadraten der Termnummern,

$$\omega^2 = \frac{k^2}{(n^3)^3}, \quad \omega = \frac{k}{n^3}.$$

Würde also das Elektron, wie es klassisch notwendig wäre, in derselben Frequenz ausstrahlen, in der es umläuft, so müßten auch die ausgestrahlten Frequenzen der dritten Potenz der Termnummer umgekehrt proportional sein. Andererseits ergibt sich auch aus dem Bohrschen Atommodell, daß die Frequenzen, die ausgestrahlt werden, wenn das Elektron von der n ten auf die $n-1$ te Bahn übergeht, sich bei hohen Termnummern demselben Gesetz nähern, und zwar um so besser, je höher die Quantenzahlen oder Termnummern werden. Diese Korrespondenz zwischen der Bohrschen und der klassischen Theorie ist nicht so erstaunlich, wie es auf den ersten Blick scheint. Denn die Quantentheorie, auf die sich ja die Bohrsche Theorie stützt, besagt doch, daß die Quanten der Schwingungszahl proportional sind. Sie werden also um so kleiner, je kleiner die Schwingungszahlen werden; und je kleiner die Quanten sind, um so kontinuierlicher wird der Emissionsvorgang und um so mehr werden deshalb die klassischen Gesetze erfüllt sein. Für sehr kleine Schwingungszahlen geht also die Quantentheorie in die klassische Theorie über. Diese Analogie und Proportionalität veranlaßte nun Bohr, für den Grenzwert sehr kleiner Frequenzen (oder was dasselbe ist, sehr großer Termnummern) die Umlaufzahlen direkt den quantenmäßig zu erwartenden Frequenzen gleich zu setzen. Dadurch bekam er eine neue Gleichung zwischen Bahnenradius und Rydberg-Konstante und konnte diese nun aus den bekannten Größen e , m und h berechnen und erhielt sie vollkommen übereinstimmend mit dem spektroskopischen Wert.

Es fehlt nur noch ein rationaler Ausdruck für die Festlegung der stationären Zustände. Indessen ergab sich auch dafür ein überraschendes Ergebnis. Unter dem Impulsmoment einer solchen Bewegung, wie sie das Elektron beschreibt, versteht man das Produkt seiner Masse mal Geschwindigkeit mal dem Abstand vom Kern, und nun ergibt eine einfache mathematische Rechnung, daß für die stationären Zustände das Impulsmoment des Elektrons gleich ist einem ganzen Vielfachen der

Planckschen Konstanten h geteilt durch 2π . Damit ist nun auch eine Quantenregel für die stationären Bahnen gegeben von einer Einfachheit, daß sie sich auch auf andere Verhältnisse übertragen läßt.

Es wäre natürlich möglich gewesen, diese Regel als drittes zu den beiden andern Bohrschen Prinzipien zu stellen, und dann aus ihr alles weitere abzuleiten.

Im folgenden Abschnitt werden wir zeigen, wie sich die Bohrschen Prinzipien auf kompliziertere Verhältnisse als das H-Atom anwenden lassen. [A. 261.]

Über die Verbreitung des Jodes in der Natur und seine physiologische Bedeutung im pflanzlichen und tierischen Organismus¹⁾

von JULIUS STOKLASA, Prag.

Unter Mitwirkung von Dvořák, Bareš, Šilhavý, Štrupl.

(Eingeg. 30. Sept. 1926.)

Das in der unübersehbaren Länge der geologischen Zeiträume entstandene biogene Element Jod ist endogenen oder exogenen Ursprunges. Schon in der ersten Entwicklungsphase unseres Planeten war wahrscheinlich Jod vorhanden, und zwar als freies Jod in nebulearem Zustande. Namentlich aber in der letzten Phase, bei fortschreitender Verdickung der Erstarrungskruste, auf welcher sich die Wasserdünste kondensiert und zur Bildung der Hydrosphäre geführt haben, fand das Jod große Verbreitung. Das Jod findet sich in der Lithosphäre, Hydrosphäre und Atmosphäre. Seine größte Verbreitung verdankt das Jod den Prozessen der Eruption glutflüssiger, zum Teil durch Explosion zerstäubter Magmen, die sich nach den Massenausbrüchen früherer geologischer Zeitalter gegenwärtig auf die Tätigkeit der Vulkane beschränkt und mit der Exhalation von Gasen und Dämpfen durch Solfataren, Mofetten und Fumarolen in Verbindung steht.

Wir haben im Jahre 1906 Studien am Vesuv angestellt und fanden, daß tatsächlich alle Exhalationen, sowie die Lava, Lapillen, Bomben und Asche Jod enthalten. Und zwar konstatierten wir in der Lava einen Jodgehalt von 1082 γ Jod pro 1 kg. ($\gamma = 0,001$ mg.) Auch in dem Ammoniumchlorid, welches in großen Kristalldrusen in der Umgebung des Vesuvs vorkommt, konnten wir Jod konstatieren. Wir fanden pro 1 kg 1258 γ Jod.

Die gelben bis orange-roten Inkrustate von Schwefel, Gips und Alaun, welche sich in den Solfataren bei Neapel bilden, sind ebenfalls jodhaltig, und zwar beträgt der Jodgehalt pro 1 kg 1053 γ Jod. Das Vesuvian vom Vesuv enthält pro 1 kg 1073 γ Jod. In den Eruptionsprodukten des Mont Pelée auf der Insel Martinique fanden wir (1902) gleichfalls gewisse Mengen Jod, und zwar durchschnittlich 1654 γ Jod pro 1 kg. Alle aus der Erdtiefe aufsteigenden heißen Quellen juvenilen Ursprunges enthalten Jod, und zwar bis 6000 γ Jod pro 1 kg. Mineralquellen und deren Absätze enthalten manchmal Jod in großen Quantitäten, so daß sie als Jod-

¹⁾ In der neuesten Zeit wird der Verbreitung und der physiologischen Funktion des Jodes große Aufmerksamkeit geschenkt. Ich beschäftige mich mit meinen Mitarbeitern schon längere Zeit mit diesem Probleme, und diese Arbeit soll eine kurze Skizze der Resultate unserer Forschungen darstellen. Ich möchte hervorheben, daß die schönen und ausführlichen Untersuchungen von Th. v. Fellenberg, besonders die exakte Methode zur Bestimmung des Jodes uns neue Wege für unsere Forschungen gewiesen haben und es uns ermöglichen, unsere Untersuchungen zu vertiefen und zu erweitern.