

Wandlungen im physikalischen Weltbild¹⁾.

Von Prof. Dr. HANS REICHENBACH, Berlin.

Vorgetragen am 5. Dezember 1927 im Märkischen Bezirksverein des Vereins deutscher Chemiker, Berlin.

(Eingeg. 9. Dezember 1927.)

Wer vor etwa 50 Jahren das physikalische Studium begann, der lernte auf der Universität das Bild einer fertigen physikalischen Wissenschaft kennen, in der es wohl noch allerhand Einzelheiten zu entdecken gab — dessen Grundzüge aber bereits feststanden. Es war das Weltbild der klassischen Mechanik, das Weltbild eines Kopernikus, Galilei und Newton, in dessen weiten Rahmen sich das physikalische Wissen der damaligen Zeit einfügte; die Mechanik erschien darin als die Grundlage aller physikalischen Disziplinen, und alle Vorgänge erschienen letzten Endes geregelt durch die Newtonschen Grundgleichungen, die die Bewegung von Massenpunkten unter mechanischen Kräften bestimmen und damit das Urbild aller Naturerscheinungen überhaupt zu treffen schienen. Es war vor allem die mechanische Wärmetheorie, deren große Erfolge zu solchen weittragenden Konsequenzen berechtigen. Daß es gelungen war, die Wärme, sozusagen das Urbild einer nichtmechanischen Kraft, dennoch als Ausfluß der mechanischen Bewegungen der Moleküle hinzustellen, daß diese Erkenntnis den weittragenden Satz von der Erhaltung der Energie erklärt hatte — das waren in der Tat Erfolge, die zum Triumph der Mechanik führen mußten. Aber auch die Optik, soweit sie damals bekannt war, fügte sich diesem Rahmen ein. Denn auch die Wellenlehre des Lichts hatte man von jeher mechanisch aufgefaßt; es hatte niemals einem Zweifel unterlegen, daß es sich hier um elastische Wellen in einem mechanischen Medium handelte, und wenn auch die Aufklärung der Eigenschaften dieses Mediums noch nicht gelungen war, so glaubte doch jeder, daß die Lösung dieses Problems nur eine Frage der Zeit wäre. Einzig die elektrischen Phänomene enthielten noch einige dunkle Punkte, besonders in den damals eben aufkommenden Kenntnissen der Entladungserscheinungen in luftverdünnten Röhren; aber niemand rechnete ernstlich damit, daß hier etwa eine Schranke für die Geltung der Mechanik gegeben sei — der große Rahmen alles Geschehens schien in den Prinzipien der Mechanik unverrückbar festzustehen.

Was ist von diesem Weltbild heute noch übrig geblieben? Man kann nicht sagen, daß die damals bekannten Tatsachen heute als falsch erkannt seien — ist es doch das glückliche Schicksal aller Tatsachen, den bleibenden Bestand einer Wissenschaft auszumachen, der wohl durch neue Tatsachen vermehrt, nicht aber umgestoßen werden kann. Aber man muß sagen, daß diese Tatsachen auch so ziemlich das einzige sind, was von damals noch übriggeblieben ist. Gerade die erklärenden Prinzipien, die großen Gedankenzüge, die die Tatsachen erst zu einem Weltbild zusammenfassen und die den Stolz der damaligen Zeit ausmachten, haben sich gewandelt. Ja, es ist kaum zu erkennen, daß das heutige Weltbild überhaupt erst in stetiger Entwicklung aus jenem älteren Weltbild heraus erwachsen ist; der

Umschwung ist so groß, daß die Jüngeren der heutigen Generation sich gar nicht mehr bewußt sind, wie die neuen Einsichten erst Schritt für Schritt erkämpft werden mußten. Denn so sprunghaft die Entwicklung auch aus rückschauender Perspektive erscheint, zu verstehen ist sie schließlich doch nur aus dem Gedanken heraus, daß hier eine allmähliche Fortentwicklung der alten Ideen stattfand, die nur unter dem Eindruck der anstürmenden Fülle neuer Tatsachen schon innerhalb der Dauer eines Menschenlebens zu einem ganz neuen Weltbild führte.

Wenn wir im folgenden versuchen wollen, dieses neue Weltbild aufzurollen, so werden wir unsere Ausführungen am besten den zwei großen Theorienkreisen angliedern, die das neue Denken beherrschen: der Relativitätstheorie und der Quantentheorie. Von diesen beiden ist die Quantentheorie zwar die um einige Jahre ältere; aber wir werden in unserer Darstellung doch die Relativitätstheorie voranstellen, da diese heute bereits als im wesentlichen abgeschlossen betrachtet werden muß, die Quantentheorie dagegen in die gegenwärtig brennenden Fragen einmündet.

Die Relativitätstheorie hat zwei ganz verschiedene Wurzeln. Die eine geht in verhältnismäßig frühe Zeiten zurück, in die Zeiten von Newton und Leibniz; es hat damals eine ebenso bewegte Diskussion um die Relativität gegeben, wie wir sie in den letzten Jahren erlebt haben. Leibniz war der Verfechter der relativistischen Ansicht, Newton der des absoluten Raumes; damals freilich hat noch die absolutistische Ansicht gesiegt, und erst die Lehre Einsteins hat den endgültigen Sieg der relativistischen Ansicht begründet. Die andere Wurzel der Relativitätstheorie geht dagegen in die moderne Physik hinein, in die Elektrodynamik; mit ihr hängt die Relativierung des Zeitbegriffs zusammen. Merkwürdigerweise ist diese modernere Wurzel als erste von Einstein entwickelt und unter dem Namen der speziellen Relativitätstheorie schon 1905 veröffentlicht worden, während die ältere Wurzel erst 1915 von ihm zur allgemeinen Relativitätstheorie ausgebildet wurde. In der Tat muß man zugeben, daß eine relativistische Gravitationslehre schon viel früher möglich gewesen wäre; beweist doch die Machsche Kritik an der Newtonschen Mechanik, daß der zugrunde liegende Gedanke von der Relativität der Bewegung schon im Rahmen der klassischen Mechanik zu einer allgemeinen Relativitätstheorie hätte führen können. Eine solche Fortbildung ist jedoch nie versucht worden, wie man heute sagen muß, glücklicherweise; denn wir wissen jetzt, daß eine solche Lehre ohne Hinzunahme der relativistischen Zeitlehre zu falschen Resultaten geführt hätte. Aber wir wollen doch im folgenden unsere Darstellung dieser logischen Reihenfolge anpassen und mit der allgemeinen Relativität beginnen.

Wenn ich in einem Wort das Resultat der allgemeinen Relativitätstheorie kennzeichnen soll, so möchte ich es formulieren als die Erkenntnis von der physikalischen Natur des Raumes. Daß der Raum nicht eine

¹⁾ Vgl. hierzu auch Mark, Atombau und Quantentheorie, Ztschr. angew. Chem. 40, 16, 645 u. 1497 [1927] u. Sommerfeld, Theorie des periodischen Systems und Entwicklung der Wellenmechanik, ebenda 41, 1 [1928].

a priori vorgegebene Wesenheit bedeutet, deren Gesetze nicht Objekt der Naturforschung, sondern allein der mathematischen Wissenschaft sind — diese von Kant noch zuletzt am schärfsten formulierte Lehre ist es, die die allgemeine Relativitätstheorie endgültig widerlegt hat. Vorbereitet allerdings war diese Lehre schon durch die Entwicklung der Mathematik im letzten Jahrhundert. Denn die Entdeckung nichteuklidischer Geometrien war schon von Gauß, Riemann und Helmholtz richtig dahin interpretiert worden, daß es neben dem mathematischen ein physikalisches Problem des Raumes gibt, daß die Frage, welche von den verschiedenen Geometrien in der Wirklichkeit vorliegt, nur durch praktische Messungen im Raum zu entscheiden sei. Aber Einstein hat dieser Erkenntnis noch einen wesentlich neuen Gedanken hinzugefügt, der sie erst vollständig macht.

Um das zu verstehen, müssen wir einen Augenblick auf die Relativität der Bewegung eingehen. Es ist ja für jeden, der schon einmal über dieses Problem ein wenig nachgedacht hat, ein außerordentlich zwingender Gedanke, daß man von Bewegung nur relativ zu einem Bezugskörper sprechen kann, daß „Bewegung an sich“ eine sinnlose Vorstellung ist; aber diese Form der Relativität kann man nur kinematische Relativität nennen. Denn es ist ja gerade der Sinn der Newtonschen Mechanik, daß die Relativität sofort schwindet, wenn man nach den verursachenden Kräften der Bewegung fragt, daß also dynamisch die Relativität der Bewegung nicht zu halten ist. Darum war eine wirklich durchschlagende Begründung der Relativität erst möglich, als es Einstein gelang, die Relativitätstheorie zu einer Gravitationstheorie auszuarbeiten, welche den Kraftbegriff in die Relativierung einbezieht; erst damit gelang die Weiterführung der kinematischen Relativität zu einer dynamischen Relativität. In dieser Theorie wird nichts Geringeres ausgesprochen, als daß die Massen, gegen welche die Bewegung zu messen ist, auch zugleich die Bewegung in ihrem Kräfteverhältnis bestimmen. Wenn etwa die alte Ansicht lehrte, daß ein frei im Weltenraum dahineilender Massenpunkt sich geradlinig und gleichförmig bewegt, wenn man seine Bewegung gegen die Sternmassen als ruhende mißt, so lautet die entsprechende Einsteinsche Behauptung, daß diese Sternmassen zugleich diejenigen Größen sind, die diese Gleichförmigkeit der Bewegung kausal bestimmen. Die Massen des Weltraums erscheinen also als Ursache aller mechanischen Kräfte, nicht nur der Gravitationskraft wie bei Newton, sondern auch der Trägheitskraft.

Auf das Problem der Geometrie angewandt, bedeutet dies aber, daß auch die geometrischen Verhältnisse nichts an sich Feststehendes sind, sondern erst durch die Massen des Weltalls bestimmt werden. Dieser ganz neue Gedanke tritt also zur Lehre von der empirisch zu ermittelnden Geometrie noch dazu: die Geometrie ist eine Funktion der Massenverteilung. Je stärker die Masse, desto mehr ist der Raum in ihrer Umgebung gekrümmt; nur in größerer Entfernung von den Massen herrscht die euklidische Geometrie, während in ihrer Nachbarschaft nichteuklidische Verhältnisse herrschen. Diese tiefe Einsicht, die zugleich zu überraschenden physikalischen Resultaten wie der Lichtablenkung und der Rotverschiebung führte, bedeutet erst die eigentlich physikalische Fundierung der Lehre von der physikalischen Natur des Raumes; ihre Tragweite wird sich erst in der Physik der nächsten Generation ganz bemerkbar machen.

Die moderne Wurzel der Relativitätstheorie dagegen betrifft nicht unmittelbar den Raum, sondern die Zeit.

Als den zugrunde liegenden physikalischen Gedanken möchte ich das Prinzip von der Sonderstellung des Lichts formulieren. In der Tat kann man zeigen, daß die Lehre Einsteins in diesem Satz gipfelt; mit ihm hängt die Relativität der Gleichzeitigkeit zusammen, aber auch die Lehre von der Formänderung bewegter Körper und der Verzögerung bewegter Uhren²⁾. Und die wichtigste Teilbehauptung dieses Prinzips wieder ist die Behauptung von der Grenzstellung der Lichtgeschwindigkeit, die Aussage also, daß es nichts Rascheres geben kann als die elektrische Welle; denn natürlich ist diese Behauptung nur im Rahmen der elektromagnetischen Lichttheorie möglich gewesen, nach welcher das Licht nur einen schmalen Ausschnitt aus dem umfassenden Spektrum der elektrischen Wellen darstellt. Es wird hier nicht etwa behauptet, daß es nur bei dem gegenwärtigen Stande der Forschung nichts Rascheres gäbe als das Licht, sondern es wird die prinzipielle Behauptung aufgestellt, daß es aus naturgesetzlichen Gründen nichts Rascheres geben kann; das wird eben erst verständlich, wenn man die elektrische Welle als die Urform aller Wirkungsübertragung erkannt hat.

In diesen Rahmen gehört denn auch die zweite Grundbehauptung der speziellen Relativitätstheorie hinein, die unter dem Namen der Trägheit der Energie bekannt geworden ist. Masse und Energie ist dasselbe; die zwei getrennten Erhaltungsgesetze sind einzeln genommen falsch, es kann wohl Masse verschwinden und in Energie verwandelt werden, und umgekehrt — an Stelle dessen gilt nur noch ein einziges Erhaltungsgesetz: die Summe von Masse und Energie ist konstant. Es ist bekannt, wie diese Erkenntnis erst zu einem wirklichen Verständnis besonders der radioaktiven Erscheinungen geführt hat; mit ihr ist einer der ältesten physikalischen Grundbegriffe, der Begriff der Substanz, aufgelöst und in einen neuen tiefer fundierten Begriff übergeführt worden.

Mit diesen Gedanken kommen wir nun schon in den zweiten großen Problemkreis hinein, von dem wir hier sprechen wollen, in den Problemkreis der Quantentheorie; denn diese Theorie ist zu der beherrschenden Theorie der Materie geworden. Die Theorie ist erwachsen aus Fragen der Strahlungstheorie; im Jahre 1900 hat Planck, ausgehend von Untersuchungen über Wärmestrahlung, den kühnen Gedanken ausgesprochen, daß die bisherige kontinuierliche Theorie der Strahlung durch eine atomistische Theorie zu ersetzen sei. Die Atomtheorie, die sich für die Materie schon bewährt hatte, zieht damit in den Energiebegriff ein; die Energie ist quantenhafter Natur, ihr Atom ist das Energiequantum. Genauer ist bekanntlich nicht die Energie selbst, sondern die mit ihr zusammenhängende Größe der Wirkung die quantenhaft strukturierte Größe; aber auf diesen Unterschied brauchen wir hier nicht einzugehen. Wir wollen uns nur als Ausfluß dieser Unterscheidung merken, daß das Energieatom nicht für alle Sorten von Strahlung gleich groß, sondern eine Funktion der Wellenlänge ist; je kürzer die Wellenlänge, desto größer das zugehörige Energiequantum. Röntgenlicht besitzt deshalb sehr viel größere Energiequanten als sichtbares Licht oder gar die Wellen der drahtlosen Telegraphie.

Am Anfang schien es noch so, und Planck hat das wohl auch geglaubt, als ob dieser Atomismus von der Strahlung selbst auf die Materie abgeschoben werden

²⁾ Vgl. hierzu und für die philosophische Weiterführung der Relativitätstheorie die „Philosophie der Raum-Zeit-Lehre“ des Verfassers, die Januar 1928 bei de Gruyter, Berlin, erschien.

könnte, mit der die Strahlung in Wechselwirkung tritt. Danach besitzt der materielle Mechanismus, der das Licht erzeugt oder absorbiert, die quantenhafte Natur; er vermag eben nur ganze Lichtquanten abzugeben oder aufzunehmen, während die den Raum durchdringende Strahlung selbst keine Quantenstruktur in sich trägt. Aber diese Vorstellung zeigte sich doch bald als nicht haltbar. Es waren insbesondere die Erscheinungen des lichtelektrischen Effekts, deren quantitative Erfassung mittels des Einsteinschen photochemischen Äquivalenzgesetzes zur Vorstellung einer nadelartigen Strahlung führte, die aus einzelnen Energiequanten besteht. Danach werden die Lichtquanten wie nadelartige Projektile durch den Raum geschleudert; der Atomismus ist also nicht nur in der Materie bedingt, sondern das Strahlungsfeld selbst ist atomistischer Natur.

Es sieht fast so aus, als ob man damit auf die alte Newtonsche Emissionstheorie des Lichts zurückgegangen wäre; aber damit werden auch alle die Einwände wieder wach, die man der Newtonschen Theorie gemacht hatte und die mit unausweichlicher Notwendigkeit zur Wellentheorie geführt hatten. Zwar die kugelförmige Ausbreitung des Lichts, wie wir sie etwa um eine Lampe herum wahrnehmen, vermag die Lichtquantenlehre noch zu erklären; die gleichförmige Ausbreitung muß danach als ein statistischer Effekt aufgefaßt werden, der nur im kleinen sich in unregelmäßige Elementarprozesse auflöst. Anders dagegen steht es mit dem Kardinalzeugen der Wellentheorie, mit der Interferenz. Daß die Addition zweier heller Lichtstrahlen Dunkelheit ergeben kann, das ist erst verständlich, wenn man das Licht nicht als ein materielles Teilchen, sondern als eine Welle auffaßt, der neben einer die Stärke charakterisierenden Größe noch eine Phase zukommt; Interferenz ist nur verständlich als Überlagerung von Wellenberg und Wellental. Wenn aber das Licht aus einzelnen Lichtquanten besteht, so kann, selbst wenn diese Quanten eine wellenhafte Natur in sich tragen, also kurze Wellenstöße sind, eine dauernde Interferenz nicht eintreten. Lichtstrahlen, die verschiedene Wege gehen, müssen auch aus getrennten Nadelprojektilen bestehen, aber wenn selbst einmal die Phase dieser Projektile so getroffen sein sollte, daß Interferenz eintritt, so muß sich das doch schon bei dem nächsten Projektil verschoben haben. Es ist auch bis heute nicht gelungen, eine befriedigende Erklärung für die Interferenz vom Standpunkt der Lichtquantentheorie zu geben. Wenn trotzdem diese Theorie festgehalten wurde, so liegt das daran, daß es ebenso eine Reihe von Erscheinungen gibt, die wiederum vom Standpunkt der Wellentheorie nicht zu erklären sind; und es hat sich deshalb eine sehr unerfreuliche Doppelheit der Erklärungen herausgebildet, derart, daß für eine Reihe von Phänomenen die Wellentheorie, für eine andere Reihe die Quantentheorie zur Erklärung herangezogen wird. Insbesondere sind es die mit dem sogenannten Compton effekt zusammenhängenden Tatsachen, die den nadelartigen Charakter der Strahlung zu einem unausweichlichen Faktum machen. Der amerikanische Physiker Compton konnte nämlich zeigen, daß bei dem Zusammenstoß von Röntgenlicht und Elektronen, also bei der „Spiegelung“ von Röntgenlicht, eine eigentümliche Wellenlängenänderung eintritt, die als Absorption von Quanten gedeutet werden muß und sich aus einem Rückstoß des Elektrons berechnet, wie er bei der Ausschleudering einer einseitig gerichteten Strahlung eintreten muß, nicht aber bei Aussenden einer Kugelwelle. In einem späteren Versuch hat Compton

sogar die Richtung des ausgesandten Lichtquantums sozusagen photographieren können; dieser Versuch beweist die Realität der Lichtquanten noch zwingender als der erstgenannte, der sich schließlich auch noch vom Standpunkt der Wellentheorie in einer wenn auch befremdenden Weise erklären läßt.

Wir sind mit dem Bericht über die Comptonschen Versuche dem historischen Gang schon etwas vorausgeeilt, gehören sie doch einer Phase der Quantentheorie an, die nicht verständlich wäre ohne den Einzug der Quanten aus der Strahlung in ein anderes Gebiet: in das Gebiet des Atoms. Es ist die Bohrsche Theorie des Atoms, durch welche das Quantenprinzip eine ganz neue Anwendung und Vertiefung erfuhr; seit dem Jahre 1913, in welchem Bohr seine erste Arbeit publizierte, hat sich deshalb die Quantenliteratur in ungeahnter Weise vervielfacht.

Das Bohrsche Atommodell fußt auf dem Modell von Rutherford und ist deshalb ein Planetenmodell. Um den Zentralkörper, den positiven Kern, kreisen die Elektronen wie Planeten herum. Der neue Gedanke Bohrs aber besteht darin, daß er dieses Modell in Zusammenhang brachte mit den eigentümlichen Serien der Spektrallinien, die man schon lange kannte und für deren Gesetzmäßigkeit man vorher keine Erklärung besaß. Eben die Ganzzahligkeit in den Spektraltermen ist es, die Bohr auf den Gedanken brachte, in dem Modell des Atoms selbst die ganzzahligen Gesetze der Quantenstruktur anzunehmen. Dazu bedurfte es einer sehr befremdenden Annahme über den Vorgang der Strahlungserzeugung: während alle bisherigen Theorien in Übereinstimmung mit den Grundvorstellungen der Elektrodynamik die Strahlen aus dem Kreise der Elektronen erzeugt dachten, machte Bohr die Annahme, daß die Elektronen während ihres Umlaufs überhaupt keine Strahlung aussenden. Die Strahlung kommt vielmehr dadurch zustande, daß gelegentlich in diesem System kleine Weltkatastrophen stattfinden: ein Elektron stürzt gelegentlich aus seiner stabilen Bahn herab auf eine andere Bahn, und während des Sturzes sendet es die Lichtwelle aus. Die Stabilität der Bahn aber wird aus der Quantenvorstellung begründet: nur solche Bahnen sind stabil, deren Energie ein ganzes Vielfaches des Elementarquantums beträgt^{*)}. Und auch die Frequenz der ausgesandten Welle wird nach dem Quantenprinzip berechnet: der bei dem Sturz freiwerdende Energiebetrag wird in ein Strahlungsquantum umgesetzt, dessen Frequenz gerade so bemessen ist, daß sie zu diesem Energiequantum paßt.

Die Bohrschen Postulate waren in bewußtem Widerspruch zur Elektrodynamik ausgesprochen; sie haben damit eine eigentümliche Periode des theoretischen Probierens in der Physik eingeleitet. Daß die Elektrodynamik im allgemeinen richtig war, wurde ja nicht bezweifelt, im Gegenteil mußte dies für einen großen Teil der Rechnungen zum Atom selbst angenommen werden; nur an manchen Stellen sollte sie eine Ausnahme erleiden. Alle theoretischen Ansätze bestanden deshalb in einer Kombination der beiden widersprechenden Grundvorstellungen; es war dem Instinkt des Physikers überlassen, wann er die eine, wann die andere Grundannahme voraussetzen sollte. Diese Zeit ist deshalb charakterisiert durch das Auftreten von Regeln, die wie das Korrespondenzprinzip, das Pauliverbot u. a. für die Kombination der beiden Grundannahmen recht künstliche Vorschriften aufstellten. So

^{*)} Wir geben hier nur diese nicht ganz korrekte Formulierung, da die genaue Formulierung recht kompliziert lautet.

unbefriedigend ein solcher Zustand ist, man muß es bewundern, daß die Physiker den Mut dazu aufbrachten, ihn durchzuhalten. Mit dem Ideal der Physik als der systematischsten aller Wissenschaften ist dieser Zustand freilich sehr wenig vereinbar; dennoch ist er dem gewalt-samen Festhalten an dem systematischen Aufbau vorzu-ziehen, wenn die experimentellen Befunde mit dem alten System schlechterdings nicht mehr vereinbar sind. Es hat sich noch immer gezeigt, daß es richtiger ist, die theoretische Einheit hinten zu stellen und zuvor jedes Gebiet mit Methoden zu behandeln, die ihm angemessen sind, auch wenn damit Widersprüche der Gebiete unter-einander eintreten. Das Zusammenwachsen der Gebiete zu einer theoretischen Einheit ist Sorge einer späteren Zeit; und es wird gewiß auf diesem Wege früher erreicht als durch dogmatisches Theoretisieren, das sehr bald in die Irrwege phantastischer Spekulation führen muß.

Es waren die ungeheuren experimentellen Erfolge, die den Bohrschen Ansatz bei den Physikern be-festigten. Schon in seiner ersten Arbeit gelang Bohr die Berechnung der Rydbergschen Konstanten; und als dann die gesamte Spektralanalyse in den Dienst der Bohrschen Ideen trat, da fand man eine Bestätigung nach der anderen. Eine Reihe hervorragender Physiker, unter Führung von Sommerfeld, beteiligte sich an der Weiterführung und Vertiefung der Bohrschen Ideen. So wurde der innere Aufbau des Atoms er-schlossen; ja, es wurde noch viel mehr geleistet, denn es gelang, die chemischen Eigenschaften der Atome aus dem Bohrschen Modell zu erklären.

Bohr selbst hat hier wieder das meiste geleistet. Er hat in einer 1921 erschienenen längeren Arbeit den Aufbau der komplizierten Atome im Anschluß an das periodische System der Elemente durchkonstruiert; und wenn dieses Ziel auch quantitativ wegen der großen Komplikation der Rechnungen nicht gelingen konnte, so ist es doch wenigstens qualitativ gelungen. Wir wollen seinen Gedankengang hier kurz verfolgen.

Der Grundgedanke besteht darin, daß die chemische Verbindung als Vereinigung der Elektronenhüllen an-gesehen wird, die ein aus den beiden Kernen gebildetes System umkreisen und zusammenhalten. Es gibt nun be-stimmte Anordnungen von Elektronen, die besonders stabil sind; sie werden die chemisch inaktiven Stoffe kennzeichnen, während die instabilen Hüllen wegen ihrer Neigung zur Aufnahme weiterer Elektronen und zur Umbildung gerade die chemisch aktiven Stoffe charakterisieren. Der Wasserstoff z. B. besteht aus einem positiven Kern und einem Elektron. Das Elektron kann durch äußere Kraftfelder leicht abgespalten werden, dann haben wir das einfach positiv ionisierte Wasserstoffatom vor uns, das sehr reaktionsfähig ist und sich mit negativen Atomen gern verbindet. Das Helium besteht aus dem zweifach positiv geladenen Kern und zwei um-kreisenden Elektronen, deren Ebenen vermutlich geneigt sind; diese Anordnung erweist sich als sehr stabil, d. h. es gelingt sehr schwer, Helium zu ionisieren und reak-tionsfähig zu machen. Das nächste Element im periodi-schen System ist das Lithium, das drei Elektronen ent-hält; man kann nun zeigen, daß das dritte Elektron nicht mit den zwei anderen zu einer Schale vereint werden kann, sondern das heliumähnliche System des Atom-restes auf langgestreckter Ellipse wie ein Komet um-kreisen muß, der sich im allgemeinen weit außen auf-hält und nur selten in das Innengebiet des Atoms hinein-tritt. Dieses Elektron ist deshalb leicht abspaltbar und bewirkt die Reaktionsfähigkeit des Lithiums, seinen ein-wertigen, leichtmetallischen Charakter. Geht man in der Reihe fort, so kommt man beim Neon wieder an eine

stabile Anordnung, seine 10 Elektronen sind in einer Zweierschale und einer Achterschale angeordnet. Vorher liegen der Sauerstoff und das Fluor, die in der zweiten Schale nur sechs bzw. sieben Elektronen haben; diese Stoffe suchen ihre äußere Hülle durch Aufnahme von zwei bzw. einem Elektron zu ergänzen und treten deshalb leicht als zweifach bzw. einfach negatives Ion auf. Ver-bindungen entstehen durch Verschmelzen der Hüllen; beim Wasser z. B. sind die zwei Elektronen der beiden Wasserstoffatome mit den sechs äußeren des Sauerstoffs zu einer Achterschale vereinigt.

Die Bedeutung dieser Ideen besteht darin, daß mit ihnen eine elektrische Theorie der chemischen Valenz gegeben wird. Die chemischen Eigenschaften der Stoffe werden als elektrischer Natur erkannt; die Stabilität der chemischen Stoffe beruht auf dem Gesetz der Quanten, das die Planetenbahnen der Elektronen in ganz be-stimmte Rhythmen zwingt. Wir dürfen deshalb das Resultat dieser Entwicklung dahin formulieren, daß die Chemie zu einem Teil der Physik geworden ist. Ähnlich wie früher die Thermodynamik durch die Aufstellung der mechanischen Wärmetheorie zu einer Disziplin der Physik geworden ist, ist jetzt durch die Bohrsche Atomtheorie für die Chemie dieselbe Wendung eingetreten. Natürlich soll das nicht heißen, daß die Chemie in ihrer wissenschaftlichen Praxis von der Physik abgelöst werden könnte — sie bleibt im Sinne der Arbeitsteilung eine selbständige Wissenschaft, wie etwa die Elektro-technik eine selbständige Wissenschaft darstellt, obgleich auch sie der physikalischen Elektrodynamik Max-wells unterzuordnen ist. Sondern es heißt, daß die Chemie in ihren begrifflichen Grundlagen jetzt in der Physik verankert ist, daß es sich in chemischen Pro-zessen letzten Endes auch nur um physikalische Prozesse handelt, deren Gesetze von der Quantentheorie des Atoms erfaßt werden.

Nach diesem großen Erfolg in systematischer Hin-sicht muß als besonders unbefriedigend erscheinen, daß in der Quantentheorie des Atoms selbst die systematische Einheit noch nicht erreicht ist. Niemand hat dies mehr empfunden als die Physiker selbst, und die Vorstellung, daß einmal eine grundsätzliche Wendung gefunden werden müßte, hat im letzten Jahrzehnt ständig hinter allen physikalischen Arbeiten gestanden. Seit zwei Jahren nun sind neue theoretische Ansätze ausgearbeitet worden, die in der Tat diese grundsätzliche Wendung zu bedeuten scheinen und von denen jetzt noch kurz be-richtet werden muß.

Der erste Vorstoß ging aus von dem Göttinger Physiker Heisenberg und wurde von ihm gemein-sam mit Born und Jordan zu einer systematischen Theorie ausgearbeitet. Heisenberg stellt den Ge-danken in den Vordergrund, daß man in der Bohrschen Theorie, so gut sie zu den Beobachtungen stimmt, doch einen systematischen Fehler begeht: man behauptet mehr, als durch die Beobachtungen wirklich gewähr-leistet ist. Denn die Beobachtungen lehren wohl etwas über die Gesetze der ausgesandten Strahlung, nicht aber etwas über den inneren Aufbau des Atoms selbst; dieser wird vielmehr in ziemlich komplizierter Weise daraus erschlossen. Ja, nicht nur in komplizierter Weise, son-dern in einer prinzipiell unzulässigen Weise, denn man behauptet dabei etwas über die Bahn des Elektrons und stellt sich diese nach Analogie des Planetenbahnen vor, ohne daß doch die Beobachtungen selbst eine Tatsache enthalten, in denen eine direkte Wirkung der Elektronenbahn überhaupt vorkommt. Man sollte vielmehr, nach Heisenberg, sich das Atom als einen irgendwie gebauten Strahlungsmechanismus vorstellen, dessen Gesetze man

kennt, für dessen Vorstellung im einzelnen aber diese Gesetze gar keinen Anhaltspunkt enthalten. Man denke zum Vergleich etwa an eine Orgel, die man von fern hört: die Gesetze der ausgesandten Schallstrahlung, etwa ihre Klangfarbe und damit das Amplitudenverhältnis der Grund- und Obertöne, können wir durch Messungen ermitteln, aber es wäre gewiß verfehlt, wollten wir aus der beobachteten Strahlung auf die Farbe der Orgelpfeifen schließen. Ein Schluß von dieser Art liegt nach Heisenberg vor, wenn wir uns das Atom als Planetenmodell vorstellen.

Das positivistische Prinzip der Denkökonomie, das Prinzip der logischen Sparsamkeit, tritt damit in den Vordergrund der quantentheoretischen Überlegungen, und Heisenberg, Born und Jordan haben unter diesem Gesichtspunkt eine neue Quantenmechanik entwickelt, die die Bohrsche Vorstellung eines Modells entbehren zu können glaubt. Wie weit dieser Verzicht auf ein Modell allerdings geglückt ist, erscheint mir noch zweifelhaft; wichtiger als diese negative erkenntnistheoretische Begründung ist sicherlich die positive Wendung, die mit der Heisenbergschen Quantenmechanik in die begriffliche Beherrschung des Strahlungsmechanismus hineingekommen ist. Die Gesetze werden hier nicht mehr als Einzelgesetze, sondern sogleich als Aussagen über Gesamtheiten formuliert; das hat sich auch in der mathematischen Behandlung dieser Fragen ausgedrückt, in der mit Matrizen, d. h. mit gitterartig geordneten Gesamtheiten von Funktionen gearbeitet wird. So hat auch dieses physikalische Gebiet, wie wir das in der Entwicklung der Physik ja schon oft erlebt haben — ich erinnere nur an die Newtonsche Erfindung der Infinitesimalrechnung, an die Einsteinsche Tensorrechnung —, sich seine eigene Mathematik geschaffen, die wohl dem Fernstehenden das Verständnis des Neuen zunächst erschwert, die aber für ein wirkliches Erfassen unerläßlich ist, weil in ihr die neue Methode erst ihren erschöpfenden begrifflichen Ausdruck findet.

Nur wenige Monate nach dem Erscheinen der grundlegenden Arbeiten von Heisenberg, Born und Jordan wurde von einer ganz anderen Seite ein Vorstoß auf eine neue Quantenmechanik gemacht. Die Grundlage dieser Überlegungen ist von der Heisenbergschen völlig verschieden — um so überraschender ist es, daß sie, wie sich nachher herausgestellt hat, zu dem gleichen Ziele führen. Dieser Vorstoß geht zurück auf Schrödinger und ist unter dem Namen der Wellenmechanik bekanntgeworden.

Schrödinger fußte dabei auf Arbeiten des französischen Physikers de Broglie, welcher Wellenvorstellungen in die Mechanik des Massenpunktes eingeführt hatte. Man kann seine Ideen am besten verstehen, wenn man dabei die von ihm selbst benutzte Analogie zwischen Optik und Mechanik zugrunde legt. In der Optik hat man anfangs nur die geometrische Optik gekannt, nach welcher der Lichtstrahl das grundlegende Gebilde darstellt; erst später ist man zur Wellentheorie übergegangen und hat darin das genauere Hilfsmittel zur Beherrschung der Lichtvorgänge gefunden, das überall da anzuwenden ist, wo die grobe Vorstellung des Lichtstrahls versagt. Die bisherige Mechanik entspricht nach Schrödinger nur der geometrischen Optik; sie muß durch eine Wellenmechanik verfeinert werden, in der es keine Massenpunkte und ihre linienhaften Bahnen gibt, sondern statt dessen einen Schwingungsvorgang in einem kontinuierlich erfüllten Raum. Das Wasserstoffatom z. B. darf nach Schrödinger nicht als Planetenmodell angesehen

werden; vielmehr hat man sich in der Umgebung des positiven Kerns ein stetiges Feld aus negativer Elektrizität zu denken, das sich in stehenden Schwingungen befindet. Nun kann allerdings, wenn genügend viele dieser Schwingungen zugleich stattfinden, eine derartige Überlagerung eintreten, daß in den größten Teilen des Gebietes Interferenz und damit Auslöschung der elektrischen Dichte stattfindet und nur ein kleines Gebiet übrigbleibt, auf das sich die ganze Ladung konzentriert: dieses Gebiet läuft, wie Schrödinger gezeigt hat, als ein Ausfluß der eigenartigen Überlagerungsverhältnisse um den Kern herum. So entsteht der Massenpunkt als eine Interferenzerscheinung; für grobe Zwecke genügt es, ihn als punktförmig aufzufassen, für feinere Zwecke aber, und vor allem für Verhältnisse, in denen sich die Interferenz gar nicht in dieser Art ausbilden kann, muß überall die Wellenvorstellung Platz greifen.

Der Schrödingersche Ideengang ist also von dem Heisenbergschen vollständig verschieden, an Stelle des Prinzips der logischen Sparsamkeit tritt bei Schrödinger eher ein Überfluß an anschaulichen Vorstellungen, und darin hat für viele das Gewinnende der Wellenmechanik gelegen. Merkwürdigerweise aber konnte Schrödinger zeigen, daß trotz dieser Verschiedenheit die beiden neuen Ansätze auf dasselbe hinauskommen in ihren mathematischen Resultaten, ja, daß sie als mathematisch direkt identisch zu bezeichnen sind. Man kann sich kaum einen besseren Beweis für die Tatsache denken, daß die anschaulich-gedankliche Begründung einer Entdeckung und ihr begrifflicher Gehalt etwas völlig Verschiedenes sind; es scheint, als ob das philosophische Verständnis einer physikalischen Theorie viel schwerer zu finden ist als diese Theorie selbst und erst nach Vollendung des physikalischen Gehalts der Theorie langsam herausgearbeitet werden muß. So erscheint mir denn auch in philosophischer Hinsicht das letzte Wort über die neue Quantenmechanik noch nicht gesprochen. Wie die Situation gegenwärtig liegt, scheint die Schrödingersche anschauliche Deutung doch nicht haltbar zu sein; sie gerät schon bei dem nächsthöheren Element des periodischen Systems, dem Helium, in begriffliche Schwierigkeiten, während natürlich der physikalische Ansatz sich hier ebenso wie in den höheren Atomen voll bewährt. Die Heisenbergsche begriffliche Fundierung erscheint beständiger, wenn sie auch durch Heisenberg selbst bereits eine wesentliche Korrektur dahin erfuhr, daß räumliche Vorstellungen im kleinen in gewissem Sinne doch zulässig sind. Es scheint danach mehr auf eine Erschütterung des Gedankens der strengen Gesetzmäßigkeit alles Naturgeschehens hinauszukommen, auf einen Ersatz der Kausalität durch Wahrscheinlichkeitsgesetze; aber dieser Gedanke ist für jeden, der die Entwicklung des Gesetzesbegriffs in der Physik unter erkenntnistheoretischem Gesichtspunkt verfolgt hat, nicht einmal so verwunderlich. Man wird die begriffliche Klärung dieser Fragen noch abzuwarten haben; was wir aber als einen bewunderungswerten Erfolg anzusehen haben, ist, daß hier tatsächlich eine tiefgreifende theoretische Wendung gefunden wurde, in der wir nach allem Ermessen die entscheidende Wendung zur Lösung der grundsätzlichen Schwierigkeiten zu sehen haben.

Dazu berechtigt nicht nur die systematische Einheit, die in diesen neuen Ansätzen in vorbildlicher Form erreicht wurde; dazu berechtigt vor allem auch der Erfolg, den die neue Theorie bei der großen Probe vor den experimentellen Tatsachen gefunden hat. Die neue Quantenmechanik vermag die spektroskopischen Daten

besser zu erklären als die alte, die doch schließlich angesichts der immer wachsenden spektroskopischen Meßgenauigkeit in empfindliche Schwierigkeiten geriet. So ist es denn schließlich auch hier die Erfahrung, diese oberste Richterin aller naturwissenschaftlichen Erkenntnis, der der letzte Entscheid über diese tiefsten Fragen nach der Natur der Materie zugewiesen wird; niemals

hat sich die experimentelle Verankerung der Naturwissenschaft deutlicher gezeigt als in solchen Zeiten der theoretischen Krisen. Man braucht sich deshalb vor der neuen Krise des physikalischen Weltbilds nicht zu fürchten — es hat allen Anschein, daß es sich hier vielmehr um einen tiefgreifenden Gesundungsprozeß handelt.

[A. 145.]

Über Sexualhormone, insbesondere das Feminin.^{*)}

Von Dr.-Ing. F. WADEHN, Danzig.

(Eingeg. 10. Februar 1928.)

Vor zwei Jahren berichtete ich an dieser Stelle¹⁾ über die bis dahin vorliegenden Arbeiten über Sexualhormone. In der Zwischenzeit ist dieses Gebiet Gegenstand lebhafter Bearbeitung geworden, ohne daß allerdings das augenblickliche Hauptziel, die chemische Reindarstellung des weiblichen Sexualhormons — des Feminins — erreicht werden konnte.

Als wesentlichster Fortschritt der letzten beiden Jahre darf wohl die Auffindung der Wasserlöslichkeit des Feminins gebucht werden. Sie konnte erst festgestellt werden, als die fortschreitende Reinigung das Hormon von der Hauptmenge der öligen Ballaststoffe getrennt hatte. Den Nachweis erbrachte Laqueur²⁾, der aus Follikelsaft wässrige klare Hormonlösungen herstellte und der zeigen konnte, daß das Hormon in so gereinigtem Zustande durch Kollodium- und Pergamentmembranen dialysiert. Auch aus der Placenta³⁾ waren fast zur gleichen Zeit wässrige Femininlösungen erhalten worden, die allerdings das Hormon in verdünnter ammoniakalischer Lösung enthielten und jedenfalls unreiner waren als die aus dem Follikelsaft hergestellten.

Diese neue Erfahrung ist insofern wichtig, als sie zu ganz neuen Darstellungsmethoden geführt hat, die einfacher sind als die bisher benutzten. Für die Therapie eröffneten sich mit der Schaffung wasserlöslicher injizierbarer Präparate neue Möglichkeiten.

Die älteren Methoden zur Gewinnung des Feminins beruhen fast ausschließlich auf seiner Eigenschaft, in fast allen organischen Lösungsmitteln sehr leicht löslich zu sein und so eine gute Trennung von den meisten anderen Zellinhaltsbestandteilen zu ermöglichen.

Am vollkommensten ist diese Methode von Frankel und Herrmann, von Faust und weiter von Hartmann und Isler⁴⁾ mit der Placenta als Ausgangsmaterial ausgebaut worden. Die getrockneten Placenten werden mit organischen Lösungsmitteln ausgezogen, aus Aceton, Alkohol und Methylalkohol bei -10 bis -20° umgelöst und der Rückstand im hohen Vakuum fraktioniert. Als vorteilhaft wird eine Behandlung der Acetonlösung mit alkalischem Kohlepulver, die den letzten Rest freier Fettsäuren fortnimmt, und eine folgende Tiefkühlung, die die praktisch vollständige Entfernung des Cholesterins ermöglicht, beschrieben⁵⁾. Die Imprägnation der hormonhaltigen Organe mit alkalischen Mitteln, z. B. alkoholischer Natronlauge, und darauffolgender Trocknung und Extraktion mit Aceton bei 15° wird ebenfalls empfohlen⁶⁾. Der Destillation des gereinigten Extraktes im hohen Vakuum geht zweck-

mäßig eine Behandlung mit Essigsäureanhydrid vorher, bei der das Öl acetyliert aber das Hormon nicht geschädigt wird. Das Acetylprodukt siedet wesentlich gleichmäßiger und geht bei 185° und $0,02$ – $0,05$ mm Druck, also unter denselben Bedingungen über wie das Hormonöl selbst. Für die Zusammensetzung des Acetylproduktes werden folgende Zahlen angegeben: C 71,86 bis 73,42%, H 10,12 bis 10,80%. Das Hormonöl ist auch seiner chemischen Beschaffenheit nach ein Öl, d. h. es ist verseifbar und liefert bei der Spaltung ungesättigte Fettsäuren und einen Neutralkörper, der das wirksame Prinzip darstellt. Die Verseifung wird unter Luftabschluß ausgeführt, da die ohnehin große Sauerstoffempfindlichkeit des Hormons durch die Gegenwart von Alkali noch erhöht wird⁷⁾.

Zondek und Brahn⁸⁾ wandten die Verseifungsmethode auf den Follikelsaft an und erhielten dank dessen erheblich günstigerer Beschaffenheit zum Schluß ein wasserlösliches Präparat.

Fellner⁹⁾, Loewe¹⁰⁾, Glimm und Wadehn¹¹⁾ beschreiben Verfahren, die darauf beruhen, daß die alkoholischen unreinen Hormonlösungen mit Wasser bis zu einem bestimmten Prozentgehalt versetzt werden. Es ist aber eigentümlicherweise durch immer weitere Verdünnung oder Abdunsten des Alkohols nicht möglich, das Hormon so ganz von den wasserunlöslichen Stoffen zu befreien. Glimm und Wadehn arbeiteten mit einem sorgfältig vorgereinigten Hormonextrakt aus Placenta und fanden, daß die Verteilung des Feminins zwischen ausfallendem Öle und alkoholisch wässriger Phase sich bei einem Gehalt von etwa 40% Methylalkohol umkehrt. Bis zu dieser Verdünnung bleibt das Hormon im Alkohol, fällt aber dann beim vorsichtigen Verjagen des Alkohols im Vakuum mit den sich weiterhin abscheidenden Ölen aus. Immerhin gelang es auf diesem Wege und unter Benutzung der ebenfalls neu aufgefundenen Petrolätherunlöslichkeit des Hormons, auch aus der Placenta das Feminin auf einen Reinheitsgrad zu bringen, wie es vorher nur bei Präparaten aus dem Follikelsaft zu errreichen gewesen war. $0,008$ mg dieses Präparates genügten, um die Brunst an der kastrierten Maus voll zum Ablauf zu bringen¹²⁾. Wurde der vorgereinigte Placentaextrakt in sehr viel Petroläther gegossen, so fiel ein wesentlicher Teil des Hormons zusammen mit einem bräunlichen Harz aus, die beide zusammen in wässrigem Ammoniak spielend leicht löslich waren.

Die Unlöslichkeit des Hormons in Petroläther hatten auch Ralls, Jordan und Doisy¹³⁾ benutzt,

^{*)} Vgl. auch Ztschr. angew. Chem. 40, 1921 ff. u. 1465 [1927].

¹⁾ Ztschr. angew. Chem. 39, 468 [1926].

²⁾ Laqueur, Hart, de Jongh u. Wijsenbeek, Dtsch. med. Wchschr. 1926, Nr. 1 u. 2; Ztschr. angew. Chem. 40, 1926 [1927].

³⁾ Glimm u. Wadehn, Biochem. Ztschr. 166, 155 [1925].

⁴⁾ Hartmann u. Isler, ebenda 175, 46 [1926].

⁵⁾ Schw. Pat. 113 835.

⁶⁾ Schw. Pat. 117 282.

⁷⁾ Schw. Pat. 120 097.

⁸⁾ Zondek, Klin. Wchschr. 1926, Nr. 27.

⁹⁾ D. R. P. 420 438.

¹⁰⁾ Loewe, Zentralblatt Gyn. 1925, Nr. 31.

¹¹⁾ Glimm u. Wadehn, Biochem. Ztschr. 179, 3 [1926].

¹²⁾ Glimm u. Wadehn, Klin. Wchschr. 1927, Nr. 21.

¹³⁾ Ralls, Jordan u. Doisy, Journ. biol. Chemistry 69, 357 [1926].