

Zur Erinnerung  
an Erwin Schrödinger

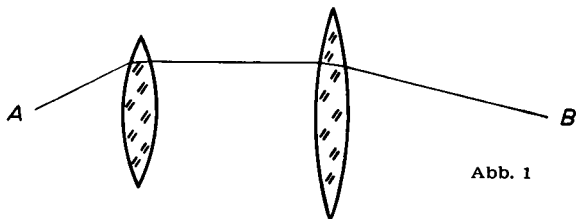
† am 4. Januar 1961

Der Grundgedanke  
der Wellenmechanik\*)

Von Erwin Schrödinger



Wenn ein Lichtstrahl durch ein optisches Instrument geht, beispielsweise durch ein Fernrohr oder ein photographisches Objektiv, so erfährt er an jeder brechenden oder spiegelnden Fläche eine Richtungsänderung. Der Strahlengang läßt sich konstruieren, wenn man die beiden einfachen Gesetze kennt, welche die Richtungsänderungen beherrschen: das Brechungsgesetz, das vor ein paar Hundert Jahren von Snellius entdeckt wurde, und das



Spiegelungsgesetz, das schon vor mehr als zweitausend Jahren dem Archimedes bekannt war. Abb. 1 zeigt als einfaches Beispiel einen Strahl A—B, der an jeder der vier Grenzflächen von zwei Linsen eine Brechung erfährt, die von dem Snelliusschen Gesetz beherrscht zu denken ist. Unter einen viel allgemeineren Gesichtspunkt hat Fermat den Gesamtverlauf eines Lichtstrahls zusammengefaßt. Das Licht pflanzt sich in verschiedenen Medien verschieden schnell fort, und die Strahlbahn ist so, als ob es dem Licht darauf ankäme, *so schnell wie möglich* den Ort zu erreichen, den es erreicht. (Dabei darf man, nebenbei bemerkt, *irgendzwei* Punkte entlang dem Strahl als Anfangs- und Endpunkt ansehen.) Die geringste Abweichung von dem

\*) Nobelvortrag, gehalten zu Stockholm am 12. Dezember 1933, entnommen aus E. Schrödinger „Was ist ein Naturgesetz?“ Verlag R. Oldenburg, München - Wien, 1962

wirklich eingeschlagenen Weg würde eine Verzögerung bedeuten. Das ist das berühmte Fermatsche *Prinzip der kürzesten Lichtzeit*, welches das gesamte Schicksal eines Lichtstrahls in wunderbarer Weise durch eine einzige Aussage bestimmt und auch den allgemeineren Fall mitumfaßt, daß die Beschaffenheit des Mediums nicht sprunghaft an einzelnen Flächen, sondern allmählich von Ort zu Ort variiert. Ein Beispiel liefert die Erdatmosphäre. Je tiefer ein von außen kommender Lichtstrahl in sie eindringt, um so lang-

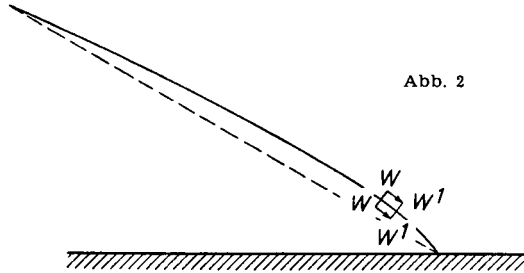


Abb. 2

samer läuft er in der dichter und dichter werdenden Luft. Und wenn die Unterschiede in der Fortpflanzungsgeschwindigkeit auch nur äußerst gering sind, so fordert doch das Fermatsche Prinzip unter diesen Umständen, daß der Lichtstrahl sich erdwärts krümmt (Abb. 2), denn so bleibt er etwas länger in den höheren „schnelleren“ Schichten und kommt rascher ans Ziel als auf dem kürzeren geraden Weg (in der Figur gestrichelt; das kleine Viereck  $WW'W''W'''$  möge vorläufig unbeachtet bleiben). Ich denke, Sie haben wohl alle schon bemerkt, daß die Sonne, wenn sie tief am Horizont steht, nicht kreisrund, sondern abgeplattet aussieht; ihr lotrechter Durchmesser erscheint verkürzt. Das ist eine Folge dieser Strahlenkrümmung.

Nach der Wellentheorie des Lichtes haben die Lichtstrahlen eigentlich nur fiktive Bedeutung. Sie sind nicht physische Bahnen irgendwelcher Licht-

Abb. 3

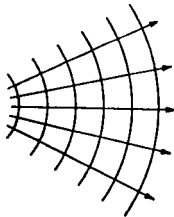
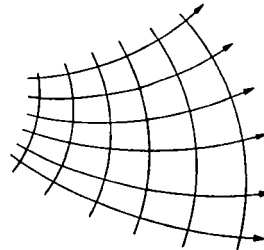


Abb. 4



teilchen, sondern eine mathematische Hilfskonstruktion, die sogenannten Orthogonaltrajektorien der Wellenflächen, gleichsam gedachte Führungslinien, die an jeder Stelle in die Richtung senkrecht zur Wellenfläche weisen, in der letztere fortschreitet (vgl. Abb. 3a, die den einfachsten Fall konzentrisch kugelförmiger Wellenflächen und demgemäß geradliniger Strahlen darstellt, während Abb. 3b den Fall gekrümmter Strahlen erläutert.) Es nimmt wunder, daß ein so wichtiges allgemeines Prinzip wie das Fermatsche seine Aussage

direkt auf diese mathematischen Hilfslinien bezieht, nicht auf die Wellenflächen, und man könnte aus diesem Grunde geneigt sein, es nur für ein mathematisches Kuriosum zu halten. Aber weit gefehlt. Erst vom Standpunkte der Wellentheorie wird es richtig verständlich und hört auf, ein göttliches Wunder zu sein. Vom Wellenstandpunkt ist nämlich die sogenannte *Krümmung* des Lichtstrahls viel unmittelbarer verständlich als *Schwenkung* der Wellenfläche, die trivialerweise erfolgen muß, wenn benachbarte Teile einer Wellenfläche verschieden schnell fortschreiten; genau wie etwa eine Kompanie Soldaten im Frontmarsch das Kommando „Rechts schwenkt“ dadurch ausführt, daß die Leute verschieden große Schritte machen, der rechte Flügelmann die kleinsten, der linke die größten. Zum Beispiel bei der atmosphärischen Strahlenbrechung (Abb. 2) muß das Wellenflächenstückchen  $WW$  notwendig eine Rechtsschwenkung nach  $W^1W^1$  vollziehen, weil doch sein linker Teil in etwas höherer, dünnerer Luft liegt und daher rascher fortschreitet als der rechte, tiefer gelegene<sup>1)</sup>. Bei näherem Zusehen stellt sich nun heraus, daß das Fermatsche Prinzip vollkommen *inhaltsgleich* ist mit der trivialen und selbstverständlichen Behauptung, daß — bei vorgegebener örtlicher Verteilung der Lichtgeschwindigkeit — die Wellenfront in der angegebenen Art schwenken muß. Ich kann das hier nicht beweisen, will aber versuchen, es plausibel zu machen. Denken Sie sich wieder die Reihe Soldaten im Frontmarsch. Zur Sicherheit, damit die Reihe ausgerichtet bleibe, sollen die Leute durch eine lange Stange verbunden sein, die jeder fest in der Hand hält. Richtungskommando wird keines gegeben, der Befehl lautet bloß: Jeder marschiere oder laufe, so schnell er kann. Wenn nun die Beschaffenheit des Bodens langsam von Ort zu Ort wechselt, so wird bald der rechte, bald der linke Flügel rascher vorankommen, und es werden ganz von selbst Schwenkungen auftreten. Nach längerer Zeit wird man bemerken, daß die gesamte durchlaufene Bahn nicht geradlinig, sondern irgendwie gekrümmt ist. Daß diese gekrümmte Bahn genau diejenige ist, auf welcher der jeweils erreichte Ort nach Maßgabe der Terrainbeschaffenheit *am raschesten* zu erreichen war, ist zum mindesten recht plausibel, weil jeder von den Leuten doch sein Bestes getan hat. Auch kann man bemerken, daß die Schwenkung sich immer nach der Richtung hin vollzieht, in welcher die Terrainbeschaffenheit schlechter wird, so daß es zum Schluß so aussieht, als hätten die Leute absichtlich um eine Gegend, wo sie langsam vorwärtskommen würden, „einen Bogen gemacht“.

So erscheint das Prinzip von Fermat geradezu als die *triviale Quintessenz* der Wellentheorie. Darum war es eine recht merkwürdige Sache, als eines Tages Hamilton die Entdeckung machte, daß auch die wirkliche Bewegung von Massenpunkten in einem Kraftfeld (beispielsweise eines Planeten auf seinem Weg um die Sonne oder eines geworfenen Steins im Schwerfeld der Erde) von einem ganz ähnlichen allgemeinen Prinzip beherrscht wird, das seither den Namen seines Entdeckers trägt und berühmt gemacht hat. Das Hamiltonsche Prinzip besagt zwar nicht genau dies, daß der Massenpunkt

1) Beiläufig sei hier auf einen Punkt hingewiesen, in dem die *Snelliussche* Auffassung versagt. Ein horizontal ausgesandter Lichtstrahl sollte horizontal bleiben, weil doch in horizontaler Richtung der Brechungsindex nicht variiert. In Wahrheit krümmt ein horizontaler Strahl sich stärker als jeder andere, was nach der Vorstellung der schwenkenden Wellenfront ganz selbstverständlich ist.

den raschesten Weg wählt, aber doch etwas so ähnliches — die Analogie zum Prinzip der kürzesten Lichtzeit ist so eng, daß man vor ein Rätsel gestellt war. Es schien so, als hätte die Natur ein und dieselbe Gesetzmäßigkeit zweimal auf ganz verschiedene Weise verwirklicht: das eine Mal beim Licht vermittelt eines ziemlich durchsichtigen Wellenspiels, das andere Mal bei den Massenpunkten, wo man gar nicht durchsah, es sei denn, daß man auch ihnen irgendwie Wellennatur zuschreiben wollte. Und das schien fürs erste ausgeschlossen. Denn die „Massenpunkte“, an denen die Gesetze der Mechanik wirklich experimentell bestätigt waren, waren zu der Zeit bloß die großen, sichtbaren, zum Teil *sehr* großen Körper, die Planeten, für die so etwas wie „Wellennatur“ gar nicht in Frage zu kommen schien. Die kleinsten, letzten Bausteine der Materie, die wir heute in viel eigentlicherem Sinn „Massenpunkte“ nennen, waren damals noch etwas rein Hypothetisches. Erst im Anschluß an die Entdeckung der Radioaktivität führte eine ständige Verfeinerung der Meßmethoden dazu, daß man die Eigenschaften dieser Korpuskeln oder Partikeln im einzelnen studieren konnte, ja daß man heute die Bahnen solcher Korpuskeln nach dem sinnreichen Verfahren C. T. R. Wilsons zu photographieren und (stereophotogrammetrisch) sehr genau auszumessen versteht. Soweit die Messungen reichen, bestätigen sie für die Korpuskeln die Gültigkeit derselben mechanischen Gesetze wie für große Körper, Planeten usw. Im übrigen aber stellte sich heraus, daß natürlich nicht das Molekül, aber auch nicht das einzelne Atom als „letzter Baustein“ gelten kann, sondern auch das Atom ist noch ein recht kompliziert zusammengesetztes System. Es entstanden Bilder in unserem Geist von dem Aufbau der Atome aus Korpuskeln, Bilder, die eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Planetensystem zu haben schienen. Und es war natürlich, daß man zunächst versuchte, hier dieselben Bewegungsgesetze für gültig zu halten, die sich im Großen so wundervoll bewährt hatten. Das heißt, man wendete auch auf das „Innenleben“ des Atoms die Hamiltonsche Mechanik an, die, wie ich vorhin sagte, im Hamiltonschen Prinzip gipfelt. Daß dieses letztere eine sehr enge Analogie zum optischen Prinzip von Fermat hat, war inzwischen fast in Vergessenheit geraten. Oder wenn man daran dachte, so sah man das nur als einen kuriosen Zug der mathematischen Theorie an.

Es ist nun sehr schwer, ohne näheres Eingehen auf die Details einen rechten Begriff davon zu geben, welchen Erfolg oder Mißerfolg man mit diesen klassisch-mechanischen Bildern des Atoms erzielte. Auf der einen Seite erwies sich gerade das Hamiltonsche Prinzip als der treueste und zuverlässigste Wegweiser, den man schlechterdings nicht entbehren konnte; auf der anderen Seite mußte man sich aber, um den Tatsachen gerecht zu werden, den groben Eingriff ganz neuer, unverständlicher Forderungen gefallen lassen, der sogenannten Quantenbedingungen und Quantenpostulate. Grobe Mißtöne in der Symphonie der klassischen Mechanik — und doch seltsam an sie anklingend, gleichsam auf demselben Instrument gespielt. Mathematisch läßt es sich so ausdrücken: Während das Hamiltonsche Prinzip nur verlangt, daß ein gewisses Integral ein Minimum sein muß, ohne daß durch diese Forderung der Zahlenwert des Minimums festgelegt wäre, wird jetzt gefordert, daß der Zahlenwert des Minimums auf ganzzahlige Vielfache einer universellen Naturkonstante, des Planckschen Wirkungsquantums, beschränkt sei. — Doch dies nur nebenbei. — Die Situation war ziemlich ver-

zweifelt. Hätte die alte Mechanik ganz versagt, es hätte noch hingehen mögen. Dann hätte man die Bahn frei gehabt, um eine neue zu ersinnen. So aber stand man vor der schwierigen Aufgabe, ihre *Seele* zu retten, deren Hauch fühlbar in diesem Mikrokosmos waltete, und doch ihr sozusagen abzuschmeicheln, daß sie die Quantenbedingungen nicht mehr als grobe Eingriffe, sondern als aus ihrem eigenen inneren Wesen fließend anerkennen möge.

Der Ausweg bot sich gerade in der schon oben angedeuteten Möglichkeit, daß man auch in dem Prinzip von Hamilton den Ausfluß eines Wellenspielles vermutet, das den punktmechanischen Vorgängen eigentlich zugrunde liege, genau wie man es bei den Erscheinungen des Lichtes und dem sie beherrschenden Prinzip von Fermat schon lange gewohnt war. Die einzelne Bahn eines Massenpunktes verliert dadurch allerdings ihre eigentliche physische Bedeutung und wird zu etwas Fiktivem wie der einzelne isolierte Lichtstrahl. Aber die Seele der Theorie, das Minimalprinzip, bleibt nicht nur unangetastet, sondern enthüllt erst bei wellenmäßiger Betrachtung seine wahre, einfache Bedeutung, wie schon oben ausgeführt wurde. Die neue Theorie ist eigentlich gar keine *neue* Theorie, sie ist eine völlig organische Weiterbildung, fast möchte man sagen nur eine feinere Auslegung der alten. Aber wie konnte dann diese neue „feinere“ Auslegung zu merklich anderen Resultaten führen, wie konnte sie in der Anwendung auf das Atom Schwierigkeiten beheben, denen die alte nicht zu begegnen wußte? Wie konnte sie jene groben Eingriffe erträglich oder gar sich zu eigen machen?

Auch diese Dinge lassen sich am besten durch die Analogie mit der Optik verdeutlichen. Wohl nannte ich vorhin das Prinzip von Fermat mit gutem Recht die Quintessenz der Wellentheorie des Lichtes. Trotzdem kann es das genauere Studium des Wellenvorganges selbst nicht entbehrlich machen. Die sogenannten Beugungs- und Interferenzerscheinungen des Lichtes lassen sich nur verstehen, wenn man den Wellenvorgang im einzelnen verfolgt, weil es dabei nicht bloß darauf ankommt, wohin die Welle schließlich gelangt, sondern auch darauf, ob sie in einem bestimmten Augenblick mit einem Wellenberg oder mit einem Wellental dort eintrifft. Bei älteren, größeren Versuchsanordnungen traten diese Erscheinungen nur als kleine Details auf und entgingen der Beobachtung. Sobald sie aber auffielen und richtig, wellenmäßig gedeutet waren, war es leicht, Versuche zu ersinnen, bei denen sich die Wellennatur des Lichtes nicht bloß in feineren Details, sondern ganz grob im Gesamtcharakter der Erscheinung äußert.

Lassen Sie mich das an zwei Beispielen erläutern, zunächst an dem eines optischen Instrumentes, wie Fernrohr, Mikroskop u. dgl. Mit einem solchen will man ein scharfes Bild erzeugen, das heißt man strebt darnach, daß alle Strahlen, die von einem Objektpunkt ausgehen, sich wieder in einem Punkt vereinigen, dem sogenannten Bildpunkt (vgl. Abb. 5). Anfangs glaubte man, daß dem nur die geometrisch-optischen Schwierigkeiten im Wege stehen, die allerdings groß genug sind. Später zeigte sich, daß auch bei den bestkonstruierten Instrumenten die Strahlenvereinigung wesentlich schlechter ist, als zu erwarten wäre, wenn wirklich jeder Strahl unabhängig von seinen Nachbarstrahlen genau dem Fermatschen Prinzip folgte. Das Licht, das von einem Objektpunkt ausgeht und vom Instrument aufgenommen wird, vereinigt sich hinter demselben nicht wieder in einem Punkt, sondern verteilt

sich auf eine kleine kreisrunde Fläche, ein sog. Beugungsscheibchen, das übrigens nur deshalb meistens ein Kreis ist, weil die Blenden und Linsenränder es zu sein pflegen. Die Ursache der Erscheinung, die man *Beugung* nennt, ist nämlich die, daß nicht die ganzen Kugelwellen, die von dem Objektpunkt ausgehen, vom Instrument aufgenommen werden können. Die Linsenränder und eventuelle Blenden schneiden nur einen Teil aus den Wellenflächen heraus (vgl. Abb. 6) und — wenn ein anschaulicher Aus-

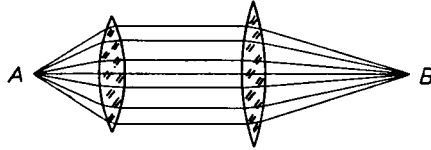


Abb. 5

druck erlaubt ist — die verletzten Wundränder widersetzen sich der strengen Vereinigung in einem Punkt und erzeugen das etwas verschwommene oder verwaschene Bild. Die Verwaschenheit hängt aufs engste mit der *Wellenlänge* des Lichtes zusammen und ist wegen dieses tiefliegenden theoretischen Zusammenhanges völlig unvermeidbar. Anfangs kaum beachtet, beherrscht und begrenzt sie die Leistungsfähigkeit des modernen Mikroskops, das aller anderen Abbildungsfehler Herr geworden ist, ganz und gar. Von Gebilden, die nicht viel gröber oder gar noch feiner sind als die Wellenlän-

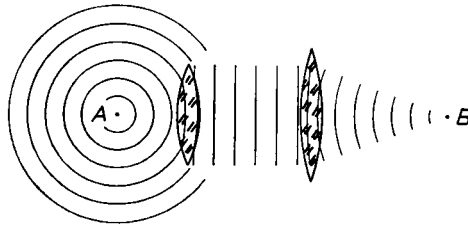


Abb. 6

gen des Lichtes, erhält man Abbildungen, die nur entfernte oder gar keine Ähnlichkeit mit dem Original haben. Ein zweites, noch einfacheres Beispiel ist der Schatten, den eine kleine, punktförmige Lichtquelle von einem undurchsichtigen Gegenstand auf einem Schirm entwirft. Um die Form des Schattens zu konstruieren, hat man jeden Lichtstrahl zu verfolgen und nachzusehen, ob der undurchsichtige Körper ihn hindert, auf den Schirm zu gelangen oder nicht. Der Schattenrand ist gebildet durch diejenigen Lichtstrahlen, die gerade noch streifend am Rande des Körpers vorbeikommen. Erfahrungsgemäß ist nun der Schattenrand auch bei punktförmiger Lichtquelle und völlig scharfer Begrenzung des schattenwerfenden Gegenstandes nicht wirklich scharf. Die Ursache davon ist wieder dieselbe wie im früheren Fall. Die Wellenfront wird durch den Körper sozusagen entzweigeschnitten (vgl. Abb. 5), und die Spuren der Verwundung haben eine Unschärfe des Schattenrandes zur Folge, die unverständlich wäre, wenn die einzelnen Lichtstrahlen selbständige Wesenheiten wären, die unabhängig voneinander fortschreiten, ohne sich umeinander zu kümmern.

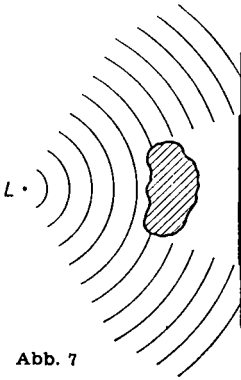


Abb. 7

Das Phänomen — das gleichfalls als Beugung bezeichnet wird — ist im allgemeinen bei größeren Körpern nicht sehr auffällig. Ist aber der schattenwerfende Körper wenigstens in einer Dimension sehr klein, dann äußert sich die Beugung erstens darin, daß überhaupt kein eigentlicher Schatten mehr zustande kommt, zweitens — und viel auffälliger — darin, daß das kleine Körperchen gleichsam selbstleuchtend wird und nach allen Seiten Licht ausstrahlt (vorzugsweise allerdings unter kleinen Winkeln mit dem einfallenden Licht). Jeder von Ihnen kennt gewiß die sogenannten „Sonnenstäubchen“ auf dem Weg eines Lichtstreifens, der in ein dunkles Zimmer fällt. Auch zarte Gräser und Spinweben am Rand eines Hügels, hinter dem sich die Sonne versteckt, oder das lose Haupthaar eines Menschen, der gegen die Sonne steht, erstrahlen oft wunderbar in abgebeugtem Licht, und die Sichtbarkeit von Rauch und Nebel beruht auf ihm. Es kommt nicht

eigentlich von dem Körper selbst, sondern aus seiner unmittelbaren Umgebung, einem Gebiet, in welchem er eine erhebliche Störung der auftretenden Wellenfronten hervorruft. Es ist interessant und für das Folgende wichtig zu bemerken, daß das Störungsgebiet immer und nach jeder Richtung hin mindestens die Ausdehnung einer oder einiger weniger Wellenlängen hat, wie klein das störende Körperchen auch sein mag. Wir haben also auch hier wieder die enge Beziehung des Beugungsphänomens zur Wellenlänge. Das wird vielleicht am handgreiflichsten illustriert durch den Hinweis auf einen anderen Wellenvorgang, nämlich den Schall. Wegen der viel größeren Wellenlänge, die hier nach Zentimetern und Metern mißt, tritt beim Schall die Schattenbildung ganz zurück, und die Beugung spielt eine große, auch praktisch wichtige Rolle: wir können einen Rufenden hinter einer hohen Mauer oder um die Ecke eines soliden Hauses herum sehr gut *hören*, auch wenn wir ihn nicht *sehen* können.

Kehren wir jetzt von der Optik wieder zur Mechanik, und suchen wir die Analogie voll zur Geltung zu bringen. Der *alten* Mechanik entspricht in der Optik das gedankliche Operieren mit isolierten, voneinander unabhängigen Lichtstrahlen. Der neuen undulatorischen Mechanik entspricht die Wellentheorie des Lichtes. Was man beim Übergang von der alten zur neuen Auffassung gewinnt, wird dies sein, daß man die Beugungserscheinungen mitumfaßt oder — besser gesagt — etwas, was den Beugungsphänomenen des Lichtes streng analog ist und was wohl im allgemeinen, wie dort, sehr unbedeutend sein muß, sonst hätte die alte Auffassung der Mechanik nicht so lange voll befriedigen können. Aber es ist nicht schwer zu erraten, daß unter Umständen das vernachlässigte Phänomen sehr fühlbar werden, das mechanische Geschehen ganz und gar beherrschen und der alten Auffassung unlösbare Rätsel aufgeben wird, und zwar dann, wenn *das ganze mechanische System in seiner Ausdehnung vergleichbar ist mit der Wellenlänge der „Materialwellen“*, die für die mechanischen Vorgänge dieselbe Rolle spielen wie die Lichtwellen für die optischen.

Das ist der Grund, weshalb in diesen winzig kleinen Systemen, den Atomen, die alte Auffassung versagen mußte, die zwar für die grobmechanischen Vorgänge sehr angenähert zu Recht bestehen bleibt, aber nicht mehr für das feine Wechselspiel in Gebieten von der Größenordnung einer oder weniger Wellenlängen. Es war verblüffend zu bemerken, wie hier alle jene seltsamen Zusatzforderungen sich aus der neuen undulatorischen Auffassung heraus ganz von selbst einstellten, während sie der alten künstlich aufgepfropft werden mußten, um sie auf das Innenleben des Atoms zuzupassen und dessen wirklich beobachtete Lebensäußerungen einigermaßen zu erklären.

Man sieht, der springende Punkt bei der ganzen Sache ist der, daß die Durchmesser der Atome und die Wellenlänge jener hypothetischen Materiewellen von ungefähr derselben Größenordnung sind. Und da werden Sie gewiß fragen, ob man es als einen bloßen Zufall anzusehen hat, daß wir bei fortgesetzter Analyse des Aufbaus der Materie gerade an dieser Stelle auf die Größenordnung der Wellenlänge stoßen, oder ob man das einigermaßen verstehen kann. Ferner woher man denn überhaupt weiß, daß es so ist, da die Materiewellen doch ein ganz neues Requisite dieser Theorie sind, das noch nirgend anderswo her bekannt war. Oder hat man vielleicht einfach diese *Annahme* machen müssen?

Nun, die Übereinstimmung der Größenordnungen ist kein bloßer Zufall, und man hat auch keine besondere Annahme darüber nötig, sie ergibt sich von selbst aus der Theorie, und zwar hat es damit folgende merkwürdige Bewandnis. Daß der schwere Atomkern viel, viel kleiner ist als das Atom und darum bei der folgenden Überlegung als punktförmiges Anziehungszentrum gelten kann, das ist, wie man wohl sagen darf, experimentell sichergestellt durch Rutherfords und Chadwicks Versuche über die Streuung der Alphastrahlen. Statt der Elektronen führt man hypothetische Wellen ein, deren Wellenlänge man aber noch ganz offen läßt, weil man doch darüber nichts weiß. Es steht dann zwar in unserer Rechnung ein Buchstabe, sagen wir  $a$ , der eine noch unbestimmte Zahl bedeutet. Aber das sind wir bei solchen Rechnungen ohnedies gewöhnt, und es hindert uns nicht, auszurechnen, daß der Atomkern eine Art Beugungserscheinung dieser Wellen erzeugen muß, ähnlich wie ein winziges Staubteilchen an den Lichtwellen. Ganz wie dort ergibt sich, daß die Ausdehnung des Störungsgebietes, mit dem der Kern sich umgibt, zur Wellenlänge in enger Beziehung steht und von derselben Größenordnung ist wie sie. Die haben wir nun freilich offenlassen müssen. Aber nun kommt der wichtigste Schritt: *man identifiziert das Störungsgebiet, den Beugungshof, mit dem Atom; man erklärt, das Atom sei in Wirklichkeit gar nichts weiter als das Beugungsphänomen einer vom Atomkern gewissermaßen eingefangenen Elektronenwelle.* Es ist dann kein Zufall mehr, daß Atomgröße und Wellenlänge von derselben Größenordnung sind, sondern das ist selbstverständlich. Aber zahlenmäßig kennen wir weder die eine noch die andere, denn in unserer Rechnung steht ja noch immer die *eine* unbestimmte Konstante, die wir  $a$  nannten. Diese zu bestimmen hat man nun zwei Möglichkeiten, die sich gegenseitig kontrollieren. Man kann sie erstens so wählen, daß die Lebensäußerungen des Atoms, vor allem die ausgesandten Spektrallinien, quantitativ richtig herauskommen, die ja sehr genau gemessen sind. Zweitens kann man  $a$  so wählen, daß der



Beugungshof die für das Atom zu fordernde Größe bekommt. Diese beiden Bestimmungen von  $a$  (deren zweite allerdings sehr viel unschärfer ist, weil „Größe des Atoms“ kein scharfer Begriff ist) *stehen miteinander in vollkommenem Einklang*. — Man kann endlich drittens die Bemerkung machen, daß die unbestimmt gebliebene Konstante physikalisch nicht wirklich die Dimension einer Länge, sondern einer Wirkung, d. i. Energie mal Zeit, hat. Dann liegt es sehr nahe, für sie den Zahlenwert des universellen Planckschen Wirkungsquantums einzusetzen, der ja von den Gesetzen der Wärmestrahlung her recht genau bekannt ist. Es zeigt sich, daß man mit der vollen, jetzt erheblichen Genauigkeit *auf die erste (genaueste) Bestimmung zurückfällt*.

Die Theorie kommt also in quantitativer Hinsicht mit einem Minimum neuer Annahmen aus. Sie enthält eine einzige verfügbare Konstante, und dieser hat man einen aus der älteren Quantentheorie wohlbekannten Zahlenwert zu erteilen, um erstens jenen Beugungshöfen die richtige Größe zu

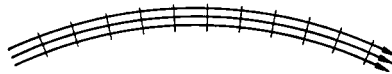


Abb. 8

geben, damit sie vernünftigerweise mit den Atomen identifiziert werden können, und um zweitens alle Lebensäußerungen des Atoms, das von ihm ausgestrahlte Licht, die Ionisierungsarbeit usw., quantitativ richtig auszurechnen.

Ich habe versucht, den Grundgedanken dieser Wellentheorie der Materie in möglichst einfacher Form vor Ihnen zu entwickeln. Lassen Sie mich nun eingestehen, daß ich in diesem Bestreben — in dem Wunsch, die Begriffe nicht gleich von vornherein zu verwirren — schöngefärbt habe. Nicht was die Vollkommenheit betrifft, mit der alle hinreichend vorsichtig gezogenen Konsequenzen von der Erfahrung bestätigt werden, wohl aber in Bezug auf die begriffliche Leichtigkeit und Einfachheit, mit der die Konsequenzen erreicht werden. Ich rede dabei nicht von den mathematischen Schwierigkeiten, die letzten Endes immer trivial sind, sondern von den begrifflichen. Es ist natürlich nicht schwer, zu sagen, man geht von der Vorstellung einer *Bahnkurve* über zu einem System von Wellenflächen, das dazu senkrecht ist. Aber die Wellenflächen, selbst wenn man nur kleine Stückchen davon in Betracht ziehen will (s. Abb. 6), fassen doch mindestens ein schmales *Bündel* möglicher Bahnkurven zusammen, zu denen allen sie in der gleichen Beziehung stehen. Nach der alten Auffassung ist eine von ihnen als die „wirklich durchlaufene“ vor allen übrigen, „bloß möglichen“, im konkreten Einzelfall ausgezeichnet, nach der neuen Auffassung aber nicht. Es ist die ganze Wucht des logischen Gegensatzes zwischen einem

Entweder-Oder (Punktmechanik)

und einem

Sowohl-Als auch (Wellenmechanik),

was uns hier entgegentritt. Nun würde das nicht schlimm sein, wenn es sich wirklich darum handelte, die ältere Auffassung ganz fallenzulassen und durch die neuere zu *ersetzen*. Aber so steht die Sache leider nicht. Vom Standpunkte der Wellenmechanik wäre die unendliche Schar der möglichen

Punktebahnen nur etwas Fiktives, keine davon hätte vor den übrigen das Prädikat, die im Einzelfall wirklich durchlaufene zu sein. Aber wie ich schon vorhin einmal erwähnte, in manchen Fällen haben wir doch solche einzelnen Teilchenbahnen wirklich beobachtet. Die Wellenvorstellung kann dies nicht oder nur sehr unvollkommen wiedergeben. Es fällt uns verteuelt schwer, die Bahnspuren, die wir *sehen*, nur als schmale Bündel gleichberechtigter möglicher Bahnen anzusprechen, zwischen denen die Wellenflächen Querverbindungen herstellen. Und doch sind diese Querverbindungen nötig, um die Beugungs- und Interferenzerscheinungen zu verstehen, die an denselben Teilchen mit derselben Handgreiflichkeit demonstriert werden können — und zwar ganz im großen, nicht etwa bloß erschlossen aus den theoretischen Vorstellungen über das Atominnere, von denen vorhin die Rede war. Wohl liegen die Verhältnisse so, daß man in jedem konkreten Einzelfall immer gerade durchkommt, ohne daß die zwei verschiedenen Aspekte zu verschiedenen Erwartungen über den Ausgang bestimmter Experimente führen. Aber mit solchen alten, lieben und unentbehrlich scheinenden Begriffen wie „wirklich“ oder „bloß möglich“ kommt man nicht durch, man kann nie sagen, was wirklich *geschieht*, sondern bloß, was im konkreten Einzelfall *zu beobachten* sein wird. — Ob man sich damit dauernd wird begnügen müssen . . . ? Prinzipiell gewiß. Prinzipiell ist ja die Forderung auch gar nicht neu, daß die exakte Wissenschaft letzten Endes nur die Beschreibung des wirklich Beobachtbaren zu erstreben hat. Die Frage ist nur, ob man von nun an darauf wird verzichten müssen, die Beschreibung wie bisher anzuknüpfen an eine klare Hypothese darüber, wie die Welt wirklich beschaffen ist. Viele wollen den Verzicht schon heute aussprechen. Aber ich glaube, man macht sich die Sache dadurch ein bißchen zu leicht.

Ich würde den gegenwärtigen Stand unserer Erkenntnis folgendermaßen kennzeichnen. Der Strahl oder die Teilchenbahn entspricht einem *longitudinalen* Zusammenhang des Ausbreitungsvorganges (d. h. *in der* Richtung der Ausbreitung), die Wellenfläche dagegen einem *transversalen* Zusammenhang, d. h. *senkrecht* dazu. *Beide* Zusammenhänge sind ohne Zweifel wirklich, der eine wird durch die photographierten Teilchenbahnen, der andere durch die Interferenzexperimente bewiesen. Sie beide in einem einheitlichen Bild zu erfassen, ist uns bis jetzt noch nicht gelungen. Nur in extremen Fällen überwiegt entweder der transversale, schalenförmige oder der strahlige, longitudinale Zusammenhang so sehr, daß wir mit dem Wellenbild allein oder mit dem Partikelbild allein auszukommen *glauben*.