

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 26 (1935)
Heft: 21

Artikel: Über die Wellentheorie der Materie
Autor: Weisskopf, V.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058482>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 25.12.2024

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:
Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens
et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

EDITEUR ET ADMINISTRATION:
S. A. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zurich 4
Stauffacherquai 36/40

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXVI^e Année

N^o 21

Vendredi, 11 Octobre 1935

Ueber die Wellentheorie der Materie.

Vortrag, gehalten in der Physikalischen Gesellschaft Zürich, am 3. Juni 1935,

von V. Weisskopf, Zürich.

530.145

Die moderne Atomforschung hat gezeigt, dass die Elementarbausteine der Materie — die Elektronen — in vielen Experimenten als Wellen in einer Art «Materiefeld» anzusehen sind. Hierdurch werden viele Quantenerscheinungen der Atomphysik erklärt. Da das Elektron jedoch in andern Experimenten als Partikel erscheint, muss die moderne Atomtheorie auf ein anschauliches Bild des Elektrons verzichten und dem Elektron eine Doppelnatur zuschreiben; je nach den äusseren Bedingungen tritt dieses als Welle oder als Teilchen in Erscheinung.

Maintes expériences effectuées au cours de recherches modernes sur l'atome obligent à considérer les éléments constitutifs de la matière, les électrons, comme des oscillations dans un «champ de matière». Ceci permet d'expliquer bien des phénomènes quantiques de la physique de l'atome. Cependant, dans d'autres expériences, les électrons se comportent comme des particules. Ceci empêche la théorie moderne de l'atome de donner une image raisonnable de l'électron et force à lui prêter une double nature; suivant les conditions extérieures, l'électron se manifeste donc comme une oscillation ou comme une particule.

Das Wissen über die Struktur der Materie hat sich in den letzten Jahrzehnten stark erweitert. Die grossen Fortschritte der Technik haben die Möglichkeit geschaffen, tief ins innerste der Bausteine der Materie einzudringen und Näheres über die kleinsten Bestandteile der Materie zu erfahren. Es stellte sich dabei vor allem heraus, dass die ungeheure Vielfältigkeit der Dinge und Stoffe der Natur nur auf eine verschiedene Anordnung und Bewegung derselben Urteilchen der Materie zurückzuführen ist, dass also alle Dinge aus den gleichen kleinsten Bausteinen aufgebaut sind; dem Wesen und den Eigenschaften dieser kleinsten Bausteine sei der folgende Vortrag gewidmet.

Wenn man z. B. ein Stück Eis mechanisch in immer kleinere Teile teilt, so stösst man schliesslich auf den kleinsten Teil: ein Molekül Wasser. Teilt man dieses weiter, was nur mit chemischen Mitteln möglich ist, so erhält man ein Atom Sauerstoff und zwei Atome Wasserstoff. Diese beiden Stoffe gehören der Reihe der Elemente an. Es gibt deren 92; aus ihnen lassen sich alle existierenden Moleküle aufbauen.

Die moderne Atomtheorie macht aber keineswegs bei den Atomen Halt. Es ist gelungen, auch die Atome weiter in Bestandteile zu zerlegen und zu zeigen, dass alle 92 Grundstoffe aufgebaut sind aus nur 2 Arten von Urteilchen: aus Elektronen und Atomkernen. Die Forschung ergab folgende Vorstellung von der Struktur eines Atoms: In der Mitte des Atoms befindet sich ein sog. *Atomkern*, der stark positiv elektrisch geladen ist. Um diesen Kern bewegen sich eine Anzahl von Elektronen. Elektro-

nen sind kleine, negativ geladene, sehr leichte Teilchen. Sie stellen die Elementarteilchen der Elektrizität dar. Mit wieviel Recht sie als «Teilchen» bezeichnet werden dürfen, soll noch diskutiert werden. Der Atomkern hat den grössten Teil der Masse des Atoms auf sich konzentriert. Seine positive Ladung ist genau so gross wie die aller ihn umgebenden negativen Elektronen, so dass die Gesamtladung des Atoms Null wird. Die 92 verschiedenen Atomarten unterscheiden sich nur durch die Anzahl der Elektronen, die sich um den Kern bewegen und durch die Ladung des Kerns. So besteht das einfachste Element, der Wasserstoff, aus einem einfach geladenen Kern mit einem umlaufenden Elektron, das schwerste Element, Uran, aus 92 Elektronen um einen 92fach geladenen Kern. Die qualitative Verschiedenheit der Atome ist auf quantitative Unterschiede zurückgeführt.

Es gibt viele Experimente, die diese elektrische Natur der Atome beweisen (u. a. Elektronenemission aus Glühdrähten, Leuchterscheinungen). Der historisch entscheidende Versuch war der folgende: Es ist bekannt, dass ein Stück Radium kleine elektrisch geladene Teilchen mit ungeheurer Geschwindigkeit herausschiesst, die sog. α -Strahlen (Fig. 1). Diese « α -Teilchen» haben eine so grosse Geschwindigkeit, dass sie nur von äusserst starken elektrischen Feldern aus ihrer Richtung abgelenkt werden können. Es konnten nun Ablenkungen festgestellt werden, die ohne die Einwirkung äusserer elektrischer Felder zustande kommen. Fig. 2 zeigt solche Ablenkungen einiger Strahlen. Es muss daraus auf die Existenz von elektrischen Feldern im Innern

der Atome geschlossen werden. Durch das starke positive Feld eines Atomkerns wird ein in das Atom eingedringenes α -Teilchen aus seiner Bahn abgelenkt.

Die genaueren Forschungen über die Natur der Elektronen brachten eine Reihe äusserst merkwürdige Eigenschaften dieser Teilchen ans Licht, die unser allergrösstes Interesse beanspruchen. Die Atomkerne haben ganz ähnliche Eigenschaften, jedoch sind die Untersuchungen bei den Elektronen leichter durchzuführen und verständlicher, weshalb sich das Folgende auf die Elektronen beschränken kann.

Unsere erste Untersuchung gilt den Bewegungen der Elektronen innerhalb der Atome. Das Bild ihrer Umläufe um den Kern erinnert stark an unser Planetensystem; die Analogie des Kerns mit der Sonne, und der Elektronen mit den Planeten wurde oft verwendet. Doch zeigte sich da ein charakteristischer Unterschied: Wenn man den Planeten von

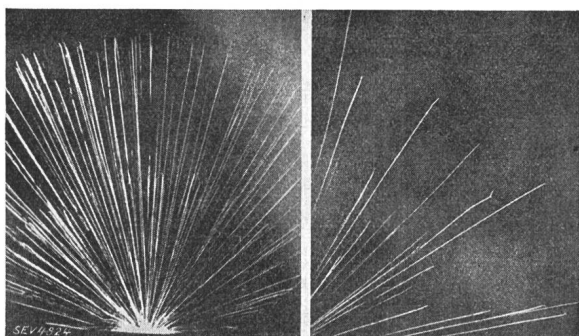


Fig. 1.
Wilsonkammer-Aufnahme
der von einem radioaktiven
Thoriumpräparat aus-
gesandten positiv geladenen
Teilchen (α -Strahlen).

Fig. 2.
Die charakteristi-
schen, geknickten
Enden von
 α -Strahlen.

aussen her Energie zuführt, etwa durch einen Stoss mit einem Körper, so ändert der Planet entsprechend seine Bahn; man sagt, die Bahn wird gestört.

Aehnlich versuchte man die Bahnen der Elektronen in den Atomen durch Stoss zu beeinflussen. Man schickte einen Elektronenstrahl von aussen in ein Gas und mass die kinetische Energie, welche die hineingeschossenen Elektronen beim Austritt aus dem Gas noch haben. Aus der Differenz mit ihrer ursprünglichen Schussenergie konnte man die Energie bestimmen, die sie an die Elektronen in den Atomen des Gases abgegeben hatten. Und da zeigte sich folgender merkwürdiger Sachverhalt. Anfänglich lassen sich die Elektronen überhaupt nicht stören. Wenn die Schussenergie eine gewisse Grenze («Anregungsenergie») nicht überschreitet, so kommen die Geschosse mit der gleichen Energie aus dem Gas wieder heraus: die Bahn der Elektronen in den Atomen blieb völlig ungestört. Ist die Energie der Geschosse aber höher als jene Grenze, so können sie die Elektronen der Atome wohl stören, aber stets nur um ein festes und bestimmtes Energiemass. Die Elektronen innerhalb der Atome

sind sozusagen anspruchsvoll: Sie nehmen entweder genau 2,1 Volt oder 3,5 Volt usw.¹⁾ oder aber überhaupt nichts. Keinesfalls aber einen Wert der nicht in dieser Reihe liegt. (Diese Zahlen gelten für Natriumatome, andere Elemente haben andere Zahlenwerte.) Man sagt auch, die Atome nehmen die Energie *quantenhaft* auf, in Form von bestimmten Energiequanten. Daher stammt der Name «Quantentheorie» für die diese Erscheinungen behandelnden Theorien.

Man kann daraus schliessen, dass keineswegs alle Bewegungsarten der Elektronen im Atom möglich sind, sondern dass die Natur aus vorläufig rätselhaften Gründen nur Bewegungen mit den genannten Energiewerten zulässt: Ein völlig unverständlicher Sachverhalt, wenn man am Bilde des Planetensystems festhält. Selbst der schwächste Meteorit kann unserer Erde ein bisschen Energie zuführen und damit ihre Bahn ein wenig ändern, ohne dass dabei irgendein Energiewert ausgeschlossen wäre.

Es ist nötig, sich klarzumachen, dass diese merkwürdige Eigenschaft der Elektronen nicht nur in diesem Versuch eine Rolle spielt, sondern dass sie überhaupt die wesentliche Grundlage für die Existenz der Welt ist, in der wir leben. Die Tatsache, dass die Bewegungen der Elektronen z. B. im Natriumatome erst dann gestört werden können, wenn die störenden Einflüsse eine Energie haben, die über 2 Volt liegt — dies ist für atomare Verhältnisse eine sehr hohe Energie — hat nämlich eine ungewöhnliche Stabilität der Atome zur Folge. Ein Atom in einem Stück Materie des täglichen Lebens ist ungeheuer viel Störungen ausgesetzt. Infolge der unregelmässigen Wärmebewegungen stossen die Nachbaratome sehr oft aneinander (in einem gewöhnlichen Stück festen Körpers etwa 10^{13} mal in der Sekunde). Wären die Atome so gebaut, wie man es von einem normalen kleinen Planetensystem erwarten sollte, so würde die Wirkung dieser vielen Störungen sich derart summieren, dass die Atome bald zerstört wären, oder jedenfalls diese stets gleichen Eigenschaften nicht hätten, die wir beobachten können. Dass z. B. Jod stets braun oder Schwefel stets gelb ist, beruht ausschliesslich darauf, dass trotz der Myriaden Stösse und Störungen, die die Atome dieser Stoffe erleiden, ihre Elektronenbewegungen so genau gleich bleiben, dass sie immer exakt auf die «Frequenz braun» oder «gelb» der auf sie eintreffenden Lichtwellen abgestimmt sind. Erst wenn die Störungen so stark sind, dass sie über die charakteristische Schwelle hinausreichen, können die Elektronen im Jod- oder Schwefelatome genügend Energie aufnehmen, um in den nächst höheren erlaubten Bewegungszustand überzugehen.

Eine weitere merkwürdige Eigenschaft der Elektronen, die in eigenartiger Beziehung zu der eben besprochenen steht, zeigt sich bei der Untersuchung

¹⁾ Das Mass «Volt» für die Energie der Elektronen wird in der Atomphysik folgendermassen definiert: Die Bewegungsenergie « a Volt» besitzt ein Elektron, das durch eine Potentialdifferenz von a Volt beschleunigt wurde.

eines Elektronenstrahls. Man lässt diesen Strahl eine dünne Metallfolie durchdringen. Man sollte nun erwarten, dass die einzelnen Elektronen bei dem Durchgang mehr oder weniger aus ihrer geraden Bahn abgelenkt werden. Je näher ein Elektron an den starken Ladungen eines der Metallatome vorbeikommt, desto stärker sollte es aus seiner Bahn verschoben werden. Man sollte also eine diffuse Verbreiterung beim Durchgang erwarten. Lassen wir den Strahl hinter der Folie auf eine photographische Platte fallen, so sollten wir einen verwaschenen Fleck auf dieser erhalten. Man erhält aber die in Fig. 3 abgebildete Figur. Die Elektronen wurden somit nicht in alle Richtungen abgelenkt, wie wir dachten, sondern nur in jene, wo die regelmässigen weissen Flecken sichtbar sind.

Was sollen alle diese merkwürdigen Eigenschaften bedeuten? Kann man vielleicht aus ihnen auf das Wesen der Elektronen schliessen? Das kann

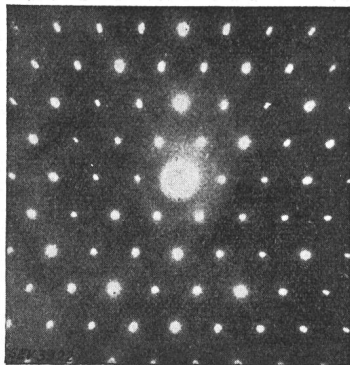


Fig. 3.

Elektronenwellen-
Interferenzzufnahme
an einer dünnen
Glimmerplatte.

man, und es soll nun gezeigt werden, dass man zwingend zu dem Resultat geführt wird, die Elektronen seien gar keine kleinen Partikelchen, sondern *Wellen*, ebenso wie das Licht und der Schall! Wir betonen schon jetzt, dass dies keineswegs nur eine Hypothese ist, sondern dass dieses merkwürdige Ergebnis direkt aus den Tatsachen folgt und somit ein empirisch gewonnener Sachverhalt ist.

Um dies einzusehen, muss etwas näher auf das Wesen einer Welle eingegangen werden. Beispiele von Wellen finden wir auf der Wasseroberfläche. Die Wasserteilchen schwingen auf und ab; sie sind die «Träger» der Welle. Bei den Schallwellen ändert sich der Luftdruck periodisch, die Luft ist der Träger der Schallwellen. Bei den elektromagnetischen Wellen, die wir im Rundfunk und in den Lichtwellen vor uns haben, ist es die elektrische und magnetische Feldstärke, die die Schwingungen ausführt. Der Träger dieser Wellen ist der leere Raum selbst. Die Feldstärke ist ja eine Eigenschaft des leeren Raumes; z. B. des Raumes zwischen den beiden Polen einer Batterie²⁾. Man kennt fortlaufende Wellen, die sich in einer bestimmten Richtung fortpflanzen. Wenn die Wellenbewegung aber auf einen beschränkten Raum eingeschränkt ist, so bilden sich

²⁾ Früher führte man einen sog. Aether als Träger der elektrischen Feldstärke ein. Man fand aber bald, dass dieser Aether gar keine materiellen Eigenschaften haben könnte, und mit dem leeren Raum identisch ist.

sog. stehende Wellen aus. Man kann sich davon leicht in einer geschlossenen Wanne, oder an einem begrenzten Seilstück überzeugen. Während aber die fortlaufenden Wellen in jeder beliebigen Frequenz schwingen können, werden sich als stehende Wellen nur ganz bestimmte Schwingungsformen mit ganz bestimmten Frequenzen ausbilden, die von der Form des Gebietes abhängen, auf das die Wellenbewegung eingeschränkt ist. Eine gute Vorstellung hiervon erhält man durch folgenden Versuch: Als schwingendes Medium sei eine in einem Kreisring eingespannte Seifenmembran verwendet. Diese kann durch einen Lautsprecher, der verschiedene Tonfrequenzen aussenden kann, in Schwingung versetzt werden. Variiert man die Tonhöhe des Lautsprechers, so sieht man deutlich, dass die Membran nur bei ganz bestimmten Tönen mitschwingen kann. Bei jedem dieser ausgewählten Töne hat die Schwingung der Membran eine andere Form.

Wenn man nun die Elektronen als Wellen auffasst, so wird die Existenz von ganz bestimmten erlaubten Bewegungsformen der Elektronen innerhalb des Atoms sofort verständlich. Infolge der starken elektrischen Anziehung, die die negativ geladenen Elektronen durch den positiven Atomkern erleiden, ist ihrer Ausbreitung eine Beschränkung auferlegt: sie müssen stets in der Nähe der Atomkerne verbleiben. Die Anziehungskraft des positiven Kerns übt nämlich ihre Wirkung auch auf die Elektronenwelle aus, was sich darin äussert, dass die Wellenbewegung durch die elektrischen Kräfte des Kerns gezwungen wird, sich nur in der Umgebung des Kerns auszubreiten³⁾. Wenn die Elektronen eine Wellenerscheinung sind, so müssen sich wegen dieser Beschränkung stehende Wellen ausbilden. Diese sind aber nur in ganz bestimmten ausgewählten Formen möglich, wodurch das eigenartige diskontinuierliche Verhalten in den Bewegungen der Elektronen erklärt ist: Führt man nämlich den Elektronen durch Stösse Energie zu, so können sie nur dann ihren Bewegungszustand ändern, wenn die zugeführte Energie genügend gross ist, um in den nächst höheren Schwingungszustand zu gelangen. Eine kontinuierliche Änderung des Zustandes gibt es bei stehenden Wellen nicht.

Die Energie einer atomaren Elektronenwellenschwingung bestimmt sich allerdings auf etwas andere Weise als die Energie einer gewöhnlichen elektrischen oder mechanischen Schwingung. Bei den letzteren ist die Energie von der Schwingungsintensität abhängig: Je stärker die Amplitude ist, desto höher die Energie. Bei den Elektronenwellen gibt aber diese Intensität die Menge der vorhandenen Elektronenmaterie an; diese ist natürlich stets un-

³⁾ Man kann die Wirkung der Anziehungskraft des Kerns auf die Elektronenwelle dadurch beschreiben, dass diese Kraft eine Brechung der Elektronenwelle hervorruft und dadurch — analog zur Brechung der Lichtwellen — die geradlinige Ausbreitung der Welle verhindert und sie zur Ausbreitung um den Kern zwingt. Eine ähnliche Erscheinung gibt es auch bei Lichtstrahlen in der Atmosphäre der Sonne. Dort gibt es Schichten, die das Licht so stark brechen, dass die Strahlen in geschlossenen Bahnen um die Sonne laufen.

veränderlich und konstant. Die *Energie* der Elektronenwellen ist durch die *Frequenz* ihrer Schwingung gegeben, und zwar erhält man die Energie durch Multiplikation der Frequenz mit der bekannten Planckschen Konstante $h = 6,5 \cdot 10^{-27}$. Je höher die Frequenz, um so höher die Energie. Wenn sich nun die Elektronenwelle im Atom nur in Form von stehenden Wellen von ganz bestimmter Frequenz ausbilden kann, so folgt daraus, dass auch die *Energie* dieser Zustände nur die entsprechenden ausgesuchten Werte haben kann. Die quantenhafte Natur der Energie des Elektrons im Atom ist daher auf Grund seiner Wellennatur verständlich.

Man konnte die Wellennatur der Elektronenbewegung im Atom auch quantitativ nachprüfen. Wenn man nämlich die Art und Weise genau kennt, wie die Wellenbewegung auf das Gebiet um den Atomkern beschränkt ist, lässt sich rein mathematisch Form und Frequenz der dort sich ausbildenden stehenden Wellen berechnen und dann nachprüfen, ob die aus der Frequenz sich ergebenden Energiewerte genau mit denen übereinstimmen, die man im Atom tatsächlich beobachtet hat. Diese zuerst von Schrödinger im Jahre 1926 durchgeführte Rechnung stimmt tatsächlich ganz genau mit den aus den Experimenten gewonnenen Zahlen überein. Damit dürfte wohl die Wellennatur dieser Elektronenbewegungen über jeden Zweifel erhaben sein.

Die früher so rätselhafte Stabilität der Atome gegen äussere Störungen ist nun leichter verständlich. Wenn man eine stehende Wellenschwingung stört, so nimmt sie gleich nach dem Aufhören der Störung ihre ursprüngliche Form wieder an; nur

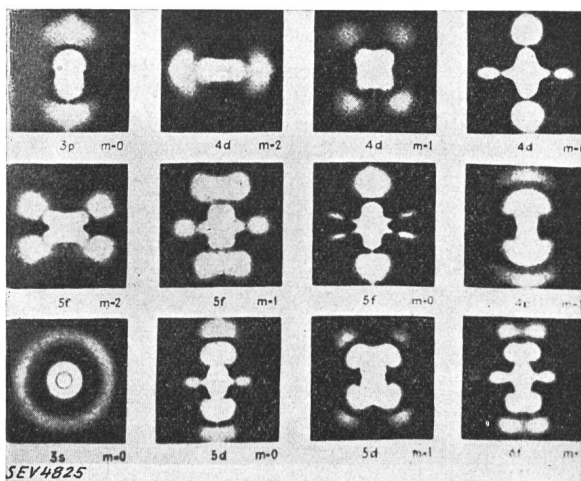


Fig. 4.

Verschiedene Schwingungsformen von Elektronenwellen im Atom.

ganz starke Störungen sind imstande, eine andere Schwingungsform hervorzubringen, wenn sie die hierzu nötige grosse Energie abgeben können.

Die Vorstellung des Atoms als kleines Planetensystem muss man also aufgeben, da die Elektronenbewegungen als Schwingungen der Elektronen betrachtet werden müssen. Um aber trotzdem ein an-

schauliches Bild eines Atoms zu geben, sind in Fig. 4 einige dieser Schwingungsformen abgebildet, die die Elektronenwellen im Atom annehmen können.

Wie erklärt man nun die merkwürdigen Erscheinungen, die bei dem Durchgang eines Elektronenstrahls durch eine Metallfolie auftraten? Sie beruhen auch auf einer grundlegenden Eigenschaft jeder Wellenausbreitung. In Fig. 5 sieht man, dass die von zwei Zentren ausgehenden Wasserwellen

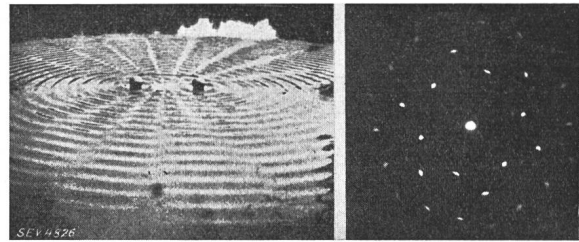


Fig. 5.

Charakteristische Interferenzen zweier Wasserwellen, die von benachbarten Punkten ausgehen.

Fig. 6.

Röntgenstrahlen-Interferenzaufnahme an einer Kristallplatte.

sich nicht nach allen Richtungen gleichmässig ausbreiten können. Dies beruht auf der sog. Interferenz der Wellen: wenn der Wellenberg einer Welle auf das Wellental einer anderen fällt, so heben sich die beiden auf. Die von den regelmässig angeordneten Atomen der Metallfolie gestreuten Elektronenwellen können sich aus den gleichen Gründen nur in ganz bestimmten Richtungen weiter fortpflanzen, wodurch das charakteristische Bild der Fig. 3 entsteht. Als Beispiel diene Fig. 6; sie wurde mit einem Röntgenstrahl aufgenommen, der eine Metallfolie durchdrang. Fig. 3 und Fig. 6 sind genau gleich; die Wellennatur eines Röntgenstrahls ist aber hinlänglich bekannt und bewiesen.

Das Elektron ist eine Wellenbewegung; was ist der Träger dieser «Materiewellen»? Ganz analog zu den Lichtwellen ist hier eine schwingende «Materiefeldstärke» vorhanden, die die Materiewelle bildet; der Träger dieser Wellen ist auch hier der leere Raum. Es sei nochmals betont, dass diese Vorstellungen nicht nur eine Hypothese darstellen, sondern dass die Experimente, aus deren grosser Zahl hier nur einige ganz wenige ausgesucht wurden, die Existenz der Materiewellen beweisen. Die Bausteine der Materie sind somit Schwingungen einer «Materiefeldstärke» und der körperliche Widerstand, den wir bei Berührung eines festen Körpers verspüren, kann als der Widerstand zweier «Materiefeldstärke»-Schwingungsfelder angesehen werden.

Leider ist aber die Wellennatur der Materie noch immer nur ein Teil der wahren Natur der Materie. Trotz vieler Experimente, welche die Wellennatur der Elektronen beweisen, gibt es eine grosse Zahl anderer Experimente, die ebenso zwingend das Gegenteil beweisen, nämlich, dass die Elektronen, so wie man es früher immer dachte, gewöhnliche

kleine Partikelchen sind. Fig. 7 stellt z. B. eine Aufnahme von Elektronen dar, die von einem Radiumpräparat ausgesendet werden. Man sieht die Bahn jedes einzelnen Teilchens. Wenn die Elektronen wirklich Wellen wären, so müsste sich die «Materiefeldstärke» überall bemerkbar machen, nicht nur auf einzelnen «Bahnen». Weiter hat man an Elektronenstrahlen beobachtet, dass man deren Intensität nicht beliebig schwach machen kann. Die Minimalstärke eines Strahls ist gerade *ein* Elektron. Wenn dieses aber eine Welle wäre, so könnte man doch die Intensität dieser Welle beliebig verkleinern?

Aus diesen und noch vielen andern Versuchen scheint die Teilchennatur der Elektronen hervorzugehen; sie widersprechen absolut jeder Wellenvor-

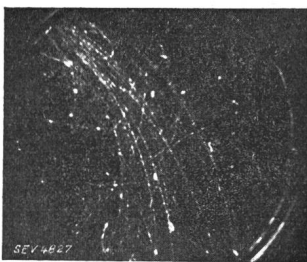


Fig. 7.

Wilsonkammeraufnahme von Elektronen, die von Thorium ausgesandt werden.

stellung, während eine andere Serie von Versuchen, wie die früher erwähnten, jeder Teilchenvorstellung widersprechen und die Wellennatur beweisen.

Die Wissenschaft hat über 25 Jahre — von 1900 bis etwa 1926 — versucht, diese Widersprüche aufzuklären. Mit steigender Zahl der Versuche traten sie aber immer deutlicher heraus, so dass heute an ihrem tatsächlichen Vorhandensein kein Zweifel mehr möglich ist. Auf Grund der Erfahrung müssen beide Bilder, das Partikelbild und das Wellenbild, als wahr angesehen werden. Beides sind zwei verschiedene Erscheinungsformen der Materie, die dem Forscher in den einzelnen Versuchen gegenüber treten. Diese Doppelnatur der Elektronen scheint deshalb so unglaublich, weil man sich Gegenstände der Umwelt, die man sieht und fühlt, unmöglich anders als eindeutig vorstellen kann. Man muss aber bedenken, dass eine unmittelbare körperliche Fühlungnahme mit den Elektronen jedenfalls ausgeschlossen ist. Man kann nur aus den Messungen und Beobachtungen an Körpern unserer Umwelt indirekte Schlüsse über ihre Eigenschaften ziehen. Dabei stellte es sich heraus, dass alle diese ganz verschiedenen Erfahrungen *nicht* zum gleichen Bild führen; die einen führen zum Wellenbild, die andern zum Partikelbild. Vielleicht scheint diese Tatsache nicht so unglaublich, wenn man bedenkt, welch grosses Wunder allein darin liegt, dass die verschiedensten Wege, über Dinge etwas zu erfahren, mit denen wir nie in körperliche Fühlungnahme treten können, überhaupt zu ähnlichen Bildern führen. Sollte es da nicht schon sehr befriedigend sein, dass man aus den Experimenten wenigstens nur zu *zwei* verschiedenen Vorstellungen über

die Natur des Elektrons gelangt? Die Natur ist eben dort, wo wir nicht direkt hineinsehen können, noch viel mannigfaltiger als die uns gewohnte körperliche Umwelt. Die Tatsache, dass wir uns die kleinsten Bausteine der Materie nicht körperlich vorstellen können, bedeutet keineswegs einen Verzicht, die Vorgänge innerhalb der Atome ganz zu verstehen. Es ist vor allem deshalb kein Verzicht, weil die Atomphysik die Gesetzmässigkeiten, mit denen die Doppelnatur in Erscheinung tritt, genau kennt. Man kann heute mit Hilfe der sog. «Wellen- oder Quantenmechanik» genau vorhersagen, wann das Elektron als Teilchen, wann es als Welle erscheint.

Es sei nun noch auf eine ganz charakteristische Folgerung aus dieser Theorie hingewiesen. Angenommen, man habe sich durch ein Experiment Kenntnis über den augenblicklichen Bewegungszustand eines Elektrons verschafft, bei welchem dieses als Welle erscheint, und man wolle aus dieser Kenntnis Schlüsse ableiten über das Verhalten des Elektrons in einem andern Versuch, wo dieses als Teilchen auftritt. Diese Schlüsse werden nie ganz eindeutig sein können. Die Wellenbewegung des Elektrons erstreckt sich ja z. B. in einem Atom über einen grösseren Raumbereich. Wenn man diese Welle noch so genau in ihren Einzelheiten kennt, so ist es unmöglich, daraus genau zu schliessen, an welcher Stelle sich das *Teilchen* Elektron befinden wird, wenn man einen Versuch durchführt, bei dem es als ein solches erscheinen soll. Man wird dann höchstens aussagen können, dass das Teilchen ungefähr dort sein wird, wo die Wellenbewegung stattfand, und zwar ist die Wahrscheinlichkeit, es zu finden, an jenen Stellen gross, wo auch die Intensität der Elektronenwelle gross war. Während man in der gewöhnlichen Physik stets aus der genauen Kenntnis des Zustandes eines Körpers exakt auf das Resultat einer Untersuchung schliessen kann, ist dies in der Physik der Atome infolge der verschiedenen Erscheinungsformen des Elektrons nicht mehr möglich: man kann in gewissen Fällen nur statistische Wahrscheinlichkeitsvoraussagen machen, weil selbst die genaueste Kenntnis des Zustandes eines Elektrons in der einen Erscheinungsform keine exakten Schlüsse auf den Zustand in der andern Form zulässt.

Es ist natürlich unmöglich, innerhalb eines kurzen Vortrags zu zeigen, dass alle Schlussfolgerungen, die zu diesen Resultaten führen, wirklich zwingend sind und dass keine andere Erklärung unserer Erfahrungen möglich ist, die mehr in den Bahnen des Gewohnten verbliebe. Die Physik hat erst nach jahzehntelangen Versuchen erkannt, dass die Doppelnatur der Elektronen und der andern Bausteine der Materie eine grundlegende Eigenschaft darstellt. Man ist dadurch um eine tiefe Erkenntnis reicher geworden, die in vielem der Erkenntnis von Kopernikus gleicht, der die damals unglaubliche und unvorstellbare Behauptung aufstellte, dass nicht die Erde, sondern die Sonne im Mittelpunkt des Planetensystems steht.