

Grenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnis*)

Von Prof. Dr. WALTHER GERLACH, München

Eingeg. 23. Mai 1938

Aus der vielfachen Erörterung grundsätzlicher und spezieller Fragen der naturwissenschaftlichen Forschung ersehen wir, daß diese heute wie zu den Zeiten des Physikers *Galilei*, des Mediziners *Vesalius* in den Bereich weltanschaulicher Betrachtung gezogen ist. Das nimmt nicht wunder; denn sie ist ja verantwortlich für die Entwicklung unserer Kenntnis um die Natur und der die Lebensführung umgestaltenden Technik. Sie ist aber nicht verantwortlich für Folgerungen, die von Unwissenden oder Unverantwortlichen gezogen werden auf Gebiete, die außerhalb des Behandlungsbereichs der Naturforschung liegen und damit auch außerhalb der Naturgesetze. Denn unter „Naturgesetz“ verstehen wir nicht ein in der Natur herrschendes Gesetz, sondern eine Gesetzmäßigkeit, mit welcher wir eine möglichst große Anzahl heterogener Erscheinungen in einheitlicher und möglichst einfacher Form in quantitative Verbindung, in das kausale Verhältnis von Ursache und Wirkung bringen.

Diese Aufgabe, die wir als naturwissenschaftliche Synthese bezeichnen möchten, verlangt eine strenge Prüfung der Grenzen der Naturforschung, und zwar in zweierlei Beziehung:

1. ist zu fragen, wie weit eine experimentelle naturwissenschaftliche Analyse geführt werden kann, bis zu welchen Grenzen im Kleinen wie im Großen. Denn nur auf die Ergebnisse einer verfeinerten und sicheren Analyse kann sich eine Synthese stützen, die Anspruch auf wissenschaftliche Wahrheit machen kann: das ist die Frage nach den Grenzen der physikalischen Meßverfahren;
2. steht zur Diskussion die Grenze der naturwissenschaftlichen Methode: welche Bereiche der Welt der naturwissenschaftlichen Analyse zugänglich sind über die hinaus, auf welchen sie sich entwickelt; die Antwort auf diese Frage verlangt eine genaue Kennzeichnung dessen, was wir als naturwissenschaftliche Methode bezeichnen.

I. Grenzen der physikalischen Verfahren.

Experimentelle Grenzen.

Wir wollen zunächst einmal die Frage stellen, wie man überhaupt an eine Grenze des physikalisch Erforschbaren kommt, d. h. wie man von einer solchen Grenze etwas merkt. Wir halten es nämlich immer für gut, bei allen solchen Betrachtungen sich der philosophischen Spekulation so weit als irgend möglich zu enthalten. Das heißt nicht, daß man die Phantasie hemmen soll, man soll sie mit dem Zügel lenken und auf dem rechten Weg halten, den die Naturforschung einiger hundert Jahre uns in die Hand gegeben hat, durch das Experiment, jene Kontrolle an der Erfahrung, an dem sich uns darbietenden Vorgang in der Natur und an dem von uns herbeigeführten im Forschungsexperiment. Wer selbst sich bemüht, der Natur auf solche Weise die Auflösung eines Rätsels zu entlocken, der soll auch in den allgemeinen — sit venia

verbo — philosophischen Fragen seine naturwissenschaftliche Kinderstube nicht vergessen. So wollen wir uns also ganz streng an die Naturforschung halten und auch dieses allgemeine Problem naturwissenschaftlich analysieren.

Grenzen der optischen Wahrnehmbarkeit.

Wir beginnen mit der Grenze eines Forschungsverfahrens. Ein wichtiges, wenn auch nicht unentbehrliches Hilfsmittel jeder Forschung ist das Auge. Es hat unter anderem eine wichtige Grenze seiner Verwendungsmöglichkeit, die man als Auflösungsvermögen bezeichnet. Es ist bekannt, daß es Gegenstände gibt, die so klein sind, daß man sie nicht sehen kann. Hiervon wollen wir vorerst nicht sprechen. Es gibt aber auch Gegenstände, die so nahe beieinander liegen, daß man sie nicht mehr trennt sieht. Ein Plakatanschlag in größerer Entfernung erscheint uns noch bedruckt, aber wir können die Buchstaben nicht mehr lesen. Das kommt daher, daß die Bilder der Gegenstände auf unserer Netzhaut zu eng zusammen liegen. Getrennt können wir zwei Gegenstände nur sehen, wenn sie auf zwei verschiedene Zäpfchen der Netzhaut abgebildet werden. Bei der photographischen Aufnahme ist es genau so: zwei Gegenstände geben nur dann ein getrenntes Bild, wenn sie so weit auseinander liegen, daß getrennte Bromsilberkörnerreihen geschwärzt werden. Aus dem Abstand der Zäpfchen und der Brennweite der Augenlinse kann man geometrisch berechnen, daß man Gegenstände nur dann getrennt sieht, wenn sie unter einem Sehwinkel von etwa 1 Bogenminute auseinander liegen.

Zur Erweiterung der Grenze der Wahrnehmbarkeit benutzt man ein Instrument¹⁾. Ein solches ist das Mikroskop. Vermittels seiner Objektivlinse vergrößert man diesen Trennungswinkel. Aber auch hier kommt man zu einer Grenze: Diese ist durch das Licht gegeben. Das Licht besteht aus Wellen, welche an der Grenze von Körpern oder im Zwischenraum zwischen zwei Körpern gebrochen werden (Abb. 1). Hierdurch entstehen die Farberscheinungen, die vom Regenschirm her bekannt sind, wenn man durch sein Gewebe gegen eine Lampe blickt. Statt durch die Zwischenräume zwischen den Fäden die Lampe zu erkennen, unterteilt durch die Schatten der Fäden, sieht man ein recht farbenprächtiges, geometrisch meist stern- oder kreuzförmig geordnetes „Beugungsbild“ — aber weder Zwischenräume noch Fäden. Das ist beim Mikroskop genau das gleiche — vielleicht hatte der eine oder andere schon Gelegenheit, die bunten Beugungsscheibchen zu sehen, welche die Erkennung der Form „ultramikroskopischer“ Teilchen verhindern.

Hier sind wir an einer eigenartigen Grenze angelangt: Die Beugung des Lichtes an kleinen Teilchen läßt uns ihre Gestalt nicht mehr erkennen, wohl aber ihre

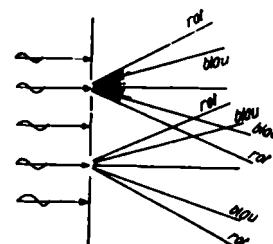


Abb. 1. Schematische Darstellung der Beugung des Lichtes.

*) Vortrag im Verein Deutscher Chemiker, Gauverein Hessen-Nassau, am 17. März 1938.

¹⁾ Eine andere Aufgabe des Instruments ist die quantitative Messung.

Gegenwart. Der farbige Hof um den Mond ist eine solche Beugung, welche mit Sicherheit auf die Anwesenheit von kleinsten Teilchen, Wassertröpfchen oder Staub schließen läßt.

Werden die Teilchen kleiner als die Wellenlänge des Lichtes, so wird das Licht von ihnen nach allen Seiten zerstreut, es entsteht überhaupt kein Schattenbild mehr. Bei einer anderen Betrachtungsart tritt aber eine Möglichkeit auf, sogar Moleküle mit dem Auge wahrzunehmen. Wenn nämlich der Beobachter senkrecht zum Lichtstrahl blickt, so wird er das gestreute Licht erhalten; er sieht keine Struktur des Moleküls, nicht die Moleküle selbst, aber er sieht das zerstreute Licht, welches an die Anwesenheit der Moleküle gebunden ist. Auch diese Erscheinung kennen wir in der Atmosphäre: Es ist das blaue Himmelslicht, die Zerstreuung des Sonnenlichtes an den Gasmolekülen. Daß es blau und nicht weiß ist, hängt mit der Kleinheit der Moleküle zusammen, je kleiner, desto stärker wird das kurzwellige Licht zerstreut. Sind in der Luft größere Molekülmassen vorhanden, so wird der Himmel weißlicher bis zu den weißen Wolken der Wassertröpfchen.

Die Beugung des Lichtes tritt an allen Körpern ein. Abb. 2 zeigt das „Schattenbild“ einer Schere,

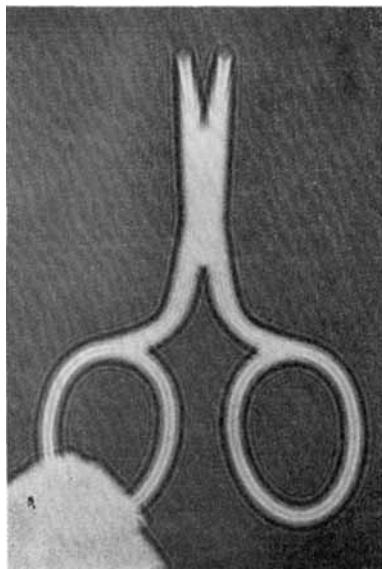


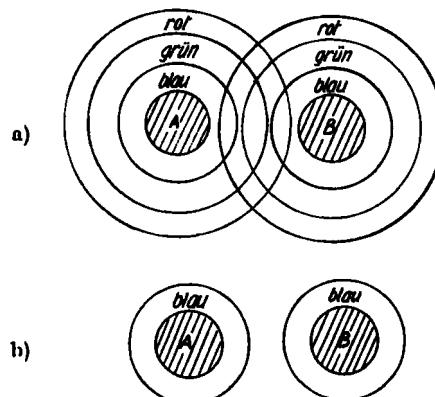
Abb. 2. Beugungsbild einer Schere.

von einer kleinen Lichtquelle entworfen. Die Theorie der Beugung lehrt uns, daß diese Erscheinung um so enger begrenzt ist, je kleiner die Wellenlänge des Lichtes ist. Schon die Verwendung von blauem Licht statt von weißem liefert schärfere mikroskopische Bilder, weil im kurzweligen blauen Licht die Beugungerscheinung weniger ausgedehnt ist. Gute Mikrophotographien macht man daher mit dem noch kurzwelligeren ultravioletten Licht (Abb. 3).

Können wir nun wirklich erwarten, immer kleinere Teilchen zu sehen, je kleiner die Wellenlänge des benutzten Lichtes ist? Die Antwort heißt nein und ja. Wir sehen sie im eigentlichen Sinn nicht, weil unser Auge für kurze Wellenlängen nicht empfindlich ist. Aber das ist keine vernünftige Grenze, wir können ja photographieren, mit Photozellen oder anderen Instrumenten kurzwellige Strahlung nachweisen.

Die Physik hat gelehrt, daß es kurzwelligere Strahlen als das Licht gibt, z. B. die Röntgenstrahlen: Sie sind nur so lang, wie die Atome dick sind. Die Folge davon ist, daß man die Anordnung der Atome in einem Metall

oder in einem Molekül mit Hilfe von Röntgenstrahlen nachweisen kann. Und so haben wir uns daran gewöhnt, zu sagen, daß wir die Lage der Atomie sehen können.



a) Belichtung mit weißem Licht. Die Beugeringe überlagern sich:
die zwei Teilchen A und B erscheinen nicht getrennt.
b) Belichtung mit Blaufilter: Die Beugungsscheiben sind getrennt.

Abb. 3. Erhöhung des Auflösungsvermögens durch Verwendung kurzweligen Lichtes.

Hat man dies nun früher für „unmöglich“ gehalten, hat hier vor der Entdeckung der Wellennatur der Röntgenstrahlen eine Grenze bestanden, die dann überschritten werden konnte? Das kann man nicht sagen, denn seit man weiß, daß Licht aus Wellen besteht, hatte man die Beugungstheorie und hiermit auch die Folgerung, daß man um so kleinere Körper „sehen“ kann — sehen im physikalischen Sinn —, je kürzere Wellenlängen zur Verfügung stehen. Also es bestand früher keine grundsätzliche Grenze, sondern es fehlte nur das geeignete Hilfsmittel.

Über die Grenze des Sehens können wir also eine klare Antwort geben: Eine grundsätzliche Grenze des physikalischen Sehens ist dann erreicht, wenn die Ausdehnung des Körpers gleich oder kleiner als die Wellenlänge des benutzten Lichtes ist. Wo aber diese Grenze liegt, wissen wir nicht, weil es uns unbekannt ist, mit wie kurzen Wellen man in der Zukunft wird arbeiten können.

Aber eine grundsätzliche Grenze wird es hier, glaube ich, doch geben: Es dürfte unmöglich sein, einen materiellen Körper mit irgendeiner Art von elektromagnetischen Strahlen nachzuweisen, welcher keine elektrische Ladung enthält. Sie wissen, daß alle Atome aus Elementarbausteinen bestehen; einer von ihnen ist völlig ladungsfrei: Das ist das Neutron. Es hat die Atommasse des Wasserstoffatoms, aber es hat keine Ladung. Deshalb ist bis heute überhaupt kein Verfahren erdenkbar, es direkt wahrnehmbar zu machen; und doch kennen wir seine Existenz und seine Masse, denn es setzt andere Atome beim Stoß in Bewegung.

Grenzen der Erforschung der Welt.

Eine zweite optische Grenzbetrachtung führt uns zu einer wichtigen Grenze des Forschungsbereiches. Um einen sehr entfernten Gegenstand näher betrachten zu können, benutzen wir ein Fernrohr. Man könnte so auf den Gedanken kommen, das Fernrohr auch zu gebrauchen, um über Einzelheiten der Oberfläche ferner Fixsterne einen Aufschluß zu erhalten. Und es gibt viele Menschen, die meinen, daß man zu diesem Zweck immer größere astronomische Instrumente baut. Das ist gar nicht richtig.

Der Versuch lehrt: Mit einem kleinen Fernrohr erscheint uns ein Fixstern als eine Scheibe. Je größer das Fernrohr, desto kleiner wird die Scheibe, desto punktförmiger, gleichzeitig aber auch heller. Woher kommt das?

Vom Stern kommt praktisch paralleles Licht in die Fernrohrlinse und soll im Brennpunkt der Linse vereinigt werden. Aber die Linse hat ja Ränder, und wir haben vorhin gelernt, daß an diesen Beugung entsteht: Sie verbreitert das punktförmige Bild. Je größer nun die Linsenöffnung, desto kleiner wird die Beugung, desto schärfer also die punktförmige Abbildung, desto größer das Auflösungsvermögen. Denn wenn z. B. zwei Sterne scheinbar sehr nahe beieinander stehen, so daß auch ihre Bilder nahe zusammenkommen, so werden sie sich im kleinen Fernrohr wegen der großen Beugung am Linsenrand überdecken, im großen Fernrohr wegen der kleinen Beugung sind sie getrennt. Das ist der Hauptgrund für den Bau der großen Instrumente. Daneben nimmt eine große Linse mehr Licht auf als eine kleine, also wird das Sternpunktchen heller.

Besteht also auch hier eine grundsätzliche Grenze, welche uns zu sagen erlaubt, daß wir niemals die Oberfläche der Sterne abbilden können? Wir erkennen aus dem Gesagten, daß das nicht der Fall ist, weil — im Gegensatz zum Mikroskop — die Auflösung durch genügende Größe der Fernrohrlinse immer weiter gesteigert werden kann. Man kann berechnen, daß man mit einer Fernrohrlinse von etwa 50 m Dmr. einen Stern von der Größe der Sonne in der Entfernung von einem Lichtjahr³⁾ so sieht, wie den Jupiter mit einem guten Feldstecher. Die Frage, ob der Bau und der Gebrauch eines solchen Fernrohrs technisch möglich ist, steht auf einem Blatt, das uns hier nicht interessiert.

Bezüglich der chemischen Zusammensetzung der Sterne lehren uns die Spektren, die Absorptions- und die Emissionslinien weniger, als man zur Zeit Bunsens und Kirchhoffs annehmen durfte; mehr aber als man damals ahnte, zeigen sie uns von den physikalischen Bedingungen auf den Sternen.

Das Licht der Sterne ist durch die Atmosphäre filtriert. Hierdurch scheidet der ganze Bereich unterhalb etwa 2900 Å aus; auch bei Höhenaufstiegen ist er nicht zu fassen: es dürfte wesentlich die Absorption des Ozons hieran schuld sein. So fällt der ganze UV-Bereich aus; und damit wird die Erforschbarkeit der Welt wesentlich begrenzt.

Was das bedeutet, lehrt ein bekanntes Beispiel an der Sonne. Sie schien kein Caesium zu enthalten. Wir wissen aber heute, daß bei der Temperatur der Sonne das Caesiumatom nicht mehr stabil ist, sondern völlig in das Caesiumion dissoziiert. Und dessen Spektrallinien liegen in dem UV, welches uns nicht mehr zugänglich ist. In viel höherem Maße trifft dies auf die viel heißeren Sterne zu, auf welchen nach Laboratoriumserfahrung fast alle Elemente hochionisiert sein müssen.

Vielleicht darf ich auf ein uns naheliegendes Problem hinweisen, das man allerdings doch zu lösen hofft: das ist die Zusammensetzung der hohen Atmosphäre, in der sich das Nordlicht abspielt. Es bedeutete eine sehr große Überraschung, als festgestellt wurde, daß das Leuchten des Nordlichts in Höhen bis zu 1000 km dem O und N angehört, und zwar sowohl Atomen und Ionen und Molekülen, während man H bis jetzt dort nicht entdeckte. Es scheint sicher, daß die hohe Atmosphäre anders zusammengesetzt ist, als man molekular-physikalisch folgerte. Das Fehlen von H kann ein Trugschluß sein: sein Hauptspektrum liegt im kürzesten UV.

Auch auf der Sonne gibt es noch Materieprobleme. Die Coronastrahlung besteht aus Linien, die noch nie in Laboratoriumslichtquellen erzeugt wurden. Man denkt aber heute nicht mehr an ein unbekanntes Element, sondern an besondere Zustände von z. B. Sauerstoff und

anderen Elementen. Es war möglich, das Nordlichtspektrum im Laboratorium zu erzeugen; so hoffen wir es auch vom Coronaspektrum. Dann liefern uns die Bedingungen im Laboratorium die physikalischen Zustände in der Corona. Wir erwarten hier von der Forschung eine bedeutende Erweiterung der Erkenntnisgrenzen, sowohl über spezielle Fragen der Sterne als auch über allgemeine Probleme der Materie.

Grenzen der Meßbarkeit durch die Brownsche Bewegung³⁾.

Ich will noch eine anderes Beispiel einer Wahrnehmungsgrenze besprechen, welche durch eine energetische Betrachtung gegeben ist. Wir wissen aus der Beobachtung, daß alle Körper — ob fest, flüssig oder gasig — aus Molekülen bestehen, die sich in dauernder Bewegung befinden: der Brownschen Bewegung. Die zwingende Folge ist, daß jeder aufgehängte feste Körper, also z. B. eine Waage, niemals zur Ruhe kommen kann, sondern unter dem Einfluß der Stöße der Gasmoleküle unregelmäßige Schwankungen um den Nullpunkt zeigt. Das ist nicht eine Hypothese, sondern es ist eine mit einer genügend empfindlichen Waage zu beobachtende Erscheinung. Dasselbe gilt für den Zeiger eines genügend empfindlichen Amperemeters. Es scheint also unmöglich, mit einem solchen — wieder experimentell herstellbaren — Instrument noch einen Stromausschlag zu messen, der von der Größe dieser Schwankung ist, und somit eine Grenze für einen noch meßbaren Strom vorzuliegen. Aber diese Folgerung ist ganz falsch.

Die Schwankungen des Nullpunkts sind zwar wegen der ganz unregelmäßigen Stöße der Gasmoleküle auf den Zeiger unregelmäßig; aber sie haben eine gewisse mittlere Größe, und sie erfolgen um eine mittlere Lage des Zeigers. Die Energie dieser Bewegungsschwankungen

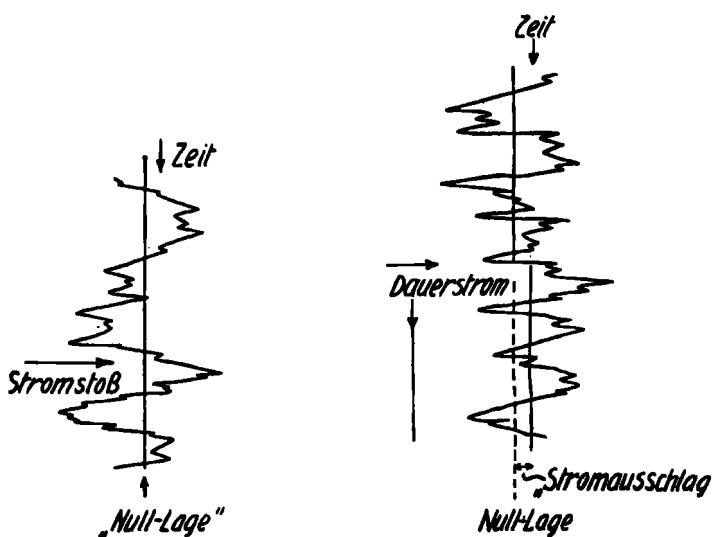


Abb. 4. Brownsche Bewegung, auf bewegtem Film registriert.

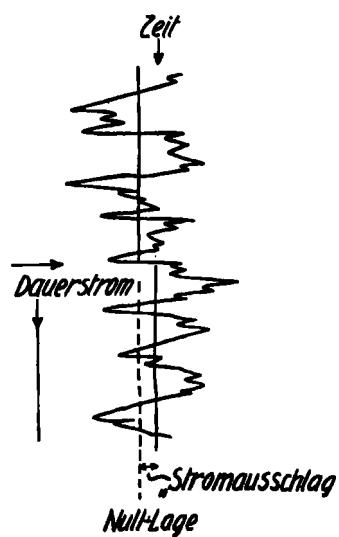


Abb. 5. Brownsche Bewegung eines Strommessers, ohne Strom und mit sehr kleinem Dauerstrom: Verlagerung der Null-Lage.

stammt aus der Temperaturenergie des Gases. Nun schicken wir durch das Amperemeter einen sehr kleinen, kurz dauernden elektrischen Strom; dann wird der Zeiger hierdurch einen Ausschlag machen; aber der ist klein, und es ist uns gar nicht möglich zu entscheiden, ob die in diesem Moment beobachtete Zeigerbewegung von dem Strom herführt oder ob es eine Brownsche Bewegungsschwankung war (Abb. 4). Nun

³⁾ Diese Frage ist ausführlich behandelt: W. Gerlach, Z. Ver. dtsch. Ing., 81, 1 [1937].

³⁾ D. h., das Licht braucht 1 Jahr vom Stern zur Erde: das entspricht 10^{13} km Abstand.

lassen wir den Strom dauernd durch das Amperemeter fließen; dann wird sich der kleine konstante Ausschlag über die Schwankung überlagern. Und wenn man diese lange genug beobachtet, so wird man finden, daß jetzt die Schwankung um einen anderen Mittelwert erfolgt als ohne Stromdurchgang: Der Abstand der beiden Mittelwerte ist der Stromausschlag (Abb. 5).

Wie ist das richtig zu verstehen? Je länger wir den Strom durch das Amperemeter gehen lassen, desto größer ist die elektrische Energie, welche im Amperemeter verbraucht ist. Wenn diese größer geworden ist als die Temperaturenergie, dann ist der Ausschlag mit dem angegebenen Verfahren messbar.

Wir sehen jetzt auch, warum bei der Messung eines kurzen starken Stromes die Schwierigkeit der Messung klein ist: Der starke Strom lagert auch in kleiner Zeit hohe Energie im Meßinstrument ab, und sobald diese größer ist als die Temperaturenergie, wird der Ausschlag größer als die Schwankungen durch die Temperaturenergie.

Somit besteht keine grundsätzliche untere Grenze für eine elektrische Messung, wenn nur genügend Energie (oder Zeit) zur Verfügung steht. Je tiefer die Temperatur der Meßanordnung, desto weniger Zeit ist erforderlich, weil die Schwankungen dann kleiner werden.

II. Eine heutige Grenze der physikalischen Anschauung.

Wir wenden uns nun einer grundsätzlichen Frage zu, einer jener Epochen in der Geschichte der Naturwissenschaft, in der wir uns plötzlich vor eine Grenze des Verstehenskönnens gestellt sehen. Ein solcher Fall ist die Quantentheorie. In den 90er Jahren hatte vor allem *Paschen* die Methoden zur Messung der Strahlung erhitzen Körper, die Reichsanstalt die Temperatormessung wesentlich verfeinert. Als mit diesen besseren Hilfsmitteln frühere Strahlungsmessungen von Temperaturstrahlern wiederholt wurden, ergaben sich ganz geringe Abweichungen gegen die damals herrschende Theorie der Strahlung, die auf bewährten Grundsätzen der Thermodynamik und der Elektrodynamik aufgebaut war. So war die Lage um 1900: Entweder sind diese Grundlagen nicht richtig oder sie sind auf die Strahlung nicht anwendbar. *Planck* zeigte damals, daß ein Ausweg möglich ist, wenn man der Strahlung eine andere Struktur gab, wenn man sie auffaßte als die Aussendung von Energiequanten. Es ist unmöglich, diese Tatsache etwa durch ein mechanisches Modell darzustellen — es ist eben eine völlig neuartige Tatsache, für die also auch eine Erklärung in dem Gehalt der früheren Physik nicht vorhanden sein konnte. So entstanden die Schlagworte klassische und moderne Physik. Kürzlich hat einmal jemand gesagt: Die Quantentheorie und die sich an sie anschließende Entwicklung wäre ein Unglück für die Physik, es wäre besser, man wäre bei der klassischen Physik geblieben. Man sollte so jemand mit sofortiger Wirkung alle Errungenschaften der Zivilisation und Technik sperren, die durch die Quantentheorie auf ihre heutige Höhe gebracht oder überhaupt erst ermöglicht wurden. Vielleicht würde er dann sein philosophisches Weltbild doch ändern.

Aber wir wollen ganz ehrlich sein: Die Rätsel der Quantentheorie haben einen unbefriedigenden Zustand gebracht, wenn auch die auf sie folgenden Entdeckungen von größter Bedeutung wurden. Hier haben wir heute tatsächlich eine Grenze des Verstehenskönnens, und wir hoffen, daß in späterer Zeit eine Lösung gefunden wird.

Über die Schwierigkeiten, denen sich die Physik hier gegenübergestellt sieht, möchte ich einiges sagen.

Wir haben vorhin über die Beugung der Lichtstrahlen gesprochen. Eine solche Beugung ist immer und nur mit der Fortpflanzung von Wellen verbunden; deshalb hat *Huyghens* das Licht als eine Wellenbewegung aufgefaßt,

ursprünglich als eine elastische Schwingung; schließlich kam man zu der elektromagnetischen Schwingung, wesensgleich den elektrischen Wellen der drahtlosen Telegraphie. Zwar kann man diese Wellen nicht direkt, etwa mit unseren Sinnen, nachweisen, aber die Beugung und die Brechung des Lichtes, die Drehung der Polarisationsebene und die anderen Erscheinungen der Lichtfortpflanzung sind in allen Feinheiten mit der Wellenvorstellung und nur mit ihr verständlich.

Und nun wird behauptet, daß die Lichtwelle nicht aus einem Schwingungsvorgang im strahlenden Körper entsteht (etwa analog zur Schwingung einer Geigenseite), sondern durch das Ausstoßen von Quanten, von einer Art Lichtenergieteilchen. Aber noch mehr: Jede Wirkung des Lichtes geschieht nicht so, als ob Wellen, sondern Quanten auf den Körper auffielen. Es ist niemals gelungen — und man hat von 1900 bis 1914 sich immer wieder darum bemüht —, den lichtelektrischen Effekt oder die Zersetzung des Bromsilbers der photographischen Platte oder auch den Sehvorgang im Auge irgendwie mit Schwingungen zu verstehen; dagegen ist alle solche Wirkung und damit auch die Wirkung auf unser Auge völlig darstellbar mit der Annahme von Lichtquanten. Deshalb gelingt es eben auch nicht, die Schwingungen etwa mit dem Auge nachzuweisen.

Dieser Zustand wäre nun noch erträglich, wenn nicht ein genau entgegengesetzt liegender Fall vor 10 Jahren entdeckt worden wäre. Man war bis damals der Ansicht, daß ein Elektron als eine Art von Korpuskel aufzufassen ist; konnte man doch seine Energie, seine Geschwindigkeit, seine Masse unmittelbar durch das Experiment bestimmen mit Hilfe von elektrischen Versuchen, die denen der Ballistik materieller Körper ganz entsprechen. Nun entdeckte man auf einmal, daß ein Strahl solcher Elektronen nach dem Durchgang durch einen genügend engen Spalt genau so unter definierten Winkeln abgelenkt, „gebeugt“, wurde, als ob er ein Lichtstrahl sei. Als genügend enger Spalt dienten genau wie bei der Beugung der Röntgenstrahlen die Raumgitter von Kristallen, also z. B. Metallfolien. Diese Erscheinung ist so sicher, daß man heute ja schon die „Beugung von Elektronenwellen“ genau so wie die der Röntgenstrahlen zur Strukturforschung technisch verwendet; ja sie stellen sogar in vielen Fällen eine wesentlich erweiterte Möglichkeit dar, wo Röntgenstrahlen versagen.

Aber noch ein drittes Faktum ist zu erwähnen: Auch ein Strahl von Atomen zeigt unter bestimmten Bedingungen die gleiche „Beugung“, so als ob die Atome Wellen wären.

Ich will versuchen, diese Tatsache durch ein Gedankenexperiment etwas handgreiflicher zu gestalten. Stellen Sie sich folgendes vor: In diesem Raum stünde in einer Ecke eine Scheibe, die durch einen Stoß umgeworfen werden kann; ich stehe auf der anderen Seite und wir verdunkeln den Saal. Nun mache ich irgendeinen Ihnen unbekannten Versuch, als dessen Folge die Scheibe umfällt. Sie sollen dieses deuten: Es kann keinem Zweifel unterliegen, daß Sie ohne Bedenken sagen: Es wurde eine Masse wider die Scheibe geworfen. Dann versichere ich Ihnen: Nein, ich habe nichts hingeworfen, sondern einen Lichtstrahl auf die Scheibe geworfen, sie ist durch den Impuls der Strahlung umgeworfen worden, durch den Lichtdruck, der auch die Kometenschweife von der Sonne ablenkt.

Nun ist einer unter Ihnen, der weiß, daß Strahlung durch einen Spalt seitlich gebeugt wird. Er stellt also in den Raum eine große Blechwand mit einem Spalt und bringt die Scheibe an eine Stelle, die seitlich von der durch mich und den Spalt gegebenen Geraden liegt, so daß sie also für mich durch die undurchdringliche Blechwand verdeckt ist. Und dann sagt der Kritiker, ich solle den Versuch nochmals machen. Er denkt nämlich: Wenn es wirklich Lichtstrahlen waren, die die Scheibe umwarfen, so werden

diese gebeugt und die Scheibe wird wieder umfallen, eben durch den gebeugten Strahl.

Wir verdunkeln und ich mache wieder einen Versuch, die Scheibe fällt — und man schließt daraus, daß ich wieder eine Lichtstrahlung ausgesandt habe, daß also in der Tat eine Strahlung einen Stoß ausüben kann. Nun erkläre ich aber: Nein, diesmal habe ich gar keine Lichtstrahlung, sondern Elektronen, Elektrizitätsteilchen, ausgeschickt, diese sind auch gebeugt worden.

Genau so liegt der Fall. Hier stehen wir vor dem berühmten Dualismus „Welle—Korpuskel“. Man sagt: Es kommt auf den Versuch an, ob eine Welle sich als Korpuskel oder ein Korpuskel als Welle manifestiert. Hiermit haben wir eine Grenze unseres heutigen Verstehens. Wir benutzen diesen Dualismus zu den wichtigsten technischen Dingen, wir können jeden Fall für sich messend und rechnend verfolgen, aber wir verstehen nicht, wie beide Erscheinungen einmal in ursächlichen Zusammenhang gebracht werden können.

Es wäre zwecklos, nun die Physik und die aus jeder der Erscheinungen für sich gezogenen Folgerungen aufzugeben und verzweifelt aufhören zu wollen. Wir arbeiten mit den zwar unverstandenen, aber in jeder Weise experimentell handhabbaren Dingen weiter. Der Naturforscher gleicht hier einem Feldherrn, der eine feindliche Armee über eine noch nicht eingenommene Festung hinaus verfolgen will: Er belagert die Festung und geht mit dem anderen Teil des Heeres neuen erreichbaren Zielen nach, planend, als ob er die Festung genommen hätte. Aber bei jedem Schritt bleibt er des noch nicht überwundenen Hindernisses eingedenkt!

Grundsätzlich möchte ich sagen, daß dieser Zustand der Physik mit seinen großen Problemen höchst erfreulich, daß aber das Erreichte noch nicht zufriedenstellend ist. Ich gehöre nicht zu denjenigen, die meinen, daß schon die Zeit dafür reif ist, diese Schwierigkeiten als grundsätzlich anzusehen. Das heißt nicht, daß man es als unrichtig bezeichnen soll, wenn jemand den Versuch macht, durch ein neues gedankliches Prinzip diese Schwierigkeiten wegzuschieben. Die Forscher müssen jeden Weg versuchen; aber am vernünftigsten scheint mir doch vorerst eine Forschung mit dem Gesichtspunkt zu sein, den Grund für die bestehenden Schwierigkeiten in einer nicht naturgemäßen Folgerung oder Ausdeutung der Experimente zu suchen.

III. Grenzen der naturwissenschaftlichen Methode.

Seit die exaktnaturwissenschaftliche Forschung als eine der klarsten Betätigungen des menschlichen Geistes auch in das Bewußtsein der Nicht-Naturforscher trat, begann man ihre Denk- und Forschungsart auch auf andere Bereiche auszudehnen. Man suchte nach „Gesetzen“ in der Nationalökonomie, in der Geschichte wie in der Biologie. Und da die Gesetze nicht immer stimmten, glaubte man vielfach, daß die „statistischen“ Gesetze der Naturwissenschaft hierfür geeignet seien, weil sie ja auch nur eine gewisse Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des vorausgesetzten Ablaufs enthalten. Eine „statistische“ Aussage heißt aber nicht eine unsichere Aussage, sondern eine Aussage mit einer quantitativ angebbaren Wahrscheinlichkeit. Man hat sich aber oft nicht klar gemacht, was der Naturforscher unter „Gesetz“ und „Statistik“ versteht. Es ist natürlich unmöglich, hier einen auch nur einigermaßen vollständigen Überblick über dieses Problem zu geben. Ich muß mich deshalb mit einigen Hinweisen begnügen.

Wenn wir das Ohmsche Gesetz als ein Grundgesetz kennen, so deshalb, weil die Stromleitung in einem Draht auf dem Ablauf einer außerordentlich großen Zahl von

Einzelprozessen beruht. Die Zustände in jedem Element des Drahts ändern sich ununterbrochen, aber nicht in einer Richtung, sondern um einen Mittelwert. Das „Gesetz“ sagt aus, wie sich dieser Mittelwert ändert, wenn ein ihn bestimmender Faktor geändert wird. Das ist die streng kausale Fassung eines Gesetzes.

Sobald wir aber das Ohmsche Gesetz in immer kleineren Volumeinheiten prüfen wollen, machen sich die Schwankungen bemerkbar, und das Ohmsche Gesetz nimmt den Charakter eines „statistischen Gesetzes“ an. Das heißt aber nicht, daß es jetzt nicht mehr streng kausal gilt. Es heißt nur: wir können nicht alle einzelnen Bedingungen in einem Zeitmoment zahlenmäßig fassen. Das möchte ich als eine Grenze des menschlichen Vermögens bezeichnen, aber nicht als eine Grenze des Erforschbaren. Es ist die Aufgabe der Wissenschaft, die Analyse so weit zu treiben, daß die Kausalität stets erkannt wird. Der Fall liegt ganz ähnlich wie bei der Wettervorhersage: Es sind nicht alle Anfangsbedingungen bekannt, deshalb hat die Vorhersage statistischen Wert, nicht aber weil das Wetter ein „statistischer“ Vorgang ist. Bjerkness hat das einmal ungefähr so ausgedrückt: Wenn wir alle Bedingungen wüßten, so könnten wir hieraus das kommende Wetter berechnen; und die Meteorologie wäre eine exakte Wissenschaft, auch wenn sie zur Berechnung der Voraussage für den folgenden Tag Monate gebrauchte.

Aber nun kommt noch eine zweite Bedingung für die Aufstellbarkeit eines physikalischen Gesetzes: das ist die willkürliche Herstellung der Bedingungen und die Prüfung seiner Richtigkeit am wiederholten Ablauf des Vorganges: also das Experiment und seine Reproduzierbarkeit.

Und hiermit kommen wir an die Grenze der Anwendbarkeit der physikalischen Forschung in den Bereichen, in denen dieses Experiment nicht möglich ist. Das sind alle die Bereiche, in welchen das menschliche Denken, die menschliche Psyche — sagen wir ruhig auch: die Laune —, einer der bestimmenden Faktoren ist; es sind alle die Bereiche, in welchen Menschen handelnd in Aktion treten; es sind alle die Bereiche, in welchen die Feststellung der Bedingungen der Wertung unterworfen ist.

In allen diesen Fällen, in denen der Mensch nicht nur eine beobachtende, einer physikalisch messenden Kontrolle unterworfen, sondern eine handelnde Rolle spielt, entfällt die Feststellung eines wesentlichen Bestimmungsstückes, nämlich seines Denkzustandes. Das ist die grundsätzlich vorhandene Unsicherheit, welche den Versuch zur Aufstellung eines physikalischen Gesetzes von vornherein verbietet.

So halten wir es auch für ausgeschlossen, mit Hilfe der naturwissenschaftlichen Analyse das größte Problem des Lebens zu erforschen: das Problem unseres Denkens, unserer Seele. Mit den gegebenen Denkfähigkeiten, die sich sicher in der Entwicklung des menschlichen Geschlechts erweitern — man erinnere sich, daß im Mittelalter die Existenz von „Antipoden“ noch unfaßbar war! —, können wir wohl die Außenwelt erforschen, nicht aber unsere Innenwelt. Denn diese ist identisch mit den Denkvorgängen, die man nicht mit sich selbst analysieren kann. Darum halten wir es auch für ausgeschlossen, daß jemals ein Konflikt zwischen naturwissenschaftlicher Forschung und anderen Betätigungen des menschlichen Geistes, etwa mit der Religion, auftreten kann: Sollte er sich zeigen, so hat sich eine der beiden Disziplinen in den Gültigkeitsbereich, auf das Forschungsfeld der anderen begeben und damit eine Sünde gegen ihren eigenen Geist begangen.

* * *

Die Grenzen der naturwissenschaftlichen Forschung sind gegeben durch die Grenzen der Meßverfahren, durch die Grenzen in der willkürlichen Herstellung und

Wiederholbarkeit der Bedingungen eines Geschehens und die Grenzen der Abstraktion vom Ich. Der Mensch darf mit Recht stolz sein auf das, was sein Bemühen, sein Einfühlen in die Natur ihm von ihren Rätseln enthüllte. Aber er ist auch bescheiden: denn er weiß, daß dieser Tätigkeit Grenzen gesetzt sind, daß es Rätsel der Natur gibt und geben wird, in die seine wissenschaftlichen Forschungs-

methoden nicht eindringen können. Und er wird auf das stolze Wort des Sophokles über die Gewaltigkeit des Menschen für seine Person und seine Arbeit antworten:

„Teurer als uns erhöhender Trug
Ist uns die Finsternis niederer Wahrheit.“

[A. 34.]

Von neuen Ergebnissen und Fragestellungen der Kolloidforschung

Von Prof. Dr. P. A. THIESSEN

Direktor des Kaiser-Wilhelm-Instituts für physikalische Chemie und Elektrochemie, Berlin-Dahlem

Eingelegt 14. Mai 1938

Einleitung.

In allgemeinen gilt die Regel, daß die stofflichen und physikalischen Eigenschaften eines Körpers unabhängig sind von seinen Abmessungen. Die Erfahrung lehrt indes, daß im Bereich sehr feiner Zerteilungen, d. h. bei Durchmessern oder Seitenlängen von Körpern unter 10^{-5} cm, Abweichungen von dieser Regel auftreten. So ändern sich z. B. Dichte, Dampfdruck und sogar die chemische Affinität von Stoffen in diesem Bereich fühlbar gegenüber den Werten bei größeren Abmessungen der Körper.

Die Eigenart des Bereiches der feinsten Zerteilungen führte seinerzeit zur Entwicklung eines neuen Zweiges der Chemie, der Kolloidforschung. Diese gewann einen zunehmenden Einfluß auf die chemische und physikalische Allgemeinforschung; sie erwies sich darüber hinaus als unentbehrliche Grundlage für eine große Gruppe von ausgedehnten und bedeutenden technischen Prozessen. Die Ansprüche, die an die Kolloidforschung gestellt wurden, bewirkten, daß ihre Entwicklung in die Breite rascher erfolgte als die Vertiefung ihrer Grundlagen. Die Möglichkeiten eines vollen Einsatzes sind daher in manchem ihrer Bereiche noch beschränkt; es bedarf daher noch viel intensiver Arbeit, um allenthalben sichere, tragfähige und ausgedehnte Grundlagen zu schaffen.

Da die Kolloidforschung sich mit einem Zerteilungszustand der Materie beschäftigt, der grundsätzlich bei allen Stoffen möglich ist, erfaßt sie das ganze Gebiet der Lehre vom Stoff. Sie kann infolgedessen auch das Rüstzeug der experimentellen und theoretischen Chemie aller Zweige nicht entbehren. Ebenso ist sie auf die allgemeinen Verfahren und Denkweisen der Physik angewiesen. Daneben war sie aber genötigt, sich einen Schatz eigener charakteristischer Methoden zu schaffen und fortgesetzt zu erweitern, der den Dimensionen und Konstanten ihres Bereiches besonders angepaßt ist.

Aus den weiten Gebieten, welche die Kolloidforschung erfassen muß, entsteht eine erhebliche Schwierigkeit: Die Erscheinungen an kolloiden Systemen ergeben sich in der Regel aus einem überaus verwickelten Zusammenwirken zahlreicher und vielgestaltiger chemischer und physikalischer Einflüsse. Bei der großen Zahl von Variablen ist es dabei meist sehr schwierig, die wesentlichen und kennzeichnenden Grundlagen herauszufinden und gerecht zu beurteilen. Eine wirksame Abhilfe besteht darin, für die Erkundung der Grundlagen möglichst einfache Grundsysteme zu suchen, in denen die verschiedenen Einflüsse zu erkennen, abzugrenzen und zu bewerten sind. Solche Grundsysteme müssen dann nach ihrer vollständigen Erforschung zunehmend Schritt für Schritt mit weiteren Variablen belastet werden, um schließlich in ständig gesichertem Fortschreiten zu den verwickelten Systemen der kolloidchemisch fundierten Wissenschaft und Technik zu führen.

Der Gang und Ausbau von Untersuchungen an solchen Grundsystemen und Fortschritte der Entwicklung, der Schaffung und des Einsatzes des experimentellen Rüstzeuges sowie eine Reihe von Folgerungen daraus sollen im folgenden im Rahmen eines Berichtes über kolloidchemische Arbeiten des Kaiser-Wilhelm-Institutes für physikalische Chemie und Elektrochemie in Berlin-Dahlem dargelegt werden.

Ultra- und Übermikroskopie.

Seit Zsigmondy's Tagen gilt das Ultramikroskop als eines der klassischen Geräte der Kolloidforschung. Es ermöglicht in seinen besten, auf der Grundlage der Konstruktion von Siedentopff und Zsigmondy beruhenden Typen unter günstigen Bedingungen noch die Wahrnehmung von Partikeln mit Durchmessern von etwa 100 Å. Seine Leistungsfähigkeit ist bei gegebenem Material begrenzt durch die Stärke der Objektbeleuchtung. Es gelang kürzlich Winkel u. Witt¹⁾ durch einen einfachen Kunstgriff, die Leistungsfähigkeit des klassischen Instrumentes erheblich zu steigern.

Sie benutzten dabei anstatt der einen bis dahin üblichen Lichtquelle (Abb. 1a) für die Beleuchtung des

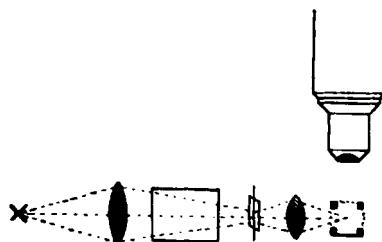


Abb. 1a. Schema des einfachen Ultramikroskopes.

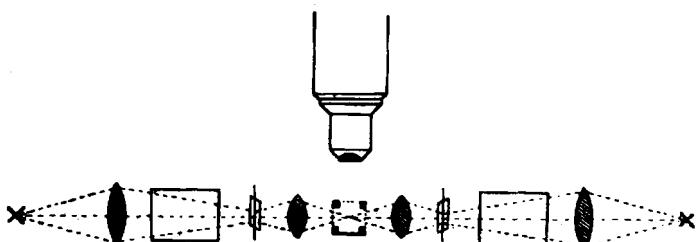


Abb. 1b. Schema des Zwillings-Ultramikroskopes.

Objektes zwei gleichachsig angeordnete Beleuchtungssysteme (Abb. 1b). Die Lichtstärke wuchs dadurch so an, daß es möglich wurde, sehr lichtschwache Teilchen photographisch aufzunehmen und von Bewegungsvorgängen an Partikeln wenig reflektierender Substanzen sogar Laufbilder zu gewinnen.

¹⁾ A. Winkel u. W. Witt, Z. Elektrochem. angew. physik. Chem. 42, 281 [1936].