

A. Einstein (Zürich), Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung.

Als man erkannt hatte, daß das Licht die Erscheinungen der Interferenz und Beugung zeige, da erschien es kaum mehr bezweifelbar, daß das Licht als eine Wellenbewegung aufzufassen sei. Da das Licht sich auch durch das Vakuum fortzupflanzen vermag, so mußte man sich vorstellen, daß auch in diesem eine Art besonderer Materie vorhanden sei, welche die Fortpflanzung der Lichtwellen vermittelt. Für die Auffassung der Gesetze der Ausbreitung des Lichtes in ponderablen Körpern war es nötig, anzunehmen, daß jene Materie, welche man Lichtäther nannte, auch in diesen vorhan-

den sei, und daß es auch im Innern der ponderablen Körper im wesentlichen der Lichtäther sei, welcher die Ausbreitung des Lichtes vermittelt. Die Existenz jenes Lichtäthers schien unbezweifelbar. In dem 1902 erschienenen ersten Bande des vortrefflichen Lehrbuches der Physik von Chwolson findet sich in der Einleitung über den Äther der Satz: „Die Wahrscheinlichkeit der Hypothese von der Existenz dieses einen Agens grenzt außerordentlich nahe an Gewißheit“.

Heute aber müssen wir wohl die Ätherhypothese als einen überwundenen Standpunkt ansehen. Es ist sogar unleugbar, daß es eine ausgedehnte Gruppe von die Strahlung betreffenden Tatsachen gibt, welche zeigen, daß dem Lichte gewisse fundamentale Eigenschaften zukommen, die sich weit eher vom Standpunkte der Newtonschen Emissionstheorie des Lichtes als vom Standpunkte der Undulationstheorie begreifen lassen. Deshalb ist es meine Meinung, daß die nächste Phase der Entwicklung der theoretischen Physik uns eine Theorie des Lichtes bringen wird, welche sich als eine Art Verschmelzung von Undulations- und Emissionstheorie des Lichtes auffassen läßt. Diese Meinung zu begründen, und zu zeigen, daß eine tiefgehende Änderung unserer Anschauungen vom Wesen und von der Konstitution des Lichtes unerlässlich ist, das ist der Zweck der folgenden Ausführungen.

Der größte Fortschritt, welchen die theoretische Optik seit der Einführung der Undulationstheorie gemacht hat, besteht wohl in Maxwells genialer Entdeckung von der Möglichkeit, das Licht als einen elektromagnetischen Vorgang aufzufassen. Diese Theorie führt statt der mechanischen Größen, nämlich Deformation und Geschwindigkeit der Teile des Äthers, die elektromagnetischen Zustände des Äthers und der Materie in die Betrachtung ein und reduziert dadurch die optischen Probleme auf elektromagnetische. Je mehr sich die elektromagnetische Theorie entwickelte, desto mehr trat die Frage, ob sich die elektromagnetischen Vorgänge auf mechanische zurückführen lassen, in den Hintergrund; man gewöhnte sich daran, die Begriffe elektrische und magnetische Feldstärke, elektrische Raumdichte usw. als elementare Begriffe zu behandeln, die einer mechanischen Interpretation nicht bedürfen.

Durch die Einführung der elektromagnetischen Theorie wurden die Grundlagen der theoretischen Optik vereinfacht, die Anzahl der willkürlichen Hypothesen vermindert. Die alte Frage nach der Schwingungsrichtung des polarisierten Lichtes wurde gegenstandslos. Die Schwierigkeiten, betreffend die Grenzbedingungen an der Grenze zweier Media ergaben sich aus dem Fundament der Theorie. Es bedurfte keiner willkürlichen

Hypothese mehr, um longitudinale Lichtwellen anzuschließen. Der erst in neuerer Zeit experimentell konstatierte Lichtdruck, welcher in der Theorie der Strahlung eine so wichtige Rolle spielt, ergab sich als Konsequenz der Theorie. Ich will gar keine erschöpfende Aufzählung der wohlbekannten Errungenschaften hier versuchen, sondern einen Hauptpunkt ins Auge fassen, in bezug auf welchen die elektromagnetische Theorie mit der kinetischen Theorie übereinstimmt oder, besser gesagt, übereinzustimmen scheint.

Nach beiden Theorien erscheinen nämlich die Lichtwellen im wesentlichen als ein Inbegriff von Zuständen eines auch bei Abwesenheit von Strahlung allenthalben vorhandenen hypothetischen Mediums, des Äthers. Es war daher anzunehmen, daß Bewegungen dieses Mediums auf die optischen und elektromagnetischen Erscheinungen von Einfluß sein müssen. Das Suchen nach den Gesetzen, welchen dieser Einfluß unterliege, veranlaßte eine Wandlung in den die Natur der Strahlung betreffenden Grundanschauungen, deren Verlauf wir kurz betrachten wollen.

Die Grundfrage, die sich da aufdrängte, war folgende: Macht der Lichtäther die Bewegungen der Materie mit, oder ist er im Innern bewegter Materie anders bewegt als diese, oder endlich nimmt er vielleicht an den Bewegungen der Materie überhaupt gar nicht Anteil, sondern bleibt stets in Ruhe. Um diese Frage zu entscheiden, stellte Fizeau einen wichtigen Interferenzversuch an, der auf folgender Überlegung beruht. Es breite sich das Licht in einem Körper mit der Geschwindigkeit V aus, falls dieser ruht. Falls dieser Körper, wenn er bewegt ist, seinen Äther vollkommen mitnimmt, so wird sich in diesem Falle das Licht relativ zum Körper ebenso ausbreiten, wie wenn der Körper ruhte. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit relativ zum Körper wird also auch in diesem Falle V sein. Absolut genommen, d. h. relativ zu einem nicht mit dem Körper bewegten Beobachter, wird aber die Fortpflanzungsgeschwindigkeit eines Lichtstrahles gleich sein der geometrischen Summe aus V und der Bewegungsgeschwindigkeit v des Körpers. Falls Fortpflanzungs- und Bewegungsgeschwindigkeit gleich gerichtet und gleichsinnig sind, ist V_{abs} einfach gleich der Summe der beiden Geschwindigkeiten, d. h.

$$V_{\text{abs}} = V + v.$$

Um zu prüfen, ob diese Konsequenz aus der Hypothese des vollkommen mitbewegten Lichtäthers zutrefte, ließ Fizeau zwei kohärente monochromatische Lichtbündel je eine mit Wasser gefüllte Röhre axial passieren und nachher zur Interferenz gelangen. Ließ er nun gleichzeitig das Wasser in den Röhren sich axial durch diese hindurch bewegen, und zwar

durch die eine im Sinne des Lichtes, durch die andere im entgegengesetzten Sinne, so ergab sich eine Verschiebung der Interferenzfransen, aus denen er einen Rückschluß ziehen konnte auf den Einfluß der Körpergeschwindigkeit auf die Absolutgeschwindigkeit.

Es ergab sich bekanntlich, daß ein Einfluß der Körpergeschwindigkeit in dem zu erwartenden Sinne vorhanden ist, daß er aber stets kleiner ist, als der Hypothese von der vollständigen Mitführung entspricht. Es ist

$$V_{\text{abs}} = V + \alpha v,$$

wobei α stets kleiner als 1 ist. Unter Vernachlässigung der Dispersion ist

$$\alpha = 1 - \frac{1}{n^2}.$$

Aus diesem Experiment folgte, daß eine vollständige Mitführung des Äthers durch die Materie nicht stattfindet, daß also eine Relativbewegung des Äthers gegen die Materie im allgemeinen vorhanden sei. Nun ist aber die Erde ein Körper, der in bezug auf das Sonnensystem im Laufe des Jahres Geschwindigkeiten verschiedener Richtung hat, und es war anzunehmen, daß der Äther in unseren Laboratorien ebensowenig diese Bewegung der Erde vollkommen mitmache, wie er beim Fizeauschen Versuch die Bewegung des Wassers vollkommen mitzumachen schien. Es war also zu folgern, daß eine mit der Tages- und Jahreszeit wechselnde Relativbewegung des Äthers gegen unsere Apparate existiere, und man mußte erwarten, daß diese Relativgeschwindigkeit bei optischen Versuchen eine scheinbare Anisotropie des Raumes herbeiführe, d. h. daß die optischen Erscheinungen von der Orientierung der Apparate abhängig seien. Die verschiedensten Experimente zur Konstatierung einer solchen Anisotropie wurden ausgeführt, ohne daß man die erwartete Abhängigkeit der Erscheinungen von der Orientierung der Apparate hätte konstatieren können.

Dieser Widerspruch wurde zum größten Teil beseitigt durch die bahnbrechende Arbeit von H. A. Lorentz im Jahre 1895. Lorentz zeigte, daß man unter Zugrundelegung eines ruhenden, an den Bewegungen der Materie nicht teilnehmenden Äthers ohne Aufstellung sonstiger Hypothesen zu einer Theorie gelangt, welche fast allen Erscheinungen gerecht wird. Insbesondere erklärten sich die Ergebnisse des oben angedeuteten Versuches von Fizeau sowie das negative Ergebnis der erwähnten Versuche, die Bewegung der Erde gegen den Äther zu konstatieren. Nur mit einem einzigen Experiment schien die Lorentzsche Theorie nicht vereinbar zu sein, nämlich mit dem Interferenzversuch von Michelson und Morley.

Lorentz hatte gezeigt, daß nach seiner

Theorie, abgesehen von Gliedern, welche den Quotienten $\frac{\text{Körpergeschwindigkeit}}{\text{Lichtgeschwindigkeit}}$ in der zweiten oder einer höheren Potenz als Faktor enthielten, ein Einfluß einer gemeinsamen Translationsbewegung der Apparate auf den Strahlengang bei optischen Versuchen nicht vorhanden sei. Es war aber damals schon der Interferenzversuch von Michelson und Morley bekannt, welcher dartat, daß in einem speziellen Falle auch Glieder zweiter Ordnung in bezug auf den Quotienten $\frac{\text{Körpergeschwindigkeit}}{\text{Lichtgeschwindigkeit}}$ sich nicht bemerkbar machten, trotzdem dies vom Standpunkte der Theorie des ruhenden Lichtäthers aus zu erwarten war. Damit dieser Versuch von der Theorie mit umfaßt werde, wurde von Lorentz und Fitz-Gerald bekanntlich die Annahme eingeführt, daß alle Körper, also auch diejenigen, welche die Bestandteile der Versuchsanordnung von Michelson und Morley miteinander verbanden, in bestimmter Weise ihre Gestalt ändern, falls sie relativ zum Äther bewegt werden.

Diese Sachlage war nun eine höchst unbefriedigende. Die einzige Theorie, welche brauchbar und in ihren Grundlagen durchsichtig war, war die Lorentzsche Theorie. Diese ruhte auf der Voraussetzung eines absolut unbeweglichen Äthers. Die Erde mußte relativ zu diesem Äther als bewegt angesehen werden. Alle Versuche aber, jene Relativbewegung nachzuweisen, verliefen resultatlos, so daß man zur Aufstellung einer ganz eigentümlichen Hypothese gezwungen wurde, um begreifen zu können, daß jene Relativbewegung sich nicht bemerkbar mache.

Der Michelsonsche Versuch legte die Voraussetzung nahe, daß alle Erscheinungen relativ zu einem mit der Erde bewegten Koordinatensystem, allgemeiner überhaupt relativ zu jedem beschleunigungsfrei bewegten System nach genau den gleichen Gesetzen verlaufen. Diese Voraussetzung wollen wir im folgenden kurz „Relativitätsprinzip“ nennen. Bevor wir die Frage berühren, ob es möglich sei, an dem Relativitätsprinzip festzuhalten, wollen wir kurz überlegen, was bei Festhaltung dieses Prinzips aus der Ätherhypothese wird.

Unter Zugrundelegung der Ätherhypothese führte das Experiment dazu, den Äther als unbeweglich anzunehmen. Das Relativitätsprinzip besagt dann, daß alle Naturgesetze in bezug auf ein relativ zum Äther gleichförmig bewegtes Koordinatensystem K' gleich seien den entsprechenden Gesetzen in bezug auf ein relativ zum Äther ruhendes Koordinatensystem K . Ist dem aber so, dann haben wir ebensoviel Grund, uns den Äther als relativ zu K' ruhend vorzustellen wie als relativ zu K ruhend. Es ist

dann überhaupt ganz unnatürlich, eines der beiden Koordinatensysteme K, K' dadurch auszuzeichnen, daß man einen relativ zu ihm ruhenden Äther einführt. Daraus folgt, daß man zu einer befriedigenden Theorie nur dann gelangen kann, wenn man auf die Ätherhypothese verzichtet. Die das Licht konstituierenden elektromagnetischen Felder erscheinen dann nicht mehr als Zustände eines hypothetischen Mediums, sondern als selbständige Gebilde, welche von den Lichtquellen ausgesandt werden, gerade wie nach der Newtonschen Emissionstheorie des Lichtes. Ebenso wie gemäß letzterer Theorie erscheint ein nicht von Strahlung durchsetzter, von ponderabler Materie freier Raum wirklich als leer.

Bei oberflächlicher Betrachtung erscheint es unmöglich, das Wesentliche der Lorentzschen Theorie mit dem Relativitätsprinzip in Einklang zu bringen. Pflanzt sich nämlich ein Lichtstrahl im Vakuum fort, so geschieht dies nach der Lorentzschen Theorie in bezug auf ein im Äther ruhendes Koordinatensystem K stets mit der bestimmten Geschwindigkeit c , unabhängig vom Bewegungszustande des emittierenden Körpers. Wir wollen diesen Satz das Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nennen. Nach dem Additionstheorem der Geschwindigkeiten wird sich derselbe Lichtstrahl in bezug auf ein relativ zum Äther in gleichförmiger Translationsbewegung befindliches Koordinatensystem K' nicht ebenfalls mit der Geschwindigkeit c fortpflanzen. Die Gesetze der Lichtfortpflanzung scheinen also in bezug auf beide Koordinatensysteme verschieden zu sein, und es scheint daraus zu folgen, daß das Relativitätsprinzip mit den Gesetzen der Lichtausbreitung unvereinbar ist.

Das Additionstheorem der Geschwindigkeiten beruht indessen auf den willkürlichen Voraussetzungen, daß Zeitangaben sowie Angaben über die Gestalt von bewegten Körpern eine vom Bewegungszustande des benutzten Koordinatensystems unabhängige Bedeutung haben. Man überzeugt sich aber, daß man zu einer Definition der Zeit und der Gestalt bewegter Körper der Einführung von Uhren bedarf, welche relativ zu dem benutzten Koordinatensystem ruhen. Man muß deshalb jene Begriffe für jedes Koordinatensystem besonders festlegen, und es ist nicht selbstverständlich, daß diese Definitionen für zwei relativ zueinander bewegte Koordinatensysteme K und K' zu gleichen Zeitwerten t und t' für die einzelnen Ereignisse führen; ebensowenig läßt sich a priori sagen, daß jegliche Aussage über die Gestalt von Körpern, welche in bezug auf das Koordinatensystem K gilt, auch in bezug auf das relativ zu K bewegte Koordinatensystem K' gelte.

Daraus geht hervor, daß die bisher gebräuch-

lichen Transformationsgleichungen für den Übergang von einem Koordinatensystem zu einem relativ zu ihm gleichförmig bewegten Koordinatensystem auf willkürlichen Annahmen beruhen. Läßt man diese fallen, so zeigt sich, daß man das Fundament der Lorentzschen Theorie bzw. allgemeiner das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit mit dem Relativitätsprinzip in Einklang bringen kann. Man gelangt so zu neuen, durch die beiden Prinzipie eindeutig bestimmten Gleichungen der Koordinatentransformation, welche bei passender Wahl der Anfangspunkte von Koordinaten und Zeiten dadurch charakterisiert sind, daß durch sie die Gleichung

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2$$

zu einer Identität wird. Hierbei bedeutet c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, x, y, z sind Raum-Zeit-Koordinaten in bezug auf K , x', y', z', t' in bezug auf K' .

Dieser Weg führt zu der sogenannten Relativitätstheorie, von deren Konsequenzen ich hier nur eine einzige anführen möchte, weil sie eine gewisse Modifikation der Grundanschauungen auf dem Gebiete der Physik mit sich bringt. Es zeigt sich nämlich, daß die träge Masse eines Körpers um L/c^2 abnimmt, wenn derselbe die Strahlungsenergie L emittiert. Man kann dazu auf folgenden Wege gelangen.

Wir betrachten einen unbewegten, freischwebenden Körper, welcher nach zwei entgegengesetzten Richtungen die gleiche Energiemenge in Form von Strahlung aussendet. Dabei bleibt der Körper in Ruhe. Bezeichnen wir mit E_0 die Energie des Körpers vor der Emission, mit E_1 dessen Energie nach der Emission, mit L die Menge der emittierten Strahlung, so hat man nach dem Energieprinzip

$$E_0 = E_1 + L.$$

Wir betrachten nun den Körper sowie die von demselben emittierte Strahlung von einem Koordinatensystem aus, relativ zu welchem sich der Körper mit der Geschwindigkeit v bewegt. Es liefert dann die Relativitätstheorie die Mittel, um die Energie der ausgesandten Strahlung bezüglich des neuen Koordinatensystems zu berechnen. Man erhält hierfür den Wert

$$L' = L \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Da in bezug auf das neue Koordinatensystem ebenfalls das Prinzip von der Erhaltung der Energie gelten muß, erhält man in analoger Bezeichnungsweise

$$E'_0 = E'_1 + L \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Durch Subtraktion erhält man unter Weglassung der Glieder, welche in v/c von vierter und höherer Ordnung sind:

$$(E'_0 - E_0) = (E'_1 - E_1) + \frac{1}{2} \frac{L}{c^2} v^2.$$

Nun ist aber $E'_0 - E_0$ nichts anderes als die kinetische Energie des Körpers vor der Lichtaussendung, $E'_1 - E_1$ nichts anderes als dessen kinetische Energie nach der Lichtaussendung. Nennt man M_0 die Masse des Körpers vor der Aussendung, M_1 dessen Masse nach der Lichtaussendung, so kann man unter Vernachlässigung der Glieder höheren als zweiten Grades setzen:

$$\frac{1}{2} M_0 v^2 = \frac{1}{2} M_1 v^2 + \frac{1}{2} \frac{L}{c^2} v^2$$

oder

$$M_0 = M_1 + \frac{L}{c^2}.$$

Es vermindert sich also die träge Masse eines Körpers bei Lichtaussendung. Die abgegebene Energie figuriert als Teil der Masse des Körpers. Man kann hieraus weiter schließen, daß jegliche Energieaufnahme bzw. -abgabe eine Zu- bzw. Abnahme der Masse des betreffenden Körpers mit sich bringt. Es erscheinen Energie und Masse ebenso als äquivalente Größen wie Wärme und mechanische Energie.

Die Relativitätstheorie hat also unsere Anschauungen über die Natur des Lichtes insofern geändert, als sie das Licht nicht als Folge von Zuständen eines hypothetischen Mediums auf faßt, sondern als etwas wie die Materie selbständig Bestehendes. Es hat ferner nach dieser Theorie mit einer Korpuskulartheorie des Lichtes das Merkmal gemeinsam, träge Masse vom emittierenden zum absorbierenden Körper zu übertragen. An unserer Auffassung von der Struktur der Strahlung, insbesondere von der Verteilung der Energie in dem durchstrahlten Raume änderte die Relativitätstheorie nichts. Es ist jedoch meine Meinung, daß wir in bezug auf diese Seite der Frage am Anfange einer noch nicht übersehbaren, jedoch zweifellos höchst bedeutsamen Entwicklung stehen. Was ich im folgenden vorbringen werde, ist größtenteils bloße persönliche Meinung bzw. Ergebnis von Überlegungen, welche eine genügende Nachprüfung durch andere noch nicht erfahren haben. Wenn ich dieselben trotzdem hier vorbringe, so ist dies nicht auf übermäßiges Vertrauen in die eigenen Ansichten zurückzuführen, sondern auf die Hoffnung, den einen oder anderen von Ihnen dazu veranlassen zu können, sich mit den in Betracht kommenden Fragen abzugeben.

Auch ohne tiefer in irgendwelche theoretische Betrachtung einzugehen, bemerkt man, daß unsere Lichttheorie gewisse fundamentale Eigenschaften der Lichtphänomene nicht zu er-

klären vermag. Warum hängt es nur von der Farbe, nicht aber von der Intensität des Lichtes ab, ob eine bestimmte photochemische Reaktion eintritt oder nicht? Warum sind die kurzwelligen Strahlen im allgemeinen chemisch wirksamer als die langwelligen? Warum ist die Geschwindigkeit der lichtelektrisch erzeugten Kathodenstrahlen von der Intensität des Lichtes unabhängig? Warum bedarf es hoher Temperaturen, also hoher Molekularenergien, damit die durch die Körper emittierte Strahlung kurzwellige Bestandteile enthalte?

Auf alle diese Fragen gibt die Undulationstheorie in ihrer heutigen Fassung keine Antwort. Insbesondere ist es durchaus nicht begreiflich, warum die lichtelektrisch oder durch Röntgenstrahlen erzeugten Kathodenstrahlen eine so bedeutende, von der Strahlintensität unabhängige Geschwindigkeit erlangen. Das Auftreten so großer Energiemengen an einem molekularen Gebilde unter dem Einfluß einer Quelle, in welcher die Energie so wenig dicht verteilt ist, wie wir dies bei der Licht- und Röntgenstrahlung nach der Undulationstheorie voraussetzen müssen, veranlaßte tüchtige Physiker dazu, ihre Zuflucht zu einer recht fernliegenden Hypothese zu nehmen. Sie nahmen an, daß das Licht bei dem Vorgang lediglich eine auslösende Rolle spiele, die zum Vorschein kommenden Molekularenergien aber radioaktiver Natur seien. Weil diese Hypothese bereits wieder so ziemlich verlassen ist, will ich gegen sie keine Gründe vorbringen.

Die Grundeigenschaft der Undulationstheorie, welche diese Schwierigkeiten mit sich bringt, scheint mir im folgenden zu liegen. Während in der kinetischen Molekulartheorie zu jedem Vorgang, bei welchem nur wenige Elementarteilchen beteiligt sind, z. B. zu jedem molekularen Zusammenstoß, der inverse Vorgang existiert, ist dies nach der Undulationstheorie bei den elementaren Strahlungsvorgängen nicht der Fall. Ein oszillierendes Ion erzeugt nach der uns geläufigen Theorie eine nach außen sich fortpflanzende Kugelwelle. Der umgekehrte Prozeß existiert als Elementarprozeß nicht. Die nach innen fortschreitende Kugelwelle ist nämlich zwar mathematisch möglich; aber es bedarf zu deren angenäherter Realisierung einer ungeheuren Menge von emittierenden Elementargebilden. Dem Elementarprozeß der Lichtemission als solchem kommt also der Charakter der Umkehrbarkeit nicht zu. Hierin trifft, glaube ich, unsere Undulationstheorie nicht das Richtige. Es scheint, daß in bezug auf diesen Punkt die Emissionstheorie des Lichtes von Newton mehr Wahres enthält als die Undulationstheorie, da nach ersterer die Energie, welche einem Lichtteilchen bei der Aussendung verliehen wird, nicht über den unendlichen Raum zerstreut wird,

sondern für einen Elementarprozeß der Absorption disponibel bleibt. Man denke an die Gesetze der Erzeugung der sekundären Kathodenstrahlung durch Röntgenstrahlen.

Fallen primäre Kathodenstrahlen auf eine Metallplatte P_1 , so erzeugen sie Röntgenstrahlen. Fallen diese auf eine zweite Metallplatte P_2 , so werden wieder Kathodenstrahlen erzeugt, deren Geschwindigkeit von derselben Größenordnung ist wie die Geschwindigkeit der primären Kathodenstrahlen. Die Geschwindigkeit der sekundären Kathodenstrahlen hängt, soviel wir heute wissen, weder vom Abstand der Platten P_1 und P_2 noch von der Intensität der primären Kathodenstrahlen, sondern ausschließlich von der Geschwindigkeit der primären Kathodenstrahlen ab. Nehmen wir einmal an, dies sei streng richtig. Was wird geschehen, wenn wir die Intensität der primären Kathodenstrahlen oder die Größe der Platte P_1 , auf die sie fallen, derart abnehmen lassen, daß man das Auftreffen eines Elektrons der primären Kathodenstrahlen als einen isolierten Prozeß auffassen kann? Wenn das Vorhergehende wirklich richtig ist, so werden wir wegen der Unabhängigkeit der Geschwindigkeit der Sekundärstrahlen von der Intensität der primären Kathodenstrahlen anzunehmen haben, daß an P_2 (infolge des Auftreffens jenes Elektrons auf P_1) entweder gar nichts erzeugt wird, oder aber an P_2 eine sekundäre Emission eines Elektrons erfolgt mit einer Geschwindigkeit, die von derselben Größenordnung ist, wie diejenige des auf P_1 auffallenden Elektrons gewesen ist. Mit anderen Worten, der elementare Strahlungsprozeß scheint derart zu verlaufen, daß er nicht, wie die Undulationstheorie verlangt, die Energie des primären Elektrons durch eine nach allen Seiten sich fortpflanzende Kugelwelle verteilt und zerstreut. Sondern es scheint wenigstens ein großer Teil dieser Energie an irgendeiner Stelle von P_2 oder anderswo disponibel zu sein. Der Elementarvorgang der Strahlungsemission scheint gerichtet zu sein. Es macht ferner den Eindruck, daß der Prozeß der Erzeugung des Röntgenstrahles in P_1 und die Erzeugung des sekundären Kathodenstrahles in P_2 im wesentlichen inverse Prozesse seien.

Die Konstitution der Strahlung scheint also eine andere zu sein, als unsere Undulationstheorie folgern läßt. Wichtige Anhaltspunkte hierüber hat die Theorie der Temperaturstrahlung geliefert, und zwar zuerst und in erster Linie diejenige Theorie, durch welche Herr Planck seine Strahlungsformel begründet hat. Da ich diese Theorie wohl nicht als allgemein bekannt voraussetzen darf, will ich das Notwendigste über dieselbe kurz angeben.

Im Innern eines Hohlraumes von der Temperatur T befindet sich Strahlung von bestimmter,

von der Natur des Körpers unabhängiger Zusammensetzung. Pro Volumeneinheit ist in dem Hohlraum die Strahlungsmenge $\rho d\nu$ vorhanden, deren Frequenz zwischen ν und $\nu + d\nu$ liegt. Das Problem besteht darin, daß ρ in Funktion von ν und T gesucht wird. Befindet sich in dem Hohlraum ein elektrischer Resonator von der Eigenfrequenz ν_0 und geringer Dämpfung, so erlaubt die elektromagnetische Theorie der Strahlung, das zeitliche Mittel der Energie (\bar{E}) des Resonators in Funktion von $\rho(\nu_0)$ zu berechnen. Das Problem ist dadurch auf dasjenige reduziert, \bar{E} in Funktion der Temperatur zu ermitteln. Das letztere Problem läßt sich aber wieder auf das folgende reduzieren. Es seien in dem Hohlraum sehr viele (N) Resonatoren von der Frequenz ν_0 vorhanden. Wie hängt die Entropie dieses Resonatorensystems von dessen Energie ab?

Um diese Frage zu lösen, wendet Herr Planck die allgemeine Beziehung zwischen Entropie und Zustandswahrscheinlichkeit an, wie sie von Boltzmann aus seinen gastheoretischen Untersuchungen gefolgert worden ist. Es ist allgemein

$$\text{Entropie} = k \cdot \log W,$$

wobei k eine universelle Konstante und W die Wahrscheinlichkeit des ins Auge gefaßten Zustandes bedeutet. Diese Wahrscheinlichkeit wird gemessen durch die „Anzahl der Komplexionen“, eine Zahl, die angibt, auf wie viele verschiedene Weisen der ins Auge gefaßte Zustand sich realisieren läßt. Im Falle der obigen Fragestellung ist der Zustand des Resonatorensystems durch die Gesamtenergie desselben definiert, so daß die zu lösende Frage lautet: Auf wie viele verschiedene Arten kann die gegebene Gesamtenergie unter die N Resonatoren verteilt werden? Um dies zu finden, teilt Herr Planck die gesamte Energie in gleiche Teilchen von bestimmter Größe ϵ . Eine Komplexion wird dadurch bestimmt, daß angegeben wird, wie viele Teilchen ϵ auf jeden Resonator entfallen. Die Anzahl solcher Komplexionen, welche die gegebene Gesamtenergie ergeben, wird bestimmt und gleich W gesetzt.

Herr Planck folgt dann weiter aus dem auf thermodynamischer Grundlage ableitbaren Wienschen Verschiebungsgesetz, daß $\epsilon = h\nu$ gesetzt werden müsse, wobei h eine von ν unabhängige Zahl bedeutet. Er findet so seine mit aller bisherigen Erfahrung übereinstimmende Strahlungsformel

$$\rho = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}.$$

Es könnte scheinen, daß gemäß dieser Ableitung die Plancksche Strahlungsformel als eine Konsequenz der heutigen elektromagneti-

schen Theorie der Strahlung anzusehen sei. Dies ist jedoch insbesondere aus folgendem Grunde nicht der Fall. Man könnte die Anzahl der Komplexionen, von welcher soeben die Rede war, nur dann als einen Ausdruck für die Mannigfaltigkeit der Verteilungsmöglichkeiten für die Gesamtenergie unter die N Resonatoren ansehen, wenn jede denkbare Verteilung der Energie wenigstens mit gewisser Annäherung unter den zur Berechnung von W benutzten Komplexionen vorkäme. Hierfür ist notwendig, daß für alle ν , denen eine merkbare Energiedichte ρ entspricht, das Energiequantum ϵ klein sei gegenüber der mittleren Resonatorenergie \bar{E} . Nun findet man aber durch einfache Rechnung, daß $\epsilon \bar{E}$ für die Wellenlänge $0,5 \mu$ und eine absolute Temperatur $T = 1700$ nicht nur nicht klein gegen 1, sondern sogar sehr groß gegen 1 ist. Es hat den Wert etwa $6,5 \cdot 10^7$. Es wird also bei dem gegebenen Zahlenbeispiel bei der Zählung der Komplexionen so verfahren, wie wenn die Energie des Resonators nur den Wert Null, das $6,5 \cdot 10^7$ fache seines mittleren Energiewertes oder ein Vielfaches davon anzunehmen vermöchte. Es ist klar, daß bei dieser Art des Vorgehens nur ein ganz verschwindend kleiner Teil derjenigen Verteilungen der Energie, welche wir nach den Grundlagen der Theorie als möglich ansehen müssen, zur Berechnung der Entropie herangezogen wird. Die Anzahl dieser Komplexionen ist also nach den Grundlagen der Theorie kein Ausdruck für die Wahrscheinlichkeit des Zustandes im Boltzmannschen Sinne. Die Plancksche Theorie annehmen heißt nach meiner Meinung geradezu die Grundlagen unserer Strahlungstheorie verwerfen.

Daß unsere jetzigen Grundlagen der Strahlungstheorie verlassen werden müssen, habe ich schon vorher zu zeigen versucht. Jedenfalls kann man nicht daran denken, die Plancksche Theorie zu refüsieren, weil sie zu jenen Grundlagen nicht paßt. Diese Theorie hat zu einer Bestimmung der Elementarquanta geführt, welche durch die neuesten Messungen dieser Größen auf Grund der Zählung der α -Teilchen glänzend bestätigt worden ist. Für das Elementarquantum der Elektrizität erhielten Rutherford und Geiger im Mittel den Wert $4,65 \cdot 10^{-10}$, Regener $4,79 \cdot 10^{-10}$, während Herr Planck mit Hilfe seiner Strahlungstheorie aus den Konstanten der Strahlungsformel den dazwischen liegenden Wert $4,69 \cdot 10^{-10}$ ermittelte.

Die Plancksche Theorie führt auf folgende Vermutung. Wenn es wirklich wahr ist, daß ein Strahlungsresonator nur solche Energiewerte aufzunehmen vermag, welche Vielfache von $h\nu$ sind, so liegt die Annahme nahe, daß Emission und Absorption von Strahlung überhaupt

nur in Quanten von dieser Energiegröße stattfindet. Auf Grund dieser Hypothese, der Lichtquantenhypothese, kann man die oben aufgeworfenen, die Absorption und Emission von Strahlung betreffenden Fragen beantworten. Soweit unsere Kenntnisse reichen, werden auch die Folgerungen quantitativen Inhaltes dieser Lichtquantenhypothese bestätigt. Es erhebt sich nun folgende Frage. Wäre es nicht denkbar, daß zwar die von Planck gegebene Strahlungsformel richtig wäre, daß aber eine Ableitung derselben gegeben werden könnte, die nicht auf einer so ungeheuerlich erscheinenden Annahme beruht wie die Plancksche Theorie? Wäre es nicht möglich, die Lichtquantenhypothese durch eine andere Annahme zu ersetzen, mit welcher man ebenso den bekannten Erscheinungen gerecht werden könnte? Wenn es nötig ist, die Elemente der Theorie zu modifizieren, könnte man nicht wenigstens die Gleichungen der Ausbreitung der Strahlung beibehalten und nur die Elementarvorgänge der Emission und Absorption anders auffassen als bisher?

Um uns hierüber klar zu werden, wollen wir versuchen, in umgekehrter Richtung vorzugehen wie Herr Planck in seiner Strahlungstheorie. Wir sehen die Plancksche Strahlungsformel als richtig an und fragen uns, ob aus ihr etwas gefolgert werden kann bezüglich der Konstitution der Strahlung. Von zwei Betrachtungen, die ich in diesem Sinne ausgeführt habe, will ich Ihnen nur eine hier skizzieren, die mir wegen ihrer Anschaulichkeit besonders überzeugend erscheint.

In einem Hohlraume befindet sich ein ideales Gas sowie eine Platte aus fester Substanz, welche lediglich senkrecht zu ihrer Ebene frei beweglich sei. Infolge der Unregelmäßigkeit der Zusammenstöße zwischen Gasmolekülen und Platte wird letztere in Bewegung geraten, und zwar derart, daß ihre mittlere kinetische Energie gleich ist dem dritten Teil der mittleren kinetischen Energie eines einatomigen Gasmoleküls. Es ist dies eine Folgerung aus der statistischen Mechanik. Wir nehmen nun an, daß außer dem Gas, welches wir uns als aus wenigen Molekülen bestehend denken können, in dem Hohlraume Strahlung vorhanden ist, und zwar sei diese Strahlung sogenannte Temperaturstrahlung von der nämlichen Temperatur wie das Gas. Dies wird der Fall sein, wenn die Wände des Hohlraumes die bestimmte Temperatur T besitzen, für Strahlung nicht durchlässig und gegen den Hohlraum hin nicht überall vollkommen reflektierend sind. Wir nehmen ferner vorläufig an, daß unsere Platte auf beiden Seiten vollkommen reflektierend sei. Bei dieser Sachlage wird nicht nur das Gas, sondern auch die Strahlung auf die Platte einwirken.

Die Strahlung wird nämlich auf beide Seiten der Platte einen Druck ausüben. Die auf die beiden Seiten wirkenden Druckkräfte sind einander gleich, wenn die Platte ruht. Ist sie aber bewegt, so wird an der bei der Bewegung vorangehenden Fläche (Vorderfläche) mehr Strahlung reflektiert als an der Rückfläche. Die auf die Vorderfläche nach rückwärts wirkende Druckkraft ist also größer als die auf die Rückfläche wirkende Druckkraft. Es bleibt also als Resultierende der beiden eine Kraft übrig, welche der Bewegung der Platte entgegenwirkt und mit der Geschwindigkeit der Platte wächst. Wir wollen diese Resultierende kurz „Strahlungsreibung“ nennen.

Nehmen wir nun für einen Augenblick an, wir hätten damit die ganze mechanische Einwirkung der Strahlung auf die Platte berücksichtigt, so gelangen wir zu folgender Auffassung. Durch Zusammenstöße mit Gasmolekülen werden der Platte in unregelmäßigen Intervallen Impulse unregelmäßiger Richtung erteilt. Die Geschwindigkeit der Platte zwischen zwei solchen Stößen nimmt infolge der Strahlungsreibung stets ab, wobei kinetische Energie der Platte in Strahlungsenergie verwandelt wird. Die Konsequenz wäre die, daß unausgesetzt Energie der Gasmoleküle durch die Platte in Energie der Strahlung verwandelt wird, so lange, bis alle vorhandene Energie in Energie der Strahlung übergegangen ist. Es gäbe also kein Temperaturgleichgewicht zwischen Gas und Strahlung.

Diese Betrachtung ist deshalb fehlerhaft, weil man die von der Strahlung auf die Platte ausgeübten Druckkräfte ebensowenig als zeitlich konstant und als frei von unregelmäßigen Schwankungen ansehen darf wie die vom Gase auf die Platte ausgeübten Druckkräfte. Jene Schwankungen der Druckkräfte der Strahlung müssen nun, damit thermisches Gleichgewicht möglich sei, so beschaffen sein, daß sie im Mittel die Geschwindigkeitsverluste der Platte durch Strahlungsreibung kompensieren, wobei die mittlere kinetische Energie der Platte gleich ist dem dritten Teil der mittleren kinetischen Energie eines einatomigen Gasmoleküls. Wenn das Strahlungsgesetz bekannt ist, so kann man die Strahlungsreibung berechnen, und hieraus die mittlere Größe der Impulse, welche die Platte infolge der Schwankungen des Strahlungsdruckes erhalten muß, damit statistisches Gleichgewicht bestehen könne.

Noch interessanter wird die Betrachtung dadurch, daß man die Platte so wählt, daß sie nur Strahlung von dem Frequenzbereich $d\nu$ vollkommen reflektiert, Strahlung anderer Frequenz aber ohne Absorption durchläßt; man erhält dann die Schwankungen des Strahlungsdruckes der Strahlung vom Frequenzbereich $d\nu$,

Für diesen Fall will ich nun das Resultat der Rechnung angeben. Bezeichnet man mit A die Bewegungsgröße, welche in der Zeit τ infolge der unregelmäßigen Schwankungen des Strahlungsdruckes auf die Platte übertragen wird, so erhält man für den Mittelwert des Quadrates von A den Ausdruck:

$$\overline{A^2} = \frac{1}{c} \left[h \rho \nu + \frac{c^3 \rho^2}{8 \pi \nu^2} \right] d\nu f \tau.$$

Zunächst fällt die Einfachheit dieses Ausdruckes auf; es dürfte keine mit der Erfahrung innerhalb der Grenzen der Beobachtungsfehler übereinstimmende Strahlungsformel geben, welche einen so einfachen Ausdruck für die statistischen Eigenschaften des Strahlungsdruckes liefert wie die Plancksche.

Zur Interpretation ist zunächst zu bemerken, daß der Ausdruck für das mittlere Schwankungsquadrat eine Summe von zwei Termen ist. Es ist also so, wie wenn zwei voneinander unabhängige verschiedene Ursachen vorhanden wären, welche ein Schwanken des Strahlungsdruckes verursachen. Daraus, daß $\overline{A^2}$ proportional f ist, schließt man, daß die Druckschwankungen für nebeneinander liegende Teile der Platte, deren Linearabmessungen groß sind gegen die Wellenlänge der Reflexionsfrequenz, voneinander unabhängige Ereignisse sind.

Die Undulationstheorie liefert nun nur für das zweite Glied des für $\overline{A^2}$ gefundenen Ausdruckes eine Erklärung. Nach der Undulationstheorie müssen nämlich Strahlenbündel von wenig verschiedener Richtung, wenig verschiedener Frequenz und wenig verschiedenem Polarisationszustand miteinander interferieren, und es muß der Gesamtheit dieser in ungeordnetster Weise eintretenden Interferenzen ein Schwanken des Strahlungsdruckes entsprechen. Daß diese Schwankung durch einen Ausdruck von der Gestalt des zweiten Gliedes unserer Formel sein muß, läßt sich durch eine einfache Dimensional Betrachtung einsehen. Man sieht, daß die Undulationsstruktur der Strahlung in der Tat zu den aus ihr zu erwartenden Schwankungen des Strahlungsdruckes Veranlassung gibt.

Wie ist aber das erste Glied der Formel zu erklären? Dieses ist keineswegs zu vernachlässigen, sondern ist im Gültigkeitsbereich des sogenannten Wienschen Strahlungsgesetzes sozusagen allein maßgebend. So ist für $\lambda = 0,5 \mu$ und $T = 1700$ dieses Glied etwa $6,5 \cdot 10^7$ mal größer als das zweite. Bestände die Strahlung aus sehr wenig ausgedehnten Komplexen von der Energie $h\nu$, welche sich unabhängig voneinander durch den Raum bewegen und unabhängig voneinander reflektiert werden — eine Vorstellung, welche die roheste Veranschaulichung der Lichtquantenhypothese darstellt —, so würden infolge Schwankungen des Strahlungs-

druckes derartige Impulse auf unsere Platte wirken, wie sie durch das erste Glied unserer Formel allein dargestellt werden.

Nach meiner Meinung muß also aus obiger Formel, welche ihrerseits eine Konsequenz aus der Planckschen Strahlungsformel ist, folgendes geschlossen werden. Außer den räumlichen Ungleichmäßigkeiten in der Verteilung der Bewegungsgröße der Strahlung, die aus der Undulationstheorie hervorgehen, sind noch andere Ungleichmäßigkeiten in der räumlichen Verteilung der Bewegungsgröße vorhanden, welche bei geringer Energiedichte der Strahlung die erstgenannten Ungleichmäßigkeiten an Einfluß weit überragen. Ich füge hinzu, daß eine andere Betrachtung bezüglich der räumlichen Verteilung der Energie ganz entsprechende Resultate liefert, wie die im vorstehenden angedeutete bezüglich der räumlichen Verteilung der Bewegungsgröße.

Soviel mir bekannt ist, ist die Aufstellung einer mathematischen Theorie der Strahlung, welche der Undulationsstruktur und der aus dem ersten Glied der obigen Formel zu folgender Struktur (Quantenstruktur) zusammen gerecht wird, noch nicht gelungen. Die Schwierigkeit liegt hauptsächlich darin, daß die Schwingungseigenschaften der Strahlung, wie sie durch obige Formel ausgedrückt werden, wenig formale Anhaltspunkte für die Aufstellung einer Theorie bieten. Man denke sich, es wären die Beugungs- und Interferenzerscheinungen noch unbekannt, aber man wüßte, daß die mittlere Größe der unregelmäßigen Schwankungen des Strahlungsdruckes durch das zweite Glied der obigen Gleichung bestimmt sei, wobei ν ein die Farbe bestimmender Parameter unbekannter Bedeutung ist. Wer hätte genug Phantasie, um auf dieser Grundlage die Undulationstheorie des Lichtes aufzubauen?

Immerhin erscheint mir vorderhand die Auffassung die natürlichste, daß das Auftreten der elektromagnetischen Felder des Lichtes ebenso an singuläre Punkte gebunden sei wie das Auftreten elektrostatischer Felder nach der Elektronentheorie. Es ist nicht ausgeschlossen, daß in einer solchen Theorie die ganze Energie des elektromagnetischen Feldes als in diesen Singularitäten lokalisiert angesehen werden könnte, ganz wie bei der alten Fernwirkungstheorie. Ich denke mir etwa jeden solchen singulären Punkt von einem Kraftfeld umgeben, das im wesentlichen den Charakter einer ebenen Welle besitzt, und dessen Amplitude mit der Entfernung vom singulären Punkte abnimmt. Sind solcher Singularitäten viele in Abständen vorhanden, die klein sind gegenüber den Abmessungen des Kraftfeldes eines singulären Punktes, so werden die Kraftfelder sich über-

einanderlagern und in ihrer Gesamtheit ein undulatorisches Kraftfeld ergeben, das sich von einem undulatorischen Felde im Sinne der gegenwärtigen elektromagnetischen Lichttheorie vielleicht nur wenig unterscheidet. Daß einem derartigen Bilde, solange dasselbe nicht zu einer exakten Theorie führt, kein Wert beizumessen ist, braucht wohl nicht besonders hervorgehoben zu werden. Ich wollte durch dasselbe nur kurz veranschaulichen, daß die beiden Struktureigenschaften (Undulationsstruktur und Quantenstruktur), welche gemäß der Planckschen Formel beide der Strahlung zukommen sollen, nicht als miteinander unvereinbar anzusehen sind.

(Eingegangen 14. Oktober 1909.)

Diskussion.

Planck: Wenn ich mir erlaube, einige Worte zu dem Vortrage zu bemerken, so kann ich mich zunächst nur dem Danke der ganzen Versammlung anschließen, welche mit größtem Interesse das, was Herr Einstein vorgebracht hat, angehört hat und auch da, wo vielleicht ein Widerspruch auftauchte, zu weiterem Nachdenken angeregt wurde. Ich werde mich naturgemäß auf das beschränken, worin ich anderer Meinung bin als der Vortragende. Das meiste, was der Vortragende ausgeführt hat, wird ja nicht auf Widerspruch stoßen. Auch ich betone die Notwendigkeit der Einführung von gewissen Quanten. Wir kommen mit der ganzen Strahlungstheorie nicht weiter, ohne daß wir die Energie in gewissem Sinne in Quanten teilen, die als Wirkungsatome zu denken sind. Es fragt sich nun, wo man diese Quanten suchen soll. Nach den letzten Ausführungen von Herrn Einstein wäre es notwendig, die freie Strahlung im Vakuum, also die Lichtwellen selber, als atomistisch konstituiert anzunehmen, mithin die Maxwellschen Gleichungen aufzugeben. Das scheint mir ein Schritt, der in meiner Auffassung noch nicht als notwendig geboten ist. Ich will nicht ins einzelne eingehen, sondern nur folgendes bemerken. In der letzten Betrachtung des Herrn Einstein wird von der Bewegung der Materie auf die Schwankungen der freien Strahlung im reinen Vakuum geschlossen. Dieser Schluß scheint mir nur dann ganz einwurfsfrei, wenn man die Wechselwirkungen zwischen der Strahlung im Vakuum und der Bewegung der Materie vollständig kennt; wenn das nicht der Fall ist, fehlt die Brücke, die notwendig ist, um von der Bewegung des Spiegels auf die Intensität der auffallenden Strahlung überzugehen. Nun scheint mir diese Wechselwirkung zwischen freier elektrischer Energie im Vakuum und der Bewegung der Atome der Materie doch sehr wenig bekannt zu sein. Sie beruht im wesent-

lichen auf Emission und Absorption des Lichtes. Auch der Strahlungsdruck besteht im wesentlichen darin, wenigstens nach der allgemein als gültig angenommenen Dispersionstheorie, welche auch die Reflexion auf Absorption und Emission zurückführt. Nun ist gerade die Emission und die Absorption der dunkle Punkt, über den wir sehr wenig wissen. Über die Absorption wissen wir vielleicht noch eher etwas, aber wie steht es mit der Emission? Man stellt sie sich vor als hervorgebracht durch Beschleunigung von Elektronen. Aber dieser Punkt ist der schwächste der ganzen Elektronentheorie. Man stellt sich vor, das Elektron besitzt ein bestimmtes Volumen und eine bestimmte endliche Ladungsdichte, sei es räumliche oder flächenhafte Ladung, ohne das kommt man nicht aus; das widerspricht aber wieder im gewissen Sinne der atomistischen Auffassung der Elektrizität. Das sind nicht Unmöglichkeiten, aber Schwierigkeiten, und ich wundere mich fast, daß sich nicht mehr Widerspruch dagegen erhoben hat.

An diesem Punkt kann, glaube ich, mit Nutzen die Quantentheorie einsetzen. Wir können nur für große Zeiten die Gesetze aussprechen. Aber für kleine Zeiten und für große Beschleunigungen steht man einstweilen noch vor einer Lücke, deren Ausfüllung neue Hypothesen erfordert. Vielleicht darf man annehmen, daß ein schwingender Resonator nicht eine stetig veränderliche Energie besitzt, sondern daß seine Energie ein einfaches Vielfaches eines Elementarquantums ist. Ich glaube, wenn man diesen Satz benutzt, kann man zu einer befriedigenden Strahlungstheorie kommen. Nun ist die Frage immer: wie stellt man sich so etwas vor? Daß heißt, man verlangt ein mechanisches oder elektrodynamisches Modell eines solchen Resonators. Aber in der Mechanik und in der jetzigen Elektrodynamik haben wir keine diskreten Wirkungselemente und daher können wir auch ein mechanisches oder elektrodynamisches Modell nicht herstellen. Mechanisch erscheint das also unmöglich, und man wird sich daran gewöhnen müssen. Auch unsere Versuche, den Lichtäther mechanisch darzustellen, sind ja vollständig gescheitert. Auch den elektrischen Strom hat man sich mechanisch vorstellen wollen und hat an den Vergleich mit einer Wasserströmung gedacht, aber auch das hat man aufgeben müssen, und wie man sich hieran gewöhnt hat, wird man sich auch an einen solchen Resonator gewöhnen müssen. Selbstverständlich müßte diese Theorie noch viel weiter im einzelnen ausgearbeitet werden als bisher geschehen; vielleicht ist da ein anderer glücklicher als ich.